

# 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

持続可能な開発における  
再生可能エネルギー（仮訳）

# 9

## 持続可能な開発における再生 可能エネルギー（仮訳）

### 統括執筆責任者:

Jayant Sathaye (USA), Oswaldo Lucon (Brazil), Atiq Rahman (Bangladesh)

### 執筆責任者:

John Christensen (Denmark), Fatima Denton (Senegal/Gambia), Junichi Fujino (Japan), Garvin Heath (USA), Monirul Mirza (Canada/Bangladesh), Hugh Rudnick (Chile), August Schlaepfer (Germany/Australia), Andrey Shmakin (Russia)

### 執筆協力者:

Gerhard Angerer (Germany), Christian Bauer (Switzerland/Austria), Morgan Bazilian (Austria/USA), Robert Brecha (Germany/USA), Peter Burgherr (Switzerland), Leon Clarke (USA), Felix Creutzig (Germany), James Edmonds (USA), Christian Hagelüken (Germany), Gerrit Hansen (Germany), Nathan Hultman (USA), Michael Jakob (Germany), Susanne Kadner (Germany), Manfred Lenzen (Australia/Germany), Jordan Macknick (USA), Eric Masanet (USA), Yu Nagai (Austria/Japan), Anne Olhoff (USA/Denmark), Karen Olsen (Denmark), Michael Pahle (Germany), Ari Rabl (France), Richard Richels (USA), Joyashree Roy (India), Christoph von Stechow (Germany), Jan Steckel (Germany), Ethan Warner (USA), Tom Wilbanks (USA), Yimin Zhang (USA)

### 査読編集者:

Volodymyr Demkine (Kenya/Ukraine), Ismail Elgizouli (Sudan), Jeffrey Logan (USA)

### 顧問:

Susanne Kadner (Germany)

### 本章の引用時の表記方法:

Sathaye, J., O. Lucon, A. Rahman, J. Christensen, F. Denton, J. Fujino, G. Heath, S. Kadner, M. Mirza, H. Rudnick, A. Schlaepfer, A. Shmakin, 2011: Renewable Energy in the Context of Sustainable Energy. 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も責任を負いかねますのでご了承ください。

## 第9章: 持続可能な開発における再生可能エネルギー

### 目次

目次	3
要約	4
9.1 序論	6
9.1.1 持続可能な開発の概念	6
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	7
9.2.1 第9章の枠組みと本報告書の他章とのつながり	7
9.2.2 再生可能エネルギー及び持続可能な開発の指標に対する持続可能な開発の目標	9
9.3 社会、環境、経済的な影響: 世界及び地域の評価	11
9.3.1 社会及び経済の発展	11
9.3.1.1 エネルギーと経済成長	12
9.3.1.2 人間開発指数とエネルギー	14
9.3.1.3 雇用創出	14
9.3.1.4 再生可能エネルギーへの財政支援	15
9.3.2 エネルギーアクセス	15
9.3.3 エネルギー安全保障	20
9.3.3.1 資源の利用可能性及び分布	20
9.3.3.2 エネルギー供給の変動性及び信頼性	24
9.3.4 気候変動の緩和と環境、健康への影響の軽減	25
9.3.4.1 気候変動	28
9.3.4.2 地域の大气汚染	34
9.3.4.3 健康への影響	38
9.3.4.4 水	39
9.3.4.5 土地利用	42
9.3.4.6 生態系及び生物多様性への影響	43
9.3.4.7 事故及びリスク	45
9.4 再生可能エネルギーの(持続可能な)開発の道筋の示唆	47
9.4.1 社会及び経済の発展	48
9.4.1.1 将来のシナリオにおける社会及び経済の発展	49
9.4.1.2 調査のギャップ	50
9.4.2 エネルギーのアクセス	51
9.4.2.1 将来のシナリオにおけるエネルギーのアクセス	51
9.4.2.2 調査のギャップ	52
9.4.3 エネルギー安全保障	53
9.4.3.1 将来のシナリオにおけるエネルギー安全保障	53
9.4.3.2 調査のギャップ	56
9.4.4 気候変動の緩和と環境、健康への影響の低減	56
9.4.4.1 将来のシナリオにおける環境、健康への影響	56
9.4.4.2 調査のギャップ	57
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	57
9.5.1 障壁	58
9.5.1.1 社会文化的な障壁	58
9.5.1.2 情報・意識啓発上の障壁	59
9.5.1.3 市場の失敗及び経済的障壁	60
9.5.2 機会	61
9.5.2.1 持続可能な開発に関する国際的戦略と国家戦略	61
9.5.2.2 地域、民間、及び非政府の持続可能な開発の取り組み	65
9.6 統合	65
9.6.1 再生可能エネルギー源の理論上のコンセプト及び方法論的なツール	66
9.6.2 社会経済の発展	66
9.6.3 エネルギーアクセス	67
9.6.4 エネルギー安全保障	67
9.6.5 気候変動緩和と環境及び健康への影響の軽減	67
9.6.6 結論	68
9.7 知見のギャップと将来の研究ニーズ	69
REFERENCES	71

## 要約

歴史的に見て、経済発展はエネルギー消費量の増加と温室効果ガス (GHG) 排出量の伸びと強い相関関係にある。再生可能エネルギー (RE) は、持続可能な開発 (SD) に貢献し、この相関関係を解消する手助けとなりうる。また、再生可能エネルギーは社会の最貧層が現代的なエネルギーサービスを利用出来る機会を与える。このことは、8つのミレニアム開発目標 (MDGs) のいずれの達成においても重要なものである。

持続可能な開発の理論上の概念は、持続可能な開発と再生可能エネルギーの間の相互作用の評価に役に立つ枠組みを示すことが出来る。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Ⅲ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。

再生可能エネルギーと持続可能な開発の関係は、世界的、地域的に考慮した目標と制約の積み重ね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再生可能エネルギーは貢献出来る。危機的な人為的気候変動を緩和することは、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。本章では、これら4つの持続可能な開発の目標と再生可能エネルギーの関係、同時に化石燃料及び原子力エネルギー技術に関する科学的文献についてまとめる。これらの評価は、帰属的ライフサイクル評価 (LCA) またはエネルギー統計に基づくボトムアップ指標、動的な統合モデル指標及び質的分析など、様々な方法論に基づいて行われる。

国の発展段階が異なると、再生可能エネルギーを進めるための動機や社会経済に関する持続可能な開発の目標が異なる。特に先進工業国においては、雇用機会の創出及び経済の構造的変化の積極的な促進は、再生可能エネルギーの促進を支援する目的となっている。しかし、関連するコストは、増加するエネルギー需要を満たすのに再生可能エネルギーが望ましいかどうかを判断する主たる要素となってしまう。また、エネルギー価格の上昇が工業的途上国の開発の見通しを阻害する可能性があるという懸念が指摘されている。これは、国際的な負担分担体制について同時進行で詳細に議論を行う必要があることを強調している。今のところ、再生可能エネルギーをベースとする分散型送電系統は拡張されてきており、すでに発展途上国においてエネルギーアクセスが向上してきている。有利な状況下では、非再生可能エネルギーの利用に比べコストが低く抑えられており、特に、集中型エネルギーへのアクセスができない遠隔地や貧しい農漁山村においてそれが見られる。また、発電以外への再生可能エネルギー技術は、たとえば温水及び穀物乾燥への太陽エネルギーの利用、交通機関へのバイオ燃料の利用、冷暖房、調理、照明へのバイオガス及び近代的バイオマスの利用、揚水への風力の利用など、エネルギーのサービスを近代化させる機会を提供している。再生可能エネルギーの普及は、エネルギー資源の多様化、限られた数の供給者への依存度減少、価格変動に伴う経済的な脆弱性の減少により、エネルギーの安全保障に貢献することが出来る。多くの発展途上国は、その国のエネルギー安全保障の定義に地域の供給安定性及び信頼性も含めており、エネルギーアクセスとエネルギー安全保障上の課題を特に関連させている。

エネルギーシステムから環境への影響を軽減するという持続可能な開発の目標を支援することにおいて、再生可能エネルギー技術は、特に温室効果ガス排出に関しては、化石燃料と比べて重要な便益をもたらしている。これらの便益を最大に出来るかどうかは、各再生可能エネルギー・プロジェクトに関する特定の技術、管理及び立地特性、特に土地利用変化 (LUC) の影響に関する特性に依存することが多い。発電のライフサイクル評価は、再生可能エネルギーによる温室効果ガス排出量が、一般に化石燃料を選択した場合の温室効果ガス排出量よりも大幅に低く、また、様々な条件下で、二酸化炭素回収・貯留 (CCS) を用いる化石燃料の場合よりも低いことを示している。集光型太陽熱発電 (CSP)、地熱、水力、潮力及び風力における温室効果ガス排出量の推計は、最大でも 100g CO<sub>2</sub>eq/kWh 以下であり、すべての再生可能エネルギーの中間値は、4~46g CO<sub>2</sub>eq/kWh の範囲となる。しかし、バイオエネルギー生産の温室効果ガスの収支は、主に土地管理及び土地利用変化において、不確実性が大きい。土地利用変化を除き、多くのバイオエネルギーシステムでは、化石燃料システムと比べ、温室効果ガス排出量が減少しており、埋め立て処分や副産物の残渣物や廃棄物からの温室効果ガス排出の抑制につながる可能性がある。また、バイオエネルギーと二酸化炭素回収・貯留を組み合わせることにより、さらに削減出来る可能性がある。輸送燃料において、いくつかの第一世代のバイオ燃料は比較的低程度ではあるが、温室効果ガス緩和ポテンシャルをもたらすものもある。一方で、多くの次世代バイオ燃料では、気候に与える便益はより大きいと考えられる。バイオエネルギー生産からの便益を最適化するには、不確実性を減らし、バイオエネルギーによる土地利用変化のリスクを軽減する方法

を検討することが重要である。

再生可能エネルギーは、大気汚染及び健康に関する便益ももたらすことが出来る。非燃焼系の再生可能エネルギー発電技術は、化石燃料をベースとする発電と比較して地域での大気汚染を大幅に減らし、関連する健康への影響を低減する可能性がある。しかし、水及び生物多様性への影響は、地域の状況による。水不足が既に懸案事項になっている地域においては、非火力利用の再生可能エネルギー技術または乾式冷却を用いる熱利用の再生可能エネルギー技術は、水資源へ新たな負担を与えずにエネルギーのサービスを提供出来る。従来の水冷式火力発電は、特に水不足や気候変動に対し脆弱なことがある。水力及び一部のバイオエネルギーシステムは、水の供給力にかかっており、競争力が激化するか、水不足緩和のいずれかが発生する。生物多様性に対する再生可能エネルギー特有の影響は、いいものも悪いものもある。これらの影響の程度は、場所により異なる。再生可能エネルギー技術の事故リスクは無視できないものであるが、再生可能エネルギー技術に多く見られる分散型の構造は、災害における悲惨な状況の可能性を著しく抑える。しかし、一部の水力発電プロジェクトに関係するダムは、場所により異なる要因によって特定のリスクを生み出す可能性がある。

再生可能エネルギー普及に向けた世界規模の温暖化緩和の経路について記述するシナリオの文献は、関連する持続可能な開発の予測される影響にいくつかの見識を与えることが出来る。将来のGHG排出量に上限を設けることは、気候変動の影響のコストを考慮しなければ、福祉の効用を減少させる（通常、これは国内総生産または先立つ消費によって不可避免的に測定される）。このような福祉の損失は緩和技術の可用性及びコストについての仮定に基づいており、温室効果ガスを抑制する技術的な代替手段、たとえば再生可能エネルギー技術の可用性が制限される場合に上昇する。シナリオ分析は、再生可能エネルギー生産の拡大の多くは発展途上国にて見られる可能性が高いとしている。たとえば伝統的バイオマスから近代的エネルギーへの移行は、単に化石燃料への移行となりうるため、エネルギーアクセスの増加は持続可能な開発のすべての面にとって必ずしも有益とは言えない。近代的エネルギーのサービスへのアクセスを可能にする再生可能エネルギーへの強制的な移行は、家計にマイナスの影響を与える可能性があるにもかかわらず、一般に、利用可能なシナリオ分析では、増加するエネルギーアクセスに対する政策及び財政支援の役割を強調している。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寄与する範囲で、エネルギーシステムが（突然の）エネルギー供給分断からの影響を受けにくくすることで、再生可能エネルギーの普及はエネルギー安全保障を高める可能性がある。シナリオでは、この再生可能エネルギーの役割はエネルギー形態によって変化するとしている。適切な炭素緩和政策が整えば、建築及び産業部門において集中的に使用されてますます不足していく化石燃料と置き換わるポテンシャルを持つ再生可能エネルギーを利用して、発電は比較的容易に脱炭素が可能である。対照的に、輸送部門では、技術的なブレークスルーが行われない限り液体燃料の需要が非弾力的なままである。そのため、石油及びエネルギー安全保障に関する懸案事項は、引き続き将来の世界のエネルギーシステムで重要な意味をもつ可能性が高い。これは、現在と比較して、発展途上国でより顕著に見られることとなるだろう。エネルギーシステムからの環境及び健康への影響を考慮するため、いくつかのモデルでは硫酸塩汚染のような明白な影響を含めている。一部のシナリオ結果では、気候政策にて地域の大気汚染（粒子状物質）の改善につながるとしているが、大気汚染抑制政策のみが温室効果ガス排出量の削減を行うわけではないことが示されている。また、別の示唆も提示しており、いくつかの可能性のあるエネルギーの経路では、バイオ燃料生産支援へ土地が流用される可能性があるとしている。シナリオ結果は、気候政策が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得る可能性を指摘している。土地はバイオエネルギー作物栽培へと移行されつつあるが、これは持続可能な開発に対し温室効果ガス排出などの悪影響を与える可能性がある。

様々なレベルでの再生可能エネルギー政策と持続可能な開発の戦略における方策を統合することにより、現存する障壁を克服し、持続可能な開発の目標に沿って再生可能エネルギーを普及させるための支援を可能にする。持続可能な開発において、障壁は再生可能エネルギーの普及を妨害し続ける。市場関連の障壁や経済的な障壁は、社会的及び個人的な価値や基準にも本来関連するため、根源的には再生可能エネルギー及びそれに関連する普及の影響に対する個人、グループ、社会の認識や受入に影響を与えていく。そのため、コミュニケーションに特化した取り組みはあらゆる変革戦略において極めて重要な要素であり、この状況において地域の持続可能な開発の構想は重要な役割を持つ可能性がある。国際的及び国家的レベルにおいて、戦略は次のものを含むべきである。持続可能な開発に対し不利に働く恐れのあるメカニズムの除去、環境的及び社会的な外部性を内在化する持続可能な開発のメカニズム、及びリープフロッグを含む低炭素で環境にやさしい持続可能な開発を支援する再生可能エネルギー戦略。

以上のような評価によって、再生可能エネルギーが様々な程度において持続可能な開発に貢献出来ることが示された。これ以降も、現存する知識の溝を埋めるため、学際的な調査がさらに必要である。環境や健康への影響に関連する便益がさらに明確に現れてくる可能性がある一方で、たとえば社会的及び経済的発展への正確な貢献はより不明瞭である。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を高め、効果的で経済的効率がよく、社会にも受容性のあるエネルギーシステムへの変革とは何であるのかという答えを出すため、様々な（特に異時的、空間的、及び世代内の）持続可能性の次元を反映させて、社会、自然及び経済科学からの見解をはるかに密接に統合（リスク分析手法の採用など）することが必要である。これまでのところ、知識の土台は、調査の特定部分の非常に狭い見解に限定されることが多く、問題の複雑性を完全には考慮していない。

## 9.1 序論

持続可能な開発 (SD) は 1972 年にフネ報告書 (Founex Report) により政治的、公的及び学問的領域にて現れ、1987 年には「ブルントラント報告書」としても知られるブルントラント委員会 (WCED) の報告書「地球の未来を守るために (*Our Common Future*)」により再び提起された。この「再生可能エネルギー資源と気候変動緩和についての特別報告書」は、持続可能な開発は、将来の世代が彼ら自身のニーズを満たすための能力を損なうことなく、現在のニーズを満たすとする、ブルントラントの定義に従っている (WCED, 1987; Bojő et al., 1992)。そのような概念を実行に移す困難さにより、持続可能な開発の多くの競合する枠組みがそれ以降に提案されている (Pezzey, 1992; Hopwood et al., 2005)。本章では、いくつかの持続可能な開発の概念を紹介し、持続可能な開発と再生可能エネルギーの関連性を明らかにし、意思決定の潜在的な重要性を明確にしていく。

持続可能な開発は、1992 年にブラジルのリオデジャネイロで開催され、温室効果ガスの大気濃度を安全と考えられるレベルに安定させようとした、環境と開発に関する国際連合会議 (UNCED) において気候変動と (それ以降は IPCC とも) 強く結びつけられた。結果として、緩和活動の技術及びコストパフォーマンスに注目した IPCC の第 1 次評価報告書をもとに、第 2 次評価報告書では社会的な検討事項に加え公平性の懸案事項が盛り込まれた (IPCC, 1996a)。第 3 次評価報告書では世界的な持続可能性について包括的に取り組み (IPCC, 2007b)、第 4 次評価報告書 (AR4) には気候優先論文及び開発優先論文の両方のレビューに焦点を当てた、第 2 作業部会 (WG) 及び第 3 作業部会の報告書の両方に持続可能な開発についての章を盛り込んだ (IPCC, 2007a,b)。

### 9.1.1 持続可能な開発の概念

従来、持続可能性は経済、環境、及び社会が全て相互に連携し、持続可能性と関わりを持つと考える「3 本柱モデル (three pillar model)」の枠組みに位置づけられていた (BMU, 1998)。3 本柱モデルは、持続可能性の概念的な性質を明確に認識し、持続可能性の問題を図式的に分類することを可能にする。国連総会は、持続可能な開発における相互に依存し補強しあう柱としての 3 つの要素 (経済発展、社会的発展及び環境保護) の一体化を推進する活動を目的としている (UN, 2005a)。この見解は、ある一連の動き (化石燃料を再生可能エネルギー資源に置き換えるなど) が、3 つの開発目標を同時に満たすことが可能という見解に賛同している。3 本柱モデルは、あいまいな分類により明確な基準的概念を薄くし、自然資本保護の必要性を分野間統合の方法的概念に置き換えていると批判されてきた (Brand and Jochum, 2000)。

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 つの両極に位置するパラダイムに沿って方向付けが可能であるとしている。この 2 つのパラダイムでは、自然資本と人為的資本の持続可能性の想定が異なる (Hartwick, 1977; Pearce et al., 1996; Neumayer, 2003)。弱い持続可能性は、代用可能なパラダイムに分類され (Neumayer, 2003)、全体としての資本ストックのみを保全する必要があるとの考え方に基づいている。つまり自然資本は将来の福利を損なうことなく人為的資本と置き換えることが出来るという考えである。このように、弱い持続可能性は新古典派厚生経済学の拡大と解釈することが出来る (Solow, 1974; Hartwick, 1977)。たとえば、再生可能資源や、市場価格により誘発される技術進歩などによって化石燃料のような非再生可能資源は代替可能であるという議論が可能である (Neumayer, 2003)。弱い持続可能性は、環境悪化をより多くの機械、輸送インフラ、教育、情報技術などの人為的資本によって環境悪化を補うことが出来る可能性を示唆する。

弱い持続可能性では、様々な資本形成の可用性の変化に対して経済システムが柔軟に適合することを想定する一方、強い持続可能性では社会や経済の経路に対してガードレールを提案しようとする環境保護の視点が出発点である。強い持続可能性は、自然資本は生産目的または規制・支援・栽培システムの環境整備のどちらとも置き換えることはできないという信念に基づき (Norgaard, 1994)、非代替性パラダイムとみなすことが出来る (Pearce et al., 1996; Neumayer, 2003)。たとえば、温室効果ガスを吸収する大気能力などの限られた吸収源は、強い持続可能性の概念を制限することで、より確保出来る可能性がある (Neumayer, 2003; IPCC, 2007b)。ある重要な解釈においては、(様々な形式の自然資本の間での代替を認めるのではなく、) 特定の非代替的資源 (いわゆる「重要な自然資本」) の物理的貯蔵は、維持されなければならないとされる (Ekins et al., 2003)。持続可能性の範囲内に留まるためのガードレールは、非線形、不連続性、非円滑性及び非凸性により正当化されるか、それらが動機になることが多い (Pearce et al., 1996)。一般的な関連要因として、自然科学者は、特定の転換点、すなわち小さな摂動が地球システムの状態または発展を定性的に変化させる可能性のある臨界閾値について警告及び言及している (Lenton et al., 2008)。予防原理は、自然資本を減少させる行動をしている人々に対して、自然資本の減少が無害であることの立証責任を設定し、ガードレールからの距離を十分にとることを唱えている (Ott, 2003)。

再生可能エネルギーは 3 本柱モデルの開発目標に貢献でき、また弱い持続可能性及び強い持続可能性の両方の条件にて評価可能である。化石燃料やウランなどの非再生可能エネルギー源の消費は、自然資本を直接減少させる。対照的に、再生可能エネルギーは、その資源の利用により将来の潜在的採取量が減少しない限りは自然資本を維持する。

## 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、地域的な考慮を伴う目標と制約の積み重ねと見ることが出来る。本章では、第4次評価報告書の結論と同じく、危機をもたらす人為起源な気候変動に対する緩和を行うことが世界的な再生可能エネルギー技術の利用の増加を後押しする強い原動力の1つとなるというところから始める。気候変動の安定化レベル（たとえば、大気中のGHG濃度の上限が最大550ppmCO<sub>2</sub>eq以下、もしくは産業革命前の全球平均と比較して温度上昇の上限値が2度以下の状態）は受容されており、9.1節で取り上げたとおり、強い持続可能性の原則に対する暗黙の了解がある。

再生可能エネルギーは、多くの温室効果ガス緩和戦略（第10章）において中心的な役割を担うと予想されており、また、すべてのコスト負荷が最小になるように、技術的可能性と経済的効率性が高くなければならない。そのため、技術的可能性及び削減の道筋を最適化するモデルの知識は重要である。しかし、エネルギー技術、経済的コストと便益、及びエネルギー政策は、本報告書の他の章で述べたとおり、それらが組み込まれている社会や自然環境に依存する。したがって、空間的及び文化的変化は、一貫した持続可能な開発への取り組みにおいても1つの重要な因子となる。持続可能性の課題と解決法は、地理的状況（太陽放射など）、社会経済的状況（エネルギー需要の誘発など）、社会内及び社会全体での格差、細分化された制度及び現存するインフラ（送電系統など）によって決定的に異なる（Holling, 1997; NRC, 2000）だけでなく、持続可能性の規範的理解の違いによっても異なる（Lele and Norgaard, 1996）。そのため、分析者は、分析や解決のための戦略の地理的な位置や特定の場所に準じた差別化（e.g., Wilbanks, 2002; Creutzig and Kammen, 2009 など）と、持続可能性に対する認識論的観点及び規範的観点の多元性（Sneddon et al., 2006 など）を求めている。

このような状況は、持続可能な開発の目標全体と整合をとりつつ再生可能エネルギーの普及を確実なものとするために、再生可能エネルギー技術の社会的影響と環境的影響の両方を評価することが必要であることを強調する。たとえば、温室効果ガス排出上昇、森林破壊、他の目的に使用することのできない土地の拘束、水の消費により、再生可能エネルギー技術自体がどの程度環境へ影響を与え、自然資本を減らすのかというような、これらの重要な警告の一部を本章にて取り上げる。弱い持続可能性及び強い持続可能性パラダイムの点から見た、これらの影響の評価は、脱炭素化及びその他の持続可能性の目標の間の潜在的トレードオフを明確にする。

それゆえ、持続可能な開発を確実にを行うための取り組みは、いくつかの緩和への道筋に新たな制約または選定基準を課すことができ、事実上、政策決定者及び市民に対して強制的にトレードオフを認めさせることでもある。エネルギーシステムにおける新たな境界条件それぞれについて、一部の開発の道筋は非持続的であるとして取り除かれ、また、気候緩和について一部の技術的に実現可能なシナリオにおいても、持続可能な開発が重要である場合にはその実現不可能となることがある。しかし、本章で取り上げたとおり、気候緩和シナリオと比較される現状継続（BaU）の軌道も持続可能な開発を達成させるにはおそらく不十分である。

### 9.2.1 第9章の枠組みと本報告書の他章とのつながり

本章では、持続可能な開発の包括的な目標の促進において、再生可能エネルギーが担うことが出来る役割の概要について取り上げる。本報告書の第1章は、再生可能エネルギー技術を紹介し、気候変動緩和と関連づける。第2～7章は特定の再生可能エネルギー技術単独のポテンシャルと影響について評価する。第8章は現在のエネルギーシステムと再生可能資源との統合に焦点を当て、第10章及び11章では再生可能エネルギーや気候緩和の経済的コスト及び便益、さらに再生可能エネルギー政策の経済的コスト及び便益について、それぞれ取り上げる。統合的な章として、本章では、様々なエネルギー技術の持続可能な開発の影響について比較・報告を行い、持続可能な開発に関する再生可能エネルギーの普及に対する障壁またはその機会を取り上げることで、持続可能な開発の観点からの再生可能エネルギーの役割を評価する。図9.1に本報告書の第9章とその他の章とのつながりについて示す。

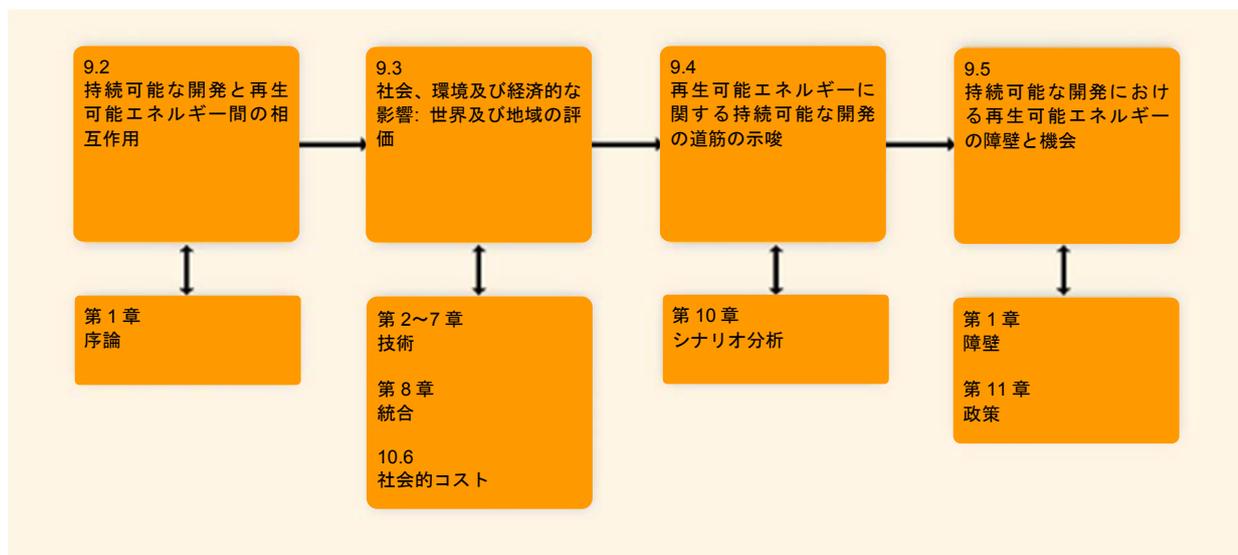


図 9.1: 第 9 章の枠組みと他の章とのつながり

持続可能な再生可能エネルギーの普及の道筋に対する最終的で包括的な評価のために、本章では、本報告書の他の章において取り上げられているように、関連する経済的費用・便益や現在のエネルギー政策を含む各特定のエネルギー技術に関する情報をまとめる必要がある。結果として、再生可能エネルギーの普及に関連する持続可能な開発の機会について、政策決定者に対し道筋とその機会を実現する方法について示す一方で、意図しない副次的悪影響を避けることで、その概要をはっきり示すことができたであろう。しかし、様々な潜在的な機会が多様であり、現在のモデル能力に制約がある状況下では、そのような包括的な統合評価はまだ実用的ではない。本章では、1.4.1 節に概要が示されている明確に定義された以下の一連の機会の評価に焦点をあてる。

- ・社会的・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・健康への影響の低減

これらの一連の発展の機会は、持続可能な開発に貢献するために再生可能エネルギーが達成しなければならない目標とみなすことが出来る。以降の節で取り上げるとおり、再生可能エネルギーは最新のエネルギー技術へのアクセスを増加させることができ、社会的・経済的発展を促進することを可能とする。エネルギーアクセスや社会的・経済的発展のための対策は、たとえば、ジェンダー衡平性やエンパワーメントを含むエネルギー関連の衡平性の課題を重視することで、現在の福祉に関係し、世代間の衡平性や持続可能性にもある程度関係する。エネルギー安全保障、気候変動の緩和、環境影響の低減に対する再生可能エネルギーは、持続可能性に固有である世代間の福祉に関する側面に対して潜在的な貢献があるのは明白である。エネルギーアクセス、社会的・経済的発展、及びエネルギー安全保障の懸案事項は、非常に多くの場合、弱い持続可能性のパラダイムの下で検討されるが、これは、これらの目標間のバランスを踏まえてトレードオフが考慮されるためである。一方、環境への影響は、通常、強い持続可能性のパラダイムの下で評価されるが、これは、変革の道筋に対する制約として理解されることが多いからである。責任ある意思決定を可能にするためには、代替エネルギーシステムの選択がもたらす持続可能な開発の目標に対する結果と起こりうるトレードオフを理解することが極めて重要である。

本章では、これら 4 つの持続可能な開発の目標と再生可能エネルギー間の関係、同時に化石燃料及び原子力エネルギー技術についての科学論文の概要について説明する。将来的に付け加える必要のある持続可能な開発の側面からの見方や潜在的な発展の道筋のより包括的な評価は、量的及び質的な方法で、またより叙述的な方法で概説されている。9.3 節では、現在利用可能なデータ（ライフサイクル評価など）をもとにした静的ボトムアップ指標に注目し、個々の再生可能エネルギー技術及びその他のエネルギー技術の社会経済的影響と環境影響を評価する。9.4 節は、より動的なトップダウン型の統合方式によって、将来の再生可能エネルギーの普及と持続可能な開発の道筋の相互作用の評価することを目的とする。道筋とは、世界規模の様々なエネルギー技術間の複雑な相互関係を対処する試みによるシナリオの結果であるとまずは理解されている。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。持続可能な開発の文脈における再生可能エネルギーの障壁と機会の分析を目的とする 9.5 節にて分析を締めくくる。

結論としては、持続可能な開発の多次元課題の面で、再生可能エネルギーを評価すると、世界中で通用する唯一の答えは存在しないといえる。多くの解決法が、地方、地域的及び文化的状況に強く依存し、また、発展途上国と

先進国では解決法やの手法やそれぞれが重視する内容が恐らく異なる。そのため、本章では再生可能エネルギーを利用する持続可能な開発に対する道筋をはっきりと薦めることはできない。

## 9.2.2 再生可能エネルギー及び持続可能な開発の指標に対する持続可能な開発の目標

エネルギー指標は、持続可能性原則と一貫性をもつエネルギー・サブシステムにて行われる進歩状況を各国が把握する手助けとなる。指標の測定や報告は、持続可能な開発の実施を測定するだけではなく、実施を促し、また、意思決定への波及影響も持つ (Meadows, 1998; Bossel, 1999)。しかし、エネルギーの持続可能性の測定は、様々な概念的及び技術的課題が付随しており (Sathaye et al., 2007)、手法の更新が必要となる (Creutzig and Kammen, 2009)。

過去 20 年にわたり、経済、社会及び環境の幅広いテーマに関連する、持続可能な開発に対する統一された一連のエネルギー指標の開発が進展してきた (Vera and Langlois, 2007)。再生可能エネルギー技術においては、量的指標は電気料金、技術のライフサイクル全体における温室効果ガス排出量、再生可能エネルギー源の利用可能性、エネルギー変換効率、必要な土地及び水消費を含む (Evans et al., 2009)。他の手法では、再生可能エネルギーシステムの性能、正味エネルギー要求量 (net energy requirement)、温室効果ガス排出及びその他の指標を基にした、様々な再生可能エネルギーシステムと比較した性能指数を開発している (Varun et al., 2010)。

普遍的に使用されている国内総生産 (GDP) を超えて経済発展の概念を拡大する必要があるため、持続可能な開発の様々な指標が提案されている。弱い持続可能性の総合指標には、グリーン国民純生産、真の貯蓄量 (Hamilton, 1994; Hamilton and Clemens, 1999; Dasgupta, 2001)、持続可能な経済福祉指標 (ISEW)、真の進歩指標 (GPI) (Daly, 2007 など) などがある。持続可能な経済福祉指標 (ISEW) や真の進歩指標 (GPI) は強い持続可能性の支持者により中間段階として提案されている。特に、後者の 2 つのように国内総生産を拡大した指標は、1970 年代または 80 年代以降、国内総生産から質的に大きく外れる傾向にあり、多くの経済協力開発機構 (OECD) 参加国においてその指標は沈滞している (イギリスにおいては減少している) (Lawn, 2003)。強い持続可能性により一致している指標は、環境収容力・エコロジカルフットプリント・復元力 (Pearce et al., 1996)、持続可能な国民所得・持続可能性のギャップ (Huetting, 1980; Ekins and Simon, 1999) が含まれる。

しかし、経済発展に対する集合指標の使用 (たとえば人間開発指数 (HDI) または持続可能な経済福祉指標 (Fleurbaey, 2009)) は重大な問題を引き起こす。結果の値は不確実性が高いと指標づけられ、また、方法論的及び認識論的見地において疑問視されることが多い (Neumayer, 2003)。集合指標の構成要素の重みづけのための特定の選択に対する厳密な正当化は困難であり、また、多くの指標は代用指標であるため、量的な正確さを伴わない誤ったメッセージを伝える恐れもある。また、複合指標の構成要素のために、信頼性が高く国際的に一貫したデータ系列を獲得するのは困難であることが多い。持続可能性の集合指標は社会的発展や経済的発展の多くの側面を統合するため、再生可能エネルギーの普及によるある特定の持続可能性に対する影響が無視される。持続可能性の評価はよく識別された指標の計器盤を必要とする (Stiglitz et al., 2009)。

9.3 節では、静的ボトムアップ測定の見点で再生可能エネルギーを評価するが、一方でその限界を認識している。9.2.1 節で定義した、持続可能な開発の 4 つの目標は、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するガイドラインとして用いられる。持続可能性は、境界が開かれた概念であり、未知の可能性に対する転向要素 (tipping element) に直面するため、最終段階まで一貫した量的評価の実現は疑わしい。新たな課題が出現したり新たなデータが利用可能になったりした場合に調整される可能性のある量的指標は、既存の文献の評価のための適切な枠組みを表すが、持続可能な開発に対する包括的で一貫性を持つ測定方法を獲得するための大きなギャップを埋めることができない。

### 社会的・経済的発展

経済成長とエネルギー消費拡大の間に強い相関関係があるため、エネルギー部門は一般に、経済発展に対する鍵と認識されてきた。国内総生産や一人当たりの国内総生産などの指標は、数十年の間、経済発展を示す数字の尺度として使用されてきた (統合モデルなど。9.4.1 節を参照)。また、人間開発指数は一人あたりのエネルギー使用量と密接に関連するとされている (9.3.1 節を参照)。人間開発指数は、各国の相対的発展レベルを評価するのに使用され、また、購買力平価で調整された収入、リテラシー及び平均余命をその 3 つの主要マトリクスとして含む。人間開発指数は、社会の幸福度を評価する多くの潜在的な基準の 1 つに過ぎないが、発展を示す尺度の指標としての役目を持ち得る。

上記パラメータ (国内総生産、人間開発指数) の時系列データの可用性により、これらのパラメータは本章で指標として利用される (9.3.1.1 及び 9.3.1.2 節)。しかし、総合的マクロ経済パラメータ (国内総生産) や、これらの経済指標 (人間開発指数) の拡張版ですら、社会的及び経済的発展の持続可能性の全体像をとらえるのには不十分である点は重要である。技術発展の追加的指標はエネルギー強度の減少である。つまり、1 ドルの国内総生産を生み出すのに必要なエネルギー量の減少量である。

経済の効率的特性を示す指標以外にも、たとえば雇用機会の増加のようなマクロ経済の追加的便益は、再生可能エネルギーと潜在的に関係がある(9.3.1.3 節参照)。また、2009年にコペンハーゲンで行われた会議での合意などに基づいて、発展途上国が気候変動緩和対策を行うことを支援するために財務的支援の約束が富裕国家間でなされている(9.3.1.4 節を参照)。後半において指摘したこれらの点はそれぞれ、地域状況及び実施される特定の政策によって、プラスの影響またはマイナスの影響のいずれかをもつ可能性がある。

## エネルギーアクセス

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。実際に、適切なエネルギーのサービスとミレニアム開発目標(MDG)の達成の間の関連性は、2002年の持続可能な開発に関する世界首脳会議にて提起されたヨハネスブルグ実施計画にて明確に定義された(IEA, 2010b)。多数の研究にて強調されている通り、社会の最貧層が(電力または天然ガスといった)近代的エネルギーにアクセス出来るようにすることは、8つのミレニアム開発目標のいずれを達成するためにも極めて重要である(Modi et al., 2006; GNESD, 2007a; Bazilian et al., 2010; IEA, 2010b)。

過去数百年にわたり、工業化された社会は、非再生可能な化石エネルギー源、原子力エネルギー及び大規模な水力発電を有効利用し、自分たちの生活の質を変革させてきた。しかし、2010年において、世界人口の約20%は、主に農村部に住んでいて、いまだに電力へのアクセスができずにいる。その2倍の人数が伝統的バイオマスを主な手段として調理を行っており、それは主に非持続的な方法に集中している(IEA, 2010b)。エネルギーアクセスを高めるための協調的な取り組みが欠落しているため、電力へのアクセスや現代的な調理ができない人々の絶対数が、今後数十年での大幅に変わるとは推測されていない。

9.3.2 節でより詳細に検討された具体的な指標は、収入に関連する一人当たりの最終エネルギー消費と、電力アクセスの分析(農村部と都市部で分割)、石炭または伝統的バイオマスを調理に利用する人数データである。国内または地域内の農村部と都市部の間にある様々な不均衡(使用されるエネルギーの形態及び量に関して、またはインフラの信頼性などに関して)を解消するためのエネルギーシステムの将来に向けた道筋が持続的であるかを評価出来るモデルの必要性がエネルギーアクセスの議論の中に潜んでいる(9.4.2 節を参照)。

## エネルギー安全保障

「エネルギー安全保障」という用語の定義で広く受け入れられているものではなく、この用語の意味は状況に強く依存する(Kruyt et al., 2009)。一般的なレベルにおいては、この用語は、エネルギー供給の(突然の)分断に対する頑健性と理解するのが最もよいと考えられる(Grubb et al., 2006)。エネルギーシステム全体で広く考えると、変化する時間的及び地理的規模の違いによって、安全保障が異なった局面で運用されていることが識別出来る(Bazilian and Roques, 2008)。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。経済成長とエネルギー消費の相互依存を考えると、継続する分断は多くの社会に対し、深刻な経済的及び基本機能的問題を引き起こす可能性があるため、安定的なエネルギー供給の確保は先進国と発展途上国の経済が共に直面する主な政策的懸念と技術的・経済的課題である(Larsen and Sønderberg Petersen, 2009)。

長期的に見て、化石燃料の不足及び化石埋蔵物の質の低下する可能性をあることは、持続可能な世界の再生可能エネルギーシステムへの移行するための重要な理由となる。復元可能な化石燃料資源量の問題は異論が多く、楽観主義者(Greene et al., 2006)はより悲観的な見方(Campbell and Laherrère, 1998)や投資が不足するという中間主義者の慎重な予測(IEA, 2009)から反論されている。しかし、再生可能エネルギーの利用増加により、各国において化石燃料の利用からの移行が可能になり、現在の化石燃料の埋蔵の枯渇は鈍化し、これらの埋蔵が枯渇する時はさらに先に延びる(Kruyt et al., 2009)。

短期的には資源の可用性及び分配の制約についての懸念もまた、エネルギー安全保障の重要な要因となる。他に特別な条件がない限り、エネルギーシステムの単一のエネルギー源に対する依存が高まると、エネルギーシステムが重大な分断に陥りやすくなる。例として、石油供給の分断、予想外の大規模で長期にわたる風不足や日照の低下(天候によるものなど)、またはあらゆる供給源の予期しない影響の発生などがあげられる。

エネルギー輸入(化石燃料であれ再生エネルギーの導入に必要な技術であれ)に対する依存は発展途上国及び工業国のエネルギー源の潜在的な不安定性を意味する。たとえば、国際エネルギー機関(IEA、1970年代の第一次オイルショックに対応するため設立された)は加盟国の石油供給分断に対する脆弱性への対応策として、各国で90日分の純輸入量の石油を備蓄として保有するよう指示してきた。化石燃料と比較して、再生可能エネルギー資源は世界中により平等に分布しており(WEC, 2007)、一般的には世界市場にて取り引きされることが少ない。そのため、国のエネルギー・ポートフォリオでの再生可能エネルギーの割合が高まることにより、実際のエネルギー輸入への依存度を低下させることが出来る(Grubb et al., 2006)。それゆえ、再生可能エネルギー源による供給オプション

のポートフォリオの多様性への寄与、及び価格変動に対する経済的な脆弱性低下の程度 (Awerbuch and Sauter, 2006) は、世界、国内及び地方レベルでのエネルギー安全保障を高める機会を意味する (Awerbuch, 2006; Bazilian and Roques, 2008)。

様々な時間規模 (秒単位から季節単位まで) によって変化する再生可能エネルギー技術の導入はエネルギー安全保障に新たな懸念をもたらす。それは、敵対的な仲介業者(agent)による供給の分断に対する懸念だけではなく、危険性や自然の予測できない変化 (日照りのような極端な出来事など) に対するエネルギー供給の脆弱性である。しかし、再生可能エネルギーは、特に、送電系統へのアクセスがたびたび不十分となる遠隔地や農村部において、エネルギーのサービスの信頼性向上への貢献が可能である。エネルギー資源の様々なポートフォリオは、優れた管理及びシステム設計 (たとえば、必要に応じてエネルギー源の地理的多様性を含めるなど) を伴うかどうかに関係なく、安全性向上に役立つ可能性がある。

安全性に対する特有の指標は特定が困難である。上に示した 2 つの広範囲なテーマに基づき、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。

### 気候変動緩和及び環境や健康への影響の低減

第 1 章で述べたとおり、気候変動の緩和を目的とする温室効果ガス排出の削減は、再生可能エネルギー技術の需要の高まりを背景とする主要な原動力の 1 つである。しかし、エネルギーシステムからの環境に対する負荷全体を評価したり、潜在的なトレードオフを表面化したりするためには、その他の影響や分類の特定も考慮されなければならない。水や大気に対する大量の排出や、エネルギー生産の単位当たりの水、エネルギー、土地の使用量は、技術全体で評価されなければならない。パラメータのいくつかは正確に定量化出来るが、その一方で、その他に関しては包括的なデータや有益な指標は不足しているであろう。また、人類の健康や生物多様性に対する包括的な影響を導き出すことは、これらの影響の多くが特定の土地、曝露経路や環境に特有であり、単一源に起因するとは考えにくいことが多いため、困難な作業である。

環境影響評価やリスク評価など、プロジェクトの環境への影響を評価する方法複数の方法がある。多くは場所により異なり、設備の運転に関連する直接的な環境への影響に制限されることが多い。比較のための明確な枠組みの提供のため、9.3.4 節でのボトムアップ測定にはライフサイクル評価 (LCA) が選ばれているが、これは、通常運転以外における負荷の主な原因となる事故リスクを相対的に評価することによって補われている。エネルギー供給技術の公開済みライフサイクル評価の多くは、ライフサイクルの目録のみを集めており、これは、環境基準に対する効果 (または影響) の報告よりもむしろ環境に対する排出の定量化 (またはリソースの消費量) の評価である。ライフサイクルの影響を報告する文献または総合的な持続可能性指標が不足しているため、9.3.4 節においても、同様の手法が用いられる。部分的には、これは様々な影響のカテゴリの非整合性によるものである。様々な形式の指標を組み合わせて 1 つの全体的な点数を算出しようという試み (たとえば、影響の道筋を共通の評価項目へ結合することや、貨幣化 (monetization) により) が行われてきた。しかし、そのような採点法に付随する不確実性はあまりにも多く、方針の決定を不可能としている (Hertwich et al., 1999; Rabl and Spadaro, 1999; Schleisner, 2000; Krewitt, 2002; Heijungs et al., 2003; Sundqvist, 2004; Lenzen et al., 2006)。しかしながら、10.6 章にて社会的コストについて説明し、また 9.4.4 節における分析の一部は影響の貨幣化をもとにしている。後半の節にて、土地利用変化や関連する温室効果ガス排出及び地方の大気汚染に焦点を当て、マクロ視点による再生可能エネルギー普及のシナリオ分析において、どの環境への影響が代表的であるかについて分析する。

## 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 (9.3.2 節を参照)、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 (第 1 章を参照)、エネルギー安全保障の強化 (9.3.3 節を参照)、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。本章で評価する 4 つの持続可能な開発の目標についての概念説明は、9.2.2 節を参照のこと。

### 9.3.1 社会及び経済の発展

この節では、持続可能な社会及び経済の発展への再生可能エネルギーの潜在的な貢献について評価する。ただし、持続可能な開発の複次的な性質により、全緩和オプションの包括的評価が関連する全コストの正式な計算を行う

ことはできない。むしろ、次の節にて、主要問題を特定し、発展の面から再生可能エネルギーと化石燃料の関連する便益とデメリットについて議論する枠組みを提供する。

### 9.3.1.1 エネルギーと経済成長

エネルギーフローを制御する能力は工業生産及び社会経済の発展 (Cleveland et al., 1984; Krausmann et al., 2008) に対する非常に重要な因子であることから、産業社会は、「高エネルギー文明」と特徴づけられることが多い (Smil, 2000)。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。これは結果が、採用する経験的方法論と研究の地域や時期に強く依存するためである (D. Stern, 1993; Asafu-Adjaye, 2000; S. Paul and Bhattacharya, 2004; Ang, 2007, 2008; Lee and Chang, 2008)。

工業化は経済の構造的変化を引き起こすため、エネルギー需要に影響を与える。経済活動が拡大及び多様化するにつれ、より高度で柔軟なエネルギー源への需要が生まれている。農業に強く依存する社会では、一次エネルギー消費の大部分を伝統的バイオマスから得る一方で (Leach, 1992; Barnes and Floor, 1996)、収入が増えるにつれ石炭及び液体燃料 (灯油や液化石油ガスなど) の重要度が増し、電力、ガス及び石油は1人あたりの収入が高い場合に優位に立つ (Grübler, 2004; Marcotullio and Schulz, 2007; Burke, 2010、9.3.2 節及び図 9.5 を参照)。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 (Schafer, 2005、図 9.2 を参照)。また、著者の多くは (Jorgenson, 1984; Schurr, 1984 など) は、電力 (他のエネルギーと比較して質が高く柔軟性も高い) が産業先進国において生産の機械化及び自動化の原動力となっており、継続的な生産性向上に大きく貢献している点を指摘している。

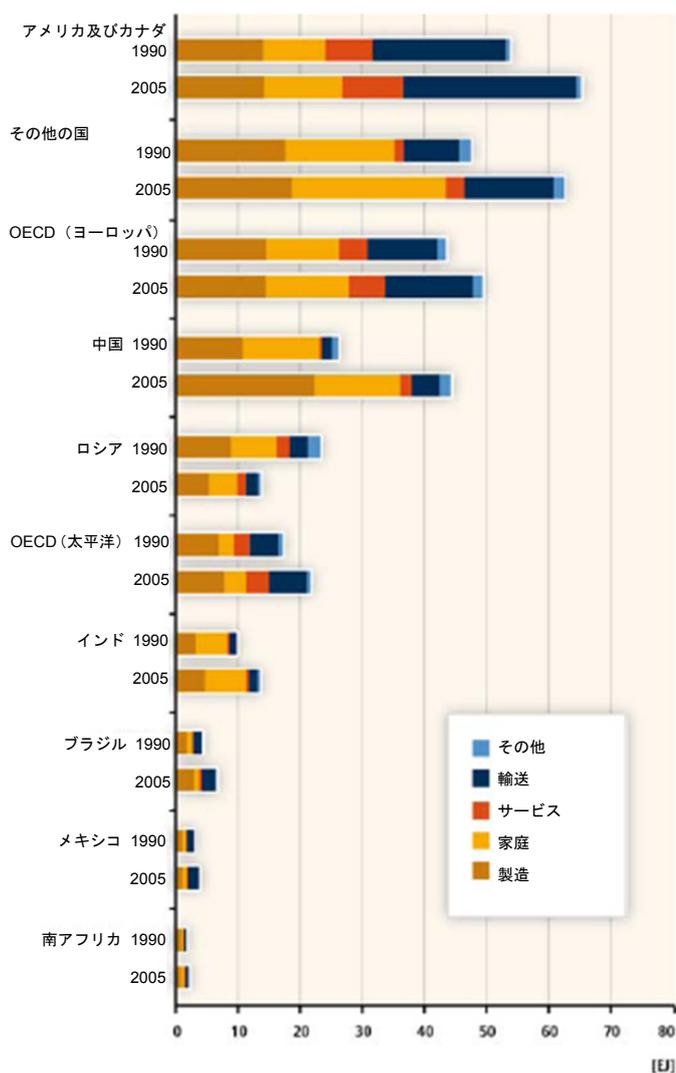


図 9.2: 経済部門によるエネルギー消費(EJ)。基礎データは、直接等価法<sup>1</sup>ではなく IEA の物理量法(physical content method) で計算されている点に留意 (IEA, 2008c)。

注: RoW = その他の国

産業先進国グループでは発展途上国よりも一人あたりのエネルギー消費量が非常に多いという事実にも関わらず、国全体のエネルギー消費パターンにおける縮図の特徴はそれ以上に重要である。エネルギー消費が比較的低くても 1 人当たりの収入が高い国 (日本など) がある一方で、エネルギー消費が高いにも関わらず、比較的貧しい国もある。特に、この傾向は化石燃料資源が豊富な国で見られる。これらの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 (UNEP, 2008b)。発展途上で過渡期の経済は、多くの場合「リープフロッグ」が可能であると強く主張されている。つまり、工業化の段階で現在の成長しきった工業経済と比較して、低エネルギー集約型及び低炭素集約型の成長パターンに着手するため、近代的で効率の良いエネルギー技術を採用することが可能である (Goldemberg, 1998) ということだ。たとえば、東ヨーロッパの EU 加盟 12 か国のある研究は、1990 年から 2000 年の間に、十分に産業化した先進国及び移行経済国との、1 人あたりの収入 (購買力平価にて測定) の集束が、後者 (移行経済国) におけるエネルギー強度の大幅な低下に付随して発生することを発見している (Markandya et al., 2006)。産業先進国において、ある仮説が、構造変化としてのエネルギー強度が一定に減少することにより、エネルギー消費から経済成長を大幅に分離させることができ、また、効率性の向上が経済活動の「脱物質化」(dematerialization) の引き金となり得ると示唆している (Herman et al., 1990)。しかし、ほぼすべての地域において時間の経過とともにエネルギー強度 (つまり、国民総生産単位当たりのエネルギー消費) の減少が見受けられるにもかかわらず、過去においては、エネルギー強度の低下よりも経済成長の方が速く進むことが多く、そのためエネルギー強度の低下はエネルギー消費を実際に抑えるには不十分であることがわかっている (Roy, 2000)。また、産業先進国におけるエネルギー強度の減少は、エネルギー集約型産業が徐々に発展途上国へと移行しているという

<sup>1</sup> 過去のエネルギーデータは経済部門ごとのエネルギー使用 (の分析) にもみ利用可能である。直接等価法を用いたデータ換算時に、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。

事実により部分的に説明出来ると主張されてきた (G. Peters and Hertwich, 2008; Davis and Caldeira, 2010)。また、実際のエネルギー効率の向上は、高品質の燃料へ移行することにより大きく推進されており、エネルギー強度の低下を漠然と継続し続けることは期待できない (Cleveland et al., 2000; R.K. Kaufmann, 2004)。

### 9.3.1.2 人間開発指数とエネルギー

9.2.2 節ですでに述べたとおり、産業先進社会における生活の質の向上は、今までのところ主として非再生可能エネルギー源の開拓をもとにしている（一方で、産業化の初期段階、また今日の多くの発展途上国において水力発電の果たす重要な役割に注意する）。その生産目的の重要性とは別に、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、安全な環境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 (UNDP, 2007)。

図 9.3 では人間開発指数 (9.2.2 節を参照) と 135 か国の 1 人当たりの一次エネルギー消費の間の相関関係を示す。グラフはエネルギー消費と人間開発指数間の正の相関を示す。特に、人間開発のレベルが最も高い国は、最大のエネルギー消費者でもある。エネルギー需要が比較的少ない (1 人当たり 84GJ 未満) 国々ではより分散されている。一部は低い人間開発指数レベル (0.5 未満) へ抑制される一方、その他の相対的エネルギー消費では中程度 (0.5 から 0.8) の人間開発指数を示している。エネルギー消費のレベルが上がると、エネルギー利用と人間開発指数間の正の関係の収束(saturation)が始まる (Martinez and Ebenhack, 2008)。これは、妥当な生活水準を保証するにはある一定のエネルギーの最低量が必要であることを意味する。Goldemberg (2001) により一人当たり 42GJ という値が提案され、その後にエネルギー消費量の増加が生活の質をわずかに向上させる。

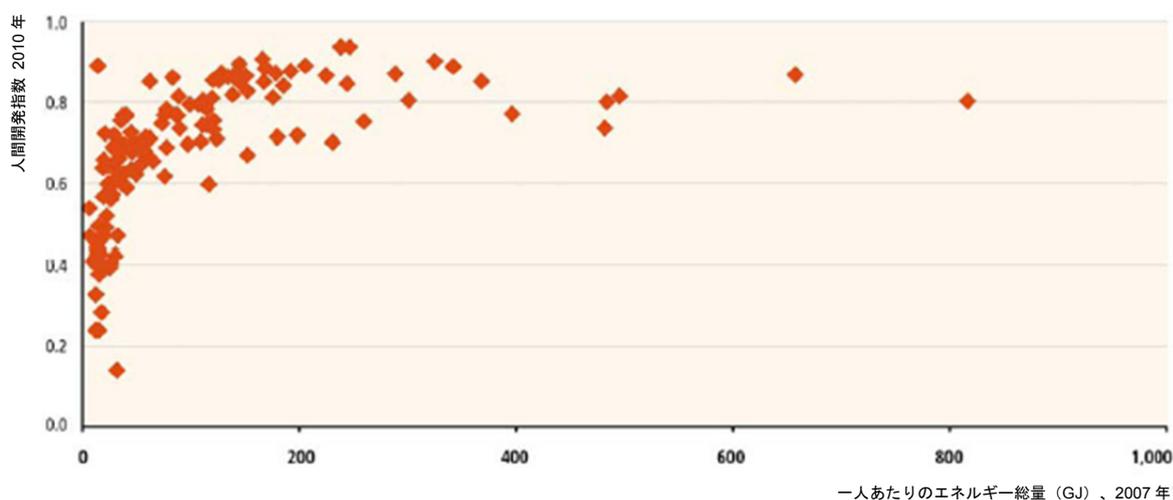


図 9.3: 一人あたりの総エネルギー消費量 (GJ) と各国の人間開発指数 (HDI) 間の相関。エネルギー利用の基本データは、直接等価法ではなく、IEA の物理量法を用いて算出されることに注意<sup>2</sup>。UNDP (2010) 及び World Bank (2010) を基にした。

### 9.3.1.3 雇用創出

UNEP (2008a) の最近の研究によると、再生可能エネルギーはすでに、全世界の約 2,300 万の仕事を含めており、多くの国において、雇用創出は再生可能エネルギー源への投資の主な便益の 1 つとみなされている。ドイツの環境省による研究では、2006 年に約 236,000 名の人々が再生可能エネルギーに従事しており、2 年前の約 161,000 名から増加した (BMU, 2009)。インド、ネパール及びアフリカの一部 (Cherian, 2009)、またブラジル (Goldemberg et al., 2008; Walter et al., 2011) における再生可能エネルギーの利用の例では、発展途上国の大部分において、再生可能エネルギーは地方の経済発展及び社会発展を促進出来ると示している。多くの政府が、クリーンエネルギー技術に関する多額の出費をその技術の刺激策に含めていて、この刺激策は、金融及び経済危機に対応して実践されてきた (N. Bauer et al., 2009; Bowen et al., 2009)。アメリカでは、ある研究 (Houser et al., 2009) が、グリーン技術への財政措置として 10 億 US ドル (2005 年) の出費ごとに、約 33,000 の雇用を生み出す可能性があるとして示唆した。アメリカ進歩センターによる別の研究 (Pollin et al., 2008) では、907 億 US ドル (2005 年) のグリーン技術刺激策は、およそ 200 万の雇用を生み出せると推計した。クリーンエネルギーへの 820 億 US ドル (2005 年) の出費をアメリカ復興・再投資法に盛り込んだ大統領経済諮問委員会 - 米政権のプロジェクト (The Council of Economic Advisors to the US administration projects) は 2012 年まで、72 万の雇用創出または安全措置を行うとしている。さらに長期的な

<sup>2</sup> 過去のエネルギーデータは国ごとの一人あたりのエネルギー消費 (の分析) にのみ利用出来る。直接等価法を用いたデータ換算時に、各国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。

観点より、多くの国家的グリーン成長戦略は、たとえば中国、韓国、日本、EU 及びアメリカにおいて (UNEP, 2010)、雇用創出に対する重大な貢献として再生可能エネルギーの普及を重視してきた。また、ある研究 (Barbier, 2009) は、「世界のグリーン・ニューディール」は、低炭素輸送及び関連する活動のみで、長期にわたり 3,400 万を超える雇用を創出出来るだろうと主張している。

雇用の減少効果もあるとする他の研究はこの点においてより批判的であり、雇用の創出効果があるという主張は、それを計算するために用いられる手法についての論争によってさらに力を失っている (Sastresa et al., 2009)。再生可能エネルギー政策の労働市場効果の評価は、いずれのケースにおいても、中期的にバリューチェーンと生産パターンをどのように調整するか、長期においては構造的調整や革新的な活動がどのように反応するかを評価するという困難な作業である (Fankhauser et al., 2008)。再生可能エネルギーを、労働市場に内在する非効率性を修正するために採用される道具とみなすべきではない。包括的評価では、特定の技術のすべての社会的コスト及び便益 (労働市場の摩擦との相互作用を含む) において、公平な条件にて再生可能エネルギーと化石燃料を適切に比較出来ることを要因として盛り込むことが必要である。これは、再生可能エネルギーの支援スキームのコストと化石燃料の補助金を含む (9.5.2 節を参照)。

### 9.3.1.4 再生可能エネルギーへの財政支援

この節にて述べる再生可能エネルギーの特定の便益の評価は、国特有の事情においてのみ査定可能である。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 (Mattoo et al., 2009)。しかし、9.3.2 節にてより詳しく説明する通り、再生可能エネルギーは化石燃料 (ディーゼル発電機など) に比べ、送電系統の利用ができない貧しい農村部においてコスト低減の可能性をもたらすと示されてきた (Casillas and Kammen, 2010)。それにもかかわらず、一般に再生可能エネルギーの純経済コストは、多くの例において、化石燃料をベースとするエネルギー生産の純経済コストを上回る (2.7、3.8、4.7、5.8、6.7、7.8 及び 10.5 節を参照)。また、再生可能エネルギーの採用へのさらなる財務的障壁について、11.4.3 節にて説明する。

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 (N. Stern, 2007)。たとえば、コペンハーゲン合意は、2010 年から 2012 年までの間に、260 億 US ドル (2005 年) を、発展途上国において気候対策に使用出来るようにすべきであるとしている (緩和及び適応を含む)。また、この総計は、2020 年までに 1 年あたり 860 億 US ドル (2005 年) まで拡大すべきともしている (UNFCCC, 2009)。中期から長期の発展途上国に対する財政的な流れの推計は、温室効果ガス安定化レベル及び適当とみなされる負荷分担スキームに高度に依存して、大きな変化を見せる。排出権の一人あたりの配分に等しい大気中の二酸化炭素を 450ppm と仮定する安定化シナリオの推計によると、気候資金に関連する資金の流入は、2020 年ごろには、サハラ以南のアフリカで国民総生産の最大 10%、インドでは最大 5% に達するだろう (IMF, 2008)。明らかに、この大きな資金の流入は、再生可能エネルギーをベースとするエネルギーシステムへの移行支援において大きな役割を果たすことが可能である。しかし、レントシーキング (rentseeking、企業が独占利益を得るために政府などに法制や政策の実施を働きかける活動) の動きを誘発し製造活動を締め出すことで発展を弱めるのではなく、この移行が実際の持続可能な開発の便益をもたらすようにして、大きな資金の流入を適切に統制することも非常に重要である (Strand, 2009)。リソースレント (resource rents、鉱物資源による企業の利益) 及び援助の流れ (aid flows) の統制 (たとえば、透明性及び歳入管理に関連するベストプラクティスの特定による) からの見識は、これらの課題についての指針を提供出来る。したがって、再生可能エネルギーの採用決定は、単独の基準のみを基にすることはできないが、経済コスト、副次的便益 (エネルギーアクセス、エネルギー安全保障、及び健康や環境への影響低減など)、また、気候資金を用いる新たな資金提供の可能性を含む様々な局面における要素でなければならないことをここで再び強調しておく。

