

10.1 序論

将来の温室効果ガス排出量の推定は、特に経済的成長、人口増加、関連するエネルギー需要、エネルギー資源、及びエネルギー供給や最終消費技術の将来のコストや性能など、様々な将来の要因に多く依存している（IPCC, 2007; 第1章）。気候緩和における再生可能エネルギーの役割を検討する場合、これらのすべての異なる影響を同時に検討する必要があるだけでなく、今日の時点で確実に知ることが不可能ではあるが、これらの様々な主な影響力（key force）の数十年後の見通しも検討する必要がある。こうした背景に対して、この章では、特にシステムの全体像と、これらの様々な影響力が将来に発展し、また形づくられていく多くの方法について明らかにしながら、再生可能エネルギー技術の緩和ポテンシャルやコストについて検討する。

10.2 では、広範囲の統合モデルからの 164 の中長期のシナリオのレビューによって、気候緩和における再生可能エネルギーの役割を理解する背景を示す。このレビューでは、最近のシナリオで示されている地球規模の再生可能エネルギーの普及レベルを調査し、普及レベルの違いを生む主な影響力をいくつか示す。レビューは、再生可能エネルギー全体だけでなく、個々の再生可能エネルギー技術についても行う。また他の緩和技術との相互作用や競争の重要性、エネルギー需要の進化についても広く焦点を当てる。このセクションではまた、シナリオにおける再生可能エネルギーと緩和コストの関連についても検討し、シナリオで到達している普及レベルを達成するために影響を与える要因について、第2～7章からの議論（技術及び経済的側面など）で締めくくる。

10.3 では、164 のシナリオから 4 つのシナリオを使用してより詳細に論じることで、広範囲のレビューを補完している。4 つのシナリオでは、ベースラインに位置する再生可能エネルギーの将来の発展から、将来の楽観的な見通しまでの範囲に及び、様々な温室効果ガス安定化レベルを含み、また様々な基本的なモデル手法を用いている。このセクションは、再生可能エネルギーが気候変動の緩和に果たす役割を探る次の段階について詳細に論じているものである。10.3 では、再生可能エネルギー普及についてさらに地域別・部門別（発電、冷暖房、輸送など）の特徴について詳細に扱っている特定の将来像についての詳細を述べている。より詳細については、要求される発電容量、年間成長率、再生可能エネルギー普及に対応する緩和ポテンシャルの推定値といった問題を考える。さらに、シナリオの結果についての別の視点として、10.3 では、再生可能エネルギー技術が、コストに応じて 4 つのシナリオにおいてどのように普及するかを認識するために、供給コスト曲線の手法を使用する。

これに関連して、この章及び本報告書を通じて、特に再生可能エネルギーと非再生可能エネルギー技術との比較、またはバイオマスとその他の再生可能エネルギー技術との比較の場合においては、一次エネルギーを計算するのに直接等価法が使用されることに留意することが重要である。他の伝統的手法と比較し、このアプローチは他の一次等価法よりも再生可能エネルギーに関して一次エネルギーの割合が低いことを示す傾向にある（詳細は第1章の Box 1.1 参照）。

10.4 では、コスト曲線についてより包括的な議論を行っている。これは再生可能エネルギー源を用いた緩和に関連するもので、再生可能エネルギーと温室効果ガス緩和の供給曲線の長所と短所を評価し、さらに地域の再生可能エネルギーの供給曲線や削減コスト曲線に関する既存の文献をレビューする。セクションの次の部分では、不確実性の検討を含む、技術特有の供給とコスト曲線を要約する。

10.5 では、再生可能エネルギーの商用化と普及に必要なコストについて議論する。また、現在の再生可能エネルギーのコストと、これらのコストがどのように将来に変化し得るかの予測について検討する。研究による学習（研究開発（R&D）費による誘発）と経験による学習（容量拡大プログラムによる促進）の結果として、再生可能エネルギー技術コストの比較的長期にわたる削減が実現する。従ってこのセクションでは、研究開発資金及び観測された学習率についてのこれまでのデータを示している。将来の市場規模と投資需要の評価を可能にするため、再生可能エネルギーにおける投資について、特に気候変動防止の野心的な目標を達成するために何が必要とされるかについてと共に議論し、ベースラインにある程度沿った再生可能エネルギーの投資需要と比較する。本章を通じた一貫性のため、投資の必要性についての議論は、10.3 で調査された 4 つのシナリオに基づいている。

最後に、10.6 では、技術及び緩和コストの一般的基準を超えたコストについての考察を展開する。ここでは気候変動の緩和と持続可能な開発に関連した再生可能エネルギーの普及拡大による社会的及び環境的コストと便益を統合し議論する（シナリオの中でコストが考慮されることはあまり無いが、様々な将来への経路の全体的評価においては重要である）。本セクションでは、第9章の議論に基づき、経済的側面により焦点を当てる。

再生可能エネルギーの技術ポテンシャルとコストに関連する知識と不確実性のギャップは、本章の各セクションの最後で検討する。

考察とテーマの展開のための手引きとして以下の質問を用いた。

- ・ 特に温室効果ガス緩和の道筋への貢献において、再生可能エネルギー源は将来においてどのような役割を担う可能性が高いか？

- ・ 温室効果ガス緩和の経路（エネルギー需要、コスト及び性能、競合する緩和オプション、障壁、社会的要因、相乗便益、政策など）に対して、再生可能エネルギー源の潜在的な普及に対しどのような要因が影響するか？
- ・ 特定の再生可能エネルギー技術、需要部門、地域に関連し、結果的に再生可能エネルギーはどのような役割となるか？
- ・ 文献から示される潜在的な再生可能エネルギー普及の経路は、地球規模及び地域的なレベルにおいて、技術的ポテンシャルとどのように一致するか？
- ・ 再生可能エネルギーの商業化及び普及のコストはどの程度で、再生可能エネルギー普及に対して生じる投資の必要性はどの程度か？
- ・ 社会的及び環境的要因に関連する市場外のコスト及び便益はどの程度か？
- ・ これらすべての疑問に対する可能な回答は、どのくらいの不確実性を伴うか？また、関連するすべての不確実性を考慮した上でも示される確実な調査結果とは何か？

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

このセクションでは、16の地球規模のエネルギー経済及び統合評価モデルから、164の最新の中期～長期シナリオをレビューする。これらのシナリオは、気候変動に対処するために未来はどのように発展するかという、非常に緻密な調査の中に示されているものであり、気候変動における再生可能エネルギー技術の役割に対する現時点での理解への視野を開くものである。

このセクションでの議論は、主に3つの戦略的疑問から誘引されるものである。第一に、様々な二酸化炭素濃度目標と一致するためには、再生可能エネルギーの普及レベルはどの程度になるのか。言い換えれば、二酸化炭素濃度目標と再生可能エネルギー普及との関連はどのようなものか。第二に、どのくらいの期間に、どこで再生可能エネルギーが普及するのか。また再生可能エネルギーの技術によってどのように異なるのか。第三に、緩和コストがどのように再生可能エネルギーの普及や利用可能性、コスト及び性能と関連するか。

（10.2.1と10.2.2は、分析及び検討においてKrey and Clarke（2011）を多く参照しており、その多くはこれに従っている点に留意する。Krey and Clarke（2011）の公表は、本報告書と並行して行われている。ここでは、本セクションで検討された164のシナリオのうち162のシナリオ分析の手法と結果について綿密かつ広範なレビューや検討を行っている）。

10.2.1 シナリオ分析の状態

10.2.1.1 シナリオ手法のタイプ

気候変動緩和のシナリオ文献は、その多くが、シナリオ開発における定量的モデルと定性的な説明という異なったアプローチから成っている（より広範な検討については、Morita et al., 2001、Fisher et al., 2007 参照）。説明と定量的モデルのアプローチを統合するための、いくつかの試みも行われている（IPCC, 2000; Morita et al., 2001; Carpenter et al., 2005）。本セクションにおける検討はもっぱら定量的モデルによって作成されたシナリオによるものである。これらのシナリオは、気候緩和における再生可能エネルギーの役割を理解するための再生可能エネルギーの普及と他の重要なパラメータを提供しており、またこれらはシステムアプローチに従うモデルに基づいているため、明示的かつ形式的に再生可能エネルギー技術、他の緩和技術、及び緩和の性質に影響を与える様々な他の要因の間の相互関連を示している。

Box 10.1: トップダウン対ボトムアップの打破？

以前のIPCC報告書では（Herzog et al., 2005; Barker et al., 2007 など）、定量的シナリオモデルのアプローチは、大きく2つのグループ、トップダウンとボトムアップに分類されていた。この分類は過去においては意味を成したかもしれないが、近年の展開においてはこの分類が徐々に不適切になってきている。重要であるのは(i) 2つの分類の間の変化は継続的なものであり、(ii) 多くのモデルは2つの昔からのやり方（マクロ経済モデル、またはエネルギー工学的モデル）の1つに根差しているが、他のアプローチの重要な特徴も組み込んでおり、いわゆるハイブリッドモデルの類いとなるものである（Hourcade et al., 2006; van Vuuren et al., 2009）。

さらに、トップダウン、ボトムアップという言葉は、状況によるものであり、異なる科学的コミュニティにおいて異なって使用されてきたため、誤解を招く恐れがある。たとえば、以前の IPCC の評価においては、すべての統合モデルのアプローチは、それらのモデルに重大な技術情報が含まれているどうかに関わらず、トップダウンモデルとして分類されていた（van Vuuren et al., 2009）。エネルギー経済モデルのコミュニティにおいては、従来、マクロ経済的アプローチはトップダウンモデルとして、エネルギー工学モデルはボトムアップモデルとして分類されている。しかし、エンジニアリング科学の世界では、発電プラントのような個別の技術だが、実質的には「ブラックボックス」として扱っているようなモデルは、ボトムアップとして考えられているような構成要素を基礎とした視点を持たないからである。このような理由により、このレビューでシナリオを描くために使用されたモデル化の方法は、単に大規模統合モデルと呼ばれている。

このレビューにおけるすべてのシナリオは、定量的モデルを使用して作成されたが、シナリオを構成するために使用されるモデルの細部や構造には大きな相違があることを見るのが重要である。多くの著者は過去、ボトムアップまたはトップダウンどちらかでモデルを分類しようとしてきた。いくつかの理由により（Box 10.1 参照）、このレビューはトップダウン、ボトムアップ分類法のどちらにも依存していない。その代わりに、これらのモデルは一般的に、大規模な統合モデルと呼んでいる。本セクションで検討されたシナリオの重要な手法の性質、及び使用されたモデルは以下のとおりである。（1）シナリオでは、少なくとも集合としては（aggregate scale）、競合するエネルギー技術同士の相互作用がわかるように、エネルギーシステムを統合的視点で考える、（2）意思決定のほとんどが経済的基準に基づいているという点で、シナリオは経済学の基盤を持つ、（3）シナリオは長期的であり規模は地球規模であるが、一部のものは地域の詳細のものである、（4）シナリオには、排出量の成果を必要とする政策的強硬手段を含む、（5）地域及び地球レベルでの再生可能エネルギーの普及レベルを調査するために、シナリオは十分な技術の詳細を有する。また多くのシナリオは、たとえば農業と土地利用を完全に結合したモデルなど、エネルギーシステムを超えた統合的な視点も持っている。

10.2.1.2 定量的シナリオの長所及び短所

シナリオは将来を理解するツールであり、将来を予測するツールではない。シナリオによって、主な推進要因（技術変化率、価格など）やその関係についての一貫して矛盾しない仮定に基づいて、将来がどのように発展していくのかという妥当な説明が示される。本報告書において、シナリオは将来のエネルギー供給への再生可能エネルギーの潜在的貢献の調査方法であり、再生可能エネルギーの発展の要因を特定するための方法である。

本セクションでレビューしたモデルのような、大規模統合モデルを使用して作成されたシナリオは、これらのモデルが他の技術（二酸化炭素回収・貯留を有する化石エネルギー、原子力、及び需要削減オプションのような競合する緩和技術を含む）、その他のエネルギーシステム、その他の関連する人間システム（農業、経済全般など）、気候変動と関連する重要な物理的プロセス（炭素サイクルなど）と主な相互作用を多く得られるという利点がある。それは、再生可能エネルギー技術が導入される環境として機能する。この統合により、内部一貫性の重要性が提供される。さらに、こうしたシナリオによって、少なくとも数十年から 1 世紀にわたる、将来への地球規模の相互関係が考慮される。この時間・空間的な範囲のレベルは、再生可能エネルギーの戦略面を確立するために不可欠である。

評価において対象となるシナリオの設計、仮定、重要点は、非常にばらつきがある。個々の再生可能技術やその他のエネルギー技術、及び再生可能エネルギーのシステム統合の側面のより詳細な説明に基づいているものもあれば、経済全般に関する再生可能エネルギー普及の影響に焦点を当てているものもある。手法、仮定、及び重要点のばらつきは、エネルギーシステムの将来のダイナミクスや、気候変動緩和における再生可能エネルギー源の役割に関する強い不確実性を表している。

Krey and Clarke (2011) において議論されたように、本セクションでシナリオを解釈する際に、2つの注意点に留意されなければならない。第一に、地球規模の大規模統合的な視点を保つことは、詳細な視点とのトレードオフを含んでいる。たとえばモデルは、特に短期的には、国や企業や個人規模でも、意思決定を行う上での強制力を全て示していない。さらに、これらは電力システムモデルでも工学モデルでもないため、たとえば変動性のある発電を電力システムに組み入れるという課題など、再生可能エネルギーの性能や普及に影響を与える多くの詳細な定式化された説明を行っている。これらの精巧さのレベルは、モデル全体によって大幅に違っている。これらを簡約した結果によると、統合された地球規模、及び地域的なシナリオは、中期～長期的な展望、つまり 2020 年以降の場合、非常に有益であるということである。短期的な展望の場合、明示的に既存のすべての政策や規制を扱う市場の展望や短期的な国内分析がより適切な情報源になる。

第二に、シナリオは、定式化された不確実性分析に使用される可能性のあるシナリオの無作為なサンプルとなっていない。シナリオは様々な目的のために作成されたため、「最も信頼出来る推測」のセットではない。シナリオの

大多数は、特に将来の技術的利用可能性の範囲と気候変動に関する国際的措置のタイミングに敏感であり、お互いに関連している。一部のモデル群は、他のモデル群よりも実質的に多くのシナリオを提供している。ここでのレビューのように、様々な研究からのシナリオ収集に基づくシナリオの調和の取れた分析においては、シナリオは本当の意味で無作為のサンプルではないという事実と、シナリオにおけるばらつきがあっても、将来に対するわれわれの知識不足に対する現実的かつ明らかな洞察を提供するという状況が常に発生している。

10.2.2 シナリオにおける再生可能エネルギー源の役割

10.2.2.1 本セクションにおいて検討されるシナリオの概要

本セクションで検討される 164 のシナリオは、再生可能エネルギーのデータのモデリングを行う研究者に対する募集を通じて最近公表されたシナリオから収集された。このレビューは提出されたすべてのシナリオを含んでいる。本評価（表 10.1 参照）における大部分のシナリオは、以下の 3 つの協調的な複数のモデルの研究に由来している。エネルギー・モデリング・フォーラム (the Energy Modeling Forum: EMF) の 22 の国際的シナリオ (Clarke et al., 2009)、気候変動への適応と緩和戦略 (the Adaptation and Mitigation Strategies: ADAM) プロジェクト (Knopf et al., 2009; Edenhofer et al., 2010)、及びヨーロッパにおけるエネルギー及び気候政策に関する報告書 (the Report on Energy and Climate Policy in Europe: RECIPE) 比較 (Edenhofer et al., 2009; Luderer et al., 2009)。これらの 3 例においてはベースラインの仮定、または気候政策などにおいて、関連するモデルを通じて一部のシナリオと特徴が一致している。残りのシナリオは、個々の公表文献に由来する。164 のシナリオは、明らかに最近の文献を包括しているわけではなく、本当の意味で無作為のサンプルとなっていないが、一連のシナリオは、気候変動緩和における再生可能エネルギーの役割を現時点で理解する強力な手がかりとしては、十分に大規模かつ広範囲である。

シナリオ全体では、二酸化炭素濃度は広範囲に及び (2100 年までの大気中の二酸化炭素濃度は 350~1,050ppm、表 10.1 参照)、緩和シナリオと政策無し又はベースラインシナリオの双方が描かれている。シナリオ全体では、2050~2100 年の時間の範囲も取り上げており、シナリオすべての対象範囲は地球規模である。

この議論上特に有益ないくつかのシナリオの特徴がある。まず、これらのシナリオは、統合モデルのコミュニティの最近の研究から作成されている。この研究におけるシナリオのすべては、2006 年あるいはそれ以降に公表された。従って、シナリオは、主要な基礎となるパラメータに対する最新の理解、及び基礎となる人間システムや地球システムのダイナミクスの最近の理解を反映している。これらのシナリオは、(2 番目に良い政策としての) 気候変動に対処する、あるいは限定された技術ポートフォリオ (技術制約のある) に対処する国際的措置に関してあまり楽観視していないシナリオが比較的多く含まれているという点においても有益である。2 番目に良い政策についての仮定は、シナリオ全体でばらつきが大きい、ほとんどは EMF 22 の研究 (Clarke et al., 2009) 及び RECIPE プロジェクト (Edenhofer et al., 2009; Luderer et al., 2009) から引用されており、発展途上国による遅延した措置を記載している。技術の利用可能性は、分析されたシナリオ群全体において均一的には定義されていないが、ここで焦点を当てられている制約のある技術ポートフォリオの研究は、二酸化炭素回収・貯留を有する化石エネルギー、原子力、及び再生可能エネルギーの普及に制約がある。最後に、再生可能エネルギーの普及に関するデータは、IPCC 報告書用に編集されたものなど、大部分の公表された論文または既存のシナリオデータベースのもの以上に詳細レベルで収集された (Morita et al., 2001; Hanaoka et al., 2006; Nakicenovic et al., 2006)。再生可能エネルギー普及の情報には、多くの場合、過去に単にバイオエネルギー及び非バイオマスの再生可能源の観点から収集されたのに対し、ここで検討されたデータにおいては、明らかに風力エネルギー、太陽エネルギー、バイオエネルギー、地熱エネルギー、水力発電、及び海洋エネルギーの普及についての情報も含んでいる。

表 10.1: この分析で検討されたエネルギー経済及び統合された評価モデル。モデルごとのシナリオの合計には大幅なばらつきがある。遅れた関与の緩和への統合 (2 番目に良い政策)、及び二酸化炭素回収・貯留を有する化石エネルギー、原子力、及び再生可能エネルギーの普及への制約やばらつき (制約された技術) によってシナリオはさらに分類されている。出典: Krey and Clarke(2011)を採用し、IEA(2009)及び Teske et al.(2010)を含むよう修正。

