

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

緩和ポテンシャルとコスト（仮訳）

緩和ポテンシャルとコスト (仮訳)

統括執筆責任者:

Manfred Fischedick (Germany) and Roberto Schaeffer (Brazil)

執筆責任者:

Akintayo Adedoyin (Botswana), Makoto Akai (Japan), Thomas Bruckner (Germany), Leon Clarke (USA), Volker Krey (Austria/Germany), Ilkka Savolainen (Finland), Sven Teske (Germany), Diana Ürge - Vorsatz (Hungary), Raymond Wright (Jamaica)

執筆協力者:

Gunnar Luderer (Germany)

査読編集者:

Erin Baker (USA) and Keywan Riahi (Austria)

本章の引用時の表記方法:

Fischedick, M., R. Schaeffer, A. Adedoyin, M. Akai, T. Bruckner, L. Clarke, V. Krey, I. Savolainen, S. Teske, D. Ürge - Vorsatz, R. Wright, 2011: Mitigation Potential and Costs. 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 10 章：緩和ポテンシャルとコスト

目次

目次	2
要約	4
10.1 序論	7
10.2 様々な再生可能エネルギー戦略に関する緩和シナリオの統合	8
10.2.1 シナリオ分析の状態	8
10.2.1.1 シナリオ手法のタイプ	8
10.2.1.2 定量的シナリオの長所及び短所	9
10.2.2 シナリオにおける再生可能エネルギー源の役割	10
10.2.2.1 本セクションにおいて検討されるシナリオの概要	10
10.2.2.2 シナリオにおける再生可能エネルギーの役割概要	12
10.2.2.3 再生可能エネルギー普及規模の設定：エネルギーシステムの発展及び長期的気候目標	14
10.2.2.4 再生エネルギー源及びその他の形式の低炭素エネルギーとの競合	17
10.2.2.5 技術、時間の経過、及び地域による再生可能エネルギーの普及	20
10.2.2.6 再生可能エネルギーと緩和コスト	23
10.2.3 技術的視点から見たシナリオにおける再生可能エネルギー源の普及	25
10.2.4 知見のギャップ	26
10.3 様々な再生可能エネルギー戦略に対する代表的な緩和シナリオの評価	27
10.3.1 再生可能エネルギー源の部門別内訳	27
10.3.1.1 電力部門の再生可能エネルギーの普及	31
10.3.1.2 暖房及び冷房部門の再生可能エネルギー普及	36
10.3.1.3 輸送部門の再生可能エネルギー普及	39
10.3.1.4 世界の再生可能エネルギーの一次エネルギーへの貢献	39
10.3.2 地域別内訳 - 技術的ポテンシャルと市場展開の比較	40
10.3.2.1 地域の再生可能エネルギー供給曲線	40
10.3.2.2 地域、技術、及び部門ごとの一次エネルギー	43
10.3.3 全体及び個別のオプションとしての再生可能エネルギーの温室効果ガス緩和のポテンシャル	47
10.3.4 綿密なシナリオ分析の結果の比較と知見のギャップ	51
10.4 再生可能エネルギーによる緩和に対する地域的なコスト曲線	53
10.4.1 序論	53
10.4.2 コスト曲線:概念、長所と制約	53
10.4.2.1 概念	53
10.4.2.2 供給曲線法の制約	53
10.4.3 文献からの地域のエネルギー及び削減コスト曲線のレビュー	55
10.4.3.1 序論	55
10.4.3.2 地域的及び世界的再生可能エネルギーの供給曲線	55
10.4.3.3 地域的及び世界的な炭素削減コスト曲線	61
10.4.4 一部の技術資源コスト曲線のレビュー	61
10.4.5 知見におけるギャップ	65
10.5 商業化と普及のコスト	65
10.5.1 序論:現在の技術的コストのレビュー	66
10.5.2 コスト減少の見通し	71
10.5.3 展開コスト曲線と学習投資	74
10.5.4 時間依存の出費	75
10.5.5 市場支援及び調査、開発、実証及び展開	78
10.5.6 知見のギャップ	78
10.6 社会的、環境的コストと便益	79
10.6.1 背景と目標	79
10.6.2 外部コスト及び便益についての研究レビュー	80
10.6.2.1 気候変動	80
10.6.2.2 大気汚染による健康への影響	81
10.6.2.3 その他の影響	81
10.6.3 エネルギー源及び地域の条件ごとの社会的及び環境のコストと便益	82
10.6.4 損害及び外部コストを制限するための相乗効果的戦略	85
10.6.5 知見のギャップ	86