### 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。家庭においては、公害及び非効率なエネルギーのサービスからの女性に対する影響が頻繁に見られてきた (A. Reddy et al., 2000; Agbemabiese, 2009; Brew-Hammond, 2010)。

表 9.1 に電力にアクセスできない人数の推計を示す。これは、2009 年に総計で 14 億人を超えた。地域的分布は、これが、もっぱら発展途上国の問題、特にサハラ以南のアフリカや南アジアにおける問題であることを示している。

表 9.1: 2009 年における電力にアクセスできない人 (百万人単位) を地域ごとに表示。IEA の *World Energy Outlook 2010* (新政策シナリオ) に基づく 2015~2030 年の予測、及び予測される電力化率の結果としての将来にアクセス可能になる総人数の割合 (IEA, 2010b)。

地域	2009			2015	2030	2009	2015	2030
	農村部	都市部	合計	合計	合計	%	%	%
アフリカ	466	121	587	636	654	42	45	57
サハラ以南のアフリカ	465	120	585	635	652	31	35	50
アジアの発展途上国	716	82	799	725	545	78	81	88
中国	8	0	8	5	0	99	100	100
インド	380	23	404	389	293	66	70	80
その他のアジア諸国	328	59	387	331	252	65	72	82
ラテンアメリカ	27	4	31	25	10	93	95	98
発展途上国*	1,229	210	1,438	1,404	1,213	73	75	81
世界**	1,232	210	1,441	1,406	1,213	79	81	85

注: \* 中東諸国を含む。 \*\* OECD 及び移行経済を含む。

国連事務総長のエネルギーと気候変動に関する諮問グループからの最新の報告書 (AGECC, 2010) は、持続可能な開発を促進する主要部分として、2030 年までの近代的エネルギー源の普遍的アクセスの重要性を強調する。エネルギーと気候変動に関する諮問グループはまた、「アクセス」という用語の再認識について提案し、送電システムの拡大によるエネルギーアクセスの拡大、またはディーゼルプラントのような化石燃料技術の効果を越える、持続可能な開発に対する再生可能エネルギーの特定の貢献を明らかにする。この方法は、エネルギーアクセスを「調理、暖房 (加熱)、照明、通信及び生産用途に用いるクリーンで、信頼性が高く手頃なエネルギーのサービスへのアクセス」と定義し (AGECC, 2010)、人間の基本的欲求を満たすことから持続可能な開発の自立プロセスの産出への移行に含まれる漸進的プロセスについて示す (図 9.4)。



図 9.4: エネルギーのサービスに対するアクセスの漸進的レベル (AGECC, 2010、IEA のデータと分析を基に作成)

注: kgoe は石油換算 kg。

照明、通信、健康管理及び教育に対する電力供給などの基本的な水準のエネルギーアクセスでも、コスト節約を含め、コミュニティまたは家庭に大きな便益をもたらすことが出来る。しかし、エネルギーと気候変動に関する諮問グループは、広義のエネルギーアクセスを主張し、最貧国の生活改善及び地方経済の発展の促進のため、エネルギー水準は基本サービスだけではなく生産用途に対するものにもすべきと主張する (図 9.4 を参照)。社会的及び経済的基準に対する数値化最小要望などエネルギーアクセスの概念についてのより詳しい説明は Modi et al. (2005) を参照のこと。

アクセス問題は、地方の事情にそって<sup>3</sup>、理解される必要があり、多くの国々では、都市部及び農村部における電力化の間に大きな違いがある (Baumert et al., 2005; Bhattacharyya, 2005; World Bank, 2008b; UNDP and WHO, 2009; Brew-Hammond, 2010; IEA, 2010a)。これは、特にサハラ以南のアフリカ及び南アジア地域において事実である一方、統計は、国全体の電化率は高い国においても、いまだに農村部のアクセスが発展途上の地域における懸念事項となっていることを示している。また、近代的なエネルギーのサービスにおける農村部と都市部の格差がいまだに非常に著しいことを浮き彫りにしている (表 9.1 参照)。

再生可能エネルギーを基盤とする分散型送電系統は一般に、全国の送電系統から遠く離れた農村部地域にてより競争力を持つ (Baumert et al., 2005; Nouni et al., 2008; Deichmann et al., 2011)。また、農村部地域の電化は遅れているため、再生可能エネルギーを基盤とする小規模系統システムには大きな機会がある。都市部における電力へのアクセスの増加における再生可能エネルギーの役割は、注目すべきものは少ない。これは、他の送電系統供給オプションによる競争力、または家庭やコミュニティレベルにおける社会的経済的問題のいずれかと関連する。ここで、アクセスは法律上の土地問題や手の届く価格かどうかがネックとなる。

現在、約 27 億の人々が、調理用のエネルギーを木材、木炭及び糞のような伝統的バイオマスに頼っている。また、別の 5 億人が石炭を利用していると推定されている (表 9.2)。この推計の不確実性は高いが、様々なデータにおいてもこの範囲は限られている (EA, 2010a)。電気を利用できない 14 億を超える人々以外にも、約 13 億人がいまだに、何らかの形の電力を利用する代わりに、調理などのエネルギーを必要とするサービスにバイオマス、灯油、石炭または液体石油ガス (LPG) を使用している (Bravo et al., 2008; Karekezi et al., 2008; Dhingra et al., 2009, IEA, 2010b)。

**表 9.2: 2009 年における、調理に伝統的なバイオマスを利用する人の数 (百万人) (IEA, 2010b)**

地域	合計
アフリカ	657
サハラ以南のアフリカ	653
アジアの発展途上国	1,937
中国	423
インド	855
その他のアジア諸国	659
ラテンアメリカ	85
発展途上国 <sup>※</sup>	2,679
世界 <sup>※※</sup>	2,679

注: ※※ 中東諸国を含む。 ※※OECD 及び移行経済圏を含む。

これらの統計のより詳しい分析は、一般に、多くの発展途上国の貧困層におけるエネルギー消費についてのデータがほとんどないために難航する。エネルギー関連のデータを含む国勢調査の数が増える一方、対象は未だに貧しい都市近郊や公式登録または土地を所有していない農村部の家庭の非常に限られたものになっている (GNESD, 2008; Dhingra et al., 2009)。適切に定義され一般に受け入れられている指標が不足していることが、分析の制約を強める (IEA, 2010a)。

主に室内で用いられるような、調理目的での伝統的バイオマス燃料の主たる使用は、マイナスの影響が多数確認されている。これらには、健康への影響 (Barnes et al., 2009、9.3.4.3 節を参照)、燃料集めに費やす時間や、収入に占める割合の高い少量の市販バイオマス費用などの社会的影響、木炭や市場本位のバイオマスが支配的な燃料である地域における森林減少などの環境面が含まれる。

現在行われている、その多くが持続可能ではないようなバイオマスの非効率な利用の形を、より持続可能で効率的な代替策に変えることは、大きな課題となる。図 9.5 に示す通り、家計の低収入と低品質な燃料の使用には強い相関関係があり、危険にさらされている人々は、最貧層であることが浮かび上がる。調理用の固体バイオマスと置き換えるための、エタノールジェルなどの液体またはガス状の再生可能エネルギー燃料の導入は、数百万人の健康を改善すると同時に重要な役割を担うであろう (Lloyd and Visagle, 2007)。液化石油ガスはすでに一部の地域で木炭から置き換わっているが、貧困層の大部分にとっては高価格な選択肢であるため、大きく浸透している国は数か国のみとなっている (Goldemberg et al., 2004)。バイオマスまたは液化石油ガスのバイオマスから作り出されるジメチルエーテルによる置き換えには将来性がある (Larson and Yang, 2004)。調理用燃料の需要を満たすのに必要な液化バイオ燃料生産の規模は、輸送用燃料の需要を満たすものよりも小さい (8.2.7 及び 8.3.1 節)。

<sup>3</sup> 電力アクセスについての地球規模の傾向を示すデータベース ([earthtrends.wri.org/searchable\\_db/index.php?theme=6](http://earthtrends.wri.org/searchable_db/index.php?theme=6)) も参照のこと。

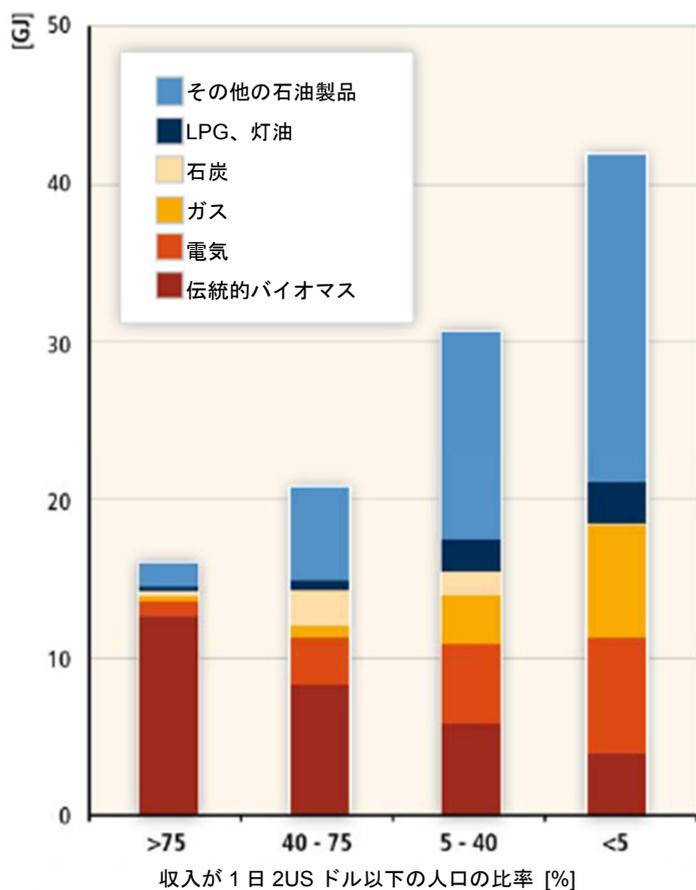


図 9.5: 発展途上国における一人当たりの最終エネルギー消費と収入の関係 (IEA, 2010b)。2000~2008 年の入手可能な最新データを参照。

注: LPG = 液化石油ガス

遠隔地における電化に対する再生可能エネルギーの特有の関連性とは別に、再生可能エネルギー源は他のエネルギー源よりも持続可能な方法でエネルギーアクセスを提供するという特別なことを成し遂げ得るが、その貢献についてはあまり理解されていない。

持続可能な開発のためのエネルギーに関するグローバル・ネットワーク (Global Network on Energy for Sustainable Development) による研究では、農村部の開発に対し具体的な貢献を為す再生可能エネルギー技術のオプションを調査した (GNESD, 2007b)。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は、電力を利用できない地域において優先的に家庭及び生産エネルギーのニーズ (調理、温水、暖房、揚水) を満たしていることが分かった。表 9.3 の概要にこれを示す。この概要は、再生可能エネルギーが、農村部の送電線網を持たない地域において基本的なエネルギーのサービスを提供出来る可能性について示す。また一方で、多くの選択肢は、多くの家庭が近くの送電系統に対してさえ合法的または経済的なアクセスを得られない都市近郊地域で増加するスラム化したコミュニティに対しても、等しく適用される (Jain, 2010)。

表 9.3: 農村部（非系統連系）の地域における再生可能エネルギーへの移行 (REN21, 2010)

農村部のエネルギーのサービス	現在の非系統連系の農村部のエネルギー源	新規及び再生可能エネルギー源の例
照明及びその他の小さな電力需要（住居、学校、街灯、電気通信、手道具、ワクチン貯蔵）	ろうそく、灯油、バッテリー、送電系統にバッテリーを運ぶことで再充電する中核バッテリー	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水力発電（ピコ水力発電、マイクロ水力発電、小規模水力発電）</li> <li>・家庭用消化槽からのバイオガス</li> <li>・ガスエンジンを持つ小規模のバイオマス用ガス化装置</li> <li>・集落規模のミニグリッド及び太陽熱/風力ハイブリッドシステム</li> <li>・太陽熱によるホームシステム</li> </ul>
通信（テレビ、ラジオ、携帯電話）	乾電池、送電系統にバッテリーを運ぶことで再充電する中核バッテリー	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水力発電（ピコ水力発電、マイクロ水力発電、小規模水力発電）</li> <li>・家庭用消化槽からのバイオガス</li> <li>・ガスエンジンを持つ小規模のバイオマス用ガス化装置</li> <li>・集落規模のミニグリッド及び太陽熱/風力ハイブリッドシステム</li> <li>・太陽熱によるホームシステム</li> </ul>
調理（住宅用、業務用ストーブ及びオープン）	約 15%の効率の焚火の燃木、糞または藁	<ul style="list-style-type: none"> <li>・調理用ストーブ（薪、農産物廃棄物）を 25%超の効率に改良</li> <li>・家庭用消化槽からのバイオガス</li> <li>・太陽熱調理器</li> </ul>
加熱・冷却（穀物の乾燥及びその他の農産物加工、温水）	大部分は木材、糞及び藁による焚火	<ul style="list-style-type: none"> <li>・改良型加熱ストーブ</li> <li>・小規模及び中規模の消化槽からのバイオガス</li> <li>・太陽熱穀物乾燥機</li> <li>・太陽熱温水器</li> <li>・食物貯蔵用の製氷</li> <li>・小規模な送電系統の再生可能エネルギーシステムの扇風機</li> </ul>
プロセスの原動力（小規模産業）	ディーゼルエンジンと発電機	<ul style="list-style-type: none"> <li>・マイクロ水力発電、ガス化装置、直接燃焼及び大規模なバイオ消化槽からの小規模な送電系統システム</li> </ul>
揚水（農業用水及び飲用水）	ディーゼルポンプ及び発電機	<ul style="list-style-type: none"> <li>・機械的風力ポンプ</li> <li>・太陽光発電 (PV) ポンプ</li> <li>・マイクロ水力発電、ガス化装置、直接燃焼及び大規模なバイオ消化槽からの小規模送電系統システム</li> </ul>

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すことが出来る。このように、これらの技術は、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をもたらしている。たとえば、上で概要を述べた非電力技術は、地方の雇用創出、生産システム及び再生可能エネルギー資源の抽出と処理を通じた経済活動の高まりに対し高い可能性を持っていることが分かった (GNESD, 2007a)。

再生可能エネルギーを基盤としたエネルギーアクセスプログラムの実施は、急速に広がっているが、持続可能性関連の局面の研究は、いまだに非常に限定されており、大規模実施についての文献もほとんどない。そのため、小規模事業発展による地方の雇用創出の可能性を利用する社会的及び生産サービスの組み合わせに特に注目して、エネルギーアクセスの要素が実現する特定の活動の数例に依存して分析を行わなければならない (van der Vleuten et al., 2007; Nouni et al., 2008; Kaundinya et al., 2009; J. Peters et al., 2009; Urmeel et al., 2009; Jonker Klunne and Michael, 2010)。しかし、使用可能な評価及び事例は、エネルギーアクセスが一般にミレニアム開発目標達成及び経済発展のカギとなることを示している。再生可能エネルギー技術はクリーンで効率的なエネルギーのサービスの供給の向上に大きく貢献する可能性を持っている。再生可能エネルギーの普及からの持続可能な開発の潜在的便益を完全に実現するためには、首尾一貫した、安定した支援の政策的及び法的枠組みを用意することが不可欠である。これらの枠組みに対するオプション及び障壁についての詳細評価を第 11 章で行う。

最後に、注意であるが、再生可能エネルギーの様々な設備（すなわち分散型供給と集中型供給）は実に様々な制約を受け、後者は従来型のエネルギーシステムと同じ障壁（すなわち先行投資、立地問題、インフラと土地要件、及びネットワーク更新問題）を経験するという点にも留意すべきである。その他の新技術のように、再生可能エネルギーの導入は社会的及び文化的障壁に直面し、実施は、たとえば食事や調理の習慣のような社会的構造及び地方の伝統に敏感である必要がある。文化、主食の形式及び調理習慣への理解不足により改良型ストーブのプログラムの失敗例が数多くある（Slaski and Thurber, 2009）。

### 9.3.3 エネルギー安全保障

エネルギー消費の削減及びエネルギー効率の改善に加え、再生可能エネルギーはエネルギー安全保障の強化を可能にする選択肢である。本節では、再生可能エネルギー技術がエネルギー安全保障の目標に対して果たす潜在的な貢献について、その証拠を評価する。評価は、資源の利用可能性及び分布、エネルギー源の変動性及び信頼性という、エネルギー安全保障の2つの幅広いテーマに基づき行われる。テーマの概要は9.2.2節に示す。

再生可能エネルギーが化石燃料を代替するポテンシャル（つまり、再生可能エネルギーの理論上また技術的なポテンシャル）は、1.2節で概要が示され、各章（2.2, 3.2, 4.2, 5.2, 6.2 及び 7.2 節）でそれぞれの技術の詳細な議論が行われた。さらに、11.3.3節では、エネルギー安全保障に関連するエネルギー政策の側面を論じる。

#### 9.3.3.1 資源の利用可能性及び分布

可採埋蔵量（ratio of proven reserves to current production）（R/P）とは、埋蔵量枯渇まで、現在の生産率を今後どのくらいの年数維持可能かを示したものであり、潜在的な化石燃料枯渇を説明する一般的な方法である。この方法論に従うと、最近の推定値では、石炭の枯渇は（世界的な可採埋蔵量は100年以上のため）当面は大きな課題ではないが、石油及び天然ガス<sup>4</sup>の生産率が現在のまま続くと、世界の可採埋蔵量は石油が41～45年、天然ガスが54～62年でそれぞれ枯渇するだろうことが示されている（BGR, 2009; BP, 2010; WEC, 2010）<sup>5</sup>。これらの数字は、化石燃料の残存埋蔵量の規模感を示す目的しか持たず、現在の埋蔵量が実際に枯渇する時期は評価していない。可採埋蔵量を適切に解釈するには、多数の側面を考慮しなければならない。これらには、埋蔵量の分類方法と計算方法に関する方法論、生産の将来的な変化と新たな埋蔵量発見、埋蔵量の質の悪化などがある（Feygin and Satkin, 2004）。これらの要因を分析に盛り込んだ最近の報告は、在来型の石油はピークが2030年以前に来る可能性が高く、2020年以前にピークが到来すれば大変危険であると予測して締めくくられている（Sorrell et al., 2009）。

IEA（2008b）が World Energy Outlook 2008 で強調したように、開発途上世界の多くの場所で加速している経済成長は、世界規模のエネルギー需要を上昇させる可能性が高い。この結果、残存する化石燃料資源の寿命がさらに短命化しかねない。技術的進歩で、いわゆる非在来型源（オイルサンドなど）の石油貯留層から採掘が可能になっているにせよ、通常は多額の投資が必要であることから、石油採掘コスト、石油とガスの価格は上昇する（Bentley, 2002）。さらに、枯渇した在来型及び非在来型の採掘所から一定の有効エネルギーを生産するためにはより多くのエネルギーが必要となる。在来型石油については、エネルギー収支比（出力エネルギーに対する投入エネルギーの比率 EROEI, 9.3.4 節参照）の公表推定値では、埋蔵量の質を考慮すると、時の経過とともに大幅に減少することが示されている。エネルギー収支比は1972年に最大の約19に達したものの、1997年にはおおよそ11に低下した（約42%低下）（Cleveland, 2005）。非在来型資源の場合、エネルギー収支比はさらに低い（IEA, 2010b; Seljom et al., 2010）。このため、化石燃料産業の採掘コストが過去10年で特に石油で急増しても、驚くべきことではない。ただし、この採掘コストの急増は、機器、原料、及び労働者の要求も影響を及ぼしている（EIA, 2009）。資源掘削に対する投入エネルギー量の増加は、これらの資源によるライフサイクルの炭素排出量に相関する。

化石燃料の埋蔵地及び消費地はほぼ重なることがなく、化石燃料は大量に取引され、比較的資源に乏しい国々の多くは、エネルギーの大部分を輸入に依存し、消費側が求める水準に対応している。世界規模のエネルギー貿易では、ごく少数の重要な地理的地域（要所）を経由する割合が大きい。このために、事故またはテロ攻撃に対する脆弱性は高く、輸入側は供給分断や価格上昇に対してかなりのリスクを負う（E. Gupta, 2008）。図9.6は石油純輸入国<sup>6</sup>を示し、欧州連合（EU-27）が石油消費量の85%、北アメリカが32%、アジア太平洋地域が61%を海外生産者から調達している。欧州連合（EU-27）は、ガス消費量の半分以上も輸入に依存するが、アジア太平洋地域では輸入割合は15%を下回り、北アメリカでは国内生産でガス需要をほぼ賄っている。中東、旧ソビエト連邦（FSU）、アフリ

<sup>4</sup> シェールガス及びコールベッドメタンの採取技術は最近向上し、この結果、近い将来にこれらの非在来型資源から相当量の天然ガスを生産出来ると推測されている（IEA, 2008b）。

<sup>5</sup> 1990年以降、石油及び天然ガスの確認可採埋蔵量は、公的統計の改定、新たな埋蔵量発見、及び採収率向上により、中程度に増加している。しかしながら、新たに埋蔵量が発見されても、消費には追いついていない。究極可採埋蔵量（未発見の埋蔵量を含む）は、確認可採埋蔵量に比べかなり大きい。その実際の規模は、将来の石油価格及び開発コストの影響を非常に受ける（IEA, 2008b）。

<sup>6</sup> 単一の地域内でもかなりの不均衡があることには、留意するべきである（たとえば、アメリカは石油純輸入国だが、カナダは純輸出国である）。

カ、ラテンアメリカの一部は、石油及びガスの最も重要な輸出国である（アフリカの場合、石油及びガスの輸出力は国内消費量を上回る）。欧州連合（EU-27）及び中東も、石炭は輸入に依存しているが<sup>7</sup>、エネルギー安全保障上それほど顕著な懸念があるわけではない。欧州連合（EU-27）は、年間消費量を 90 倍超上回る埋蔵量を有しており、中東の場合、石炭はエネルギー使用全体で最低限の割合しか占めていない（BGR, 2009）。このように、エネルギー貿易は世界的に顕著に偏在することから、エネルギー輸入に大きく依存する国では、自国のエネルギー消費が供給分断の可能性に深刻な影響を受けるだろうという懸念がしばしば持ち上がっている（Sen and Babali, 2007）。

化石燃料の埋蔵量、生産、及び輸出の空間分布は偏在しており、いくつかの地域に非常に集中している。石炭埋蔵量の 60%超は、わずか 3 地域（アメリカ、中国、及び旧ソビエト連邦）にあり（BP, 2010）、2009 年には、無煙炭の世界規模の生産の約半分が中国のみで生産されている（IEA, 2010b）。天然ガス埋蔵量の 75%超は、OPEC 諸国及び旧ソビエト連邦の州が保有し、世界規模のガス市場の 80%は上位 10 輸出国から供給を受けている（IEA, 2010b）。エネルギー資源が、その多くが化石燃料源の採掘または輸入が政治的出来事の悪影響を受ける可能性のある地域にあり、このように過剰集中していることは、輸入側が依存する状況を生じさせるとともに、エネルギー供給停止の危険性を高めている（E. Gupta, 2008）。そうは言っても、輸出国は、化石燃料供給を継続的に売却して収入源を維持するべく、莫大な投資を行っているため、長期間にわたり輸出を制限する可能性は低いことに留意するべきである。

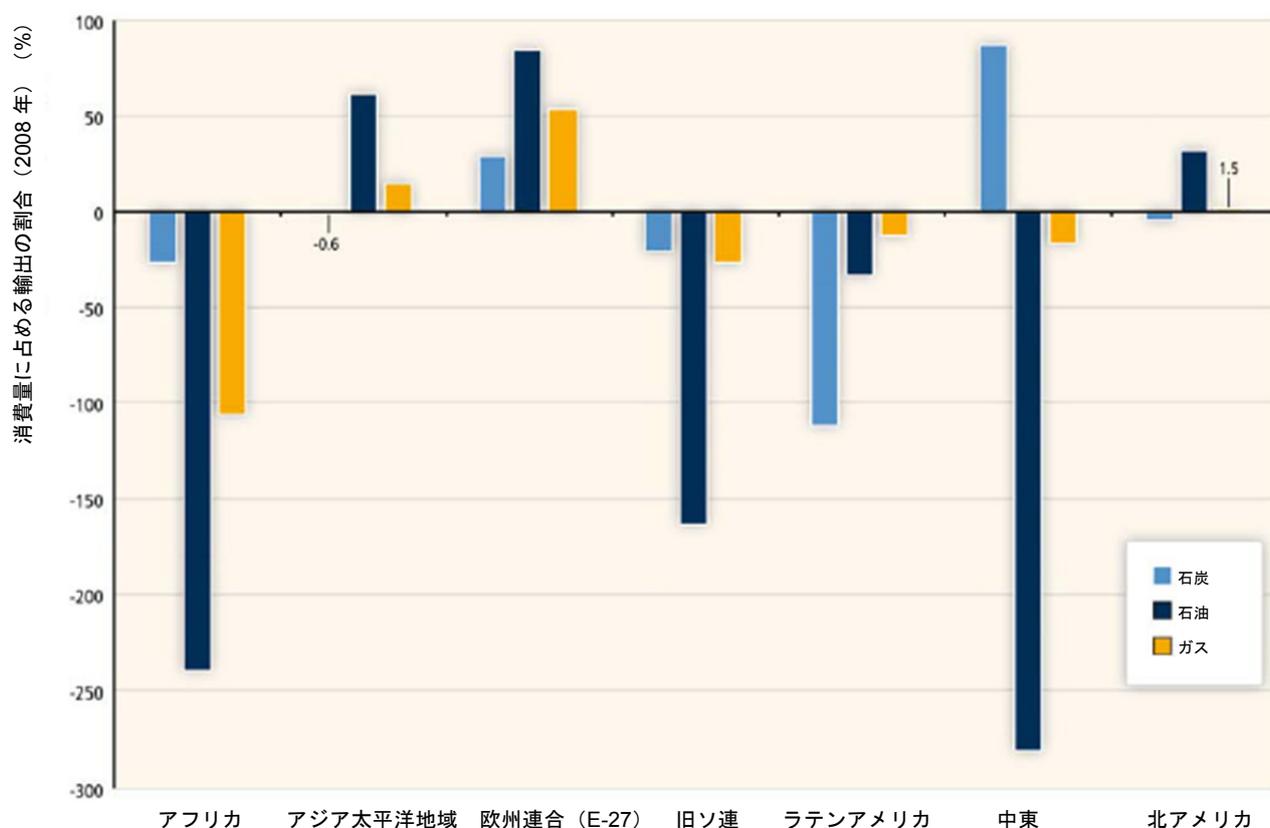


図 9.6: 世界の特定の地域における総一次エネルギー消費量に占める石炭（硬質炭及び褐炭）、原油、天然ガスのエネルギー輸入の割合（2008 年）（%）。マイナスの値はエネルギーキャリアの純輸出地域を示す。BGR（2009）に基づく。

さらに、多数の国々（モルドバ、パキスタン、トリニダード・トバゴ、マダガスカル、インド、ウクライナ、タジキスタン）では、輸入全体に占めるエネルギー輸入の割合は 2000～2005 年の間、25%を上回り、バーレーンでは最高 45%、シエラレオネでは最高 40%に達した（World Bank, 2007b）。関連指標は、エネルギー輸入が輸出収入及び GDP 全体に占める割合である。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（GNESD, 2010; Jain, 2010）。このようにエネルギー輸入に依存すると、経済は潜在的な価格変動リスクに晒される。世界銀行の Energy Sector Management Program (ESMAP) は、石油価格上昇が低所得国及び貧困国に与える影響について評価している（ESMAP, 2005）<sup>8</sup>。表 9.4 は、これらの調査結果をまとめたもので、石油を輸入する開発途上国は石油価格上昇の影響を大幅に受けること、石油価格がバレル当たり 10US ドル（1999～2001 年）上昇すると、最貧国（1 人当たり国民所得 300US ドル（1999～2001 年）以下）で

<sup>7</sup> 石炭輸出は硬質炭である。褐炭は、輸送コストが高いため、一般に取引は行われない。

<sup>8</sup> データは多数の国別のケーススタディに基づくため、必ずしも普遍的に有効なわけではないことに留意を要する。

は GDP がほぼ 1.5%低下しかねないことが示されている。ESMAP の国別のケースでも、灯油、液化天然ガス、及びディーゼルといった商用エネルギーの購入費が変動するパーセンテージが最も高かったのは、最貧困層の家庭だった。

**表 9.4:** 石油価格がバレル当たり 10US ドル (1999~2001 年) 上昇したことによる GDP のパーセンテージの変化<sup>9</sup> (分析結果は収入レベルで分類) (ESMAP, 2005)。

石油純輸入国		石油純輸出国	
一人当たり国民所得 (US ドル (1999~2001 年))	△GDP (%)	一人当たり国民所得 (US ドル (1999~2001 年))	△GDP (%)
<300	-1.47	<300	+5.21
300-900	-0.76	900-9,000	+4.16
900-9,000	-0.56		
>9,000	-0.44		

これらの国々では、再生可能エネルギー技術の取り込みを拡大すれば、外国為替フロー(foreign exchange flows) をエネルギー輸入から地域で生産できない製品 (ハイテクの資本財など) の輸入へ転換する手段になり得る。エネルギーの純輸出国であるその他の開発途上国では、再生可能エネルギーの国内使用を推進すれば、自国の化石燃料基盤の寿命を延長し、製造部門及びサービス部門の強化を行いつつ資源輸出への依存を低下させることで、より時間をかけて経済活動の範囲の多角化を図ることが可能である。

政府は、補助金の調整または最貧層の家庭への特定の金銭的支援、備蓄品の配給を行ったり、供給企業に短期的影響の一部を強制的に負担させたりして、短期的な国際価格の上昇による影響を抑制しようとすることが多い (ESMAP, 2005, 2006, 2008)。これは、政府予算及び企業の安定した供給を維持する能力の双方に大きな影響を与えかねないため (UNEP, 2008b)、長期的な対応は、効率化対策及び多角化により焦点が置かれる。この背景においては、輸入への依存性は特定のエネルギー源に関してのみ生ずるのではないことに留意する必要がある。再生可能エネルギー導入に要する技術は、潜在的な供給分断及び価格変動に対して独自のリスクを有している (Box 9.1 参照)。

#### Box 9.1: 将来の再生可能資源普及に関する原材料へのアクセス

再生可能資源は、化石燃料枯渇を緩和する有力な手段になる可能性があるものの、他の原材料不足が再生可能エネルギー技術の普及拡大の制約になりかねない。欠かせない希少な無機鉱物原材料 (IRM)、とりわけレアメタル及び一部の特殊金属を合理的な価格で安定的に入手出来るかが、全ての産業にとってやがて直面する課題になる。複雑な再生可能エネルギー部門の場合、無機鉱物原材料の需要の構造及び量に特化した評価は利用不可能である。将来の再生可能資源普及にとって懸念となる潜在的分野を特定するには、技術及び可能性のある技術の道筋を大量に検討する必要がある。こうした分析の足がかりとして、いくつかの報告が利用可能である (Frondel et al., 2007; Reuscher et al., 2008; Angerer et al., 2009; Ziemann and Schebek, 2010; US DOE, 2010; EC, 2010; Kristof and Henricke, 2010; Teipel, 2010)。

無機鉱物原材料のサプライチェーンは、脆弱なシステムと理解せざるを得ず、様々な脅威にさらされている。潜在的な市場の歪みの源は、選鉱工程及び一部の主要な鉱物資源国の政治不安である。現在、希土類元素生産の 97%、インジウム生産の 60%、及びガリウム生産の 30%が中国国内で行われ、世界のクロム供給は南アフリカ及びカザフスタンが 56%を押さえている。コバルトの 55%は、アフリカの政情不安な地域で採掘されている (USGS, 2010)。

一部の顕著な例外はあるが (銀など)、将来の無機鉱物原材料の制約は、地理的資源の枯渇よりもむしろ、需給の不均衡から生ずる (Angerer, 2010)。一部の金属は、副産物として生ずる。その大半は、メジャーメタルまたはキャリア金属の鉱石の中に、低濃度で存在する。生産レベルは、採掘を牽引する主な経済的動力としてのメジャーメタルへの需要に左右される (Hagelüken and Meskers, 2010)。典型的な副産物の金属は、ガリウム、ゲルマニウム、インジウム、テルル、及びセレンである。一部の沈殿物では、実際のキャリア金属がないのに、族金属が「結合素子」として生ずることがある。有名な例としては、白金族金属及び希土類元素があり、これらは一般に同時に採掘加工する必要がある。こうした場合、一定の元素への需要増に対応して生産を拡大することは、経済的には実現性がないだろう。その結果、複雑な価格パターン及び供給リスクが生じる。また、たとえば、新興国及び開発途上国が急速に経済的に繁栄した結果や、需要の急増または急減を引き起こすような技術のブレイクスルーが起きるといった予期せぬ需要の変化に対応して、市場の緊張も生じる。

<sup>9</sup> 本表の国の分類は、いかなる地域的な分類にも対応しておらず、適切な換算係数がないことから、US ドル (2005 年) の貨幣的価値に転換は不可能だった。

将来、一定の金属の需要は大幅に増加すると予測される。現在の世界規模の生産全体と 2030 年の未来技術による原材料需要を関連付けた指標では、推測される技術イノベーションの結果、ガリウムの需要は 6 倍、ネオジムの需要は 3.8 倍になると示されている (Angerer et al., 2009; 表 9.5 参照)。ガリウムの需要は、薄層の太陽光集積回路及び高速の集積回路に、ネオジムの需要は、風車の発電機及びエネルギー効率の良い電気モーターに使用される高性能な永久磁石に牽引される。

**表 9.5:** 新たな技術に牽引される、特定の金属の世界規模の需要の推定 (2030 年)。2006 年の世界規模の生産の倍数として表示 (Angerer et al., 2009)。

元素	倍数
ガリウム	6
ネオジム	3.8
インジウム	3.3
ゲルマニウム	2.4
スカンジウム	2.3
白金	1.6
タンタル	1
銀、スズ	0.8
コバルト	0.4
パラジウム、チタン	0.3

代替品の可能性が全くない場合、産業部門の脆弱性は大きい。こうした代替品のない事例として、現在、ステンレススチールのクロム (潮力発電プラント)、耐摩耗性超合金のコバルト、軽量合金のスカンジウム、太陽光パネル用のインジウムすず酸化物の電極に使用されるインジウム、及び強力な永久磁石のネジウムが挙げられる。同時に、産業間で原材料の競合使用も見られる。たとえば、コバルトは充電式リチウムイオンバッテリーの拡大する様々な用途や、バイオマスから合成燃料を生産する際に将来使用されるだろうフィッシャー・トロプシュ法の触媒に必要であり、自動車工学、機械工学、及び医用工学では、非常に耐摩耗性の高い部品として必要不可欠な構成要素である。表 9.6 は、再生可能資源技術で必要不可欠な構成部品の一部に使用される重要な原材料について、その概要を示す。

**表 9.6:** 再生可能資源技術の重要な原材料の内容

用途	構成部品	重要な原材料の内容
風力プラント及び水力プラント	同期発電機の永久磁石	ネジウム、ジスプロシウム、プラセオジム、テルビウム
	耐食構成部品	クロニウム、ニッケル、モリブデン、マンガン
太陽光	透明電極	インジウム
	薄膜半導体	インジウム、ガリウム、セレン、ゲルマニウム、テルル
	色素増感太陽電池	ルテニウム、白金、銀
	電気接点	銀
集光型太陽熱発電 (CSP)	ミラー	銀
燃料電池自動車	水素燃料電池	白金
	電気モーター	ネジウム、ジスプロシウム、プラセオジム、テルビウム、銅
バイオマス液化燃料 (BtL)	フィッシャー・トロプシュ合成	コバルト、レニウム、白金
電力貯蔵	充電式レドックスフローバッテリー	バナジウム
	充電式リチウムイオンバッテリー	リチウム、コバルト
送電系統	低損失の高温超電導ケーブル	ビスマス、タリウム、イットリウム、バリウム、銅

無機鉱物原材料の安定供給に対する将来の重要な貢献は、有効なリサイクルシステムの設立である。耐用年数を経た製品 (電極、バッテリー、または触媒など) は、全般的に金属をかなり豊富に含有している。再生可能エネルギー技術の場合、当初からクローズドリサイクルの開発がきわめて重要になるだろう。これが実現すれば、いくつか

の環境上の利点に加え、希少な原材料の供給状況及び長期的な供給の安定性を強化することができ、金属価格の変動性を緩和しつつ、(通常はよりエネルギーを大量消費する) 一次供給への依存を低下させることが可能だろう (Hagelüken and Meskers, 2010)。

### 9.3.3.2 エネルギー供給の変動性及び信頼性

再生可能エネルギー源は、上記に示した有利な性質だけでなく、いくらかの欠点もある。一部の再生可能エネルギーは、季節変動、日中の変動、または天候の変化のため、利用可能性が短長期で変動する。これは、貯蔵及び熱需要または電力需要の変化に対応するよう技術的にバランスを保つことで準備可能である。それだけでなく、エネルギー市場の制度的背景も最適化可能である。たとえば、地理的多角経営の導入によって、地方の統合された電力市場の地域的変動を平滑化出来るし (Roques et al., 2010)、系統の柔軟性などのその他の様々な解決策も導入されるだろう (8.2.1 節参照)。エネルギー供給システムにおける変動性の制約を克服する解決策は、再生可能エネルギーと従来のエネルギー技術プロジェクトの相対的便益を比較時に考慮されるべき追加コストを伴う可能性がある。

主に一定の OECD 諸国の分析及び運用経験から、風力発電のシェアが低～中程度の場合 (電力の年間平均総需要の最大 20%)、風力エネルギーの統合に概して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。それにもかかわらず、風力エネルギーの統合及び統合コストへの懸念は、風力エネルギー普及に伴い高まる。シェアが低くても、統合上の課題には積極的に対応しなければならない。シェアが低～中程度の場合、利用可能な文献によると、電力システムの変動性及び不確実性を管理する追加コスト、発電の適切性の確保、及び風力エネルギーに対応する送電網新設は、システムによって異なるが、一般に 0.7～3US セント (2005 年) /kWh の範囲である (7.5 節)。

東アフリカ、西アフリカ、南アフリカ、中南米、及び東南アジアで見られる電力を巡る多数の新興の地域間協力は、送電系統の信頼性を強化し、これにより地域の供給を改善する目的がある。ESMAP (2010) では、12 の準地域 (sub region) の統合公共計画を研究した結果、エネルギー安全保障は大半の公共計画で動機となる要因の 1 つだったことが分かった。統合ネットワークが大規模化すれば、コスト効率、取引、及びより一般的な経済発展の点で、便益もあるだろう。

多くの発展途上国ではエネルギー安全保障の定義の一部として、特に人口全体に適切で手頃なエネルギーへのアクセスを提供することを含めており、地域供給の安定性や信頼性にまで概念を拡大させつつ、アクセスの問題と安全保障の問題を関連づけている。国レベルにおいては、地域間の連系はエネルギー供給安定性を高める興味深い手法かもしれないが、それによって、人々のアクセスが改善されたり、あるいは連系された人々に安定した手頃な供給するという意味においては貧困層の人々に自動的に「浸透して滴り落ちる (トリクルダウン理論)」ということにはならない。GNESD では電力セクターの改革がアクセスレベルに与える効果を検証し、改革が結果に結びつくのは貧困世帯の電力へのアクセスを改善するという強い政治的コミットメントがある場合に限ることを見出した。貧困世帯への明示的なフォーカスが、電化のためのファンドを確保するとともに必要不可欠であることが分かった。

電力接続は、近代的なエネルギーのサービスへのアクセスに関する重要な指標として使用されることが多いものの、表 9.7 の世界銀行のデータから分かるように、容量、安定性、及び供給停止の問題という点で家庭の接続が制限されている点を強調するのは重要である。

表 9.7: インフラサービスの信頼性を示す指標 (World Bank, 2007a)。

	サハラ以南のアフリカ	開発途上国
電力接続開通の遅延 (日)	79.9	27.5
電力供給停止 (年間日数)	90.9	28.7
電力供給停止による生産高損失の価値 (出来高のパーセンテージ)	6.1	4.4
自家発電装置を維持する企業 (全体に対するパーセンテージ)	47.5	31.8

このため、開発途上国のミクロレベルでのエネルギー安全保障は、燃料価格上昇の直接的な影響を超え、多数の社会的影響及び経済的影響を与えるだろう (Jain, 2010)。それゆえ、手頃で信頼性のあるエネルギー供給へのアクセスが改善すれば、エネルギーのサービスの向上になるだけでなく、生産性も幅広く高まり、不安定な供給に備えるために、大半の家庭が最大でも 2 つの異なる選択肢を保持する場合、小規模な発電装置から照明と調理の類似システムに到るまでのインフラへの並行投資も不要になるだろう。しかしながら、分散的な再生可能エネルギーは大半の場合、遠隔地及び農村部で競争力を有しており、一般に家庭の大多数が居住する人口密集地では、系統接続の供給が優勢である (Deichmann et al., 2011)。

### 9.3.4 気候変動の緩和と環境、健康への影響の軽減

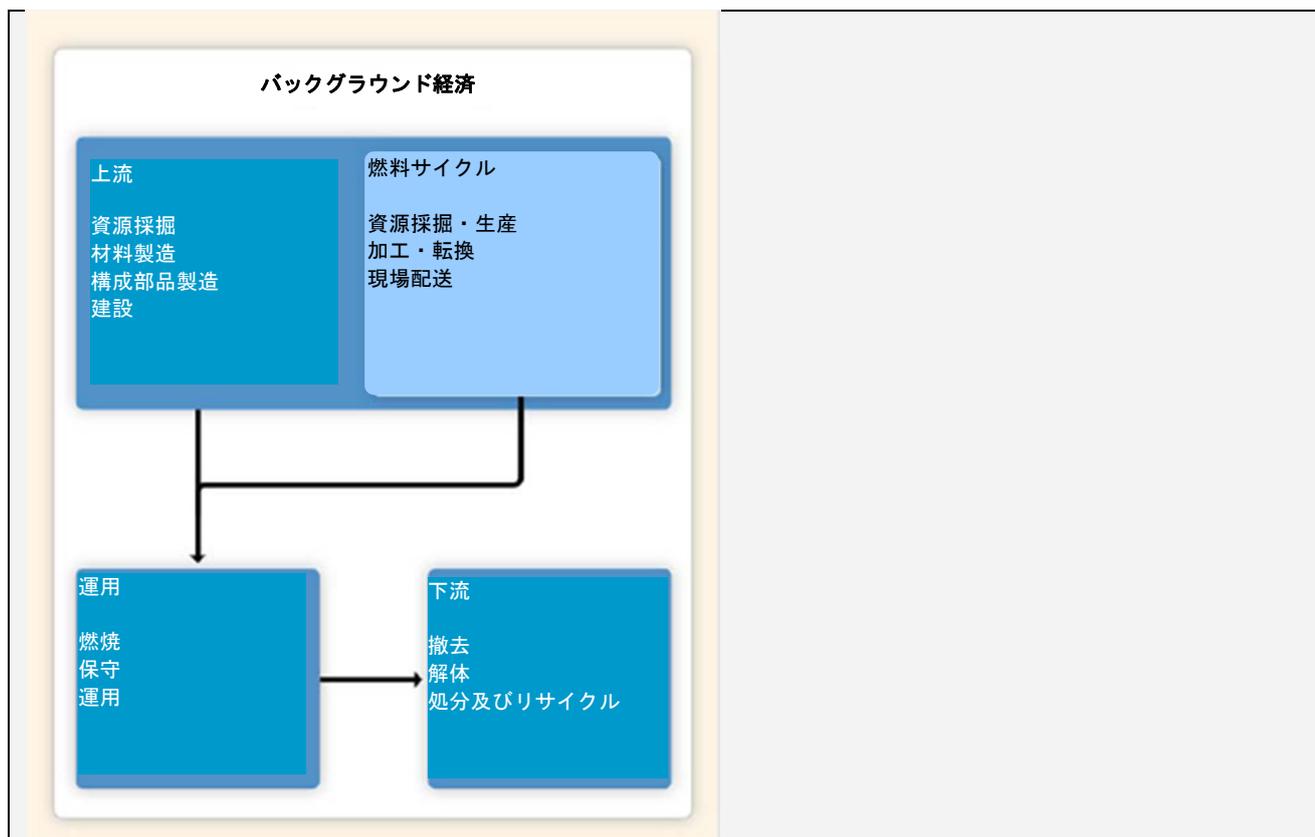
持続可能な開発では、環境の質を確保しつつ、過度な環境被害を回避しなければならない。大規模な技術導入には環境的なトレードオフがつきものであり、ボトムアップの視点からエネルギー技術が環境に与える様々な影響を評価している多くの文献が参照可能である。

本節の目的は、サプライチェーン全体を含め、現在及び近い将来のエネルギー技術に関連する環境への影響に関して、利用可能な証拠を比較検討することである。この検討は主に、ライフサイクル評価 (LCA) による文献に基づく。ライフサイクル評価では、社会的に最適なエネルギー供給のポートフォリオを決定しようとはしない。ライフサイクル評価の目的は、環境負荷の観点からの技術比較を支援することにある。一方、持続可能な戦略及びポートフォリオの開発は、トップダウンでマクロ経済的なシステムの観点から検討する必要がある。ライフサイクル評価のボトムアップ的証明は、カテゴリ全体の様々な技術の環境パフォーマンスに関する貴重な洞察を提示する。同様に、エネルギー・ペイバック・タイム (EPT, Box 9.3 参照) は、個々の技術のライフサイクルのエネルギー効率を示す方法であり、質の高いエネルギー源の特定に有効であるが、より広い経済的及び社会的背景からさらに検討しなければならない。以下の節では、数百のライフサイクル評価研究の結果を検討し、エネルギー技術におけるライフサイクル評価の主な特性及び課題を以下に説明する (Box 9.2)。

#### Box 9.2: エネルギー技術のライフサイクル評価

ライフサイクル評価(LCA)研究は、再生可能エネルギーを、化石系技術及び原子力技術と比較するにあたり、確立された包括的な枠組みを提供する。ライフサイクル評価の方法論は数十年にわたり進化を遂げ、現在は国際的なイニシアチブの支援 (UNEP and SETAC, 2010) を受け、基準に適用されている (Cowie et al., 2006; ISO, 2006)。ライフサイクル評価がエネルギー技術に適用されることは増えたが、方法論上の課題は一部残っている (Udo de Haes and Heijungs, 2007)。

エネルギー技術に関して利用可能な文献の大半は、いわゆる帰属的ライフサイクル評価で、平均的な製品または技術ライフサイクルに関連する環境への影響を調査する (図 9.7)。その結果生ずる主な制限には、再生可能エネルギーの追加容量設置の決定から生ずるだろうエネルギーシステムの変化が除外されることが挙げられる。たとえば、風力発電及び太陽光発電 (PV) では、変動性及び限定的な予測可能性のために、バランス用の余剰電力の必要性が高まり、化石発電プラントがこれらの余剰電力を提供する場合は効率上の損失が生まれる (R. Gross et al., 2007; Pehnt et al., 2008; 3.5.4 及び 7.6.1.3 節も参照)。対照的に、近年発達した帰結的ライフサイクル評価の方法では、技術及び産業間で見られる市場のダイナミックな相互作用を反映させ、技術導入、その他の技術運用の代替と変化に関する限界効果を検討する (Rebitzer et al., 2004; Brander et al., 2008; Finnveden et al., 2009)。しかしながら、帰結的ライフサイクル評価は文献では少数派の研究であり、文脈依存性があるため、利用可能な限定的な結果をここで提示した幅広い評価に組み入れることができない。今度は、バックグラウンドのエネルギーシステム (炭素強度など) の想定及び特性変化が大半の再生可能エネルギー技術のライフサイクル評価に特に影響してくる。これは、ライフサイクルの影響がほとんど全て構成部品の製造段階に起因するためである (Lenzen and Wachsmann, 2004 参照)。さらなる課題として、大規模な相互連結接続のエネルギーシステム評価時に重複算入の可能性があること (Lenzen, 2009)、及びシステム境界の問題 (Suh et al., 2003; Lenzen, 2008) などがある。



**図 9.7:** エネルギー技術の一般的なライフサイクルステージの説明。燃料サイクルは化石燃料と原子力のチェーン、及びバイオエネルギーに適用される。

(たとえば、図 9.8 から分かるように) 公表済みのライフサイクル評価結果に大幅なばらつきが生ずる原因として、技術特性 (設計、最大出力数、変動性、サービスの耐用年数、及び成熟度)、地理的立地、バックグラウンドのエネルギーシステムの特長、データ出典の種類 (経験的か理論的か)、ライフサイクル評価技術の差異 (プロセスに基礎を置いた方法または投入産出方法など)、及び主要な方法と想定 (副産物の配分、排出物の回避、研究の範囲) も挙げられる。これらを重要な注意点として着目すると、特定のエネルギー技術の結果を説明する際の不確実性や変動性の根本的な理由が主眼点となるだろう。

ライフサイクル評価では、現在のエネルギーシステムで評価された特定の技術の製造、運用、及び解体に関連する環境面での重要性の詳細な調査が可能である。調査を行うにあたり、ライフサイクル評価は、エネルギーの均等化コスト (LCOE; 10.5.1 節参照) など、現在のコストを重点的に評価する経済予測を補完する。再生可能エネルギー技術の将来のコストが (10.5.2 節参照。研究開発 (R&D) 及び実践的学習などにより) 減少するだろう道筋と同様に、再生可能エネルギー技術の製造、運用、及び解体の方法も将来的に変化するだろう。結果として、様々な再生可能エネルギー技術の拡大を図る戦略を包括的に評価する際は、これらの予測される改良を考慮するよう努力すべきである。バックグラウンドのエネルギーシステムが重要でない変化であれば、帰結的ライフサイクル評価で解決可能であり (Box 9.2 参照)、バックグラウンド・システムの継続的な進化に起因する重要な変化は、シナリオ分析で説明可能である (10.2 及び 10.3 節参照)。シナリオ分析を拡大し、様々な技術の建設、運用、及び解体に付随するライフサイクル排出量及びエネルギー要件を明示的に取り込めば、統合モデルで、エネルギーシステムがその関連するライフサイクル排出量及び環境負荷全体と混合した場合に関する有益な情報を示すことが出来るだろう。

本章の範囲でエネルギー供給技術に関連する環境への影響<sup>10</sup>全てを扱うことは、不可能である。本節は、発電及び液体輸送燃料を中心に論ずる。これらの分野は、本報告書の技術の章も含め、文献で最も頻繁に報告されているためである。発熱及び家庭用エネルギーは、大気汚染及び健康に関する評価で取り上げるが、公表済みの研究が少ないため、大半のその他の節では省略した。暖房用燃料のライフサイクルの影響については、燃料の採掘及び加工という掘削・調査段階での影響が、対応する輸送チェーンまたは発電チェーンのものと、多くの場合は似ている。しかしながら、一部の再生可能技術 (ヒートポンプまたはパッシブ太陽熱など) は、違う特性を示す。輸送燃料の議論は、バイオ燃料に重点が置かれる。現状では、成熟した大規模な用途に使用可能と見なせる唯一の再生可能燃料

<sup>10</sup> 本小節内で、影響という用語は、ライフサイクル評価分野で定義される厳密な意味で使用されているわけではない。

であるためである。電気自動車充電用の再生可能発電、及びその他の将来の道筋については、8.3.1 節で議論する。技術統合の選択肢については、第 8 章で幅広く議論する。

様々な影響のカテゴリに使用可能なデータは、出典の数及び質で幅広く異なっている。温室効果ガスは一般に、十分に扱われている (9.3.4.1 節)。非常に多くの研究で、大気汚染物質の排出 (9.3.4.2 節)、関連する健康への影響 (9.3.4.3 節)、及び運用に必要な水使用 (9.3.4.4 節) 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、水中への (ライフサイクルの) 排出、土地利用 (9.3.4.5 節)、及び健康への影響については、証拠は乏しい。生物多様性及び生態系への影響は、比較のための定量的基礎が全く利用不可能であることから、潜在的に懸念される分野を定性的にまとめるにとどまる (9.3.4.6 節)。通常運用とは対照的な事故関連の負荷を説明するため、9.3.4.7 節ではエネルギー技術関連のリスクの概要を提示する。

**Box 9.3: 発電のエネルギー・ペイバック**

現代文明の発展において質の高いエネルギー源の果たす役割は、広く認識されている。以下に示すエネルギー・ペイバック・タイム (EPT) 及び類似の概念は、技術または燃料のエネルギー効率を計る方法である。以下は、発電プラントの製造、運用、及び解体まで対象にしたエネルギー (「総」エネルギー) 及びエネルギー・ペイバック・タイム (技術が自己の総エネルギーを回収する運用時間) の観点から見たそのエネルギー出力について、両者の間のバランスの特性を示している。燃焼技術の場合、燃料の採掘及び加工のエネルギー要件を含むが、燃料自体のエネルギー量は含まない。エネルギー・ペイバック・タイムは、エネルギー収支比 (EROEI) またはエネルギー比といったその他の一般的な測定基準法と密接に関連する。エネルギー比は、以下に示すプラントの耐用年数の想定に左右される (定義及び詳細な説明については、Annex II を参照)。たとえば、風力及び太陽光発電 (PV) などの一部の再生可能エネルギー技術では、技術的進歩及び規模の経済の恩恵で、エネルギー・ペイバック・タイムがここ数年で急激に減少している。化石技術及び原子力技術は、燃料の採掘及び加工を継続的に行う必要がある点が特徴的である。在来型の燃料供給が減少し、非在来型の燃料の割合が増加するなか、このことは益々重要な影響を持つだろう (Farrell and Brandt, 2006; Gagnon, 2008; Lenzen, 2008)。

ライフサイクル評価の影響の推定値における変動性のありがちな原因に加え (Box 9.2)、表 9.8 の範囲は主に、以下の変動が原因になっている。

- ・燃料の特性 (水分量など)、冷却方法、大気温度と冷却水温度、及び負荷変動 (石炭及びガス)
- ・ウランの鉱石等級及び濃縮技術 (原子力)
- ・結晶シリコンまたはアモルファスシリコンの材料 (太陽光発電 (PV) 電池)
- ・出力定格の観点から見た規模の経済 (風力)
- ・貯蔵の容量及び設計 (集光型太陽熱)

また、場所に特有の設備利用率は、エネルギー・ペイバック・タイムに主に関係する。これは特に、変動性のある再生可能エネルギー技術に該当する。

**表 9.8: 発電技術のエネルギー・ペイバック・タイム及びエネルギー比。バイオマス発電は除外。文献では、バイオマス発電のエネルギー収支ではなく、温室効果ガスについてもほぼ立証を行い、ほぼバイオ燃料のサイクルのみを扱っているためである (Lenzen, 1999, 2008; Voorspools et al., 2000; Lenzen and Munksgaard, 2002; Lenzen et al., 2006; Gagnon, 2008; Kubiszewski et al., 2010)。**

技術	エネルギー・ペイバック・タイム (年)		最も一般的な耐用年数 (年)	エネルギー比 (kWh <sub>e</sub> /kWh <sub>prim</sub> )	
	値 (低)	値 (高)		値 (低)	値 (高)
褐炭 (新規の未臨界)	1.9	3.7	30	2.0	5.4
黒炭 (新規の未臨界)	0.5	3.6	30	2.5	20.0
黒炭 (超臨界)	1.0	2.6	30	2.9	10.1
天然ガス (開放型サイクル)	1.9	3.9	30	1.9	5.6
天然ガス (コンバインドサイクル)	1.2	3.6	30	2.5	8.6
重水炉	2.4	2.6	40	2.9	5.6
軽水炉	0.8	3.0	40	2.5	16.0
太陽光	0.2	8.0	25	0.8	47.4
集光型太陽熱	0.7	7.5	25	1.0	10.3
地熱	0.6	3.6	30	2.5	14.0
風力	0.1	1.5	25	5.0	40.0
水力発電	0.1	3.5	70	6.0	280.0

**9.3.4.1 気候変動**

本節では、再生と非再生の発電技術及び液体輸送燃料から排出されるライフサイクルの温室効果ガス排出量に関して、利用可能な推定値の検討を行う。土地利用変化 (LUC) に関連するプラス及びマイナスの排出量は、バイオ燃料を中心に議論が行われるにもかかわらず、両方のレビューで省略され、個別に議論されている。

土地利用変化関連の温室効果ガス排出は潜在的にどの技術にも関連するが、土地の相当規模を変換し、その土地の炭素ストックの変化を誘起する技術にとって最も重要である。バイオエネルギーシステムでは、土地利用変化の影

響は、状況及び想定によるが、潜在的な温室効果ガス排出削減の便益を低下、無効化、または強化可能だろう。水中のバイオマスまたは有機堆積物から排出されるメタンは、特定の水力発電の貯水池にとって、重大な排出物質となり得る。しかし、水力発電の貯水池から実際に排出される正味の量については、未解決の状況である（詳細は5.6.3節参照）。石炭露天掘（Fox and Campbell, 2010）や石油生産（Yeh et al., 2010）などの化石燃料の資源掘削に関する土地利用変化の調査については、初期段階である（Gorissen et al., 2010）。

土地利用変化に関する温室効果ガス排出は、以下の理由のため、レビューから除外される。

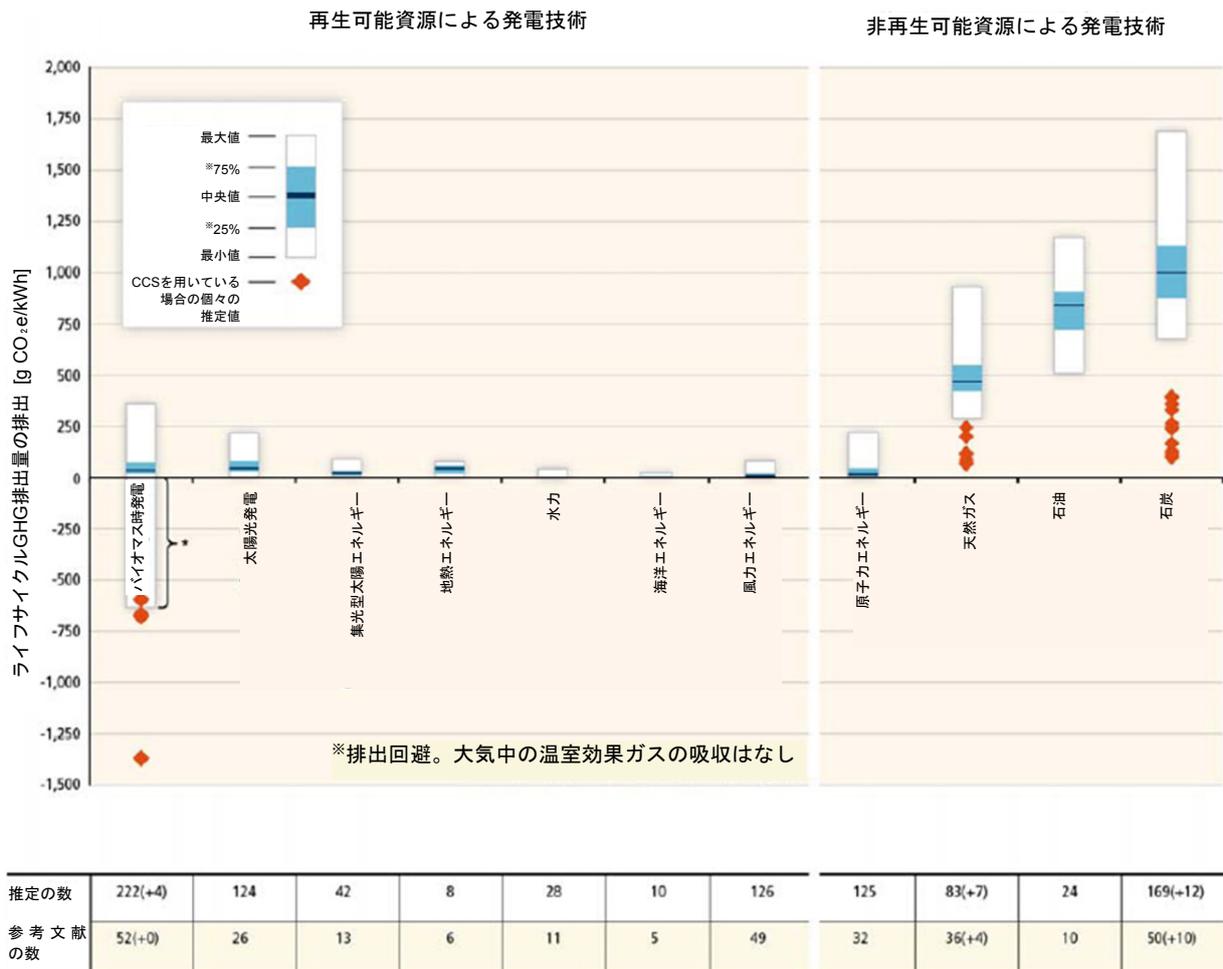
- 1) 本節で評価された電力技術及び燃料全てを網羅した利用可能な証拠に大きなギャップがあるため、一貫した比較ができない。
- 2) 土地利用変化による温室効果ガス排出の推定の不確実性は、技術自体の製造、運用、及び解体に関わる温室効果ガス排出をより直接的に理解することに深く関連する。