モデル	シナリオの数	ベースラインシナリオ	政策シナリオ				比較プロジェクト	引用
			1 番良い政策	制約された技術 ¹	2 番目に良い政策	制約された技術&2 番目に良い政策		
AIM/CGE	3	1	1	0	1	0	---	Masui et al. (2010)
DNE21	7	1	3	3	0	0	---	Akimoto et al. (2008)
GRAPE	2	1	1	0	0	0	---	Kurosawa (2006)
GTEM	7	1	4	0	2	0	EMF 22	Gurney et al. (2009)
IEA-ETP	3	1	2	0	0	0	---	IEA (2008b)
IEA-WEM	1	1	0	0	0	0	---	IEA (2009); 2050 年まで延長, Teske et al. (2010)
IMACLIM	8	1	2	4	1	0	RECIPE	Luderer et al. (2009)
IMAGE	17	3	5	6	0	3	EMF 22 / ADAM	van Vuuren et al. (2007, 2010); van Vliet et al.(2009)
MERGE-ETL	19	4	3	12	0	0	ADAM	Magne et al. (2010)
MESAP/PlaNet	2	0	0	2	0	0	---	Krewitt et al. (2009); Teske et al. (2010)
MESSAGE	15	2	4	7	2	2	EMF 22	Riahi et al. (2007); Krey and Riahi (2009)
MiniCAM	15	1	5	4	3	0	EMF 22	Calvin et al. (2009)
POLES	15	4	3	8	0	0	ADAM	Kitous et al. (2010)
ReMIND	28	4	6	14	4	0	ADAM / RECIPE	Luderer et al. (2009); Leimbach et al. (2010)
TIAM	10	1	5	0	4	0	EMF 22	Loulou et al. (2009)
WITCH	12	1	4	4	3	0	EMF 22 / RECIPE	Bosetti et al. (2009); Luderer et al. (2009)
合計	164	27	48	64	20	5		

注:

¹ 制約された技術シナリオの大多数において、個々の技術または技術群の普及は、実際のところ制約されてきたが、この分類に含まれる数個のケースにおいて、バイオエネルギーの潜在能力は、モデルの既定の仮定と比較して拡大した。

表 10.2: 2100 年における二酸化炭素濃度レベルに基づき本セクションで検討された 164 のシナリオの分類、遅効性の緩和への統合（2 番目に良い政策）、及び二酸化炭素回収・貯留を有する化石エネルギー、原子力、及び再生可能エネルギーの普及への制約やばらつき。二酸化炭素濃度分類は、IPCC の第 4 次評価報告書（AR4）、第 3 作業部会における分類と一貫して定義されている（Fisher et al., 2007）。カテゴリ V 及びそれ以上はここには含まれておらず、カテゴリ IV は 570ppm から 600ppm に拡大されていることに留意する。なぜなら、すべての安定化シナリオは、2100 年において二酸化炭素 600ppm 以下であり、最低のベースラインシナリオは、2100 年までに 600ppm をわずかに超えるレベルの濃度に達するからである¹。データは、Krey and Clarke（2011）から引用し、2 つの追加的シナリオを含むために修正。

	2100 年までの二酸化炭素濃度 (ppm)	シナリオの数	政策シナリオ			
			一番良い政策	制約された技術	2 番目に良い政策	制約された技術 & 2 番目に良い政策
ベースライン	>600	27	---	---	---	---
カテゴリ IV	485~600	32	11	13	6	2
カテゴリ III	440~485	63	20	29	11	3
カテゴリ II	400~440	14	7	6	1	0
カテゴリ I	<400	28	10	16	2	0

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

気候緩和における再生可能エネルギーの役割に関する基本的な疑問は、再生可能エネルギー普及レベルと長期的な気候・濃度、またはその他の気候関連目標がどの程度緊密な相関関係にあるかということである。再生可能エネルギー普及と気候目標との関係を理解する背景として、過去のシナリオ文献と整合性を保ちながら（Fisher et al., 2007）、シナリオ全体において化石燃料使用及び工業活動から排出される二酸化炭素の道筋と、長期的な二酸化炭素濃度の目標の間には強い相関関係があることをまずは観測することが重要である（図 10.1、色分けされたカテゴリの正確なグループ分けにより説明）。この相関関係が重要な理由は、地球規模の炭素循環の基礎を成す主要な物理的なプロセスの仮定におけるシナリオ全体の類似性である。排出の道筋における変化はいずれも、炭素循環に関する仮定同様、緩和シナリオにおいて時間とともに排出の割り当てを決定する要素に関する仮定において残っている違いを反映する。これには、技術的改善率、経済的成長など一般的に排出の基礎となるドライバー、時間とともに排出割り当てを行うための手法のアプローチ（割引率、オーバーシュートや上限の道筋の選択など）が含まれる。

再生可能エネルギーの普及と、二酸化炭素濃度目標との関係は、かなり脆弱である。一方においては、再生可能エネルギーの普及は通常、特に今後数十年間あるいはそれ以降において、二酸化炭素濃度目標の過酷さを伴い増加する。言い換えれば、他のすべてが等しければ、より厳しい二酸化炭素濃度目標が通例、再生可能エネルギーの普及につながる。同時に、いかなる二酸化炭素濃度目標に対しても、再生可能エネルギーの普及レベルには非常に大きなばらつきがある。このばらつきは、再生可能エネルギーが気候緩和において担うであろう明確な役割に関する不確実性の反映であり、再生可能エネルギー普及が、ある特定の気候目標にどの程度関連しているのかについて、シナリオ開発者の間で合意が得られていないことを説明している。

¹ 二酸化炭素濃度安定化カテゴリの定義は、AR4 で使用されている定義と一致している。Fisher et al. (2007) におけるセクション 3.3.5 では、AR4 で評価された大部分のシナリオは、2100～2150 年における濃度を安定させるが、一方で、ここで使用される定義は、2100 年における二酸化炭素濃度に基づくということが説明されている。2100 年以降の安定化は通常、高い二酸化炭素濃度目標を持つシナリオ、つまり、ここでは評価されていないカテゴリ V 以上のものと、最終目標に到達する前に、濃度における一時的なオーバーシュートを示すカテゴリ I の非常に低い安定化シナリオに当てはまる。後者は、下方から抑制されないため、カテゴリに課せられた課題に影響を与えない。さらに、二酸化炭素濃度は、結果としてモデル全体のばらつきにつながる炭素循環に関する仮定の影響を受けるということに、留意すべきである。

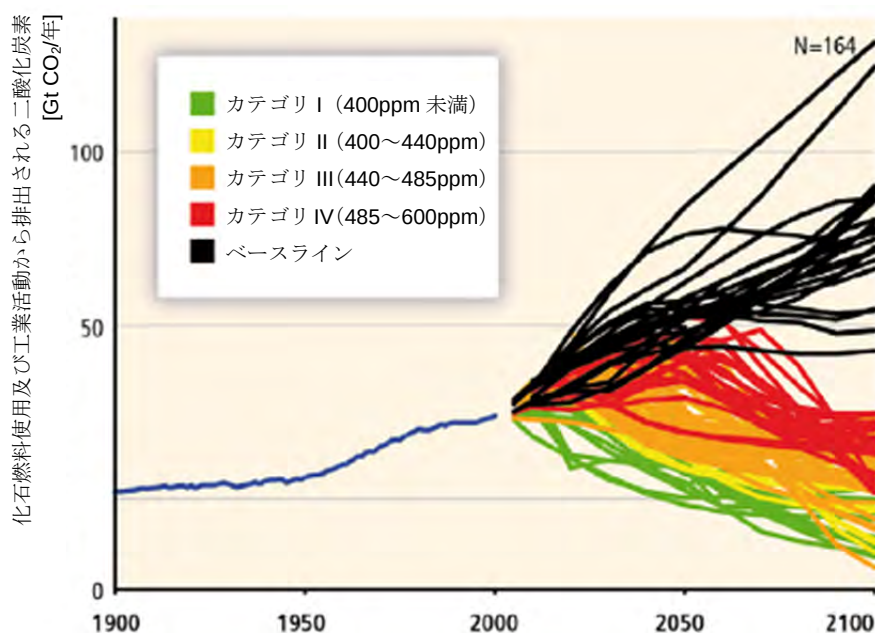


図 10.1: 過去の地球規模の化石燃料使用及び工業活動から排出される二酸化炭素、及び長期的な 164 個のシナリオからの予測。Nakicenovic et al. (2006) からの過去の排出量データを有する IPCC の AR4 及び第 3 作業部会 (WGIII) (Fisher et al., 2007) で定義されているように、色分けは、2100 年における大気中の二酸化炭素濃度のカテゴリに基づく。図やデータは、Krey and Clarke (2011) から引用し、2 つの追加的シナリオを含むために修正。

同時に、このようなばらつきにもかかわらず、再生可能エネルギーの普及の絶対的規模は、シナリオの大多数における今日の絶対的規模より著しく大きいことに留意することも重要である。2008 年の、直接等価における地球規模の再生可能な一次エネルギー供給は、63.6EJ/年 (IEA, 2010d) ² であり、伝統的バイオマスは 30EJ/年を超える。対照的に、2030 年までには、多くのシナリオが、再生可能エネルギーの普及が今日と比較して 2 倍もしくはそれ以上になることを示している。ほとんどのシナリオにおいて、これに付随して伝統的バイオマスが減少し、近代的エネルギー源が相当な成長を示す。2050 年までには、ほとんどのシナリオにおける再生可能エネルギーの普及レベルは、100EJ/年を超え (中央値 173EJ/年)、多数のシナリオにおいて 200EJ/年に達し、一部の事例では 400EJ/年を超えている。伝統的バイオマスの使用がほとんどのシナリオにおいて減少していることを考慮すれば、シナリオは、(伝統的バイオマス以外の) 再生可能エネルギー生産がほぼ 3 倍から 10 倍以上の範囲で増加することを示す。同様に、再生可能エネルギーが地球規模の一次エネルギー供給に占める割合は、シナリオ間でかなり違っている。シナリオの半分以上が、2030 年において、再生可能エネルギーの貢献が、一次エネルギー供給の 17%を超え、2050 年においては 27%超に達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では、2030 年では約 43%、2050 年では 77%に達している。2100 年における再生可能エネルギーの普及レベルは、これらよりも相当高く、今世紀にわたる継続的な成長を反映している。

事実、再生可能エネルギーの普及は、多くのベースラインシナリオにおいて、つまり明確な気候政策を持たないシナリオにおいてかなり進んでいる。2030 年までに、最大約 120EJ/年の再生可能エネルギー普及レベルが予測されており、2050 年では多くのベースラインシナリオが 100EJ/年超に到達し、一部の事例では最大 250EJ/年に達する。これらの規模の大きい再生可能エネルギーのベースライン普及は、エネルギー消費は今世紀を通して大幅に増加しつづけるという仮定、及び気候政策がない場合に、再生可能エネルギー技術を多くの用途において経済的に競争力を持つように変える仮定によって直接生じる。

² 使用された様々な一次エネルギーの計算法のために、IEA によって公表された (及び図 8.2 で示された) 65.6EJ の値とわずかな差があることに留意する。このテーマについての追加的背景については、第 1 章の Box 1.1、1.2.1、及び Annex A.11.4 参照。

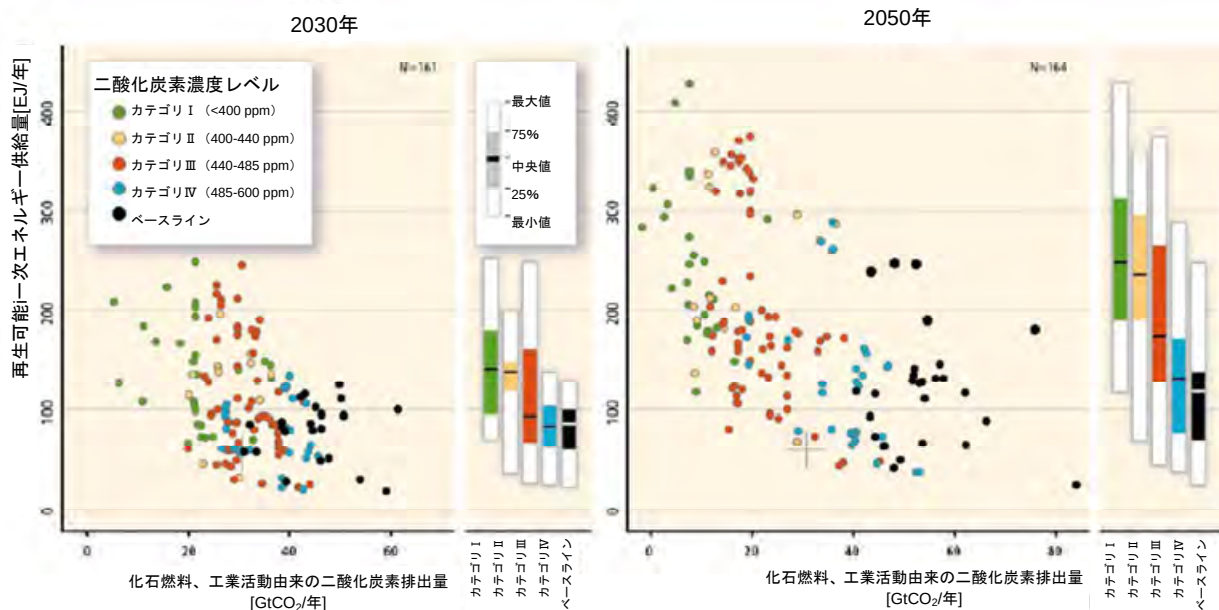


図 10.2: 164 の長期シナリオから得られた、2030 年及び 2050 年における化石燃料と工業由来の二酸化炭素排出量と比較した、世界の再生可能エネルギー供給量（直接等価法）。色別の分類は、2100 年の大気中の二酸化炭素濃度レベルのカテゴリに基づく（Fisher et al., 2007）。分布図の右側にある図は、大気中の二酸化炭素濃度の各カテゴリにおける再生可能エネルギーの普及レベルを示す。黒の細線は中央値、棒内の着色部分は四分位範囲（25～75%）、白の棒の両端は全ての評価対象のシナリオの全体の範囲を示す。十字は 2007 年における値を示す。2 つのデータセットのピアソンの相関係数は、-0.40（2030 年）と -0.55（2050 年）である。評価対象のシナリオは 164 あるが、2030 年の結果はデータ報告の都合上 161 のシナリオのみである。再生可能エネルギーの普及レベルが現在を下回るのは、モデル結果と伝統的バイオマスの報告の差異による。図及びデータは、Krey and Clarke（2011 年）から引用し、2 つの追加的シナリオを含むために修正。

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

10.2.2.2 では、特定の二酸化炭素濃度目標に対するシナリオ全体にわたる再生可能エネルギーの普及レベルの大きなばらつきが実証された。このセクションでは、主にエネルギーシステムの発展という視点からこのばらつきを調査する。次に、10.2.2.4 では、その他の低炭素エネルギー供給源との競合性を調査する。

再生可能エネルギー普及レベルにおけるばらつきの意味を解明する第一歩は、一次エネルギー消費と 164 のシナリオ全体の長期的な気候目標との間には弱い相関関係しかないことに留意することである（図 10.2）。たとえば、440ppm 未満のレベルで大気中の二酸化炭素濃度が安定化するシナリオでは（カテゴリ I 及び II）、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、2030 年では最高値は 252EJ/年、2050 年では最高 428EJ/年に到達した。これらのレベルは、ベースラインシナリオにおける対応する再生可能エネルギー普及レベルを大幅に上回っており、一方では、二酸化炭素安定化の各カテゴリにおける再生可能エネルギー普及の範囲は広範であることを認められなければならない。その他のすべてが同等であるならば、二酸化炭素緩和は、地球規模のエネルギー消費全体に下向きの圧力をかけるが³、この効果の規模はシナリオ全体でかなりばらつきがある。そして、多くの場合非常に小さいため、シナリオにおける一次エネルギー消費総量と長期的な気候目標（図 10.3）との相関関係は、二酸化炭素排出量と長期的な気候目標（図 10.1）との相関関係よりはるかに弱い。言い換えると、一次エネルギー消費に関する緩和効果は、モデル及びシナリオ全体でばらつきがあるということになる。さらに、緩和に基づく一次エネルギー消費のばらつきは、経済成長や関連するエネルギーのサービスに対する需要など、ベースラインの一次エネルギー消費を促す、エネルギー消費の基本的なドライバーに関する仮定におけるばらつきに大きな影響を受ける。ばらつきは、これらの基本的なドライバーについての統一の見解の不足に起因する。これらは、今日いかなる程度の確実性を持ってしても理解され得ない影響力である。

³ これが必ずしも真実でないことに留意する。気候政策に対応した大規模な帯電が原因となり一次エネルギーが増加するシナリオが存在する（Loulou et al., 2009 など参照）。

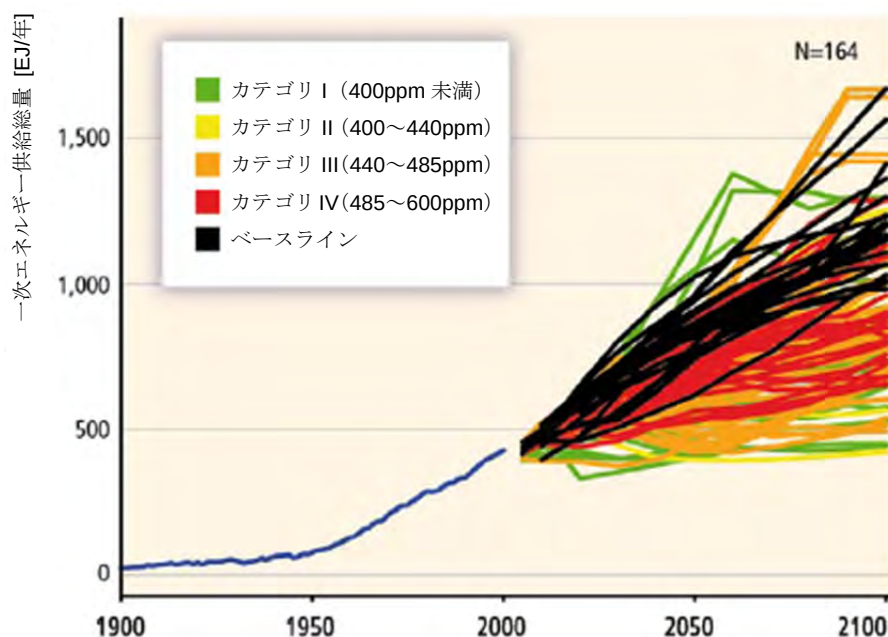


図 10.3: 過去の地球規模の一次エネルギー供給総量（直接等価）及び 164 の長期シナリオからの予測。色分けは、Grubler（2008 年）の過去のデータを有する、2100 年の大気中の二酸化炭素濃度レベルのカテゴリに基づく（Fisher et al., 2007）。図とデータは、Krey and Clarke（2011 年）から引用し、2 つの追加的シナリオを含むために修正。