REFERENCES	87
------------------	----

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

要約

再生可能エネルギー (RE) は、野心的な気候緩和目標の達成のために重要であり、ますます大きな役割を担う可能性がある。一部の革新的な再生可能エネルギー技術は、まだ非再生可能エネルギー技術に対し経済的代替技術となるほど成熟していないが、多くの再生可能エネルギー技術は、ますます市場競争力をつけている。しかし、再生可能エネルギーの将来の役割の評価には、再生可能エネルギー技術のコスト及び性能の検討だけでなく、様々な強制力と全体的なシステム挙動との相互作用を考慮にいたった統合的な視野もまた必要である。

増加している統合シナリオの分析は、公表された文献において入手可能である。これらの分析は、再生可能エネルギーによる将来のエネルギー供給及び気候変動緩和への潜在的な貢献に関連する洞察が提示されている。募集を通じて 16 の異なる大規模な統合モデルからの 164 のシナリオの検討が行われた。文献から収集されたシナリオは、厳正な統計分析による本来の意味での無作為なサンプルではないが、シナリオを概観することによって、不確実性はあるものの、気候緩和における再生可能エネルギーの役割についての重要で戦略的な見識が提供された。

長期的な気候目標と地球規模の再生可能エネルギー普及レベルを明確に結びつけることは不可能であるが、再生可能エネルギーの普及が、野心的な温室効果ガス (GHG) 濃度安定化レベルとなるシナリオにおいて、大幅に増加している。野心的な温室効果ガス濃度安定化レベルは、ベースラインと比較すると、平均としてより高い再生可能エネルギーの普及につながっている。しかし、いくつかの長期的温室効果ガス濃度目標に対しては、シナリオでは、幅広い範囲の再生可能エネルギー普及レベルが示されている。大気中の二酸化炭素 (CO₂) 濃度を 440ppm 未満に安定させるシナリオにおいては、再生可能エネルギー普及レベルの中央値は、2030 年では 139EJ/年、2050 年では 248EJ/年であり、最大は 2030 年では 252EJ/年、2050 年では 428EJ/年に達した。この範囲は、以下の要因の仮定の差の結果である。それは、再生可能エネルギー技術の開発及びそれに関連する資源の主材料やコスト、競合する緩和オプションの相対的な魅力 (最終消費エネルギー効率、原子力、及び二酸化炭素回収・貯留 (CCS) を持つ化石エネルギー)、エネルギーのサービス需要の基本的なドライバー (人口、経済成長などを含む)、様々な再生可能エネルギー源を送電網に統合する能力、化石燃料資源、緩和への特定の政策アプローチ、長期的な目標にむけての排出量の道筋 (オーバーシュートや安定化など) である。しかし、ばらつきが示されているものの、これらのシナリオは、他のすべてが同等であれば、より野心的な緩和が概して再生可能エネルギーの普及拡大につながることを示している。

近年の 164 のシナリオの多くは、2030 年、2050 年及びそれ以降における再生可能エネルギーの大幅な普及拡大を示している。2008 年には、再生可能エネルギー生産の総計は、約 64EJ/年 (一次エネルギー供給総計の 12.9%) であり、伝統的バイオマスは 30EJ/年を超えている。50%を超えるシナリオにおいて、2050 年における再生可能エネルギーの普及レベルが、173EJ/年を超えており一部の事例では、最大で 400EJ/年を超える程度に達するとしている。ほとんどのシナリオで伝統的バイオマスの需要が低下したことを考慮すると、再生可能エネルギー (伝統的バイオマスを除く) の生産レベルが、約 3 倍から 10 倍を超える範囲に増加することが予想される。地球規模の一次エネルギー供給において再生可能エネルギーが占める割合は、シナリオ間で大きく違っている。シナリオの半分以上では、再生可能エネルギーの寄与は、2030 年における一次エネルギー供給の 17%を超え、2050 年においては 27%超まで上昇することを示している。再生可能エネルギーの割合が最も高いシナリオは、2030 年には約 43%、2050 年には 77%に達している。つまり、再生可能エネルギーは、今日より将来における地球規模のエネルギーシステムにおいて、著しく大きな役割 (絶対量、相対量とも) を担う可能性が高い。