土地利用変化の推定値の不確実性は、現在未解決で一貫性のない出典の多くに原因がある。たとえば、モデリングと推定の方法、データとモデリングの分解能（空間、時間、カテゴリ）、システム境界と耐用年数、一次製品、副産物と残渣での影響の配分、政策背景と市場規模と特性に関する想定、技術性能、バックグラウンド・エネルギーシステムと比較参照ケースの予測、及び評価の計画対象期間などが考えられる（Cherubini et al., 2009; Kline et al., 2009; Hertel et al., 2010）。

特にバイオエネルギーの温室効果ガス排出の既算値に関連するその他の不確実性には、肥沃化と土壌からの  $N_2O$  排出（Crutzen et al., 2008; E. Davidson, 2009）、現在と将来のモデルと規制に比較して、技術が実際にどの程度性能を発揮するか、商用規模のリグノセロース系原材料と燃料の生産不足、その他の潜在的な間接的影響（再生可能エネルギー導入後のエネルギー価格変化によるエネルギー消費のリバウンド効果など）（Rajagopal et al., 2010）を含む。これらの不確実性は、Box 9.2 で説明したライフサイクル評価に関連する注意とともに、9.3.4.1 節の証拠検討時に、念頭に置くべきである。

#### 発電技術のライフサイクル温室効果ガス排出

本節は、世界の全地域を対象とした公表済みのライフサイクル評価の包括的レビューから得た証拠を総合的に扱う（文献収集、スクリーニング、及び分析方法は Annex II 参照）。土地利用変化を考慮しない場合、ライフサイクル温室効果ガス排出量は、再生可能エネルギー源を用いた発電技術では電気出力のユニット当たり（ $g\ CO_2eq/kWh$ ）に標準化され、一般に、化石燃料系資源の発電技術に比べかなり低いことが分かっている（図 9.8）。原子力は、再生可能資源の発電技術と同様の四分位範囲（IQR; 75 パーセンタイルの値から 25 パーセンタイルの値を減算したもの）及び中央値になる。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  $100g\ CO_2eq/kWh$  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  $4\sim 46\ g\ CO_2eq/kWh$  である。ただし、これらの技術のいくつかを検証した参考文献の数は少ない。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。これは主に、バックグラウンドのエネルギーシステム、ウランの鉱石等級の想定（原子力）、及び準最適な生産プロセスの事例（太陽光、バイオマス発電）の違いのためである。それにもかかわらず、化石燃料技術の範囲と重なるのは、バイオマス発電の最も高い推定値の範囲のみである。また、全再生可能エネルギーの代表値の傾向は、化石燃料（二酸化炭素回収・貯留なし）に比べ  $400\sim 1,000g\ CO_2eq/kWh$  ほど低い。



**図 9.8:** 広範なカテゴリの発電技術に加え、二酸化炭素回収・貯留を組み合わせた一部技術におけるライフサイクル温室効果ガス排出量 (g CO<sub>2</sub>eq/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<sup>11</sup>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関連するが、あらゆる普及条件の検討には、基礎となる理論的極値、実際の極値 (practical extrema)、あるいは実際の代表値の傾向に必ずしも関連しない。

燃焼後の二酸化炭素回収・貯留の事例は、基本技術と二酸化炭素回収・貯留の併用に関する排出を示す。そのライフサイクル温室効果ガス排出量は、推測されたとおり、基本技術の排出量に比べかなり低く、化石燃料系技術の場合、ライフサイクル温室効果ガスの総排出量を多くの再生可能エネルギー技術の範囲に近づけることが可能である。バイオマス発電と二酸化炭素回収・貯留を併用すると、温室効果ガス排出量は大幅にマイナスになる（土地利用変化は考慮しない場合）。二酸化炭素回収・貯留は现阶段では成熟した技術とは言えないため、隔離期間及び漏洩率に関する想定は、図 9.8 に示す変動性に寄与する。

ライフサイクルの各ステージから排出される温室効果ガス排出量の割合は、再生可能資源または非再生可能資源の発電技術で異なる。化石燃料系技術の場合、施設運用中の燃料燃焼により温室効果ガスの大部分が排出される。原子力技術及び再生可能エネルギー技術の場合、温室効果ガス排出の大部分は、運用の掘削・調査段階で生ずる。バイオマス発電では、大半の排出は原材料生産時に発生するので、農業慣行が重要な役割を果たす。原子力では、燃料加工の段階が最も重要で、温室効果ガス排出はかなりの部分が建設及び解体に関連する。その他の再生可能技術では、ライフサイクル温室効果ガスの大半が構成要素製造時に、そしてそれよりは少ない量が施設建設時に排出される。バックグラウンドのエネルギーシステム（発電部品製造など）は、時の経過とともに進化するため、現在の推定値は将来の状況を反映しないだろう。

<sup>11</sup> SRREN 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、排出回避では大気中から温室効果ガスを取り除くものではない。

評価された技術のライフサイクル温室効果ガス排出の推定値に見られる変動性は、基礎となる文献における方法論の多様性に関連する要因と (Box 9.2 参照)、評価された技術の多様性に関連する要因の双方が原因である。後者の要因をさらに詳細に説明すると、燃焼技術 (化石燃料及びバイオマス発電) の場合、変動性は、最大出力 (最大出力は、その他の多くの技術でも、温室効果ガス排出に影響を与える)、燃焼効率、燃料の炭素含有量、及び燃料の成長や採掘、輸送の条件の差異により最も顕著に生ずる。バイオマス発電はさらに、バイオマス原材料の準拠使用に関する想定に影響を受ける。これはたとえば、有機物を埋立せずに済む場合、このバイオマスを発電に使用すれば、メタンの排出回避と見なせる (図 9.8 の非二酸化炭素回収・貯留、負の排出推定値を参照)。太陽光発電 (PV) の変動性は、太陽電池設計の急速な進化及び多様化による。太陽熱、地熱<sup>12</sup>、海洋、及び風力の技術の場合、発電場所の一次エネルギー資源の質が電力出力に大きな影響を与える。

発電技術のライフサイクル温室効果ガス排出に関する知見は、まちまちな状況であることが分かっている。以下の概要は、多数の参照及び推定値に関する評価、推定値の分布密度 (上位四分位点及び中央値に関連する範囲)、ライフサイクル温室効果ガス排出という駆動要因に対する理解に基づく。化石燃料系技術及び風力のライフサイクル温室効果ガス排出は、十分理解されていると思われる<sup>13</sup>。バイオマス発電、水力、原子力、一部の太陽光発電 (PV) 技術、及び集光型太陽熱発電 (CSP) のライフサイクル温室効果ガス排出では、比較的良く知られているが、知見と実証研究のニーズに潜在的に重要なギャップがいくらかある。地熱及び海洋エネルギーに関する知見は、現状は予備的なものである。

### 特定の石油系燃料及びバイオ燃料のライフサイクル温室効果ガス排出

本節では、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) と、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 (エタノール及びフィッシャー・トロプシュ・ディーゼル) のライフサイクル温室効果ガス排出の評価を推論した文献を比較する。第一世代のバイオ燃料の排出量の範囲は、最先端の技術及び短期的な技術向上の予想を示し、リグノセルロース系バイオマス由来の次世代のエタノール及びフィッシャー・トロプシュ・ディーゼルは、商用規模のバイオ精製所を想定した概念設計を示す。

1MJ の燃料を生産し乗用車走行に使用した場合において排出が報告された。これらは、自動車の走行 km 当たりの比較とほぼ同じ結果が出る。なぜなら、乗用車の燃料効率 (MJ 当たりの走行距離) は、同一の乗用車で評価対象のバイオ燃料及び石油系燃料を代替して使用した場合を考へても、事実上変わらないためである (Beer et al., 2002; Sheehan et al., 2004; CARB, 2009)。直接的または間接的な土地利用変化からの温室効果ガス排出は全ての燃料で除外されており、以下の小節で議論を行う (2.3.1 及び 2.5.3 節も参照)。異なる乗り物の形態に使用される様々な燃料 (水素及び電力を含む) のライフサイクル温室効果ガス排出を比較する際は、8.3.1 節も参照すべきである。電気自動車は、再生可能源の電力が使用される場合、既存のバイオ燃料自動車に比べ、ライフサイクル温室効果ガス排出は少なく、炭素集約的な化石燃料系発電が使用される場合は石油系燃料に比べて排出が多くなる可能性があることに、留意を要する (Creutzig et al., 2009; van Vliet et al., 2011)。

検討した研究の結果からは、潜在的な土地利用変化関連の温室効果ガス排出を考慮しない場合、第一世代及び次世代のバイオ燃料は、様々な原油から生産される石油系燃料に比べ、直接のライフサイクル温室効果ガス排出は少ない (図 9.9)。比較すると、バイオ燃料の推定値の範囲は、ガソリン及びディーゼルよりもかなり広い。これは、活用する原材料の種類、土地生産性の変動、作物の管理慣行、転換プロセスと加工エネルギー源の変動、つまり肥沃化による N<sub>2</sub>O 排出の不確実性、及びライフサイクル評価の方法論の選択 (副産物の配分方法及びシステム境界の定義など) といった多数の要因に帰すると考えられる<sup>14</sup> (Williams et al., 2009; Hoefnagels et al., 2010; Cherubini and Strömman, 2011; Box 9.2 も参照)。

事実上全てのバイオ燃料でライフサイクル温室効果ガス排出の範囲が大幅に重なるが、全てのバイオ燃料システムが、石油と比較した場合にライフサイクル温室効果ガス排出を同じ効率で削減出来るわけではない。たとえば、ブラジルのサトウキビエタノールは、小麦及びトウモロコシから生産されたエタノールに比べ、温室効果ガス排出は少ない (von Blottnitz and Curran, 2007; S. Miller, 2010)。推定値は、菜種及び大豆から生産されたバイオディーゼると、合理的に比較可能である (Hill et al., 2006; CONCAWE, 2008; Huo et al., 2009a; Hoefnagels et al., 2010)。土地利

<sup>12</sup> また、地熱流体の構成及び融解した高い二酸化炭素濃度のため、一部の既存の組成でも運用時に多量の二酸化炭素が排出されるだろう。これは、評価されたライフサイクル評価文献には、反映されていない。詳細は、4.5.1 及び 4.5.2 参照。

<sup>13</sup> 2010 年後半に、天然ガスの温室効果ガス排出プロフィールの改定の可能性をめぐり、論争がいくらか生じた。一部のオブザーバーは、天然ガスの掘削・調査段階での生産及び輸送に関連するメタン漏洩が、過去の分類に比べて高いと考えている。この論争の見解に関しては、EPA (2010a) 及び Lustgarten (2011) 参照。

<sup>14</sup> 2.3 及び 2.5 で、バイオ燃料の技術及び配置 (ライフサイクル温室効果ガス排出も含む) について、より詳細に検討している。

用変化を考慮しない場合、パームオイルのバイオディーゼルは、パームのプランテーション及びパームオイル廃液 (POME) の管理が適切であれば、菜種及び大豆から生産されたバイオディーゼルと同様のライフサイクル温室効果ガス排出になる可能性があり、パームオイル廃液から排出されたメタンが回収されない場合には、これらのバイオディーゼルに比べて高くなる可能性があるだろう (Beer et al., 2007; CONCAWE, 2008; Wicke et al., 2008; Achten et al., 2010; Hoefnagels et al., 2010)。ジャトロファのバイオディーゼルの温室効果ガス推定値の範囲は、パームオイルのバイオディーゼルと比較可能である (Whitaker and Heath, 2010)。

リグノセルロース系の原材料及び燃料は、商用規模の生産が行われていないため、これらのシステムのライフサイクル温室効果ガス排出量の推定値は高い不確実性を伴う。不確実性の分析では、リグノセルロース系バイオ燃料で予想される一部のサプライチェーンの温室効果ガス排出は、サプライチェーンの様々な要素で最悪の状況を組み合わせたと想定する場合 (バイオマスの生産慣行の管理が不適切、バイオマスの事前加工にエネルギーを大量使用など)、図 9.9 に比べ高くなり得ることが示されている (Soimakallio et al., 2009; Hsu et al., 2010)。しかしながら、十分に管理された状況下では、リグノセルロース系のバイオ燃料の温室効果ガス排出は、穀物エタノール及び油糧種子のバイオディーゼルに比べ、低くなる。

燃料のライフサイクル温室効果ガス排出全体は、土地利用変化の直接、間接的影響の兆候及び規模によって、決定的に左右される。これらは、本節で論じたバイオ燃料による石油系燃料の代替から生ずる温室効果ガス削減の便益を、潜在的に無効にするか、あるいは増やす可能性があるだろう (Berndes et al., 2010)。

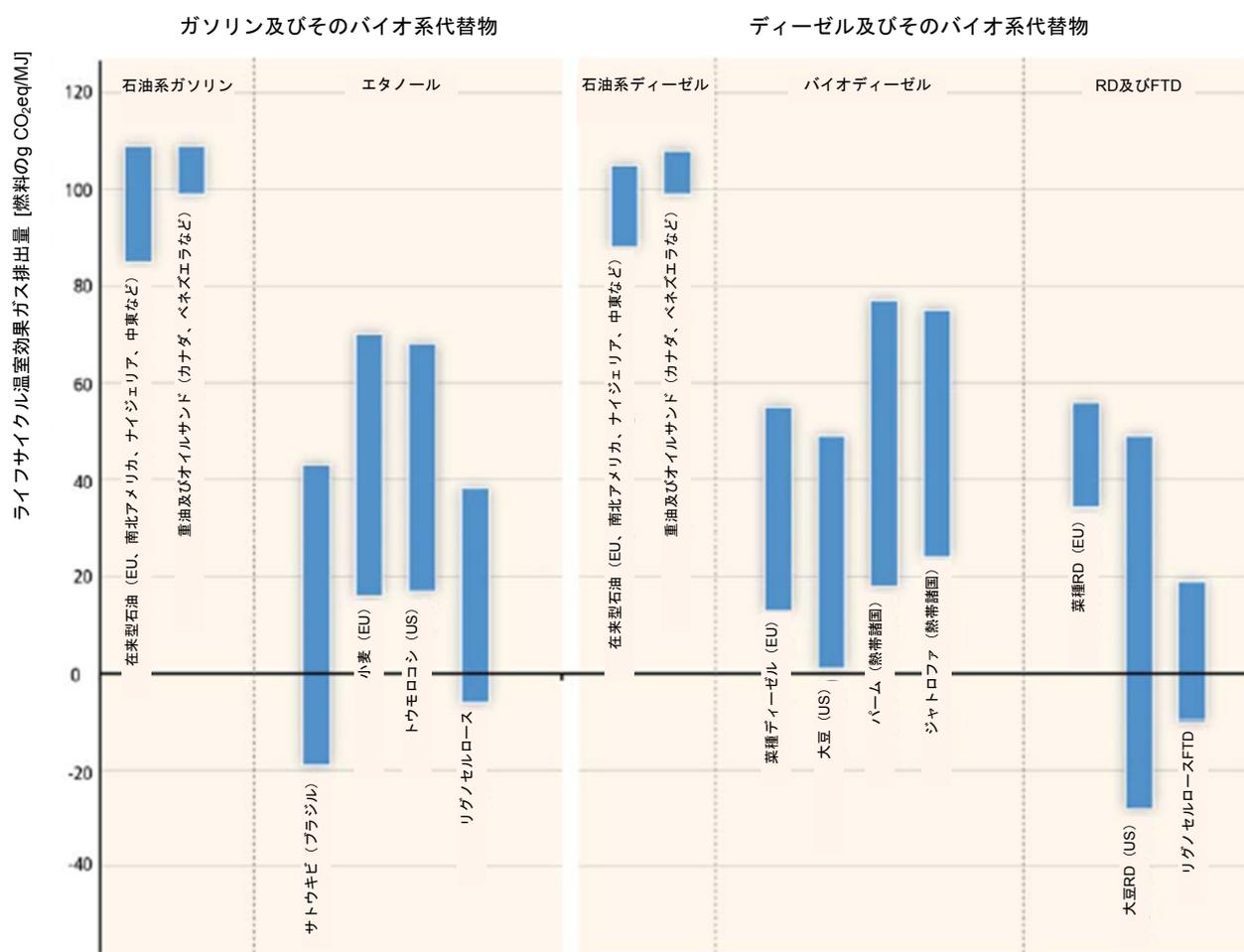


図 9.9: 石油系燃料、第一世代のバイオ燃料、及び特定の次世代のリグノセルロース系バイオ燃料のライフサイクル温室効果ガス排出の範囲を、土地利用変化を考慮せずに図示したもの (描写した推定値の出典: Wu et al., 2005; Fleming et al., 2006; Hill et al., 2006, 2009; Beer et al., 2007; Wang et al., 2007; CONCAWE, 2008; Macedo and Seabra, 2008; NETL, 2008, 2009; CARB, 2009; Hoefnagels et al., 2010; Hsu et al., 2010; Kaliyan et al., 2010; Larson et al., 2010; Neely et al 2010)。

注: FTD = フィッシャー・トロプシュ・ディーゼル, RD = 再生可能ディーゼル (加工及び製品性質の点で、バイオディーゼルとは相違)。図 2.10 及び上図 (サトウキビエタノール, FTD など) 双方で共通する原材料及び燃料カテゴリでは、引用した参照及び温室効果ガス排出の推定値の範囲は、一致する。

### 土地利用変化関連の温室効果ガス排出及びバイオエネルギー

ある土地被覆の種類や使用を別の種類や使用に転換すると、土地の温室効果ガス貯蔵及び流量に間接的また直接的な影響を与え、世界規模の温室効果ガス排出に歴史的に大きく寄与する (IPCC, 1996b; Le Quere et al., 2009)。農業システム及び森林システムは、これらの土地利用変化を牽引する重要な要因であり、エネルギーシステム (特にバイオエネルギーだが、貯水式の水力発電、採鉱及び石油採掘も同じく該当) を追加的なストレス要因として伴う (Schlamadinger, 1997)。土地利用変化による温室効果ガス排出は定量化が難しいものの、調査及び評価を実施することは重要である。なぜならば、土地利用変化関連の温室効果ガス排出を考慮する際、化石エネルギー源と比較すると、バイオエネルギー使用増から得られる温室効果ガス排出削減の潜在的な便益が一部または全部が失われる恐れがあるためである。

直接的土地利用変化 (dLUC) は、バイオエネルギーの原材料生産によって既存の土地利用が変更される場合に発生し、結果的に地上及び地下の炭素ストックに変化をもたらす。直接的土地利用変化に関連する温室効果ガス排出は、以前の土地利用、土壌の種類、地域の気候、作物の管理の風習、及び栽培するバイオエネルギー作物など、場所により異なる条件に依存する。図 9.10 の例では、直接的土地利用変化に関連する温室効果ガス排出を決定する際は、栽培するバイオエネルギー原材料の種類よりも、元々の土地利用が一般的により重要な要因であることが示されている。ある特定の土地種類 (熱帯雨林及び泥炭地など) を転換すると、非常に多量の温室効果ガスが排出される可能性がある。逆に、(リグノセルロース系原材料の使用時に) 荒廃地を使用したり、元農地も時に使用したりすれば、炭素ストックを強化可能である。直接的土地利用変化に関連する温室効果ガス排出は、どのようなものであれ、バイオエネルギー使用による温室効果ガス排出が削減の便益が保証される前に、解消しなければならない (Gibbs et al., 2008)。図 9.10 で報告される結果は、30 年の時間枠で平均した合計である。ここで検討された分析では、温室効果ガスの気候変動の影響の重要な決定要因である、温室効果ガス排出の時間固有の特徴 (time signature) (ロングテールにより追跡される初期信号) を考慮していない。

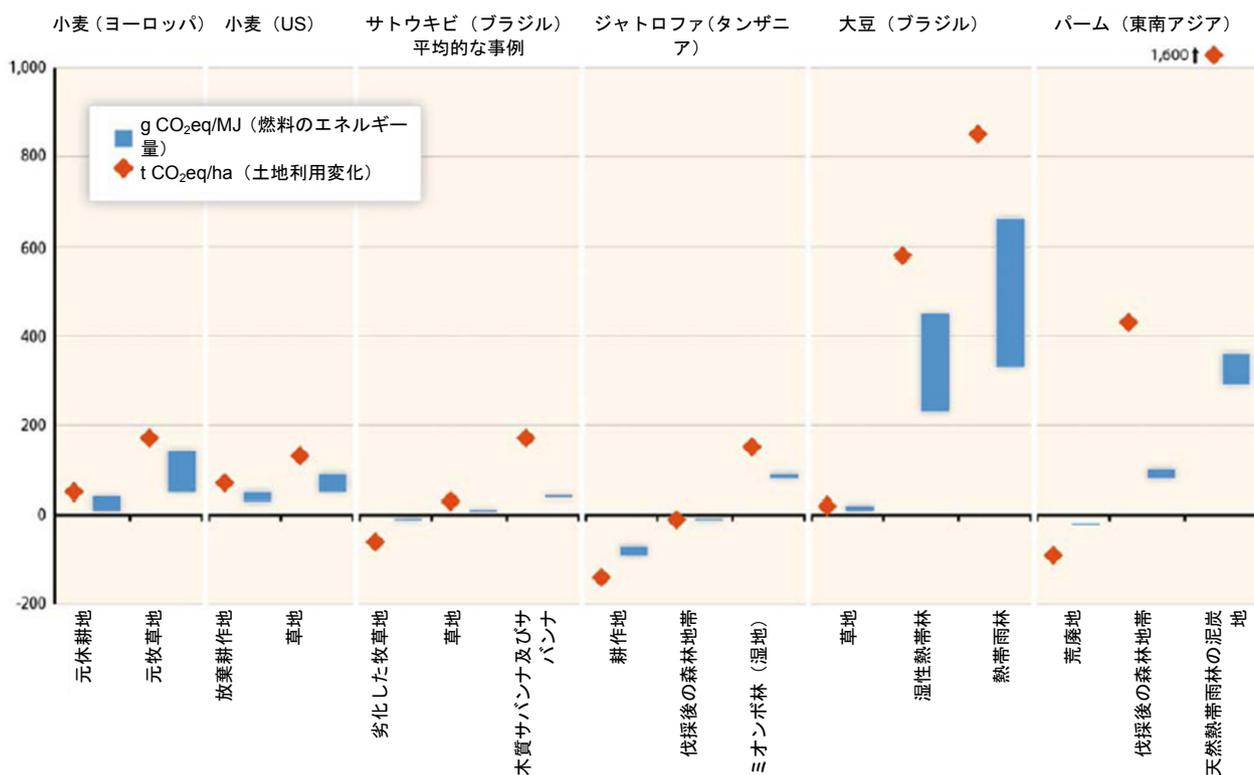


図 9.10: 特定の土地利用の種類及び第一世代のバイオ燃料 (エタノールとバイオディーゼル) 原材料による直接的土地利用変化関連の温室効果ガス排出推定値を図示。Hoefnagels et al. (2010) 及び Fargione et al. (2008) から抜粋した結果は、必要な場合、Hoefnagels et al. (2010) 及び EPA (2010b) のデータを用いて (30 年の時間枠の想定で) 機能ユニットに変換される。範囲は、様々な副産物配分方法 (質量値、エネルギー値、市場価格による配分) に基づく。

間接的土地利用変化 (iLUC) は、農業製品の生産レベルが変化する場合 (つまり、農地がバイオエネルギー原材料生産に転用され、食料、飼料、または繊維生産が減少する場合) に発生し、本来の動力となる刺激がおこる場所以外で、市場が媒介する土地管理活動 (直接的土地利用変化) への移行につながる。間接的土地利用変化は、直接的に観察可能ではないためモデル化が複雑であり、単一の要因に帰することは難しい。この複雑性の重要な側面として、モデルの地理的分解能、バイオエネルギーと他の農業システムの相互作用、システムが市場及び政策の変化

にいかに関与するか、世界の多様な関係者の取る行動に対する社会的責任及び環境への責任に関する想定などが挙げられる。たとえば、間接的土地利用変化による温室効果ガス排出の推定値は、土地被覆のモデル化方法に左右される可能性がある。

より高い地理的解像度や多数の土地被覆の種類を使用するモデルは、たとえば牧草地及び森林のみを考える低解像度のものよりも推定値が低くなり、不確実性の範囲も狭まる傾向がある (Nassar et al., 2009; EPA, 2010b)。排出の推定値も、将来のバイオエネルギー市場が大きく、成長率も高いと想定する場合、高くなる傾向がある。評価方法は類似しているにもかかわらず、同様のバイオ燃料の組み合わせに対し、Al-Riffai et al. (2010) は  $25\text{CO}_2\text{eq/MJ}$ 、Hiederer et al. (2010) は  $43\text{CO}_2\text{eq/MJ}$  の土地利用変化 (直接及び間接) の影響を報告している。この原因の一部には、バイオ燃料市場の成長規模の評価が異なっていることがあった (Al-Riffai et al. (2010) は  $0.3\text{EJ}$ 、Hiederer et al. (2010) は  $0.9\text{EJ}$ )。

バイオエネルギーシステムによる間接的土地利用変化のモデリングに課題はあるが、方法は改善されてきており、生物物理学のデータセットが作成されてきた。代表的な土地利用変化 (直接及び間接) に関連する温室効果ガス排出の実例的な推定値の一部を、図 9.11 に例として示す。更なる土地利用変化に関する公表済みの推定値及び議論については、2.5.3 節参照。

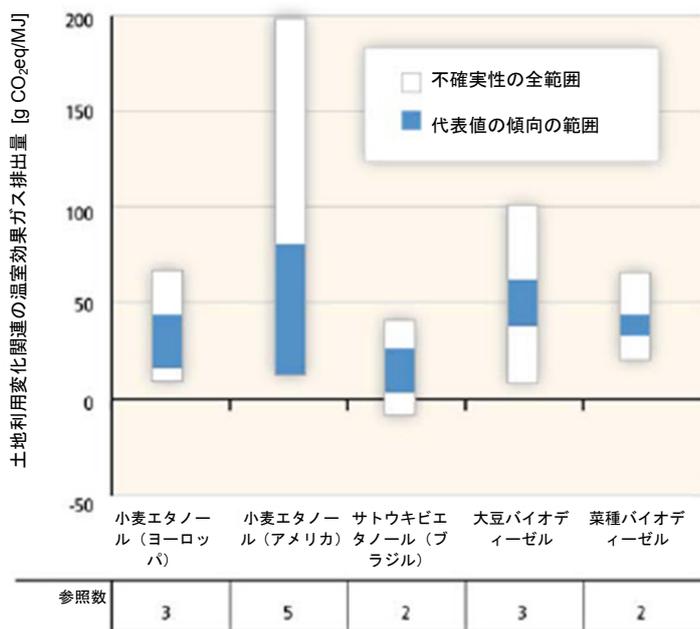


図 9.11: 第一世代のバイオ燃料の複数の経路による土地利用変化関連の温室効果ガス排出 (直接及び間接) の推定値の例。上図では、代表値の傾向と報告された全不確実性の範囲を示す。上図の推定値は、複数の様々な不確実性の計算方法と代表値の傾向の測定方法が併用されており、30年の時間枠を想定している。x軸の下部の報告は参照数で、結果はこれらの範囲内に収まる (出典: Searchinger et al., 2008; Al-Riffai et al., 2010; EPA, 2010b; Fritsche et al., 2010; Hertel et al., 2010; Tyner et al., 2010)。

多くのバイオエネルギー専用のシステムでは非土地利用ライフサイクルの GHG 排出量に比べて土地利用の影響が非常に大きくなる可能性があることが示されているにもかかわらず、代表値の推定でさえ幅が広いのは、バイオエネルギーシステムに由来する土地利用変化による温室効果ガス排出の推定値に残る不確実性及び変動性を反映しているからである。このため、土地利用評価手法を改善するとともに、現在の土地利用やバイオエネルギー由来の製品及びその他の土地利用変化の動因についての情報の量と質を高めるための研究を継続することが重要である。また、バイオエネルギーによる土地利用変化のリスク緩和を図る方法を検討することも極めて重要である。たとえば、アグロ・エコロジカル・ゾーニング (Agro-Ecologic Zoning) システム (EMBRAPA, 2009) は、適切な監視、施行、場所により異なるバイオエネルギーの炭素フットプリントの評価の併用、すなわち間作と改良型の輪作システムなどによる農業管理と農業生産力の改善、土地利用変化のリスクの低いリグノセルロース系原材料の使用または残渣か廃棄物による専用バイオマス代替、及び荒地か耕作限界地か、持続可能性認証システムの使用促進などに対する評価を伴う (van Dam et al., 2009; Berndes et al., 2010; 2.2.4, 2.4.5, 2.5.2, 及び 2.8.4 節)。

### 9.3.4.2 地域の大气汚染

本節では、エネルギー技術により排出され、世界保健機関によって人間への健康に最も重要な影響を与えるとされ

る特定の大气汚染物質のデータを示す (WHO, 2006)。これらには、粒子状物質<sup>15</sup> (PM)、亜酸化窒素 (NO<sub>x</sub>)、二酸化硫黄 (SO<sub>2</sub>)、及び非メタン炭化水素 (NMVOC) などがある。これらが大気中に分散すると、地域の規模 (最大で数千キロメートル) で大きな影響が出る (Hirschberg et al., 2004b など)。ブラックカーボンは、粒子状物質の排出全体に占める割合はわずかであるが、他のエアロゾルと共に、世界及び地域の気候に影響を与える可能性がある (Box 9.4 参照)。大气汚染物質による地域特有の影響は、曝露、大気中の濃度、反応物質として働く追加の汚染物質 (二次粒子の形成など) の濃度に左右される (Kalberer et al., 2004; Andreani-Aksoyoglu et al., 2008; Hallquist et al., 2009 など)。大气汚染は、都市部及び農村部でもまた大幅に異なる。このため、累積的なライフサイクル・インベントリの結果、つまり各ユニットに届くエネルギー当たりの汚染物質排出量は、人間の健康及び環境への潜在的な影響の結論に関して、注意深く解釈を行わなければならない (Torfs et al., 2007)。以下の結果は、特殊な影響の推定値に関する基礎データとしてのみ、その役割を果たすことが出来る (9.3.4.3 節参照)。伝統的な調理ストーブで使用される固体燃料が原因の屋内の空気汚染については、Box 9.4 及び 9.3.4.3 節で論じる。

#### Box 9.4: ブラックカーボン及びエアロゾル: 大气汚染物質が気候に与える影響

ブラックカーボン (BC) は、化石燃料またはバイオマス燃料の不完全燃焼で形成される、一時的な大气汚染物質である。ブラックカーボンの主な発生源は、野焼きと森林火災、(ディーゼル) 燃焼機関、特に重油を使用する海洋船舶、及び暖房と調理の燃料としての住宅での使用である (Bond et al., 2004; Lack et al., 2008)。ブラックカーボンの排出量は、開発途上国で特に多い。ブラックカーボンは、健康に有害な影響を与え (9.3.4.3 節参照)、大気中で熱を吸収する性質や、雲、雪と氷表面のアルベドを低下させる働きにより、気候変動を加速させる可能性がある (Ramanathan and Carmichael, 2008; Flanner et al., 2009; Lau et al., 2010)。ブラックカーボンは、放射強制に負の影響を与える有機炭素 (OC)、その他のエアロゾル (硫酸塩など) とともに排出される。このため、燃焼で排出されるエアロゾルの純温暖化の正味の効果は、発生源や場所に左右され、依然として不確実性を伴う。利用可能な文献では、化石燃料の内燃及び固体バイオマスの家庭内の燃焼は、正味の温暖化につながる一方、バイオマス源の開放燃焼 (野火) による正味の効果は否定的である。これは、吸収型のブラックカーボン・エアロゾルに比べ、反射型の有機炭素の比率が高いためである (Bond et al., 2004; M. Jacobson, 2004; Hansen et al., 2005; Koch et al., 2007)。双方のプロセスは、大気の色雲の形成や、インドのモンスーンの変化 (Auffhammer et al., 2006)、熱帯の高所の温暖化 (Gautam et al., 2009) といった地域の気候への強い影響を示すその他のプロセスで、顕著な役割を果たす (Ramanathan et al., 2005, 2007)。

ブラックカーボンの軽減は、気候変動緩和だけでなく、持続可能性のさらなる懸念 (大气汚染、非効率なエネルギーのサービス、貧困層への関連する健康上の影響など) の解決も図れる重要な手段として提案されている (Grieshop et al., 2009)。エネルギー効率が良く無煙の調理器具や、小規模産業における石炭燃焼時のすす軽減技術を提供すれば、放射強制の軽減及び都市地区の屋内の空気汚染と呼吸器疾患の闘いに、大きな便益が生ずるだろう (Ramanathan and Carmichael, 2008; 2.5.4 及び 9.3.4.3 節参照)。デリーでは、公共輸送システムをディーゼルから液化石油ガスに切り替えた結果、温室効果ガスは正味節減 (net savings) になり、ブラックカーボンの負荷も大幅に低下した (C. Reynolds and Kandlikar, 2008)。

ただし、大气汚染の制御方法を通じて、反射型 のエアロゾルの「マスキング」効果が除かれてしまうと、既に判明している温暖化による影響を加速しかねないことが示されている (Ramanathan and Feng, 2008; Carmichael et al., 2009)。

#### 発熱及び電力供給

化石燃料及びバイオマス (木材) を燃焼させて空間暖房及び発電を行う場合、ライフサイクル・インベントリの結果 (最終使用エネルギーの kWh 当たり) に圧倒的に貢献するのは、一般に、排出全体の 70 からほぼ 100% の割合を占める燃焼段階である (Jungbluth et al., 2005; C. Bauer, 2007; Dones et al., 2007 など) (図 9.12 参照)。しかしながら、石炭、天然ガス、石油、及び薪を長距離輸送する場合、輸送段階がより重要になるだろう (C. Bauer, 2007, 2008 など)。一般に、天然ガスは化石燃料のなかで最も排出が少ない。エネルギーチェーンの様々な部門の貢献と排出全体は、図 9.12 の最小値及び最大値で示したように、発電プラントの技術、排出制御技術の適用 (排煙脱硫、粒子除去など)、及び適用される燃料原材料の特性により、桁違いに異なってくる。

たとえば、空間暖房の場合、最小値及び最大値は、評価されたデータセット全体で最も効率的な技術の選択肢及び最も非効率な技術の選択肢を示す。さらに、燃料の種類 (バイオマスの場合、丸太、チップ、またはペレットなど) が結果に影響を与える。太陽熱暖房の数字は、中央ヨーロッパのある特定の場所でも有効で、太陽放射の変動性は図

<sup>15</sup> 粒子状物質 (PM) の排出は PM<sub>d</sub> として特定され、下付きの d は、含まれる粒子の最大の直径 (μm) を示す。内燃機関が排出する粒子は、どれも非常に小さく、ほぼ PM<sub>2.5</sub> 内に収まる。

示の範囲では考慮されていない。化石発電の場合、全ヨーロッパ及びいくつかの他地域の国（アメリカ及び中国など）の現在の技術と燃料供給の国別平均が結果に含まれている。このため、最小値は主に最も効率の良い発電プラント及び汚染制御技術を持つ国々、最大値は主に最も非効率な発電プラント及び汚染制御技術を持つ国々を示す。

評価結果では、非燃焼型の再生可能エネルギー技術及び原子力の大気汚染物質の排出は比較的少なく、掘削・調査段階及び流通・マーケティング段階からのみであることが示されている。また、結果のばらつきは、（たとえば、太陽放射（Jungbluth et al., 2009）及び風況（EWEA, 2004）の観点から）適用される発電技術及び発電場所の双方に左右され、一般に、化石の発電及び発熱システムに比べ、再生可能エネルギーと原子力のほうがかなり低くなる。変動性のある再生可能電力の流入（フィードイン）に対応した、火力発電所のより柔軟な運用により、発電システムからの全体の排出量が増加する可能性については考慮されていない。図 9.12 には示されていないが、地熱ヒートポンプ運用に使用される電力の種類は、この技術の性能に大きな影響を与える（Heck, 2007）。

開発途上国の大気汚染の結果を取り込んだライフサイクル評価の文献は乏しく、利用可能なケーススタディは、一貫性を持つ結果に統合はできないだろう。しかしながら、示された範囲の上限の排出は典型的に、古い技術を使用し、汚染制御方法もあまり実施されておらず、質の低い燃料を使用している可能性のある開発途上国に当てはまるだろう。また、開発途上国では環境上の規制も十分ではないため、排出は比較的多くなる。Molina and Molina (2004) は、産業、エネルギー、及び輸送から生ずる都市の屋外の大気汚染について報告し、結果は先進国の 10 倍以上高かった。排出源の場所と普及した気象条件の組み合わせが、この観点では重要な要因である。大気汚染軽減は、1990 年代初め以降、重要になっており、アジア（特に中国）で硫黄の排出が鈍化している（Carmichael et al., 2002）。再生可能エネルギーが大気汚染軽減に対して果たす大きな貢献は、特に新興国の経済の電力部門及び輸送部門を対象に研究が続けられている（Boudri et al., 2002; Aunan et al., 2004; Ramanathan and Carmichael, 2008; Creutzig and He, 2009; 9.4.4 及び 10.6 節参照）。

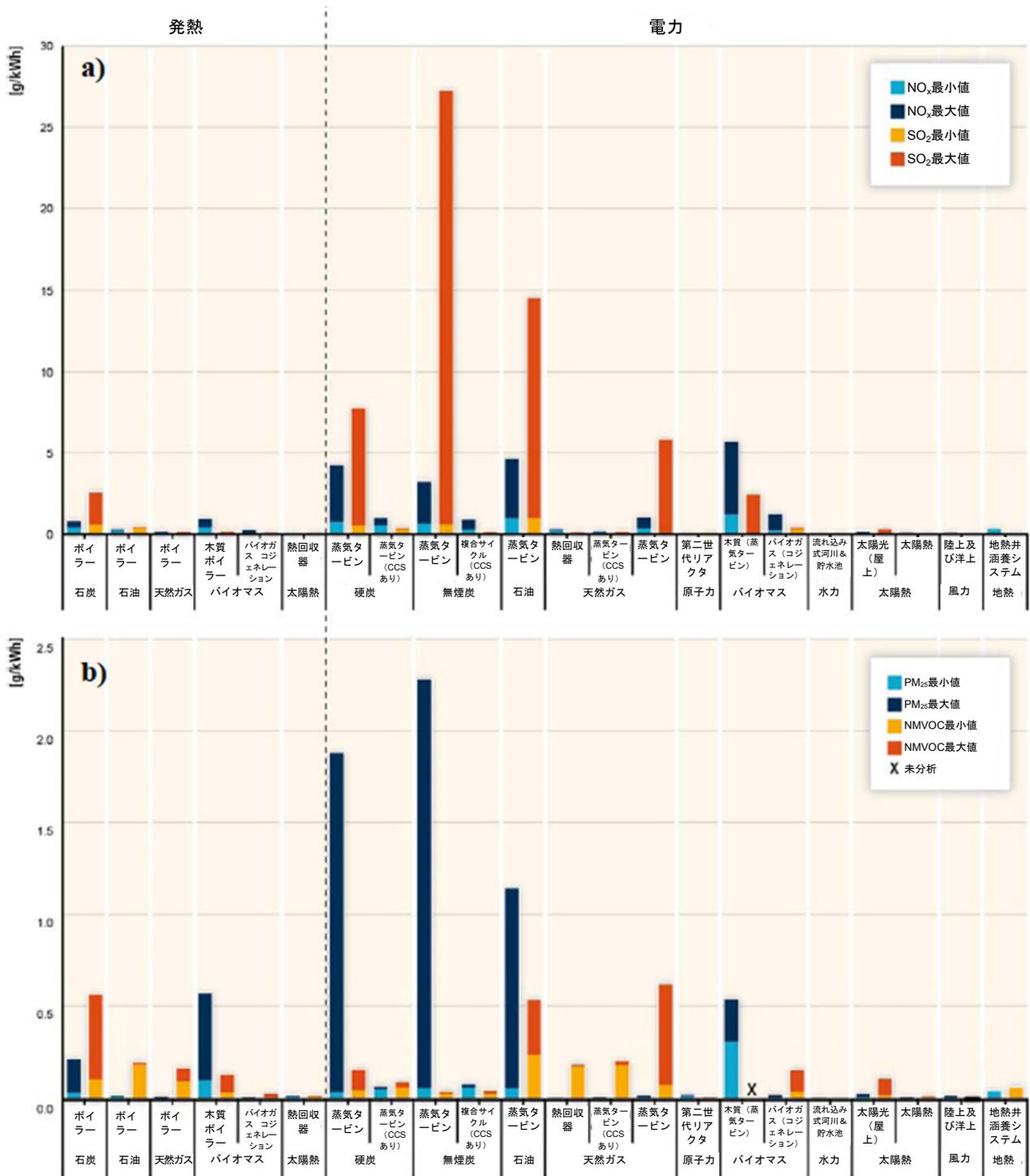


図 9.12: a) NO<sub>x</sub> と SO<sub>2</sub> 及び b) NMVOC と PM<sub>2.5</sub> からの発電ユニット当たりのライフサイクル累積排出量。現在の熱及び電力の供給技術を対象とする (C. Bauer, 2008; Viebahn et al., 2008; Ecoinvent, 2009)。伝統的バイオマス使用は考慮せず。二酸化炭素回収・貯留を備える石炭及びガスの電力チェーンの数字は、近い将来の予想で有効である (C. Bauer et al., 2009)。

輸送燃料

ライフサイクルの手法のもとでは、バイオマス燃料や自動車システムから、採掘から車両走行による消費まで (well-to-wheel) に排出される大気汚染物質は、大幅に異なる。これらの相違は、燃料生産に使用する原材料、バイオマス生産量、燃料生産の経路と技術、バイオマスの栽培収穫の場所、燃料の特性と輸送機関の技術から生ずる (von Blotnitz and Curran, 2007; Cherubini and Strømman, 2011)。

ガス化燃料を使用すると、原料が化石燃料であれバイオマスであれ、液体燃料に比べ大気汚染が軽減される傾向が

ある (Zah et al., 2007)。バイオ燃料及びバイオエタノール混合物とバイオディーゼル混合物の使用が排出ガスに与える影響は、数え切れないくらいに検証が行われ、その結果は様々である (Schifter et al., 2004, 2011; Niven, 2005; Coelho et al., 2006; Fernando et al., 2006; Goldemberg et al., 2008; Graham et al., 2008; Pang et al., 2008; Coronado et al., 2009; Costa and Sodré, 2009; Demirbas, 2009; Hilton and Duddy, 2009; Roayaei and Taheri, 2009; Yanowitz and McCormick, 2009; Yoon et al., 2009; Zhai et al., 2009; Park et al., 2010)。燃料混合物、燃焼温度と大気温度、添加物が、大気汚染物質形成に決定的な役割を果たす (Lucon et al., 2005; Coelho et al., 2006; Graham et al., 2008; Ginnebaugh et al., 2010)。研究は全般的に、エタノール及びバイオディーゼル混合物の使用により、ガソリン及びディーゼルに比べ、一酸化炭素 (CO) 及び炭化水素の排出は減少することに同意しているものの、窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) の排出は増加すると思われる。バイオ燃料混合物の酸化による窒素酸化物と蒸発ガスが増加すると、対流圏オゾンの濃度が高まる可能性がある (Schifter et al., 2004; Agarwal, 2007)。ブラジルでは、アルデヒド排出の増加が報告されている。アルデヒドは、化石燃料に由来するホルムアルデヒドに比べ、毒性は低い (Goldemberg et al., 2008; Graham et al., 2008; Anderson, 2009)。第二世代のバイオ燃料及び将来のバイオ燃料は、燃焼システムが具体的に適用されれば、パフォーマンスが向上すると推測される (Pischinger et al., 2008; U ner and Müller-Langer, 2009)。

Notter et al. (2010) 及び Zackrisson et al. (2010) は、将来の電気または燃料電池を利用した乗り物 (8.3.1 節参照) が、再生可能エネルギー資源による発電や水素がエネルギーキャリアとして使用される場合、大気汚染軽減 (とその他環境への負荷) に大きなポテンシャルを持つとした。

都市部から人口の少ない地域へ排出が移動すると、曝露は減少することから、人間の健康への影響は軽減される可能性がある (9.3.4.3 節参照)。ブラジルでは全体での排出は増加したにもかかわらず、大半の排出が農村部における耕作機械、肥料製造、及びエタノールプラントに起因するので、フレックス燃料自動車に使用される一部のバイオエタノール混合物を使用することにより、都市部の排出を最大で 30% 減少させた (Huo et al., 2009b)。同様に、汚染物質のバックグラウンド濃度などの大気の状態によっては、都市部での二次汚染物質 (エアロゾル及びオゾンなど) の形成も減少するだろう。

### 9.3.4.3 健康への影響

人間の健康に対して最も重要な影響を与えるエネルギー関連のものは、化石燃料及びバイオマスの燃焼による大気汚染物質の排出に関連する影響である (Ezzati et al., 2004; W. Paul et al., 2007)。大気汚染は、現在の環境レベルでさえも、(特に呼吸器系及び循環器の疾患の) 死亡率を悪化させ、若年死につながる (表 9.9; Cohen et al., 2004; Curtis et al., 2006)。環境大気汚染の健康への影響は、燃焼生成物の複合混合物によるものであるため、一定の発生源または汚染物質に起因すると断定するのは難しいが、疫学調査では、微粒子状物質、二酸化硫黄、及び対流圏オゾンという 3 種類の汚染物質が最も密接にマイナスの影響に相関している (Ezzati et al., 2004; Curtis et al., 2006)。汚染物質の大量排出を再生可能エネルギー普及で大幅に減少させれば、健康上の便益は向上するはずであり、気候変動及び (都市部の) 大気汚染軽減を組み合わせた政策措置の機会は、認識が高まる (9.4.4.1, 10.6 及び 11.3.1 節)。

表 9.9: 重要な大気汚染物質による健康への影響 (Bickel and Friedrich, 2005 より採用)。

一次汚染物質 <sup>1</sup>	二次汚染物質 <sup>2</sup>	影響
粒子状物質 (PM <sub>10</sub> 、PM <sub>2.5</sub> 、ブラックカーボン)		心肺の疾病率 (脳血管及び呼吸器の入院、心不全、慢性気管支炎、上下気道症状、ぜんそく悪化)、死亡率
二酸化硫黄	硫黄	粒子のようなもの? <sup>3</sup>
窒素酸化物	硝酸塩	疾病率?、粒子のようなもの? <sup>3</sup>
窒素酸化物+揮発性有機化合物	オゾン	呼吸器系の疾病率、死亡率
一酸化炭素		心血管の疾病率、死亡率
芳香族多環式炭化水素		がん
鉛、水銀		疾病率 (神経毒及びその他)

注: <sup>1</sup> 汚染源による排出、<sup>2</sup> 大気中の化学反応により生成、<sup>3</sup> 具体的な証拠の欠如。利用可能な疫学研究の大半は、構成要素または特性の区別をせず、質量粒子を基にしているため。

家庭の環境曝露には、固形の暖房及び調理用燃料の燃焼で生ずる屋内汚染物質 (IAP) を含み、一般に発展とともに減少するが、農村部及び都市部では重要な違いがあり、コミュニティーレベルの曝露は当初は増加し、その後徐々に減少することが分かっている (Smith and Ezzati, 2005; HEI, 2010)。石炭及び伝統的バイオマスの燃焼による屋内汚染物質への曝露は、開発途上国における疾病率及び死亡率の最も重要な原因の 1 つとして認識されている (Bruce et al., 2002; Ezzati et al., 2004; Smith and Ezzati, 2005; Zhang and Smith, 2007)。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 (WHO, 2002; Smith and Mehta, 2003; Smith et al., 2004; Torres-Duque et al., 2008)。図 9.13 は、屋内汚染物質に関連する健康問題の規模を示したもので、2030 年までに若年死のその他の主因 (HIV や AIDS、マラリア、及び結核) を超えると予測される (IEA, 2010a)。

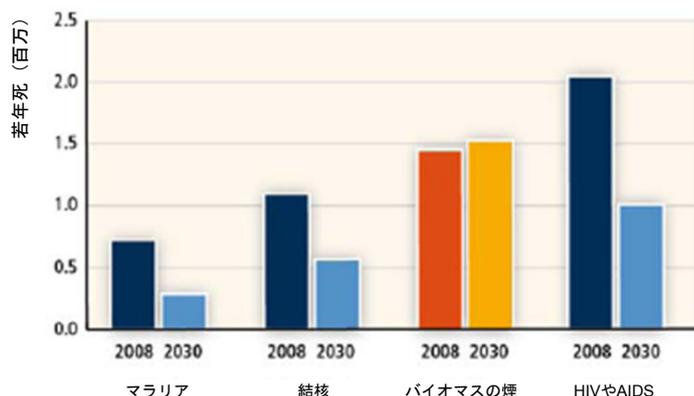


図 9.13: 家庭内の大気汚染物質による若年死及びその他の疾病。2008 年及び 2030 年の予測 (IEA, 2010a)。

慢性閉塞性肺疾患、白内障、及び肺炎といった多くの健康問題は、屋内の排出に最も曝露される女性及び子どもの間では最も深刻で (Smith et al., 2000; Pokhrel et al., 2005; Barnes et al., 2009; Haines et al., 2009; UNDP and WHO, 2009)、一般には最貧困層に及ぼす (9.3.2 節参照)。

伝統的な使用では、バイオマス系の燃料は木炭及び石炭に比べ、不純物濃度が高い結果が出る (Kim Oanh and Dung, 1999; Bailis and Cutler, 2004; Zhang and Smith, 2007)。屋内汚染物質からの影響を緩和する選択肢は、よりコスト高で排出の少ない燃料への転換に加え (9.3.2 節参照)、改良型の調理ストーブ (ICS)、換気と建物の設計、及び行動変化などがある (Smith et al., 2000; Bruce et al., 2004; Mehta and Shahpar, 2004; Palanivelraja and Manirathinem, 2010)。近代的なバイオエネルギー技術 (改良型の調理ストーブ、バイオガス) は、燃料の転換を行わずに健康上の便益を提供出来るだけでなく (Smith et al., 2007; Bailis et al., 2009)、環境的、社会的な付加的利益を提供出来る (Haines et al., 2009) (2.5.7.2 節参照)。

#### 非燃焼型 (エネルギー) の健康への影響

エネルギー技術による健康への影響は、先述したもの以外は比較的小さい。表 9.10 は、本報告書で認識した再生可能エネルギー技術の懸念分野について、概要を示す。

表 9.10: 2.5、4.6、5.6、及び 7.6 節で報告した、再生可能エネルギー技術が人間の健康に与える潜在的な影響の概要。太陽熱技術及び海洋技術では、影響は全く確認されなかった。

再生可能エネルギー技術	潜在的な健康への懸念
バイオエネルギー	原材料及び農業慣行によるが、殺虫剤または硝酸塩といった農薬及び誘導体、または残渣の焼却による煙は、直接、間接的に地域に影響を与えるだろう。  燃焼*による大気汚染物質の排出に関連する健康への影響
地熱エネルギー	一部の運用では、硫化水素の排出が地域に影響を与えるだろう。
貯水式水力	貯留水は、熱帯地域の場合、ベクター媒介病の蔓延につながりかねない。大規模ダム建設中に人口及び出稼ぎ労働者が集中すると、公衆衛生上の懸念が生ずるだろう
風力	騒音及びフリッカ現象による公害

※ 詳細は、前の小節参照

原子力の場合、使用済み燃料及びウラン廃棄物の放射能毒性 (風による放射性ちりの拡散、採掘段階で放出されるラドンガスなども含む) が、健康上最も強く懸念される (OECD/NEA, 2002; Abdelouas, 2006; Al-Zoughool and Krewski, 2009)。原子力プラント近隣の住民、特に子どものがんのリスク増大が研究されているが、結果は各国によって異なる (Ghirga, 2010)。

#### 9.3.4.4 水

水は、エネルギーも含め、多様で競合する用途を伴う極めて重要で非常に局在する資源である。一定の場所における水資源の条件及び量は、エネルギー技術の選択、設計及び性能に影響を与える。エネルギー技術の影響は、地理的、時間的にも異なる。したがって、水資源とエネルギーの連関 (water-energy nexus) の示唆は、持続可能な開発

の背景において検討されなければならない。エネルギー技術が水資源に与える影響を総合的に評価した文献は限られており、特にライフサイクルの観点から見たものでその傾向は顕著である。以下の節で示した証拠から、幅広い結論をいくつか出すことは出来るものの、結果の多くの裏付けを取り、既存の知見のギャップを埋めるには、さらに調査が必要である。

2006年、エネルギー部門及び産業部門の淡水取水割合は、附属書I国では45%を、非附属書I国では10%を占めた (Gleick, 2008)。開発途上国が工業化し、エネルギーのサービスへのアクセスが向上すると、エネルギー生産増加の水需要に対応するため、淡水資源がさらに必要になるだろう。しかしながら、様々な計量値では、多くの開発途上国で既に水不足の問題が生じていること、気候変動が水ストレスを深刻化させるだろうということが示されている (Rijsberman, 2006; IPCC, 2008; Dai, 2011)。火力発電所は、継続的に水が必要なため、水不足の状況及び気候変動には特に脆弱である。また、水力及びバイオエネルギーは水の入手可能性に大きく依存し、競争の激化及び水不足の緩和の双方に対してポテンシャルがある (2.5.5.1 及び 5.10 節参照)。

### 運用の水使用及び発電が水質に与える影響

電力部門の影響には、取水及び消費の双方が関わる。取水は、土壌から取り除いた水か、水源から転用した水の量を示し、消費は、蒸発、蒸散、人間の消費、及び製品への組み込みを通じて失われた水の量を示す (Kenny et al., 2009)。どちらの計量値も地域の水の利用可能性に重要な影響を与えており、既存の技術では1度にどちらか1つの影響しか緩和できないという、トレードオフを伴うことが多い。産業及び発電用の水の消費量は世界の水消費量の4%に満たないが、水不足の地域においては考慮すべき重要な事項である。これは水がシステムから効率的に除去され、農業や飲料水などの他目的に利用できないため、特に将来の資源開発の面で重要である (Shiklomanov, 2000)。

水は大半の技術のライフサイクルを通じて使用されるものの、火力発電所の運用では冷却のニーズが生じるため、バイオマス原材料の生産を除き、その他のライフサイクルの段階以上に取水及び消費が行われることになる (Fthenakis and Kim, 2010)。図 9.14 では、発電ユニット及び冷却技術に関連して、運用による水消費率の変動を示す。水の消費は、冷却技術のカテゴリ内でもカテゴリ間でも幅広く異なるが、特にカテゴリ間で差異が出る。冷却システムの選択は、場所に特有なことが多く、水資源の利用可能性、地域の環境規制や環境の質への影響、寄生性エネルギーの負荷、コスト、その他の考慮事項に基づく (J. Reynolds, 1980; Bloemkolk and van der Schaaf, 1996)。非火力利用の技術は、水力を除き、発電ユニット当たりの取水及び消費に関する水利用値は、運用でもライフサイクル上でも最も低い (Tsoutsos et al., 2005; Fthenakis and Kim, 2010)。水力発電の貯水池から多量に蒸発する可能性があるが、貯水池は、発電だけでなく、その他の有益なサービス (洪水調節、淡水供給、及びレクリエーションなど) を提供することも多く、多様な貯水池の使用から水消費を決定する配分スキームは、報告された水消費の値に大幅な影響を与える可能性がある (Gleick, 1993; LeCornu, 1998; Torcellini et al., 2003)。特定の流域において貯水池の建設が蒸発に与える正味の影響を特定する調査が必要だろう。図 9.14 のデータは、アメリカのシステムの研究からのみのものであるが、技術の耐用年数及び気候条件も幅広い範囲になっており、このいずれも水の使用率に影響を与える可能性がある (B. Miller et al., 1992)。このため、これらの結果は他国の水の使用率に適用し、比較することが可能である (EC, 2006)。

地熱エネルギーのデータは図 9.14 には含まれていない。これは、大半の状況で、地熱流体は再注入前に冷却に使用可能であることから、淡水は消費されないためである (Franco and Villani, 2009; 4.5.3 節参照)。使用される技術、資源の種類及び冷却システムによるが、地熱の運用による水消費はほぼゼロから最大  $15\text{m}^3/\text{MWh}$  の範囲になる可能性がある (Fthenakis and Kim, 2010)。

水域の水位低下または温度上昇により、火力発電所の貫流冷却が必要になるだろう。この際には大量に取水がおこなわれるが、消費は比較的少なく、低い容量で稼働させるか完全に停止させるかになる (Poumadère et al., 2005)。取水量の少ない再循環の冷却技術を活用してこの脆弱性を処理すると、水の消費増 (図 9.14)、プラントレベルの熱効率の低下、及び運用コストと設置コストの増加につながる可能性があるだろう (Tawney et al., 2005)。そして、周囲温度が上昇すると、プラントレベルの熱効率及び冷却システムのパフォーマンスは低下すると思われる。この結果、水の使用率は上昇する (B. Miller et al., 1992; Turchi et al., 2010)。火力発電所の脆弱性は、都市下水などの代替的な水源を活用するか、乾式冷却システムを活用すれば、低減可能である。しかし、コスト、パフォーマンス、入手可能性の点で、トレードオフ及び制約がある (EPRI, 2003; Gadhamshetty et al., 2006)。貯水池及び河川の水位も気候変動の影響を受け、水の入手可能性及び水力発電のパフォーマンス能力と出力が変化するだろう (Harrison and Whittington, 2002; IPCC, 2008)。

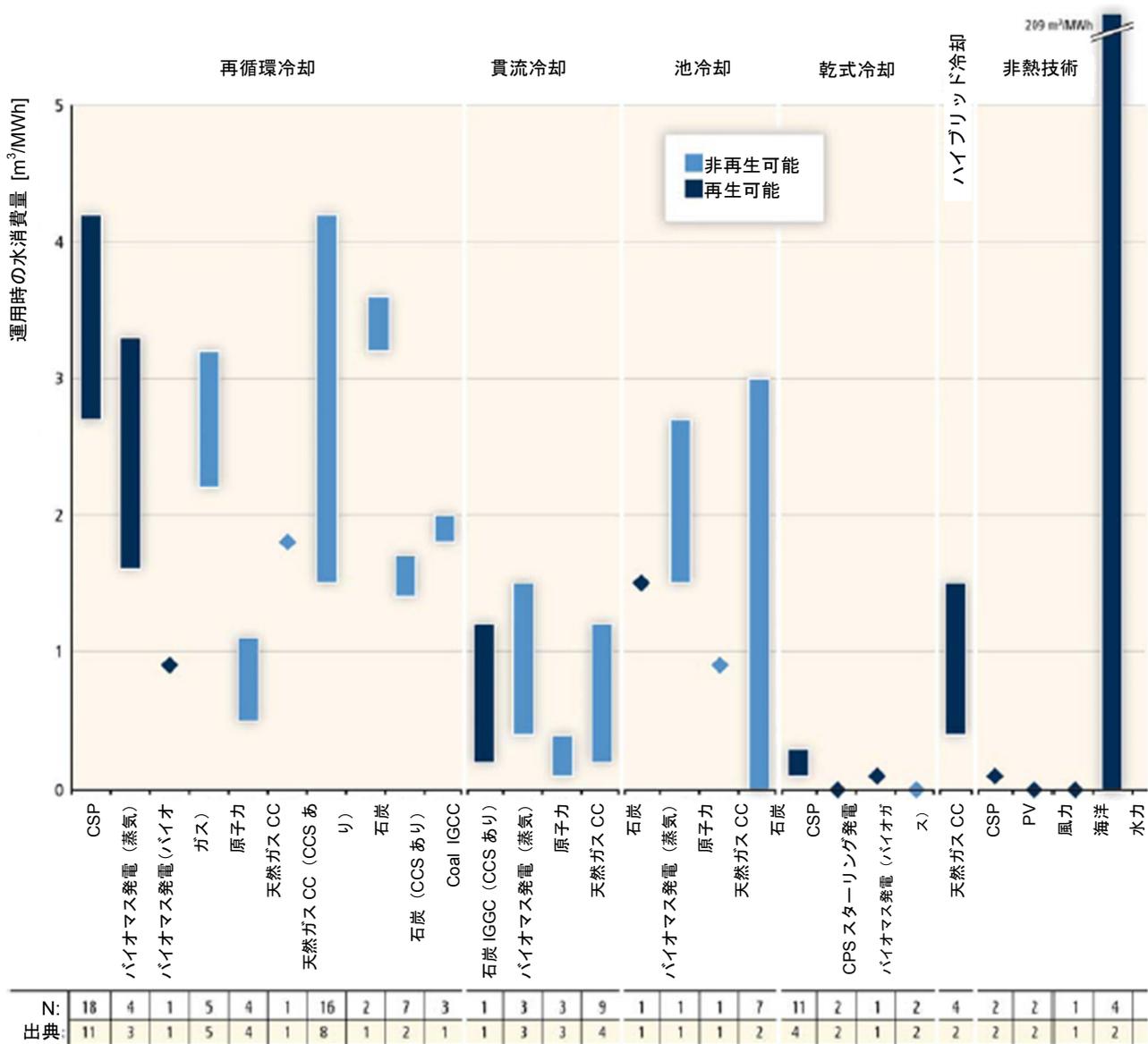


図 9.14: 非熱発電技術と熱による発電技術で見た場合の、運用に必要な水消費量の範囲 (利用可能な文献のレビューに基づく (m³/MWh))。棒は、利用可能な文献における絶対範囲、ダイヤモンドは単一の推計を示す。n は出典で報告された推計値の数を示す。水力の上限値は総蒸発量を測定したいくつかの研究によるもので、代表的なものではない場合があることに留意が必要である (Box 5.2 参照)。本文献レビューで使用した方法と参照は Annex II で報告する。