一次エネルギー総量におけるばらつきとは対照的に、無制限に放出する化石エネルギーの生産（二酸化炭素回収・貯留を持たない化石源）は、将来におけるいかなる時点の二酸化炭素排出量によっても厳しく制約されている（図 10.4）。長期的な気候目標を満たすためには、エネルギー及びその他の人為的な源からの二酸化炭素排出量における削減が必要となる。重要な地球システム、中でも注目すべきは地球規模の炭素循環であり、これらが特定の長期的目標達成に関連する二酸化炭素排出量レベルを制限する。同様に、これによって、無制限に放出する化石エネルギー源から生成され得るエネルギー総量が抑制される。二酸化炭素排出量の一定レベルに関連する無制限に放出する化石エネルギーにおける残存するばらつきにつながる要因には、たとえば化石源間の異なる炭素含有量を交換する能力（天然ガスは、エネルギー原単位につき石炭よりも炭素含有量が少ない）と、二酸化炭素回収・貯留を有するバイオエネルギーを使用するか、または炭酸ガス吸収森林の拡充を切り替えることによる負の排出を達成する可能性（2.6.3.3 参照）が含まれる。二酸化炭素排出量と長期目標との関係性は、異なる基礎となるモデル構造、技術及び排出ドライバーに関する仮定、及び炭素循環などの物理的システムの説明の結果として、時間とともに起こる排出量削減の時間経路における相違の影響を受けている。

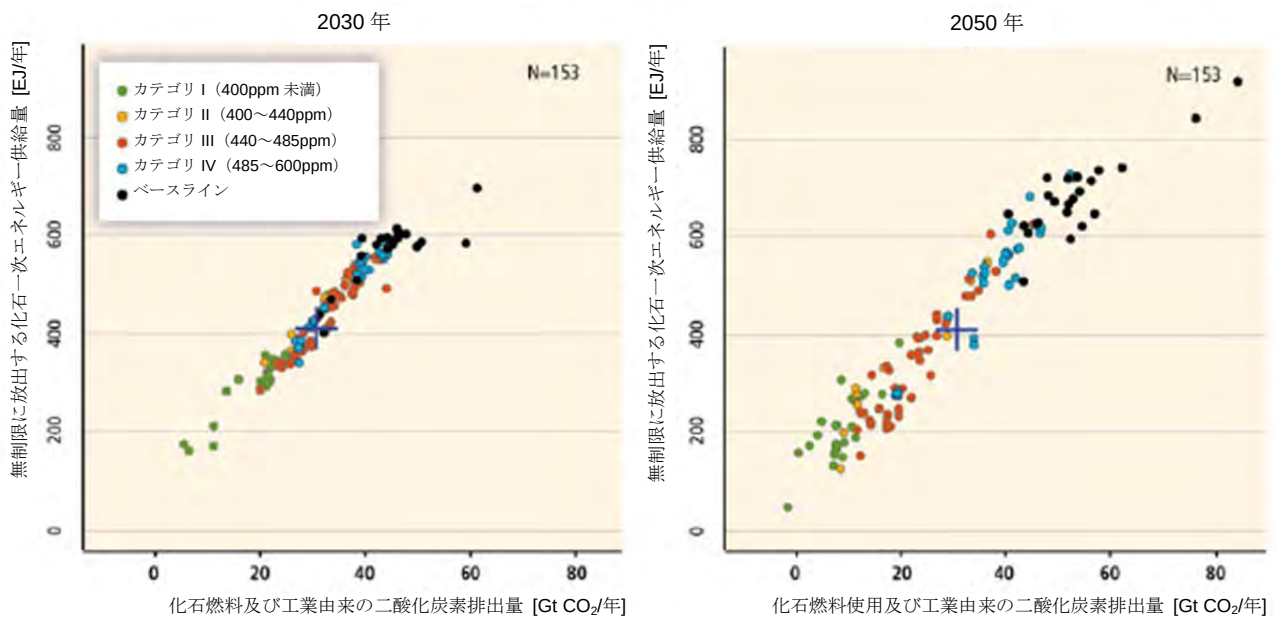


図 10.4: 化石燃料及び工業由来の二酸化炭素排出量を関数とし、2030 年及び 2050 年における 164 の長期シナリオによる世界の化石燃料を無制限に放出した場合の一次エネルギー供給量（直接等価法）。色別の分類は、2100 年における大気中の二酸化炭素濃度レベルのカテゴリに基づく（Fisher et al., 2007）。青十字は、2007 年における値を示す。2 つのデータセットのピアソンの相関係数は 0.96（2030 年）及び 0.97（2050 年）である。評価されたシナリオは 164 あるが、データ報告の都合上、ここで示された 2030 年及び 2050 年の結果では 153 シナリオの結果のみを使用している。図及びデータは、Krey and Clarke（2011 年）から引用し、2 つの追加的シナリオを含むために修正。

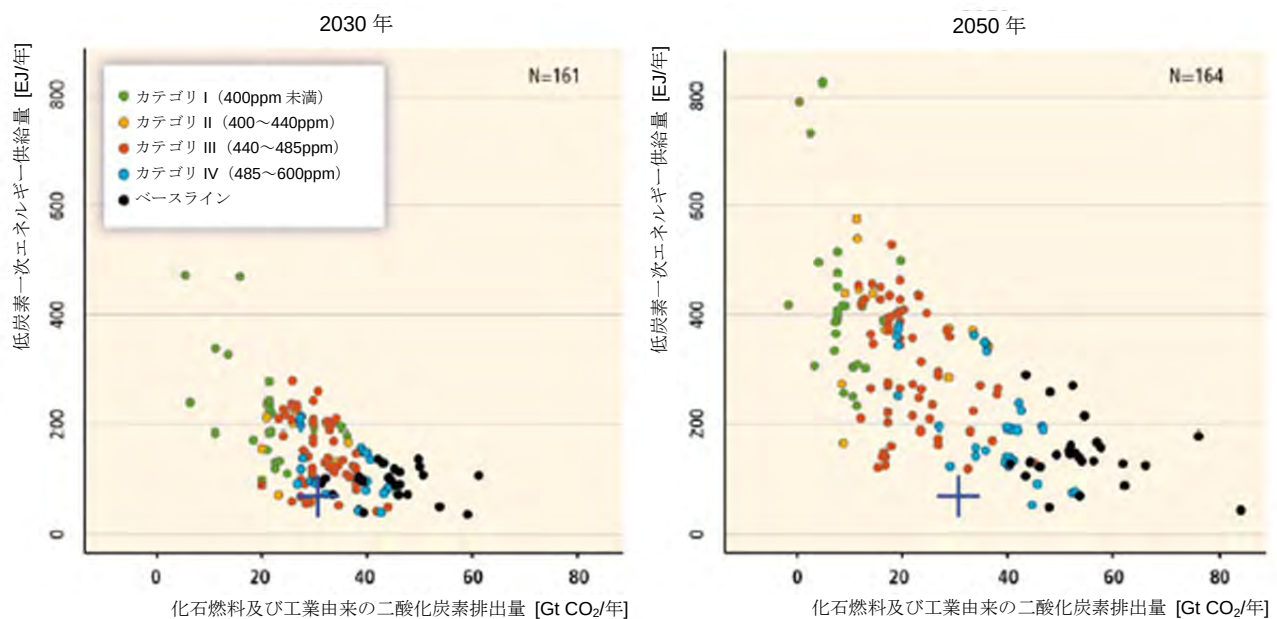


図 10.5: 化石燃料及び工業由来の二酸化炭素排出量を関数とし、2030 年及び 2050 年における 164 の長期シナリオにおける世界の低炭素の一次エネルギー供給量（直接等価法）。低炭素のエネルギーとは、再生可能エネルギー、二酸化炭素回収・貯留を備えた化石エネルギー、原子力エネルギーを指す。色別の分類は、2100 年における大気中の二酸化炭素濃度レベルのカテゴリに基づく（Fisher et al., 2007）。青十字は、2007 年における値を示す。2 つのデータセットのピアソンの相関係数は、-0.60（2030 年）及び -0.68（2050 年）である。評価されたシナリオは 164 あるが、データ報告の都合上、ここで示された 2030 年の結果では、161 シナリオの結果のみを使用している。図及びデータは Krey and Clarke（2011 年）から引用し、2 つの追加的シナリオを含むために修正。

再生可能エネルギーは、3つの主要な低炭素供給オプションのうちの1つにすぎない。他の2つのオプションは、原子力、及び二酸化炭素回収・貯留を有する化石エネルギーである。低炭素エネルギーへの需要（3つのオプションすべての総計）は、単純にここでの議論に照らし合わせると、一次エネルギーの総需要量と二酸化炭素を無制限に放出した化石エネルギー生産量の相違と考えられる（図 10.5）。つまり、気候変動の制約上、二酸化炭素を無制限に放出した化石エネルギーによるエネルギー供給が出来なくなっても、低炭素エネルギーの利用かエネルギー消費の削減かの、いずれかの方法によって供給せざるを得ない。上記で議論されたように、緩和による需要応答が、ここで調査されたようにシナリオセット全体において一般的に需要の持つ変動性によって引き起こされることを考えると、結果としては、二酸化炭素濃度目標及び低炭素エネルギーの間の強固な相関関係はあっても（Clarke et al., 2009; O'Neill et al., 2010 も参照）、二酸化炭素濃度のいずれの目標についても、依然としてかなり大きい低炭素エネルギーについての変動性がある。したがって、再生可能エネルギー、原子力、及び二酸化炭素回収・貯留を有する化石エネルギーの間の競合は、再生可能エネルギーの普及及び二酸化炭素濃度目標との関係に更なる変動性をもたらすことになる（図 10.2）。

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

このセクションでは、再生可能エネルギー及びその他の2つの低炭素供給オプション（原子力及び二酸化炭素回収・貯留を有する化石エネルギー）との競合について取り上げる。164のシナリオの大部分は、これらの2つのオプションのうちの1つまたは両方の普及に対する明らかな限界によって特徴づけられている。制約された二酸化炭素回収・貯留シナリオでは、新たな、または既存の発電プラント、化石、バイオエネルギーを投入（精製）する他のエネルギー変換施設、いずれかに二酸化炭素回収・貯留を組み込むためのオプションを排除しただけであった。制約された原子力のシナリオは3つの形を持つ。2つのアプローチでは、既存の発電プラントが時間と共に閉鎖することを可能にし、あらゆる新規の導入を許可しないことで、今日のレベル以下での原子力の普及を維持するか、もしくは閉鎖の影響を相殺するような耐用年数の延長又は新規の導入のどちらかによって、現在のレベルの原子力の普及を完全に維持する。多くのシナリオで適用されている3つ目のオプションは、ベースラインレベルで、緩和シナリオにおける原子力普及を時間と共に維持することである。この3つめのカテゴリを解釈する上での問題点は、原子力がベースラインシナリオ全体にわたって大幅に異なる次元まで拡大し、比較可能性が制約されることである（詳細については図 10.6 の説明参照）。

その他のすべての事柄が同じであるならば、競合するオプションが利用不可能であるか制約されている場合、再生可能エネルギーの普及は拡大する（図 10.6）。2つの効果は同時に、再生可能な一次エネルギーの割合の増加に貢献する。まず、競合するオプションが少なくなり、再生可能エネルギーは、低炭素エネルギーの割合の大部分を占める。次に、最終消費オプションが経済的に魅力的になり、オプション不足による緩和コストの上昇が、エネルギー消費総量に下向きの圧力をかける。これらの2つの強制力の相対的な影響はモデル全体でばらつきがある。

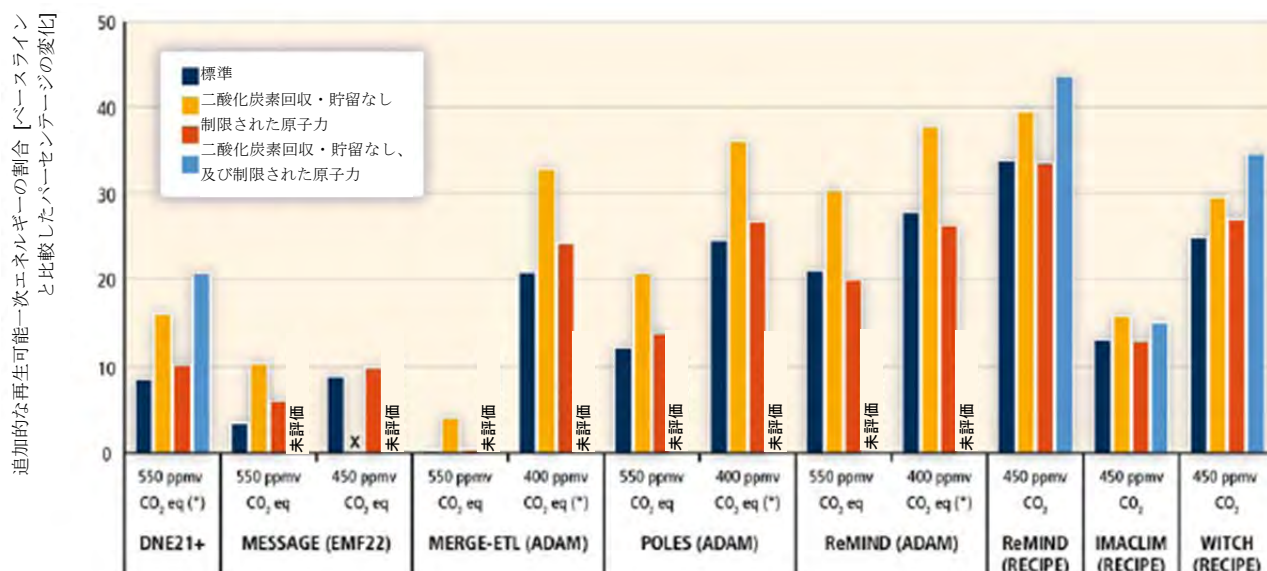


図 10.6: ベースラインシナリオと比較した、特定の技術的制約シナリオにおける世界の再生可能一次エネルギーの割合の増加（2050 年、直接等価法）。「X」は、シナリオの各濃度レベルが未達成だったことを示す。「限定的な原子力」と「二酸化炭素回収・貯留なし」の定義は、モデル間で異なる。DNE21+、MERGE-ETL、POLES の各シナリオは、様々な速度での原子力の段階的撤廃を示す代表例である。MESSAGE シナリオでは普及を 2010 年までに限定している。ReMIND、IMACLIM、WITCH の各シナリオは、原子力の貢献を各ベースラインシナリオに限定しているため、現在の普及レベルに比べて大幅な拡大をさらに暗示している。REMIN (ADAM) の 400ppmv・

二酸化炭素回収・貯留なしのシナリオでは、二酸化炭素貯留の累積量が 120Gt CO₂ に制限されるシナリオを参照している。MERGE-ETL の 400ppmv・二酸化炭素回収・貯留なしのシナリオでは、二酸化炭素貯留の累積可能量は約 720Gt CO₂ としている。POLES の 400ppmv CO₂/eq・二酸化炭素回収・貯留なしのシナリオは実現不可能だったため、ここで示すシナリオの各濃度レベルは約 50ppm CO₂ 下げられたものである。DNE21+シナリオは、2050 年までの排出の経路に基づき 550ppmv CO₂/eq と見積もっている図は Krey and Clarke（2011 年）から引用。

同時に、技術の競合は、再生可能エネルギー普及レベルに影響を与える要因の 1 つに過ぎないことを再び強調することが重要である。技術の競合は、それだけで様々な緩和レベルに関連した再生可能エネルギーの普及におけるばらつきを説明するものでない。ここまでの議論によって、いかなる緩和レベルにおいても、再生可能エネルギー技術自体の技術的特徴と共に、エネルギー需要の基本的なドライバー（経済的成長、人口増加、経済成長のエネルギー強度、及びエネルギー最終消費の改善）も再生可能エネルギーの普及の不可欠なドライバーであることを明確にするべきである。にもかかわらず、環境的、社会的、または国家安全保障の障壁が、二酸化炭素回収・貯留を有する化石エネルギーと原子力双方を大幅に抑止する場合、再生可能エネルギーが、低炭素エネルギーの大部分を供給しなければならないということを想定することが適切となる（図 10.7）。これらの非再生可能の低炭素エネルギー供給オプションの利用可能性とは関係なく、大部分のシナリオにおいては、2050 年までの低炭素エネルギーを供給するために原子力及び二酸化炭素回収・貯留を有する化石エネルギーよりも再生可能エネルギー源に大きく依存している（図 10.7 の左上の三角印を参照）。これらのオプションのうち 1 つだけに限定されている場合、低炭素エネルギーである再生可能エネルギーの普及の割合は通常、1 つのオプションに限定されていない場合よりも高いが、この効果の程度は、再生可能エネルギーの不足を補うこれらの中の他のオプションの能力に左右される。多くのモデル化の方法論において、二酸化炭素回収・貯留を有する化石エネルギーと原子力は、ベースロード発電に最も近い代替物であると考えられている。その 1 つが利用不可能となると、それが提供してきた発電量の大部分が、再生可能エネルギー源よりむしろもう一方によって代わりにより供給される。これは、太陽エネルギー、波エネルギー、及び風力エネルギーが変動しやすいためである。同時に、貯水池水力発電、バイオエネルギー、及び地熱エネルギーは出力調整可能なベースロードであることに留意することが重要である（8.2.1）。

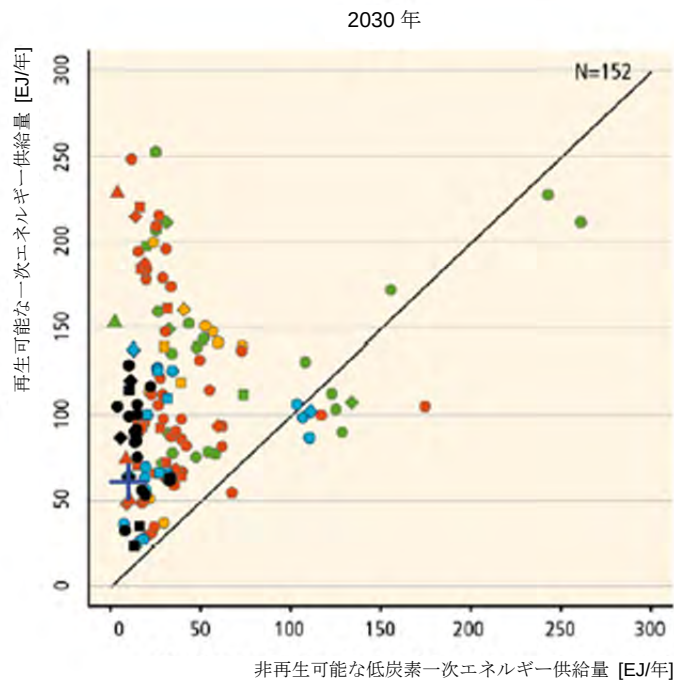
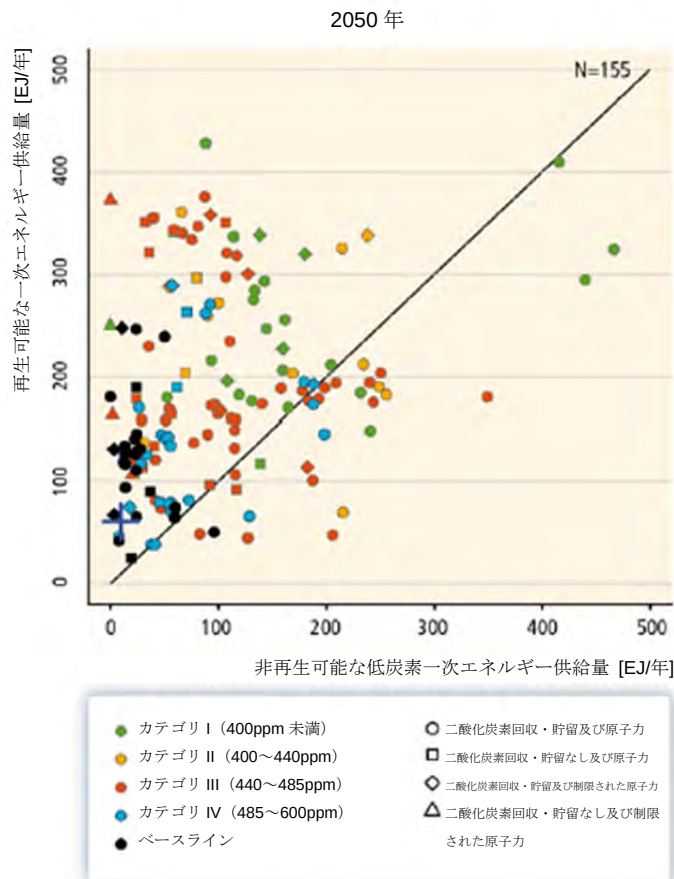