気候変動に対処する取り組みがなかったとしても、再生可能エネルギーは拡大すると推測される。気候緩和政策を想定していないほとんどのベースラインシナリオは、2008 年の 64EJ/年のレベルを大幅に超える再生可能エネルギーの普及 (2030 年までには最大 120EJ/年) を示している。多くのベースラインシナリオは、2050 年までに、100EJ/年を超える (一部の事例では最大 250EJ/年) 再生可能エネルギー普及レベルに到達する。これらの相当な普及レベルは、例えばエネルギーのサービス需要が 21 世紀を通して大幅に増加しつづけるという仮定、再生可能エネルギーのエネルギーアクセスの増加へ貢献する能力についての仮定、化石資源の長期の制限された利用可能性についての仮定など、広範囲の仮定の結果として生じている。そして、その他の仮定 (再生可能エネルギー技術のコストや性能の向上など) によって、気候政策がない場合であっても、多くの用途において、再生可能エネルギー技術は、ますます経済的に競争力のあるものになる。

再生可能エネルギーの普及は、温室効果ガス安定化濃度が低いシナリオにおいて、大幅に拡大している。温室効果ガス安定化濃度が低いシナリオは、ベースラインと比較すると、平均的により高い再生可能エネルギーの普及につながる。しかし、特定の長期的な温室効果ガス濃度のいかなる目標に関しても、シナリオは広範囲の再生可能エネルギー普及レベルを示す (図 SPM.9)。大気中の二酸化炭素濃度を 440ppm 未満のレベルに安定化させるシナリオでは、2050 年の再生可能エネルギーの普及レベルの中央値は、248EJ/年 (2030 年では 139EJ/年)、2050 年までには最高レベルの 428EJ/年に到達する。

低炭素エネルギー供給オプションと省エネルギーとの組み合わせの多くは、一定の温室効果ガス濃度レベルの低下

に貢献し、2050年までにシナリオの大多数において、再生可能エネルギーが主たる低炭素エネルギー供給オプションとなる。野心的な温室効果ガス濃度安定化レベルの多くは、ベースラインより高い再生可能エネルギーの普及につながり、2050年までに再生エネルギー普及の上限である400EJ/年を超える。多くのシナリオにおいて、原子力と二酸化炭素回収・貯留の普及に関する外的な制約を持つ感度を持っており、再生可能エネルギーは、これらのシナリオにおいてますます重要な役割を担っている。しかし、競合する低炭素オプションの明白な制約がないこれらのシナリオでさえ、再生可能エネルギーが、地球規模の一次エネルギー供給の50%をはるかに上回る割合を示す場合が多い。

シナリオでは、一般的に再生可能エネルギーの成長は世界中に広がることを示している。地域中での再生可能エネルギーの普及の精緻な分布をみると、シナリオによってかなりばらつきがあるが、大部分においては、一貫して地球全体の再生可能エネルギー普及には幅広い成長を示している。加えて、シナリオでは、再生可能エネルギーの普及レベルを長期的に見ると、非Annex I諸国のグループが、今後数十年にわたって地球規模のエネルギー需要全体においてますます多くの割合を占めるようになるとの推定を反映し、Annex I諸国のグループよりも高くなること示唆されている。

シナリオは、地球規模で明白に主な一つの再生可能エネルギー技術があることは示していない。すべての再生可能エネルギーが時間と共にシナリオ内でより重要な役割を取得するという面に加えて、一般的にはバイオエネルギー（主に、近代的バイオマス）、風力エネルギー、及び太陽エネルギーが2050年までに再生可能エネルギー技術の中で最もエネルギーシステムへの貢献度が高いことが特徴づけられている。

個別の研究において再生可能エネルギーの普及が限定的である場合、緩和のコストが増加し、温室効果ガスの安定化濃度の低下は達成されないかもしれないことが示されている。多くの研究では、再生可能エネルギー同様、原子力及び二酸化炭素回収・貯留を持つ化石エネルギーなど、個々の緩和オプション普及への制約を仮定するシナリオの感度を追求してきた。これらの研究では、再生可能エネルギーなどのオプションが利用不可能で、コスト増加の正確な大きさについての合意がほとんどない場合、緩和コストはより高くなることが示されている。また、再生可能エネルギーオプションが入手可能でない場合、より野心的な温室効果ガスの濃度目標は達成されない可能性があることも示されている。