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

発電ユニットは、熱及び化学汚染により水質に影響を与える可能性がある。通常の運用時、貫流冷却システムを備える発電ユニットは、冷却水排出先の水域の温度を上昇させる可能性があり、これが水界生態系に負の影響を与え、漁獲高を減少させる可能性がある (Kelso and Milburn, 1979; Barnthouse, 2000; Poornima et al., 2005; Greenwood, 2008; Kesminas and Olechnoviciene, 2008; Shanthy and Gajendran, 2009)。化石燃料燃焼による大気汚染物質が水域に沈殿する場合も、水質に影響を与える可能性がある (Larssen et al., 2006)。水力発電施設は、排水の温度及び溶存酸素量に影響を与える可能性があるだけでなく、流動様式を変化させたり、生態系や堆積物分布のプロセスをかく乱したりしかねない (Cushman, 1985; Liu and Yu, 1992; Jager and Smith, 2008; 5.6 節参照)。河口にある潮力エネルギーの施設は、河口の水文学や塩分濃度に影響を与える可能性があり、海洋温度差技術は、アンモニア及び塩素といった有毒な化学物質を偶発的に放出することで、水質を局所的に変化させる可能性がある (Pelc and Fujita, 2002; Vega, 2002; 6.5 節参照)。地熱発電の施設は、運用時に地熱流体が地表や地表貯水で漏れ出したり、淡水泉源 (freshwater wells) 近くが汚染されたりすると、地表水及び地下水双方の水質に影響を与える可能性がある (Brophy, 1997; Dogdu and Bayari, 2004; 4.5 節参照)。

## 掘削・調査段階の水使用

掘削・調査段階の水使用（図 9.7 参照）は、特に燃料採掘及びバイオマス原料生産の段階で、一部のエネルギー技術では多量になる可能性がある（Fthenakis and Kim, 2010）。具体的には、非在来型の化石燃料（オイルシェール、シェールガスなど）の採掘技術及び加工技術では、在来型の採掘技術に比べて水使用率が大幅に高くなる可能性があり、他の流域から淡水を搬入する必要があるだろう（GAO, 2010; Kargbo et al., 2010; Parfitt, 2010; Veil, 2010）。水使用を非在来型の生産で採掘された燃料の出力エネルギーの割合として捉え、他の在来型の生産燃料との比較を容易にするには、さらに調査が必要になる。

バイオマス原材料は、発電に使用されることもあれば、液体燃料に転換されることもある。原材料生産に必要な自然変動する降雨及び淡水の灌漑の双方を考慮すると、水フットプリントの方法論が使用される（Gerbens-Leenes et al., 2009）。原材料生産の水フットプリントは、原材料の種類、地理的地域と地域の気象条件、及び作物の管理慣行に大きく影響される（Berndes, 2002, 2008; Gerbens-Leenes et al., 2009; Wu et al., 2009; Harto et al., 2010; Stone et al., 2010）。これらの要因は年々変動するだろう。また、個別のケースの水フットプリントは、世界規模の平均とは大きく異なるだろう。多目的で栽培されるバイオマスの水フットプリントでも、その推定値は配分方法の選択によって大きく異なる可能性がある（S. Singh and Kumar, 2011）。

発電用のバイオマス原材料生産の水フットプリントは現在、熱による発電所運用の際に消費される水の量に比べ、おおよそ 70~400 倍に達する可能性がある（Gerbens-Leenes et al., 2009; S. Singh and Kumar, 2011）。（生産質量で加重平均した）バイオマス原材料生産の水フットプリントの世界平均は現在、MJ 燃料当たりで約 60~600l である（Gerbens-Leenes et al., 2009）。バイオディーゼル原材料の水フットプリントは、エタノール作物のほぼ 2~4 倍である。これは、油糧種子作物は水効率が良くないためである（Gerbens-Leenes et al., 2009; S. Singh and Kumar, 2011）。バイオ燃料の精製及び加工では、MJ 燃料当たりで約 0.1~0.5l の水が必要であり、これは原材料生産の所要量に比べて非常に少ないが、在来型の石油生産に比べれば、依然としてかなり高い（Berndes, 2002; King and Webber, 2008; Wu et al., 2009; Harto et al., 2010; S. Singh and Kumar, 2011）。

適切な管理が行われないうまま、バイオエネルギー生産が拡大すると、危機的な地域では水の競合が激化する可能性があるだろう（2.5.5.1 節参照; Dornburg et al., 2008; Berndes, 2010; Fingerman et al., 2010）。しかしながら、淡水の灌漑が水消費全体に占める割合はかなり異なっており、地形規模での植圧及び水文学的過程の関係は複雑である。一定の原材料生産システムは、水の生産性が向上し水の競合が低下したシステム（複数年の輪作で栽培される木質作物など）へ土地利用を変化させるだろう。一部の多年草は荒廃地の保水機能を改善可能であり、農業慣行を向上させれば水効率はかなり改善可能である。

## 掘削・調査段階のによる質への影響

原材料生産、採掘作業、及び燃料加工も水質に影響を与える可能性がある（Larssen et al., 2006）。石炭採掘時の廃水は、pH の低下、固体金属と重金属の濃度上昇により、地域の水質を悪化させる可能性がある。採鉱表土集積場からの浸出水も、その重金属の濃度は高い可能性がある（Tiwary, 2001）。原子力用のウラン採掘の廃水は、周辺の表層水及び地下水のウラン、ラジウム、セレン、モリブデン、及び硝酸塩の濃度を上昇させる可能性がある（R.F. Kaufmann et al., 1976; van Metre and Gray, 1992; Au et al., 1995; Voitsekhoitch et al., 2006; Carvalho et al., 2007）。使用済み原子力の再加工の際、排出は効果的な規制で大幅に減少させることが出来るけれども、水の放射能汚染が起きる可能性がある（EC, 1999; Suzuki et al., 2008; Yamada and Zheng, 2008）。石油タンカー運用による排出（すなわちタンカー洗浄作業時の石油投棄）も、水質汚染の断続的な原因である（Jernelov, 2010; Rogowska and Namiesnik, 2010）。大半の国で、水汚染を防ぐため、厳格な制限及び安全基準を設けているが、だからといって必ず事故を防げるわけではない（9.3.4.7 節参照）。

従来の条植え生産（row-cropping production）方法を用いる場合、バイオエネルギーの原材料生産は、他の条植え作物と同様、肥料及び殺虫剤の使用により水質に影響を与える可能性があるが、多くの地域では、第二世代の原材料は非エネルギー条植作物に比べて化学物質投入量は少なくすむ（Paine, 1996; McLaughlin and Walsh, 1998; Lovett et al., 2009）。有機蒸留廃水の排出は地域の水域を汚染する可能性があるが、嫌気性汚水分解の既存技術で緩和可能である（Giampietro et al., 1997; Wilkie et al., 2000）。

### 9.3.4.5 土地利用

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（Hirschberg et al., 2006; Fthenakis and Kim, 2009）。

様々な再生可能エネルギーの主要な段階で必要となる土地、即ち、発電施設が占有する場所やバイオマス原材料の

栽培場所を説明したり比較したりするため、文献において様々な測定基準が使用されている。たとえば、占有面積 ( $\text{m}^2/\text{kW}$ )、土地利用の有効パーセンテージ (Trieb et al., 2009; Rovere et al., 2010) または土地フットプリント (一人当たり  $\text{m}^2$ ) が挙げられる (Denholm and Margolis, 2008)。土地の必要性を適切に解釈し比較するうえで、検討する必要がある側面は以下のとおりである。

- ・ 必要な土地の性質及び条件 (耕地またはかつての商工業地域、需要地からの遠近など)
- ・ 土地利用の質 (単一か多目的の利用が可能か)
- ・ 土地の転換の耐久性と可逆性 (かつての土地利用や土地被覆、干拓回数)

特に、土地の転換利用の環境影響評価は非常に複雑で、方法論上の課題の多くが解決されていない (Dubreuil et al., 2007; Scholz, 2007)。これらには、地形の分断化 (Jordaan et al., 2009)、生命維持機能と生態系部門への影響、地域の自然性への影響 (様々な種類の使用後の再生回数など)、及び生物多様性への影響などがある (Lindeijer, 2000; Scholz, 2007; Schmidt, 2008) (9.3.4.6 節参照)。

化石エネルギーチェーン及び原子力の場合、採掘の運用か抽出の種類 (オンサイト、浸出、露点採掘または坑内採掘)、鉱床と燃料の質、及び供給インフラによるが、土地利用は掘削・調査段階の流通・マーケティング段階が圧倒的である (図 9.7 参照) (Hirschberg et al., 2006; Fthenakis and Kim, 2009; Jordaan et al., 2009)。高灰分の結果、廃棄物処理場は石炭火力発電所の土地利用に大きく貢献する (Mishra, 2004; NRC, 2010)。原子力チェーンの地上の土地利用の転換の範囲は、化石燃料チェーンに比べ低い。しかしながら、非常に長期のスパン (10,000~100,000 年) で高レベル放射性廃棄物へのアクセスを遮断する将来の処分場所を維持する必要があるため、原子力施設の占有の土地利用は大幅に増える可能性がある (Gagnon et al., 2002; Fthenakis and Kim, 2009)。

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。もし残渣または有機廃棄物に由来するバイオマスを利用する場合、追加的な土地利用は小さい (2.3.1 節参照)。

太陽光発電 (PV) 及び太陽熱設備が屋根に設置される限りは、運用上の土地利用はごくわずかであるが、集中的な太陽光発電 (PV) プラント及び集光型太陽熱発電 (CSP) の場合は、設計上の考慮が土地利用の程度及び排他性に影響を与える可能性がある (Tsoutsos et al., 2005; Denholm and Margolis, 2008; 3.6.1 節参照)。地熱発電は、地上の直接の土地利用は非常に低いが、地熱地帯に土地の地盤沈下リスクがある場合はかなり大きくなる (Evans et al., 2009)。景観及び優れた自然の姿の保存、観光産業との関連するあつれきが、懸念分野として生ずるだろう (4.5.3.3 節参照)。同様に、風力の場合、沿岸でも沖合でも景観の妨害が課題として浮上している (7.6.3.2 節参照)。

流れ込み式の水力発電ではライフサイクルの土地の利用は非常に低いが、貯水式の水力発電の場合は、場所の物理的条件によって値が大きく異なる (Gagnon et al., 2002)。貯水池の貯水及び存在が、影響の最も大きな原因として目立ち (Egré and Milewski, 2002)、非自発的な立ち退き及び文化遺産の破壊といった社会的課題も極めて重要な社会的側面に加わっている (9.5.1 及び 5.6.1.7 節参照)。貯水池を多目的で使用する場合、氾濫の影響は発電にのみ帰すことはできない (5.10 節参照)。現在の風力、波と海洋、または潮流エネルギーの場合、エネルギーが散逸するため、施設間で間隔を空ける必要がある。このため、転換する土地または海洋全体の面積は非常に広がる。農業、漁業、及びレクリエーション活動といった二次使用も可能なことが多いものの (Denholm et al., 2009; M. Jacobson, 2009)、一定の海洋技術では、競合使用へのアクセスが制約されていることが、課題になるだろう (6.5.2 節参照)。

結論としては、将来のエネルギーシステムの配送ネットワーク及び供給ネットワークの設置や更新を行うための土地の需要はかなり重要になるだろうという点、変動性のある再生可能エネルギー源の割合が高まれば、将来的にはさらに増加するだろうという点には留意すべきである。

#### 9.3.4.6 生態系及び生物多様性への影響

土地利用と密接に結びついているのは、生態系及び生物多様性に対する (場所に特有の) 影響である。エネルギー技術は、主に以下の経路を通じ、生態系及び生物多様性に影響を与える。

- ・ 貯水池の形成と河川の変更、露点採掘、潮汐発電、廃棄物堆積所、及び土地利用の転換 (森林または草地から管理地など) の場合、生息地及び生態系の直接的、物理的な破壊
- ・ インフラ、収穫の運用、または構築環境の改変などによる、生息地の分断、生態系の退化、及び一定の種の生態系の破壊

- ・大気汚染及び水汚染による生息地の悪化

最後のものは、化石エネルギー技術及び採掘に大きく関連している一方 (M. Jacobson, 2009)、水生生物に影響する熱公害は、全ての熱技術で深刻な懸念である。化石燃料の採掘段階で発生し得る重大事故の潜在的影響も、同じく重要性を持つ可能性がある (9.3.4.4 及び 9.3.4.7 節)。

生物多様性に対する影響の評価は、ライフサイクル評価の方法論の一部ではない。指標を設けてライフサイクル評価に統合しようという試みはあっても (Schmidt, 2008 など)、様々なエネルギーチェーンのライフサイクルの影響を比較する枠組みは、現在のところ全く利用できない。再生可能エネルギー技術に関連する潜在的な懸念については、表 9.11 に概要をまとめ、その後に知見の状況を短く説明する。潜在的便益及び緩和策などを含むより広い議論は、技術の章で参照可能である (2.5.5, 3.6.1, 4.5.3, 5.6.1, 6.5.2, 7.6.2 及び 7.6.5 節参照)。

**表 9.11: 生態系及び生物多様性に対する潜在的なマイナスの影響及び懸念に関する概要。SRREN の第 2~7 章で報告した再生可能エネルギー技術に関連。技術特有の影響及び適切な緩和策に関する詳細な議論は、2.5.5, 3.6.1, 4.5.3, 5.6.1, 6.5.2, 7.6.2 及び 7.6.5 節参照。**

バイオエネルギー (専用の原材料)	管理地への転換による質の高い自然の生息地の喪失、保護地区への圧力、農業集約化、土壌荒廃、栄養汚染と水生生息地への農薬排出による農業生物多様性と野生生物への影響、侵入種か遺伝子改変種の導入
バイオエネルギー (残渣)	残渣の除去による、森林システムにおける土壌荒廃、木質の有機堆積物の生息環境の喪失
太陽光発電 (PV) (フィールド設置)	設置段階を通じた生態系の破壊、日陰効果による植物群落の変化
集光型太陽熱発電 (CSP)	脆弱な砂漠の生態系の破壊
地熱	表層処理 (surface disposal) の場合は塩水流体の有害化学物質の影響、保護地区内の生息地の変化
水力 (一般的な影響)	沿岸、河川、及び静水の生態系改変、魚類の回遊経路との干渉、産卵場所と生育域へのアクセス低下、河川の堆積負荷の変化
水力 (貯水型の典型)	氾濫を通じた生息地及び特殊なビオトープの喪失 (陸生から水生へ、河川から静水への生態系の変化)、化学組成と水温の変化による影響 (下流)、季節の流動様式と洪水様式の変化、在来種の絶滅や非在来種の導入、水循環の下流の変化
潮汐	海洋及び沿岸の生態系の変化、水の濁度の変化、植物生育、魚類と鳥類の繁殖種に影響を与える河口の塩分濃度と土砂流動の変化
海洋塩分濃度差	局所的な海洋環境及び河川環境に対する汽水排水の影響
海洋 (海洋温度差)	栄養分豊富な水が表層に上昇する効果による、水生生物への影響の可能性
海洋 (波力エネルギー、海流及び潮流)	タービン翼回転、騒音、振動、及び電磁場による、敏感な種 (軟骨魚類、海洋哺乳類) への影響、漂泳性の生息地と底生群集の自然のバランスの破壊
風力 (沿岸)	渡り鳥の飛行経路の妨害、鳥類や猛禽類、コウモリの衝突死、地域の回避または移動、繁殖の低下
風力 (沖合)	海洋哺乳類に悪影響を与えかねない建設時の音波、底生群集の自然のバランスの破壊

再生可能エネルギー技術が生物多様性に与える影響に関する科学的証拠は、まちまちである。バイオエネルギーの場合、様々な原材料の生産システムの地域的影響及び大規模な展開の結果の双方が、研究されている。様々な原材料の生産及び管理システム (有機残渣の使用含む) が生物多様性に与える局所的な影響は、プラスとマイナスの双方の証拠がある (Semere and Slater, 2007; Firbank, 2008; Fitzherbert et al., 2008; Baum et al., 2009; Lovett et al., 2009; Schulz et al., 2009; Fletcher et al., 2011; Riffell et al., 2011 など)。しかしながら、バイオエネルギーの大きな可能性の活用は、懸念の原因と見なされている。生物多様性に富み、絶滅危惧種及び固有種の生息地になっている既に分断され環境が悪化している地域に対して、潜在的な影響を伴う (Firbank, 2008; Sala et al., 2009; WBGU, 2009; Dauber et al., 2010; Beringer et al., 2011 など; 2.2.4., 2.5.5, 9.4.3.5 及び 9.4.4 節参照)。バイオエネルギーが生物多様性に与える全体的な影響は、将来の気候変動緩和に関する長期的なプラスの影響及び土地利用転換による短期的なマイナスの影響のバランスにも左右される (Dornburg et al., 2008)。

場所により異なる影響の場合、水力発電 (Rosenberg et al., 1997; Fearnside, 2001; IUCN, 2001 など; 5.6 節参照) では、主に環境影響評価に基づいた十分な証拠が利用可能であり、沿岸・沖合の風力ファーム (7.6.2 節参照) や一部の太陽エネルギー技術 (Tsoutsos et al., 2005 など) においても、ある程度利用可能である。地熱エネルギーにおいて

利用可能の証拠はさらに少なく、様々な海洋装置及び潮力装置（潮汐除く）は、生物多様性に与える影響を評価するには、時期尚早の開発段階である。しかしながら、大規模な導入が長期的に個体群レベルで与える結果は、全てのエネルギー技術でさらに調査する必要がある。

### 9.3.4.7 事故及びリスク

現在及び将来のエネルギーシステムと関連する事故リスクの比較評価は、エネルギー及び持続可能性を包括的に評価するうえで、極めて重要な側面である。事事故象は、自然災害 (Steinberg et al., 2008; Kaiser et al., 2009; Cozzani et al., 2010 など)、技術の不具合 (Hirschberg et al., 2004a; Burgherr et al., 2008 など)、意図的に悪意ある行為 (Giroux, 2008 など)、及び人為ミス (Meshakti, 2007; Ale et al., 2008 など) が原因となる可能性がある。本節では、社会的なリスク対策に焦点を置きつつ、ある事象の確率及びその結果に関する客観的な情報に基づき、様々なエネルギー技術の事故によるリスクを比較する (Jonkman et al., 2003 など)。通常の運用、意図的行為、及び倫理基準違反の影響だけでなく、能動的リスクと受動的リスクの比較、及び労働安全におけるリスク内在化の側面は、対象にしない。再生可能技術の大規模な展開に関連する追加的リスクについても、議論を行う。

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 (Hirschberg et al., 1998; Burgherr and Hirschberg, 2008)。1990年代初めには既に、エネルギー部門の事故は世界規模の人為的事故で第二位を占めることが認識されている。しかしながら、完全性及びデータの質については、その論述は十分とは考えられていなかった (Fritzsche, 1992)。これに対応して、Energy-Related Severe Accident Database (ENSAD) が開発され、Paul Scherrer Institute により継続的に更新されている (Hirschberg et al., 1998, 2003; Burgherr and Hirschberg, 2008 など)。ここで示された結果は、いわゆる重大事故に注目している。これは、公的理解及びエネルギー政策で最も議論になるためである。方法論的アプローチの詳細は、Annex II に示す。

まず、致死をベースにした2つの補完的なリスク指標の評価を行い、包括的な概要を示す。致死が選ばれた理由は、致死のデータは一般に、信頼性、精度、完全性が最も高いためである (Burgherr and Hirschberg, 2008)。リスクを受容可能なレベルまで低下させることには、死亡者数も含まれる。これは、致死が貨幣化に耐えられるためである (Viscusi, 2010)。また、実際の事象または先行の事象から、ある技術の最大の致死ポテンシャルの推定値が分かる (Vinnem, 2010)。致死率は、重大事故 (5人以上の死亡) によって発生する死亡者数の推測数に基づき、発電の場合はGWと年で標準化される。最大の結果は最大の死亡数に基づき、これは特定のエネルギー技術の単一の事故に合理的に信用可能である。

図9.15は、現在運用中の様々な技術のリスク評価結果を示す。化石燃料チェーン及び水力の場合、致死率はOECD及びEU27諸国で一般に低く、非OECD諸国に比べ最大の結果も低くなる。化石燃料チェーンのなかでは、両方の指標の観点からは、天然ガスの成績が最も良い。中国の石炭の致死率は(1994~1999年)は、その他の非OECD諸国に比べて明らかに高い (Hirschberg et al., 2003; Burgherr and Hirschberg, 2007)。ただし、2000~2009年のデータからは、中国は緩やかなペースで非OECDのレベルに近づいていることが示されている (Annex II 参照)。大規模な集中型の技術の中では、近代的な原子力及びOECDの水力プラントで致死率が最も低いが、それと同時に、極端な現象の結果も非常に大きくなる可能性がある。OECD諸国の水力発電の経験では致死率は非常に低くなっており、原子力発電を対象とした確立論的安全性評価 (PSA)の代表的な結果と比べても低くなっているが、非OECD諸国ではダム事故で多数の犠牲者が出る可能性がある。2010年までに<sup>16</sup>、原子力発電所では2件の炉心溶融事象が発生した。スリーマイル島の2号炉 (TMI-2、アメリカ、1979年) 及びチェルノブイリ (ウクライナ、1986年) である (Annex II 参照)。ただし、チェルノブイリの事故は、OECD諸国で他の技術及び安全性の高い技術を使用して運用中のプラントを代表するものではなく、非OECD諸国における現在の状況を代表しているわけでもない (Hirschberg et al., 2004a; Burgherr and Hirschberg, 2008)。第三世代の原子炉は、現在運用中の発電プラントに比べ致死率が大幅に低くなると推測されるが、プラントの大規模化の傾向により、最大の結果は大きくなる可能性があるだろう (Annex II 参照)。その他の再生可能技術は全て、化石チェーンに比べ致死率が明らかに低く、先進国では水力及び原子力と完全に比較可能である。最大の結果に関しては、これらの再生可能源はその他の全ての技術に比べて優れている。分散的な性質が、大惨事を引き起こすポテンシャルを強く制限しているためである。ただし、現在は完全に定量化が難しい再生可能エネルギーの追加的なリスク要因を評価することは重要であるが、潜在的に大規模な展開を阻害しかねない (表9.12 参照)。

<sup>16</sup> 2011年の3月に日本の福島で発生した3番目の炉心溶融事象は、現在の分析では取り上げられていない。

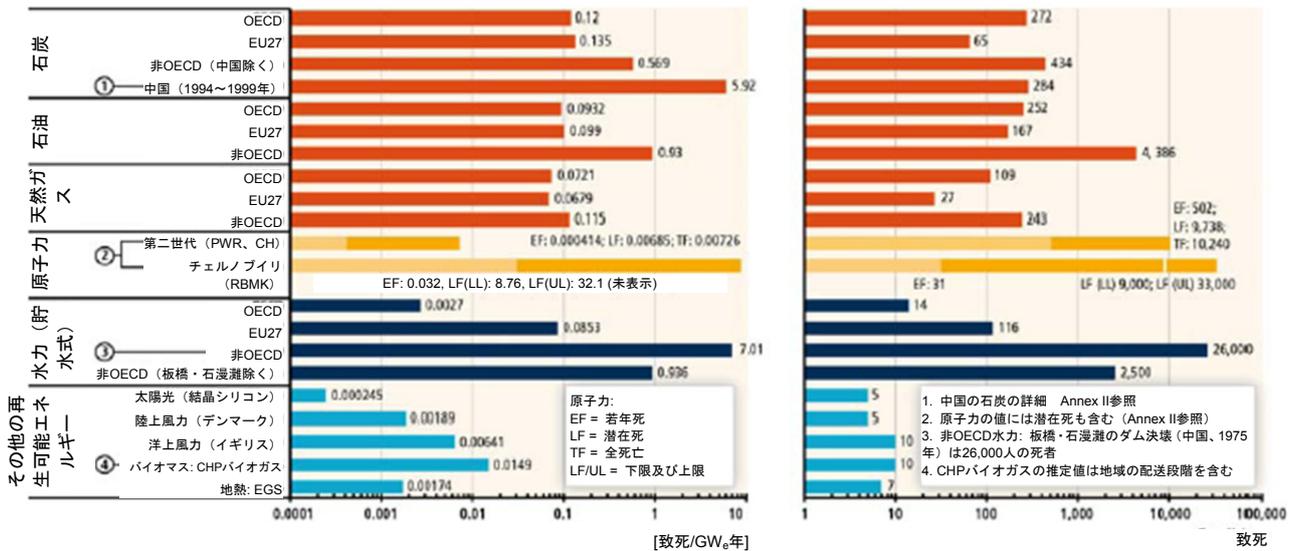


図 9.15: 現在運用中の大規模な集中型のエネルギー技術及び分散型のエネルギー技術に関する、致死率及び最大の結果の比較。化石及び水力は ENSAD のデータベース (1970~2008 年) に基づく。原子力では、確率論的安全性評価が適用される。その他の再生可能エネルギー源については、利用可能なデータ、文献調査、及び専門家の判断を組み合わせて使用する。方法論の詳細に関しては、Annex II 参照。

注: RBMK = 黒鉛減速沸騰軽水圧力管型原子炉。沸騰水冷却 黒鉛の減速材の中に圧力管を配置する種類の原子炉; PWR = 加圧水型原子炉; CHP = コージェネレーション; EGS = 地熱井涵養システム

事故は、広範な土地及び水域も汚染する可能性がある。放射性同位体の排出による偶発的な土地汚染は、原子力技術にのみ関連する (Burgherr et al., 2008)。原油及び石油製品が偶発的に海洋環境に放出されることに関しては、1970 年代以降は、技術的な方法だけでなく、国際協定、国の規制、及び財政的負担の強化で大幅な改善がなされている (Burgherr, 2007; Knapp and Franses, 2009; Kontovas et al., 2010)。それでもなお、石油の採掘及び生産による偶発的な流出はよく発生し、塩水資源及び淡水資源の双方に影響を与える可能性がある (Kramer, 1982; Jernelöv, 2010; Rogowska and Namiesnik, 2010)。また、掘削プラットフォームであるディープウォーター・ホライズン (2010 年のメキシコ湾における 67 万トンの原油流出事故: Lubchenco et al., 2010) など、非常に悲惨な事象は将来において排除できない。さらに、深海の資源 (メキシコ湾、ブラジルなど) や極端な環境 (北極圏など) での掘削が増えれば、環境及び経済に対して潜在的に高い影響を伴う事故の脅威は拡大する。化学物質の流出は、天然のシェールガス及び地熱の運用時にも水圧破砕で発生する可能性があり、潜在的に地域の水が汚染される可能性がある (Aksoy et al., 2009; Kargbo et al., 2010)。この分野では、経験が増えるにつれて更なる調査が必要である。

表 9.12 及び以下の概要は、完全に定量化できていないリスクの側面をまとめている。定量化が不完全な理由は、限定的なデータ及び経験しか利用できないか、主に結果に焦点を置いた従来のリスク指標では完全にカバーできないためである。地熱井涵養システムの誘発する地震活動の影響は遅延の原因になっており、アメリカ及びスイスの 2 つの地熱井涵養システムの主要プロジェクトは、永久放棄にさえなっている (Majer et al., 2007; Dannwolf and Ulmer, 2009)。沖合の風力発電地帯の拡大加速に伴い、洋上の風車と船舶の衝突に関するリスク分析及びその後のリスク低減策導入が、重要な側面になっている。発生頻度は低いが、結果は大きくなる可能性がある (Christensen et al., 2001; Biehl and Lehmann, 2006)。地政学的に安定しない地域で再生可能を大容量で設置する場合、再生可能エネルギーのインフラ (システムを含む) 及び供給に対する脅威は重大な要因となるだろう。これには、非国家主体 (サボタージュ、テロリズムなど) による意図的な供給切断、物理的攻撃またはサイバーアタックなどを含む (Lacher and Kumet, 2010)。バイオエネルギーの重要な課題には、食料生産及び水資源使用との潜在的な競合などがある (Koh and Ghazoul, 2008 など; 2.5.7.4 及び 9.3.4.4 節参照)。潮力及び波力の発電技術は、多数の試作品が設置され、小規模な商用プロジェクトもいくつか見られるが、依然として開発の比較的初期段階である。このため、これらの潜在的な影響及びリスクは、ある程度の理解という段階にも到っていない (Westwood, 2007; Güney and Kaygusuz, 2010; Langhamer et al., 2010; Shields et al., 2011)。

表 9.12: 様々なエネルギー技術の特定の追加的なリスク面に関する概要

リスク面	影響を受ける技術及び参照
地震活動誘発、地盤沈下	石油及びガスの生産、炭鉱 (Klose, 2007, 2010b; Suckale, 2009) ; 貯水式水力 (H. Gupta, 2002; Kangi and Heidari, 2008; Klose, 2010a; Lei, 2010) ; 地熱 (Bommer et al., 2006; Majer et al., 2007; Dannwolf and Ulmer, 2009) ; 二酸化炭素回収・貯留 (IPCC, 2005; Benson, 2006; Holloway et al., 2007; Bachu, 2008; Ayash et al., 2009) 。
資源の競合	バイオエネルギー (Koh and Ghazoul, 2008; Ajanovic, 2011; Bartle and Abadi, 2010) 貯水式水力 (Wolf, 1998; Sternberg, 2008; McNally et al., 2009) 。
有害性物質	太陽光発電 (PV) との関連性は、影響を適切に配分するため部門の規模縮小を必要とする (Annex II 参照) (Coburn and Cohen, 2004; Bernatik et al., 2008) 。 地熱の場合、地下水汚染発生の可能性 (Aksoy et al., 2009)
長期の貯蔵 (市民の受容)	放射性廃棄物の処分 (Adamantiades and Kessides, 2009; Sjöberg, 2009) ; 二酸化炭素回収・貯留 (IPCC, 2005; Huijts et al., 2007; Ha-Duong et al., 2009; Wallquist et al., 2009) 。
拡散	原子力 (Toth and Rogner, 2006; Yim, 2006; Adamantiades and Kessides, 2009) 。
地政学、テロリストの脅威	炭化水素及び再生可能源 (太陽熱など) の安全保障及びエネルギー地政学 (Le Coq and Paltseva, 2009; Giroux, 2010; Toft et al., 2010; Lacher and Kumetat, 2010) 。
	石油タンカーやガスタンカーに対する海賊の襲撃 (Hastings, 2009; Hong and Ng, 2010) 。

結論として、再生可能技術の事故リスクは無視できないが、その分散的な構造のため、死亡者数の点で悲惨な結果が生ずるポテンシャルは強く限定されている。しかしながら、上記で概要を示したように、様々な追加的なリスクは、純粋に致死ベースの研究方法を補完することから、検討されるべきである。公的な議論 (危険回避など) 及び意思決定 (政策など) で重要な役割を担うだろうためである。

## 9.4 再生可能エネルギーの (持続可能な) 開発の道筋の示唆

9.3 節では、現在及び新たな再生可能エネルギー (RE) システムが本章で評価を行う持続可能な開発 (SD) の 4 つの目標 (これらの持続可能な開発の目標に関する概念的な説明は、9.2 節参照) に与える影響に注目したが、それとは対照的に、本節では、持続可能な開発の道筋及び将来の再生可能エネルギー普及について取り上げる。したがって、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 (9.2.1 節参照) 。

しかしながら、持続可能な開発の道筋において再生可能エネルギーに特化して論じた地域的分析は、数例である<sup>17</sup>。これらの結果では、持続可能な開発の道筋及び再生可能エネルギーの普及には、一般に正の関係があることが示されているにせよ、9.2 節で論じた 4 つの目標に関しては、限定的な洞察しか提示されていない。また、持続可能な開発の観点において、具体的な社会経済的な制約及び生物物理学的な制約を明白に示していない。さらに、世界規模のエネルギー部門の将来の道筋を大きく形づくる様々なエネルギーのサービス向けの多様な技術、及びその幅広い社会経済的、環境的な示唆の間には世界規模の複雑な相関関係があるが、それを無視している。持続可能な開発と再生可能エネルギー普及の道筋<sup>18</sup>の相関は、個別のエネルギー技術の部分的な分析に依存して予測することはできないため (9.3 節参照)、本節の議論はシナリオ文献の結果を基に行われる。この文献では一般に、世界規模または地域のエネルギーシステムの枠組みにおける技術的代替のポートフォリオを扱っている。

本節 (及び第 10 章) 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モデルから、世界の生物物理学的プロセスのモデルと重要な人的システム (エネルギー、経済、及び土地利用など) のモデルを併用した統合的な評価モデルに到るまで、多岐にわたる。

<sup>17</sup> インドを対象としたシナリオ分析では、たとえば Shukla et al. (2008) で、再生可能エネルギーの割合は追加的な持続可能性の政策を盛り込んだ緩和シナリオで高いことが示されている (一次エネルギー 34% に対し 47%)。日本の場合、低炭素社会へのロードマップを分析した複数のバックキャスト研究では、再生可能エネルギーの割合拡大など、需給サイド双方の選択肢の必要性が強調されている (Fujino et al., 2008; Suwa, 2009)。

<sup>18</sup> 9.2 で既に論じられていることから、道筋は主に、一方で持続可能な開発、他方では世界規模で様々なエネルギー技術間の複雑な相関関係を解決しようとするシナリオ結果として解釈される。

長期的シナリオ形成におけるこれらのモデルの価値、特に持続可能な開発及び再生可能エネルギー間の関連を理解するためのそのポテンシャルは、世界規模及び地域規模、一年から数十年、世紀といった時間尺度で、幅広い人間の活動全体（産業の排出を生じる活動、土地利用と土地被覆の変化につながる活動など）における相関関係を明示的に検討する能力に依存する。これらのモデルは第 10 章に合わせ、本節でこれから展開される議論では「統合モデル」とする。なぜならこれらのモデルは個々の技術を単独で検討するのではなく、技術間の関係、エネルギーシステム、経済システム、その他の人的システムと自然分類の間の関係を調査しているためである。統合モデルは、政策的処方ではなく記述的に設計されているが、実際は政策担当者に対し、その行為に関する洞察を提供する。これは、従来の学問的調査のみに注力しては、得ることができない。

統合モデルは長年世界規模のエネルギーシステムの詳細な特性評価の分類を行うために使用されている。この評価は、気候安定化及び他のエネルギー源との経済的競合における再生可能エネルギーの役割を検証するうえで、必要である。これらのモデルも、9.2 節で取り上げた持続可能な開発の 4 つの目標に関する問題を、様々な度合いで検証可能である。大気中の排出の命運を左右する生物地球物理学的プロセスを示す度合いはモデルによって異なる。大半のモデルは、人間の活動のサブセットの一部及び生態系との相互作用を扱うが、一般に、地球システムの他の部分からのフィードバックを捉えていない。一部の事例では、これらのフィードバックは大きい可能性がある。統合モデルは強力な分析ツールであり、近い将来の長期的シナリオを形成する主な手段になる可能性が高いものの、開発は継続的に行われている。これらの開発の一部は、将来のシナリオで持続可能性の懸念が示されていることに関連する。開発の重要な分野としては、資源及びそれを活用しエネルギーを保存する技術<sup>19</sup>（最終消費の技術を含む）の説明の向上、国際取引と地域間取引の説明の向上、空間分解能と時間分解能双方の拡大、人口全体での富の配分の説明の向上、人的システムと物理的な地球システムの特性評価（水、水循環など）のより詳細な取り込み（気候フィードバック、気候変動に対する影響及び適応も含む）、不確実性及びリスク管理の取り込み、多様化と複雑化が進む政策環境の調査が挙げられる。

具体的な結果に目を転じる前に、いくつかの注意点を整理する。モデル間の標準化を行う試みはいくらか見られるが、決して「管理された実験」ではない。たとえば、モデルは、様々な重要な要因（技術、人口成長、経済成長、エネルギー強度、及びエネルギーシステムがエネルギー価格の変動に対応する方法など）に関する標準化されていない想定に基づき、非常に異なる成り行き予測（business-as-usual）を行う。これらの想定は、緩和シナリオにおけるエネルギーシステム及び福祉の損失に対し、絶大な影響を与える可能性がある。原子力及び二酸化炭素回収・貯留の制約など、分析の焦点になりがちなパラメータでさえも、モデル間で異なることが多い。さらに、全てのモデルではないが、一部のモデルでは「学習曲線」を用いる。これはつまり、再生可能エネルギーまたは他の技術のコストは、能力が高まると減少するとの想定である。さらに、一部のモデルでは、バイオマスと二酸化炭素回収・貯留の組み合わせを考慮している。この技術の選択肢は、マイナスの排出を創出するため、転換プロセスの緩和及び緩和コスト削減を可能にする（Wise et al., 2009; Edenhofer et al., 2010; Luckow et al., 2010; Tavoni and Tol, 2010; van Vuuren et al., 2010b）。これら全てが、モデル間のかなりの差異を生む。しかしながら、モデルが多くの基本的洞察において基本的には合致している点は重要である（10.2 節参照）。

本節は、9.2 節に示す持続可能な開発の 4 つの目標に沿って構成される。これらは、1) 社会及び経済の発展、2) エネルギーのアクセス、3) エネルギー安全保障、及び 4) 気候変動緩和及び環境、健康への影響の軽減である。本節では、持続可能な開発の道筋及び再生可能エネルギー間の相関関係について、長期的シナリオに関する文献から学習可能な事柄の概要を示す。本節の目的は、2 つの要素で構成される。1 つ目は、持続可能な開発の道筋及び再生可能エネルギーの役割に関して、長期的シナリオが現在提示する必要がある事柄の評価で、2 つ目は、将来の持続可能性の問題を深く理解するため、これらのシナリオ作成に使用されたモデリングのツールを改善可能な方法の評価である。

### 9.4.1 社会及び経済の発展

本節では、長期的シナリオにおける再生可能エネルギーの普及と、社会と経済の発展との関係の成長について論じる。これらの長期的シナリオ作成に使用された統合モデルは、一般にマクロ的な見方が強いため、人間開発指数（HDI）など、GDP と比較した代替的な福祉指標に関連する平均余命または余暇時間のような側面は無視している（9.3.1 節参照）。このため、本節では、経済成長及び関連した方法論について注力する。一般に、GDP 自体は、持続可能性の評価基準としては不十分である（Fleurbaey, 2009）。また第 10 章で取り上げるシナリオの大半は、将来の温室効果ガス累積排出量に上限を設けている。しかしながら、本報告書では、様々な炭素の制約が危険な気候変動を回避する政策とその程度一致するかについては論じていない。このため、経済成長は、様々な安定化の道筋における福祉の指標的基準としてのみ使用可能である。

<sup>19</sup> 残念ながら、こうした分析では最近まで、再生可能エネルギー技術だけでなく、実際は技術全般に対して注意を十分払わない傾向が続いていた。これらのシナリオ作成に使用される統合モデルの技術的詳細は、開発が続けられている。本及び第 10 章で検討されるモデルの大半は、十年前に利用可能だったモデリング能力に関して、技術の表現は大幅に向上している。

### 9.4.1.1 将来のシナリオにおける社会及び経済の発展

温室効果ガス排出削減のコストに関しては、過去 20 年で莫大な分析が行われている (IPCC, 1996a, 2001, 2007b など参照)。これは一般に費用効果分析に基づくもので、特定の目標に達するコスト及び手段を調査したものであり、世紀の時間尺度で緩和と適用によるコスト及び便益を同時に検討する費用便益の分析ではない。また、主要な目的は、時間の経過に沿った緩和及び適用の最適なパターンを決定することにある。費用効果分析では、たとえば、大気中の温室効果ガス濃度を 450ppm CO<sub>2</sub>eq 以下に抑制するなど、長期の社会的目標を想定する。排出、濃度、またはより一般的な放射強制の制限は、排出削減で最もコスト効率の良いパターンを研究するために使用される。これらの分析は典型として、様々な社会経済的想定、技術的想定、及び地政学的想定に基づき、期間も数十年から一世紀以上に渡る。温室効果ガス排出に制約が課される場合、福祉の損失が生じることが非常に多い。社会的な福祉損失を直接推定する方法から、過去の GDP または消費 (GDP の主要構成要素) の先送りといったより一般的で総体的な方法など、様々な手法が使用される。福祉についてのその他の概念は、たとえば 9.3.1 節で示したように、通常は検討されない。したがって、こうした計算は本質的に、エネルギー需要を満たすために使用されるこれらの技術の利用可能性とコスト、及びこれらの技術から生ずる温室効果ガス排出に関する想定である。それは、温室効果ガスの制約がある場合、及びない場合のいずれも対象になる。

第 10 章で検討されたシナリオは、再生可能エネルギーが生み出す可能性のある福祉の影響について、印象を与える。第一に、驚くべきことではないが、GDP 低下は温室効果ガスの制約に関連しており、特定の技術ポートフォリオとは別個のものであることに留意が必要である。つまり、少なくとも、変化する気候からのフィードバックを考慮しないシナリオでは、緩和は一般に経済成長を鈍化させる。これは、現時点で存在する統合シナリオの大半と同様である。

第二に、温室効果ガス制約に利用可能な選択肢を限定することで、GDP の損失は増加する。したがって、再生可能エネルギー技術を普及させる能力が限定的な場合、経済発展は鈍化する。過去 10 年にわたる幅広い分析では、様々な温室効果ガス安定化レベルを対象に、再生可能エネルギーのコスト、性能、及び最近では利用可能性についての様々な想定から (Kim Oanh and Dung, 1999; L. Clarke et al., 2008, 2009; Luderer et al., 2009; Edenhofer et al., 2010 など)、福祉の影響を調査している。これらの研究の全てにおいて、再生可能エネルギーのコスト、性能、及び利用可能性をより悲観的に評価することで、緩和コストが増加すると実証されている。実際、最近の調査によると、非常に意欲的な気候変動の目標ではコストが割高になるだけでなく、再生可能エネルギーを含め、選択肢の完全なポートフォリオがなければ達成不可能だろうということが示されている。たとえば、Edenhofer et al. (2010) の提示したモデルのいくつかは、再生可能エネルギー技術をそのベースラインレベルに制約した場合、400ppm CO<sub>2</sub>eq の目標を達成する実行可能な解決策を発見できなかった。バイオエネルギーと二酸化炭素回収・貯留を併用する方法の利用可能性は、非常に意欲的な気候変動の目標を達成するうえで、特に重要である (Azar et al., 2010; Edenhofer et al., 2010; van Vuuren et al., 2010b)。より一般的には、シナリオでは、コスト削減という点で、再生可能エネルギーが原子力、または二酸化炭素回収・貯留の併用を伴う化石燃料エネルギーに比べて重要かどうかは明確に示されていない。たとえば、Edenhofer et al. (2010) 及び Luderer et al. (2009) で分析された 6 つのモデルのうち 4 つでは、再生可能エネルギーを制約する経済的コストは、原子力、及び二酸化炭素回収・貯留の併用を伴う化石燃料エネルギーに比べ高くなることが分かっているが、かなりの桁数の差異が生ずる (第 10 章の図 10.10 及び 10.11 参照)。その他の低炭素のエネルギー技術が制約された場合、驚くべきことではないが、再生可能エネルギーによる一次エネルギーの割合は増加する (第 10 章の分析及び図 10.6 を参照)。同時に、緩和コストが増加すると、エネルギー消費は全体的に減少する。

多数の研究 (Edmonds et al., 2006; L. Clarke et al., 2007, 2009; Fawcett et al., 2009; Luderer et al., 2009) は様々な部門を検討した結果、電力部門は輸送部門に比べて脱炭素化が容易に可能であるとした。なぜなら再生可能エネルギー、原子力、及び二酸化炭素回収・貯留など、多数の低炭素の選択肢を利用可能であることが理由として挙げられる。この結果は、様々な低炭素技術が制約を受ける場合や、先進国及び開発途上国のどちらの場合でも、確かなことが立証されている。輸送部門においては、脱炭素化はより難しく、最長で 2100 年までの長期において化石燃料が全モデルで大幅な割合を占める。これは、たとえばバイオ燃料または輸送部門の電化 (Turton and Moura, 2007 及び第 8 章なども参照) といった石油を代替する低コストの代替物がないことで、説明可能である (エネルギー安全保障に関する 9.4.3 節も参照)。たとえば L. Clarke et al. (2009) など、最近の多くの研究では、電気利用の乗り物、電気ハイブリッドの乗り物など、旅客及び商用の輸送に関する幅広い範囲の選択肢を検討するモデルが含まれる。低コストの電気利用の乗り物技術を開発すれば、輸送部門でもより容易に安いコストで排出を削減出来るだろう (US DOT, 2010 など参照)。

福祉に関する世界規模の平均的な指標は、再生可能エネルギー、気候変動緩和、及び経済成長の間に見られる一般的な関係を調査する際は有益だが、関心の大部分は、世界規模の総計ではなく、開発途上経済及び新興国の経済の相対的パフォーマンスに集中している。重要な疑問は、一般的な緩和や、特に再生可能エネルギーが経済成長にどのような影響を与えるかという点である。

緩和シナリオは、この問題に対して一般的な洞察を提示する。全体として、世界規模の分析で得られた再生可能エネルギー、緩和、経済成長に関する同一の基本的な教訓は、開発途上国の分析でも見出すことが出来る。経済成長の影響は、一般に附属書 I 国に比べ非附属書 I 国のほうが大きい。これは、非附属書 I 国では、経済成長の速度がより早く、時の経過とともに温室効果ガス緩和の割合が高まり支配的になると想定されるためである。図 9.16 は、第 10 章の分析を踏まえ、様々な再生可能エネルギー源を対象に、世界規模の再生可能エネルギー普及における非附属書 I 国の割合を示す。ここでは、将来の再生可能エネルギーの大半は開発途上の世界で普及するとの推測が示されている (Krey and Clarke, 2011)。開発途上国は工業化のプロセスを完全に終えていないため、これは特に重要である。エネルギー効率で非常に大きな進歩が見られるとはいえ、その開発プロセスには依然としてエネルギー消費の大幅な増加を伴う可能性が高い。開発途上国における炭素フリーなエネルギーシステム導入に付随する重要な課題は、現在の市場価格に比べ、再生可能エネルギー（及びその他の低炭素の技術）の高い均等化発電原価を克服することである (Annex III 参照)。この課題を達成できれば、先進国がこれまで辿った排出集約型の開発の道筋をリープフロッグ出来るだろう<sup>20</sup>。

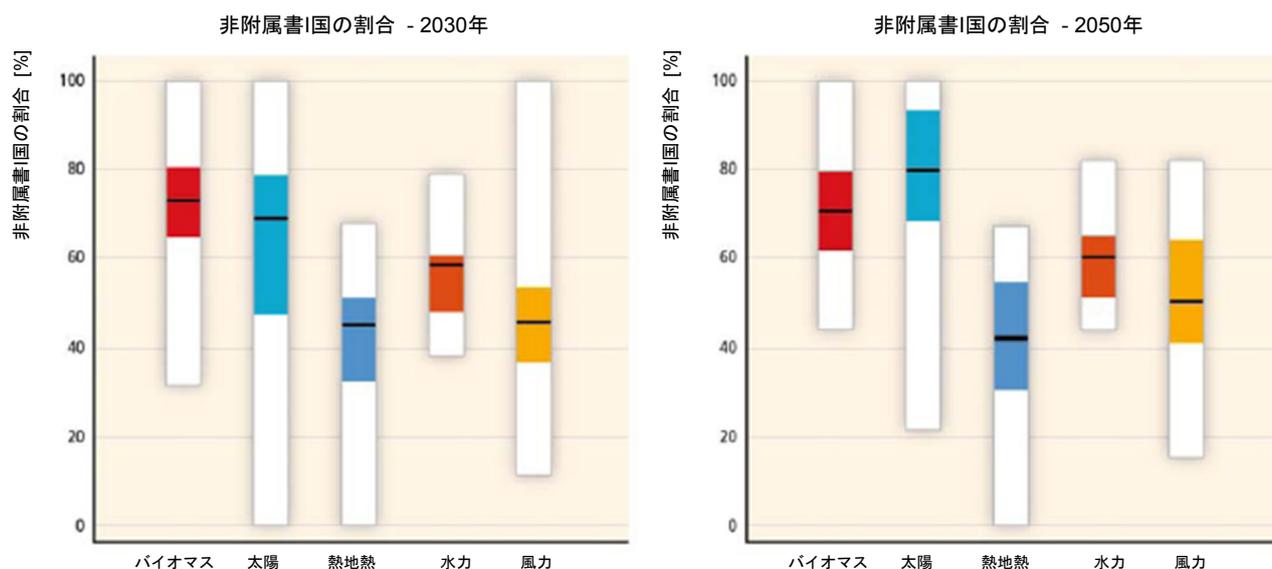


図 9.16: 長期的シナリオで示された様々な再生可能エネルギー源の世界規模の普及における、非附属書 I 国の割合 (2030 年、2050 年)。黒の細線は中央値、棒内の着色部分は四分位範囲 (25~75 パーセントイル)、白の棒の両端は評価されたシナリオ全体の上限と下限を示す (Krey and Clarke, 2011 より採用)。

全ての地域が同一の経済効率の炭素価格の道筋を用いて緩和を行う場合、結果としての技術ポートフォリオは排出量枠の配分と無関係である (Coase, 1960)。しかしながら、地域の排出緩和は、技術の利用可能性、経済成長、及び人口といった多数の要因により異なる。取引可能な排出量枠が配分される場合、各地域のコストは、その緩和コストと他地域から購入した排出権取引の価額の総計 (あるいは、その緩和コストから他地域に売却した排出権取引の価額を差し引いた額) になる。したがって、炭素の世界価格が排出権取引の配分とは無関係であっても、コスト総額は、国内の緩和コストに関連して、排出権取引の売却者にとっては減少し、排出権取引の購入者にとっては増加する。

もし排出削減義務が地域に配分され、取引が認められない場合、すべての地域や部門で排出削減のための限界コストが均一になるとは考えられず、つまりは地域の技術ポートフォリオに影響することになる。このような状況においては、どのような排出削減レベルにおいても全世界の総コストは限界コストが均一の状況と比較して高くなる。しかしながら、コストの地域的な配分は、初期段階及びその後にはわたる排出削減の義務の割り当てに依存する (Weyant, 1993; Edmonds et al., 1999; Scott et al., 2004; Luderer et al., 2009)。

#### 9.4.1.2 調査のギャップ

上述の分析で使用されたモデルは一般に、GDP または消費の損失といった総体的な手法に焦点を合わせていることから、福祉の損失を図る指標としては不十分であることは、強調されるべきである。9.2 節で示したように、大半のエコノミストが GDP は福祉の指標としては不十分であると見なしている。しかしながら、平均余命または余暇時間といったその他の福祉の指標を使用するのは、現在の統合モデル群では難しい。また、損失は経済全体のレ

<sup>20</sup> リープフロッグの詳細な議論については、9.5.2 も参照。

ベルで測定され、1人当たりの GDP 損失と関連するとはいえ、誤解を招く可能性がある。結局のところ、モデルは、人口全体での富の配分を示さない。富の配分は「少数」への集中しているのだろうか、「多数」へより均等に配分されているのだろうか？

9.4.1.1 節で示された一般的な洞察を超え、特に再生可能エネルギー及びその他のエネルギー技術に関連して、シナリオは一般に、開発途上国に先進国とは異なる行動をする作用（物理的インフラ、制度上のインフラの相違、経済市場の有効性と効率など）の多くを十分に評価していない。世界規模の長期的シナリオ形成に使用されるモデリングの構造は、一般に世界全域で完全に機能する経済市場及び制度上のインフラを想定しているために、たとえばこれらの想定が特に弱くなる開発途上国などにおいては、各国に広がる特殊な状況を無視することになる。各国の社会と経済の発展においてこれらのモデリング構造が持つ差異や影響の種類は、将来積極的な調査を行う分野になるはずである。

## 9.4.2 エネルギーのアクセス

### 9.4.2.1 将来のシナリオにおけるエネルギーのアクセス

持続可能な開発の基本的な目標の1つは、現在エネルギーのサービスに限定的にしかアクセスできない人々に対し、よりクリーンに生産されたこれらのサービスを拡大していくことである (Goldemberg et al., 1985)。持続可能なエネルギー開発は、多数の要素からなり (9.2 節; IPCC, 2000 参照)、本節は特に、様々な人口に対するエネルギーのサービスの将来の利用可能性にどのような異なったエネルギーのシナリオが決定権を持つかについて焦点を当てる。このサービスには、基本的な家庭レベルのもの（調理、照明、温水、水汲み、空間暖房、冷房、冷蔵など）、輸送（個人、貨物）、及び商業、製造、農業用のエネルギーを含む。

統合モデルは、将来の可能性あるエネルギーシステムを評価、調査するため、30年以上にわたり使用されてきたが、エネルギーのアクセスの分析がこれらのモデルで実施されたのは、この10年だけである。統合モデルの初期のものは、全てではないがその大半が、工業国の情報及び経験を基にしていた。開発途上国のエネルギーシステムは、同様に作用すると想定されることが多かったが、一部の例外では、先進地域及び開発途上地域の差異に注意を向けていた (Shukla, 1995)。また、統合モデリングの場合は以前から、基礎となる想定を全く変えずに工業国のデータを低所得国に適用し、開発途上国のシナリオを評価していた。しかしながら、開発途上国と現在の工業国では、そのエネルギーシステムに根本的な差異が依然として存在する。同様に、先進国の経験に基づくモデルや、先進国のデータを使用するモデルは、重要で決定的な変化の型を捉えていないことが多い。これらには、伝統的な燃料を使用する選択、送電システムへの不正アクセス、非公式経済、及び国内経済の構造変化などがあり、いずれも世界の多くの場所で、アクセスに対して明らかに大きな影響を与えている (van Ruijven et al., 2008)。

これらの要因は、開発途上国のエネルギーシステム及びエネルギーアクセスのダイナミクスの双方を分析する際に重要だが、これらを明示的に説明する統合モデルはわずかしかない。Urban et al. (2007) が行った12の有名な統合モデルの比較研究では、開発途上国の状況にこれらの問題を適用することに進歩が見られる。電化を扱ったモデル全て、及び大半のモデルでは、明示的にではないにせよ、伝統的バイオマスの使用及び都市部や農村部の変化の型を導入している。ただし、モデルの多くでは、潜在的な供給不足、非公式経済、及び投資の意思決定といった重要な要因が依然として欠如している。これらの課題の一部は、修正されたモデルに取り込まれつつある。たとえば、ピーク時間帯の供給不足を回避する方法を理解するため、南アフリカの MARKAL モデルには、電力のダイナミックな価格設定を許容する高等な一時的解決策及び日中の負荷曲線が追加された (Howells et al., 2005)。同様に、燃料選択における非公式経済の側面を反映させるため、MESSAGE には、燃料使用に関連して、非商用の「不便コスト」が追加されている (Ekholm et al., 2010)。複数のグループは分布的な分解能 (distributional resolution) の増加を図り、人口を都市部と農村部に分割したり様々な所得グループに分割したりして、行動学的雑多性 (behavioural heterogeneity) を捉えようとしている (van Ruijven, 2008; Ekholm et al., 2010)。

それにもかかわらず、エネルギーのアクセスのモデルは一般に、データまたはプロセスの解明 (process resolution) が不足しているため、特定の地域または国に限定されていることから、多々の取り組みは今もなお必要である。別の障害として、近代的なエネルギーのサービスを受ける代替的な道筋を示すこと、モデルが本当に分配された様々な再生可能エネルギーのオプションの分布を捉え分析可能かを具体的に示すことが、相対的に難しい点が挙げられる。モデルが、大規模なシステムの供給または調理用燃料のみに注目するようであれば、エネルギーのアクセス問題の一部しか扱わないことになる。

エネルギーアクセスのモデルの解明は向上しているものの、農村部の変化の型に対する理解は今も不十分である。それにもかかわらず、開発途上国の農村部の人口は、近い将来のエネルギー需要を満たすため伝統的燃料に強く依存し続ける可能性が高いと思われる (表 9.1 参照)。所得の成長がアクセスの課題の一部を緩和すると推測されるが、この成長と燃料移行の関連には大きな不確実性が伴う。たとえば、2050年のインドのエネルギーシステムの

シナリオ分析では、ジニ係数<sup>21</sup>が現在のイタリアまたは中国のレベルに接近するかによって、将来の電化率に10%以上の差異が出ている (van Ruijven, 2008)。近代的エネルギーの普及を高めるためには、効果的な政策の実施及び大規模な投資の誘発が非常に重要である。

電化は、系統の拡張または非系統連系の分散型発電によるかを問わず、資本集約的で、多額の投資を必要とする。IEA の推定では、2030 年までに近代的エネルギーの普遍的アクセスを実現するには、2010~2030 年の間に 5,580 億 US ドル (2005 年) の投資が必要になる。電力のユニバーサル・アクセス達成には、このうち 5,150 億 US ドル (2005 年)、つまり年平均で 240 億 US ドル (2005 年) が必要になる。開発途上国が電化の資金を確保できない場合、電力を使用できない人口数は現在のレベルで横ばいになる (IEA, 2010b)。新たなエネルギーインフラを構築する間、低コストな伝統的バイオマス及び多額の初期投資を要する液化石油ガスの入手しやすさの組み合わせから、薪及びその他の形態の伝統的バイオマスは引き続き調理用の主なエネルギー源となるだろう。政策は普及拡大を誘起するするだろうが、経済的インセンティブの構造は地域の経済状況に合わせて調整されなければならない。Ekholm et al. (2010) が行ったインドの調理用燃料のシナリオ分析では、資金供給がない場合、2020 年までに液化石油ガスが完全に普及するには補助金が 50%必要になるが、電化製品購入の資金供給も改善されれば、補助金は 20%しか必要ない。

近代的なエネルギーへのアクセスがあるからといって、持続可能な開発の道筋が保証されるわけではない。第一に、近代的なエネルギーへの移行は、単に化石燃料に移行する場合もある。これでは結局のところ、持続可能にはならない。第二に、所得面において、一国内のエネルギー使用の分布は、アクセスの理解に必要な不可欠な要素である。たとえば、一部の国 (ノルウェー、アメリカ) では、電力に比較的平等なアクセスがあるが、その他の国 (ケニア、タイ) では、アクセスは所得によってかなり不平等である (A. Jacobson et al., 2005)。第三に、再生可能エネルギー使用も同様に、環境または健康にそれ固有の影響を与える可能性もある (9.3.4 節参照)。ただし、エネルギーの持続可能な使用を確保するため、近代的なエネルギーへのアクセスを提供しつつも全体的な環境負荷を軽減する方法は、必要不可欠である。こうした移行の 1 つの側面として、再生可能エネルギー技術で供給するエネルギーの割合を、系統及び分散型の双方で増加させることがある。また、エネルギー使用には社会的側面があり、再生可能エネルギーへの移行を強制すると、家計及びマクロ経済コストに影響を与えかねないという懸念に関連している。Howells et al. (2005) が行った、南アフリカにおける農村部の家庭の将来のエネルギー消費に関する分析では、照明及び娯楽のサービスの範囲を超えた電力への移行は、地域の燃焼排出による健康またはその他の外界事象を含むシナリオにおいてのみ生じた。

#### 9.4.2.2 調査のギャップ

持続可能なエネルギーの拡大により、エネルギーのサービスへのアクセスを現在あまり持たないグループでは、サービスの利用可能性が高まるはずである。これらは、貧困層 (財産、所得、またはより統合的な指標で測定)、農村部の住民、送電系統に接続のない人々、及び女性である (UNDP/UNDESA/WEC, 2000)。開発の観点からは、エネルギー技術の使用と利用可能性の分布、及びこれらが時の経過とともにどのように変化するかが、アクセス向上のポテンシャルを評価するうえで根本的に重要である (Baer, 2009)。アクセス拡大には技術及びサービスを届ける方法に様々な変化が必要であることから、分配の開始時だけでなく時の経過による変化を理解することも、シナリオごとにアクセス向上のポテンシャルを評価するうえで必要である。モデル出力を使用してアクセスの変化を評価するうえでの第二に困惑する要素は、多くのモデルが、エネルギー技術の活用の根底にある社会現象及び構造変化を把握不可能な点である。

分布的分解の欠如及び構造的硬直性という、これらの 2 つの側面は、統合モデル特有の課題である。モデルは歴史的に、エネルギー移行の技術的側面及びマクロ経済的側面に強く注目しており、その過程で、技術的な浸透または特定の供給源により生成されたエネルギーを総体的に測る方法を主に生み出してきた (Parson et al., 2007)。こうした方法は無論、国家間の低炭素エネルギーの相対的割合など、幅広い比較を行う場合に有益となる。しかしながら、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。