図 10.7: 2030 年及び 2050 年において非再生可能低炭素エネルギーの一次エネルギー供給量（直接等価）に対して想定される地球規模の再生可能エネルギーの一次エネルギー供給量（直接等価）。色分けは、2100 年における大気中の二酸化炭素濃度レベルのカテゴリに基づいている（Fisher et al., 2007）。これらの形状は、競合する低炭素エネルギー供給オプション、二酸化炭素回収・貯留を有する化石エネルギー、及び原子力の利用可能性への制約を特定する。原子力を制限するシナリオには、原子力の段階的廃止、新たな原子力の生産量への制約、原子力生産がベースラインレベルにまで抑制されているシナリオも含まれていることに留意する。青の十字線は、2007 年における関係を示す。データ報告の理由により、164 すべてのシナリオに対して、152 及び 155 のシナリオのみがここに示された 2030 年及び 2050 年の結果に含まれている。図及びデータは、Krey and Clarke (2011 年) から引用し、2 つの追加的シナリオを含むために修正している。



制約のある技術シナリオからの基本的な疑問は、低い安定化目標を達成するために、1 つ以上のエネルギー供給オプションが今世紀「必要である」のかどうか、つまり、これらの技術が利用不可能である場合でも、目標は依然として到達出来るのかどうか、ということである。この問題を探る 1 つの方法は、制限された技術で試みられたが、関連したモデルによって作成され得ないシナリオを特定することである。これらの試みは、ほとんどの場合、本当の意味で物理的な実現可能性の指標として考慮されていないが、感覚的には限られた技術オプションにより安定化目標を達成することは困難である（Clarke et al., 2009）。これら試みられたシナリオは、複雑なストーリーを物語っている。一部の場合、モデルは原子力や二酸化炭素回収・貯留なしで安定化を達成することができなかったものもあれば、これらのシナリオを作成することができたものもある（図 10.6）。いくつかの研究において、再生可能

エネルギーの普及に対する制限が、モデルの安定化目標達成を妨げることを示している（図 10.11 など参照）。その他の研究は、バイオエネルギーの形で再生可能エネルギーと二酸化炭素回収・貯留との組み合わせが、低い安定化目標を、負の排出によってかなり簡単に達成できることがされた（Azar et al., 2006; van Vuuren et al., 2007; Clarke et al., 2009; Edenhofer et al., 2010; Tavoni and Tol, 2010）。

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

個々の技術の普及の特徴にも大きな違いがあり、（図 10.8 及び 10.9）いくつかの面については注視に値する。まず、第一に普及の絶対的な尺度は、技術間で大きく違っていることである。バイオエネルギー、風力エネルギー、及び太陽エネルギーは通常、水力発電及び地熱エネルギーより高い成長の普及を示している、そのばらつきは、水力発電及び地熱エネルギーに関係のある風力及び太陽エネルギーの最低限の普及が明らかなシナリオがある場合には大きくなる。なお、わずかなシナリオにだけ示されている海洋エネルギーについてはここでは検討しない（10.2.4 も参照）。さらに普及度については、他の技術と比較して一部の技術でさらに大きな相違が見られる。例えば水力発電普及におけるばらつきは、地熱の普及におけるばらつきよりも少ない。地熱エネルギーの高い普及率のシナリオは、おそらく地熱井涵養システムや地熱ヒートポンプの広範な用途からの競争力のある電力を想定している（4.2 及び 4.8 参照）。図 10.8 及び 10.9 において、相対的に他の再生可能エネルギー技術に比べたバイオエネルギーの数を解釈する際には注意を要する。この分析は直接等価計算法を利用して行われている。バイオエネルギーは、エタノールなどの燃料や電力としての用途で利用される場合も、変換前の値で計算されている。これに対し、他の技術は一般的には発電を行っており、この場合には発電量として計算されている。もしこれらを代替する方法によって一次エネルギーに変換するのであれば、平均的な化石燃料の電力換算効率によって、これらは概ね 3 倍程度大きくなるだろう。

次に、普及の時間スケールも様々な再生可能エネルギー技術によって異なり（図 10.8 及び 10.9）、その大部分は技術の相対的成熟度についての現在の普及レベルと（もっぱら）関連する想定との違いを示すものである。たとえば、水力発電はシナリオ全体にわたってごくわずかな成長しか認められない（今日と比較して 2050 年までの中央値の場合では 1.7 倍の増加、最大値のシナリオにおいても 3 倍の増加）。風力発電は、今日における低い普及レベルから、より急速に成長している。太陽エネルギーは、今日、また多くのシナリオにおいては 2020 年からの最小値から普及が始まっており、最も急速に成長する。実際、太陽エネルギーにおける成長の大部分は、2030 年以降に起こり、大規模な太陽エネルギーが他のオプションよりも長期的なオプションであるというシナリオ間での一般的な一貫性を示している。地球規模のバイオエネルギー生産は、バイオマスの伝統的使用（2008 年におけるバイオエネルギー消費の 30EJ/年以上、つまり約 3 分の 2）と同様、セルロースバイオマスによるアプローチなどより先進的な方法も含んでいる。伝統的バイオマス使用は通常、経済的發展が進むと減ると考えられており、バイオエネルギーの増加は主に近代的な利用であることを示している。一部の技術は他の技術よりも気候政策によってより明確に影響を受けているように思われることに留意することもまた有益である。たとえば、太陽エネルギーの普及レベルは、その他のシナリオにおいてよりも、最も野心的な気候シナリオにおいて著しく高い。すべての技術においてこの効果が認められるが、その程度は様々である。

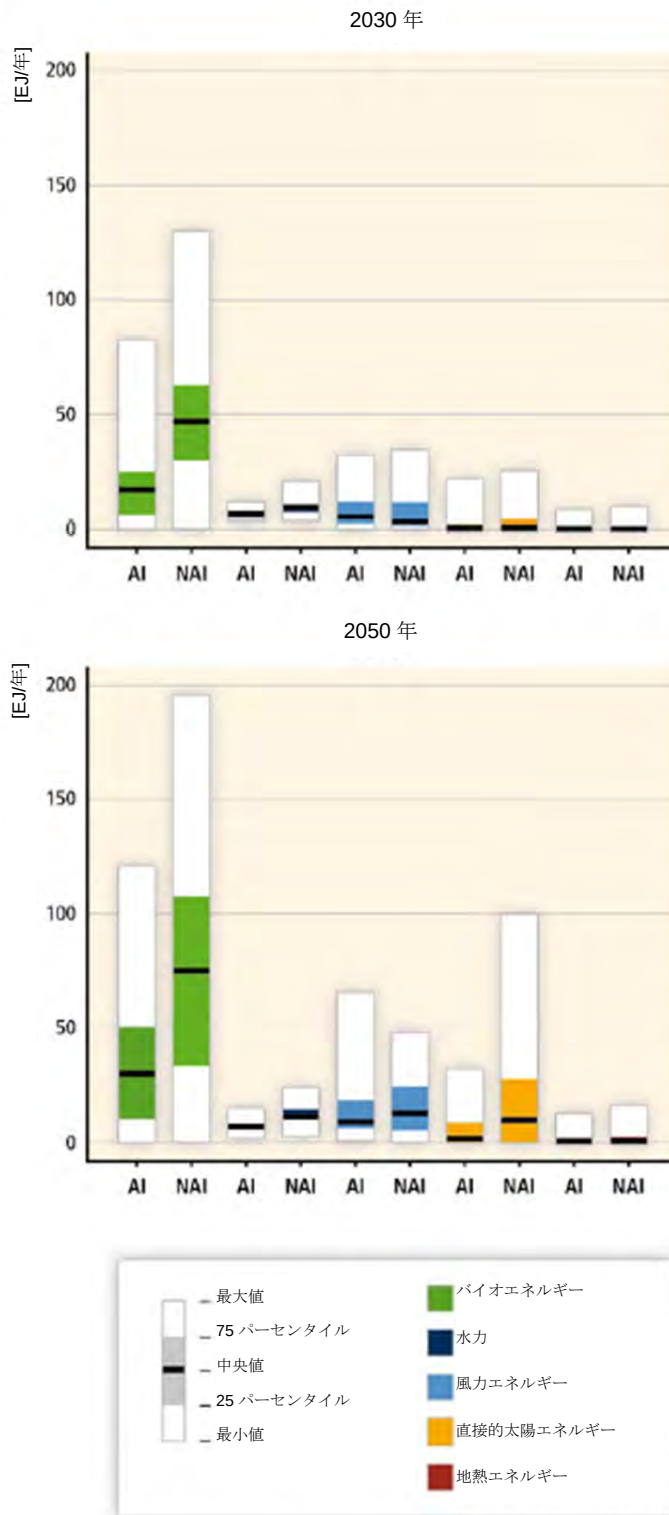


図 10.8: 164 の長期的シナリオにおける Annex I 国 (AI)、非 Annex I 国 (NAI) におけるエネルギー源別の地球規模の再生可能エネルギーによる一次エネルギー供給量（直接等価法による）（2030 年と 2050 年）。黒の細線は中央値、棒内の着色部分は四分位範囲（25～75 パーセンタイル）、白の棒の両端は全ての評価対象のシナリオ全体の範囲を示す。エネルギー源によって、これらの数字の元になるシナリオの数は 122～164 と異なっている。海洋エネルギーはわずかなシナリオでのみ示されており、不十分であるため同じグラフは作成できないことに注意。情報を解釈する価値はあるものの、164 のシナリオは伝統的な統計分析に従った無作為抽出を代表するものではないことに留意。（バイオエネルギー供給が他のエネルギー源の供給量を一見上回っている理由の 1 つとして、本図では一次エネルギーを表示するために、直接等価法が使用されることがある。バイオエネルギーは、エタノールなどの燃料や電力などに変換される前に計算されている。他の技術は主に（100%ではないが）発電に用いられ、発電量に基づき計算される。代替法に基づき、直接等価法でなく一次等価法が用いられた場合、非バイオマスの再生可能エネルギー源によるエネルギー生産は上図の 3 倍になる）。図及びデータは、Krey and Clarke (2011 年) から引用し、2 つの追加的シナリオを含むために修正。

最後に、シナリオにおいては一般的には再生可能エネルギーの普及は Annex I 諸国よりも時間と共に非 Annex I 諸国のほうが拡大していることが示されている（図 10.8 及び Krey and Clarke, 2011）。すべてのシナリオにおいては、経済的及びエネルギー需要の拡大は、Annex I 諸国よりも非 Annex I 諸国において大きいという仮定が含まれている（Clarke et al., 2007, 2009）。この結果、非 Annex I 諸国がベースラインあるいは政策がない場合において二酸化炭素排出量のより多い割合を占めてしまうため、時間が経つとともにより多くの排出量削減を行わなければならない。他のすべてが同じ条件であるならば、削減量の拡大は、再生可能エネルギーを含む低炭素供給オプションのより広範な普及を意味している。従って、シナリオが一般的に非 Annex I 諸国地域においてより広範な再生可能エネルギーの普及レベルを示していることは、驚くに値しない。

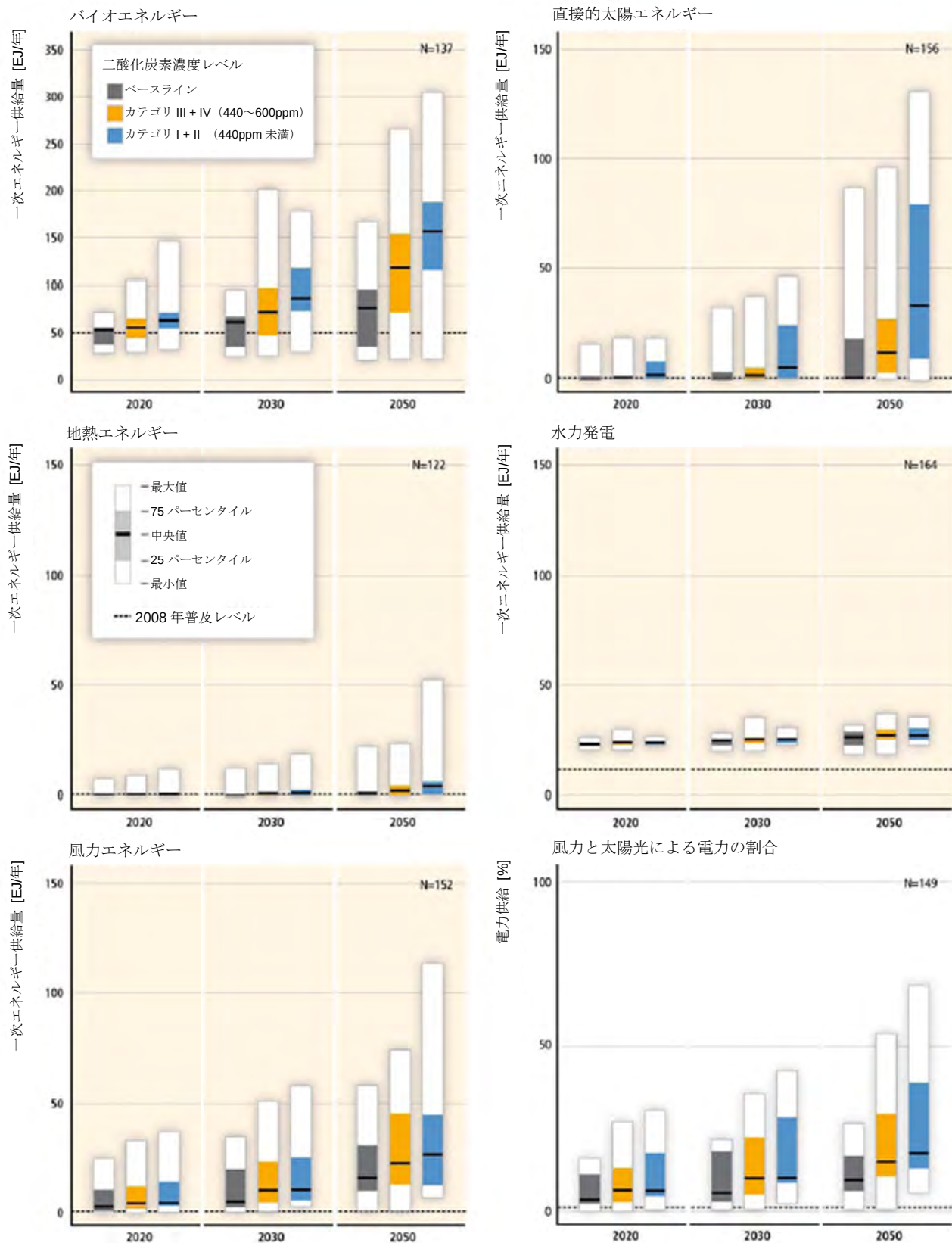


図 10.9: 164 の長期シナリオを、2100 年の大気中の二酸化炭素濃度レベルでカテゴリ分けして、バイオマス、風力、太陽光、水力、地熱エネルギーの 2020 年、2030 年と 2050 年の世界の一次エネルギー供給量（直接等価法）と世界の電力発電量に占める変動しやすい再生可能エネルギー（風力及び太陽光発電）の割合（Fisher et al., 2007）。直接等価法に従い、バイオマスの一次エネルギー供給量は変換前のもので計算する一方、他の再生可能エネルギーオプションは、生産される 2 次エネルギーに基づいて計算している。黒の太線は中央値、棒内の着色部分は四分位範囲（25～75%）、白の棒の両端は評価対象のシナリオ全体の全範囲を示す。これは、情報を解釈する上では有益であるが、164 のシナリオが正しい統計的分析用の無作為サンプルでは明らかにないことに留意することは重要で

ある。データ報告の理由により、ここで示された各国に含まれているシナリオの数には、かなりばらつきがある。個々の図の基礎となるシナリオの数 (N) は、164 すべてのシナリオに対して、各国の右上に示されている。図及びデータは、Krey and Clarke (2011 年) から引用し、2 つの追加的シナリオを含むために修正している。

同時に、特に短期における実際の普及レベルは、長期的な目標だけではなく、それに向けて国々がどの程度行動を起こすかに依ることに留意することが重要である。たとえば、一部の国が地球規模の排出削減への参加を遅らせるシナリオでは、再生可能エネルギー普及は、地球規模全体で参加するシナリオよりも必然的に低くなる (Clarke et al., 2009; Krey and Clarke, 2011)。それにもかかわらず、二酸化炭素濃度の安定化は、二酸化炭素排出量をゼロ近くにすることを意味するため、すべての国々で最終的に二酸化炭素排出量をこのレベルにしなければならず、よりエネルギー消費が多い国々は、どの国が気候に関する措置を最も早く始めるかに関わらず、他の国よりも低炭素エネルギーを多く必要とする。価格ベースの政策に焦点を当てる国があるのに対し、再生可能エネルギーに対する義務を含む規制政策を使用する国もあるなど、それぞれの国が緩和に対する異なるアプローチをとる可能性があり、このことが再生可能エネルギー普及の空間的な特徴にも影響を与えるであろうことに留意することも重要である。ここで説明されたシナリオは、大部分が専ら価格ベースの緩和に依存しており、この種のばらつきは認められない。