より大規模の164のシナリオ群から特定した4つのシナリオを詳しく分析したところ、様々な地域や部門における特定の再生可能エネルギー技術の潜在的貢献の詳細な考察が可能となった。これらの少数のシナリオさえ、再生可能エネルギーの役割にはかなりのバラつきがある。その理由の1つとしては、シナリオが様々な長期的な気候目標を持っているからであり、また1つには、技術コストについての様々な仮定、異なるシナリオの手法に基づいているからである。

これらの4つの代表的なシナリオにおいて、再生可能エネルギーによる発電が最も急速に発展しており、続いて、中期的には、冷暖房及び輸送に関する再生可能エネルギーが発展している。再生可能エネルギーによる発電においては、分析対象となった期間においては、最も高い市場占有率が期待される。これに対して、現在では、世界の多くの地域において暖房部門が最も影響力のある需要部門の1つである。特に非Annex I諸国では、その再生可能エネルギーの割合は高いが、それは主に伝統的バイオエネルギーに基づいている。4つの例示シナリオに関して、再生可能エネルギーによる発電が占める割合の合計は、2050年(2030年)の場合、24%(20%)から最大95%(61%)に到るまで様々である(2008年における再生可能エネルギーによる電力の割合の19%を参照)。4つのシナリオにおいては、再生可能エネルギーの暖房部門に対する寄与は、2050年(2030年)において、21%(20%)から91%(49%)の間である。シナリオの大部分において、暖房及び特に輸送部門は、あまり重視されていないが、研究によると将来は熱及び輸送での再生可能エネルギーの利用はさらに重要視するべきであることが示されている。

シナリオでは、地球全体の技術的ポテンシャルは、再生可能エネルギーの将来の寄与を制約しないことが示唆されている。様々な再生可能エネルギー技術の普及は時間と共に大幅に増加しているが、大部分の技術に関するシナリオにおいて、再生可能エネルギーの貢献は、それと一致する技術的ポテンシャルよりもはるかに低い。たとえば、4つのシナリオでは、大幅な技術的及び地域的なばらつきにもかかわらず、地球規模で技術的に利用可能な再生可能エネルギーポテンシャルのうち2.5%未満しか利用されていない。この意味で、技術的ポテンシャルは地球規模において再生可能エネルギーの拡大を制限する要因ではないことが裏付けられている。

再生可能エネルギーの部門ごとの割合の増加は、温室効果ガス緩和に大いに貢献する可能性がある。詳細に分析した4つのシナリオ群で、2010年から2050年の間に化石燃料使用及び工業活動から排出される約1,530Gtの二酸化炭素(IEAのWorld Energy Outlook 2009の参照シナリオ)に対して、同時期に約2,200~5,600億トンの二酸化炭素削減を想定している。再生可能エネルギーに対する緩和ポテンシャルの正確な寄与は、特定の緩和技術による役割のシナリオだけでなく、複雑なシステムの挙動と、特に再生可能エネルギーにより代替されるエネルギー源に左右される。このため、考察の際は再生可能エネルギーに対する正確な緩和ポテンシャルの寄与に注意すべきである。

シナリオでは、ほとんどの場合、緩和ポテンシャルと様々な技術的オプションを直接関係づけていない。その代わ

りに、様々な緩和戦略を検討し比較する場合に、削減コスト曲線が多く使用される。削減コスト曲線及びエネルギー供給曲線は、緩和戦略の検討や軽減オプションの優先順位付けに非常によく使用される方法である。この手法の最大の長所は、結論が容易に理解可能なことと、費用対効果の順にオプションの順位付けを行うため、手法の結果の方向性が明確になることである。一方で、削減コスト曲線には重要な限界がある。シナリオ分析とは異なり、複雑なシステムの挙動や対応する相互依存性を反映することができない。したがって、削減コスト曲線は置き換えられた非再生可能エネルギーに対応する排出係数についての簡単な仮定に依存せざるを得ない。包括的で一貫したアプローチを使用して手法を詳述する研究は少なく、大多数の研究は異なる仮定を使用しているため、一般に、再生可能エネルギーの削減費用及び供給曲線からのデータと調査結果を比較することは非常に難しい。多くの地域国家規模の研究では、約 100US ドル (2005 年) /t CO₂ の削減費用に基づき、中期的にベースラインの二酸化炭素削減量の 10% 未満の削減を示している。低コストの軽減ポテンシャルの結果は、ここで検討されている多数のシナリオで報告された緩和ポテンシャルと比較するとかなり低い。