将来のモデリングの取り組みでは、本節で強調した問題の一部を潜在的に解決可能だろう。現在、アクセスは集計された統計値を価値尺度として推定するしかない。しかしながら、これらの集計された統計値とアクセスの関係は、国の間で明確に一貫しているわけではなく、時の経過とともに変化する可能性がある。このため、アクセスが懸念材料の場合、統合モデルは、エネルギーのアクセスの変化を最も良く説明する可能性の高い要素を取り込むべきである。伝統的燃料、電化モード、及び所得分布の明示は、このプロセスにいくらか解決策を追加出来るだろう。より根本的には、これらを代替的な開発の道筋の説明に結び付ければ、アクセスを提供する選択肢の可能性ある範囲をより包括的に提示出来るだろう。たとえば、分散型の非系統連系の発電と効率的な装置を併用する事例が大幅に増えれば、大規模な系統の接続は過去と異なり、アクセスを基本的に牽引する役割を果たさなくなるだろう。再生

<sup>21</sup> ジニ係数は、所得の不平等性を図る数値尺度である。

可能エネルギーは以前から、開発途上国では比較的割高と見なされているが、コスト削減及びエネルギー安全保障の懸念から、一部の場合ではエネルギーシステムの研究で潜在的に有益な供給源として見直されている (Goldemberg et al., 2000)。再生可能エネルギーは、現地の天然のエネルギー源を変換することから遠隔地では有益であり、こうしたシナリオでは大きな役割を果たし得る (9.3.2 節参照)。

### 9.4.3 エネルギー安全保障

9.2 及び 9.3.3 節で示したように、エネルギー安全保障は持続可能な開発と同様、定量的な定義も定性的な定義も確実に構築されたものがない。多くの国では、エネルギー安全保障は石油輸入レベルと反比例の関係にあると考えられることが多い。石油に焦点が置かれるのは、多くの国が供給分断に対して潜在的に脆弱である事実による。多くの先進国は、実際石油輸出国機構 (OPEC) が 1970 年代半ばに行った石油禁輸の間に石油供給の中断を経験しているという事実による。しかしながら、その重要性にかかわらず、実際に懸念されているのは、必ずしも石油に関してではなく、エネルギー供給の突然の中断に対する脆弱性と復元力、及び結果として生ずる一般的な価格の示唆に関することである。

その他の全てのことが平等な場合、エネルギーシステムが単一のエネルギー源に依存するほど、そのエネルギーシステムは深刻な分断による影響を受けやすい。これは 9.2 及び 9.3.3 節で論じたとおり、資源の利用可能性と分布及びエネルギー源の変動性と信頼性の双方の面におけるエネルギー安全保障上の懸念について事実である。同時に、供給の多様性は、分断のリスクが資源全体で同じである限りにおいてのみ効果があるということに注意が必要である。リスクが平等ではない場合、リスクが最も低く最も相関関係がないエネルギーにより比重を置くことが概して有益である。以下の議論では、供給の多様化とそれによるエネルギー供給者の市場支配力に注目し、再生可能エネルギーが将来のシナリオでエネルギー安全保障にいかに関与するかに取り組む。特に、石油市場を検証し、その後、エネルギー安全保障における再生可能エネルギー関連のエネルギー供給の変動性を評価する。

#### 9.4.3.1 将来のシナリオにおけるエネルギー安全保障

##### 資源の利用可能性及び分布: 供給の多様化及び石油市場

再生可能エネルギーの普及レベルは一般に、長期的シナリオの気候変動緩和に伴い増加し、結果として、エネルギーのポートフォリオがより広く多様化する。緩和シナリオで再生可能エネルギー普及がこうして分断のリスク全体を低減させる限り、これはエネルギー安全保障上の便益になる。化石燃料が温室効果ガス緩和のないエネルギーシステムで優位を保ち続けければ (Grubb et al., 2006; L. Clarke et al., 2009)、欠乏して集中化している供給を増やすことによるのみ対応可能な化石燃料需要のある地域にとっては、特に有益である<sup>22</sup>。ただし、資源市場の市場支配力は一般に、大規模な統合モデルでは示されない。このため、本小節では、再生可能エネルギーが石油を代替する能力に焦点を置く。石油は、エネルギー安全保障上、最大の懸念の原因と一般に認識される化石燃料である。高い価格の激高のしやすさもまた、エネルギー安全保障上の最大の懸念を引き起こす (9.3.3 節参照)。

エネルギー供給の多様化によるエネルギー供給分断の低減で、再生可能エネルギーが果たす役割は、エネルギーの形態によって異なる。水力、太陽熱、風力、地熱、及び海洋エネルギーは、発電と関連することが多いが、これらの技術の一部はその他の最終消費部門にも貢献する。再生可能エネルギー供給の拡大により電力部門の石油需要が低下するかは、電力が石油を代替可能かどうかにかかっている。この結果は、建築物及び産業部門を対象にした緩和シナリオで提示され、(化石燃料と比較して) 相対的に有利になった電力価格に起因する。ただし、輸送部門の液体燃料需要は、現在のところ非常に非弾力的である。電力の選択肢を液体燃料による輸送の選択肢と競合させる技術力または技術のブレークスルーがない限り、石油を代替する電力は非常に乏しい。これは、将来に電気利用の乗り物技術が十分向上した場合にのみ、変化が生じ得る (9.4.1 及び 8.3.1 節参照)。

対照的に、バイオエネルギーは再生可能エネルギーの万能な形態であり、液体化石燃料と直接競合可能な液体燃料に変換可能である。参照するシナリオでは、バイオマス由来の液体は市場シェアを獲得している。バイオエネルギー及び石油消費の相関関係は、政策及び技術の双方に潜在的に影響を受ける。たとえば、炭素価格の存在がバイオエネルギーの競争優位を向上させる。しかしながら、バイオエネルギーが活用される部門は、二酸化炭素回収・貯留技術が使用可能かどうかにかかわらず強く影響される。バイオエネルギーは二酸化炭素回収・貯留がない場合、主に液体燃料として使用され、二酸化炭素回収・貯留がある場合のバイオエネルギーの使用可能性は、その使用を発電に向け、システムの炭素排出の正味量はマイナスになる (Luckow et al., 2010; 図 9.17 参照)。その他の研究でも、類似の結果が示されている (van Vuuren et al., 2010b)。

<sup>22</sup> 少数の販売者の手中にエネルギー供給が集中することは、小規模なグループがアクセスを支配する可能性があるという意味である。供給者の多様化は、エネルギー供給分断のポテンシャルを低下させる 1 つの可能性ある対応である。

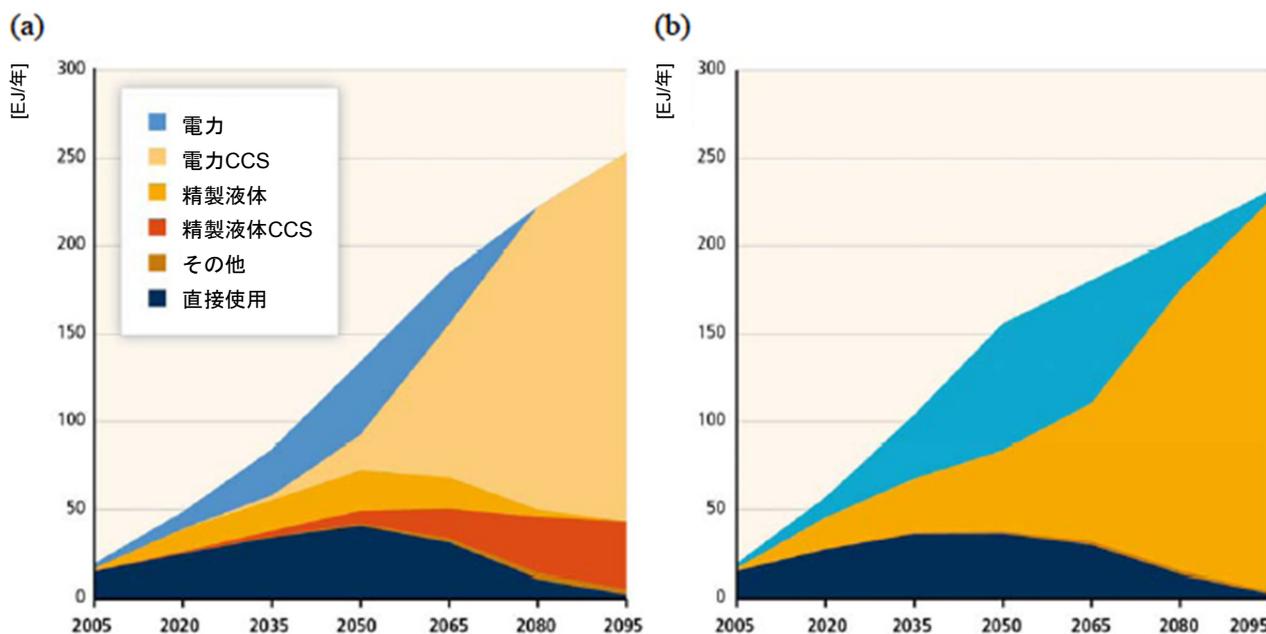


図 9.17: (a) 二酸化炭素回収・貯留を併用する場合と (b) 併用しない場合のバイオマス消費。GCAM モデルを使用した 450ppm の気候変動安定化シナリオを対象とする (Luckow et al., 2010)。

石油を代替するバイオエネルギーの出現は、液体燃料の市場を取り巻く市場支配力及び不安定性が低下することを必ずしも意味しない。モデルは一般に、主要なエネルギー形態としてのバイオエネルギーの出現は、比較的支配力の乏しい多数の販売者の存在を特徴とする市場で起こると想定しているものの、これは決して確実とは言えない。もしバイオエネルギー市場が、少数の販売者によってのみ特徴づけられた場合、購入者は世界規模の石油市場に典型的に見られる同様の種類のリスクに晒されるだろう。しかしながら、リスクとポर्टフォリオに見られるこの関係は、既存の緩和シナリオでは決して調査されない。また、将来のバイオエネルギー市場は、現在の石油市場とほぼ同様の不安定懸念を伴うだろう。

バイオエネルギー生産及び食料価格の相関関係は、別の極めて重要な問題である。潜在的に不安定なエネルギー市場と食料価格の関係は、持続可能な開発にとって重要な関連を持つためである (2.5.7.4 節参照)。多数の執筆者がこの関係を批判的に評価しており (Edmonds et al., 2003; Gurgel et al., 2007; Runge and Senauer, 2007; Gillingham et al., 2008; Wise et al., 2010)、一部では政策環境、特に土地の炭素ストックの評価の重要性を強調している (Calvin et al., 2009; Wise et al., 2009)。大規模なバイオエネルギー市場を形成させる排出緩和政策は、バイオエネルギーの販売者及び一般に土地所有者に利益をもたらすことが明らかであり、これはより有益である。ただし、食料価格の上昇は、一般に所得向上を伴うシナリオであっても、明らかに貧困層には打撃である。Burney et al. (2010) 及び Wise et al. (2009) でも、結果的にバイオマスの利用可能性が高まるとして、温室効果ガス排出削減における従来の作物生産の重要性が示されている。農業収穫高が継続的に改善されなければ、バイオエネルギーは再生可能エネルギーの重要な源に決してなり得ない (Wise et al., 2010)。

第 10 章で検証したシナリオでは、石油の消費及び価格は、より厳格な緩和を行っても、たとえば石炭の消費及び価格のような大幅な変化はしない。このように石油消費の変化がより控えめなのは、石油が主に輸送部門で消費されることにもよる。石油の代替としてバイオ燃料及び電力使用の乗り物は、現在のモデル形成に取り込まれる場合、依然として割高で、不利な影響を与えかねない (第一世代のバイオ燃料など。9.4.1 及び 2.5 節参照)。このため、これらのシナリオでは、石油の累積消費量に関して、基準値と政策シナリオとの石炭消費のような劇的な相違は示されない。石油の累積消費量の面で第 10 章のベースラインシナリオと比較した場合、二酸化炭素濃度が 440~600ppm で安定化するシナリオ (カテゴリ III 及び IV、表 10.2 参照) では 20%、低い安定化シナリオ (カテゴリ I 及び II、二酸化炭素濃度 400~440ppm) では 40%減少する (図 9.18a 参照)。

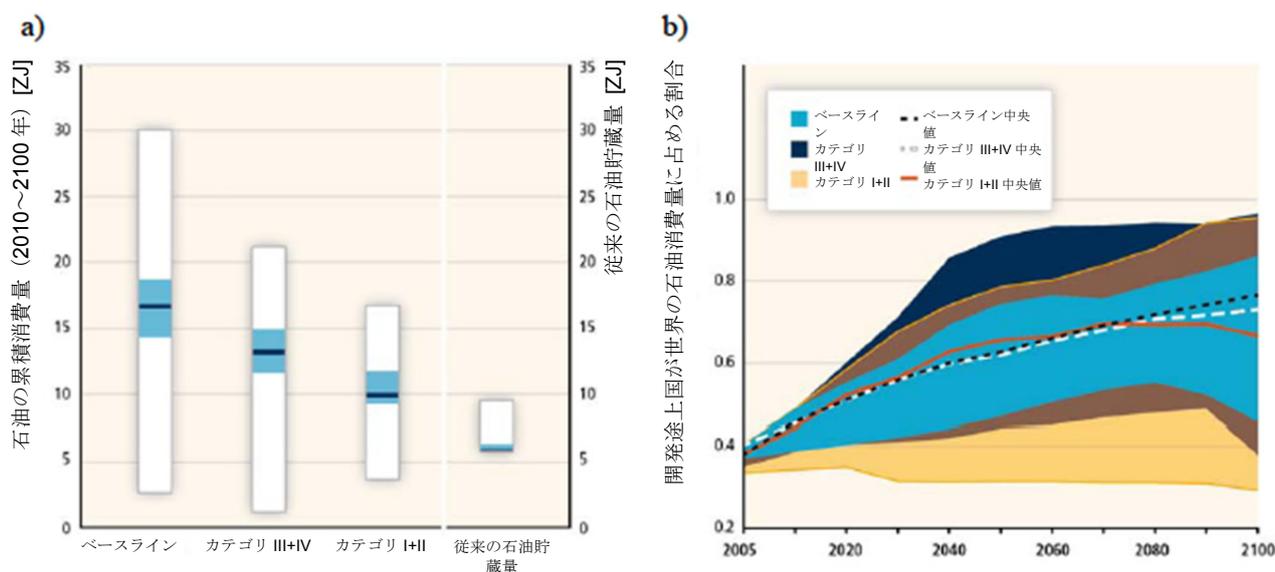


図 9.18: a) 第 10 章で評価された様々なシナリオ群（ベースライン、カテゴリ III、カテゴリ IV、カテゴリ I+II（二酸化炭素安定化濃度が低い場合））における、従来からの石油埋蔵量と 2010~2100 年の石油の累積消費量予想の比較（ZJ）。濃い青の太線は中央値、淡い青の棒は四分位間範囲（25~75 パーセントイル）、周囲にある白い部分はすべての評価シナリオの全範囲を示す。最後の列は、従来からの確認可採埋蔵量（淡い青の棒）と推定の追加埋蔵量（周りにある白い棒）を示す（Rogner, 1997）<sup>23</sup>。b) 様々な長期シナリオ群を対象とした、非附属書 I 国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。

石油供給の分断に対する脆弱性は輸入も減少する限り、参照シナリオに比べて各国で低下するだろう。しかしながら、先述のとおり、バイオエネルギーが世界的な貿易財である限り、バイオエネルギーへの移行は必ずしも液体燃料の供給分断を低減することを意味しない。石油が第 10 章の緩和シナリオで依然として主要な役割を果たすなか、石油の供給分断に関するエネルギー安全保障の議論は、将来において引き続き重要なままである。開発途上国の場合、温室効果ガス濃度安定化レベルとは別に、ほぼ全てのシナリオで世界規模の石油消費全体に占める割合が増加することから、この課題の重要度はさらに高まる（図 9.18b）。

さらに、二酸化炭素濃度の安定化シナリオでは、炭素価格は一般に、非在来型の石油供給（オイルシェールなど）が基準となるシナリオに比べて限定的な供給である場合と同じレベルに上昇する（図 9.18a など参照）。一方では、この影響は、非在来型の石油生産に一般に関連する環境上の懸念（水質汚染など）を限定する。他方では、一国の国内の資源量によって、石炭及び非在来型の液体の資源保有国ではエネルギー供給の脆弱性が高まる（非保有国では低くなる）。

在来型の石油に関する温室効果ガス排出の制限の影響も、消費タイミングの観点においては顕著である。在来型の石油生産は比較的割安であることから、需要、輸入、及び供給者への石油の価格（消費者価格の上昇）を速やかに抑制したところで、後年に石油消費が増加して相殺される。言い換えれば、二酸化炭素濃度安定化シナリオにおける上限の影響は、石油生産のピークを遅らせ、さらに将来に先延ばしする形で現れる。これには、短期的には石油輸入を減少させ、後年になって石油消費が増加するという影響がある。許容可能な長期的な二酸化炭素濃度の減少に伴い、この影響は累積の許容可能排出量の低下に埋もれてしまう（Bollen et al., 2010 など参照）。

エネルギー安全保障の政策も、再生可能エネルギー及び温室効果ガス排出に対して特筆すべき影響を与える。EU を対象にした静的な一般均衡モデルでは、旧ソビエト連邦との間の貿易フローを分析しており、バイオエネルギーの国内生産に補助金を出す政策で、化石燃料による二酸化炭素排出及び石油輸入が同時に減少することが示されている（Kuik, 2003）。ただし、この研究では、これらの政策は気候変動の目標達成にとってコスト効率の良い選択肢とは考えられていなかった。

#### 再生可能エネルギーの変動性及び信頼性

<sup>23</sup> Rogner (1997) によると、確認可採埋蔵量は 5.7~6.3ZJ である。これに加え、推定の追加埋蔵量は 2.6~3.2ZJ の範囲である。これは、従来からの原油及び液体天然ガスの確認可採埋蔵量のより最近の推定値 1 兆 2,390 億バレル (7.3ZJ) に一致する (NEC, 2010)。石油の総消費量は、第 10 章で検討された大半のシナリオをはるかに超え、非在来型の埋蔵量の使用を直接的に示唆している。

エネルギー供給の脆弱性を生む別の原因は、予測不可能で破壊的な自然事象である。たとえば、風力発電は弱風の時期は脆弱である。その他のエネルギー形態（太陽熱またはバイオエネルギー）も、異常な気象の影響を受けやすい。再生可能エネルギー発電への依存が高まれば、システムの安定性に影響を与えかねないため、さらに調査が必要である（8.2.1 節参照）。

エネルギー供給の偶然性を解決する重要な方法は貯蔵保有で、これがシステムの緩衝装置として機能する（9.2.2 節参照）。バイオエネルギーの役割が拡大すると、供給の不確実性の防衛策として、固体燃料、バイオエネルギー液体のいずれかの形態で、バイオエネルギーの貯蔵形成につながる可能性が高い。

再生可能エネルギーの形態（風力、太陽熱、地熱、及び波エネルギーなど）は発電に対応するが、一般にそのままの形態や、電力としては貯蔵しづらい。エネルギー供給の変動性は、供給の地理空間的な多様性を高めれば、低減可能である。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（8.2.1 及び 7.5 節参照）。

#### 9.4.3.2 調査のギャップ

再生可能エネルギー及びエネルギー安全保障の関係の特徴として、非常に多数の研究のギャップが存在する。たとえば、エネルギー安全保障に対して明確で定量的な定義がないことから、再生可能エネルギー及びエネルギー安全保障の関係に着目したシナリオ文献が乏しいことなどがある。エネルギー安全保障を検討する際は、一般に最近の記憶で最も顕著なエネルギー安全保障上の課題に焦点を置く。世界規模の石油供給の分断、原子力発電にまつわる安全性の課題などである。しかしながら、エネルギー安全保障の課題はこれらの側面にとどまらない。たとえば、希土類金属（レアアース金属）及びその他の極めて重要な投入資本の供給は、一部の（再生可能）エネルギー技術の生産を制約しかねない（Box 9.1 参照）。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及び再生可能エネルギーの将来のシナリオから大部分が欠落している。

再生可能エネルギー源の大規模な普及に関する重要な側面は、これらを既存の供給構造に統合することである。システムの統合は、ある程度予測不可能で変動性のある発電技術（風力、太陽光発電（PV）、及び波エネルギーなど）にとっては、最も難易度が高い。このため、システム統合に関連する課題に限定化した尺度は、世界規模のレベルにおける、予測不可能で変動性のある様々な再生可能エネルギー源の割合である（図 10.9 も参照）。再度述べるが、システムにおける風力及び太陽光発電（PV）の電力の割合が高いこれらのシナリオは、この観点におけるシステムの管理の全ての障壁が、電力貯蔵技術、需要側に対する管理の選択肢、及びシステムの管理のより一般的な進歩などを通じてほとんど克服されたと暗に仮定している（8.2.1 節参照）。これは強い仮定であり、変動性のある再生可能エネルギー発電のバランス及びシステムの信頼性確保には、貯蔵管理、発電のバランス、システムの向上、及び需要側のイノベーションが不可欠である。システムへの再生可能エネルギー源統合に関連する課題をさらに反映させて、統合モデルの空間及び時間的解析を向上させることは、継続している調査分野である（9.4.4.2 節も参照）。

#### 9.4.4 気候変動の緩和と環境、健康への影響の低減

エネルギーのアクセス及びエネルギー安全保障に対する潜在的な貢献に関して、代替的なシナリオの評価を行うことに加え、持続可能な開発の基準に基づくエネルギーの将来のどの評価においても、エネルギーのサービスが環境に与える影響の比較を含むべきである。根本的に、環境への影響緩和は、サービス提供の効率性向上、反応の変化、または影響の低い供給源への移行から生ずる可能性がある。

##### 9.4.4.1 将来のシナリオにおける環境、健康への影響

既存モデルがエネルギー効率及びエネルギーの供給の混合を明示するなか、これらのモデルによるシナリオは、持続可能性の持つこれらの双方の側面に関する情報を提供する。また、いくつかのモデルは、環境または健康への影響に関連する要因を明示している。たとえば、制御技術を用いずに硫黄を含有する石炭を燃焼させると、地域レベルで重要な汚染物質（硫黄酸化物など）が生成される可能性がある。このため、燃焼源を移行させれば、温室ガス排出の削減だけでなく地域の大气汚染軽減からも便益が生ずる可能性が生まれる（9.3.4.2 節参照）。いくつかのモデルは、硫黄による汚染を取り込んでいるため、この燃焼による副産物が健康または生態系に与える結果について、若干の推定の基準を定める（van Ruijven et al. 2008）。たとえば、van Vuuren et al. (2007) では、化石燃料を再生可能エネルギー及び二酸化炭素回収・貯留で代替した場合に、窒素酸化物及び二酸化硫黄の排出を低減させる相乗便益を強調している。しかしながら、標準的なシナリオでは、地域の汚染物質及び結果の連関は明示されない。Bollen et al. (2009) は、温室効果ガス及び粒子状物質の削減の双方を取り込んだ費用対効果分析を（MERGE モデルを用いて）行うことで、この問題に取り組んでいる。ここでは、気候政策は、地域の大气汚染改善につながる可能性があるが、大气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。加えて、粒子排出による健康への影響の外部コスト及び気候変動の影響が内部化されると外部便益は、最大になった（9.3.4.3 及び 10.6.4 節参照）。Shrestha and Pradhan (2010) は、国の特定の事例内で幅広い相乗便益の分析を行い、MARKAL モデルと

タイのエネルギーシステムのモデルを関連付けた。この結果、同様に、気候政策は石炭燃焼の影響を緩和することが分かった。

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つでは、バイオ燃料生産支援へ土地が流用される可能性である。これは集中的な議論の対象になっているものの、多くのモデルでは最近まで、エネルギー供給の選択肢及び土地利用の明白な関連を支持していなかった。この関連を解決しようと、初期には、エネルギー供給及び食料生産のトレードオフに焦点が当てられたり (Yamamoto et al., 2001)、既存のシナリオが将来のバイオエネルギー使用の推定の基礎として使用されたりした (Hoogwijk and Faaij 2005)。その後、これらの方法は、バイオエネルギーのモジュールを統合モデルに直接組み込むことで、結合された (Gillingham et al., 2008)。これまでのところ、たとえば、間接的な土地利用変化による排出 (9.3.4.1 及び 2.5.3 節参照) に関しては、かなりの文献が利用可能になっている (Yamamoto et al., 2001; Edmonds et al., 2003; McCarl and Schneider, 2003; Tilman et al., 2006; Searchinger et al., 2008; Calvin et al., 2009; Melillo et al., 2009; Wise et al., 2009)。Wise et al. (2009) 及び Melillo et al. (2009) では、適切な気候政策が実施されない場合、バイオ燃料の拡大により、森林減少、作付け転換、及び亜酸化窒素の排出が進むことが分かっている。双方の調査では、「持続可能な」エネルギーのシナリオと名目上考えられていたであろうもの (バイオ燃料の使用拡大) が、持続可能な開発の原則と矛盾する結果になりかねないことが示された。

モデルシナリオは、潜在的に予測されない (または少なくとも定量化されない) 環境上の便益のシナリオ、予測されないか定量化されない環境コストのシナリオを実証する際には有益な可能性がある。しかしながら、モデリングに加えて、様々な手法が実施されており (Croezen et al., 2010 など)、現在のシナリオに基づく分析の影響を受けかねないその他の総体的な方法は、エネルギーの水使用強度 (water use intensity) ( $\text{m}^3/\text{MWh}$ ) 及び土地利用 ( $\text{ha}/\text{MWh}$ ) などが含まれる。これらは、生物多様性の損失または食糧安全保障の変化など、持続可能性のその他の側面と関連する可能性があるだろうが、この関連性の適切な扱いは定義されていない。

#### 9.4.4.2 調査のギャップ

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、持続可能なエネルギー発展の持つ非排出関連の要素の多く (非常に幅広く非技術特有の研究のみが文献で利用可能である。Hanasaki et al., 2008; Shen et al., 2008 など参照) を明確に扱っていない。これらの持続可能性の環境上の側面は、エネルギー使用の分布及び各エネルギーの実際の使用方法に、大きく左右される。この点を既存のモデルで分析するのは難しいだろう。モデルは、所得分布または地理的分布を論じることなく、かなり広い世界の地域を設定しているためである (9.4.2.2 節参照)。既存のシナリオではむしろ、国別または部門別の温室効果ガス排出など、持続可能性の合計量 (aggregate measurement) を簡単に比較出来るようにすることで、使用者が様々な可能性がある「将来」の結果を比較可能である (L. Clarke et al., 2007; O'Neill and Nakicenovic, 2008)。一部のモデルでは、小規模な地理的スケール全体で、地域の大气汚染及び土地利用変化といった影響の比較も出来るようになりつつあるが、これまで形成されたシナリオでは、一部の環境上の変化は依然として不透明である。たとえば、伝統的燃料の使用の分布は、何十億人の健康にとってかなり重要な可能性がある (Bailis et al., 2005)。また、大半のモデルは、地域の生態系の影響をモデリングする際に、生態系のプロセスの多くが小規模である、という課題に直面している。現在は、将来のシナリオにおける空間及び時間的分析の精密化に向け、その実行可能性及びメカニズムが集中的に議論されている。ここでは、物理的な変化や生態系の変化だけでなく、社会的要因、人口統計学的要因、経済的要因もまた対象にされている (Moss et al., 2010)。一部の統合評価モデルでは、ダウンスケールを通じて小規模化の課題に取り組んでいる。しかしながら、このダウンスケールの方法は本来、排出及び人口統計学などの変数に適用されている (Bengtsson et al., 2006; Grübler et al., 2007; van Vuuren et al., 2007, 2010a)。ダウンスケールはその他の論点の報告に焦点を置いているため、地域の持続可能性に関する論点に意味のある解決を提示しない。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。

## 9.5 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、普及の機会を探求することで、これを支えることが可能である。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 9.5.1 節で検討している。<sup>24</sup> 9.5.2 節は、様々なレベルの持続可能な開発に向け

<sup>24</sup> 本報告書の多数の章で、障壁を取り上げている。第1章では、再生可能エネルギーの開発及び導入に関する障壁について一般的な概要を示し、社会文化的な障壁、情報・意識啓発上の障壁、経済的障壁、及び制度上の障壁に分類してい

た戦略における再生可能エネルギー政策及び方法の統合が、いかにこうした障壁克服を助け、持続可能な開発の目標をより完全に満たす再生可能エネルギー普及の機会を創出するかについて、注目する。

### 9.5.1 障壁

持続可能な開発の戦略の枠組みにおける再生可能エネルギーの政策形成及び普及活動の統合は、持続可能な開発の三本柱及び関連する持続可能な開発の目標との内部の関連（相乗効果及びトレードオフ）を明示的に考慮することを示唆している（9.2.1 節参照）。このように、再生可能エネルギーの政策及びプロジェクトの計画、建設、及び運用は、特定の社会、経済、及び環境上の背景に根ざし、一定の社会またはプロジェクトの場所の戦略的な開発目標を支える。多国間の環境協定とも引き続き整合性を持つはずである。本節では、再生可能エネルギー普及に対する主な社会文化的な障壁、情報・意識啓発上の障壁、経済的障壁の一部を、文献で対応した持続可能な開発を背景に検討する。障壁の各カテゴリは、再生可能エネルギー政策の形成及び普及の間に考慮すべき環境、社会、経済上の潜在的な懸念と関連している。

#### 9.5.1.1 社会文化的な障壁

大半のコミュニティでは、再生可能エネルギーの利用は環境に優しいと従来から認識されており、利用可能な研究及び世論調査でも、再生可能エネルギーは一般に世論から高く支持されていることが文書で立証されている

（Devine-Wright, 2005; McGowan and Sauter, 2005; Wolsink, 2007b; BERR, 2008）。しかしながら、一般的なレベルで世論の支持があるからといって、再生可能エネルギーの導入が個人及び集団に直接の影響を伴うことが多い地域の導入レベルでは必ずしも積極的に支援や受容されるわけではない（Painuly, 2001; Bell et al., 2005; Wustenhagen et al., 2007）<sup>25</sup>。たとえば大規模かつ新規の設置に対する世間の抵抗は、しばしば「自分の裏庭には来ないで（NIMBY）」という狭いタイプの反対を超え多くの国が経験する（Wolsink, 2007b; Devine-Wright, 2009）。

再生可能エネルギー普及及び持続可能な開発上のその潜在的なトレードオフに関する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（Sovacool and Hirsh, 2009）。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（GNESD, 2007b; Sovacool, 2009; West et al., 2010）。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（9.3.4.4 及び 9.3.4.5 節参照）、競合利用の際の使用可能性などへの影響（2.5.5.2 及び 9.3.4.6 節参照）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。以下に、これらの障壁について簡潔に説明する。

結果、再生可能エネルギー技術の普及は、社会的価値と文化的価値、規範や認識を試す行動学的影響（behavioural implication）と結びついて考え得るだろう（Painuly, 2001; S. Reddy and Painuly, 2004; GNESD, 2007b; Chaurey and Kandpal, 2010）。たとえば、インドで行われた家庭用の調理機器の複数基準解析（Pohekar and Ramachandran, 2006）では、消費者が調理機器の選好を決定する際、技術的基準に次いで、行動学的関心<sup>26</sup>を二番目に重要視している事実が判明している。行動学的関心は、比較的新しく技術的に進歩した太陽熱調理器を取り入れることを制限するだけでない。インドでは、設置された改良型の薪調理ストーブがインドでは使用されない説明としても重要である。この国では、この薪調理ストーブが計2,300万台設置されたが、このうち600万台しか使用されていない（Neudoerffer et al., 2001; Pohekar and Ramachandran, 2006）。改良型調理ストーブの普及及び使用を巡る行動学上の障壁の重要性については、他の開発途上国でも同様の調査結果が出ている（Ben Hagan, 2003; Zuk et al., 2007; Bailis et al., 2009）。新たな再生可能エネルギーの技術及びシステムに対する行動の障壁は、移行が既存の慣行及び現在の技術の性質を模倣しようとする限り、比較的小さいだろう。しかしながら、これらの障壁は、行動または消費の段階の変化の程度に伴い増大する傾向がある（Kumar et al., 2009; Petersen and Andersen, 2009）。

予防原則は、適用可能ではあるが、自然生息地、及び自然遺産と人類の遺産に対する影響を最小化するために、常に活用されるわけではない（Rylands and Brandon, 2005; Hreinsson, 2007; Nandy et al., 2007; S. Clarke, 2009; Hennenberg et al., 2010; Wolsink, 2010）。これは、様々な種類の再生可能エネルギープロジェクトに対する世論の抵抗につながっている。OECD 諸国では、風力発電開発に伴い作り変えた景観の美観 に対して、世論の認識が障壁になっており、文献で広く分析されている（Wolsink, 2000, 2007b, 2010; Upreti, 2004; Jobert et al., 2007; Wustenhagen et al., 2007）。沿岸から視野に入る沖合の風力発電基地に対する態度は、たとえば、沿岸の景観を自然のままの資源として認識し、産業用途にはそれほど適していないと考える通常の観光客が浜辺を使う方法と頻度によって左右さ

---

る。技術の章（第2～7章）では技術特有の障壁を取り上げ、第8章では、エネルギーシステムのロックイン及び再生可能エネルギー統合を扱う。政策形成及び財政支援上の障壁は、第11章で扱う。

<sup>25</sup> 再生可能エネルギープロジェクトに対する地域の反対は、世論調査の方法にも左右されるだろう（van der Horst, 2007）。

<sup>26</sup> 操作の簡単さ、調理する料理の種類、用具の清潔さ、追加の調理ストーブの必要性、購入の動機、食料の味、及び美意識に関連。

れる (Ladenburg, 2010)。新たなネットワーク・インフラに関する世論の反対については、8.2.1.3 節参照。

大規模な水力のような、広い土地を伴うプロジェクト開発にあたり、コミュニティの立ち退き及び再定住は大がかりになるだろう (Richter et al., 2010)。世界ダム委員会 (2000 年) の推定では、世界で 4,000~8,000 万人が大規模ダムのため立ち退いている。この数字は、大規模ダムに関連した河川流量及び淡水の生態系の変化が下流の住民に与える影響が含まれると、大幅に増加する (Richter et al., 2010)。水力開発の影響を受ける人数に関するより直近の数字は、個別のプロジェクト及び国のレベルで利用可能だが<sup>27</sup>、総統計は世界ダム委員会の 2000 年版の報告に限られているといえる。それだけでなく、大規模な水力プロジェクトは、たとえば、家庭用と産業用の水供給、洪水調節、及び灌漑など、水の競合使用を巡るトレードオフに関係することも多い (Moore et al., 2010)。大規模な水力開発に影響を受ける住民の再定住は、本質的に、先住民の土地所有権の問題に関連し (Bao, 2010; Moore et al., 2010; Ölz and Beerepoot, 2010)、複雑な再定住の問題及び補償問題が付随する (Chen, 2009; Mirza et al., 2009)。たとえば、経済的補償は、不十分ではあるが、影響を受ける住民または文化遺産の喪失といった外部性の影響を受ける人々に提供されるだろう (Cernea, 1997; World Commission on Dams, 2000; Bao, 2010; Brown and Xu, 2010)。商用規模のエネルギー作物に起因する土地利用の問題は、関心の高まる別の分野である (IIED, 2009)。人権及び労働権に関する職業的な懸念は、農作物プロジェクトの労働条件などがあり、この背景で検討することが重要である (ILO, 2010)。最後に、食料安全保障が、更に別の重要な社会的懸念であり (2.5.7.4 節参照)、公共事業を認証するかどうかが関心を高めている (2.4.5 節参照)。

先に指摘したように、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 (Zoellner et al., 2008)。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 (Barry et al., 2008)。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 (以下及び 9.5.2.2 節; Wolsink, 2007b; Malesios and Arabatzis, 2010 参照)。

### 9.5.1.2 情報・意識啓発上の障壁

再生可能エネルギープロジェクト推進の議論の共通点は貧困削減への貢献であり、地域のコミュニティは雇用機会、スキル開発、投資機会、及び技術移転の恩恵を受ける (9.3.1.3 及び 11.3 節; UN, 2002; GNESD, 2004, 2007a,b, 2008; Goldemberg and Teixeira Coelho, 2004; Modi et al., 2006; Goldemberg et al., 2008; UNEP, 2008a; Barbier, 2009 参照)。多くの開発途上国における再生可能エネルギーの試験的プロジェクトは、再生可能エネルギー資源がエネルギーの不足しているコミュニティで果たし得る役割についての裏づけに乏しい証拠を提供している (Karekezi and Kithyoma, 2003; Mondal et al., 2010)。しかしながら、地域のコミュニティがこうした便益を認識しない場合か、その分配を不公平と見ている場合、プロジェクトの受け入れは問題となるだろう (Upreti, 2004; Gunawardena, 2010; 11.6.4 節参照)。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 (Painuly, 2001; Ölz and Beerepoot, 2010)。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。分散的なユニットに関する情報・意識啓発上の懸念を無視すると、システムの放棄または機能不全に終わる可能性が多い (Werner and Schaefer, 2007)。

再生可能エネルギー技術を民間部門の企業が保有し、技術普及が企業を主要なアクターとする市場を通じて一般に進む場合 (Wilkins, 2002)、再生可能エネルギー技術の開発、導入、普及を進めるこれらのアクターの能力に注目する必要がある。このため、マクロレベルまたは企業レベルでの能力育成の一環としての技術上、ビジネス上の能力向上の重要性 (11.6.6 節) にも対応する必要がある (Lall, 2002; Figueiredo, 2003)。

再生可能エネルギーに対する態度は、知識及び事実を超えて形成される。9.5.1.1 節で説明したとおり、規範や価値観は検討すべき重要なものであり、再生可能エネルギーに対する世論、個人の認識について、消費の側面だけではなく、信頼、支配、及び自由に関する深い価値観の側面に対しても影響を与えるだろう (Sovacool, 2009; Walker et al., 2010)。これは、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 (Bang et al., 2000; Devine-Wright, 2009)。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 (Jager, 2006; Nannen and van den Bergh, 2010; Litvine and Wüstenhagen, 2011)。特に、情報・意識啓発の障壁は、再生可能エネルギー導入、市場、不確実性、それに伴う資本コストに影響を与えるだろう (Painuly, 2001; Ölz and Beerepoot, 2010)。

<sup>27</sup> たとえば、中国の水力及びダムの情報は、[factsanddetails.com/china.php?itemid=323&catid=13&subcatid=85#01](http://factsanddetails.com/china.php?itemid=323&catid=13&subcatid=85#01)、ベトナムの水力及びダムの情報は [www.gms-eoc.org/CEP/Comp1/docs/Vietnam/Hydropower/SocialImpact.pdf](http://www.gms-eoc.org/CEP/Comp1/docs/Vietnam/Hydropower/SocialImpact.pdf) を参照。

### 9.5.1.3 市場の失敗及び経済的障壁

再生可能エネルギーの経済的側面については、本報告書のほぼ全章（第2～7章のコスト関連の節、外部性に関する第10章、政策のケーススタディに関する第11章）で論じられている。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（C. Gross, 2007; Creutzig and He, 2009）。社会的な観点からは、再生可能エネルギーへの投資に対する合理的な決定を支えるためには、公平な経済の競争の場が必要になる。これは、再生可能エネルギー普及と社会コストの内部化（温室効果ガス排出による損害、健康、及び環境コストなど）の面において、市場の歪み（税金、補助金など）や、市場の不完全性と失敗を注意深く検討しなければならないことを示唆している（Rao and Kishore, 2010; 9.5.2 及び 10.6 節参照）。

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（Bishop and Amaratunga, 2008; Ravindranath and Balachandra, 2009; Thompson and Duggirala, 2009; Deichmann et al., 2011; 9.3.2 節参照）。より小規模な非系統連系の用途の場合、多くの再生可能エネルギー技術（風力、ミニ水力、及びバイオマス電力など）は、これには送電及び配送の均等化コストも含む、最安の均等化発電原価を提供可能である（ESMAP, 2007）。バイオマス（特に堆肥製造装置及びバイオマスガス化装置）、地熱、風力、及び水力などの多くの再生可能エネルギー技術はまた、最低のコストでミニ系統の発電を実現する可能性を秘めている技術である（ESMAP, 2007）<sup>28</sup>。しかしながら、多くの場合、非再生可能発電技術は、再生可能エネルギーに比べて経済的利益が依然として高い（van Alphen et al., 2007; Cowan et al., 2009）。これは、予見される石油価格上昇（ESMAP, 2007）や、向こう20年で再生可能エネルギー技術のコスト削減が見込まれる場合であっても、大規模な系統連系の場合の大半に当てはまる（Deichmann et al., 2011）。

再生可能エネルギーの経済的実現性の評価は、再生可能な資源の入手可能性及びコストに関する想定を対象とし、これに基づき評価される。適切な滞在資源のデータの不足は、資源の使用可能性に関する不確実性に直接影響を及ぼし、インドネシアの地熱発電開発の場合に見られたように、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と解釈されるだろう（Ölz and Beerepoot, 2010）。関心の高まる分野は、再生可能エネルギー資源のタイミング及び使用可能性が即座に影響を及ぼす場合、気候の変動性及び気候変動がエネルギーのサービス及び資源に与える潜在的な影響に関連する分野への関心が高まっている（World Bank, 2011）。気候の変動性及び極端な現象（ハリケーンと台風、熱波、洪水、及び干ばつなど）がエネルギーのサービス及び資源に与える影響は、既に経験済みである。たとえば、東アフリカでは電力供給を水力に大きく依存しており、最近の干ばつに関連する年間推定コストは、GDPの1～3.3%に相当した（Eberhard et al., 2008; Karekezi et al., 2009）。再生可能エネルギーの変動する使用可能性に起因する高コストに関連する問題については、8.2 節参照。

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（Painuly, 2001; Limmeechokchai and Chawana, 2007; Kassenga, 2008; Mathews, 2008; Monroy and Hernandez, 2008; Rao and Kishore, 2010; Green and Vasilakos, 2011）。特に低所得国では、再生可能エネルギー技術に要する多額の先行投資が消費者による導入を阻害するだろう。消費者は、長期間にわたる運用コストの最小化ではなく、初期コストの抑制を好むだろう。あるいは、現金かクレジットのどちらか、もしくは現金とクレジットの両方で入手する方法がない場合、選択肢はないだろう（S. Reddy and Painuly, 2004）。したがって、再生可能エネルギー技術の取り込み成功は、寄付、現金販売、消費者クレジット、またはサービスごとの個別支払いのスキームなど、普及モデルの選択及び設定にある程度左右される（Nieuwenhout et al., 2000）。

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（O. Davidson et al., 2003）。たとえば、システムの運用維持に必要な技術的能力の有効性を確保するため、投資が必要になるが、これは開発途上国では利用可能な再生可能エネルギー源を活用するうえで大きな障壁である（Ölz and Beerepoot, 2010）。新たな考えも広まりつつある。ここでは、再生可能エネルギーを市場ベースのエネルギー経済の不可欠な構成要素として扱い、民間部門との関与もより強まっている（GNESD, 2007b, 2008）。

多額の先行投資は、投資家間で高リスクという認識や、財政支援手段の全体的な不足、また金融部門が断片的もしくは発展途上である点も反映するだろう（Brunnschweiler, 2010）。このように、東南アジアで見られる事例証拠では、金融機関及び投資家間で再生可能エネルギーシステムに対する経験と理解が不足している結果、国の投資家の参加が低調になり、リスクプレミアムの上昇を通じ、再生可能エネルギープロジェクトの資本コストは増加しかね

<sup>28</sup> ミニグリッドの用途は、村及び地区単位の独立ネットワークで、負荷は5～500kWである。

ない点が示されている(11.4.3節参照)。インドネシアにおいて銀行及び国内の投資家は、バイオマス系の発電プロジェクトはバイオエネルギープロジェクト開発の経験が一般に不足している点、関連する原材料供給の問題に結びつく更なるハードルに直面しているとの見方をしている(Ölz and Beerepoot, 2010)。

再生可能エネルギー投資によるコスト及び便益の流れのタイミングの影響は、持続可能性の面でトレードオフにつながる。たとえば、開発途上国における意思決定者が、外部コストは高いがペイバック・タイムは短い非再生可能エネルギーに投資を行うか、ペイバック・タイムは長いが高いプラスの外部性(雇用創出、健康、温室効果ガス排出削減など)を持つ再生可能エネルギーに投資を行うかで、選択をせざるを得ない場合などが考えられる。再生可能エネルギーの財政支援に対する障壁は、9.3.1.4及び11.4.3節でも触れられている。

市場の歪みから生じた外部性は、再生可能エネルギー普及が持続可能な開発を背景に論じられる場合、主に扱われる。たとえば、補助金及び税金、もしくはその双方の構造は、再生可能エネルギーの競争力に悪影響をもたらし、非再生可能エネルギーを助けるだろう(9.5.2.1節参照)。同様に、既存の系統ネットワーク及び技術者の能力は、エネルギー普及の経路依存性に影響を伴い、他に比べて一部のエネルギー形態に有利に働く(11.6.1節参照)。経路依存性は、コスト効率または長期的な累積の社会コストの観点で劣るようなエネルギーまたはインフラの選択肢に社会を固定化してしまうだろう(Unruh, 2000)。多くの場合、環境外部性を内部化することで、再生可能エネルギー技術の均等化コストにかなりの影響が出るため(Cowan et al., 2009; Harmon and Cowan, 2009; Fahlen and Ahlgren, 2010)、それらを包含しないことは再生可能エネルギー普及の障壁になる。たとえば、化石燃料の燃焼で生ずる損害コストを、結果として生ずる電力出力の価格に内部化すると、再生可能技術の多数は、石炭プラントの発電と経済的に競争力を持つ(Owen, 2006; 10.6節参照)。セネガルの遠隔地にある3つの農村部で展開される太陽光発電(PV)小規模系統でも、環境外部性を考慮すると、太陽光発電(PV)技術の均等化発電原価が系統拡張のエネルギーコストに比べて低くなるため、同様の結論に達している(Thiam, 2010)。

最近の多数の研究では、エネルギーの選択肢を評価、ランク付けする際に、社会、環境の持続可能性に関する多数の指標を盛り込んでいる。これらの持続可能性の指標には、温室効果ガス排出に加え、土地の必要性、水消費、社会的影響、及び再生可能源の使用可能性などがあり、持続可能性を背景にした再生可能エネルギー普及に対する潜在的な障壁についての更なる洞察を提示する(Afgan et al., 2007; Becerra-Lopez and Golding, 2008; Brent and Kruger, 2009; Evans et al., 2009; Brent and Rogers, 2010; Browne et al., 2010; Carrera and Mack, 2010; 9.5.2.1節参照)。

## 9.5.2 機会

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。国際間、国レベルの戦略には、持続可能な開発に不利と認められるメカニズムの撤廃、環境外部性と社会外部性を内部化する持続可能な開発向けのメカニズム、そして再生可能エネルギーと持続可能な開発の戦略の統合などがある。地域レベルでは、市、地方自治体、及び民間組織と非政府組織が主導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。

### 9.5.2.1 持続可能な開発に関する国際的戦略と国家戦略

部門横断的な持続可能な開発戦略の必要性は、1972年の国連人間環境会議以来、多国間レベルで明確に示されている(Founex Committee, 1971; Engfeldt, 2009)。関心はアジェンダ21の目標で高まり(UNCED, 1992)、これらの様々な部門のプロセスを調和させる戦略の適用を目指すことになった(Steurer and Martinuzzi, 2007)。2002年の持続可能な開発に関する世界首脳会議で採択されたヨハネスブルグ実施計画で、各国政府は切迫感を持って、再生可能エネルギーの世界規模の割合を大幅に増加させ、2005年までに持続可能な開発に関する国家的戦略を策定するべく速やかな措置を取るよう求められた(UN, 2002)。各国は通常、こうした持続可能な発展に関する国家戦略(NSDS)を形成する際、国の状況及び国際的な責務(気候変動の制限及び再生可能エネルギー使用の拡大など)、速やかな行動を要する状況において、戦略的な政策分野及び具体的な目標の優先順位を決めている(OECD, 2002; UNDESA, 2008)。このように優先順位を決めることは、生産性、所得成長、健康と教育、男女平等、エネルギー抽出に関連する社会的影響の緩和、人間開発、及びマクロ経済的な安定性と管理に貢献するだろう(World Bank, 2001)。再生可能エネルギー技術は特に、他の便益を付加出来る(9.3節参照)。また、再生可能エネルギーの政策を持続可能な発展に関する国家戦略に統合すれば、各国は、特定の政策手段を選択し、他国の懸念を自国に取り込み、また国際的な政策措置と提携する枠組みを持てる(OECD, 2002)。

#### 持続可能な開発に不利に作用するメカニズムの撤廃

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。作為的に高められた化石燃料の競争上の優位は低下し、化石燃料の補助金使用が減少した分、再生可能エネルギー技術の研究開発及び普及に向けられるだろう。2009年のG20サミットでは、中期的に「非効率な化石燃料への補助金」

を段階的に撤廃する合意がなされ (G-20, 2009)、これに伴い、再生可能エネルギー技術にはいくらかの相乗便益が生ずるだろう。IEA、OECD、及び世界銀行の報告 (2010) は、次の G20 サミットに向けて作成され、化石燃料に対する政府の支援は地理的に集中していることが示されている。2009 年には、37 の経済圏 (主に非 OECD 加盟国) が世界規模の化石燃料の補助金の 95% 以上を占め、総額は 2,680 億 US ドル (2005 年) になった<sup>29</sup>。化石燃料に対する政府の支援は、イラン、サウジアラビアなど、支援されるエネルギー担体が豊富な経済圏で顕著である<sup>30</sup>。支援を受ける燃料は主に石油 (1,080 億 US ドル (2005 年))、天然ガス (730 億 US ドル (2005 年)) で、これらの燃料で発電が主に賄われる場合は電力も暗に含まれているだろう (820 億 US ドル (2005 年))。対照的に、石炭の補助金は世界的に比較的少額で、わずか 5 億 US ドル (2005 年) である。

これらの補助金の改革時には、貧困層にいかに関与を与えるかについての懸念が一般に生ずる。低所得の家庭は過度の影響を受ける可能性が高いため、改革の設計は注意深く行う必要がある (IEA, 2010b)。しかしながら、補助金は逆累進なことが多いため、所得の高い集団では大幅な便益後退になる (Del Granado et al., 2010)。たとえば、イランでは、最も所得の高い層 30% があらゆる政府支援の 70% を消費し (Nikou, 2010)、インドネシアでは、下から 40% の低所得層の家庭は全てのエネルギー補助金の 15% しか受け取っていない (IEA, 2008a)。全般的に見て、これは最も支援される燃料が含まれる。たとえば、アフリカの複数の国々における電力 (Angel-Urdinola and Wodon, 2007)、インドの液化石油ガス (Gangopadhyay et al., 2005)、及び世界の石油製品 (Coady et al., 2010) などである。ただし、灯油の場合は、この構図は若干不明瞭で、補助金は比較的好く対象にされる (Coady et al., 2004)。

したがって、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と、必然的に貧困層の特定の需要の解消が伴うはずである。そうするには、概括的に 2 つの方向性が適していると思われる。第一の方向性は、農村部の電化の拡大である。貧困な家庭は電力サービスのない地域に暮らす傾向があるためである (Angel-Urdinola and Wodon, 2007)。エチオピア及びベトナムでは、プログラム始動に成功し (IEA/OECD/World Bank, 2010)、同時並行で提供される化石燃料補助金の段階的撤廃で、ビジネス活動にさらにインセンティブが生まれるだろう (Barnes and Halpern, 2001)。電化の拡大は、集中的な電力供給における再生可能エネルギー技術をさらに支援することで補完される可能性があり、これによって貧困層も利用可能になるだろう。第二の方向性は、もし電化が実行可能でなかったり、低コストで優れた選択肢が存在する場合も、再生可能エネルギーの非系統連系の技術が代替として利用可能である。たとえば、ネパールでは財政支援によって再生可能エネルギーの非系統連系技術を採用する意識レベルが非常に高まってきており、電力に対する支払い意欲も高まってきている (Mainali and Silveira, 2011)。さらに、インドの家庭用照明、太陽光、及び近代的なバイオエネルギーシステムは、農村部では、灯油を使用した伝統的な照明に比べ優れた選択肢である (Mahapatra et al., 2009)。

このようなさらに多くの機会が存在する可能性は高いが、再生可能エネルギーの潜在的な利益を突き止め、その効率を評価するには、ケースバイケースの分析がさらに必要である。こうした分析が行われないうちに、再生可能エネルギー技術が化石燃料補助金の段階的撤廃から直接利益を受けるのか、それともこのような段階撤廃が潜在的に有害であるのかも、明確ではない。

汚染力が強く安定性に劣るエネルギー源への依存を低下させるための幅広い戦略の一環としての再生可能エネルギー供給の取引及び関連技術に対する障壁を除去する重要性は、複数の研究及び事象で強調されている。これは特に、太陽光発電 (PV)、風車、及びバイオ燃料に当てはまる (Steenblik, 2005; Lucon and Rei, 2006; OECD, 2006)。2.4.6.2 節で概要を示したように、バイオエネルギーの市場の浸透及び国際取引に対する障壁には、関税、技術標準、バイオマスとバイオ燃料を対象にした不適切に制限的な持続可能性の基準と認証システム、物流の障壁、及び衛生上の要件などがある。より一般的には、取引に対する障壁を除去するか低下させれば、低コストで技術をさらに普及させることで、再生可能エネルギー及び気候変動の緩和に寄与出来るその他の環境財へのアクセスを円滑化出来る。クリーンな技術に対する関税障壁及び非関税障壁の双方がなくなれば、これらの製品の取引は潜在的に 14% 増加する可能性がある (WTO, 2010)。

国連気候変動枠組み条約の京都議定書の参加国が、温室効果ガス濃度安定化を達成する政策及び措置を導入するなか、世界貿易機関 (WTO) のルールとの整合性が課題として再燃する可能性があるだろう。より一般的には、気候変動の枠組みと WTO 内外の投資ルールをつなぐに、さらに注意する必要がある (Brewer, 2004)。最も問題になる相関関係は、エネルギーの原価の国際間の差異を相殺する幅広い措置を使用する可能性、クリーン開発メカニズム (CDM)、及び WTO の補助金協定に関連する共同実施 (JM) プロジェクト、WTO の技術障壁協定に関連する効率性の基準、及び WTO の農業協定に関する二酸化炭素回収などがある (Tamiotti et al., 2009)。

#### 環境的外部性及び社会的外部性を内部化する持続可能な開発メカニズム

持続可能な開発には、環境的外部性、社会的外部性を内部化するメカニズムが継続的に必要である。再生可能エネルギー技術の普及は、多額の先行コスト及び公平な競争の場の欠如を克服する政策及び動機により、牽引される

<sup>29</sup> 基礎となる価格ギャップの方法にいくらか制限があったとしても、主要な推定値として機能するだろう。

<sup>30</sup> 補助金の率に関する詳細は、[www.iea.org/subsidy/index.html](http://www.iea.org/subsidy/index.html) 参照。

(Rao and Kishore, 2010)。しかしながら、外部コスト(10.6節参照)が含まれる場合、再生可能エネルギーの相対的優位が、特に温室効果ガス排出に関して強調される(Onat and Bayar, 2010; Varun et al., 2010)。外部コストの取り込みには、優れた指標が必要になる。様々なエネルギー生産システムの研究で発見された方法論的な制限は、比較可能な持続可能性の指標が不十分な数で使用されている点であり、結果として、持続可能性に対するエネルギー源及び技術のランキングにバイアス及び欠陥が生じかねない(Brent and Kruger, 2009; Eason et al., 2009; Kowalski et al., 2009)。多基準決定の分析及びアプローチの貢献は大きい、持続可能な開発の様々な側面、関連する情報の不正確性と不確実性、数値のみでは表現不可能な具体化された定性的側面を考慮すると、持続可能な開発に対する再生可能エネルギーの選択肢の貢献を評価するのは複雑な作業である(Cavallaro, 2009; Michalena et al., 2009; Donat Castello et al., 2010; Doukas et al., 2010)。

京都議定書で設立されたクリーン開発メカニズムは、持続可能な開発メカニズムの実例である<sup>31</sup>。化石燃料を代替する再生可能エネルギーは、プロジェクトの61%、クリーン開発メカニズムに基づき推測される2012年までの認証排出削減量の35%に相当する(UNEP Risø Pipeline, 2011)。クリーン開発メカニズムは、京都議定書の最も革新的な特徴の1つとして広く認識され、開発途上国が69か国関与し、これらの国は数十億ドル規模の世界的な炭素市場を形成している。しかしながら、主催の国々において、持続可能で低炭素の開発の道筋に貢献しているかは疑わしいことも、広く知られている(Figueres and Streck, 2009)。クリーン開発メカニズムのプロジェクトは、国レベルの持続可能性の審査と承認を受けるため、指定国家機関(DNA; 11.5.3.3, 11.6, 11.6.6.1節も参照)に申請が行われる。ただし、持続可能性を承認する既存システムに見られる短所に対応するための、持続可能性の評価に対する国際基準はない(Olsen and Fenhann, 2008b)。このため、国家的な持続可能な開発の優先順位の適合、投資の誘発にあたり、指定国家機関が果たす役割は重要である(Winkler et al., 2005)。クリーン開発メカニズム(Paulsson, 2009)及び持続可能な開発に対するその貢献(Olsen, 2007)に関する文献のレビューでは、市場メカニズムの主な短所の1つとして、より高い持続可能な開発の利益にしばしば繋がるプロジェクトに比べ、費用の安い排出削減プロジェクトが好まれる点が挙げられている(Sutter and Parreño, 2007)。Gold Standard and the Climate, Community and Biodiversity Standardsなどの自主基準が設けられている。この目的は、相乗便益を保証することで排出削減に対してプレミアムを支払う意欲のある投資家を誘発することにある(Nussbaumer, 2009)。Gold Standardは再生可能エネルギー及びエネルギー効率のプロジェクトに適用される。最も一般的な再生可能エネルギープロジェクトは、風力、バイオガス、バイオマスエネルギー、水力、埋立地、及び太陽熱である。しかしながら、これらの分類されたプロジェクトは、クリーン開発メカニズムのプロジェクト全体から見れば小さな割合でしかなく、自主基準としては、持続可能性の低いプロジェクトまたは持続不可能なプロジェクトの改善よりもむしろ、質の高いプロジェクトに対して報奨することに成功している(Wood, 2011)。2012年以降の気候変動の枠組みを巡る交渉のための情報として、持続可能な開発のメカニズムの新設や改善をより優れたものとするため、クリーン開発メカニズムの改革方法について多量の文献が論じている(Hepburn and Stern, 2008; Olsen and Fenhann, 2008a; Wara, 2008; Figueres and Streck, 2009; Schneider, 2009)。アイディアとしては、低炭素経済の長期的な便益への貢献のため、セクター別に必ず上手くいく目標(sector no-lose targets)を通じた緩和アクションの拡大(Ward, 2008)、新たな部門別アプローチの導入(Marcu, 2009)、開発途上国に対するクリーン開発メカニズムのクレジット付与の差別化(Murphy et al., 2008)、及びクリーン開発メカニズムの構造的変化などがある(Americano, 2008)。

持続可能な開発のメカニズムも、持続可能性評価に比べて幅広い見方から議論されるだろう。開発途上国は先進国に比べ、より持続可能で低炭素の開発の道筋に追従可能だろうという考えは、特に魅力的である。こうした決定は、政治的であり社会的でもあるが、リープフロッグの概念の理解に本質的に左右される(Box 9.5参照)。

#### Box 9.5: リープフロッグ

「リープフロッグ」とは、開発途上国が、工業国が過去に経験した産業開発の汚染集約的な段階を避けて通ることが出来る機会に関連する(定義については、Annex I参照)。顕著な「環境のリープフロッグ」は3種類ある。全体的な開発の道筋内のリープフロッグ、産業開発内のリープフロッグ、及び技術の適用と使用におけるリープフロッグである。吸収容量の大幅なレベルが、リープフロッグ成功の核心である。これには、変化を誘起し維持する技術的能力の存在、妥当な国家機関及び国際機関の支援などがある(Sauter and Watson, 2008)。

どのようなリープフロッグ戦略にもリスクは付随するが、新製品開発及び市場設立の初期リスクが「先行」国で生じている場合、後行国には恩恵がある可能性がある。市場がひとたび設立されれば、開発途上国は、新たな技術の急速な適用や製造能力の開発を通じて、追い上げが可能である。技術パラダイムのシフトによる、より先鋭的な改革は、開発途上国に「絶好の機会(windows of opportunity)」をさらに提供可能である。このプロセスの成功に向け、異なった要素が結び付けて考えられており、開発の標準モデルが存在しないことから、リープフロッグ戦略の一環として試行錯誤の学習を容認する必要がある(Hobday, 2003; Sauter and Watson, 2008)。再生可能エネルギーの技術

<sup>31</sup> クリーン開発メカニズムには2つの目的がある。開発途上国における持続可能な開発の推進と、先進国の排出削減目標を費用対効果よく達成するための支援である。