10.2.2.6 再生可能エネルギーと緩和コスト

気候緩和における再生可能エネルギーの役割は、再生可能エネルギー普及レベルの視点だけではなく、再生可能エネルギーの利用可能性及び普及の緩和の経済的結果やコストへの影響についての調査でも見られる。研究者が特定の技術を緩和コストに結び付けようとした 1 つの方法は、緩和コスト曲線、つまり、どの程度の緩和が特定の技術によって与えられた炭素価格で達成されることが可能なのかを示す関係を示することである。再生可能エネルギーにおいて、これらの曲線は、どの程度の二酸化炭素軽減が、再生可能エネルギー技術によってどれくらいのコストで提供され得るのか、という疑問に答えようと試みている。このような緩和コスト曲線は、10.4 においてさらに詳細に議論するので、ここでは触れない。緩和を特定の技術に割り振ることは、統合モデルの主な結果ではないということのみ、ここでは留意しておく。統合モデルは、価格、排出量、及び普及に関する情報を提供するが、一般的には、排出量の原因を特定の技術の有無には帰しない。このような割り振りは、主な仮定についての分析者の判断に依る後処理のオフラインでの計算の結果である。これらの後処理の仮定をシナリオに適用することは、統合というより新たな分析であり、シナリオ自体からのメッセージを不明確にする。様々な手法を使用することに起因する、二酸化炭素排出量緩和のばらつきの意味は、本章で分析された 164 すべてのシナリオから選ばれた 4 つのシナリオを基に、10.3 で取り上げられている。さらに、これらの分析は、再生可能エネルギー技術の普及による、気候緩和の便益（長期的にはそれほど深刻でない気候変動の影響、適応に対する必要性の低減など）、安定したエネルギー供給、及び大気汚染（医療費の軽減など）を説明していない (Nemet et al., 2010 など参照)。相乗便益のさらに詳細な検討については、10.6 で参照が可能である。

再生可能エネルギーと緩和コストとの関係に対するもう 1 つのありうる視点は、シナリオ全体の再生可能エネルギー普及レベルと炭素価格の関係の関係を考慮することによって提供される。このアプローチは、与えられた炭素価格において、再生可能エネルギーはどの程度普及するのかという疑問に答えるものである。164 のシナリオでは、再生可能エネルギーの普及と炭素価格の間に有意な相互関係がないことを示している (図 10.10)。10.2.2.2、10.2.2.3 及び 10.2.2.4 で検討されたように、再生可能エネルギーの普及レベルと長期的な濃度目標との間の関係を不明確にするすべての影響力は、再生可能エネルギーの普及と炭素価格との間の関係に影響を及ぼす。さらに、統合エネルギーモデルは、パラメータの想定とモデル構造の双方に基づき、幅広い炭素価格によって特徴づけられている (Clarke et al., 2007, 2009)。その結果、モデル全体に目を向けた場合、再生可能エネルギーの普及レベルと炭素価格を結びつける能力はほとんど持っていないことがわかった。

二酸化炭素価格は、コストの総額ではなく、値引き額の限界収益点の費用を示すため、コストに対する限定的な測定基準にすぎない。他の様々なコストの評価基準は、緩和の経済的影響を得るために、文献において使用されてきた。これらには、国内総生産 (GDP) または消費における変化、または緩和コスト総額（つまり温室効果ガス排出量低下を伴うエネルギーシステムを普及、運営させるための追加的コストを含む額）が含まれる。これは、再生可能エネルギーがコストに及ぼす影響のより広範な意味を与える可能性がある。一般的に、緩和は GDP を低減させる傾向がある (Fisher et al., 2007)⁴。しかし、これらの対策は、必ずしも炭素価格よりも再生可能エネルギー普及との強固な相互関係につながらない。たとえば、本セクションで検討されたベースラインシナリオにおける GDP の全体的なばらつき (GDP の最小値及び最大値の間では 2050 年では 1.8 倍) は、気候緩和の結果としての GDP の変化よりもさらに大きい (2050 年までのベースライン GDP の最大数パーセント)。これは、GDP のフィードバックを含むそれらのモデルに対するそれぞれのベースラインの緩和シナリオにおける GDP を比較することによって引き出される。ベースラインの GDP の優位性と変動性によって、GDP 総計と再生可能エネルギー普及の関係はさ

⁴ 少数派の研究者が、気候緩和は経済生産の増加につながると主張していることに留意する (Barker et al., 2006 など)。その基本的な主張とは、特定の仮定の下では、炭素価格の上昇によって誘発された技術的変化は、さらに大きな経済的成長を引き起こす追加的な投資につながることである。

らに不明瞭になる。

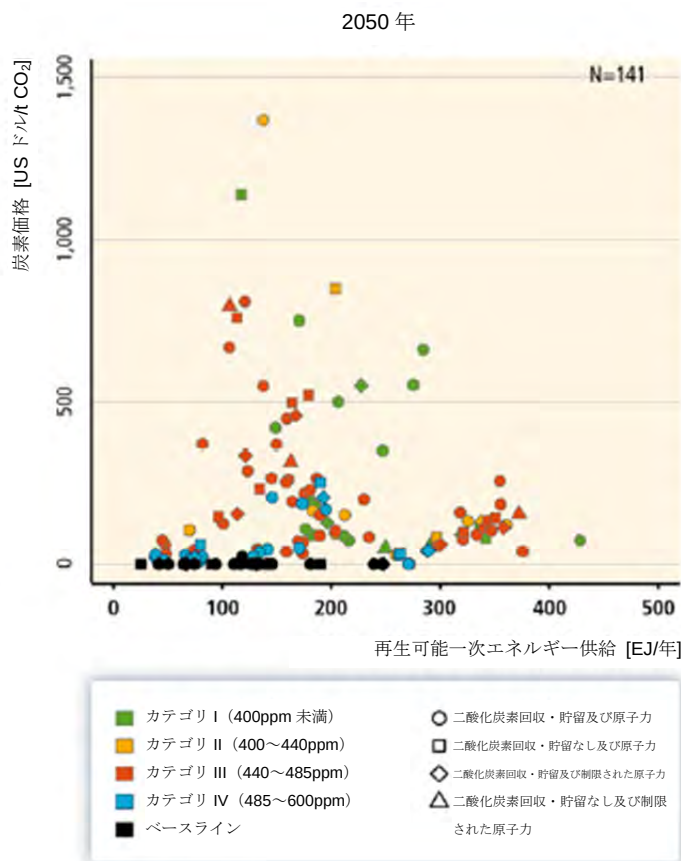


図 10.10: 2050 年における地球規模の再生可能一次エネルギー供給量（直接等価）に応じた炭素価格（US ドル（2005 年））。色分けは、2100 年における大気中の二酸化炭素濃度レベルのカテゴリに基づく（Fisher et al., 2007）。グラフ中の様々な記号は、二酸化炭素回収・貯留及び原子力の利用可能性を示す。原子力のシナリオには、原子力の段階的廃止、新たな原子力の生産量に対する制約、及び原子力生産がベースラインレベルにまで制約されるシナリオが含まれているものに限られていることに留意する。データ報告の理由により、164 すべてのシナリオに対して、141 のみのシナリオが、ここで示された 2050 年の結果に含まれている。図及びデータは、Krey and Clarke（2011 年）から引用し、2 つの追加的シナリオを含むために修正している。

緩和の経済的影響と再生可能エネルギーの普及との関係の様々な反映は、再生可能エネルギーの利用可能性、またはコストや性能についての異なる仮定や、競合する緩和オプションの下で、緩和コストがどの程度変わるかということ調査することによって、解明され得る。多くの研究者がこの問題を調査した（Clarke et al., 2008; Luderer et al., 2009; Edenhofer et al., 2010; Tavoni and Tol, 2010 など参照）。直感と同じく、これらの研究によると、再生可能エネルギー技術の存在、またはそのコストや性能の改善が緩和コストを低減させることが実証されている。これは驚くには値しない。即ち、より多くの、またはより適切なオプションはコストを増加させない。より重要なことは、二酸化炭素回収・貯留を有する化石エネルギーや原子力の利用可能性の増大に起因する緩和コストにおける変化と比較した、再生可能エネルギー技術の利用可能性、コスト、または性能の拡大に起因する緩和コストの変化の相対的規模である。たとえば、ADAM（Edenhofer et al., 2010）及び RECIPE プロジェクト（Luderer et al., 2009）双方において（どちらも 3 つのモデルを含んでいる）、再生可能エネルギー普及を拡大するオプションの不足に起因するコスト増大は、今日のレベル、またはベースラインレベルを超えて二酸化炭素回収・貯留を有する化石エネルギーを実施するオプション、または原子力の生産量を拡大するオプションの欠如からのコスト増大と比べて、明らかに桁違いの差は無い（図 10.11 及び 10.12 参照）。実際いくつかのシナリオでは、再生可能エネルギーを抑制することは、原子力または二酸化炭素回収・貯留を有する化石エネルギーを抑制することよりも多くのコスト増大につながる。再生可能エネルギーの利用可能性、コスト及び性能の有用性も、どの程度の意欲なのかによって変化する可能性がある。たとえば、二酸化炭素回収・貯留を有するバイオエネルギーの利用可能性は、厳しい安定化制約を満たすための特に有益な技術の組み合わせとして認識されている（Azar et al., 2006; van Vuuren et al., 2007; Clarke et al., 2009; Edenhofer et al., 2010; Tavoni and Tol, 2010）。まとめると、再生可能エネルギー技術の普及が制約されると緩和コストが増加することと、より野心的な安定化レベルは達成出来ないだろうことについては文献において合意があるが、コスト増加が正確にどの程度の規模になるかについては、合意はほとんど無い。

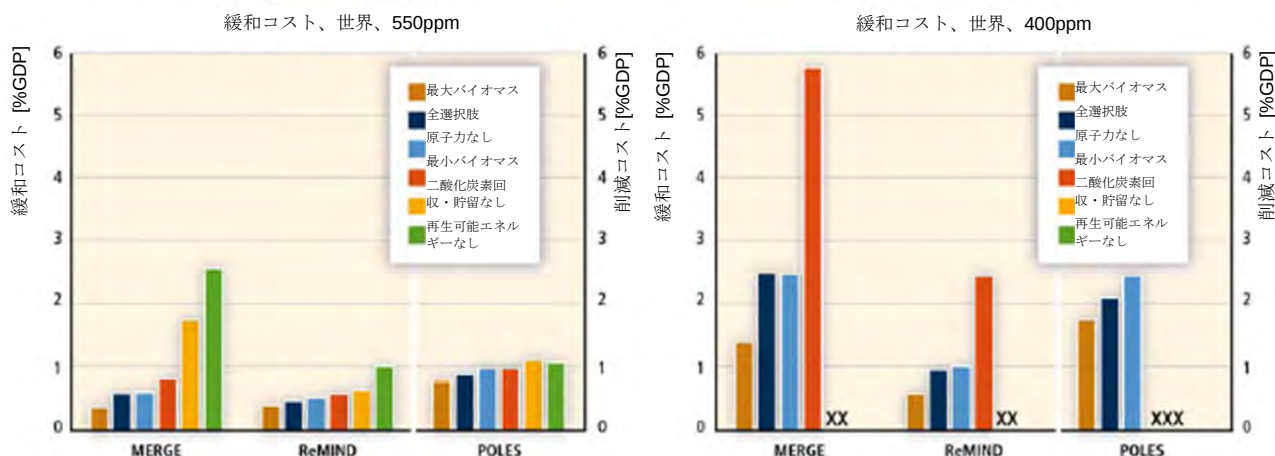


図 10.11: ADAM プロジェクトに基づく世界の緩和コスト。長期的な安定化濃度が 550ppmv CO₂/eq と 400ppmv CO₂/eq の場合における、技術の使用可能性に関する様々な想定に基づく。二酸化炭素に換算して 550ppm 及び 400ppm の長期的な安定化レベルの技術の利用可能性に関する様々な仮定の下での ADAM プロジェクトの地球規模の緩和コスト（Edenhofer et al., 2010）。緩和コストは、GDP のパーセントでのベースラインと比較して 2100 年までの GDP 総損失額（MERGE, RE MIND）または削減費用の増加（POLES）を示す。「全選択肢」は、様々なモデルにおける標準的な技術ポートフォリオを指し、「最大バイオマス（Biomax）」と「最小バイオマス（Biomax）」はそれぞれ、バイオマスの標準的な技術ポテンシャル（200EJ）に対し 2 倍であるものと 0.5 倍であるものを指す。「二酸化炭素回収・貯留なし」は緩和ポートフォリオから二酸化炭素回収・貯留を除いたもの、「原子力なし」と「再生可能エネルギーなし」は原子力と再生可能エネルギーの普及レベルをベースラインに制限したものを指しているが、それでもなお、現在と比べればかなりの拡大の可能性を示している。右側の「X」は、技術の選択肢が限定的な場合、400ppmv CO₂/eq の水準の達成が不可能であることを示す。

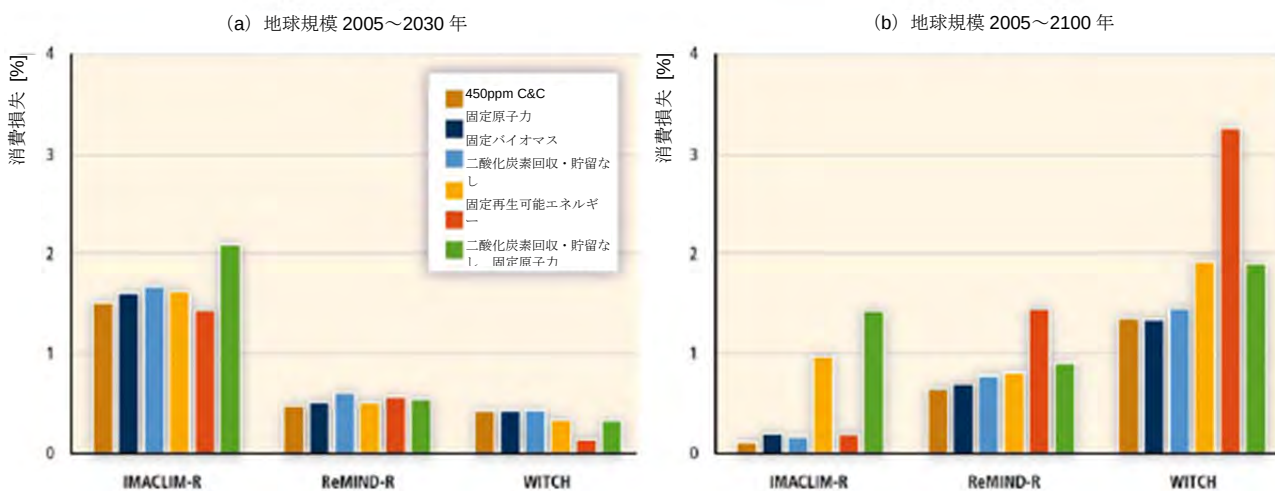


図 10.12: RECIPE プロジェクトによる緩和コスト。長期的な二酸化炭素の安定化濃度を 450ppmv とした場合の、様々な技術の可能性の想定に基づく（Luderer et al., 2009）。オプションで示す技術の値は、既知（CCS）またはベースラインのレベル（他の全ての技術）に限定されたシナリオによる消費エネルギーの削減を示す。期間は（a）2005～2030 年と（b）2005～2100 年である。オプションの値は、ある技術がベースラインのシナリオに対して制限されているシナリオの消費エネルギーの削減の差が計算されたものである。WITCH の場合、実在的な緊急時の備えの技術（generic backstop technology）は「再生可能エネルギー（固定）」シナリオでは利用出来ない想定であることに留意。

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

本セクションにおけるシナリオは、地球規模の統合モデルを用いて作成された。こうしたモデルにはいくつかの長所があるが、これらは、最終的に再生可能エネルギーの普及に影響を与える多くの決定的因子に対して限定的な注意しか払っていないという短所もある。最終的に再生可能エネルギーの普及に影響を与える短所もある。こうした強制力の役割をより深く理解する方法として、このセクションからのシナリオは、第 2～7 章の「炭素緩和における長期的展開において直面する潜在的障壁、及び、シナリオ文献において認められるような再生可能エネルギー

の普及拡大を達成する促進的要因を認識することである。このセクションは、それらのセクションの主要要素を簡潔に要約する。

資源ポテンシャル: 一般に、地球レベルの再生可能エネルギーの全てのカテゴリについて、たとえそれが最大の普及レベルであっても、利用できる技術的ポテンシャルによって制約されるとは考えられていない。しかし、再生可能エネルギー資源は地域的に不均一であるため、たとえば水力及び風力エネルギーなどにおいては、その高い普及レベルの一部は、最も経済的に魅力的な場所に制約されている可能性がある。ほとんどの再生可能エネルギー源の場合、その利用可能性は、水力発電、風力エネルギーと同様に例えば海洋、地熱、バイオマス、太陽エネルギーにおいて、その特定の形態のために、地理的に制約されている。例えばバイオエネルギーの場合、2050 年までの温室効果ガス安定化レベルが最大で約 300EJ/年までとなっているシナリオにおける供給レベルは、第 2 章で検討されているような可能な普及レベルの上限と一致する（2.8.4 及び図 2.8.3 参照）。

地域的普及: 経済的発展及び技術的成熟度は、地域的な普及のレベルの主たる決定要因となる。再生可能エネルギーの地域的な政策の枠組みは、経済的に魅力的で予測可能となる必要がある。大規模な水力発電のような成熟した技術の場合、経済協力開発機構（OECD）加盟国における利用可能な技術的ポテンシャルの大部分は使い切っており、将来の拡大の多くは、アジア及びラテンアメリカの OECD 非加盟国に期待されている。すでに高い拡大率が認められている風力エネルギーの場合、過去 10 年間にわたるヨーロッパ及び北アメリカのほとんどにおいて、またごく最近では中国及びインドにおいて、シナリオ文献で示されたようなより広範な普及を達成するには、現在観測されているものよりも地理的に更に広範囲な普及の分布が必要である可能性が高い。他の未成熟な技術は、初めのうちは、財政支援状況及びインフラ統合が好ましい状態にある豊かな地域（ヨーロッパ、北アメリカ、オーストラリア、及びアジアの地域）における拡大に焦点を当てる可能性が高い。

サプライチェーン問題: 一般的に、シナリオにおけるより高い普及レベルを阻む、原料、労働、及び生産力の克服できない中期的～長期的な制約は特定されていない。たとえば、風力エネルギー産業は、生産チェーンのグローバル化につながる過去における急速な拡大を経験してきたが、より厳密なシナリオに見られる容量の追加割合を達成するためには産業のさらなる発展が必要とされる。一部の技術に対する市場及びサプライチェーンが地球規模である（風力、太陽光発電（PV））一方で、他の技術（受動的太陽光エネルギーや低温太陽熱など）は大部分が地域的であることを認めることも重要である。市場が拡大するにつれて、それらの技術は範囲がより地球規模に拡大する可能性は高い。過去の増加率は、政策及びマーケットシグナルが明確であると仮定すると、絶対的な長期的制約は存在しないことを示している。

技術及び経済性: 再生可能な技術の成熟度には非常にばらつきがあるため、コストや技術的進歩の必要性にもばらつきがある。その範囲の一極にあるのが、火力発電プラントと競合性がある水力発電である。その対極にあるのが、ほとんどの海洋エネルギー技術の商業規模の実証プラントであるが、これはまだ存在していない。洋上風力エネルギーの場合、より離れた沖合での立地にはさらなる技術進歩を必要とする。また、コスト削減が普及の効果に影響を与える。同様に、集光型太陽熱発電（CSP）、太陽光発電、地熱ヒートポンプ、及び地熱井涵養システム（EGS）には、技術的改善が必要とされるが、特に発電コストについてはさらに削減する必要がある。研究開発投資及び商業生産への支援による 2020 年ごろの商業化のポテンシャルを持つ最新のバイオ燃料やバイオリファイナリーについては、同様の技術的進歩が必要とされる。