再生可能エネルギー技術の一部は、現在の市場エネルギー価格に対して広く競争力を持つ。他の再生可能エネルギー技術の多くは、たとえば、有利な資源条件を持つ地域、またはその他の低価格のエネルギー供給に対するインフラが不足している地域といった特定の状況において、競争的なエネルギーサービスを提供する。しかし、世界の大多数の地域では、多くの再生可能エネルギー源の急速な普及を確実にするための政策措置が依然として必要とされている。

再生可能エネルギーにおいては、エネルギー効率をさらに向上させたり、個々の技術の製造と導入のコストを削減する重要な機会が存在する。それと共に、これらの効果は、将来、多くの革新的な再生可能エネルギーを源とする技術のエネルギーの均等化発電原価を削減することが推測される。時間と共に、多くの再生可能エネルギー技術の発電コストは大幅な減少を示してきた。一般的に、これまでのコスト削減は、地球規模の学習率（コスト削減と生産倍増の関係）と共に経験曲線によって説明することが出来る。

学習効果を実現し、再生可能エネルギーの競争力向上を可能にするためには、普及への先行投資とともに研究開発も必要であり、それが結果として再生可能エネルギー供給者の新たな市場機会につながる。本特別報告書のなかで詳細に分析された 4 つのシナリオは、地球規模の再生可能エネルギー投資（発電部門のみ）を、2011～2020 年においては 1 兆 3,600～5 兆 1,000 億 US ドル (2005 年) に、2021～2030 年においては 1 兆 4,900 億～7 兆 1,800 億 US ドル (2005 年) の範囲と推定している。低い値は、IEA の World Energy Outlook 2009 の参照シナリオを指し、高い値は、大気中の二酸化炭素のみの 450ppm への濃度安定化を目指すシナリオを指す。これらの投資ニーズの年間平均はすべて、世界の国内総生産 (GDP) の 1% 未満である。参照シナリオにおける年間平均投資額は、2009 年に報告されたそれぞれの投資額をわずかに下回る。2011～2020 年において、再生可能エネルギー電力部門における投資の年間平均額の上限值は、この分野における現在の地球規模の投資額のほぼ 3 倍に相当する。その次の 10 年間 (2021～2030 年) においては、5 倍の増加が予測されている。

再生可能エネルギー発電プラントの設備容量の増加によって、増加しなかった場合に特定の電力需要を満たすために必要とされたであろう化石燃料及び原子力の総量が減る。投資に加えて、運転保守 (O&M) 及び (適用可能な場合) 再生可能エネルギー発電プラントに関連する原材料コスト、それらの用途に関連する全体的な経済的負担のいかなる評価を行う場合においても回避された燃料及び置換された投資コストを考慮しなければならない。

再生可能エネルギーの普及及び、緩和の道筋における将来的なコスト評価は、外部コストや相乗効果など、すべての範囲にわたるコストを考慮しなければならない。長期的なシナリオに関する文献は通常、様々なエネルギー技術の外部コスト (一般的に大気汚染による気候変動や健康への影響が大部分を占める) を考慮していない。不確実性は高いが、多くの場合、化石燃料による技術と比べ、再生可能エネルギー源は、ライフサイクルベースで評価するとかなり低い外部コストとなる。特に、再生可能エネルギーによる発電技術の外部コストは化石供給オプションの外部コストよりも低いことが多く報告されてきた。

要約すると、温室効果ガス排出量の制約がない場合、あるいは制約ある場合は特に、再生可能エネルギーは時間と共にますます重要になっていくことが、シナリオが強く示唆している。しかし文献によれば、様々な研究においては再生可能エネルギーの貢献が、対応する技術的ポテンシャルよりもはるかに低い。さらに、将来の再生可能エネルギーの普及の道筋が大幅な成長を示したとしても、その成長率は通常、過去 10 年間において再生可能エネルギー産業で達成された成長率よりも低い。