的リープフロッグについては、複数の研究で報告されているが (L. Clarke et al., 2007; Moreno et al., 2007; R. Singh, 2007; Tarik-ul- Islam and Ferdousi, 2007; Karakosta et al., 2010; Reiche, 2010; Saygin and Cetin, 2010)、現在のエネルギー技術では、エネルギー部門は情報技術などの他部門と同様のリープフロッグにつながらないだろう (World Bank, 2008a)。結局、根本的によりクリーンな開発の道筋を開始するには、開発途上国、先進国とも、継続的で特定の政策の支援とガイダンス、制度上の能力の改善、及び思い切った政治的意思も必要になることが、経験から示されている (Perkins, 2003; Gallagher, 2006)。

## 再生可能エネルギー及び持続可能な開発の戦略の統合

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、2つの方法によって着手可能である。つまり、1) 持続可能な開発及び再生可能エネルギーの目標を、予算プロセスや貧困低減戦略計画などの開発政策及び計画と統合する、2) 再生可能エネルギーが、グリーン成長、低炭素、及び持続可能な開発の目標に貢献する部門別の戦略を開発することである。

持続可能な発展に関する国家戦略 (NSDS) のアイデアは、国際レベルで生まれたが、戦略が実際に実施されるのは国家レベルである。2009年には、国連加盟国の55%に相当する106か国が、持続可能な開発委員会に対し、持続可能な発展に関する国家戦略を実施したと報告している。持続可能な発展に関する国家戦略のアイデア全般は、持続可能な開発の原則、つまり持続可能性の三本柱、参加、所有、包括的で調整された政策形成、ならびにターゲットティング (targeting)、リソーシング (resourcing) とモニタリング (開発結果の測定とモニタリング) などを、国の既存の開発プロセスに統合することである (George and Kirkpatrick, 2006)。持続可能な発展に関する国家戦略は、新たな個別の戦略ではなく、持続可能な開発上の懸念を国の既存のガバナンス及び意思決定の枠組みに統合することを意味する。各国で制度、開発、地理的状況は異なることから、持続可能な発展に関する国家戦略の青写真は無いが、一般には三段階に分類される。1) 気候変動とエネルギー安全保障の対処といった主要な目標と政策分野、2) 輸送、エネルギー効率と再生可能エネルギーなどの具体的な目標と課題、及び3) 再生可能エネルギー戦略の実施、エネルギー市場の自由化かクリーン開発メカニズムの使用による小規模な再生可能エネルギー発電プロジェクトの支援などの目標と行動に分類される (UNDESA, 2008)。しかしながら、持続可能な発展に関する国家戦略の導入については、進捗の記録は限られている (George and Kirkpatrick, 2006)。Volkery et al. (2006)によると、多くの国が依然として学習の初期段階であり、重要な課題は持続可能な発展に関する国家戦略とその他の戦略プロセス (国家予算、部門別戦略、及び地方公共団体別の戦略のプロセスなど) の調整である。大半の国では、持続可能な発展に関する国家戦略は、新たな行動を導き刺激する包括的な枠組みとしてよりむしろ、既存の戦略の概要を提示し、事後の合理化として機能している (George and Kirkpatrick, 2006; Volkery et al., 2006)。経済協調及び開発についての制度的展望が豊かであるのと比較して、持続可能性に関する制度的展望依然として比較的小規模だが、政府が中核をなす持続可能な開発戦略の当事者意識の向上を通じて、改善されるだろう。

低炭素、グリーン、及び持続可能な開発を目指す再生可能エネルギー戦略は、温室効果ガス濃度安定化、エネルギー安全保障、貧困層のエネルギーのアクセス、環境関連の雇用創出などの目標達成の手段として、重要度が高まりつつある (IEA, 2010b; SARI, 2010; Lund et al., 2011; 9.3節参照)。再生可能エネルギーの政策目標は、国民と資源の動員、進捗のモニタリングに役に立つ可能性がある。2010年までに、世界の85か国以上で再生可能エネルギーの割合に関する政策目標が適用されている。その割合は、電化製品の5~30%が一般的である。たとえば、最終エネルギーの目標は、中国では2020年までに15%、EUでは2020年までに20%、フィジー及びトンガの小規模な島嶼国家では2013年までに100%である (REN21, 2010)。政策目標は再生可能エネルギー特有のものだが、低炭素、グリーン、及び持続可能な開発に関する全般において戦略は重要な要素である (UN, 2005b; SARI, 2010; Offer et al., 2011)。

本質的に、再生可能エネルギー戦略は、持続不可能な化石燃料及び技術を段階的に削減しつつ再生可能エネルギーシステムを段階的に導入するため、課題及び可能性のある解決策を提示する (Lund, 2007; Verbruggen and Lauber, 2009)。再生可能エネルギー源のポテンシャルを完全に活用するにあたり、エネルギー源及び技術を持続可能な形で効果的に効率良く確実に使用するための政策及び規制とともに主な技術的変化が必要になる。再生可能エネルギー源及び技術を持続可能な形で確実に使用するには、現場の非常に幅広い多様化を評価するために再生可能電力源及び技術に関して詳細な科学的区別や定量化が必要になる (Verbruggen and Lauber, 2009)。再生可能エネルギー源及び技術に関する持続可能性の基準、指標、評価をその属性 (種類、密度、変動性、アクセスのしやすさ、規模、成熟度、コストなど) に基づき方法論的にさらに開発すれば、再生可能エネルギーの持続可能な解決策に対してきめ細かい規制の改善が可能になる (Verbruggen and Lauber, 2009)。ノルウェーでは、環境上の懸念が、より持続可能な水力の使用を導いた (Box 9.6参照)。

**Box 9.6: ノルウェーにおける持続可能な水力**

ほぼ一世紀にわたり、水力は「ノルウェーの動力」として、ノルウェーの工業化を強力に牽引している (Skjold, 2009)。2010 年前半まで、設備された最大出力は約 29GW、年間平均発電量は約 122TWh で、降雨量によるが、ノルウェーの年間電力需要の 98~115%に対応している (NVE, 2009)。1970 年代及び 1980 年代に集中的に活用された後、新たに環境上の意識が高まったことから、一般に水力発電の開発が比較的停滞した期間があった。1973 年には、ノルウェー政府は初の国家的な保護計画を承認した (現在は計 4 つの計画がある)。この結果、現在は約 400 の河川が保護されている。1986 年には、初の水力マスタープランが承認された。このプランでは、経済的、技術的な実行可能性に従い、可能性のあるプロジェクトを分類しているが、潜在的な環境上の紛争、社会的紛争にも強く注目している (Thaulow et al., 2010)。ノルウェーの河川に起因する推定上の実行可能な水力のポテンシャル 205TWh のうち、水力の国家マスタープランでは、122TWh が活用され、46TWh は保護され、約 37TWh は承認可能プロジェクトか不承認プロジェクトに分類されている (Thaulow et al., 2010)。過去 30 年で、環境上の影響及び社会的影響に関する評価の一連の手順、ガイドラインと基準は改善され、ステークホルダーの関与も高まり、許認可の手続きも改善された。これらは全て、水力を長期的により持続可能にさせるための取り組みである。

**9.5.2.2 地域、民間、及び非政府の持続可能な開発の取り組み**

地域レベルでは、市及び地域政府がビジネスや市民の関心と協力すれば、再生可能エネルギー普及で変化を牽引出来る (REN21, 2009)。国際的、また国家レベルの実用的な枠組みの条件に応じて、市及び地域政府は、自己の立法権限及び購買力を独立で使用し、自己の運用とコミュニティにおいて再生可能エネルギーの取り組みを幅広く実施可能である (11.6 節参照)。一般的に、地域の政策イニシアチブは、低い温室効果ガス濃度安定化、再生可能発電の割合、またはエネルギー消費全体といった、持続可能性の目標を動機とする (Ostergaard and Lund, 2010)。地域の再生可能エネルギーの政策及び持続可能な開発のイニシアチブについては、その他の種類として、再生可能エネルギーを取り込んだ都市計画、建築基準または建築許可への再生可能エネルギーの取り込み、バイオ燃料の混合などの規制措置、自治体のインフラ及び運用における再生可能エネルギー、再生可能エネルギーを支え、ビジネスと市民の模範となる自発的行動などがある (REN21, 2009)。経験を共有し、地域の行動を刺激するためには、様々なネットワーク及びイニシアチブが登場している。これらには、世界首長・自治体の気候変動防止合意文書 (World Mayors and Local Governments Climate Protection Agreement)、地方自治体機構ロードマップ (Local Government Climate Roadmap, Solar Cities)、再生可能エネルギー100%の地域、イクレイの地域再生可能エネルギー・イニシアチブ (ICLEI's Local Renewables Initiative)、ヨーロッパグリーン都市ネットワーク (European Green Cities Network)、環境首都賞 (Green Capital Awards) など、多数ある。これらのイニシアチブの共通点は、エネルギーの地域供給、エネルギーと資金の節減、地域の雇用創出、再生可能エネルギーのサービス提供の役割における民間部門の関与といった、再生可能エネルギーがもたらすであろう地域の持続可能な開発の便益 (del Rio and Burguillos, 2008, 2009) を広く認識していることにある (Hvelplund, 2006)。

コミュニティを基盤とする組織が関与すれば、地域の当事者意識の円滑化及び便益の共有化で、再生可能エネルギー設置に対する地域の反対を緩和することが可能である (Rogers et al., 2008; Zografakis et al., 2009)。地域のエネルギー市場創出で、地域の民間投資家には機会を提供でき (Hvelplund, 2006)、この結果、増加する地域の再生可能エネルギー設置 (風車、太陽光パネル、バイオガスパラントなど) をエネルギーシステムに統合することに関する世間の受容を確実なものに出来る。地域経済に対するプラスの影響により、再生可能エネルギー開発に対する世論の態度はさらに改善される (Jobert et al., 2007; Maruyama et al., 2007; Aitken, 2010; Warren and McFadyen, 2010)。フランス及びドイツの風力発電プロジェクトの成功を評価したケーススタディでは、開発事業者が地域の状況及び懸念に精通していること (Jobert et al., 2007)、初期段階からの計画のプロセスの透明性、情報提供、及び地域住民の参加 (Wolsink, 2007a) が、世論の受容には非常に重要な要因であることが示されている。開発途上国では、コミュニティのエネルギーの需要に最適な解決策を模索するため、農村部の女性のエンパワーメントも含まれる (Omer, 2003; Oikonomou et al., 2009; A. Singh, 2009)。

**9.6 統合**

本報告書で論じられている再生可能エネルギー (RE) 技術は、今後数十年間にわたって、世界のエネルギーシステムにおいてますます重要な役割を担う。化石燃料の燃焼によって引き起こされた気候変動の緩和は、世界のエネルギーシステムの急激な変化への重要な原動力の 1 つとなる。再生可能エネルギーへの依存拡大という望ましい状況への傾向を示す追加的な要因には、化石燃料資源の不公平な分布及び将来の供給不足に関する懸念、近代的エネルギーのサービスの妥当な供給、及び環境や人間の健康への負担の軽減がある。近代社会の化石燃料への依存度が高いことを考慮すれば、提案されたいかなる変化の道筋も、実現可能性及び持続可能な開発へのその影響に関して慎重に分析されなければならない。

いかなるエネルギー技術も、進行中の持続可能な開発として、多くの持続可能な開発目標に貢献しなければならない。本報告書では、これらは、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、健康及び環境への悪影響低減として認識されてきた。これまで、再生可能エネルギーは多くの場合、これらの4つの目標を促進することを要求されてきており、この章の評価はこれらの仮定の立証に焦点を当ててきた。以下の節では、分析における理論上のコンセプト及び方法論的なツールが簡潔に紹介されている。それに基づく、9.3と9.4節のボトムアップ評価及び統合評価による結果は、再生可能エネルギーの持続可能な開発への貢献が依然として限定されたままである場合や、それが重大な潜在性を示す場合を理解する上で、明確な手がかりとなるようまとめられている。

### 9.6.1 再生可能エネルギー源の理論上のコンセプト及び方法論的なツール

持続可能な開発は主に3本柱モデル、つまり経済的発展、社会的発展、及び環境保護への貢献を考慮して形作られてきた。持続可能な開発は、持続可能性の弱いパラダイム及び持続可能性の強いパラダイムの連続体に従い方向づけられてもいる。それらのパラダイムは、自然資本及び人為的な資本の持続可能性に関する仮定において異なっている。再生可能エネルギー技術は、再生可能エネルギーによる3本柱モデルの開発目標への貢献、及び弱い持続可能性枠組みと強い持続可能性枠組みに準じた目的の優先順位付けという両方のコンセプトの範囲内で評価される。同様に、持続可能な開発のコンセプトは、政策決定者が再生可能エネルギーの持続可能な開発への貢献を評価し、適切な経済的、社会的、及び環境的措置を立案するのに有益な枠組みを提供する。

本章で実施された評価は、帰属的ライフサイクル評価(LCA)またはエネルギー統計に由来するボトムアップ指標、動学的統計モデルアプローチ、及び定性分析など様々な方法論的なツールに基づいている。当然のことながら、これらの各々の評価技術にはそれぞれの制約が伴う。たとえば、個々のライフサイクル評価の結果からの一般的な結論は、潜在的なシステム境界問題、技術及び背景的エネルギーシステムの特徴の差異、地理的な位置、データソースのタイプ、その他の中心的な手法や仮定により妨げられている。しかし、ライフサイクル評価により、比較の標準的枠組みが提供され、ボトムアップ証明により、領域全体にわたる様々な技術の環境的性能についての貴重な見識をもたらす。包括的なアプローチにおいて、地球規模の統合モデルのシナリオ結果は、マクロ経済的及び体系的視野の範囲で分析された。それは、再生可能エネルギー普及が指定された持続可能な開発目標に対して行った貢献に関する結論を引き出すためである。しかし、これらの結果に対するいかなる解釈にも、現在すでに存在する統合モデルは比較的具体的な一連のタスクに沿って作成されたという認識が伴わなければならない。これらは、かなり広範囲にわたる世界の地域におけるエネルギーポートフォリオ、及び時間の経過と共にそれらの変化が暗示する排出の軌跡、その双方に関する政策または経済性の効果への理解と関連している。これらのタスクを超えたモデルの拡大が困難な一方で、将来における持続可能性に対する扱いは改善する余地がある。たとえば、エネルギー使用の文化的次元を正確に示すための統合モデルの能力に関する疑問や、行動や投資に関する非価格政策の影響についての疑問は解決されていない。

文献評価から生じる主なポイントの1つは、(温室効果ガス排出の範疇を超えた)エネルギーシステムの影響の評価、気候緩和シナリオ、及び持続可能な開発目標はほとんどの場合、ほとんど相互関係もなく進行してきたということである。効果的で、経済的に効率的かつ社会的に容認出来るエネルギーシステムの変換には、これら3つのすべての研究領域の結果をさらに緊密に統合することが必要である。本報告書において実施されている評価は多くの重要な洞察を導き出した一方で、これらの短所の一部も明らかにした。たとえば、この評価においては、特定の地域の状況、変動性、または生物物理学的制約の説明を改善するために、統合モデルの枠組みの範囲で、追加的な境界(環境的境界など)やさらに複雑なエネルギーシステムモデルを包括する必要があることに焦点が当てられている。しかし、再生可能エネルギーと持続可能な開発の統合という多次元的な課題に関して、地球規模で1つの回答を導き出すのは不可能であることも明白である。多くの解決法は、地域の文化的状況に大いに左右され、発展途上国及び先進国のアプローチや重視する事柄も異なる可能性がある。

### 9.6.2 社会経済の発展

エネルギー部門は一般的に、経済成長とエネルギー消費拡大の間の強い相関関係を持つ経済的発展へのカギとして認識されてきた。これまでのところ、拡大するエネルギー使用もまた、温室効果ガス排出増加と強い相関関係がある。世界各地のエネルギー使用パターンの横断的な相当量の変化は一般的なものであるが、その相関関係は、GDPのような単一計測の分析と人間開発指数のような複合指標の両方によって確認されている。開発途上及び移行経済には、低エネルギーかつ低炭素集約型の成長パターンに「リープフロッグ」する機会があるかもしれない。急速な経済成長は、実例が示すように、いかなるエネルギーの減少または炭素集約度の低下をも上回る可能性があり、これには強固な政策及び制度的枠組みが必要である。

再生可能エネルギーの社会経済の発展に対する貢献は、先進国と発展途上国との間で違いがあるだろう。発展途上国は、経済的により効率的な再生可能エネルギー技術を導入することによって、費用のかかるエネルギー輸入を避けることができ、外国為替を地域で生産できないその他の製品の輸入に廻すことが出来る。しかしながら、さらな

るコスト削減が期待されているにもかかわらず、今日では再生可能エネルギーの生産コストは通常、現在のエネルギー市場価格よりも高い。送電システムアクセスが不足する貧しい農村部では、再生可能エネルギーは今日における相当量のコスト削減にすでにつながっている。再生可能エネルギーの促進をサポートする目的として、特に先進工業国では、雇用機会の創出や経済における構造変化の積極的な促進が見られる。

シナリオ文献の結果では、長い目で見たコスト効率の高い緩和への取り組み（特に温室効果ガス安定化レベルの低下）に関する再生可能エネルギーの役割に焦点を当てている。大規模な統合モデルによって、時間とともに地球規模の再生可能エネルギーの普及割合が高くなることが示唆される開発途上国では、再生可能エネルギーが、低炭素エネルギーシステムの普及を加速する一助となる可能性がある。再生可能エネルギーの大規模な導入に必要な資金提供において、気候資金は重大な役割を担うことが期待されている。

### 9.6.3 エネルギーアクセス

クリーンで信頼性のある、手頃な価格のエネルギー源へのアクセスの強化は、持続可能な開発の重要な部分であり、再生可能エネルギーがこの目標に大いに貢献する可能性がある。現在、約 14 億人が電力を利用できず、約 27 億人が調理を伝統的バイオマスに依存している（9.3.2 節）。近代的エネルギーのサービスへのアクセスは、健康、教育、男女同権、環境安全といった人間開発の多くの基本的な決定要因の重要な前提条件である。基本レベルにおいてさえ、たとえば、照明、コミュニケーション、または健康管理の機会の改善によって、コミュニティや家庭に多大な便益を与えることが出来る。開発途上国では、再生可能エネルギーに基づく分散化した送電システムが拡大し、国の送電システムから遠く離れた農村部地域におけるエネルギーアクセスを改善してきた。さらに、非電氣的再生可能エネルギー技術は、エネルギーのサービスの直接的近代化の機会を提供し、たとえば給湯や穀物乾燥に太陽エネルギーを、輸送にバイオ燃料を、冷暖房、調理、及び照明にバイオガスや近代的バイオマスを、揚水に風力を使用する（表 9.3 参照）。近代的分析により、所得の伸びはエネルギーアクセスをもたらす傾向があることが確認されたが、これも社会における所得分配のレベルに依存している。開発途上国がエネルギーのアクセス強化に特化した財政支援を確保し、適合した政策を適用することができれば、近代的エネルギーのサービスにアクセス出来る人々の数はさらに急速に増加する可能性がある。

### 9.6.4 エネルギー安全保障

経済圏のエネルギー安全保障の形成における再生可能エネルギーの役割は複雑であり、特定の国の発展レベルに左右される。たとえば、発展途上及び移行経済の場合、再生可能エネルギーは外貨準備高を有効に活用することに貢献し、エネルギーのサービスの信頼性向上に役立つ可能性がある。多くの発展途上国の場合、エネルギー安全保障の定義は具体的に、あらゆる地域の人々に適切で入手可能なアクセスの提供を含むため、エネルギーアクセスの側面と強い関連性があることを提示している。よって、エネルギー安全保障の定義、つまり供給分断のリスクは、地域のエネルギー供給の信頼性を組み込むために、資源の利用可能性、資源分布、供給の変動性によって拡大される。

シナリオ分析によって、再生可能エネルギーはエネルギー供給を多様化するのに役立つため、エネルギー安全保障を強化する可能性があることが裏付けられている。地域の再生可能エネルギーオプションは、ますます不足する集中的な化石燃料供給の代わりとなり、エネルギー供給を多様化し、少数の供給者への依存を低下させる。再生可能エネルギー市場（バイオエネルギーなど）が集中的な供給によって特徴づけられていない限り、価格変動に対する経済的脆弱性を低減させる一助となる可能性がある。しかし、一部の再生可能エネルギーの変動性のある出力プロフィールが原因となり、地域の状況に適合した技術的及び制度的措置が多くの場合、新たな不安定さを最小化するために必要である。また、特定の無機原材料の供給制約も再生可能エネルギーの普及強化に影響を与える可能性がある。

再生可能エネルギーが輸送で使用する液体化石燃料とどの程度まで置き換わる事が出来るかは、技術、市場、及び制度開発に依存する。こうした進歩が伴ったとしても、石油及び関連したエネルギー安全保障の懸念は、将来の地球規模のエネルギーシステムにおいて大きな影響を及ぼす可能性が高い。

### 9.6.5 気候変動緩和と環境及び健康への影響の軽減

再生可能エネルギー技術は、化石燃料と比較して、温室効果ガス排出削減など、重要な環境的便益を提供することが出来る。これらの便益の最大化はほとんどの場合、それぞれの再生可能エネルギープロジェクトに関連する特定の技術、管理、場所の特徴に左右される。一定の規模で導入されたすべてのエネルギー技術が環境的影響（地域の設置判断によって大部分が決定される）を生み出す一方で、再生可能エネルギーオプションのほとんどは、すべての領域にわたる利点、特に気候、水資源、及び大気質への影響に関する利点をもたらすことが出来る。再生可能エネルギーの他のオプションに対する環境的利点は、いつも明確というわけではない。技術間の大きな差異が存在するため、その差異の一部が、厄介な持続可能な開発のトレードオフに潜在的につながり得る可能性がある。

特に、バイオエネルギーは特別な役割を担っている。バイオエネルギーは燃焼に基づく唯一の再生可能エネルギーであり、大気汚染や冷却水の必要性など関連する負担につながる。バイオエネルギー生産によるその他の影響は、プラスのものもあればマイナスのものもあり、土地や水使用と同様、水質や土壌の質に関連している。これらの影響には、バイオエネルギー固有の農業、林業、及び農村部開発への関連性に起因するため、特別な注意が必要である。バイオエネルギー生産の正味の影響は、特にライフサイクル温室効果ガス排出量に関しては、土地やバイオマス資源管理の実施、及び原材料生産に転換された土地のそれ以前の状態に著しく影響される。ほとんどのモデルが今のところ土地の使用や地球の炭素ストックを含んでいないのに対して、直接的及び間接的土地利用変化に焦点を当ててきたそれらのシナリオは、持続可能な開発のマイナスの結果を重視している。これらは、適切な政策が実施されず、大規模な未来型バイオエネルギー市場が存在しない状態での高い成長率に起因するものであるため、森林減少、土地転換、及び温室効果ガス排出量の増大につながる可能性がある。土地利用の適切な管理、地域分け、バイオマス生産システムの選択が、望ましい結果を実現するカギとなる。

再生可能エネルギーは、発電や関連する健康への影響からの地域的な大気汚染を大幅に削減する可能性がある。地域的な大気汚染物質、たとえば粒子状物質や硫黄排出量などに明確に対処するシナリオによれば、気候政策はその地域における重要な相乗便益につながる可能性があることが判明した。従来システムにおける固体燃料使用によって引き起こされる室内空気汚染は、地球規模で大きな健康問題であるが、技術や燃料の改善によって、その他の持続可能な開発に関する懸念にも対処出来るだろう。確実に水不足が持続可能な開発の障壁にならないようにし、またエネルギーのサービスへのアクセス増加が地域の水問題を悪化させないようにするためには、地域的な資源に基づく慎重な判断が必要とされる。非火力利用の再生可能エネルギー技術（風力及び太陽光発電（PV）など）は、水資源に追加的なストレスをかけることなく、クリーンな電力を提供することが出来る。その一方で、運用に水が必要なため、火力発電プラントや水力発電は、水の利用可能性における変化に脆弱である。再生可能エネルギー技術による事故の危険性は無視できない一方で、多くの場合分散したそれらの技術の構造によって、死亡者数の観点からいえば、悲惨な結果が起こる可能性を大いに抑制する。しかしながら、一部の水力発電プロジェクトに関連するダムは、場所により異なる要因に依存する特有のリスクを生み出すかもしれない。

モデルアプローチからの見識によれば、統合評価モデルは、温室効果ガス排出量（たとえば大気汚染物質排出量や水使用など）に加えて一部の重要な環境指標を含ませるには適しているが、たとえば家庭でのエネルギー選択に関する影響など局所的な影響に対処することによって疑問を突き付けられる可能性があることが分かっている。結果のシナリオは、予測不可能の、あるいは定量化されていない環境の便益またはコストを実証するのに役立つだろう。

### 9.6.6 結論

前の節では、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身が、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。

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。

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（Neumayer, 2003）、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。

いくつかの技術的、経済的、及び環境的に実現可能な開発経路の潜在的な存在にもかかわらず、そのような戦略の成功を最終的に定義するのは人間的な要素である。特に持続可能な開発における重要な障壁は、社会文化的及び情報・意識啓発上の側面に関する障壁である。特に、社会的及び個人的価値観と規範に本質的に結びついている障壁は、個人、グループ及び社会による、再生可能エネルギー技術及び関連する普及の影響の認識と容認に根本的に影響を与える。特有のコミュニケーションの取り組みは、広範囲の再生可能エネルギー利用と関連するより客観的な機会と同じ方法でこれらの主観的及び心理的な側面に対処するため、あらゆる変革戦略の不可欠な要素である。都市、地方自治体、民間組織、及び非政府組織による地域的な持続可能な開発の取り組みは、この状況のもとで、変化の重要なドライバーとしての役割を果たすことが出来る。

しかし、地域の取り組みも、国レベルの首尾一貫した持続可能な開発戦略に組み込まれる必要がある。持続可能な開発、及び再生可能エネルギーの目標を、開発政策及び再生可能エネルギーの部門ごとの戦略の開発へ明確に統合することによって、リープフロッギングを含むグリーン成長、低炭素、及び持続可能な開発の目標に貢献する機会が提供される。

## 9.7 知見のギャップと将来の研究ニーズ

本章では、持続可能な開発と再生可能エネルギーとの相互関係の一部を説明し、社会経済の発展、エネルギーアクセス、エネルギー安全保障、気候変動緩和、環境及び健康への影響の軽減など、持続可能な開発目標に焦点を当てた。これらの目標に関する指標の評価は、知見におけるいくつかのギャップを明らかにした。

持続可能な開発のより概念的な議論に始まり、人間の福祉に関する異時点間措置（持続可能性）と測定可能な副指標の間には、狭めなければならない途方もないギャップがある。さらに、持続可能性、つまり弱い持続可能性及び強い持続可能性に関する2つの正反対のパラダイムに関する可能性は、調査が必要とされる。1つの可能性は、非線形、転換点、及び異時点間措置における非線形性についての不安定さを考慮することであり、また予防原則の考慮に関する公式な指針を提供することである。本報告書において、これは、真の貯蓄量（genuine savings）、持続可能な経済福祉指標または真の進歩指標のような弱い持続可能性の特定の指標も意味するが、強い持続可能性の特定の指標（土地利用境界など）も、統計的、及び論理的に再生可能エネルギー指標に関連している必要がある。

定義及び指標とは別に、持続可能性や再生可能エネルギーを評価するのに必要なデータは入手可能とは言い難い。非電化世帯、また低価格電力消費者へのエネルギー供給及び消費に関するより適切な情報及びデータに対する明確な必要性がある。さらに、アクセス向上及び地域的な電力統合のエネルギー安全保障への影響に関する再生可能エネルギーを基盤としたミニグリッドの実例を分析する必要がある。輸送部門の電化と、それがエネルギー安全保障、環境影響、及び温室効果ガス排出量へ与える影響もまた、注目に値する。

エネルギー技術の環境的影響の評価の多くの側面は、鍵となる科学的問題を解決することや、議論も研究もされていないような側面の検証を進めることのための追加的な調査を必要とする。エネルギー技術によって引き起こされた温室効果ガス排出量に関する2つの主な問題は、直接的及び間接的土地利用変化である。再生可能エネルギー技術の場合、これらの問題はバイオエネルギーシステムに関するバイオマス生産や水力発電貯水池に関わっているが、非再生可能エネルギー技術に関連する土地利用変化は同様に研究に値する（山頂除去採炭によりむき出しになった土壌からの炭素排出量など）。いくつかのエネルギー技術には、ライフサイクル温室効果ガス排出量（地熱、海洋エネルギー、及び一部の太陽光発電（PV）電池）の相当量の研究が不足している。水使用は、そのライフサイクル全体のいかなるエネルギー技術に関しても、継続的または確実に評価されたことがなかった。土地利用についての既知知識は、特にライフサイクルベースで検討された場合、水に類似した状態にある。水と土地利用の双方にとって、定量化のための計量方法は、その方法を用いた相当量の追加的実験を行った上でのコンセンサスを必要とする。大気汚染物質については、少なくとも燃料システムの運用では多くのことが分かっているが、ライフサイクルベースで議論された知見はない。大気汚染物質の排出についてのライフサイクルベースでの解釈は、汚染の重要な影響は時間・空間的な合計量で総括出来るものではないので、向上させるべきである。LCAは全体として、手法や仮定が不統一であることが、異なる研究の推定値についての公平な比較や共用を阻害している。

シナリオ文献の評価は、持続可能な開発経路がどのように再生可能エネルギーと相互作用するか、またはその逆に関するいくつかの有益な洞察を提供してきた。しかし、これまでモデルは、エネルギー移行や持続可能な開発経路の評価についての技術的・マクロ経済的な側面に焦点を当ててきており、多くの場合、いつも有効ではないような代理物に依存する必要がある。1つの主要な問題は、モデルのマクロ的見方であり、また一方で、持続可能な開発の一部の問題は、マクロ及び地域レベルで関連性がある。よって、特に様々な持続可能な開発基準に焦点を合わせた場合、それらのすべてに関する主要な欠点が見受けられる。

- ・ 持続可能な社会経済の発展について、シナリオ文献は、消費やGDPを重視する。たとえモデルが福祉についての複数の基準に対処するとしても、分布の問題について告知するには、通常十分に明確ではない。所得層、都市人口と農村部人口などの区別を行うのは難しい。
- ・ エネルギーのサービスの供給及び利用可能性、及びそれらが時間と共にどのように変化するかは、これまでほとんどのエネルギー経済モデルには広く含まれていない側面である。そのため、エネルギーアクセスの評価が難しくなっている。
- ・ エネルギー安全保障に関して、ほとんどのモデルにおける系統構造の現在の概念は、再生可能エネルギーの大規模な統合に関連する起こり得る問題の徹底的な分析を考慮していない。可能性のある蓄電及び変動性の問題を考えた場合、起こり得る障壁は、ほとんどが問題なく克服出来ると考えられている。たとえば燃料供給リスクは通常モデルに考慮されていないように、供給の多様化と農村部地域に電力を供給する可

能性の拡大など、再生可能資源の起こり得る相乗便益も、ほとんど文献に取り上げられていない。

- ・ 既存のシナリオ文献は、たとえば水使用、生物多様への影響、エネルギー選択が世帯レベルのサービスまたは室内の大気質に与える影響など、持続可能なエネルギー開発の多くの無排出関連の側面について、明確に対処していない。さらに、本章の 9.3.4 節に関して、排出量は通常、技術オプションのライフサイクルにわたって処理されていない。これは将来の研究の興味深い側面となるだろう。

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。

## REFERENCES

- Abdelouas, A. (2006).** Uranium mill tailings: Geochemistry, mineralogy, and environmental impact. *Elements*, **2**(6), pp. 335-341.
- Achten, W.M.J., L.R. Lene R Nielsen, R. Aerts, A.G. Lengkeek, E.D. Erik D Kjær, A.Trabucco, J.K. Hansen, W.H. Maes, L. Lars Graudal, F.K. Festus K Akinnifesi, and B. Muys (2010).** Towards domestication of *Jatropha curcas*. *Biofuels*, **1**(1), pp. 91-107.
- Adamantiades, A., and I. Kessides (2009).** Nuclear power for sustainable development: Current status and future prospects. *Energy Policy*, **37**, pp. 5149-5166.
- Afgan, N.H., F. Begic, and A. Kazagic (2007).** Multi-criteria sustainability assessment – A tool for evaluation of new energy system. *Thermal Science*, **11**(3), pp. 43-53.
- Agarwal, A.K. (2007).** Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, **33**(3), pp. 233-271.
- Agbemabiese, L. (2009).** A framework for sustainable energy development beyond the grid: Meeting the needs of rural and remote populations. *Bulletin of Science, Technology & Society*, **29**(2), pp. 151-158.
- AGECC (2010).** *Energy for a Sustainable Future*. United Nations Secretary General's Advisory Group on Energy and Climate (AGECC), New York, NY, USA.
- Aitken, M. (2010).** Wind power and community benefits: Challenges and opportunities. *Energy Policy*, **38**(10), pp. 6066-6075.
- Ajanovic, A. (2011).** Biofuels versus food production: Does biofuels production increase food prices? *Energy*, **36**(4), pp. 2070-2076.
- Aksoy, N., C. Şimşek, and O. Gunduz (2009).** Groundwater contamination mechanism in a geothermal field: A case study of Balcova, Turkey. *Journal of Contaminant Hydrology*, **103**, pp.13-28.
- Al-Riffai, P., B. Dimaranan, and L. Laborde (2010).** *Global Trade and Environmental Impact Study of the EU Biofuels Mandate*. International Food Policy Institute (IFPRI) for the Directorate General for Trade of the European Commission, Brussels, Belgium, 123 pp. Available at: [www.ifpri.org/sites/default/files/publications/biofuelsreportec.pdf](http://www.ifpri.org/sites/default/files/publications/biofuelsreportec.pdf).
- Al-Zoughool, M., and D. Krewski (2009).** Health effects of radon: a review of the literature. *International Journal of Radiation Biology*, **85**(1), pp. 57-69.
- Ale, B.J.M., H. Baksteen, L.J. Bellamy, A. Bloemhof, L. Goossens, A. Hale, M.L. Mude, J.I.H.Oh, I.A. Papazoglou, J. Post, and J.Y. Whiston (2008).** Quantifying occupational risk: The development of an occupational risk model. *Safety Science*, **46**, pp. 176-185.
- Americano, B. (2008).** CDM in Brazil: Towards structural change for sustainable development in some sectors. In: *A Reformed CDM*. K.H. Olsen and J. Fenhann (eds.), UNEP Risø Centre, Roskilde, Denmark, pp. 23-46.
- Anderson, L. (2009).** Ethanol fuel use in Brazil: air quality impacts. *Energy & Environmental Science*, **2**, pp. 1015-1037.
- Andreani-Aksoyoglu, S., J. Keller, A.S.H. Prévôt, U. Baltensperger, and J. Flemming (2008).** Secondary aerosols in Switzerland and northern Italy: Modeling and sensitivity studies for summer 2003. *Journal of Geophysical Research*, **113**, pp. 131-143.
- Ang, J.B. (2007).** CO<sub>2</sub> emissions, energy consumption, and output in France. *Energy Policy*, **35**(10), pp. 4772-4778.

- Ang, J.B. (2008).** Economic development, pollutant emissions and energy consumption in Malaysia. *Journal of Policy Modeling*, **30**(2), pp. 271-278.
- Angel-Urdinola, D., and Q. Wodon (2007).** Do utility subsidies reach the poor? Framework and evidence for Cape Verde, Sao Tome, and Rwanda. *Economics Bulletin*, **9**(4), pp. 1-7.
- Angerer, G. (2010).** Der Einfluss des technischen Fortschritts und der Weltwirtschaft auf die Rohstoffnachfrage. In: *Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen*. U. Teipel (ed.), Fraunhofer Verlag, Stuttgart, Germany, pp. 61-68.
- Angerer, G., E. Erdmann, F. Marscheider-Weidemann, M. Scharp, A. Lüllmann, V. Handke, and M. Marwede (2009).** *Rohstoffe für Zukunftstechnologien*. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, Germany.
- Asafu-Adjaye, J. (2000).** The relationship between energy consumption, energy prices and economic growth: time series evidence from Asian developing countries. *Energy Economics*, **22**(6), pp. 615-625.
- Au, W., R. Lane, M. Legator, E. Whorton, G. Wilkinson, and G. Gabehart (1995).** Biomarker monitoring of a population residing near uranium mining activities. *Environmental Health Perspectives*, **103**(5), pp. 466-470.
- Auffhammer, M., V. Ramanathan, and J.R. Vincent (2006).** Integrated model shows that atmospheric brown clouds and greenhouse gases have reduced rice harvests in India. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **103**(52), pp. 19668-19672.
- Aunan, K., J. Fang, H. Vennemo, K. Oye, and H.M. Seip (2004).** Co-benefits of climate policy – lessons learned from a study in Shanxi, China. *Energy Policy*, **32**(4), pp. 567-581.
- Awerbuch, S. (2006).** Portfolio-based electricity generation planning: Policy implications for renewables and energy security. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **11**(3), pp. 693-710.
- Awerbuch, S., and R. Sauter (2006).** Exploiting the oil-GDP effect to support renewables deployment. *Energy Policy*, **34**(17), pp. 2805-2819.
- Ayash, S.C., A.A. Dobroskok, J.A. Sorensen, S.L. Wolfe, E.N. Steadman, and J.A. Harju (2009).** Probabilistic approach to evaluating seismicity in CO<sub>2</sub> storage risk assessment. *Energy Procedia*, **1**, pp. 2487-2494.
- Azar, C., K. Lindgren, M. Obersteiner, K. Riahi, D.P. van Vuuren, K.M. den Elzen, K. Möllersten, and E.D. Larson (2010).** The feasibility of low CO<sub>2</sub> concentration targets and the role of bio-energy with carbon capture and storage (BECCS). *Climatic Change*, **100**(1), pp. 195-202.
- Bachu, S. (2008).** CO<sub>2</sub> storage in geological media: Role, means, status and barriers to deployment. *Progress in Energy and Combustion Science*, **34**, pp. 254-273.
- Baer, P. (2009).** Equity in climate–economy scenarios: the importance of subnational income distribution. *Environmental Research Letters*, **4**(1), 015007.
- Bailis, R., and J.C. Cutler (2004).** Wood in household energy use. In: *Encyclopedia of Energy*. Elsevier, New York, NY, USA, pp. 509-526.
- Bailis, R., M. Ezzati, and D.M. Kammen (2005).** Mortality and greenhouse gas impacts of biomass and petroleum energy futures in Africa. *Science* **308**(5718), pp. 98-103.
- Bailis, R., A. Cowan, V. Berrueta, and O. Masera (2009).** Arresting the killer in the kitchen: The promises and pitfalls of commercializing improved cookstoves. *World Development*, **37**(10), pp. 1694-1705.

- Bang, H.K., A.E. Ellinger, J. Hadjimarcou, and P.A. Traichal (2000).** Consumer concern, knowledge, belief, and attitude toward renewable energy: An application of the reasoned action theory. *Psychology and Marketing*, **17**(6), pp. 449-468.
- Bao, G.J. (2010).** Study on the relevance of cultural system and hydropower resettlement project in Nujiang River. In: *Advance in Resources & Environmental Economics Research*. Scientific Research Publishing, California, USA, pp. 360-364.
- Barbier, E.B. (2009).** *Rethinking the Economic Recovery: A Global Green New Deal*. Report prepared for the Green Economy Initiative and the Division of Technology, Industry and Economics of the UN Environment Programme, Available at: <http://www.unep.org/greeneconomy/portals/30/docs/GGND-Report-April2009.pdf>.
- Barnes, B., A. Mathee, E. Thomas, and N. Bruce (2009).** Household energy, indoor air pollution and child respiratory health in South Africa. *Journal of Energy in South Africa*, **20**(1), pp. 4-13.
- Barnes, D.F., and W.M. Floor (1996).** Rural energy in developing countries: A challenge for economic development. *Annual Review of Energy and the Environment*, **21**, pp. 497-530.
- Barnes, D., and J. Halpern (2001).** Reaching the poor: Designing energy subsidies to benefit those that need it. *Refocus*, **2**(6), pp. 32-34.
- Barnthouse, L. (2000).** Impacts of power-plant cooling systems on estuarine fish populations: the Hudson River after 25 years. *Environmental Science & Policy*, **3**, pp. 341-348.
- Barry, J., G. Ellis, and C. Robinson (2008).** Cool rationalities and hot air: A rhetorical approach to understanding debates on renewable energy. *Global Environmental Politics*, **8**(2), pp. 67-98.
- Bartle, J.R., and A. Abadi (2010).** Toward sustainable production of second generation bioenergy feedstocks. *Energy Fuels*, **24**, pp. 2-9.
- Bauer, C. (2007).** *Holzenergie*. Paul Scherrer Institut and Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Villigen and Duebendorf, Switzerland.
- Bauer, C. (2008).** *Life Cycle Assessment of Fossil and Biomass Power Generation Chains*. Paul Scherrer Institut, Villigen, Switzerland.
- Bauer, C., T. Heck, R. Dones, O. Mayer-Spohn, and M. Blesl (2009).** *Final Report on Technical Data, Costs, and Life Cycle Inventories of Advanced Fossil Power Generation Systems*. Deliverable n° 7.2 - RS 1a, European Commission, Brussels, Belgium
- Bauer, N., A. Bowen, S. Brunner, O. Edenhofer, C. Flachsland, M. Jakob, and N. Stern (2009).** *Towards a Global Green Recovery. Recommendations for Immediate G20 Action*. Report prepared on behalf of the German Foreign Office, Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), The Grantham Research Institute on Climate Change and Environment (GRI LSE), 49 pp.
- Baum, S., M. Weih, G. Busch, F. Kroiher, and A. Bolte (2009).** The impact of Short Rotation Coppice plantations on phytodiversity. *Landbauforschung vTI Agriculture and Forestry Research*, **3**, pp. 163-170.
- Baumert, K., T. Herzog, and J. Pershing (2005).** *Navigating the Numbers. Greenhouse Gas Data and International Climate Policy*. World Resource Institute, Washington, DC, USA.
- Bazilian, M., and F. Roques (eds.) (2008).** *Analytical Methods for Energy Diversity and Security. Portfolio Optimization in the Energy Sector: A Tribute to the work of Dr. Shimon Awerbuch*. Elsevier Science, Oxford, UK and Amsterdam, The Netherlands.
- Bazilian, M., P. Nussbaumer, E. Haites, M. Levi, M. Howells, and K. Yumkella (2010).** Understanding the scale of investments for universal energy access. *Geopolitics of Energy*, **32**(10-11), pp. 21-42.

- Becerra-Lopez, H.R., and P. Golding (2008).** Multi-objective optimization for capacity expansion of regional power-generation systems: Case study of far west Texas. *Energy Conversion and Management*, **49**(6), pp. 1433-1445.
- Beer, T., T. Grant, D. Williams, and H. Watson (2002).** Fuel-cycle greenhouse gas emissions from alternative fuels in Australian heavy vehicles. *Atmospheric Environment*, **36**(4), pp. 753-763.
- Beer, T., T. Grant, and P.K. Campbell (2007).** *The Greenhouse and Air Quality Emissions of Biodiesel Blends in Australia*. Report Number KS54C/1/F2.29, Report for Caltex Australia Limited, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Clayton South, Australia, 126 pp.
- Bell, D., T. Gray, and C. Haggett (2005).** The ‘social gap’ in wind farm siting decisions: Explanations and policy responses. *Environmental Politics*, **14**(4), pp. 460 - 477.
- Ben Hagan, E. (2003).** Woodfuels consumption in Ghana – Environmental issues and challenges. In: *Proceedings of 1st International Conference on Energy and Environment*, Changsha, China, 11-14 October 2003, pp. 495-500.
- Bengtsson, M., Y. Shen, and T. Oki (2006).** A SRES-based gridded global population dataset for 1990-2100. *Population and Environment*, **28**, pp. 113-131.
- Benson, S.M. (2006).** *Carbon Dioxide Capture and Storage: Assessment of Risks from Storage of Carbon Dioxide in Deep Underground Geological Formations*. Lawrence Berkeley National Laboratory, Earth Sciences Division, Berkeley, CA, USA.
- Bentley, R.W. (2002).** Global oil and gas depletion: an overview. *Energy Policy*, **30**(3), pp. 189-205.
- Beringer, T.I.M., W. Lucht, and S. Schaphoff (2011).** Bioenergy production potential of global biomass plantations under environmental and agricultural constraints. *Global Change Biology - Bioenergy*, doi:10.1111/j.1757-1707.2010.01088.x.
- Bernatik, A., W. Zimmerman, M. Pitt, M. Strizik, V. Nevrlly, and Z. Zelinger (2008).** Modelling accidental releases of dangerous gases into the lower troposphere from mobile sources. *Process Safety and Environmental Protection*, **86**(3), pp. 198-207.
- Berndes, G. (2002).** Bioenergy and water – the implications of large-scale bioenergy production for water use and supply. *Global Environmental Change*, **12**, pp. 253-271.
- Berndes, G. (2008).** Future biomass energy supply: The consumptive water use perspective. *International Journal of Water Resources Development*, **24**, pp. 235-245.
- Berndes, G. (2010).** Bioenergy and water: risks and opportunities. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, **4**(5), pp. 473-474.
- Berndes, G., N. Bird, and A. Cowie (2010).** *Bioenergy, Land Use Change and Climate Change Mitigation*. IEA Bioenergy: ExCo:2010:03, International Energy Agency, Whakarewarewa, Rotorua, New Zealand, 20 pp. Available at: [www.ieabioenergy.com/LibItem.aspx?id=6770](http://www.ieabioenergy.com/LibItem.aspx?id=6770).
- BERR (2008).** *Renewable Energy Awareness And Attitudes Research. Management Summary*. URN 08/657, Department for Business Enterprise and Regulatory Reform (BERR), London, UK.
- BGR (2009).** *Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen*. Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Hannover, Germany.
- Bhattacharyya, S.C. (2005).** Energy access problem of the poor in India: Is rural electrification a remedy? *Energy Policy*, **34**(18), pp. 3383-3397.
- Bickel, P., and R. Friedrich (2005).** *Externalities of Energy Methodology 2005 Update*.

EUR21951, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, Stuttgart, Germany.

- Biehl, F., and E. Lehmann (2006).** Collisions of ships with offshore wind turbines: Calculation and risk evaluation. In: *Offshore Wind Energy: Research on Environmental Impacts*. J. Köller, J. Köppel, and W. Peters (eds.), Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg, Germany, pp. 281-304.
- Bishop, J.D.K., and G.A.J. Amaratunga (2008).** Evaluation of small wind turbines in distributed arrangement as sustainable wind energy option for Barbados. *Energy Conversion and Management*, **49**(6), pp. 1652-1661.
- Bloemkolk, J., and R. van der Schaaf (1996).** Design alternatives for the use of cooling water in the process industry: minimization of the environmental impact from cooling systems. *Journal of Cleaner Production*, **4**(1), pp. 21-27.
- BMU (1998).** *Nachhaltige Entwicklung in Deutschland, Entwurf eines umweltpolitischen Schwerpunktprogramms*. Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Bonn, Germany.
- BMU (2009).** *Umweltwirtschaftsbericht 2009*. Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Bonn, Germany.
- Bojö, J., K.-G. Maler, and L. Unemo (1992).** *Environment and Development: An Economic Approach*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands and Boston, MA, USA.
- Bollen, J., B. van der Zwaan, C. Brinka, and H. Eerensa (2009).** Local air pollution and global climate change: A combined cost-benefit analysis. *Resource and Energy Economics*, **31**(3), pp. 161-181.
- Bollen, J., S. Hers, and B. van der Zwaan (2010).** An integrated assessment of climate change, air pollution, and energy security policy. *Energy Policy*, **38**, pp. 4021-4030.
- Bommer, J.J., S. Oates, J.M. Cepeda, Lindholm, Conrad, J. Bird, R. Torres, G. Marroquin, and J. Rivas (2006).** Control of hazard due to seismicity induced by a hot fractured rock geothermal project. *Engineering Geology*, **86**, pp. 287-306.
- Bond, T.C., D.G. Streets, K.F. Yarber, S.M. Nelson, J.H. Woo, and Z. Klimont (2004).** A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, **109**, D14203, doi:10.1029/2003JD003697.
- Bossel, H., 1999:** *Indicators for Sustainable Development: Theory, Methods, Applications*. International Institute for Sustainable Development, Winnipeg, MB, Canada, 138 pp.
- Boudri, J.C., L. Hordijk, C. Kroeze, M. Amann, J. Cofala, I. Bertok, L. Junfeng, D. Lin, Z. Shuang, H. Runqing, T.S. Panwar, S. Gupta, D. Singh, A. Kumar, M.C. Vipradas, P. Dadhich, N.S. Prasad, and L. Srivastava (2002).** The potential contribution of renewable energy in air pollution abatement in China and India. *Energy Policy*, **30**(5), pp. 409-424.
- Bowen, A., S. Fankhauser, N. Stern, and D. Zenghelis (2009).** *An Outline of the Case for 'Green' Stimulus*. The Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, The Centre for Climate Change Economics and Policy, London, UK, 11 pp.
- BP (2010).** *Statistical Review of World Energy 2010*. BP, London, UK. Available at: [www.bp.com/productlanding.do?categoryId=6929&contentId=7044622](http://www.bp.com/productlanding.do?categoryId=6929&contentId=7044622).
- Brand, K.-W., and G. Jochum (2000).** *Die Struktur des deutschen Diskurs zu nachhaltiger Entwicklung*. MPS-Texte 1/2000, Münchner Projektgruppe für Sozialforschung e.V., München, Germany.

- Brander, M., R. Tipper, C. Hutchison, and G. Davis (2009).** *Consequential and Attributional Approaches to LCA: a Guide to Policy Makers with Specific Reference to Greenhouse Gas LCA of Biofuels*. Technical Paper TP-090403-A, Ecometrica Press, Edinburgh, Scotland, 14 pp. Available at: [d3u3pjcknor731.cloudfront.net/assets/media/pdf/approachesto\\_LCA3\\_technical.pdf](https://d3u3pjcknor731.cloudfront.net/assets/media/pdf/approachesto_LCA3_technical.pdf).
- Bravo, G., R. Kozlulj, and R. Landaveri (2008).** Energy access in urban and peri-urban areas of Buenos Aires. *Energy for Sustainable Development*, **12**(4), pp. 56-72.
- Brent, A.C., and W.J.L. Kruger (2009).** Systems analyses and the sustainable transfer of renewable energy technologies: A focus on remote areas of Africa. *Renewable Energy*, **34**(7), pp.1774-1781.
- Brent, A.C., and D.E. Rogers (2010).** Renewable rural electrification: Sustainability assessment of mini-hybrid off-grid technological systems in the African context. *Renewable Energy*, **35**(1), pp.257-265.
- Brew-Hammond, A. (2010).** Energy access in Africa: Challenges ahead. *Energy Policy*, **38**(5), pp.2291-2301.
- Brewer, T.L. (2004).** The WTO and the Kyoto Protocol: Interaction issues. *Climate Policy*, **4**, pp.3-12.
- Brophy, P. (1997).** Environmental advantages to the utilization of geothermal energy. *Renewable Energy*, **10**, pp. 367-377.
- Brown, P.H., and K. Xu (2010).** Hydropower development and resettlement policy on China's Nu River. *Journal of Contemporary China*, **19**(66), pp. 777-797.
- Browne, D., B. O'Regan, and R. Moles (2010).** Use of multi-criteria decision analysis to explore alternative domestic energy and electricity policy scenarios in an Irish city-region. *Energy*, **35**(2), pp. 518-528.
- Bruce, N., R. Albalak, and P. Perez-Padilla (2002).** *The Health Effects of Indoor Air Pollution Exposure in Developing Countries*. WHO/SDE/OEH/02.05, World Health Organization, Geneva, Switzerland.
- Bruce, N., J. McCracken, R. Albalak, M.A. Schei, K.R. Smith, V. Lopez, and C. West (2004).** Impact of improved stoves, house construction and child location on levels of indoor air pollution exposure in young Guatemalan children. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, **14**(S1), pp. S26-S33.
- Brunnschweiler, C.N. (2010).** Finance for renewable energy: an empirical analysis of developing and transition economies. *Environment and Development Economics* **15**(3), pp. 241-274.
- Burgherr, P. (2007).** In-depth analysis of accidental oil spills from tankers in the context of global spill trends from all sources. *Journal of Hazardous Materials*, **140**(1-2), pp. 245-256.
- Burgherr, P., and S. Hirschberg (2007).** Assessment of severe accident risks in the Chinese coal chain. *International Journal of Risk Assessment and Management*, **7**(8), pp. 1157-1175.
- Burgherr, P., and S. Hirschberg (2008).** A comparative analysis of accident risks in fossil, hydro, and nuclear energy chains. *Human and Ecological Risk Assessment*, **14**(5), pp. 947-973.
- Burgherr, P., S. Hirschberg, and E. Cazzoli (2008).** *Final Report on Quantification of Risk Indicators for Sustainability Assessment of Future Electricity Supply Options*. NEEDS Deliverable No. D7.1 - Research Stream 2b. New Energy Externalities Developments for Sustainability, Brussels, Belgium.
- Burke, P.J. (2010).** Income, resources, and electricity mix. *Energy Economics*, **32**(3), pp. 616-626.

- Burney, J.A., S.J. Davis, and D.B. Lobell (2010).** Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **107**(26), pp. 12052-12057.
- Calvin, K., J. Edmonds, B. Bond-Lamberty, L. Clarke, S.H. Kim, P. Kyle, S.J. Smith, A.Thomson, and M. Wise (2009).** 2.6: Limiting climate change to 450 ppm CO<sub>2</sub> equivalent in the 21st century. *Energy Economics*, **31**(Supplement 2), pp. S107-S120.
- Campbell, C.J., and J.H. Laherrère (1998).** The end of cheap oil. *Scientific American*, **March 1998**, pp. 80-85.
- CARB (2009).** *Low Carbon Fuel Standard Program. Fuel Pathways Documents.* California Air Resources Board, Sacramento, CA, USA.
- Carmichael, G.R., D.G. Streets, G. Calori, M. Amann, M.Z. Jacobson, J. Hansen, and H.Ueda (2002).** Changing trends in sulfur emissions in Asia: Implications for acid deposition, air pollution, and climate. *Environmental Science & Technology*, **36**(22), pp. 4707-4713.
- Carmichael, G.R., B. Adhikary, S. Kulkarni, A.D. Allura, Y. Tang, D. Streets, Q. Zhang, T.C. Bond, V. Ramanathan, A. Jamroensan, and P. Marrapu (2009).** Asian aerosols: Current and year 2030 distributions and implications to human health and regional climate change. *Environmental Science & Technology*, **43**(15), pp. 5811-5817.
- Carrera, D.G., and A. Mack (2010).** Sustainability assessment of energy technologies via social indicators: Results of a survey among European energy experts. *Energy Policy*, **38**(2), pp. 1030-1039.
- Carvalho, F., J. Oliveira, I. Lopes, and A. Batista (2007).** Radionuclides from past uranium mining in rivers of Portugal. *Journal of Environmental Radioactivity*, **98**(3), pp. 298-314.
- Casillas, C.E., and D.M. Kammen (2010).** Environment and development. The energy-poverty-climate nexus. *Science*, **330**(6008), pp. 1181-1182.
- Cavallaro, F. (2009).** Multi-criteria decision aid to assess concentrated solar thermal technologies. *Renewable Energy*, **34**(7), pp. 1678-1685.
- Cernea, M. (1997).** The risks and reconstruction model for resettling displaced populations. *World Development*, **25**(10), pp. 1569-1587.
- Chaurey, A., and T.C. Kandpal (2010).** Assessment and evaluation of PV based decentralized rural electrification: An overview. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **14**(8), pp. 2266-2278.
- Chen, S.J. (2009).** Discussion of resettlement cost externalization of water resources and hydropower projects. *Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering, Vols 1-6*, pp. 1427-1432.
- Cherian, A. (2009).** *Bridging the Divide Between Poverty Reduction and Climate Change through Sustainable and Innovative Energy Technologies.* Environment and Energy Group, United Nations Development Programme, New York, NY, USA, 55 pp.
- Cherubini, F., and A.H. Strømman (2011).** Life cycle assessment of bioenergy systems: state of the art and future challenges. *Bioresource Technology*, **102**(2), pp. 437-451.
- Cherubini, F., N.D. Bird, A. Cowie, G. Jungmeier, B. Schlamadinger, and S. Woess-Gallasch (2009).** Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resources, Conservation and Recycling*, **53**(8), pp. 434-447.
- Christensen, C.F., L.W. Andersen, and P.H. Pedersen (2001).** Ship collision risk for an offshore wind farm. In: *Structural Safety and Reliability: Proceedings of the Eighth International Conference, ICOSSAR '01*, Newport Beach, CA, USA, 17-22 June 2001. Swets & Zeitlinger B.V.,

Lisse, The Netherlands.

- Clarke, L., J. Edmonds, H. Jacoby, H. Pitcher, J. Reilly, and R. Richels (2007).** *Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations*. Sub-report 2.1, Department of Energy, Office of Biological and Environmental Research, Washington, DC, USA, 154 pp.
- Clarke, L., P. Kyle, M. Wise, K. Calvin, J. Edmonds, S. Kim, M. Placet, and S. Smith (2008).** *CO<sub>2</sub> Emissions Mitigation and Technological Advance: An Updated Analysis of Advanced Technology Scenarios*. Technical Report PNNL-18075, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, USA.
- Clarke, L., J. Edmonds, V. Krey, R. Richels, S. Rose, and M. Tavoni (2009).** International climate policy architectures: Overview of the EMF 22 International Scenarios. *Energy Economics*, **31**(Supplement 2), pp. S64-S81.
- Clarke, S. (2009).** Balancing environmental and cultural impact against the strategic need for wind power. *International Journal of Heritage Studies*, **15**(2-3), pp. 175-191.
- Cleveland, C.J. (2005).** Net energy from the extraction of oil and gas in the United States. *Energy*, **30**(5), pp. 769-782.
- Cleveland, C.J., R. Costanza, C.A.S. Hall, and R. Kaufmann (1984).** Energy and the U.S. economy: a biophysical perspective. *Science*, **225**(4665), pp. 890-897.
- Cleveland, C.J., R.K. Kaufman, and D.I. Stern (2000).** Aggregation and the role of energy in the economy. *Ecological Economics*, **32**(2), pp. 301-317.
- Coady, D., M. Grosh, and J. Hoddinott (2004).** *Targeting of Transfers in Developing Countries: Review of Lessons and Experience*. The World Bank, Washington, DC, USA.
- Coady, D., R. Gillingham, R. Ossowski, J. Piotrowski, T. Shamsuddin, and J. Tyson (2010).** *Petroleum Product Subsidies: Costly, Inequitable, and Rising*. IMF Staff Position Note SPN/10/05, International Monetary Fund, Washington, DC, USA.
- Coase, R.H. (1960).** The problem of social cost. *Journal of Law and Economics*, **3**, pp. 1-44.
- Coburn, A., and A. Cohen (2004).** *Catastrophe, Injury, and Insurance. The Impact of Catastrophes on Workers Compensation, Life, and Health Insurance*. Risk Management Solutions, Newark, CA, USA, 80pp.
- Coelho, S.T., J. Goldemberg, O. Lucon, and P. Guardabassi (2006).** Brazilian sugarcane ethanol: lessons learned. *Energy for Sustainable Development*, **10**(2), pp. 26-39.
- Cohen, A.J., H.R. Anderson, B. Ostro, K.D. Pandey, M. Krzyzanowski, N. Künzli, K. Gutschmidt, C.A. Pope III, I. Romieu, J.M. Samet, and K. Smith (2004).** Urban air pollution. In: *Global and Regional Burden of Disease Attributable to Selected Major Risk Factors: Comparative Quantification of Health Risks*. World Health Organization, Geneva, Switzerland, pp. 1353-1434.
- CONCAWE (2008).** *Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context*. European Council for Automotive R&D (EUCAR), European Association for Environment, Health and Safety in Oil Refining and Distribution (CONCAWE), and the Institute for Environment and Sustainability of the EU Commission's Joint Research Centre (JRC/IES). Brussels, Belgium and Ispra, Italy.
- Coronado, C.R., J.A. de Carvalho Jr., J.T. Yoshioka, and J.L. Silveira (2009).** Determination of ecological efficiency in internal combustion engines: The use of biodiesel. *Applied Thermal Engineering*, **29**(10), pp. 1887-1892.
- Costa, R.C., and J.R. Sodr  (2009).** Hydrous ethanol vs. gasoline-ethanol blend: Engine

performance and emissions. *Fuel*, **89** (2), pp. 287-293.