システム統合及びインフラ: システム統合は、変動性のある発電技術である風力、太陽光発電、及び波力エネルギーにとって困難である（8.2.1）。技術的（需給調整を行う発電容量、相互接続、蓄電など）及び制度的（市場設計と運用、市場アクセス、及び関税構造など）解決法は、運用上の統合の懸念事項に対処するために実施される必要がある。さらに、例え控えめな拡大シナリオであっても、遠隔地の資源を結びつけるためには、洋上及び陸上の風力発電、集中発電所である集光型太陽熱発電や太陽光発電、熱水地熱発電、及び水力発電などの大規模な新規送電インフラが求められている。ヨーロッパなどの地域に関しては、洋上風力発電へより大きく依存する可能性が高いが、それには洋上送電インフラの開発が必要である。特定の形態の海洋エネルギーは類似の統合の課題に直面しているため、これらの技術の開発においては、相乗効果が存在する可能性がある。エネルギー供給システムに占めるそれらの割合を大きくするためには、8.2 で概説したように、他の再生可能エネルギーによるエネルギーキャリア（熱、バイオガス、液体バイオ燃料、固体バイオマス、及び水素など）はすべて既存のシステムインフラへの適切な統合が必要である。

10.2.4 知見のギャップ

大規模な統合モデルにおける再生可能エネルギーの評価に関する主な知見のギャップは、これらのモデル内での再生可能エネルギー技術自体によるものである。シナリオの文献におけるそれぞれの再生可能エネルギー源の範囲は大きく異なっている。水力発電のような成熟した技術は、この評価で検討されたすべてのモデルに組み込まれている一方、未熟な技術または今日大規模に普及していない技術（海洋エネルギー、洋上風力、集光型太陽熱発電、及び地熱エネルギーなど）は、少数のシナリオによって焦点を当てられている。その 1 つの理由は、未熟な技術、ま

たは貢献度が低いと想定される先験的な技術に具体的に焦点を当てる需要が少ないことである。2 つ目の理由は、一部の利用可能な資源（地熱エネルギー、様々な海洋エネルギーなど）に対する（望ましい格子レベルを持つ）質の良い地球規模の資源データの欠如である。これは、エネルギー経済及び統合評価モデルへの入力である資源供給曲線を得る前提条件である。より広く言えば、技術自体の表現を超え、再生可能エネルギー技術の実施に関する多くの問題には、大規模な統合モデルにおけるさらなる研究及び包括が必要である。この点における重要な領域には、電力網への再生可能エネルギーの統合、及びバイオエネルギー生産、作物生産、及び森林減少の間の関係が含まれる。

しかし、再生可能エネルギー技術や関連するシステムの表現を改善しても、気候緩和における再生可能エネルギーの役割に関する不確実性を完全には排除しないことには留意することが重要である。このセクションを通して検討されたように、再生可能エネルギー技術とは無関係の様々なその他の不確実性、たとえば経済成長及び人口増加、競合する技術の利用可能性、コストや性能、及び緩和アプローチやその意欲の性質が、気候緩和における再生可能エネルギーの役割に影響を与える。単に様々なモデル化のプラットフォームの設計に由来する不確実性であっても、結果に影響を与え得る。それゆえ、将来に優先すべき研究課題は、なぜモデル結果が再生可能エネルギーに関して変化するのかという疑問への理解を深めること、そしてモデル結果の相違の原因を仮定及び手法の相違に帰することである。

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

10.2 ではより統計的な視点から、再生可能エネルギー技術が様々な緩和の道筋において果たし得る役割について包括的な概要を検討した。これに対し、本セクションではさらにその先の集約されたデータレベルに進み、地域及び部門別の視点に焦点を置く。この掘り下げた分析のために、前のセクションでの全シナリオの評価から、異なった実例的なエネルギー及び排出の道筋を代表する 4 つのシナリオを選択した（表 10.3 参照）。これらのシナリオにおいては、前提も、緩和の目標も、基礎となるモデルのタイプも異なっている。シナリオとモデルについての説明は 10.2 の Box 内の記載を参照すること。この分析の主要なデータは今日まで発表されている内容の範囲を超えており、シナリオ執筆者と執筆機関による特別な要請により提供されたものである⁵。

10.3.1 再生可能エネルギー源の部門別内訳

各シナリオにおいて普及する再生可能エネルギーの量は、多くのばらつき、前提、及び入力データ（10.2.1 も、特に 10.2.1.1 を参照）に依存している。最も影響力の強いものは、様々な再生可能エネルギー技術のコストと性能の前提であることが多い。これらは競合する低炭素供給のオプション（つまり、原子力と二酸化炭素回収・貯留を伴う化石エネルギー）の相対的魅力を決定するのみでなく、最終消費エネルギーの効率化策の相対的魅力を決定するうえでも一助にもなる。コストの過小評価は再生可能エネルギー普及の過大評価につながり、また逆にコストの過大評価は再生可能エネルギー普及の過小評価につながる。計算された再生可能エネルギーの割合は更に競合するオプションの一般的な利用可能性により決定される。代替の緩和オプションに制約があることは、ある特定のレベルの温室効果ガスの緩和に対して、さらに大きな再生可能エネルギーの普及拡大が起こることを意味する。インフラの制約とシステム統合オプションに関する前提は、更に重要な決定要因である。この面では、重要な要因は、電力網がどのようにして大量の変動的な再生可能資源に適合するかについての仮定に関連してくる。対照的に、再生可能エネルギーの全体的な技術ポテンシャル（即ち一次エネルギー源、社会地理的制約、及び変換プロセスにおける技術的損失（Annex I の定義参照）を考慮した生産可能なエネルギーの総量）は、それが現在や予測される将来の需要を桁違いの規模で置き換えるので（1.2.2 参照）、世界的レベルでの制限要因とはなり得ない。そのため、技術的な再生可能エネルギーポテンシャルをすべて探究することは要求されないし、またその必要もない。

実際に、環境に優しい未来のエネルギー供給を達成するためには、再生可能エネルギー資源の普及は持続可能性の判断基準（criteria）を尊重しなければならない（第 1 章と第 9 章参照）。再生可能エネルギー資源の拡大には、社会的受容性が極めて重要である。屋上太陽光発電や太陽熱、ならびにバイオエネルギーコジェネレーションプラントや陸上風力発電といった再生可能エネルギーの運用は、分散型エネルギー生産設備であることが多く、需要中心地の近く、あるいは需要中心地にさえ設置されることがある。他の再生可能エネルギーの運用は需要中心地からある程度離れた場所に位置する工業規模のエネルギー製造施設を必要とする場合が多く、大規模な送電を必要とする。その例としては大規模陸上ウィンドパーク、洋上風力エネルギー、砂漠での集光型太陽熱発電、熱水地熱プラント、及び水力がある。どの場合でも、社会的受容性への配慮を注意深く行わない場合、開発が制約される可能性がある。バイオマスの使用については、他の土地利用との競合、食糧生産、生態系保存、土地利用の転換により起こりうる直接的または間接的温室効果ガス排出に関して問題が起こっているため、最近特に論議を呼んでいる（2.5、9.3.4

⁵ IEA-WEO2009- ベースラインは国際エネルギー機関 (IEA) とドイツ航空宇宙センター (German Aerospace Center)、ReMIND-RECIPE はポツダム気候変動研究所 (Potsdam Institute for Climate Impact Research)、MiniCAMEMF22 はパシフィック・ノースウエスト国立研究所 (Pacific Northwest National Laboratory)、そして ER-2010 はドイツ航空宇宙センター

及び 10.6 参照）。一方で、再生可能エネルギーの普及は、通常は化石燃料に付随する環境及び健康への影響がなく、遠隔地におけるエネルギーアクセスを提供するポテンシャルがあるため、持続可能性基準により積極的に推進されている（9.3.2、9.3.4 及び 10.6）参照）。そのため、非経済的な判断基準も再生可能エネルギーの普及に著しい影響を与え、関係する前提はシナリオの結果にとって極めて重要である。

最後に重要なことであるが、シナリオ分析においては気候変動及びエネルギー政策の枠組みが再生可能エネルギーの普及に深く関連していることである。市場の原理と制約が再生可能エネルギーの普及に関連し、市場ポテンシャルを決定する。市場ポテンシャルは機会も含んでいるため、理論上は支援プログラムによって市場ポテンシャルが経済ポテンシャルよりも大きくなる可能性があるが、様々な再生可能エネルギーの制約要因となるような市場の欠点や他の新しい技術のために、一般的には市場ポテンシャルは経済ポテンシャルよりも低い（1.4.2 と 11.4）。市場ポテンシャル分析は、一部は公共機関により形作られる固有の条件下における民間経済主体の行動を考慮しなければならない（11.5 と 11.6 参照）。この意味において、エネルギー政策の枠組みは再生可能エネルギー源の拡大に対して、それぞれのシナリオの結果に対応する前提に大きな影響を与える。

再生可能エネルギーの普及は様々な要因により推進され、また妨げられ、異なる決定要因とその影響がどのように評価されるかに非常に大きく依存する。将来の開発の不確実性は一般的に高く、特定の前提によって決定される。この意味において、一貫した一連の特定の前提を積み上げていくエネルギーシナリオは、特定の条件下で将来何が期待出来るかについての概算である。様々なシナリオの比較は未来の範囲にまで及ぶため、隅々までに及ぶ共通点と傾向を示し、違いと不確実性を可視化し、より透明化することが可能である。

掘り下げた分析のための 4 つの例示シナリオの選定

シナリオの結果はパラメータ前提のみでなく、基礎となるモデルの構造とモデル固有の制約（特定の再生可能エネルギー技術の開発上限など）によって決まる。4 つのシナリオは、広い範囲の異なるモデル構造、需要予測、及び供給側の技術のポートフォリオを提示するために選んだ（ボックス 10.2 参照）。IEA-WEO2009 - ベースライン参照シナリオ（IEA, 2009; 2050 年までへの延長: Teske et al., 2010）（以下 IEA-WEO2009 - ベースライン）は 4 つのシナリオにおける唯一のベースラインシナリオであり、2009 年までに実施されたもの以降のいかなる気候政策目標も組み込んでいないシナリオである。このシナリオの特徴は低い再生可能エネルギー普及での比較的高い需要予測にある。3 つの緩和シナリオのうちの 2 つ、つまり ReMIND RECIPE 450ppm 安定化シナリオ（Luderer et al., 2009）（以下 ReMIND RECIPE）及び MiniCAM EMF 22 最良の 2.6W/m² オーバーシュートシナリオ（Calvin et al., 2009）（以後 MiniCAM-EMF22）では、高い需要予測と著しい再生可能エネルギーの増加が、二酸化炭素回収・貯留と原子力発電プラント採用の可能性と共に組み合わせられている。3 番目の緩和シナリオ、先進 Energy [R]evolution 2010（Teske et al., 2010）（以下 ER-2010）では、低い需要（たとえばエネルギー効率の著しい増加による）と、高い再生可能エネルギー普及、二酸化炭素回収・貯留は無い状態、かつ、2045 年までの世界的な原子力発電の段階的廃止と共に組み合わせられている。

表 10.3: 各モデルにおける内生的な結果への外生的な前提に基づく例示シナリオの主要なパラメータの概要。緑色は外生的入力、オレンジ色は内生的モデル結果を示す。文献中で使われている濃度カテゴリは二酸化炭素（のみ）の濃度で示し、他の測定基準は主に京都議定書または全ての強制力ある主体における二酸化炭素換算濃度が使われていることに注意すること（出典: IEA-WEO2009 - ベースライン（IEA, 2009; Teske et al., 2010）、ReMIND-RECIPE（Luderer et al., 2009）、MiniCAM-EMF22（Calvin et al., 2009）、ER-2010（Teske et al., 2010））。

カテゴリ	単位	現状	ベースライン		カテゴリ III+IV (400～600ppm)		カテゴリ I+II (<400ppm)		カテゴリ I+II (<400ppm)	
シナリオ名			IEA-WEO2009 - ベースライン		ReMind-RECIPE		MiniCAM-EMF22		ER-2010	
モデル					ReMind		EMF22		MESAP/PlaNet	
	年	2007	2030	2050 ¹	2030	2050	2030	2050	2030	2050
技術の道筋 ² 再生可能 二酸化炭素回収・貯留 原子力			すべて ³ (+) (+)	すべて (+) (+)	太陽熱: 太陽光発電と集光型太陽熱発電の区別なし		太陽熱: 太陽光発電と集光型太陽熱発電の区別なし、海洋エネルギーは含まず		すべて (-) (+)	すべて (-) (-)
人口	10 億	6.67	8.31	9.15	8.32	9.19	8.07	8.82	8.31	9.15
GDP/1 人 ⁴	1000US ドル (2005 年) /1 人	10.9	17.4	24.3	12.4	18.2	9.7	13.9	17.4	24.3
エネルギー需要（直接等価）	EJ/年	469	645	749	590	674	608	690	474	407
エネルギー強度	MJ/US ドル (2005 年)	6.5	4.5	3.4	5.7	4.0	7.8	5.6	3.3	1.8
再生可能エネルギー	%	13	14	15	32	48	24	31	39	77
化石燃料と工業活動由来の二酸化炭素排出	Gt CO ₂ /年	27.4	38.5	44.3	26.6	15.8	29.9	12.4	18.4	3.7
炭素強度	kg CO ₂ /GJ	58.4	57.1	56.6	45.0	23.5	49.2	18.0	36.7	7.1

注

¹IEA（2009）は 2031～2050 年を含まない。IEA（2009）の予測はこのシナリオの対象期間を 2030 年までのみとしているため、ドイツ航空宇宙センター（DLR）が WEO 2009 のマクロ経済とエネルギーの主要指標を 2050 年まで延長して適用し作成したシナリオの推定が使用されている（Teske et al., 2010）。

²(-): 技術は含まれない、(+): 技術は含まれる。

³これには太陽光発電、集光型太陽熱発電、太陽熱温水、風力（陸上及び洋上）、地熱発電、暖房とコジェネレーション、バイオエネルギー発電、暖房とコジェネレーション、水力、海洋エネルギーが含まれる。

⁴データはモデルにおけるインプットか、内生的モデル結果である。

表 10.3 は 4 つの例示シナリオの主なパラメータを示しており、モデルによっていくつかの仮定が外生的に適用される場合と内生的に決定される場合がある。すべてのシナリオが世界人口の著しい増加を予測しており、GDP の著しい増加を想定または計算している。IEA-WEO2009 - ベースラインの GDP 予測は国際通貨基金 (IMF, 2009) 及び OECD の予測に基づく。これらの GDP 予測は ER-2010 モデルの入力パラメータとしても使用されている。対照的に MiniCAM-EMF22 及び ReMIND-RECIPE の GDP 予測は内生的に決定されたものである。人口及び GDP のどちらの変化も将来のエネルギー需要（すべてのモデルにおいて内生的に計算されている）の主要な推進力であり、そのため少なくとも間接的には再生可能エネルギーの割合を決定めている。

4 つの例示シナリオに関して、様々な部門それぞれについて利用可能なデータの概要を以下のセクションで説明する。世界のエネルギーシナリオは再生可能エネルギー発電について詳細な情報を提供している場合が多い。現在及び未来の再生可能エネルギー電力市場についての情報は公的にアクセス可能な場合が多いが、一方で電力部門に比べて再生可能エネルギーによる暖房部門や輸送部門の利用に関する適切なデータセットは、入手できない場合や電力部門と比べて詳細ではない場合が多い。これらの部門、特に再生可能エネルギー暖房は重要な技術的ポテンシャルを示し、多くの場合すでに費用対効果も高いため、より注目されるべきである (Aitken, 2003; Seyboth et al., 2007)。

Box 10.2: 4 つの例示シナリオと基本となるモデルの概要

IEA-WEO2009 - ベースライン: このシナリオは典型的なベースラインシナリオアプローチを使用している。そのため政府政策を実質的に変更することなく、最小から中程度の化石燃料コストの上昇の前提に基づき、可能なエネルギーの道筋を計算している (IEA, 2009, p. 44)。シナリオには特定の温室効果ガス排出への制約は含まれていない。IEA (2009) の予測がこのシナリオの範囲を 2030 年までのみとしているため、ドイツ航空宇宙センター (DLR) が IEA (2009) のマクロ経済とエネルギーの主要指標を 2050 年まで延長して適用し作成したシナリオの推定が使用されている (Teske et al., 2010)。化石燃料及び工業活動に由来する二酸化炭素排出についてベースラインシナリオでは 2007 年の 27.4Gt CO₂/年から 2050 年までに 44.3Gt CO₂/年へと増加すると予測している (Teske et al. (2010) により IEA (2009) から 2030 年を超えて延長されたシナリオ「IEA WEO 2009 参照シナリオ」)。

ReMIND-RECIPE: このシナリオは大気中の二酸化炭素（のみ）の濃度を 450ppm（2050 年までの化石燃料及び工業活動に由来する二酸化炭素排出量 15.8Gt CO₂/年に対応）に安定させることを目的とする緩和の道筋を描いている。これはエネルギー・経済・気候モデル ReMIND-R とともに算出され、ReMIND-R では完全な「場所の柔軟性」（排出量削減はそれが最も安価な場所で行われる）、「時間の柔軟性」（排出量削減はそれが最も安価な時に行われる）及び「技術の柔軟性」（排出量削減は最も安価な技術の組み合わせを選ぶことにより行われる）の条件下で、最適な福利が実現するような変換を実現する軌跡を計算する。もう 1 つの極めて重要な前提は理想的な見通しである。投資判断は将来の価格変化及び技術成長を事前に知ったうえで行われる。モデルの特徴は高レベルの統合である。マクロ経済とエネルギーシステムは統合された最適化の枠組みのなかで扱われ、そのため気候緩和の努力のマクロ経済へのフィードバックを取り込んでいる。複雑な統合の定式化のためにはエネルギーシステムの部門別及び技術的な解決のための調整を要する。ReMIND-RECIPE は様々な再生可能エネルギー資源（風力、太陽熱、バイオマス、水力及び地熱）と変換技術を取り込んでいる。風力と太陽光発電は学習する技術としてパラメータ化されている。再生可能エネルギー技術は最適地での工業的規模の普及が可能であり、世界の地域内（大陸規模まで）で需要中心地まで輸送されるが、それによってこのモデルでは障害（電力網インフラに関するものなど）が先行する計画によって避けられることを暗黙のうちに想定している (Luderer et al. (2009) による「450ppm 安定化シナリオ」)。