- Cowan, K.R., T. Daim, W. Wakeland, H. Fallah, G. Sheble, L. Lutzenhiser, A. Ingle, R.Hammond, and M. Nguyen (2009).** Forecasting the adoption of emerging energy technologies: Managing climate change and evolving social values. In: [\*Portland International Conference on Management of Engineering and Technology, PICMET 2009\*](#), Portland, OR, USA, 2-6 Aug2009, pp. 2964-2974.
- Cowie, A., P. Smith, and D. Johnson (2006).** Does soil carbon loss in biomass production systems negate the greenhouse benefits of bioenergy? *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **11**(5), pp. 979-1002.
- Cozzani, V., M. Campedela, E. Renni, and E. Krausmann (2010).** Industrial accidents triggered by flood events: Analysis of past accidents. *Journal of Hazardous Materials*, **175**, pp. 501-509.
- Creutzig, F., and D. He (2009).** Climate change mitigation and co-benefits of feasible transport demand policies in Beijing. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **14**(2), pp. 120-131.
- Creutzig, F., and D. Kammen (2009).** The Post-Copenhagen roadmap towards sustainability: differentiated geographic approaches, integrated over goals. *Innovations*, **4**(4), pp. 301-321.
- Creutzig, F., A. Papson, L. Schipper, and D.M. Kammen (2009).** Economic and environmental evaluation of compressed-air cars. *Environmental Research Letters*, **4**, 044011.
- Croezen, H.J., G.C. Bergsma, M.B.J. Otten, and M.P.J. van Valkengoed (2010).** *Biofuels: Indirect Land Use Change and Climate Impact*. 10 8169 49, CE Delft, Delft, The Netherlands, 62 pp.
- Crutzen, P.J., A.R. Mosier, K.A. Smith, and W. Winiwarter (2008).** N<sub>2</sub>O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **8**, pp. 389-395.
- Curtis, L., W. Rea, P. Smith-Willis, E. Fenyves, and Y. Pan (2006).** Adverse health effects of outdoor air pollutants. *Environment International*, **32**(6), pp. 815-830.
- Cushman, R.M. (1985).** Review of ecological effects of rapidly varying flows downstream from hydroelectric facilities. *North American Journal of Fisheries Management*, **5**, pp. 330-339.
- Dai, A. (2011).** Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, **2**(1), pp. 45-65.
- Daly, H. (2007).** *Ecological Economics and Sustainable Development, Selected Essays of Herman Daly*. Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK.
- Dannwolf, U.S., and F. Ulmer (2009).** *AP 6000 Report – Technology risk comparison of the geothermal DHM project in Basel, Switzerland – Risk appraisal including social aspects*. RC006, RiskCom, Pforzheim, Germany.
- Dasgupta, P. (2001).** *Human Well-Being and the Natural Environment*. Oxford University Press, Oxford, UK.
- Dauber, J., M.B. Jones, and J.C. Stout (2010).** The impact of biomass crop cultivation on temperate biodiversity. *Global Change Biology Bioenergy*, **2**(6), pp. 289-309.
- Davidson, E.A. (2009).** The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860. *Nature Geoscience*, **2**(9), pp. 659-662.
- Davidson, O., K. Halsnæs, S. Huq, M. Kok, B. Metz, Y. Sokona, and J. Verhagen (2003).** The development and climate nexus: the case of sub-Saharan Africa. *Climate Policy*, **3**(Supplement1),

pp. S97-S113.

- Davis, S.J., and K. Caldeira (2010).** Consumption-based accounting of CO<sub>2</sub> emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **107**(12), pp. 5687-5692.
- Deichmann, U., C. Meisner, S. Murray, and D. Wheeler (2011).** The economics of renewable energy expansion in rural sub-Saharan Africa. *Energy Policy*, **39**(1), pp. 215-227.
- Del Granado, J.A., D. Coady, and R. Gillingham (2010).** *The Unequal Benefits of Fuel Subsidies: A Review of Evidence for Developing Countries*. IMF Working Paper WP/10/202, International Monetary Fund, Washington, DC, USA.
- del Rio, P., and M. Burguillo (2008).** Assessing the impact of renewable energy deployment on local sustainability: Towards a theoretical framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12**(5), pp. 1325-1344.
- del Rio, P., and M. Burguillo (2009).** An empirical analysis of the impact of renewable energy deployment on local sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**(6-7), pp.1314-1325.
- Demirbas, A. (2009).** Emission characteristics of gasohol and diesohol. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, **31**(13), pp. 1099-1104.
- Denholm, P., and R.M. Margolis (2008).** Land-use requirements and the per-capita solar footprint for photovoltaic generation in the United States. *Energy Policy*, **36**(9), pp. 3531-3543.
- Denholm, P., M. Hand, M. Jackson, and S. Ong (2009).** *Land Use Requirements of Modern Wind Power Plants in the United States*. Technical report NREL/TP-6A2-45834, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA.
- Devine-Wright, P. (2005).** Beyond NIMBYism: towards an integrated framework for understanding public perceptions of wind energy. *Wind Energy*, **8**(2), pp. 125-139.
- Devine-Wright, P. (2009).** Rethinking NIMBYism: The role of place attachment and place identity in explaining place-protective action. *Journal of Community & Applied Social Psychology*, **19**(6), pp. 426-441.
- Dhingra, C., S. Gandhi, A. Chaurey, and P.K. Agarwal (2009).** Access to clean energy services for the urban and peri-urban poor: a case-study of Delhi, India. *Energy for Sustainable Development*, **12**(4), pp. 49-55.
- Dogdu, M.S., and C.S. Bayari (2004).** Environmental impact of geothermal fluids on surface water, groundwater and streambed sediments in the Akarcay Basin, Turkey. *Environmental Geology*, **47**, pp. 325-340.
- Donat Castello, L., D. Gil-Gonzalez, C. Alvarez-Dardet Diaz, and I. Hernandez-Aguado (2010).** The Environmental Millennium Development Goal: progress and barriers to its achievement. *Environmental Science and Policy*, **13**(2), pp. 154-163.
- Dones, R., C. Bauer, and A. Röder (2007).** *Kohle*. Paul Scherrer Institut and Swiss Centre for LifeCycle Inventories, Villigen and Dübendorf, Switzerland.
- Dornburg, V., A. Faaij, P. Verweij, H. Langeveld, G. van de Ven, F. Wester, H. van Keulen, K. van Diepen, M. Meeusen, M. Banse, J. Ros, D.P. van Vuuren, G.J. van den Born, M. van Oorschot, F. Smout, J. van Vliet, H. Aiking, M. Londo, H. Mozaffarian, and K. Smekens (2008).** *Assessment of Global Biomass Potentials and Their Links to Food, Water, Biodiversity, Energy Demand and Economy*. The Netherlands Environmental Assessment Agency, Wageningen, The Netherlands.
- Doukas, H., C. Karakosta, and J. Psarras (2010).** Computing with words to assess the

- sustainability of renewable energy options. *Expert Systems with Applications*, **37**(7), pp. 5491-5497.
- Dubreuil, A., G. Gaillard, and R. Müller-Wenk (2007)**. Key elements in a framework for land use impact assessment within LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **12**(1), pp. 5-15.
- Eason, T.N., Y.A. Owusu, and H. Chapman (2009)**. A systematic approach to assessing the sustainability of the Renewable Energy Standard (RES) under the proposed American Renewable Energy Act (H.R. 890). *International Journal of Global Energy Issues*, **32**(1-2), pp.139-159.
- Eberhard, A., V. Foster, C. Briceño-Garmendia, F. Ouedraogo, D. Camos, and M. Shkaratan (2008)**. *Underpowered: The State of the Power Sector in Sub-Saharan Africa*. World Bank, Washington, DC, USA.
- EC (1999)**. *Pilot Study for the Update of the MARINA Project on the Radiological Exposure of the European Community from Radioactivity in North European Marine Waters*. European Commission, Brussels, Belgium, 77 pp.
- EC (2006)**. *Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants*. sic/tm/32, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, Seville, Spain.
- EC (2010)**. *Critical Raw Materials for the EU*. European Commission, Enterprise and Industry, Brussels, Belgium.
- Ecoinvent (2009)**. *The Ecoinvent LCI Database, Data v2.2*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Duebendorf, Switzerland.
- Edenhofer, O., B. Knopf, M. Leimbach, and N. Bauer (2010)**. The economics of low stabilization. *The Energy Journal*, **31**(Special Issue 1), pp. 11-48.
- Edmonds, J.A., M.J. Scott, J.M. Roop, and C.N. MacCracken (1999)**. *International Emission Trading and the Cost of Greenhouse Gas Emissions Mitigation*. Pew Center for Global Climate Change, Washington, DC, USA.
- Edmonds, J., T. Wilson, M. Wise, and J. Weyant (2006)**. Electrification of the economy and CO<sub>2</sub>emissions mitigation. *Environmental Economics and Policy Studies*, **7**(3), pp. 175-203.
- Edmonds, J.A., J. Clarke, J. Dooley, S.H. Kim, R. Izaurralde, N. Rosenberg, and G. Stokes (2003)**. The potential role of biotechnology in addressing the long-term problem of climate change in the context of global energy and ecosystems. In: *Proceedings of the Sixth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, Kyoto, Japan, 1-4 October 2002, **2**, pp.1427-1432.
- Egré, D., and J.C. Milewski (2002)**. The diversity of hydropower projects. *Energy Policy*, **30**(14), pp. 1225-1230.
- EIA (2009)**. *International Energy Outlook 2009*. U.S. Department of Energy, Energy Information Administration (EIA), Washington, DC, USA.
- Ekholm, T., V. Krey, S. Pachauri, and K. Riahi (2010)**. Determinants of household energy consumption in India. *Energy Policy*, **38**(10), pp. 5696-5707.
- Ekins, P., and S. Simon (1999)**. The sustainability gap: a practical indicator of sustainability in the framework of the national accounts. *International Journal of Sustainable Development*, **2**(1), pp.32-58.
- Ekins, P., S. Simon, L. Deutsch, C. Folke, and R. De Groot (2003)**. A framework for the practical

application of the concepts of critical natural capital and strong sustainability. *Ecological Economics*, **44**(2-3), pp. 165-185.

- EMBRAPA (2009).** *Zoneamento Agroecológico da Cana de Açúcar. Expandir a produção, preservar a vida, garantir o futuro.* 110, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Setembro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Rio de Janeiro, Brazil.
- Engfeldt, L.-G. (2009).** *From Stockholm to Johannesburg and Beyond.* Press, Information and Communication Department, Ministry for Foreign Affairs, Stockholm, Sweden.
- EPA (2010a).** *Greenhouse Gas Emissions Reporting from the Petroleum and Natural Gas Industry.* U.S. Environmental Protection Agency, Climate Change Division, Washington, DC, USA.
- EPA (2010b).** *Renewable Fuel Standard Program (RFS2) Regulatory Impact Analysis.* U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.
- EPRI (2003).** *Use of Degraded Water Sources as Cooling Water in Power Plants.* Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, CA, USA.
- ESMAP (2005).** *The Impacts of Higher Oil Prices on Low Income Countries and the Poor: Impacts and Policies.* Energy Sector Management Assistance Program, World Bank, Washington, DC, USA.
- ESMAP (2006).** *Coping with Higher Oil Prices.* Energy Sector Management Assistance Program, World Bank, Washington, DC, USA.
- ESMAP (2007).** *Technical and Economic Assessment of Off-grid, Mini-grid and Grid Electrification Technologies.* Energy Sector Management Assistance Program, World Bank, Washington, DC, USA.
- ESMAP (2008).** *Coping with Oil Price Volatility.* Energy Sector Management Assistance Program, World Bank, Washington, DC, USA.
- ESMAP (2010).** *Regional Power Sector Integration Lessons from Global Case Studies and a Literature Review.* Energy Sector Management Assistance Program, World Bank, Washington, DC, USA.
- Evans, A., V. Strezov, and T.J. Evans (2009).** Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**(5), pp. 1082-1088.
- EWEA (2004).** *Wind Energy – The Facts. An Analysis of Wind Energy in the EU-25.* European Wind Energy Association (EWEA), Brussels, Belgium.
- Ezzati, M., R. Bailis, D.M. Kammen, T. Holloway, L. Price, L.A. Cifuentes, B. Barnes, A. Chaurey, and K.N. Dhanapala (2004).** Energy management and global health. *Annual Review of Environment and Resources*, **29**(1), pp. 383-419.
- Fahlen, E., and E.O. Ahlgren (2010).** Accounting for external costs in a study of a Swedish district-heating system – An assessment of environmental policies. *Energy Policy*, **38**(9), pp. 4909-4920.
- Fankhauser, S., F. Schilleier, and N. Stern (2008).** Climate change, innovation and jobs. *Climate Policy*, **8**(4), pp. 421-429.
- Fargione, J., J. Hill, D. Tilman, S. Polasky, and P. Hawthorne (2008).** Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science*, **319**(5867), pp. 1235-1238.
- Farrell, A.E., and A.R. Brandt (2006).** Risks of the oil transition. *Environmental Research Letters*,

1, 014004.

- Fawcett, A.A., K.V. Calvin, F.C. de la Chesnaye, J.M. Reilly, and J.P. Weyant (2009).** Overview of EMF 22 U.S. transition scenarios. *Energy Economics* **31**, pp. 198-211.
- Fearnside, P.M. (2001).** Environmental impacts of Brazil's Tucuruí dam: Unlearned lessons for hydroelectric development in Amazonia. *Environmental Management*, **27**(3), pp. 377-396.
- Fernando, S., C. Hall, and S. Jha (2006).** NO<sub>x</sub> reduction from biodiesel fuels. *Energy and Fuels*, **20**(1), pp. 376-382.
- Feygin, M., and R. Satkin (2004).** The oil reserves-to-production ratio and its proper interpretation. *Natural Resources Research*, **13**(1), pp. 57-60.
- Figueiredo, P.N. (2003).** Learning, capability accumulation and firms differences: evidence from latecomer steel. *Industrial and Corporate Change*, **12**(3), pp. 607-643.
- Figueres, C., and C. Streck (2009).** The evolution of the CDM in a post-2012 climate agreement. *Journal of Environment & Development*, **18**, pp. 227-246.
- Fingerman, K., D. Kammen, S. Torn, and M. O'Hare (2010).** Accounting for the water impacts of ethanol production. *Environmental Research Letters*, **5**(1), 014020.
- Finnveden, G., M.Z. Hauschild, T. Ekvall, J. Guinee, R. Heijungs, S. Hellweg, A. Koehler, D. Pennington, and S. Suh (2009).** Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, **91**, pp. 1-21.
- Firbank, L. (2008).** Assessing the ecological impacts of bioenergy projects. *BioEnergy Research*, **1**(1), pp. 12-19.
- Fitzherbert, E.B., M.J. Struebig, A. Morel, F. Danielsen, C.A. Brühl, P.F. Donald, and B. Phalan (2008).** How will oil palm expansion affect biodiversity? *Trends in Ecology & Evolution*, **23**(10), pp. 538-545.
- Flanner, M.G., C.S. Zender, P.G. Hess, N.M. Mahowald, T.H. Painter, V. Ramanathan, and P.J. Rasch (2009).** Springtime warming and reduced snow cover from carbonaceous particles. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **9**(7), pp. 2481-2497.
- Fleming, J.S., S. Habibi, and H.L. MacLean (2006).** Investigating the sustainability of lignocellulose-derived fuels for light-duty vehicles. *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, **11**(2), pp. 146-159.
- Fletcher, R.J., B.A. Robertson, J. Evans, P.J. Doran, J.R.R. Alavalapati, and D.W. Schemske (2011).** Biodiversity conservation in the era of biofuels: risks and opportunities. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **9**(3) pp. 161-168.
- Fleurbaey, M. (2009).** Beyond GDP: The quest for a measure of social welfare. *Journal of Economic Literature*, **47**(4), pp. 1029-1075.
- Founex Committee (1971).** *The Founex Report on Development and Environment*. Founex Committee, Founex, Switzerland.
- Fox, J., and J.E. Campbell (2010).** Terrestrial carbon disturbance from mountaintop mining increases lifecycle emissions for clean coal. *Environmental Science and Technology*, **44**(6), pp. 2144-2149.
- Franco, A., and M. Villani (2009).** Optimal design of binary cycle power plants for water-dominated, medium-temperature geothermal fields. *Geothermics*, **38**(4), pp. 379-391.
- Fritsche, U., K. Hennenberg, and K. Hünecke (2010).** *The "iLUC Factor" as a Means to Hedge Risks of GHG Emissions from Indirect Land Use Change*. Oeko Institute, Darmstadt,

Germany, 64 pp.

- Fritzsche, A.F. (1992).** Editorial – Severe accidents: can they occur only in the nuclear production of electricity? *Risk Analysis*, **12**, pp. 327-329.
- Fron del, M., P. Grösche, D. Huchtemann, A. Oberheitmann, J. Peters, G. Angerer, C. Sartorius, P. Buchholz, S. Röhling, and M. Wagner (2007).** *Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen*. Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI), Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), and Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Essen, Karlsruhe, and Hannover, Germany.
- Fron del, M., N. Ritter, C.M. Schmidt, and C. Vance (2010).** Economic impacts from the promotion of renewable energy technologies: The German experience. *Energy Policy*, **38**, pp.4048-4056.
- Fthenakis, V., and H.C. Kim (2009).** Land use and electricity generation: A life-cycle analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**(6-7), pp. 1465-1474.
- Fthenakis, V., and H.C. Kim (2010).** Life-cycle uses of water in U.S. electricity generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(7), pp. 2039-2048.
- Fujino, J., G. Hibino, T. Ehara, Y. Matsuoka, T. Masui, and M. Kainuma (2008).** Back-casting analysis for 70% emission reduction in Japan by 2050. *Climate Policy*, **8**, pp. S108-S124.
- G-20 (2009).** *Leaders' Statement: The Pittsburgh Summit. The Pittsburgh G-20 Summit*. U.S. Department of State, Pittsburgh, PA, USA.
- Gadhamshetty, V., N. Nirmalakhandan, M. Myint, and C. Ricketts (2006).** Improving air-cooled condenser performance in combined cycle power plants. *Journal of Energy Engineering*, **132**, pp. 81-88.
- Gagnon, L. (2008).** Civilisation and energy payback. *Energy Policy*, **36**(9), pp. 3317-3322.
- Gagnon, L., C. Bélanger, and Y. Uchiyama (2002).** Life-cycle assessment of electricity generation options: The status of research in year 2001. *Energy Policy*, **30**(14), pp. 1267-1278.
- Gallagher, K.S. (2006).** Limits to leapfrogging in energy technologies? Evidence from the Chinese automobile industry. *Energy Policy*, **34**(4), pp. 383-394.
- Gangopadhyay, S., B. Ramaswami, and W. Wadhwa (2005).** Reducing subsidies on household fuels in India: how will it affect the poor? *Energy Policy*, **33**(18), pp. 2326-2336.
- GAO (2010).** *Energy-Water Nexus: A Better and Coordinated Understanding of Water Resources could Help Mitigate the Impacts of Potential Oil Shale Development*. GAO-11-35, U.S. Government Accountability Office (GAO), Washington, DC, USA.
- Gautam, R., N.C. Hsu, K.-M. Lau, S.-C. Tsay, and M. Kafatos (2009).** Enhanced pre-monsoon warming over the Himalayan-Gangetic region from 1979 to 2007. *Geophysical Research Letters*, **36**(7), L07704.
- George, C., and C. Kirkpatrick (2006).** Assessing national sustainable development strategies: Strengthening the links to operational policy. *Natural Resources Forum*, **30**(2), pp. 146-156.
- Gerbens-Leenes, W., A.Y. Hoekstra, and T.H. van der Meer (2009).** The water footprint of bioenergy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **106**, pp. 10219-10223.
- Ghirga, G. (2010).** Cancer in children residing near nuclear power plants: an open question. *Italian Journal of Pediatrics*, **36**(1), pp. 60.
- Giampietro, M., S. Ulgiati, and D. Pimentel (1997).** Feasibility of large-scale biofuel

production. *BioScience*, **47**, pp. 587-600.

- Gibbs, H.K., M. Johnston, J.A. Foley, T. Holloway, C. Monfreda, N. Ramankutty, and D.Zaks (2008).** Carbon payback times for crop-based biofuel expansion in the tropics: the effects of changing yield and technology. *Environmental Research Letters*, **3**, 034001.
- Gillingham, K., S. Smith, and R. Sands (2008).** Impact of bioenergy crops in a carbon dioxide constrained world: an application of the MiniCAM energy-agriculture and land use model. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **13**(7), pp. 675-701.
- Giinebaugh, D.L., J. Liang, and M.Z. Jacobson (2010).** Examining the temperature dependence of ethanol (E85) versus gasoline emissions on air pollution with a largely-explicit chemical mechanism. *Atmospheric Environment*, **44**(9), pp. 1192-1199.
- Giroux, J. (2008).** Turmoil in the Delta: trends and implications. *Perspectives on Terrorism*, **2**(8), pp. 11-22.
- Giroux, J. (2010).** A portrait of complexity: new actors and contemporary challenges in the global energy system and the role of energy infrastructure security. *Risk, Hazards & Crisis in Public Policy*, **1**(1), pp. 34-56.
- Gleick, P. (1993).** *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*. OxfordUniversity Press, New York, NY, USA, 504 pp.
- Gleick, P. (2008).** *The World's Water 2008-2009*. Island Press, Washington, DC, USA.
- GNESD (2004).** *Energy Access – Making Power Sector Reform Work for the Poor*. Global Network on Energy for Sustainable Development (GNESD), Roskilde, Denmark.
- GNESD (2007a).** *Reaching the Millennium Development Goals and Beyond: Access to Modern Forms of Energy as a Prerequisite*. Global Network on Energy for Sustainable Development (GNESD), Roskilde, Denmark.
- GNESD (2007b).** *Renewable Energy Technologies and Poverty Alleviation: Overcoming Barriers and Unlocking Potentials*. Global Network on Energy for Sustainable Development (GNESD), Roskilde, Denmark.
- GNESD (2008).** *Clean Energy for the Urban Poor: An Urgent Issue*. Global Network on Energy for Sustainable Development (GNESD), Roskilde, Denmark.
- GNESD (2010).** *Energy Security*. Global Network on Energy for Sustainable Development(GNESD), Roskilde, Denmark.
- Goldemberg, J. (1998).** Leapfrog energy technologies. *Energy Policy*, **26**(10), pp. 729-741.
- Goldemberg, J. (2001).** *Energy and Human Well Being*. Human Development Occasional PaperHDOCPA-2001-02, United Nations Development Program, New York, NY, USA.
- Goldemberg, J., and S. Teixeira Coelho (2004).** Renewable energy – Traditional biomass vs. modern biomass. *Energy Policy*, **32**(6), pp. 711-714.
- Goldemberg, J., T.B. Johansson, A.K.N. Reddy, and R.H. Williams (1985).** An end-use oriented global energy strategy. *Annual Review of Energy*, **10**(1), pp. 613-688.
- Goldemberg, J., A.K.N. Reddy, K.R. Smith, and R.H. Williams (2000).** Rural energy in developing countries. In: *World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability*. United Nations Development Program, New York, NY, USA.
- Goldemberg, J., T.B. Johansson, A.K.N. Reddy, and R.H. Williams (2004).** A global clean cooking fuel initiative. *Energy for Sustainable Development*, **8**(3), pp. 1-12.
- Goldemberg, J., S.T. Coelho, and P. Guardabassi (2008).** The sustainability of ethanol

- production from sugarcane. *Energy Policy*, **36**(6), pp. 2086-2097.
- Gorissen, L., V. Buytaert, D. Cuypers, T. Dauwe, and L. Pelkmans (2010)**. Why the debate about land use change should not only focus on biofuels. *Environmental Science & Technology*, **44**(11), pp. 4046-4049.
- Graham, L.A., S.L. Belisle, and C.-L. Baas (2008)**. Emissions from light duty gasoline vehicles operating on low blend ethanol gasoline and E85. *Atmospheric Environment*, **42**(19), pp. 4498-4516.
- Green, R., and N. Vasilakos (2011)**. The economics of offshore wind. *Energy Policy*, **39**(2), pp.496-502.
- Greene, D., J. Hopson, and J. Li (2006)**. Have we run out of oil yet? Oil peaking analysis from an optimist's perspective. *Energy Policy*, **34**(5), pp. 515-531.
- Greenwood, M. (2008)**. Fish mortality by impingement on the cooling-water intake screens of Britain's largest direct-cooled power station. *Marine Pollution Bulletin*, **56**(4), pp. 723-739.
- Grieshop, A.P., C.C.O. Reynolds, M. Kandlikar, and H. Dowlatabadi (2009)**. A black-carbon mitigation wedge. *Nature Geoscience*, **2**(8), pp. 533-534.
- Gross, C. (2007)**. Community perspectives of wind energy in Australia: The application of a justice and community fairness framework to increase social acceptance. *Energy Policy*, **35**(5), pp.2727-2736.
- Gross, R., P. Heptonstall, D. Anderson, T. Green, M. Leach, and J. Skea (2006)**. *The Costs and Impacts of Intermittency: An Assessment of the Evidence on the Costs and Impacts of Intermittent Generation on the British Electricity Network*. UK Energy Research Centre, London, UK.
- Gross, R., P. Heptonstall, M. Leach, D. Anderson, T. Green, and J. Skea (2007)**. Renewables and the grid: understanding intermittency. *Energy*, **160**, pp. 31-41.
- Grubb, M., L. Butler, and P. Twomey (2006)**. Diversity and security in UK electricity generation: The influence of low-carbon objectives. *Energy Policy*, **34**(18), pp. 4050-4062.
- Grübler, A. (2004)**. Transitions in energy use. In: *Encyclopedia of Energy*, **6**, pp. 163-177. Available at: [www.eoearth.org/article/Energy\\_transitions](http://www.eoearth.org/article/Energy_transitions).
- Grübler, A., B. O'Neill, K. Riahi, V. Chirkov, A. Goujon, P. Kolp, I. Prommer, S. Scherbov, and E. Slentoe (2007)**. Regional, national, and spatially explicit scenarios of demographic and economic change based on SRES. *Technological Forecasting and Social Change*, **74**(7), pp.980-1029.
- Gunawardena, U.A.D.P. (2010)**. Inequalities and externalities of power sector: A case of Broadlands hydropower project in Sri Lanka. *Energy Policy*, **38**(2), pp. 726-734.
- Güney, M.S., and K. Kaygusuz (2010)**. Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, pp. 2996-3004.
- Gupta, E. (2008)**. Oil vulnerability index of oil-importing countries. *Energy Policy*, **36**(3), pp.1195-1211.
- Gupta, H.K. (2002)**. A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India. *Earth-Science Reviews*, **58**(3-4), pp. 279-310.
- Gurgel, A., J. Reilly, and S. Paltsev (2007)**. Potential land use implications of a global biofuels industry. *Journal of Agricultural & Food Industrial Organization*, **5**(2), Article 9.

- Ha-Duong, M., A. Nadai, and A.S. Campos (2009).** A survey on the public perception of CCS in France. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **3**, pp. 633-640.
- Hagelüken, C., and C.E.M. Meskers (2010).** Complex lifecycles of precious and special metals. In: *Linkages of Sustainability*. [T.E. Graedel](#) and [E. van der Voet](#) (eds.), MIT Press, Cambridge, MA, USA, pp. 163-198.
- Haines, A., K. Smith, D. Anderson, P. Epstein, A. McMichael, I. Roberts, P. Wilkinson, J. Woodcock, and J. Woods (2009).** Policies for accelerating access to clean energy, improving health, advancing development, and mitigating climate change. *The Lancet*, **370**(9594), pp.1264-1281.
- Hallquist, M., J.C. Wenger, U. Baltensperger, Y. Rudich, D. Simpson, M. Claeys, J. Dommen, N.M. Donahue, C. George, A.H. Goldstein, J.F. Hamilton, H. Herrmann, T. Hoffmann, Y. Iinuma, M. Jang, M.E. Jenkin, J.L. Jimenez, A. Kiendler-Scharr, W. Maenhaut, G. McFiggans, T.F. Mentel, A. Monod, A.S.H. Prévôt, J.H. Seinfeld, J.D. Surratt, R. Szmigielski, and J. Wildt (2009).** The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: current and emerging issues. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **9**, pp. 5155-5236.
- Hamilton, K. (1994).** Green adjustments to GDP. *Resources Policy*, **20**(3), pp. 155-168.
- Hamilton, K., and M. Clemens (1999).** Genuine savings rates in developing countries. *The World Bank Economic Review*, **13**(2), pp. 333-356.
- Hanasaki, N., S. Kanaei, T. Oki, K. Masuda, K. Motoya, N. Shirakawa, Y. Shen, and K. Tanaka (2008).** An integrated model for the assessment of global water resources. Part 2: Applications and assessments. *Hydrology and Earth System Sciences*, **12**(4), pp. 1027-1037.
- Hansen, J., M. Sato, R. Ruedy, L. Nazarenko, A. Lacis, G.A. Schmidt, G. Russell, I. Aleinov, M. Bauer, S. Bauer, N. Bell, B. Cairns, V. Canuto, M. Chandler, Y. Cheng, A. Del Genio, G. Faluvegi, E. Fleming, A. Friend, T. Hall, C. Jackman, M. Kelley, N. Kiang, D. Koch, J. Lean, J. Lerner, K. Lo, S. Menon, R. Miller, P. Minnis, T. Novakov, V. Oinas, J. Perlwitz, J. Perlwitz, D. Rind, A. Romanou, D. Shindell, P. Stone, S. Sun, N. Tausnev, D. Thresher, B. Wielicki, T. Wong, M. Yao, and S. Zhang (2005).** Efficacy of climate forcings. *Journal of Geophysical Research*, **110**(D18), D18104.
- Harmon, R.R., and K.R. Cowan (2009).** A multiple perspectives view of the market case for green energy. *Technological Forecasting and Social Change*, **76**(1), pp. 204-213.
- Harrison, G.P., and H.W. Whittington (2002).** Vulnerability of hydropower projects to climate change. *IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, **149**(3), pp. 249.
- Harto, C., R. Meyers, and E. Williams (2010).** Life cycle water use of low-carbon transport fuels. *Energy Policy*, **38**(9), pp. 4933-4944.
- Hartwick, J. (1977).** Intergenerational equity and the investing of rents from exhaustible resources. *The American Economic Review*, **67**(5), pp. 972-974.
- Hastings, J.V. (2009).** Geographies of state failure and sophistication in maritime piracy hijackings. *Political Geography*, **28**, pp. 213-223.
- Heck, T. (2007).** *Wärmepumpen*. Ecoinvent report No. 6-X, Paul Scherrer Institut and Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Villigen and Dübendorf, Switzerland.
- HEI (2010).** *Outdoor Air Pollution and Health in the Developing Countries of Asia: A Comprehensive Review*. Special Report 18, Health Effects Institute, Boston, MA, USA.
- Heijungs, R., M.J. Goedkoop, J. Struijs, S. Effting, M. Sevenster, and G. Huppes (2003).** *Towards a Life Cycle Impact Assessment Method which Comprises Category Indicators at the Midpoint and the Endpoint Level*. PRé Consultants, Amersfoort, The Netherlands.

- Hennenberg, K.J., C. Dragisic, S. Haye, J. Hewson, B. Semroc, C. Savy, K. Wiegmann, H.Fehrenbach, and U.R. Fritsche (2010).** The power of bioenergy-related standards to protect biodiversity. *Conservation Biology*, **24**(2), pp. 412-423.
- Hepburn, C., and N. Stern (2008).** A new global deal on climate change. *Oxford Review of Economic Policy*, **24**(2), pp. 259-279.
- Herman, R., S.A. Ardekani, and J.H. Ausubel (1990).** Dematerialization. *Technological Forecasting and Social Change*, **38**(4), pp. 333-347.
- Hertel, T.W., A.A. Golub, A.D. Jones, M. O'Hare, R.J. Plevin, and D.M. Kammen (2010).** Effects of US maize ethanol on global land use and greenhouse gas emissions: Estimating market-mediated responses. *BioScience*, **60**(3), pp. 223-231.
- Hertwich, E.G., T.E. McKone, and W.S. Pease (1999).** Parameter uncertainty and variability in evaluative fate and exposure models. *Risk Analysis*, **19**(6), pp. 1193-1204.
- Hiederer, R., F. Ramos, C. Capitani, R. Koeble, V. Blujdea, O. Gomez, D. Mulligan, and L.Marelli (2010).** *Biofuels: A New Methodology to Estimate GHG Emissions from Global LandUse Change, A methodology involving spatial allocation of agricultural land demand and estimation of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions*. EUR 24483 EN - 2010, Joint Research Center, European Commission, Brussels, Belgium.
- Hill, J., E. Nelson, D. Tilman, S. Polasky, and D. Tiffany (2006).** Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **103**(30), pp. 11206-11210.
- Hill, J., S. Polasky, E. Nelson, D. Tilman, H. Huo, L. Ludwig, J. Neumann, H.C. Zheng, and D. Bonta (2009).** Climate change and health costs of air emissions from biofuels and gasoline. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **106**(6), pp. 2077-2082.
- Hilton, B., and B. Duddy (2009).** The effect of E20 ethanol fuel on vehicle emissions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, **223**(12), pp. 1577-1586.
- Hirschberg, S., G. Spiekerman, and R. Dones (1998).** *Severe Accidents in the Energy Sector – First Edition*. PSI Report No. 98-16, Paul Scherrer Institut, Villigen, Switzerland.
- Hirschberg, S., P. Burgherr, G. Spiekerman, E. Cazzoli, J. Vitazek, and L. Cheng (2003).** Assessment of severe accident risks. In: *Integrated Assessment of Sustainable Energy Systems in China. The China Energy Technology Program – A framework for decision support in the electric sector of Shandong province. Alliance for Global Sustainability Series Vol. 4*. Kluwer Academic Publishers, Amsterdam, The Netherlands, pp. 587-660.
- Hirschberg, S., P. Burgherr, G. Spiekerman, and R. Dones (2004a).** Severe accidents in the energy sector: comparative perspective. *Journal of Hazardous Materials*, **111**(1-3), pp. 57-65.
- Hirschberg, S., T. Heck, U. Gantner, Y. Lu, J.V. Spadaro, A. Trunkenmüller, and Y. Zhao (2004b).** Health and environmental impacts of China's current and future electricity supply, with associated external costs. *International Journal of Global Energy Issues*, **22**(2/3/4), pp. 155-179.
- Hirschberg, S., R. Dones, T. Heck, P. Burgherr, W. Schenler, and C. Bauer (2006).** Strengths and weakness of current energy chains in a sustainable development perspective. *atw - International Journal for Nuclear Power*, **51**(7), pp. 447-457.
- Hobday, M. (2003).** Innovation in Asian industrialization: A Gerschenkronian perspective. *Oxford Development Studies*, **31**(3), pp. 293-314.
- Hoefnagels, R., E. Smeets, and A. Faaij (2010).** Greenhouse gas footprints of different biofuel

- production systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(7), pp. 1661-1694.
- Holling, C.S. (1997)**. Regional responses to global change. *Conservation Ecology*, **1**(2), Article 3.
- Holloway, S., J.M. Pearce, V.L. Hards, T. Ohsumi, and J. Gale (2007)**. Natural emissions of CO<sub>2</sub> from the geosphere and their bearing on the geological storage of carbon dioxide. *Energy*, **32**, pp. 1194-1201.
- Hong, N., and A.K.Y. Ng (2010)**. The international legal instruments in addressing piracy and maritime terrorism: A critical review. *Research in Transportation Economics*, **27**, pp. 51-60.
- Hoogwijk, M., and A. Faaij (2005)**. Potential of biomass energy out to 2100, for four IPCC SRESland-use scenarios. *Biomass and Bioenergy*, **29**(4), pp. 225-257.
- Hopwood, B., M. Mellor, and G. O'Brien (2005)**. Sustainable development: mapping different approaches. *Sustainable Development*, **13**(1), pp. 38-52.
- Houser, T., S. Mohan, and R. Heilmayr (2009)**. *A Green Global Recovery? Assessing US Economic Stimulus and the Prospects for International Coordination*. Petersen Institute for International Economics, World Resources Institute, Washington, DC, USA.
- Howells, M.I., T. Alfstad, D.G. Victor, G. Goldstein, and U. Remme (2005)**. A model of household energy services in a low-income rural African village. *Energy Policy*, **33**(14), pp.1833-1851.
- Hreinsson, E.B. (2007)**. Environmental, technical, economics and policy issues of the master plan for the renewable hydro and geothermal energy resources in Iceland. In: *42nd Universities Power Engineering Conference, Vols 1-3*, Brighton, UK, 4-6 September 2007, pp. 726-731.
- Hsu, D.D., D. Inman, G.A. Heath, E.J. Wolfrum, M.K. Mann, and A. Aden (2010)**. Life cycle environmental impacts of selected US ethanol production and use pathways in 2022. *Environmental Science & Technology*, **44**(13), pp. 5289-5297.
- Hueting, R. (1980)**. *New Scarcity and Economic Growth: More Welfare through Less Production?* North-Holland Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands and New York, NY, USA.
- Huijts, N.M.A., C.J.H. Midden, and A.L. Meijnders (2007)**. Social acceptance of carbon dioxide storage. *Energy Policy*, **35**, pp. 2780-2789.
- Huo, H., M. Wang, C. Bloyd, and V. Putsche (2009a)**. Life-cycle assessment of energy use and greenhouse gas emissions of soybean-derived biodiesel and renewable fuels. *Environmental Science & Technology*, **43**(3), pp. 750-756.
- Huo, H., Y. Wu, and M. Wang (2009b)**. Total versus urban: Well-to-wheels assessment of criteria pollutant emissions from various vehicle/fuel systems. *Atmospheric Environment*, **43**(10), pp.1796-1904.
- Hvelplund, F. (2006)**. Renewable energy and the need for local energy markets. *Energy*, **31**(13), pp. 2293-2302.
- IEA (2008a)**. *Energy Policy Review of Indonesia*. International Energy Agency, Paris, France.
- IEA (2008b)**. *World Energy Outlook 2008*. International Energy Agency, Paris, France, 578 pp.
- IEA (2008c)**. *Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency. Key Insights from IEA Indicator Analysis*. International Energy Agency, Paris, France.
- IEA (2009)**. *World Energy Outlook 2009*. International Energy Agency, Paris, France, 696 pp.
- IEA (2010a)**. *Energy Poverty – How to make modern energy access universal. Special excerpt from WEO 2010 with UNIDO and UNDP*. International Energy Agency, Paris, France.

- IEA (2010b).** *World Energy Outlook 2010*. International Energy Agency, Paris, France, 736 pp.
- IEA/ OECD/ World Bank (2010).** *The Scope of Fossil-Fuel Subsidies in 2009 and a Roadmap for Phasing Out Fossil Fuel Subsidies*. International Energy Agency (IEA), Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD), and The World Bank, Paris, France and Washington, DC, USA. Available at: [www.iea.org/weo/docs/second\\_joint\\_report.pdf](http://www.iea.org/weo/docs/second_joint_report.pdf).
- IIED (2009).** *'Land grabs' in Africa: Can the Deals Work for Development? September Briefing*. International Institute for Environment and Development (IIED), London, UK.
- ILO (2010).** *Occupational Hazard Datasheets – Field Crop Worker*. International Labour Organization (ILO), International Occupational Safety and Health Information Centre (CIS), Geneva, Switzerland.
- IMF (2008).** *Fiscal Implications of Climate Change*. Fiscal Affairs Department, International Monetary Fund, Washington, DC, USA.
- IPCC (1996a).** *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. J. Bruce, H. Lee, and E.F. Haites (eds.), Cambridge University Press, 448 pp.
- IPCC (1996b).** *Climate Change 1995: Impacts, Adaptation, and Mitigation of Climate Change - Scientific-Technical Analysis. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. R.T. Watson, M.C. Zinyowera, and R.H. Moss (eds.), Cambridge University Press, 879 pp.
- IPCC (2000).** *Special Report on Emissions Scenarios*. N. Nakicenovic and R. Swart (eds.), Cambridge University Press, 570 pp.
- IPCC (2001).** *Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. B. Metz, O. Davidson, R. Swart, and J. Pan (eds.), Cambridge University Press, 700 pp.
- IPCC (2005).** *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, and L. Meyer (eds.), Cambridge University Press, 431 pp.
- IPCC (2007a).** *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007*. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, and C.E. Hanson (eds.), Cambridge University Press, 979 pp.
- IPCC (2007b).** *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007*. B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, and L.A. Meyer (eds.), Cambridge University Press, 851 pp.
- IPCC (2008).** *Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. B.C. Bates, Z.W. Kundzewicz, S. Wu, and J.P. Palutikof (eds.), Cambridge University Press.
- ISO (2006).** *ISO 14040:2006, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. Internet site, International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland. Available at: [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail?csnumber=37456](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=37456).
- IUCN (2001).** *Biodiversity Impacts of Large Dams*. World Conservation Union (IUCN), Gland, Switzerland.
- Jacobson, A., A.D. Milman, and D.M. Kammen (2005).** Letting the (Energy) Gini out of the bottle: Lorentz curves of cumulative electricity consumption and Gini coefficients as metrics of

energy distribution and equity. *Energy Policy*, **33**(14), pp. 1825-1832.

- Jacobson, M.Z. (2004).** Climate response of fossil fuel and biofuel soot, accounting for soot's feedback to snow and sea ice albedo and emissivity. *Journal of Geophysical Research*, **109**(D21), D21201.
- Jacobson, M.Z. (2009).** Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. *Energy & Environmental Science*, **2**(2), pp. 148-173.
- Jager, H.I., and B.T. Smith (2008).** Sustainable reservoir operation: can we generate hydropower and preserve ecosystem values? *River Research and Applications*, **24**(3), pp. 340-352.
- Jager, W. (2006).** Stimulating the diffusion of photovoltaic systems: A behavioural perspective. *Energy Policy*, **34**(14), pp. 1935-1943.
- Jain, G. (2010).** Energy security issues at household level in India. *Energy Policy*, **38**(6), pp. 2835-2845.
- Jernelöv, A. (2010).** The threats from oil spills: Now, then, and in the future. *Ambio*, **39**(5-6), pp.353-366.
- Jobert, A., P. Laborgne, and S. Mimler (2007).** Local acceptance of wind energy: Factors of success identified in French and German case studies. *Energy Policy*, **35**(5), pp. 2751-2760.
- Jonker Klunne, W., and E.G. Michael (2010).** Increasing sustainability of rural community electricity schemes – case study of small hydropower in Tanzania. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, **5**(3), pp. 144-147.
- Jonkman, S.N., P.H.A.J.M. van Gelder, and J.K. Vrijling (2003).** An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage. *Journal of Hazardous Materials*, **A99**, pp.1-30.
- Jordaan, S.M., D.W. Keith, and B. Stelfox (2009).** Quantifying land use of oil sands production: a life cycle perspective. *Environmental Research Letters*, **4**(2), 024004.
- Jorgenson, D.W. (1984).** The role of energy in productivity growth. *American Economic Review*, **74**(2), pp. 26-30.
- Jungbluth, N., C. Bauer, R. Dones, and R. Frischknecht (2005).** Life cycle assessment for emerging technologies: Case studies for photovoltaic and wind power. *International Journal of Life Cycle Assessment*, **10**(1), pp. 24-34.
- Jungbluth, N., M. Stucki, and R. Frischknecht (2009).** *Photovoltaics*. Swiss Centre for LifeCycle Inventories, Duebendorf, Switzerland.
- Kaiser, M.J., Y. Yu, and C.J. Jablonowski (2009).** Modeling lost production from destroyed platforms in the 2004–2005 Gulf of Mexico hurricane seasons. *Energy*, **34**(9), pp. 1156-1171.
- Kalberer, M., D. Paulsen, M. Sax, M. Steinbacher, J. Dommen, A.S.H. Prevot, R. Fisseha, E. Weingartner, V. Frankevich, R. Zenobi, and U. Baltensperger (2004).** Identification of polymers as major components of atmospheric organic aerosols. *Science*, **303**(5664), pp. 1659-1662.
- Kaliyan, N., R.V. Morey, and D.G. Tiffany (2010).** Reducing life cycle greenhouse gas emissions of corn ethanol. In: *American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) Annual International Meeting*. Pittsburgh, PA, USA, 20-23 June 2010.
- Kangi, A., and N. Heidari (2008).** Reservoir-induced seismicity in Karun III dam (SouthwesternIran). *Journal of Seismology*, **12**(4), pp. 519-527.
- Karakosta, C., H. Doukas, and J. Psarras (2010).** Technology transfer through climate change:

Setting a sustainable energy pattern. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(6), pp.1546-1557.

**Karekezi, S., and W. Kithyoma (2003).** Renewable Energy in Africa: Prospects and Limits. In: *Republic of Senegal and United Nations Workshop for African Energy Experts on Operationalizing the NEPAD Energy Initiative*, Dakar, Senegal, 2-4 June 2003, 30 pp. Available at: [www.un.org/esa/sustdev/sdissues/energy/op/nepadkarekezi](http://www.un.org/esa/sustdev/sdissues/energy/op/nepadkarekezi).

**Karekezi, S., J. Kimani, and O. Onguru (2008).** Energy access among the urban poor in Kenya. *Energy for Sustainable Development*, **12**(4), pp. 38-48.

**Karekezi, S., J. Kimani, O. Onguru, and W. Kithyoma (2009).** *Large Scale Hydropower, Renewable Energy and Adaptation to Climate Change. Climate Change and Energy Security in East and Horn of Africa.* Energy, Environment and Development Network for Africa, Nairobi, Kenya.

**Kargbo, D.M., R.G. Wilhelm, and D.J. Campbell (2010).** Natural gas plays in the MarcellusShale: challenges and potential opportunities. *Environmental Science & Technology*, **44**, pp.5679-5684.

**Kassenga, G.R. (2008).** The status and constraints of solar photovoltaic energy development inTanzania. *Energy Sources Part B-Economics Planning and Policy*, **3**(4), pp. 420-432.

**Kaufmann, R.F., G.G. Eadie, and C.R. Russell (1976).** Effects of uranium mining and milling on ground water in the Grants mineral belt, New Mexico. *Ground Water*, **14**, pp. 296-308.

**Kaufmann, R.K. (2004).** The mechanisms for autonomous energy efficiency increases: Aointegration analysis of the US energy/GDP ratio. *Energy Journal*, **25**(1), pp. 63-86.

**Kaundinya, D.P., P. Balachandra, and N.H. Ravindranath (2009).** Grid-connected versus stand alone energy systems for decentralized power – a review of literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**(8), pp. 2041-2050.

**Kelso, J.R.M., and G.S. Milburn (1979).** Entrainment and impingement of fish by power plants in the Great Lakes which use the once-through cooling process. *Journal of Great Lakes Research*, **5**, pp. 182-194.

**Kenny, J.F., N.L. Barber, S.S. Hutson, K.S. Linsey, J.K. Lovelace, and M.A. Maupin (2009).** *Estimated Use of Water in the United States in 2005.* Circular 1344, U.S. Geological Survey, Reston, VA, USA, 52 pp.

**Kesminas, V., and J. Olechnoviciene (2008).** Fish community changes in the cooler of theIgnalina nuclear power plant. *Ekologija*, **54**(2), pp. 124-131.

**Kim Oanh, N.T., and N.T. Dung (1999).** Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons and particulate matter from domestic combustion of selected fuels. *Environmental Science & Technology*, **33**(16), pp. 2703-2709.

**King, C.W., and M.E. Webber (2008).** Water intensity of transportation. *Environmental Science & Technology*, **42**, pp. 7866-7872.

**Kline, K.L., V.H. Dale, R. Efroymson, A. Goss Eng, and Z. Haq (2009).** *Land-Use Change and Bioenergy: Report from the 2009 Workshop.* ORNL/CBES-001, U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy and Oak Ridge National Laboratory, Center for Bioenergy Sustainability, Vonore, TN, USA.

**Klose, C. (2007).** Mine water discharge and flooding: A cause of severe earthquakes. *Mine Water and the Environment*, **26**(3), pp. 172-180.

**Klose, C.D. (2010a).** Evidence for surface loading as trigger mechanism of the 2008 Wenchuan

earthquake. *arXiv:1007.2155v2* [physics.geo-ph].

- Klose, C.D. (2010b).** Human-triggered earthquakes and their impacts on human security. In: *Achieving Environmental Security: Ecosystem Services and Human Welfare*. NATO Science for Peace and Security Series - E: Human and Societal Dynamics, Vol. 69. P.H. Liotta, W.G. Kepner, J.M. Lancaster, and D.A. Mouat (eds.), IOS Press, Amsterdam, The Netherlands, pp.13-19.
- Knapp, S., and P.H. Franses (2009).** Does ratification matter and do major conventions improve safety and decrease pollution in shipping? *Marine Policy*, **33**, pp. 826-846.
- Koch, D., T.C. Bond, D. Streets, N. Unger, and G.R. van der Werf (2007).** Global impacts of aerosols from particular source regions and sectors. *Journal of Geophysical Research*, **112**(D2), D02205.
- Koh, L.P., and J. Ghazoul (2008).** Biofuels, biodiversity, and people: Understanding the conflicts and finding opportunities. *Biological Conservation*, **141**, pp. 2450-2460.
- Kontovas, C.A., H.N. Psaraftis, and N.P. Ventikos (2010).** An empirical analysis of IOPCF oil spill cost data. *Marine Pollution Bulletin*, **60**, pp. 1455-1466.
- Kowalski, K., S. Stagl, R. Madlener, and I. Omann (2009).** Sustainable energy futures: Methodological challenges in combining scenarios and participatory multi-criteria analysis. *European Journal of Operational Research*, **197**(3), pp. 1063-1074.
- Kramer, W.H. (1982).** Ground-water pollution from gasoline. *Ground Water Monitoring & Remediation*, **2**, pp. 18-22.
- Krausmann, F., H. Schandl, and R.P. Sieferle (2008).** Socio-ecological regime transitions in Austria and the United Kingdom. *Ecological Economics*, **65**(1), pp. 187-201.
- Krewitt, W. (2002).** External cost of energy – do the answers match the questions? Looking back at 10 years of ExternE. *Energy Policy*, **30**, pp. 839-848.
- Krey, V., and L. Clarke (2011).** The role of renewable energy in climate change mitigation: a synthesis of recent scenarios. *Climate Policy*, in press.
- Kristof, K., and P. Hennicke (2010).** *Materialeffizienz und Ressourcenschonung*. Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy, Wuppertal, Germany.
- Kruyt, B., D.P. van Vuuren, H.J.M. de Vries, and H. Groenenberg (2009).** Indicators for energy security. *Energy Policy*, **37**(6), pp. 2166-2181.
- Kubiszewski, I., C.J. Cleveland, and P.K. Endres (2010).** Meta-analysis of net energy return for wind power systems. *Renewable Energy*, **35**(1), pp. 218-225.
- Kuik, O.J. (2003).** Climate change policies, energy security and carbon dependency. Trade-offs for the European Union in the longer term. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, **3**, pp. 221-242.
- Kumar, P., R. Britter, and N. Gupta (2009).** Hydrogen fuel: Opportunities and barriers. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, **6**(2), 021009, doi:10.1115/1.3005384.
- Lacher, W., and D. Kumetat (2010).** The security of energy infrastructure and supply in North Africa: Hydrocarbons and renewable energies in comparative perspective. *Energy Policy*, doi:10.1016/j.enpol.2010.10.026.
- Lack, D., B. Lerner, C. Granier, T. Baynard, E. Lovejoy, P. Massoli, A.R. Ravishankara, and E. Williams (2008).** Light absorbing carbon emissions from commercial shipping. *Geophysical Research Letters*, **35**(13), L13815.
- Ladenburg, J. (2010).** Attitudes towards offshore wind farms – The role of beach visits on attitude

- and demographic and attitude relations. *Energy Policy*, **38**(3), pp. 1297-1304.
- Lall, S. (2002)**. Linking FDI and technology development for capacity building and strategic competitiveness. *Transnational Corporations*, **11**(3), pp. 39-88.
- Langhamer, O., K. Haikonen, and J. Sundberg (2010)**. Wave power – Sustainable energy or environmentally costly? A review with special emphasis on linear wave energy converters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, pp. 1329-1335.
- Larsen, H., and L. Sønderberg Petersen (2009)**. *Risø Energy Report 8. The intelligent energy system infrastructure for the future*. Risø-R-1695(EN), Risø National Laboratory for Sustainable Energy, Technical University of Denmark, Roskilde, Denmark.
- Larson, E.D., and H. Yang (2004)**. Dimethyl ether (DME) as a household cooking fuel in China. *Energy for Sustainable Development*, **8**(3), pp. 115-126.
- Larson, E.D., G. Fiorese, G.J. Liu, R.H. Williams, T.G. Kreutz, and S. Consonni (2010)**. Co-production of decarbonized synfuels and electricity from coal plus biomass with CO<sub>2</sub> capture and storage: an Illinois case study. *Energy & Environmental Science*, **3**(1), pp. 28-42.
- Larssen, T., E. Lydersen, D. Tang, Y. He, J. Gao, H. Liu, L. Duan, H.M. Seip, R.D. Vogt, J. Mulder, M. Shao, Y. Wang, H. Shang, X. Zhang, S. Solberg, W. Aas, T. Okland, O. Eilertsen, V. Angell, Q. Li, D. Zhao, R. Xiang, J. Xiao, and J. Luo (2006)**. Acid rain in China. *Environmental Science & Technology*, **40**, pp. 418-425.
- Lau, W.K.M., M.-K. Kim, K.-M. Kim, and W.-S. Lee (2010)**. Enhanced surface warming and accelerated snow melt in the Himalayas and Tibetan Plateau induced by absorbing aerosols. *Environmental Research Letters*, **5**(2), pp. 025204.
- Lawn, P.A. (2003)**. A theoretical foundation to support the Index of Sustainable Economic Welfare (ISEW), Genuine Progress Indicator (GPI), and other related indexes. *Ecological Economics*, **44**(1), pp. 105-118.
- Le Coq, C., and E. Paltseva (2009)**. Measuring the security of external energy supply in the European Union. *Energy Policy*, **37**, pp. 4474-4481.
- Le Quere, C., M.R. Raupach, J.G. Canadell, G. Marland, L. Bopp, P. Ciais, T.J. Conway, S.C. Doney, R.A. Feely, P. Foster, P. Friedlingstein, K. Gurney, R.A. Houghton, J.I. House, C. Huntingford, P.E. Levy, M.R. Lomas, J. Majkut, N. Metzl, J.P. Ometto, G.P. Peters, I.C. Prentice, J.T. Randerson, S.W. Running, J.L. Sarmiento, U. Schuster, S. Sitch, T. Takahashi, N. Viovy, G.R. van der Werf, and F.I. Woodward (2009)**. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nature Geoscience*, **2**(12), pp. 831-836.
- Leach, G. (1992)**. The energy transition. *Energy Policy*, **20**(2), pp. 116-123.
- LeCornu, J. (ed.) (1998)**. *Dams and Water Management*. Report of the Secretary General, International Commission on Large Dams to the *Conference Internationale Eau et Developpement Durable*, Paris, France, 19-21 March 1998.
- Lee, C.C., and C.P. Chang (2008)**. Energy consumption and economic growth in Asian economies: A more comprehensive analysis using panel data. *Resource and Energy Economics*, **30**(1), pp. 50-65.
- Lei, X. (2010)**. Possible roles of the Zipingpu Reservoir in triggering the 2008 Wenchuan earthquake. *Journal of Asian Earth Sciences*, **40**(4), pp. 844-854.
- Lele, S., and R.B. Norgaard (1996)**. Sustainability and the scientist's burden. *Conservation Biology*, **10**(2), pp. 354-365.
- Lenton, T.M., H. Held, E. Kriegler, J.W. Hall, W. Lucht, S. Rahmstorf, and H.J. Schellnhuber**

- (2008). Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **105**(6), pp. 1786-1793.
- Lenzen, M. (1999). Greenhouse gas analysis of solar-thermal electricity generation. *Solar Energy*, **65**(6), pp. 353-368.
- Lenzen, M. (2008). Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review. *Energy Conversion and Management*, **49**(8), pp. 2178-2199.
- Lenzen, M. (2009). Double-counting in life-cycle calculations. *Journal of Industrial Ecology*, **12**(4), pp. 583-599.
- Lenzen, M., and J. Munksgaard (2002). Energy and CO<sub>2</sub> analyses of wind turbines – review and applications. *Renewable Energy*, **26**(3), pp. 339-362.
- Lenzen, M., and U. Wachsmann (2004). Wind energy converters in Brazil and Germany: an example for geographical variability in LCA. *Applied Energy*, **77**, pp. 119-130.
- Lenzen, M., C. Dey, C. Hardy, and M. Bilek (2006). *Life-Cycle Energy Balance and Greenhouse Gas Emissions of Nuclear Energy in Australia*. ISA, University of Sydney, Sydney, Australia.
- Limmechokchai, B., and S. Chawana (2007). Sustainable energy development strategies in the rural Thailand: The case of the improved cooking stove and the small biogas digester. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **11**(5), pp. 818-837.
- Lindeijer, E. (2000). Review of land use impact methodologies. *Journal of Cleaner Production*, **8**(4), pp. 273-281.
- Litvine, D., and R. Wüstenhagen (2011). Helping “light green” consumers walk the talk: Results of a behavioural intervention survey in the Swiss electricity market. *Ecological Economics*, **70**(3), pp. 462-474.
- Liu, J.K., and Z.T. Yu (1992). Water quality changes and effects on fish populations in the Hanjiang River, China, following hydroelectric dam construction. *Regulated Rivers: Research & Management*, **7**, pp. 359-368.
- Lloyd, P.J.D., and E.M. Visagle (2007). A comparison of gel fuels with alternate cooking fuels. *Journal of Energy in Southern Africa*, **18**(3), pp. 26-31.
- Lovett, A.A., G.M. Sünnerberg, G.M. Richter, A.G. Dailey, A.B. Riche, and A. Karp (2009). Land use implications of increased biomass production identified by GIS-based suitability and yield mapping for *Miscanthus* in England. *BioEnergy Research*, **2**, pp. 17-28.
- Lubchenco, J., M. McNutt, B. Lehr, M. Sogge, M. Miller, S. Hammond, and W. Conner (2010). *BP Deepwater Horizon Oil Budget: What Happened to the Oil?* No publisher specified. Available at: [www.usgs.gov/foia/budget/08-03-2010...Oil%20Budget%20description%20FINAL.pdf](http://www.usgs.gov/foia/budget/08-03-2010...Oil%20Budget%20description%20FINAL.pdf).
- Luckow, P., M.A. Wise, J.J. Dooley, and S.H. Kim (2010). Large-scale utilization of biomass energy and carbon dioxide capture and storage in the transport and electricity sectors under stringent CO<sub>2</sub> concentration limit scenarios. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **4**(5), pp. 865-877.
- Lucon, O., and F. Rei (2006). *Identifying Complementary Measures to Ensure the Maximum Realisation of Benefits from the Liberalisation of EG&S. Case study: Brazil*. Working Paper No.2004-04, COM/ENV/TD(2003)116/FINAL, Organisation for Economic Co-operation and Development, Trade and Environment, Paris, France, 35 pp. Available at: [www.oecd.org/dataoecd/18/53/37325499.pdf](http://www.oecd.org/dataoecd/18/53/37325499.pdf).

- Lucon, O., S.T. Coelho, and J.O. Alvares (2005).** Bioethanol: the way forward. In: *International Symposium on Alcohol Fuels, ISAF XV*, University of California at Riverside, CA, USA, 26-28 September 2005.
- Luderer, G., V. Bosetti, J. Steckel, H. Waisman, N. Bauer, E. Decian, M. Leimbach, O. Sassi, and M. Tavoni (2009).** *The Economics of Decarbonization – Results from the RECIPE Model Intercomparison*. Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany.
- Lund, H. (2007).** Renewable energy strategies for sustainable development. *Energy*, **32**(6), pp. 912-919.
- Lund, H., P.A. Ostergaard, and I. Stadler (2011).** Towards 100% renewable energy systems. *Applied Energy*, **88**(2), pp. 419-421.
- Lustgarten, A. (2011).** Climate benefits of natural gas may be overstated. *Scientific American*, **26 January 2011**, Available at: [www.scientificamerican.com/article.cfm?id=climate-benefits-natural-gas-overstated](http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=climate-benefits-natural-gas-overstated).
- Macedo, I.C., and J.E.A. Seabra (2008).** Mitigation of GHG emissions using sugarcane bioethanol. In: *Sugarcane Ethanol: Contributions to Climate Change Mitigation and the Environment*. P. Zuurbier and J. van de Vooren (eds.), Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands, pp. 95-110 (ISBN: 978-90-8686-090-6).
- Mahapatra, S., H.N. Chanakya, and S. Dasappa (2009).** Evaluation of various energy devices for domestic lighting in India: Technology, economics and CO<sub>2</sub> emissions. *Energy for Sustainable Development*, **13**(4), pp. 271-279.
- Mainali, B., and S. Silveira (2011).** Financing off-grid rural electrification: Country case Nepal. *Energy*, **36**(4), pp. 2194-2201.
- Majer, E.L., R. Baria, M. Stark, S. Oates, J. Bommer, B. Smith, and H. Asanumag (2007).** Induced seismicity associated with Enhanced Geothermal Systems. *Geothermics*, **36**, pp. 185-222.
- Malesios, C., and G. Arabatzis (2010).** Small hydropower stations in Greece: The local people's attitudes in a mountainous prefecture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(9), pp. 2492-2510.
- Marcotullio, P.J., and N.B. Schulz (2007).** Comparison of energy transitions in the United States and developing and industrializing economies. *World Development*, **35**(10), pp. 1650-1683.
- Marcu, A. (2009).** Sectoral approaches in greenhouse gas markets: A viable proposition? In: *NAMAs and the Carbon Market. Nationally Appropriate Mitigation Actions of Developing Countries*. UNEP Risø Centre, Roskilde, Denmark, pp. 97-111.
- Markandya, A., S. Pedroso-Galinato, and D. Streimikiene (2006).** Energy intensity in transition economies: Is there convergence towards the EU average? *Energy Economics*, **28**(1), pp. 121-145.
- Martinez, D.M., and B.W. Ebenhack (2008).** Understanding the role of energy consumption in human development through the use of saturation phenomena. *Energy Policy*, **36**(4), pp. 1430-1435.
- Maruyama, Y., M. Nishikido, and T. Iida (2007).** The rise of community wind power in Japan: Enhanced acceptance through social innovation. *Energy Policy*, **35**(5), pp. 2761-2769.
- Mathews, J.A. (2008).** How carbon credits could drive the emergence of renewable energies. *Energy Policy*, **36**(10), pp. 3633-3639.
- Mattoo, A., A. Subramanian, D. van der Mensbrugghe, and J. He (2009).** *Can Global De-*

*Carbonization Inhibit Developing Country Industrialization?* Center for Global Development, Washington, DC, USA, 39 pp. Available at: [www.cgdev.org/content/publications/detail/1423203](http://www.cgdev.org/content/publications/detail/1423203).

- McCarl, B.A., and U.A. Schneider (2003).** Greenhouse gas mitigation in U.S. agriculture and forestry. *Science*, **294**(5551), pp. 2481-2482.
- McGowan, F., and R. Sauter (2005).** *Public Opinion on Energy Research: A Desk Study for the Research Councils*. Sussex Energy Group, Science and Technology Policy Research, University of Sussex, Brighton, UK.
- McLaughlin, S., and M.E. Walsh (1998).** Evaluating environmental consequences of producing herbaceous crops for bioenergy. *Biomass and Bioenergy*, **14**, pp. 317-324.
- McNally, A., D. Magee, and A.T. Wolf (2009).** Hydropower and sustainability: Resilience and vulnerability in China's powersheds. *Journal of Environmental Management*, **90**, pp. 286-293.
- Meadows, D.H. (1998).** *Indicators and Information Systems for Sustainable Development*. A Report to the Balaton Group, The Sustainability Institute, Hartland, VT, USA.
- Mehta, S., and C. Shahpar (2004).** The health benefits of interventions to reduce indoor air pollution from solid fuel use: A cost-effectiveness analysis. *Energy for Sustainable Development*, **8**(3), pp. 53-59.
- Melillo, J., J.M. Reilly, D.W. Kicklighter, A.C. Gurgel, T.W. Cronin, S. Paltsev, B.S. Felzer, X. Wang, A.P. Sokolov, and C.A. Schlosser (2009).** Indirect emissions from biofuels: How important? *Science*, **326**(5958), pp. 1397-1399.
- Meshakti, N. (2007).** The safety and reliability of complex energy processing systems. *Energy Sources Part B - Economics Planning and Policy*, **2**(2), pp. 141-154.
- Michalena, E., J. Hills, and J.-P. Amat (2009).** Developing sustainable tourism, using a multicriteria analysis on renewable energy in Mediterranean Islands. *Energy for Sustainable Development*, **13**(2), pp. 129-136.
- Miller, B.A., V. Alavian, M.D. Bender, D.J. Benton, J.P. Ostrowski, J.A. Parsly, and M.C. Shiao (1992).** Integrated assessment of temperature change impacts on the TVA reservoir and power supply systems. In: *Hydraulic Engineering: Saving a Threatened Resource – In Search of Solutions: Proceedings of the Hydraulic Engineering sessions at Water Forum '92*, Baltimore, MD, USA, 2-6 August 1992, pp. 563-568.
- Miller, S.A. (2010).** Minimizing land use and nitrogen intensity of bioenergy. *Environmental Science & Technology*, **44**(10), pp. 3932-3939.
- Mirza, U.K., N. Ahmad, K. Harijan, and T. Majeed (2009).** Identifying and addressing barriers to renewable energy development in Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**(4), pp. 927-931.
- Mishra, U.C. (2004).** Environmental impact of coal industry and thermal power plants in India. *Journal of Environmental Radioactivity*, **72**(1-2), pp. 35-40.
- Modi, V., S. McDade, D. Lallement, and J. Saghir (2005).** *Energy Services for the Millennium Development Goals*. Energy Sector Management Assistance Programme, United Nations Development Programme, UN Millennium Project and World Bank, New York, NY, USA.
- Molina, M.J., and L.T. Molina (2004).** Megacities and atmospheric pollution. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **54**(6), pp. 644.
- Mondal, M.A.H., L.M. Kamp, and N.I. Pachova (2010).** Drivers, barriers, and strategies for implementation of renewable energy technologies in rural areas in Bangladesh – An innovation

system analysis. *Energy Policy*, **38**(8), pp. 4626-4634.

- Monroy, C.R., and A.S.S. Hernandez (2008).** Strengthening financial innovation energy supply projects for rural communities in developing countries. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, **15**(5), pp. 471-483.
- Moore, D., J. Dore, and D. Gyawali (2010).** The World Commission on Dams + 10: Revisiting the large dam controversy. *Water Alternatives*, **3**(2), pp. 3-13.
- Moreno, A., F. Fontana, and S. Grande (2007).** ENEA e-learn platform for development and sustainability with international renewable energies network. *Data Science Journal*, **6**(Supplement 9), pp. S92-S98.
- Moss, R.H., J.A. Edmonds, K.A. Hibbard, M.R. Manning, and S.K. Rose (2010).** The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, **463**, pp. 747-756.
- Murphy, D., A. Cosbey, and J. Drexhage (2008).** Market mechanisms for sustainable development in a post-2012 climate regime: Implications for the Development Dividend. In: *A Reformed CDM – Including New Mechanisms for Sustainable Development*. K.H. Olsen and J. Fenhann (eds.), UNEP Risø Centre, Roskilde, Denmark, pp 9-23. Available at: [www.cd4cdm.org/Publications/Perspectives/ReformedCDM.pdf](http://www.cd4cdm.org/Publications/Perspectives/ReformedCDM.pdf) .
- Nandy, S., S.P.S. Kushwaha, and S. Mukhopadhyay (2007).** Monitoring the Chilla-Motichur wildlife corridor using geospatial tools. *Journal for Nature Conservation*, **15**(4), pp. 237-244.
- Nannen, V., and J.C.J.M. van den Bergh (2010).** Policy instruments for evolution of bounded rationality: Application to climate-energy problems. *Technological Forecasting and Social Change*, **77**(1), pp. 76-93.
- Nassar, A., L. Harfurch, M.M.R. Moreira, L.C. Bachion, L.B. Antoniazzi, and G. Sparovek (2009).** *Impacts on Land Use and GHG Emissions from a Shock on Brazilian Sugarcane Ethanol Exports to the United States using the Brazilian Land Use Model (BLUM)*. The Brazilian Institute for International Negotiations, Sao Paulo, Brazil.
- Neely, J.G., A.E. Magit, J.T. Rich, C.C.J. Voelker, E.W. Wang, R.C. Paniello, B. Nussenbaum, and J.P. Bradley (2010).** A practical guide to understanding systematic reviews and meta-analyses. *Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, **142**, pp. 6-14.
- NETL (2008).** *Development of Baseline Data and Analysis of Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Petroleum-Based Fuels*. DOE/NETL-2009/1362, National Energy Technology Laboratory (NETL), Pittsburgh, PA, USA.
- NETL (2009).** *An Evaluation of the Extraction, Transport and Refining of Imported Crude Oils and the Impact on Life Cycle Greenhouse Gas Emissions*. DOE/NETL-2009/1362, National Energy Technology Laboratory (NETL), Pittsburgh, PA, USA.
- Neudoerffer, R.C., P. Malhotra, and P.V. Ramana (2001).** Participatory rural energy planning in India – a policy context. *Energy Policy*, **29**(5), pp. 371-381.
- Neumayer, E. (2003).** *Weak versus Strong Sustainability: Exploring the Limits of Two Opposing Paradigms*. 2nd ed. Edward Elgar, Northampton MA.
- Nieuwenhout, F.D.J., A. van Dijk, V.A.P. van Dijk, D. Hirsch, P.E. Lasschuit, G. van Roekel, H. Arriaza, M. Hankins, B.D. Sharma, and H. Wade (2000).** *Monitoring and Evaluation of Solar Home Systems. Experiences with Applications of Solar PV for Households in Developing Countries*. Report ECN-C--00-089, Netherlands Energy Research Foundation, Department of Science, Technology and Society of Utrecht University, Utrecht, The Netherlands.
- Nikou, S.N. (2010).** *Iran's Subsidies Conundrum*. USIP PeaceBrief 49. United States Institute of Peace, Washington, DC, USA. Available at: [www.usip.org/files/resources/pb49\\_0.pdf](http://www.usip.org/files/resources/pb49_0.pdf).

- Niven, R.K. (2005).** Ethanol in gasoline: Environmental impacts and sustainability review article. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **9**(6), pp. 535-555.
- Norgaard, R. (1994).** *Development Betrayed: The End of Progress and a Co-evolutionary Revisioning of the Future*. Routledge, London, UK.
- Notter, D., M. Gauch, R. Widmer, P. Wager, A. Stamp, R. Zah, and H.J. Althaus (2010).** Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles. *Environmental Science & Technology*, **44**(17), pp. 6550-6556.
- Nouni, M.R., S.C. Mullick, and T.C. Kandpai (2008).** Providing electricity access to remote areas in India: Niche areas for decentralized electricity supply. *Renewable Energy*, **34**(2), pp. 430-434.
- NRC (2000).** *Our Common Journey: A Transition toward Sustainability*. National Research Council (NRC), National Academies Press, Washington, DC, USA.
- NRC (2010).** *Hidden Costs of Energy. Unpriced Consequences of Energy Production and Use*. National Research Council (NRC), National Academies Press, Washington, DC, USA.
- Nussbaumer, P. (2009).** On the contribution of labelled Certified Emission Reductions to sustainable development: A multi-criteria evaluation of CDM projects. *Energy Policy*, **37**(1), pp.91-101.
- NVE (2009).** *Energy in Norway*. Norwegian Water Resource and Energy Directorate (NVE), Oslo, Norway. Available at: [www.nve.no/en/Energy/Energy-in-Norway---a-brief-annual-presentation/](http://www.nve.no/en/Energy/Energy-in-Norway---a-brief-annual-presentation/).
- O'Neill, B., and N. Nakicenovic (2008).** Learning from global emissions scenarios. *Environmental Research Letters*, **3**(045014), pp. 1-9.
- OECD (2002).** *Governance for Sustainable Development – Five OECD Case Studies*. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris, France.
- OECD (2006).** *Environmental and Energy Products: The Benefits of Liberalising Trade*. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris, France (ISBN-92-64-02481-6).
- OECD/NEA (2002).** *Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles – A Comparative Study*. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) and Nuclear Energy Agency (NEA), Paris, France.
- Offer, G., N. Meah, and A. Coke (2011).** *Enabling a Transition to Low Carbon Economies in Developing Countries. Case Study: Bangladesh*. Imperial College, London, UK, 21 pp.
- Oikonomou, E.K., V. Kiliass, A. Goumas, A. Rigopoulos, E. Karakatsani, M. Damasiotis, D. Papastefanakis, and N. Marini (2009).** Renewable energy sources (RES) projects and their barriers on a regional scale: The case study of wind parks in the Dodecanese islands, Greece. *Energy Policy*, **37**(11), pp. 4874-4883.
- Olsen, K.H. (2007).** The Clean Development Mechanism's contribution to sustainable development: a review of the literature. *Climatic Change*, **84**(1), pp. 59-73.
- Olsen, K.H., and J. Fenhann (2008a).** *A Reformed CDM Including New Mechanisms for Sustainable Development*. UNEP Risø Centre, Roskilde, Denmark, 184 pp.
- Olsen, K.H., and J. Fenhann (2008b).** Sustainable development benefits of clean development mechanism projects: A new methodology for sustainability assessment based on text analysis of the project design documents submitted for validation. *Energy Policy*, **36**(8), pp. 2819-2830.
- Ölz, S., and M. Beerepoot (2010).** *Deploying Renewables in Southeast Asia. Trends and potentials*. Organisation for Economic Co-operation and Development and International Energy Agency, Paris, France.

- Omer, A.M. (2003).** Implications of renewable energy for women in Sudan: Challenges and opportunities. *International Journal of Sustainable Development*, **6**(2), pp. 246-259.
- Onat, N., and H. Bayar (2010).** The sustainability indicators of power production systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(9), pp. 3108-3115.
- Ostergaard, P.A., and H. Lund (2010).** A renewable energy system in Frederikshavn using low-temperature geothermal energy for district heating. *Applied Energy*, **88**(2), pp. 479-487.
- Ott, K. (2003).** The case for strong sustainability. In: *Greifswald's Environmental Ethics*. Steinbecker Verlag Ulrich Rose, Greifswald, Germany, pp. 59-64.
- Owen, A.D. (2006).** Renewable energy: Externality costs as market barriers. *Energy Policy*, **34**(5), pp. 632-642.
- Paine, L. (1996).** Some ecological and socio-economic considerations for biomass energy crop production. *Biomass and Bioenergy*, **10**, pp. 231-242.
- Painuly, J.P. (2001).** Barriers to renewable energy penetration; a framework for analysis. *Renewable Energy*, **24**(1), pp. 73-89.
- Palanivelraja, S., and K.I. Manirathinem (2010).** Studies on indoor air quality in a rural sustainable home. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, **6**(2), pp. 70-74.
- Pang, X., Y. Mu, J. Yuan, and H. He (2008).** Carbonyls emission from ethanol-blended gasoline and biodiesel-ethanol-diesel used in engines. *Atmospheric Environment*, **42**(5), pp. 1349-1358.
- Parfitt, B. (2010).** *Fracture Lines: Will Canada's Water be Protected in the Rush to Develop Shale Gas*. Munk School of Global Affairs, University of Toronto, Toronto, Canada.
- Park, C., Y. Choi, C. Kim, S. Oh, G. Lim, and Y. Moriyoshi (2010).** Performance and exhaust emission characteristics of a spark ignition engine using ethanol and ethanol-reformed gas. *Fuel*, **89**(8), pp. 2118-2125.
- Parson, E., V. Burkett, K. Fisher-Vanden, D. Keith, L. Mearns, H. Pitcher, C. Rosenzweig, and M. Webster (2007).** *Global Change Scenarios: Their Development and Use*. Department of Energy, Office of Biological and Environmental Research, Washington, DC, USA, 106 pp.
- Paul, S., and R.N. Bhattacharya (2004).** Causality between energy consumption and economic growth in India: a note on conflicting results. *Energy Economics*, **26**(6), pp. 977-983.
- Paul, W., R.S. Kirk, J. Michael, and H. Andrew (2007).** A global perspective on energy: health effects and injustices. *Lancet*, **370**(9591), pp. 965-978.
- Paulsson, E. (2009).** A review of the CDM literature: from fine-tuning to critical scrutiny? *International Environmental Agreements-Politics Law and Economics*, **9**(1), pp. 63-80.
- Pearce, D., K. Hamilton, and G. Atkinson (1996).** Measuring sustainable development: progress on indicators. *Environment and Development Economics*, **1**, pp. 85-101.
- Pehnt, M., M. Oeser, and D.J. Swider (2008).** Consequential environmental system analysis of expected offshore wind electricity production in Germany. *Energy*, **33**(5), pp. 747-759.
- Pelc, R., and R. Fujita (2002).** Renewable energy from the ocean. *Marine Policy*, **26**, pp. 471-479.
- Perkins, R. (2003).** Environmental leapfrogging in developing countries: A critical assessment and reconstruction. *Natural Resources Forum*, **27**(3), pp. 177-188.
- Peters, G.P., and E.G., Hertwich (2008).** CO<sub>2</sub> embodied in international trade with implications for global climate policy. *Environmental Science & Technology*, **42**(5), pp. 1401-1407.
- Peters, J., M. Harsdorff, and F. Ziegler (2009).** Rural electrification, Accelerating impacts with

- complementary services. *Energy for Sustainable Development*, **13**(1), pp. 38-42.
- Petersen, L.K., and A.H. Andersen (2009).** *Socio-cultural Barriers to the Development of a Sustainable Energy System – The Case of Hydrogen*. 248, National Environmental Research Institute, Aarhus, Denmark.
- Pezzey, J. (1992).** Sustainability – An interdisciplinary guide. *Environmental Values*, **1**, pp. 321-362.
- Pischinger, S., M. Müther, F. Fricke, and A. Kolbeck (2008).** From fuel to wheel: How modern fuels behave in combustion engines. *Erdoel Erdgas Kohle*, **124**(2), pp. 58-63.
- Pohekar, S.D., and M. Ramachandran (2006).** Multi-criteria evaluation of cooking devices with special reference to utility of parabolic solar cooker (PSC) in India. *Energy*, **31**(8-9), pp. 1215-1227.
- Pokhrel, A.K., K.R. Smith, A. Khalakdina, A. Deuja, and M.N. Bates (2005).** Case control study of indoor cooking smoke exposure and cataract in Nepal and India. *International Journal of Epidemiology*, **34**(3), pp. 702-708.
- Pollin, R., H. Garrett-Peltier, J. Heintz, and H. Scharber (2008).** *Green Recovery – A Program to Create Good Jobs and Start Building a Low-Carbon Economy*. Centre for American Progress and Political Economy Research Institute (PERI), University of Massachusetts, Washington, DC and Amherst, MA, USA.
- Poornima, E., M. Rajadurai, T. Rao, B. Anupkumar, R. Rajamohan, S. Narasimhan, V. Rao, and V. Venugopalan (2005).** Impact of thermal discharge from a tropical coastal power plant on phytoplankton. *Journal of Thermal Biology*, **30**, pp. 307-316.
- Poumadère, M., C. Mays, S. Le Mer, and R. Blong (2005).** The 2003 heat wave in France: dangerous climate change here and now. *Risk Analysis*, **25**(6), pp. 1483-94.
- Rabl, A., and J.V. Spadaro (1999).** Damages and costs of air pollution: an analysis of uncertainties. *Environment International*, **25**(1), pp. 29-46.
- Rajagopal, D., G. Hochman, and D. Zilberman (2010).** Indirect fuel use change (IFUC) and the lifecycle environmental impact of biofuel policies. *Energy Policy*, **39**(1), pp. 228-233
- Ramanathan, V., and G. Carmichael (2008).** Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature Geoscience*, **1**, pp. 221-228.
- Ramanathan, V., and Y. Feng (2008).** On avoiding dangerous anthropogenic interference with the climate system: Formidable challenges ahead. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **105**(38), pp. 14245-14250.
- Ramanathan, V., C. Chung, D. Kim, T. Bettge, L. Buja, J.T. Kiehl, W.M. Washington, Q. Fu, D.R. Sikka, and M. Wild (2005).** Atmospheric brown clouds: Impacts on South Asian climate and hydrological cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **102**(15), pp. 5326-5333.
- Ramanathan, V., M.V. Ramana, G. Roberts, D. Kim, C. Corrigan, C. Chung, and D. Winker (2007).** Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption. *Nature*, **448**(7153), pp. 575-578.
- Rao, K.U., and V.V.N. Kishore (2010).** A review of technology diffusion models with special reference to renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(3), pp. 1070-1078.
- Ravindranath, N.H., and R. Balachandra (2009).** Sustainable bioenergy for India: Technical, economic and policy analysis. *Energy*, **34**(8), pp. 1003-1013.

- Rebitzer, G., T. Ekvall, R. Frischknecht, D. Hunkeler, G. Norris, T. Rydberg, W.P. Schmidt, S. Suh, B.P. Weidema, and D.W. Pennington (2004).** Review: Life cycle assessment. Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis and applications. *Environment International*, **30**, pp. 701-720.
- Reddy, A.K.N., W. Annecke, K. Blok, D. Bloom, B. Boardman, A. Eberhard, J. Ramakrishna, Q. Wodon, and A.K.M. Zaidi (2000).** Energy and social issues. In: *World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability*. United Nations Development Programme, UN Department of Economic and Social Affairs and the World Energy Council, New York, NY, USA and London, UK, pp 40-60. Available at: [www.undp.org/energy/activities/wea/drafts-frame.html](http://www.undp.org/energy/activities/wea/drafts-frame.html).
- Reddy, S., and J.P. Painuly (2004).** Diffusion of renewable energy technologies – barriers and stakeholders’ perspectives. *Renewable Energy*, **29**(9), pp. 1431-1447.
- Reiche, D. (2010).** Renewable energy policies in the Gulf countries: A case study of the carbon-neutral “Masdar City” in Abu Dhabi. *Energy Policy*, **38**(1), pp. 378-382.
- REN21 (2009).** *Renewables Global Status Report: 2009 Update*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century Secretariat, Paris, France, 42 pp.
- REN21 (2010).** *Renewables 2010: Global Status Report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century Secretariat, Paris, France, 80 pp.
- Reuscher, G., C. Ploetz, V. Grimm, and A. Zweck (2008).** *Innovationen gegen Rohstoffknappheit. Zukünftige Technologien*. Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf, Germany.
- Reynolds, C.C.O., and M. Kandlikar (2008).** Climate impacts of air quality policy: Switching to a natural gas-fueled public transportation system in New Delhi. *Environmental Science & Technology*, **42**(16), pp. 5860-5865.
- Reynolds, J.Z. (1980).** Power plant cooling systems: policy alternatives. *Science*, **207**, pp. 367-372.
- Richter, B.D., S. Postel, C. Revenga, T. Scudder, B. Lehner, A. Churchill, and M. Chow (2010).** Lost in development’s shadow: The downstream human consequences of dams. *Water Alternatives*, **3**(2), pp. 14-42.
- Riffell, S., J. Verschuyl, D. Miller, and T.B. Wigley (2011).** Biofuel harvests, coarse woody debris, and biodiversity – A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, **261**(4), pp. 878-887.
- Rijsberman, F. (2006).** Water scarcity: Fact or fiction? *Agricultural Water Management*, **80**(1-3), pp. 5-22.
- Roayaei, E., and K. Taheri (2009).** Test run evaluation of a blend of fuel-grade ethanol and regular commercial gasoline: Its effect on engine efficiency and exhaust gas composition. *Clean Technologies and Environmental Policy*, **11**(4), pp. 385-389.
- Rogers, J.C., E.A. Simmons, I. Convery, and A. Weatherall (2008).** Public perceptions of opportunities for community-based renewable energy projects. *Energy Policy*, **36**(11), pp. 4217-4226.
- Rogner, H.H. (1997).** An assessment of world hydrocarbon resources. *Annual Review of Energy and the Environment*, **22**, pp. 217-262.
- Rogowska, J., and J. Namiesnik (2010).** Environmental implications of oil spills from shipping accidents. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, **206**, pp. 95-114.
- Roques, F., C. Hiroux, and M. Saguan (2010).** Optimal wind power deployment in Europe – A portfolio approach. *Energy Policy*, **38**(7), pp. 3245-3256.

- Rosenberg, D.M., F. Berkes, R.A. Bodaly, R.E. Hecky, C.A. Kelly, and J.W.M. Rudd (1997).** Large scale impacts of hydroelectric development. *Environmental Reviews*, **5**, pp. 27-54.
- Rovere, E.L.L., J.B. Soares, L.B. Oliveira, and T. Lauria (2010).** Sustainable expansion of electricity sector: Sustainability indicators as an instrument to support decision making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, pp. 422-429.
- Roy, J. (2000).** The rebound effect: some empirical evidence from India. *Energy Policy*, **28**(6-7), pp. 433-438.
- Runge, C.F., and B. Senauer (2007).** Biofuel: corn isn't the king of this growing domain. *Nature*, **449**(7163), pp. 637.
- Rylands, A.B., and K. Brandon (2005).** Brazilian protected area. *Conservation Biology*, **19**(3), pp.612-618.
- Sala, O.E., D. Sax, and H. Leslie (2009).** Biodiversity consequences of biofuel production. In: *Biofuels: Environmental Consequences and Interactions with Changing Land Use. Proceedings of the Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE) International Biofuels Project Rapid Assessment*. R.W. Howarth and S. Bringezu (eds.), Gummingsbach, Germany, 22-25 September 2008, pp. 127-137.
- SARI (2010).** *Unlocking South Africa's Green Growth Potential. The South African Renewables Initiative*. South African Renewables Initiative (SARI), Department of Trade and Industry, Department for Public Enterprises, Pretoria, South Africa.
- Sastresa, E.L., A.A. Usón, A.Z. Bribián, and S. Scarpellin (2009).** Local impact of renewables on employment: assessment methodology and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(2), pp. 679-690.
- Sathaye, J., A. Najam, C. Cocklin, T. Heller, F. Lecocq, J. Llanes-Regueiro, J. Pan, G.Petschel-Held, S. Rayner, J. Robinson, R. Schaeffer, Y. Sokona, R. Swart, H. Winkler, S. Burch, J. Corfee Morlot, R. Dave, L. Pinter, and A. Wyatt (2007).** Sustainable development and mitigation. In: *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007*. B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, and L.A. Meyer (eds.), Cambridge University Press, pp.691-743.
- Sauter, R., and J. Watson (2008).** *Technology Leapfrogging: A Review of the Evidence*. A report for DFID, Sussex Energy Group, Science and Technology Policy Research, University of Sussex, Brighton, UK.
- Saygin, H., and F. Cetin (2010).** New energy paradigm and renewable energy: Turkey's vision. *Insight Turkey*, **12**(3), pp. 107-128.
- Schafer, A. (2005).** Structural change in energy use. *Energy Policy*, **33**(4), pp. 429-437.
- Schifter, I., L. Díaz, M. Vera, E. Guzmán, and E. López-Salinas (2004).** Fuel formulation and vehicle exhaust emissions in Mexico. *Fuel*, **83**(14-15Spec), pp. 2065-2074.
- Schifter, I., L. Díaz, R. Rodríguez, and L. Salazar (2011).** Assessment of Mexico's program to use ethanol as transportation fuel: impact of 6% ethanol-blended fuel on emissions of light-duty gasoline vehicles. *Environmental Monitoring and Assessment*, **173**(1-4), pp. 343-360.
- Schlamadinger, B. (1997).** Forests for carbon sequestration or fossil fuel substitution? A sensitivity analysis. *Biomass and Bioenergy*, **13**(6), pp. 389-397.
- Schleisner, L. (2000).** Comparison of methodologies for externality assessment. *Energy Policy*, **28**, pp. 1127-1136.

- Schmidt, J.H. (2008).** Development of LCIA characterisation factors for land use impacts on biodiversity. *Journal of Cleaner Production*, **16**(18), pp. 1929-1942.
- Schneider, L. (2009).** A Clean Development Mechanism with global atmospheric benefits for a post-2012 climate regime. *International Environmental Agreements-Politics Law and Economics*, **9**(2), pp. 95-111.
- Scholz, R. (2007).** Assessment of land use impacts on the natural environment. Part 1: An analytical framework for pure land occupation and land use change. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **12**(1), pp. 16-23.
- Schulz, U., O. Brauner, and H. Gruss (2009).** Animal diversity on short-rotation coppices – a review. *Landbauforschung vTI Agriculture and Forestry Research*, **3**, pp. 171-182.
- Schurr, S.H. (1984).** Energy use, technological change, and productive efficiency – an economic-historical interpretation. *Annual Review of Energy*, **9**, pp. 409-425.
- Scott, M.J., J.A. Edmonds, N. Mahasenan, J. Roop, A.L. Brunello, and E.F. Haites (2004).** International emission trading and the cost of greenhouse gas emissions mitigation and sequestration. *Climatic Change*, **64**(3), pp. 257-287.
- Searchinger, T., R. Heimlich, R.A. Houghton, F. Dong, A. Elobeid, J. Fabiosa, S. Tokgoz, D. Hayes, and T.H. Yu (2008).** Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*, **319**(5867), pp. 1238-1240.
- Seljom, P., G. Simbolotti, and G. Tosato (2010).** *Unconventional Oil and Gas Production*. IEA Energy Technology Systems Analysis Program, Paris, France.
- Semere, T., and F.M. Slater (2007).** Ground flora, small mammal and bird species diversity in miscanthus (*Miscanthus×giganteus*) and reed canary-grass (*Phalaris arundinacea*) fields. *Biomass and Bioenergy*, **31**(1), pp. 20-29.
- Sen, S., and T. Babali (2007).** Security concerns in the Middle East for oil supply: Problems and solutions. *Energy Policy*, **35**(3), pp. 1517-1524.
- Shanthi, V., and N. Gajendran (2009).** The impact of water pollution on the socio-economic status of the stakeholders of Ennore Creek, Bay of Bengal (India): Part I. *Indian Journal of Science and Technology*, **2**(3), pp. 66-79.
- Sheehan, J., A. Aden, K. Paustian, K. Killian, J. Brenner, M. Walsh, and R. Nelson (2004).** Energy and environmental aspects of using corn stover for fuel ethanol. *Journal of Industrial Ecology*, **7**(3-4), pp. 117-146.
- Shen, Y., T. Oki, N. Utsumi, S. Kanae, and N. Hanasaki (2008).** Projection of future world water resources under SRES scenarios: water withdrawal. *Hydrological Sciences Journal*, **53**(1), pp. 11-33.
- Shields, M.A., D.K. Woolf, E.P.M. Grist, S.A. Kerr, A.C. Jackson, R.E. Harris, M.C. Bell, R. Beharie, A. Want, E. Osalusi, S.W. Gibb, and J. Side (2011).** Marine renewable energy: The ecological implications of altering the hydrodynamics of the marine environment. *Ocean & Coastal Management*, **54**, pp. 2-9.
- Shiklomanov, I.A. (2000).** Appraisal and assessment of world water resources. *Water International*, **25**(1), pp. 11-32.
- Shrestha, R.M., and S. Pradhan (2010).** Co-benefits of CO<sub>2</sub> emission reduction in a developing country. *Energy Policy* **38**, pp. 2586-2597.
- Shukla, P.R. (1995).** Greenhouse gas models and abatement costs for developing nations : A critical assessment. *Energy Policy*, **23**(8), pp. 677-687.

- Shukla, P.R., S. Dhar, and D. Mahapatra (2008).** Low-carbon society scenarios for India. *Climate Policy*, **8**, pp. S156-S176.
- Singh, A. (2009).** The sustainable development of Fiji's energy infrastructure: A status report. *Pacific Economic Bulletin*, **24**(2), pp. 141-154.
- Singh, R. (2007).** Advancing a "carrot and stick" framework for effective CARICOM environmental cooperation and governance. *Penn State Environmental Law Review*, **16**(1), pp.199-256.
- Singh, S., and A. Kumar (2011).** Development of water requirement factors for biomass conversion pathway. *Bioresource Technology*, **102**(2), pp. 1316-1328.
- Sjöberg, L. (2009).** Precautionary attitudes and the acceptance of a local nuclear waste repository. *Safety Science*, **47**, pp. 542-546.
- Skjold, D.O. (2009).** *Power for Generations: The Development of Statkraft and the Role of the State in Norwegian Electrification 1890–2009*. Universitetsforlaget, Oslo, Norway, 284 pp.
- Slaski, X., and M. Thurber (2009).** *Cookstoves and Obstacles to Technology Adoption by the Poor*. Program on Energy and Sustainable Development, Freeman Spogli Institute for International Studies, Stanford University, Stanford, CA, USA.
- Smil, V. (2000).** Energy in the twentieth century: Resources, conversions, costs, uses, and consequences. *Annual Review of Energy and the Environment*, **25**, pp. 21-51.
- Smith, K.R., and M. Ezzati (2005).** How environmental health risks change with development: The epidemiologic and environmental risk transitions revisited. *Annual Review of Environment and Resources*, **30**(1), pp. 291-333.
- Smith, K.R., and S. Mehta (2003).** The burden of disease from indoor air pollution in developing countries: comparison of estimates. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, **206**, pp. 279-289.
- Smith, K.R., J.M. Samet, I. Romieu, and N. Bruce (2000).** Indoor air pollution in developing countries and acute lower respiratory infections in children. *Thorax*, **55**(6), pp. 518-532.
- Smith, K.R., S. Mehta, and M. Maeusezahl-Feuz (2004).** Indoor air pollution from household use of solid fuels: comparative quantification of health risks. In: *Global And Regional Burden of Disease Attributable to Selected Major Risk Factors*. WHO, Geneva, Switzerland, pp. 1435-1493.
- Smith, K.R., K. Dutta, C. Chengappa, P.P.S. Gusain, O.M.a.V. Berrueta, R. Edwards, R. Bailis, and K.N. Shields (2007).** Monitoring and evaluation of improved biomass cookstove programs for indoor air quality and stove performance: conclusions from the Household Energy and Health Project. *Energy for Sustainable Development*, **11**(2), pp. 5-18.
- Sneddon, C., R.B. Howarth, and R.B. Norgaard (2006).** Sustainable development in a post-Brundtland world. *Ecological Economics*, **57**(2), pp. 253-268.
- Soimakallio, S., T. Mäkinen, T. Ekholm, K. Pahkala, H. Mikkola, and T. Paappanen (2009).** Greenhouse gas balances of transportation biofuels, electricity and heat generation in Finland – Dealing with the uncertainties. *Energy Policy*, **37**(1), pp. 90-90.
- Solow, R.M. (1974).** Intergenerational equity and exhaustible resources. *The Review of Economic Studies*, **41**, pp. 29-45.
- Sorrell, S., J. Speirs, R. Bentley, A. Brandt, and R. Miller (2009).** *Global Oil Depletion – An Assessment of the Evidence for a Near-Term Peak in Global Oil Production*. UK Energy Research Centre, London, UK.
- Sovacool, B.K. (2009).** The cultural barriers to renewable energy and energy efficiency in the United

- States. *Technology in Society*, **31**(4), pp. 365-373.
- Sovacool, B.K., and R.F. Hirsh (2009)**. Beyond batteries: An examination of the benefits and barriers to plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and a vehicle-to-grid (V2G) transition. *Energy Policy*, **37**(3), pp. 1095-1103.
- Steenblik, R. (2005)**. *Liberalisation of Trade in Renewable-Energy Products and Associated Goods: Charcoal, Solar Photovoltaic Systems and Wind Pumps and Turbines*. COM/ENV/TD(2005)23/FINAL, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, France.
- Steinberg, L.J., H. Sengul, and A.M. Cruz (2008)**. Natech risk and management: an assessment of the state of the art. *Natural Hazards*, **46**, pp. 143-152.
- Stern, D.I., 1993**: Energy and economic-growth in the USA – a multivariate approach. *Energy Economics*, **15**(2), pp. 137-150.
- Stern, N. (2007)**. *The Economics of Climate Change*. Cambridge University Press, 712 pp. Available at: [webarchive.nationalarchives.gov.uk/http://www.hm-treasury.gov.uk/sternreview\\_index.htm](http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/http://www.hm-treasury.gov.uk/sternreview_index.htm).
- Sternberg, R. (2008)**. Hydropower: Dimensions of social and environmental coexistence. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12**, pp. 1588-1621.
- Steurer, R., and A. Martinuzzi (2007)**. From environmental plans to sustainable development strategies. *European Environment*, **17**(3), pp. 147-151.
- Stiglitz, J. E., Sen, A. and J.-P. Fitoussi (2009)**. *Report by the Commission on the Measurement of Economic Performance and Social Progress*. No publisher specified. Available at: [www.stiglitz-sen-fitoussi.fr](http://www.stiglitz-sen-fitoussi.fr).
- Stone, K.C., P.G. Hunt, K.B. Cantrell, and K.S. Ro (2010)**. The potential impacts of biomass feedstock production on water resource availability. *Bioresource Technology*, **101**, pp. 2014-2025.
- Strand, J. (2009)**. *Revenue Management Effects Related to Financial Flows Generated by Climate Policy*. Policy Research Working Paper, World Bank, Washington, DC, USA, 37 pp.
- Suckale, J. (2009)**. Induced seismicity in hydrocarbon fields. *Advances in Geophysics*, **51**, pp. 55-106.
- Suh, S., M. Lenzen, G.J. Treloar, H. Hondo, A. Horvath, G. Huppes, O. Jolliet, U. Klann, W. Krewitt, Y. Moriguchi, J. Munksgaard, and G. Norris (2003)**. System boundary selection in life-cycle inventories using hybrid approaches. *Environmental Science & Technology*, **38**(3), pp. 657-664.
- Sundqvist, T. (2004)**. What causes the disparity of electricity externality estimates? *Energy Policy*, **32**, pp. 1753-1766.
- Sutter, C., and J.C. Parreño (2007)**. Does the current Clean Development Mechanism (CDM) deliver its sustainable development claim? An analysis of officially registered CDM projects. *Climatic Change*, **84**(1), pp. 75-90.
- Suwa, A. (2009)**. Soft energy paths in Japan: a backcasting approach to energy planning. *Climate Policy*, **9**, pp. 185-206.
- Suzuki, T., S. Kabuto, and O. Togawa (2008)**. Measurement of iodine-129 in seawater samples collected from the Japan Sea area using accelerator mass spectrometry: Contribution of nuclear fuel reprocessing plants. *Quaternary Geochronology*, **3**(3), pp. 268-275.
- Tamiotti, L., A. Olhoff, R. Teh, B. Simmons, V. Kulaçoğlu, and H. Abaza (2009)**. *Trade and*

*Climate Change*. A Report by the United Nations Environment Programme and the World Trade Organization, World Trade Organization, Geneva, Switzerland.

- Tarik-ul-Islam, M.D., and S. Ferdousi (2007)**. Renewable energy development – Challenges for Bangladesh. *Energy and Environment*, **18**(3-4), pp. 421-430.
- Tavoni, M., and R.S.J. Tol (2010)**. Counting only the hits? The risk of underestimating the costs of stringent climate policy. *Climatic Change*, **100**(3-4), pp. 769-778.
- Tawney, R., Z. Khan, and J. Zachary (2005)**. Economic and performance evaluation of heat sink options in combined cycle applications. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, **127**(2), pp. 397-403.
- Teipel, U. (2010)**. *Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen*. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, Germany.
- Thaulow, H., A. Tvede, T.S. Pedersen, and K. Seelos (2010)**. Managing catchments for hydropower generation. In: *Handbook of Catchment Management*. R. Ferrier and A. Jenkins (eds.), Wiley-Blackwell, Oxford, UK, pp. 253-287.
- Thiam, D.R. (2010)**. Renewable decentralized in developing countries: Appraisal from microgrids project in Senegal. *Renewable Energy*, **35**(8), pp. 1615-1623.
- Thompson, S., and B. Duggirala (2009)**. The feasibility of renewable energies at an off-grid community in Canada. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**(9), pp. 2740-2745.
- Tilman, D., J. Hill, and C. Lehman (2006)**. Carbon-negative biofuels from low-input high-diversity grassland biomass. *Science*, **314**(5805), pp. 1598-1600
- Tiway, R.K. (2001)**. Environmental impact of coal mining on water regime and its management. *Water, Air & Soil Pollution*, **132**, pp. 185-199-199.
- Toft, P., A. Duero, and A. Bieliauskas (2010)**. Terrorist targeting and energy security. *EnergyPolicy*, **38**, pp. 4411-4421.
- Torcellini, P., N. Long, and R. Judkoff (2003)**. *Consumptive Water Use for U.S. Power Production*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA.
- Torfs, R., F. Hurley, B. Miller, and A. Rabl (2007)**. *A Set of Concentration-Response Functions*. European Commission, Brussels, Belgium.
- Torres-Duque, C., D. Maldonado, R. Perez-Padilla, M. Ezzati, and G. Viegi (2008)**. Biomass fuels and respiratory diseases: A review of the evidence. *Proceedings of the American Thoracic Society*, **5**(5), pp. 577-590.
- Toth, F.L., and H.-H. Rogner (2006)**. Oil and nuclear power: Past, present, and future. *EnergyEconomics*, **28**, pp. 1-25.
- Trieb, F.S., C. Schillings, M. O’Sullivan, T. Pregger, and C. Hoyer-Klick (2009)**. Global Potential of Concentrating Solar Power. In: *SolarPACES Conference*, 15-18 September 2009, Berlin, Germany. Available at: [www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/Solar\\_Paces\\_Paper\\_Trieb\\_Final\\_Colour\\_corrected.pdf](http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/Solar_Paces_Paper_Trieb_Final_Colour_corrected.pdf).
- Tsoutsos, T., N. Frantzeskaki, and V. Gekas (2005)**. Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy*, **33**, pp. 289-296.
- Turchi, C., M. Wagner, and C. Kutscher (2010)**. *Water Use in Parabolic Trough Power Plants: Summary Results from Worley Parsons’ Analyses*. NREL/TP-5500-49468, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA.

- Turton, H., and F. Moura (2007).** Vehicle-to-grid systems for sustainable development: An integrated energy analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, **75**(8), pp. 1091-1108
- Tyner, W., F. Taheripour, Q. Zhuang, D. Birur, and U. Baldos (2010).** *Land Use Changes and Consequent CO<sub>2</sub> Emissions due to U.S. Corn Ethanol Production: A Comprehensive Analysis*. GTAP Resource 3288, Department of Agricultural Economics, Purdue University, West Lafayette, IN, USA.
- Udo de Haes, H.A., and R. Heijungs (2007).** Life-cycle assessment for energy analysis and management. *Applied Energy*, **84**, pp. 817-827.
- UN (2002).** *Report of the World Summit on Sustainable Development*. A/CONF.199/20\*, United Nations, Johannesburg, South Africa and New York, NY, USA, 173 pp.
- UN (2005a).** *2005 World Summit Outcome. Resolution Adopted by the General Assembly*. A/RES/60/1, United Nations, New York, NY, USA.
- UN (2005b).** *Beijing Declaration on Renewable Energy for Sustainable Development*. United Nations, New York, NY, USA. Available at: [www.un.org/esa/sustdev/whats\\_new/beijingDecl\\_RenewableEnergy.pdf](http://www.un.org/esa/sustdev/whats_new/beijingDecl_RenewableEnergy.pdf).
- UNCED (1992).** *Agenda 21*. UN Conference on Environment and Development (UNCED), UN Department of Economic and Social Affairs, New York, NY, USA.
- UNDESA (2008).** *Addressing Climate Change in National Sustainable Development Strategies – Common Practices*. Background Paper No. 12, DESA/DSD/2008/12, Commission on Sustainable Development, UN Department of Economic and Social Affairs (UNDESA), New York, NY, USA, 62 pp.
- UNDP (2007).** *Human Development Report 2007/2008*. United Nations Development Programme (UNDP), New York, NY, USA (ISBN 978-0-230-54704-9).
- UNDP (2010).** *Human Development Report 2010*. United Nations Development Programme (UNDP), New York, NY, USA.
- UNDP and WHO (2009).** *The Energy Access Situation in Developing Countries, A Review Focusing on the Least Developed Countries and sub-Saharan Africa*. United Nations Development Programme (UNDP) and the World Health Organization (WHO), New York, NY, USA.
- UNDP/UNDESA/WEC (2000).** *World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability*. United Nations Development Programme, United Nations Department of Economic and Social Affairs, and World Energy Council, New York, NY, USA.
- UNEP (2008a).** *Green Jobs: Towards Decent Work in a Sustainable, Low-Carbon World*. United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi, Kenya (ISBN: 978-92-807-5).
- UNEP (2008b).** *Reforming Energy Subsidies. Opportunities to Contribute to the Climate Change Agenda*. Division of Technology, Industry and Economics, United Nations Environment Programme (UNEP), Paris, France.
- UNEP (2010).** *Global Trends in Sustainable Energy Investment 2010. Analysis of Trends and Issues in the Financing of Renewable Energy and Energy Efficiency*. United Nations Environment Programme (UNEP) and Bloomberg New Energy Finance, Nairobi, Kenya.
- UNEP and SETAC (2010).** *The Life Cycle Initiative*. Division of Technology, Industry and Economics, United Nations Environment Programme (UNEP), Society for Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), Paris, France.

- UNEP Risø Pipeline (2011).** *UNEP Risø CDM/JI Pipeline*. UNEP Risø Centre, Roskilde, Denmark. Available at: [www.cdmpipeline.org](http://www.cdmpipeline.org).
- UNFCCC (2009).** *The Copenhagen Accord 2/CP.15*. FCCC/CP/2009/11/Add.1, United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), Bonn, Germany. Available at: [unfccc.int/resource/docs/2009/cop15/eng/11a01.pdf](http://unfccc.int/resource/docs/2009/cop15/eng/11a01.pdf).
- Unruh (2000).** Understanding carbon lock-in. *Energy Policy*, **28**, pp. 817-830.
- Upreti, B.R. (2004).** Conflict over biomass energy development in the United Kingdom: some observations and lessons from England and Wales. *Energy Policy*, **32**(6), pp. 785-800.
- Urban, F., R.M.J. Benders, and H.C. Moll (2007).** Modelling energy systems for developing countries. *Energy Policy*, **35**(6), pp. 3473-3482.
- Urmee, T., D. Harrie, and A. Schlapfer (2009).** Issues related to rural electrification using renewable energy in developing countries of Asia and Pacific. *Renewable Energy*, **34**(2), pp.354-357.
- US DOE (2010).** *Critical Materials Strategy*. U.S. Department of Energy (DOE), Washington, DC, USA, 166 pp.
- US DOT (2010).** *Transportation's Role in Reducing U.S. Greenhouse Gas Emissions*. U.S.Department of Transportation, Washington, DC, USA.
- USGS (2010).** *Mineral Commodity Summaries 2010*. United States Department of the Interior, United States Geological Survey (USGS), Washington, DC, USA, 193 pp.
- Ußner, M., and F. Müller-Langer (2009).** Biofuels today and tomorrow: effects of fuel composition on exhaust gas emissions. *Accreditation and Quality Assurance: Journal for Quality, Comparability and Reliability in Chemical Measurement*, **14**(12), pp. 685-691.
- van Alphen, K., W.G.J.H.M. van Sark, and M.P. Hekkert (2007).** Renewable energy technologies in the Maldives – determining the potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **11**(8), pp. 1650-1674.
- van Dam, J., A.P.C. Faaij, J. Hilbert, H. Petruzzi, and W.C. Turkenburg (2009).** Large-scale bioenergy production from soybeans and switchgrass in Argentina. Part B: Environmental and socio-economic impacts on a regional level. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**(8), pp. 1679-1709.
- van der Horst, D. (2007).** NIMBY or not? Exploring the relevance of location and the politics of voiced opinions in renewable energy siting controversies. *Energy Policy*, **35**(5), pp. 2705-2714.
- van der Vleuten, F., N. Stam, and R. van der Plas (2007).** Putting solar home systems programmes into perspective: What lessons are relevant. *Energy Policy*, **34**(3), pp. 1439-1451.
- van Metre, P.C., and J. Gray (1992).** Effects of uranium-mining releases on ground-water quality in the Puerco River Basin, Arizona and New Mexico. *Hydrological Sciences*, **37**, pp. 463-480.
- van Ruijven, B. (2008).** *Energy and Development – A Modelling Approach*. PhD Thesis, Department of Science, Technology and Society, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands.
- van Ruijven, B., F. Urban, R.M.J. Benders, H.C. Moll, J.P. van der Sluijs, B. de Vries, and D.P. van Vuuren (2008).** Modeling energy and development: An evaluation of models and concepts. *World Development*, **36**(12), pp. 2801-2821.
- van Vliet, O., A.S. Brouwer, T. Kuramochi, M. van den Broek, and A. Faaij (2011).** Energy use, costs and CO<sub>2</sub> emissions of electric cars. *Journal of Power Sources*, **196**(4), pp. 2298-2310.

- van Vuuren, D.P., P.L. Lucas, and H. Hilderink (2007).** Downscaling drivers of global environmental change: Enabling use of global SRES scenarios at the national and grid levels. *Global Environmental Change*, **17**(1), pp. 114-130.
- van Vuuren, D.P., S.J. Smith, and K. Riahi (2010a).** Downscaling socioeconomic and emissions scenarios for global environmental change research: a review. *Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, **1**(3), pp. 393-404.
- van Vuuren, D.P., E. Bellevrat, A. Kitous, and M. Isaac (2010b).** Bio-energy use and low stabilization scenarios. *Energy Journal* **31**(Special Issue 1), pp. 192-222.
- Varun, R. Prakash, and I.K. Bhat (2010).** A figure of merit for evaluating sustainability of renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(6), pp. 1640-1643.
- Vega, L.A. (2002).** Ocean thermal energy conversion primer. *Marine Technology Society Journal*, **36**, pp. 25-35.
- Veil, J. (2010).** *Water Management Technologies Used by Marcellus Shale Gas Producers*. ANL/EVS/R-10/3, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, USA.
- Vera, I., and L. Langlois (2007).** Energy indicators for sustainable development. *Energy*, **32**(6), pp. 875-882.
- Verbruggen, A., and V. Lauber (2009).** Basic concepts for designing renewable electricity support aiming at a full-scale transition by 2050. *Energy Policy*, **37**(12), pp. 5732-5743.
- Viebahn, P., S. Kronshage, F. Trieb, and Y. Lechon (2008).** *Final Report on Technical Data, Costs, and Life Cycle Inventories of Solar Thermal Power Plants*. European Commission, Brussels, Belgium.
- Vinnem, J.E. (2010).** Risk indicators for major hazards on offshore installations. *Safety Science*, **48**, pp. 770-787.
- Viscusi, K.W. (2010).** The heterogeneity of the value of statistical life: Introduction and overview. *Journal of Risk and Uncertainty*, **40**, pp. 1-13.
- Voitsekhovitch, O., Y. Soroka, and T. Lavrova (2006).** Uranium mining and ore processing in Ukraine – radioecological effects on the Dnipro River water ecosystem and human health. *Radioactivity in the Environment*, **8**, pp. 206-214.
- Volkery, A., D. Swanson, K. Jacob, F. Bregha, and L. Pintér (2006).** Coordination, challenges, and innovations in 19 national sustainable development strategies. *World Development*, **34**(12), pp. 2047-2063.
- von Blottnitz, H., and M.A. Curran (2007).** A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, **15**(7), pp. 607-619.
- Voorspools, K.R., E.A. Brouwers, and W.D. D’haeseleer (2000).** Energy content and indirect greenhouse gas emissions embedded in ‘emission-free’ plants: results from the Low Countries. *Applied Energy*, **67**, pp. 307-330.
- Walker, G., P. Devine-Wright, S. Hunter, H. High, and B. Evans (2010).** Trust and community: Exploring the meanings, contexts and dynamics of community renewable energy. *Energy Policy*, **38**(6), pp. 2655-2663.
- Wallquist, L., V.H.M. Visschers, and M. Siegrist (2009).** Lay concepts on CCS deployment in Switzerland based on qualitative interviews. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **3**, pp. 652-657.
- Walter, A., P. Dolzan, O. Quilodrán, J.G. de Oliveira, C. da Silva, F. Piacente, and**

- A.Segerstedt (2011).** Sustainability assessment of bio-ethanol production in Brazil considering land use change, GHG emissions and socio-economic aspects. *Energy Policy*, [doi:10.1016/j.enpol.2010.07.043](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.07.043).
- Wang, M., M. Wu, and H. Hong (2007).** Life-cycle energy and greenhouse gas emission impacts of different corn ethanol plant types. *Environmental Research Letters*, **2**(2), 024001.
- Wara, M. (2008).** Measuring the Clean Development Mechanism's performance and potential. *UCLA Law Review*, **55**(6), pp. 1759-1803.
- Ward, M. (2008).** Sector no-lose targets: A new scaling up mechanism for developing countries. In: *A Reformed CDM Including New Mechanisms for Sustainable Development*. K.H. Olsen and J. Fenhann (eds.), UNEP Risø Centre, Roskilde, Denmark, pp. 147-163.
- Warren, C.R., and M. McFadyen (2010).** Does community ownership affect public attitudes to wind energy? A case study from south-west Scotland. *Land Use Policy*, **27**(2), pp. 204-213.
- WBGU (2009).** *World in Transition – Future Bioenergy and Sustainable Land Use*. German Advisory Council on Global Change (WBGU), Earthscan, London, UK.
- WCED (1987).** *Our Common Future*. World Commission on Environment and Development(WCED), Oxford University Press, Oxford, UK and New York, NY, USA.
- WEC (2007).** *Survey of Energy Resources*. World Energy Council (WEC), London, UK. Available at: [www.worldenergy.org/documents/ser2007\\_final\\_online\\_version\\_1.pdf](http://www.worldenergy.org/documents/ser2007_final_online_version_1.pdf).
- WEC (2010).** *Survey of Energy Resources 2010*. World Energy Council (WEC), London, UK. Available at: [www.worldenergy.org/documents/ser\\_2010\\_report\\_1.pdf](http://www.worldenergy.org/documents/ser_2010_report_1.pdf)
- Werner, M., and A.I. Schaefer (2007).** Social aspects of a solar-powered desalination unit for remote Australian communities. *Desalination*, **203**(1-3), pp. 375-393.
- West, J., I. Bailey, and M. Winter (2010).** Renewable energy policy and public perceptions of renewable energy: A cultural theory approach. *Energy Policy*, **38**(10), pp. 5739-5748.
- Westwood, A. (2007).** Wave and tidal – project review. *Renewable Energy Focus* **8**(4), pp. 30-33.
- Weyant, J.P. (1993).** Costs of reducing global carbon emissions. *The Journal of Economic Perspectives*, **7**(4), pp. 27-46.
- Whitaker, M., and G. Heath (2010).** *Life Cycle Assessment Comparing the Use of Jatropha Biodiesel in the Indian Road and Rail Sectors*. NREL/TP-6A2-47462, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA.
- WHO (2002).** *The World Health Report. Reducing Risks, Promoting Healthy Life*. World Health Organization (WHO), Geneva, Switzerland.
- WHO (2006).** *Air Quality Guidelines. Global Update 2005. Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide*. World Health Organization (WHO) Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark.
- Wicke, B., V. Dornburg, M. Junginger, and A. Faaij (2008).** Different palm oil production systems for energy purposes and their greenhouse gas implications. *Biomass and Bioenergy*, **32**(12), pp. 1322-1337.
- Wilbanks, T.J. (2002).** Geographic scaling issues in integrated assessments of climate change. *Integrated Assessment*, **3**(2-3), pp. 100-114.
- Wilkie, A.C., K.J. Riedesel, and J.M. Owens (2000).** Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, **19**, pp. 39.

- Wilkins, G. (2002).** *Technology Transfer for Renewable Energy. Overcoming Barriers in Developing Countries.* The Royal Institute of International Affairs, Earthscan Publications, London, UK.
- Williams, P.R.D., D. Inman, A. Aden, and G.A. Heath (2009).** Environmental and sustainability factors associated with next-generation biofuels in the US: What do we really know? *Environmental Science & Technology*, **43**(13), pp. 4763-4775.
- Winkler, H., O. Davidson, and S. Mwakasonda (2005).** Developing institutions for the clean development mechanism (CDM): African perspectives. *Climate Policy*, **5**, pp. 209-220.
- Wise, M., K. Calvin, A. Thomson, L. Clarke, B. Bond-Lamberty, R. Sands, S.J. Smith, A. Janetos, and J. Edmonds (2009).** Implications of limiting CO<sub>2</sub> concentrations for land use and energy. *Science*, **324**(5931), pp. 1183-1186.
- Wise, M., G. Kyle, J. Dooley, and S. Kim (2010).** The impact of electric passenger transport technology under an economy-wide climate policy in the United States: Carbon dioxide emissions, coal use, and carbon dioxide capture and storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **4**(2), pp. 301-308.
- Wolf, A.T. (1998).** Conflict and cooperation along international waterways. *Water Policy*, **1**(2), pp.251-265.
- Wolsink, M. (2000).** Wind power and the NIMBY-myth: institutional capacity and the limited significance of public support. *Renewable Energy*, **21**(1), pp. 49-64.
- Wolsink, M. (2007a).** Planning of renewables schemes: Deliberative and fair decision-making on landscape issues instead of reproachful accusations of non-cooperation. *Energy Policy*, **35**(5), pp.2692-2704.
- Wolsink, M. (2007b).** Wind power implementation: The nature of public attitudes: Equity and fairness instead of ‘backyard motives’. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **11**(6), pp.1188-1207.
- Wolsink, M. (2010).** Near-shore wind power – Protected seascapes, environmentalists’ attitudes, and the technocratic planning perspective. *Land Use Policy*, **27**(2), pp. 195-203.
- Wood, R.G. (2011).** *Carbon Finance and Pro-Poor Co-benefits: The Gold Standard and Climate, Community and Biodiversity Standards.* International Institute for Environment and Development, London, UK, 24pp.
- World Bank (2001).** *The World Bank Group's Energy Program – Poverty Reduction, Sustainability and Selectivity.* Energy and Mining Sector Board, The World Bank, Washington, DC, USA.
- World Bank (2007a).** *African Development Indicators 2007.* World Bank, Washington, DC, USA, 176 pp.
- World Bank (2007b).** *World Development Indicators 2007.* World Bank, Washington, DC, USA.
- World Bank (2008a).** *Global Economic Prospects.* The International Bank for Reconstruction and Development, The World Bank, Washington, DC, USA, 224 pp.
- World Bank (2008b).** *The Welfare Impact of Rural Electrification: A Reassessment of the Costs and Benefits.* The World Bank, Washington, DC, USA, 178 pp.
- World Bank (2010).** *World Development Indicators 2010.* World Bank, Washington, DC, USA, 489 pp.
- World Bank (2011).** *Climate Impacts on Energy Systems. Key Issues for Energy Sector Adaptation. A World Bank Study.* The World Bank, Washington, DC, USA (ISBN: 978-0-8213-8697-2).

- World Commission on Dams (2000).** *Dams and Development – A New Framework for Decision-Making*. Earthscan Publications Ltd, London, UK and Sterling, VA, USA.
- WTO (2010).** *Background Note: Trade and Environment in the WTO*. World Trade Organization, Geneva, Switzerland.
- Wu, M., Y. Wu, and M. Wang (2005).** *Mobility Chains Analysis of Technologies for Passenger Cars and Light-Duty Vehicles Fueled with Biofuels: Application of the GREET Model to the Role of Biomass in America's Energy Future (RBAEF) Project*. ANL/ESD/07-11, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, USA.
- Wu, M., M. Mintz, M. Wang, and S. Arora (2009).** Water consumption in the production of ethanol and petroleum gasoline. *Environmental Management*, **44**, pp. 981-97.
- Wustenhagen, R., M. Wolsink, and M.J. Burer (2007).** Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. *Energy Policy*, **35**(5), pp. 2683-2691.
- Yamada, M., and J. Zheng (2008).** Determination of  $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$  atom ratio in coastal surface seawaters from the western North Pacific Ocean and Japan Sea. *Applied Radiation and Isotopes*, **66**(1), pp. 103-107.
- Yamamoto, H., J. Fujino, and K. Yamaji (2001).** Evaluation of bioenergy potential with a multi-regional global-land-use-and-energy model. *Biomass and Energy*, **21**, pp. 185-203.
- Yanowitz, J., and R.L. McCormick (2009).** Effect of E85 on tailpipe emissions from light-duty vehicles. *Journal of the Air and Waste Management Association*, **59**(2), pp. 172-182.
- Yeh, S., S. Jordaan, A. Brandt, M. Turetsky, S. Spatari, and D. Keith (2010).** Land use greenhouse gas emissions from conventional oil production and oil sands. *Environmental Science and Technology*, **44**, pp. 8766-8772.
- Yim, M.-S. (2006).** Nuclear nonproliferation and the future expansion of nuclear power. *Progress in Nuclear Energy*, **48**, pp. 504-524.
- Yoon, S.H., S.Y. Ha, H.G. Roh, and C.S. Lee (2009).** Effect of bioethanol as an alternative fuel on the emissions reduction characteristics and combustion stability in a spark ignition engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, **223**(7), pp. 941-951.
- Zackrisson, M., L. Avellan, and J. Orlenius (2010).** Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles – Critical issues. *Journal of Cleaner Production*, **18**(15), pp.1519-1529.
- Zah, R., H. Böni, M. Gauch, R. Hischer, M. Lehmann, and P. Wäger (2007).** *Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen*. Bundesamtes für Energie, Bundesamt für Umwelt, Bundesamt für Landwirtschaft, Bern, Switzerland.
- Zhai, H., H.C. Frey, N.M. Roupail, G.A. Gonçalves, and T.L. Farias (2009).** Comparison of flexible fuel vehicle and life-cycle fuel consumption and emissions of selected pollutants and greenhouse gases for ethanol 85 versus gasoline. *Journal of the Air and Waste Management Association*, **59**(8), pp. 912-924.
- Zhang, J., and K.R. Smith (2007).** Household air pollution from coal and biomass fuels in China: Measurements, health impacts, and interventions. *Environmental Health Perspectives*, **115**(6), pp. 848-855.
- Ziemann, S., and L. Schebek (2010).** Substitution knapper Metalle – Ein Ausweg aus der Rohstoffknappheit? *Chemie, Ingenieur, Technik*, **82**(11), pp. 1965-1975.
- Zoellner, J., P. Schweizer-Ries, and C. Wemheuer (2008).** Public acceptance of renewable

energies: Results from case studies in Germany. *Energy Policy*, **36**(11), pp. 4136-4141.

**Zografakis, N., E. Sifaki, M. Pagalou, G. Nikitaki, V. Psarakis, and K.P. Tsagarakis (2009).** Assessment of public acceptance and willingness to pay for renewable energy sources in Crete. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **14**(3), pp. 1088-1095.

**Zuk, M., L. Rojas, S. Blanco, P. Serrano, J. Cruz, F. Angeles, G. Tzintzun, C. Armendariz, R.D. Edwards, M. Johnson, H. Riojas-Rodriguez, and O. Masera (2007).** The impact of improved wood-burning stoves on fine particulate matter concentrations in rural Mexican homes. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, **17**(3), pp. 224-232.