MiniCAM-EMF22: MiniCAM-EMF22 シナリオは Energy Modelling Forum study 22 (EMF 22) の一部として作成されたものであり、可能なアプローチから長期の気候目的まで視野に入れている。シナリオは地球規模の変化評価モデル (GCAM) の統合評価モデルの原型となった MiniCam 統合評価モデルを使用して作成された。シナリオは 2050 年に 525ppm CO₂eq でピークに達した後、2100 年までに 450ppm CO₂eq (Kyoto ガス)⁶に到達するというオーバーシュートシナリオであり、排出削減には完全な全世界の参加を前提としている。化石燃料と工業活動に由来する二酸化炭素排出量に対応する特定の濃度レベルは 2050 年までに 12.4Gt CO₂/年である。基本となるシナリオの特徴としては、地球の人口増加が含まれていて、2070 年に約 90 億人でピークに達しそれから 2100 年には 87 億人に減少するものである。シナリオにおいては広範なエネルギー供給オプションの利用可能性を検討しており、主要な再生可能エネルギーオプション、原子力、及び二酸化炭素回収・貯留技術を伴う化石エネルギーとバイオエネルギーの両方が含まれている。二酸化炭素回収・貯留を伴うバイオエネルギーの存在はシナリオ中では特に重要であるが、それは主として発電において負の排出を作るオプションを許容するからである (Calvin et al., 2009; Clarke et al., 2009)。Calvin et al. (2009) の「最良の 2.6W/m² オーバーシュートシナリオ」)。

ER-2010: ER-2010 シナリオ (Teske et al., 2010) は IEA-WEO2009 - ベースラインシナリオの社会経済的な仮定に基づいているが、2010 年以降の化石燃料コストと炭素価格の上昇を想定している。このシナリオでは世界全体の二

⁶ 大気中の二酸化炭素（のみ）の濃度は 2100 年には約 385ppm に達する、つまりシナリオは濃度カテゴリ I (<400ppm) に分類されることに注意する。表 10.2.2 も参照。

酸化炭素排出量を 2050 年までに年 3.7Gt CO₂ のレベルに制限するという重要な制約がある。これを達成するために、このシナリオは現在利用可能な最も実践的な技術を使用して、エネルギー効率の大きなポテンシャルを十分に開発し、再生可能エネルギー使用を促進する著しい努力を特徴としている。すべての部門において、最新の市場成長予測とそれによる再生可能エネルギー業界のコスト削減の結果が考慮されており、再生可能エネルギー部門の安定した成長が推進されている。再生可能エネルギーの市場浸透を促進するために、効果的な通信システムと技術を合わせた、電気自動車のより迅速な導入、スマートメーターの導入、変動性のある再生可能エネルギー発電（太陽光発電と風力）の高い割合での使用を許容するためのスーパー系統の早い拡大といった様々な追加措置が想定されている。シナリオの手法の背景は、エネルギーと環境計画パッケージ MESAP のシミュレーションモデル PlaNet (Krewitt et al. (2009) 参照) であり、これは国、地域及び地方レベルの長期戦略計画のために作成されたものである。このモデルは各部門の非常に詳細な技術の内訳を特色としている。シミュレーションアプローチに続き、他の要因の中でも、活動と需要の推進力（交通需要など）、及び技術の関連する市場シェアは消費者によって外生的に規定される (Teske et al., (2010) のシナリオ「先進 Energy [R]evolution 2010」)。

10.3.1.1 電力部門の再生可能エネルギーの普及

ここで分析される再生可能エネルギーの電力部門シナリオは、中期における暖房部門と輸送部門のどのシナリオと比較しても、よりダイナミックな発展とより大きな再生可能エネルギーの割合を示している。

再生可能エネルギーの電力部門の市場成長要素

技術コストと性能の前提はシナリオにおいてエネルギー普及に影響する最も影響力の強い変数の中の 1 つである。コストの想定で最も大きく変動するのは太陽光発電、集光型太陽熱発電、及び海洋エネルギーである。実例としては、2020 年の分析されたシナリオの中で最も高額な太陽光発電のコスト予測は US ドル (2005 年) 5,406US ドル (2005 年) /kW であり、最も低額な予測はその半分を下回る 2,177US ドル (2005 年) /kW であった。すべてのシナリオが将来のコスト削減を前提としているが、上限は現在の市場価格の範囲 (3.8.3 参照) である。これは、新技術市場を対象とするシナリオ分析の典型的な問題を示しており、そこではシナリオの中の数字が新しいの発達によって取って代わられてしまうことが多い。コストの前提が変わればシナリオの中において、極めて異なる市場成長の道筋へとつながり、太陽光発電ベースの発電では、緩和指向のシナリオにおいてさえ 2020 年で 115TWh (414PJ) から 594TWh (2,138PJ) までその範囲が広がっている (表 10.4 参照)。これは、年間市場成長率でそれぞれ 18%~42% に相当している。

しかしながら、2050 年に設置される太陽光発電システムのコスト予測の変動幅は著しく低く、低い例では 753US ドル (2005 年) /kW から、高い例では 1,125US ドル (2005 年) /kW である。それにも関わらず、シナリオにおいて期待される普及率はかなり異なっている。太陽光発電ベースの発電では 2050 年には 2 つの緩和指向シナリオの間では、ReMIND-RECIPE シナリオの 20,790TWh/年 (74,844PJ/年) に対し、MinCam-EMF22 では 822TWh/年 (2,959PJ/年) と、25 倍もの差が生じる。この例は、太陽光発電の普及の道筋の結果が、コストの前提のみならず、多くの他の要因（二酸化炭素回収・貯留や MinCam-EMF 22 の場合原子力発電といった代替緩和技術の利用可能性と特徴など）にも依存するため、分析が複雑であることを明らかにしている。

すべての発電用再生可能エネルギー技術の中で、モデルでのコスト予測において陸上風力エネルギーの変動が最も小さく、全体の時間枠にわたり変動幅は約±10%である。コスト最適化エネルギーモデルは各技術のコスト前提を市場拡大または縮小の主要な決定要因の 1 つとして使用するの、入力コスト前提はシナリオのエネルギーミックスを決定するうえで重要な役割を果たす。

再生可能エネルギー電力部門の年間市場ポテンシャル

分析したシナリオのエネルギーパラメータに基づき、必要な年間発電容量（年間市場規模を表す）は事後に計算されている (IEA-WEO2009 - ベースライン、ReMIND-RECIPE、MinCam-EMF 22) か、またはシナリオの執筆者により提供されているか (ER-2010) のどちらかである。これらの計算された発電容量 (表 10.4) には動力の再供給（つまり古い風車を新しいものと交換する）の追加ニーズは含まれていない。分析されたシナリオにおいては、現在の市場の原動力がどのように変わるかについての予測と同様に、年間市場成長率も大きく異なっている。いくつかのケースにおいては、野心的な温室効果ガスの安定化レベルを目標とするシナリオでさえ、現在の平均的市場成長率の大きな縮小が示されている。世界の太陽光発電産業の 1998 年~2008 年の平均年成長率は 35%であった (EPIA, 2008)。風力産業は同時期に 30%の平均年成長率を経験した (Sawyer, 2009)。太陽光発電、集光型太陽熱発電、及び風力産業の先進技術ロードマップでは次の 10 年間これらの年間成長率の維持が可能であり (Sawyer, 2009; EPIA, 2010)、その後に減少に転じることが示されているが、ほとんどの分析された統合エネルギーシナリオでは、すべての再生可能エネルギー電力供給技術についてこれよりはるかにゆっくりとした年間成長率が予測されている。MiniCAM-EMF22 シナリオでは、特に現在のレベルでの成長率の安定化は予測していないが、その代わりに、

代替となる非再生可能エネルギーの緩和技術、または他の再生可能エネルギーオプション（バイオマス技術のような）のほうが、太陽光発電よりもコスト競争力があることがわかった。さらに、MiniCAM-EMF22 は中期におけるオーバーシュートシナリオの典型であり、2030 年により野心的な温室効果ガス安定化レベルを掲げる他のシナリオ（ER-2010 など）よりも再生可能エネルギーのさらなる普及への圧力は極めて低い。さらに、MiniCAM-EMF22 と ReMIND-RECIPE は主にコスト主導のシナリオであるが、ER-2010 シナリオでは市場の成長がシミュレーションされており、それは外的背景に基づいている。これらの背景では ER-2010 は再生可能エネルギー部門の安定した成長と雇用を達成するために、再生可能エネルギー市場の年間での大きな変動を回避しようという試みがなされている。

特定の再生可能エネルギーのコスト予測と他の供給側の緩和技術（二酸化炭素回収・貯留や原子力など）の前提に加えて、電力需要の未来は、絶対的市場シェアの点で再生可能エネルギー源の未来の役割を決定する一助となるだろう。すべてのシナリオにおいて高いエネルギー需要が高い再生可能エネルギーの普及と一致する必要は必ずしもない。ReMIND-RECIPE と MiniCAM-EMF22 は両方とも電力需要の大きな増加を予測しているが、MiniCAM-EMF22 では低い再生可能エネルギーの市場シェアを予測し、そして、ReMIND-RECIPE では高い再生可能エネルギーの市場シェアを予測している。ER-2010 は分析されたすべてのシナリオの中でも需要の予測が最も低く、再生可能エネルギーの割合は最も高くなっている。しかしながら、太陽熱と風力の ER-2010（絶対数）の再生可能エネルギーの市場予測はシナリオ間においてそれぞれ中及び高い範囲となっているが、水力及びバイオマスは低い範囲となっている。いくつかのシナリオで電力需要が高いのは、省エネルギー（電力）の将来における役割に対する期待が比較的低いためである。

表 10.4: 4つの例示シナリオのシナリオ結果の概要: 再生可能発電、再生可能エネルギー市場シェアの結果、年間市場成長率、及び求められる年間発電容量。IEA-WEO2009 - ベースラインと ER-2010 のどちらもバイオエネルギーと地熱を組み合わせたコジェネレーションと、発電のみの発電プラントの別々のカテゴリを持つ。発電はこの表からは除外されており表 10.5 に記載されている。「na」はデータがない、「nsm」は特にモデル化されていないことを表す。出典: IEA-WEO2009 - ベースライン (IEA, 2009; Teske et al., 2010)、ReMIND-RECIPE (Luderer et al., 2009)、MiniCAM-EMF22 (Calvin et al., 2009)、ER-2010 (Teske et al., 2010)。

	エネルギーパラメータ								市場の成長							
	発電 [EJ/年]				分析されたシナリオの需要予測に基づく世界需要のパーセント [%]				年間市場成長 [%/年]				年間市場規模 [GW/年]			
	IEA-WEO 2009-ベースライン	ReMI ND-R ECIP E	MiniC AM-E MF22	ER-2 010	IEA-WEO 2009-ベースライン	ReMI ND-R ECIP E	MiniC AM-E MF22	ER-2 010	IEA-WEO 2009-ベースライン	ReMI ND-R ECIP E	MiniC AM-E MF22	ER-2 010	IEA-WEO 2009-ベースライン	ReMI ND-R ECIP E	MiniC AM-E MF22	ER-20 10
シナリオごとの予測される熱需要総量																
2020	98.1	117.9	103.4	92.9												
2030	123.5	146.3	124.8	111.2												
2050	167.6	228.2	222.4	158.1												
太陽熱																
太陽光発電 2020	0.4	0.8	0.4	2.1	0.4	0.7	0.4	2.3	17	27	18	42	5	12	6	36
太陽光発電 2030	1.0	9.3	1.0	7.0	0.8	6.4	0.8	6.3	11	32	10	14	18	163	17	120
太陽光発電 2050	2.3	74.8	3.0	24.6	1.4	32.8	1.3	15.6	4	12	6	7	40	651	25	211
集光型太陽熱発電 2020	0.1	na	0.7	2.5	0.1	na	0.7	2.7	17	na	40	62	1	na	3	12
集光型太陽熱発電 2030	0.4	na	2.0	9.8	0.4	na	1.5	8.8	14	na	13	17	2	na	9	45
集光型太陽熱発電 2050	0.9	na	5.6	32.4	0.5	na	2.5	20.5	4	na	6	6	4	na	11	66
風力																
陸上+洋上 2020	3.6	16.7	8.6	10.3	3.7	14.2	8.4	11.0	12	33	23	26	26	175	83	101
陸上+洋上 2030	5.5	35.2	15.8	21.1	4.5	24.0	11.9	19.0	5	9	7	8	60	381	171	229
陸上+洋上 2050	9.1	51.4	28.3	39.0	5.4	22.6	12.5	24.7	3	2	3	3	93	262	146	202

		エネルギーパラメータ								市場の成長							
		発電 [EJ/年]				分析されたシナリオの需要予測 に基づく世界需要のパーセント [%]				年間市場成長 [%/年]				年間市場規模 [GW/年]			
		IEA-W EO200 9 - ベ ースラ イン	ReMIN D-RE CIPE	MiniC AM-E MF22	ER-20 10	IEA-W EO200 9 - ベ ースラ イン	ReMIN D-RE CIPE	MiniC AM-E MF22	ER-20 10	IEA-W EO200 9 - ベ ースラ イン	ReMIN D-RE CIPE	MiniC AM-E MF22	ER-20 10	IEA-W EO200 9 - ベ ースラ イン	ReMIN D-RE CIPE	MiniC AM-E MF22	ER-201 0
地熱																	
発電用	2020	0.4	nsm	nsm	1.3	0.4	nsm	nsm	1.4	6	nsm	nsm	20	1	nsm	nsm	4
	2030	0.6	nsm	nsm	4.6	0.5	nsm	nsm	4.1	4	nsm	nsm	15	2	nsm	nsm	18
	2050	1.0	nsm	nsm	10.7	0.6	nsm	nsm	6.8	2	nsm	nsm	5	4	nsm	nsm	21
熱電用	2020	0.0	nsm	nsm	0.2	0.0	nsm	nsm	0.3	13	nsm	nsm	47	0	nsm	nsm	1
	2030	0.0	nsm	nsm	0.9	0.0	nsm	nsm	0.8	5	nsm	nsm	16	0	nsm	nsm	5
	2050	0.1	nsm	nsm	4.5	0.0	nsm	nsm	2.9	4	nsm	nsm	9	0	nsm	nsm	11
バイオエネルギー																	
発電用	2020	1.2	7.9	1.8	1.4	1.2	6.7	1.8	1.5	8	33	13	10	3	37	6	4
	2030	2.0	12.7	3.4	1.7	1.6	8.7	2.6	1.6	6	5	7	2	10	59	16	8
	2050	3.6	15.2	21.0	2.1	2.1	6.6	9.3	1.3	3	1	10	1	13	26	40	4
熱電用	2020	0.7	nsm	nsm	2.7	0.7	nsm	nsm	2.9	2	nsm	nsm	19	1	nsm	nsm	13
	2030	1.0	nsm	nsm	5.1	0.8	nsm	nsm	4.6	5	nsm	nsm	8	6	nsm	nsm	27
	2050	1.7	nsm	nsm	10.8	1.0	nsm	nsm	6.8	3	nsm	nsm	4	8	nsm	nsm	25
海洋																	
	2020	0.0	nsm	nsm	0.4	0.0	nsm	nsm	0.5	13	nsm	nsm	70	0	nsm	nsm	4
	2030	0.0	nsm	nsm	1.5	0.0	nsm	nsm	1.4	16	nsm	nsm	15	0	nsm	nsm	12
	2050	0.1	nsm	nsm	7.0	0.1	nsm	nsm	4.4	4	nsm	nsm	8	1	nsm	nsm	27
水力																	
	2020	14.5	15.1	12.1	14.6	14.8	12.8	11.9	15.7	2	2	0	2	20	25	0	21
	2030	16.8	18.9	13.4	15.9	13.6	13.0	10.1	14.3	2	3	1	1	135	151	109	127
	2050	21.5	23.7	15.8	18.4	12.8	10.4	7.0	11.6	1	1	1	1	78	86	57	67
発電用再生可能エネルギー計（コージェネレーションを含む）																	
	2020	21.0	40.6	23.6	35.6	21.4	34.4	23.6	38.3	4	12	6	10	57	249	98	197
	2030	27.5	76.2	35.6	67.8	22.3	52.1	20.3	60.9	3	7	5	7	232	755	322	590
	2050	40.2	165.1	73.7	149.6	24.0	72.4	35.1	94.6	2	4	4	4	240	1026	280	634

シナリオ中での将来の再生可能エネルギーの普及拡大の基となる前提は、常に現在の発電容量に対応しているとは限らないため、実際の市場行動（相互作用）を反映することができない。たとえば IEA-WEO2009 - ベースラインシナリオは 2020 年の風力発電の世界的普及を、現在利用可能な発電容量⁷よりも低く予測しているが、これは風力タービンの設備過剰と市場価格の低下となり得る。風力発電の価格の低下は、他の全てが等しいのであれば、より大きな普及につながるだろう。これはシナリオ分析を用いて非常にダイナミックな（そしてこの場合には政策誘導の）部門を扱うことの問題を再度提示している。他方、ReMIND-RECIPE の風力発電が高いシナリオでは 2020 年までに年間発電容量が 175GW となることを要求しており、それは全世界レベルでの発電容量の 4 倍の増加を意味している。ER-2010 と MiniCAM-EMF22 のどちらのシナリオも約 10 年後（2030 年までに）にはこの発電容量を求めており、その結果これらのシナリオの需要予測下での世界的な風力発電の割合を 12～19%としている。世界的に風力発電の割合が最も高いのは ReMIND-RECIPE シナリオで、2030 年までに 24%としているが、それは ER-2010 シナリオでは 2050 年によりやく到達出来る割合である。ReMIND-RECIPE シナリオがそれほど高い再生可能エネルギー普及を予測している理由の 1 つは、再生可能エネルギー技術が学習されることを考慮に入れ、技術の進歩ならびにコスト削減効果を内側から考えているからである。さらに、前提となるモデルでは理想的な見通しを想定しており、再生可能エネルギー統合に関して起こりうる障害を系統のインフラと貯蔵（Box 10.2 参照）の先行計画によって解決することを想定している。2030 年の風力発電の普及が ER-2010 のものより低くなっているのは、長期統合コストと再生可能エネルギー部門と他の経済部門間での労働力の再配分の可能性に限度があるために、シナリオが風力発電の拡大を制限しているからである。

図 10.13 は再生可能エネルギー源による発電の様々なシナリオ予測からの 2050 年の結果の範囲をまとめたものである。太陽光発電、集光型太陽熱発電、及び風力発電は 2020 年以降予測される市場ポテンシャルが最高となっている。水力発電はほとんどすべてのシナリオで比較的高く安定したレベルを維持しており（2030 年までに 10～15%）、予測間に高い相関関係があることを示唆している。再生可能エネルギー発電の市場ポテンシャルの総量は最も低い場合で（IEA-WEO2009 - ベースライン）2008 年のレベルより 9%高く、2050 年までに 24%のシェアとなる。再生可能エネルギー発電シェアで最も高いのは 2050 年までに 95%（ER-2010）と 72%（ReMIND-RECIPE）であるが、MiniCAM-EMF22 シナリオでは世界的再生可能エネルギー発電シェアが到達するのは 35%である。

即ち、すべてのシナリオでは再生可能エネルギー発電の著しい増加を予測している。再生可能エネルギー発電技術に要求される発電容量の増加が成長への基本的な障壁であるとは今まで確認されていないが、確かにいくつかのシナリオで想定されている成長への課題を表し得る。再生可能エネルギー以外の異なる緩和技術（化石燃料の二酸化炭素回収・貯留と原子力など）の利用可能性と対応する政策の道筋は、結果として著しく異なり、ほとんどの場合再生可能エネルギーの低い普及につながる。

⁷ 世界風力エネルギー協会（Global Wind Energy Council）発行の世界風力レポート（Global Wind Report 2009）によると、2009 年の世界の風力タービンの年間導入量は 38.3GW であった。

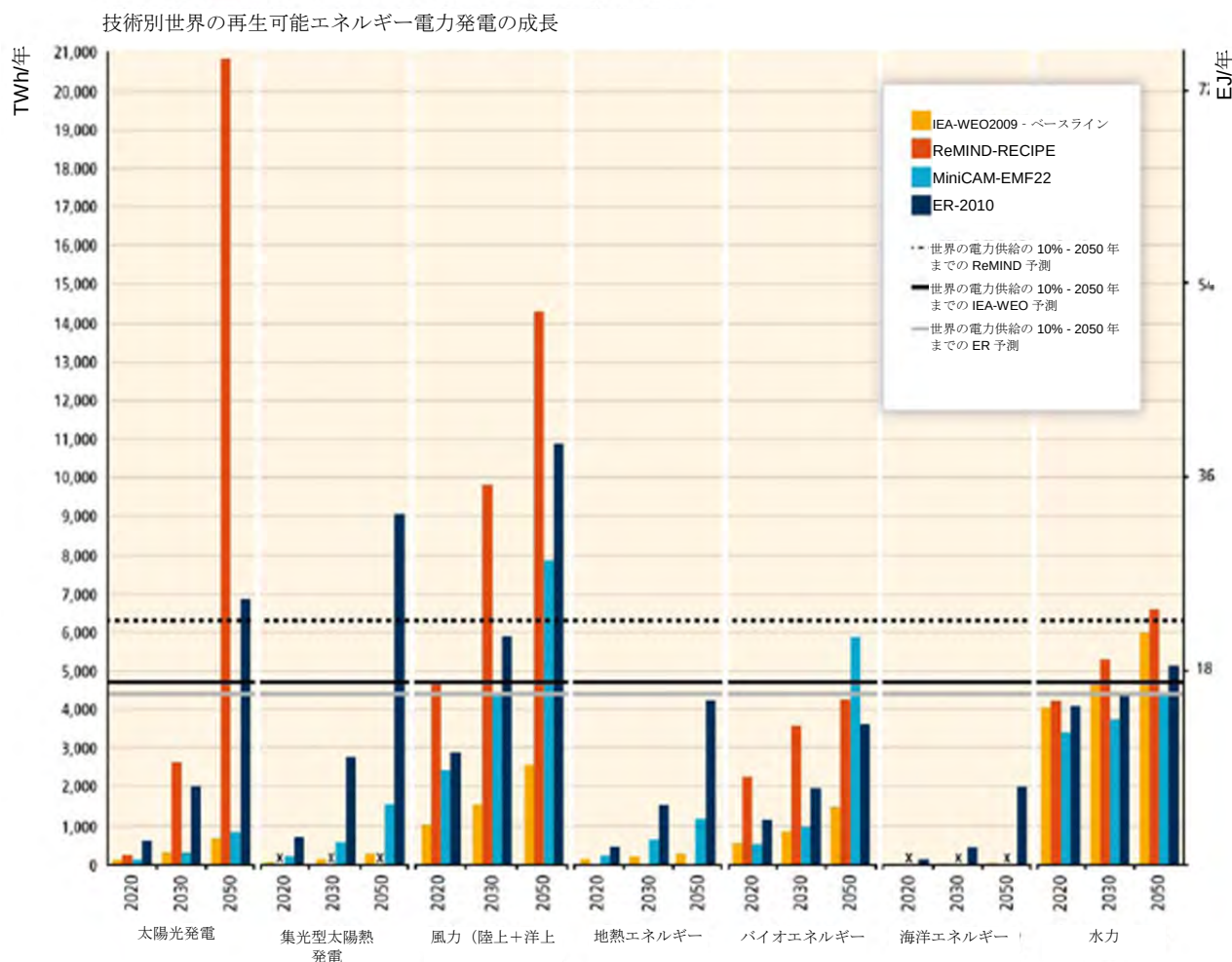


図 10.13: 世界の再生可能エネルギー発電（技術別成長予測と、比較のための 4 つの例示シナリオの世界の発電シェア）。2050 年までの再生可能エネルギー発電量はそれぞれ 11,159TWh/年（IEA-WEO2009 - ベースライン）、63,384TWh/年（ReMINDRECIPE）、21,660TWh/年（MiniCAM-EMF22）、及び 41,500TWh/年（ER-2010）。出典: IEA-WEO2009 - ベースライン（IEA, 2009; Teske et al., 2010）、ReMIND-RECIPE（Luderer et al., 2009）、MiniCAM-EMF22（Calvin et al., 2009）、ER-2010（Teske et al., 2010）。

10.3.1.2 暖房及び冷房部門の再生可能エネルギー普及

暖房部門は需要部門の中でも最も大きな部門の 1 つで、再生可能エネルギー割合は（主に伝統的なバイオエネルギーであるが）現在高くなっており、特に非 Annex I 諸国で高い。暖房用再生可能エネルギーは冷房にも使用可能で、それにより地中海性、亜熱帯、または熱帯気候の国々に新たな、そしてさらなる市場機会が提供され得る。冷房用の再生可能エネルギーは、ソーラー建築との組み合わせにより、たとえば空調にも適用可能であり、その意味で電気空調の電力需要を著しく削減するだろう。再生可能エネルギー冷暖房技術は様々な異なる技術的な道筋を示しており、異なるインフラを要求する。電力ベースの地中熱利用ヒートポンプシステム、小規模・大規模太陽熱収集器、及びバイオエネルギーコジェネレーションプラントのネットワークを持つ地域暖房は、ある程度競合する技術である。例えば低エネルギー建物はコジェネレーションネットワークの制限要因となり、ヒートポンプなどの電気暖房システムを優先的な選択肢とする可能性がある（8.2.2 参照）。

再生可能エネルギー冷暖房部門の市場成長要因

コスト面以外に、特定の再生可能エネルギー技術に有利となる政策選択と関連するインフラ（地域暖房ネットワークなど）、及び石油とガス価格の予測は、各再生可能エネルギー暖房技術の予測される普及に対して重大な影響を持つ。ER-2010 シナリオのみが世界の再生可能エネルギー割合の 2007 年の 24%⁸（IEAWEO2009-ベースライン）から 2050 年の 90%への著しい増加を示唆しており、一方 4 つの例示シナリオのそれ以外のシナリオにおいては再生可能エネルギー熱は 2020 年までで最大 30%まで（MiniCAM-EMF22）のわずかな増加のみであり、さらに 2050 年

⁸ 料理と暖房用の伝統的バイオマスを除き、再生可能エネルギーは世界の暖房需要総量の約 5~6%を提供可能で、冷房についてはごくわずかな量を提供する（Seyboth et al., 2007）。

までには 2007 年レベルへの再度の減少となる予測をしている。すべての研究が示唆していることは、暖房部門での電力需要は、燃料消費と引き換えに増加することである。

再生可能エネルギー冷暖房の年間市場ポテンシャル

再生可能エネルギー暖房部門は、様々な技術について電力部門で描かれているのに比べてかなり低い成長率予測を示している。最も高い成長率は太陽熱暖房で予測されており、特に温水用と暖房用の太陽熱収集器が高く、地熱暖房がそれに続く。地熱暖房にはヒートポンプが含まれるが、地熱コジェネレーションプラントは再生可能エネルギー発電について説明されている 10.3.2.1 で取り上げられている。

ER-2010 シナリオでは太陽熱暖房システムは、市場成長率において、2020 年までに 35%を超える著しい増加を示し、その後 2050 年の予測期間の終わりまで最低 10%までの成長率となっている（3.4 参照）。

バイオエネルギーの、伝統的で時に持続不可能な暖房用の利用から、木材ペレットオープンまたはバイオガスバーナーのようなバイオエネルギーの暖房といった近代的でより持続可能な利用への転換は、すべてのシナリオで想定されている。バイオマスのより効率的な利用は、バイオマスの全体的な需要を増加させることなく、バイオマス暖房の割合を増加させることである。しかしながら、伝統的バイオマスに対する近代的バイオマス利用の特定の内訳について情報を提供しているのは、分析されたシナリオの中で 1 つのシナリオだけである。そのため、様々なバイオエネルギー暖房システムの真の年間市場成長率を見積もるのは不可能である。

太陽熱収集器や地中熱利用ヒートポンプシステム、あるいはペレット暖房システムのような、再生可能エネルギー暖房技術の国内と工業的規模の両方の市場ポテンシャルは、再生可能エネルギーの電力部門の市場分析と重複する。太陽熱収集器の市場は電力部門とは別であるが、バイオマスコジェネレーションは電力とともに熱も供給する。地中熱利用ヒートポンプシステムはその運転に電力を使用し、そのため電力需要を増加させる。再生可能エネルギー冷暖房は再生可能エネルギー発電よりもっと分散しており、測定不足と相俟って、統計データが十分ではなく、さらなる調査が必要となる理由となっている。分析された 4 つのシナリオのエネルギーパラメータに基づき、必要な生産能力と、それらがどのように現在の能力と関連するかを確認するために、必要な年間の市場規模が計算されている。表 10.5 には予測された市場規模に関する概要が示されている。

すべての再生可能エネルギー冷暖房技術による生産能力は、すべてのシナリオで予測されている再生可能エネルギーの熱生産を実現するために大きく拡大されなければならない。太陽熱収集器の年間市場規模は IEA-WEO2009 - ベースラインの場合には 2020 年の 35PJ/年未満から 2030 年の 100PJ/年へと 3 倍に拡大すると予測されており、ER-2010 の場合には 1,162PJ/年にまでなると予測されている。バイオエネルギーと地熱エネルギー暖房システムの技術のオプションが多様なことと、すべての分析されたシナリオの情報レベルが低いため、ここで技術ごとに特定の市場規模について完全なデータ一式を提供することはできない。

表 10.5: 4つの例示シナリオごとの、予測される再生可能エネルギー熱生産、可能な市場シェア、年成長率、及び年間市場規模。ただし動力再供給のための追加のニーズは含まない。「n/a」：データなし。出典: IEA-WEO2009 - ベースライン (IEA, 2009; Teske et al., 2010)、ReMIND-RECIPE (Luderer et al., 2009)、MiniCAM-EMF22 (Calvin et al., 2009)、ER-2010 (Teske et al., 2010)。

	エネルギーパラメータ								市場の成長							
	発電 [EJ/年]				シナリオの需要予測に基づく世界需要のパーセント（熱電供給を含む） [%]				年間市場成長 [%/年]				年間市場規模 [GW/年]			
	IEA-WEO 2009- ベー スラ イン	ReMI ND-R ECIP E	MiniC AM-E MF22	ER-2 010	IEA-WEO 2009- ベー スラ イン	ReMI ND-R ECIP E	MiniC AM-E MF22	ER-2 010	IEA-WEO 2009- ベー スラ イン	ReMI ND-R ECIP E	MiniC AM-E MF22	ER-2 010	IEA-WEO 2009- ベー スラ イン	ReMI ND-R ECIP E	MiniC AM-E MF22	ER-20 10
シナリオごとの予測される熱需要総量																
2020	158	190	135	152												
2030	174	198	145	156												
2050	205	160	151	152												
太陽熱																
太陽熱 2020	0.8	NA	NA	6.5	0.5	NA	NA	4.5	10	NA	NA	39	32	NA	NA	409
太陽熱 2030	1.6	NA	NA	15.8	0.9	NA	NA	12.2	8	NA	NA	12	100	NA	NA	1162
太陽熱 2050	3.1	NA	NA	38.7	1.5	NA	NA	33.7	3	NA	NA	5	187	NA	NA	1568
地熱暖房																
2020	0.6	0.1	NA	4.4	0.4	0.1	NA	3.0	14	-6	NA	41	6	-1	NA	63
2030	0.9	0.2	NA	9.3	0.5	0.1	NA	7.0	4	7	NA	10	12	3	NA	149
2050	1.6	4.6	NA	26.5	0.8	2.8	NA	26.4	3	18	NA	7	22	66	NA	283
バイオエネルギー暖房																
2020	36.2	40.8	40.4	41.7	23.0	21.5	30.0	27.6	特にモデル化されていない				28	112	104	130
2030	38.2	39.8	39.0	45.4	22.0	20.1	27.0	29.7					678	698	686	811
2050	43.6	32.4	31.7	48.1	21.3	20.2	21.0	31.7					270	191	186	295
再生可能エネルギー暖房計																
2020	37.7	40.9	40.4	52.6	23.9	21.6	20.0	35.0	1	NA	NA	5	66	NA	NA	601
2030	40.7	40.0	39.0	70.5	23.4	20.2	27.0	48.7	1	NA	NA	4	791	NA	NA	2122
2050	48.4	37.0	31.7	113.3	23.6	23.1	21.0	90.8	1	NA	NA	3	479	NA	NA	2146

すべてのシナリオにおける 2050 年までの再生可能エネルギー暖房システムの割合の合計は市場シェア 23%（IEA-WEO2009-ベースライン、ReMIND-RECIPE 及び MiniCAM-EMF22）から 91%（ER-2010）と著しく異なっている。その結果、冷暖房用再生可能エネルギー技術のシェアはシナリオの前提（地域暖房ネットワークの拡大や建物効率・工業プロセスの改善などのインフラの変更に関する前提など）によって著しく変動する。ER-2010 シナリオにおける再生可能エネルギー暖房システムの高い割合は、たとえば太陽熱、地熱、及びバイオエネルギーにより発生する熱を流通させるための地域暖房システムが利用可能になり、2020 年以降競争力を持つだろうという前提に基づいている（表 10.5 参照）。

10.3.1.3 輸送部門の再生可能エネルギー普及

分析されたあらゆる研究における輸送部門での再生可能エネルギーの使用は、液体バイオ燃料、バイオガス由来のバイオメタン、及び私的・公的輸送に使用する再生可能エネルギーによる電気利用の乗り物に限られる。ほとんどのシナリオ文献は船舶用の第二世代の帆などといった新技術は考慮に入れていない。さらに、前提となるシナリオモデル内において報告とカテゴリ化が異なっているため、それらは説得力のあるシナリオ結果の比較を裏付けるものとはなっていない。しかしながら、この比較ですら、再生可能エネルギーの割合の推進力（温室効果ガスの安定化レベルなど）となる著しい影響力を示しているが、その割合はシナリオによって最大一桁まで異なっている（表 10.6 参照）。

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

図 10.14 は、2020 年、2030 年、2050 年の 4 つのシナリオから導かれた供給源ごとの予測される一次エネルギー生産の概観（直接等価法を用いている。1.1.8 を参照）を示すとともに、様々な予測される世界の一次エネルギー需要とその数値を比較したものである。すべてのシナリオにおいて、バイオエネルギーが平均して最も高い市場シェアを獲得しており、太陽エネルギーがそれに続いているが、シナリオごとの結果は異なっている。その主な原因は、バイオエネルギー（第 2 章を参照）は、特定の一次エネルギーの算定基準と組み合わせ、すべての部門（電力、暖房、冷房、及び輸送）にわたって利用可能であるという事実である。バイオエネルギー向けに利用可能な土地は限定されており、自然保護の問題、食物生産、及び材料生産との競争が厳しく、利用可能なバイオエネルギーの部門ごとの利用は、シナリオの前提及び基礎となる優先度に大きく依存している（2.2、2.5、及び 9.3.4 を参照）。太陽エネルギーは、暖房、冷房、及び発電に直接的な形で利用出来るが（電力経由で間接的に輸送目的にも利用出来る）、太陽エネルギー技術は比較的低いレベルから始まっている。一次エネルギーにおける風力及び水力の平均的な割合が比較的低い理由の 1 つは、電力部門における排他的な使用にあるだろう。ただし、特に風力が大きく貢献するとしているシナリオもある。

2050 年までの一次エネルギーミックスにおける総合的な再生可能エネルギーの割合は、4 つのシナリオすべてにわたって大きく変動している。2050 年までに 15%としている（2008 年に 12.9%）IEA-WEO2009-ベースラインが最も低い一次再生可能エネルギーの割合を示しており、ER-2010 は 77%、MiniCAM-EMF22 は 31%、ReMIND-RECIPE は 48%の世界の一次エネルギー需要が再生可能エネルギーによって満たされるとしている。温室効果ガス濃度水準による制約がなければ、再生可能エネルギーの普及率は幾分低くなるということは驚くべきことではないが（IEA-WEO2009-ベースライン）、緩和志向シナリオの間でも大きな違い（相対的な再生可能エネルギーの割合に関して 2 倍以上）があることは注目に値する。繰り返すが、これは、技術に特有の想定（コストなど）、モデルの特徴（内生的学習の組み込みなど）、他の緩和技術の利用可能性に関する想定、及び予想されるエネルギー需要といった多くの要素に起因している。分析した全てのシナリオにおいて、2050 年までの世界の再生可能エネルギーの総導入量は、全体でも使用可能な再生可能エネルギーの技術ポテンシャルの 2%にすら及んでいない（10.3.2.2 を参照）。広範囲に及ぶ再生可能エネルギーの割合は、政策、技術コスト、選択された緩和技術（二酸化炭素回収・貯留の利用可能性など）、及び将来のエネルギー需要予測に関する様々な想定関数である。

表 10.6: 4 つの例示シナリオにおける輸送部門の予測される再生可能エネルギーの割合（注：電力の割合には、再生可能エネルギー電力及び非再生可能エネルギー電力に加え、電力で生産された水素も含まれている。IEA-WEO2009-ベースライン、MiniCAM-EMF22、及び ER-2010 では、電力部門における再生可能エネルギーの割合は、輸送部門に利用される電力の再生可能エネルギーの割合を特定するために利用されている。そのため、輸送部門内の総合的な再生可能エネルギーの割合は、各比率の合計よりも低くなる。）出典：IEA-WEO2009-ベースライン（IEA, 2009; Teske et al., 2010）、ReMINDRECIPE（Luderer et al., 2009）、MiniCAM-EMF22（Calvin et al., 2009）、ER-2010（Teske et al., 2010）

輸送部門における再生可能エネルギーの割合		IEA-WEO2009-ベースライン (%)	ReMIND-RECIPE (%)	MiniCAMEMF22 (%)	ER-2010 (%)
バイオ燃料	2020 年	4.3	2.2	6.8	5.4
	2030 年	4.6	12.9	9.5	9.3
	2050 年	5.0	26.8	10.2	14.0
電力（従来の発電及び水素を含む）	2020 年	1.4	0.1	2.5	4.4
	2030 年	1.5	1.0	4.1	14.7
	2050 年	1.6	6.7	11.2	57.4
総合的な再生可能エネルギーの割合	2020 年	4.6	2.3	7.5	7.3
	2030 年	4.9	13.9	10.8	19.1
	2050 年	5.4	33.6	15.6	68.9

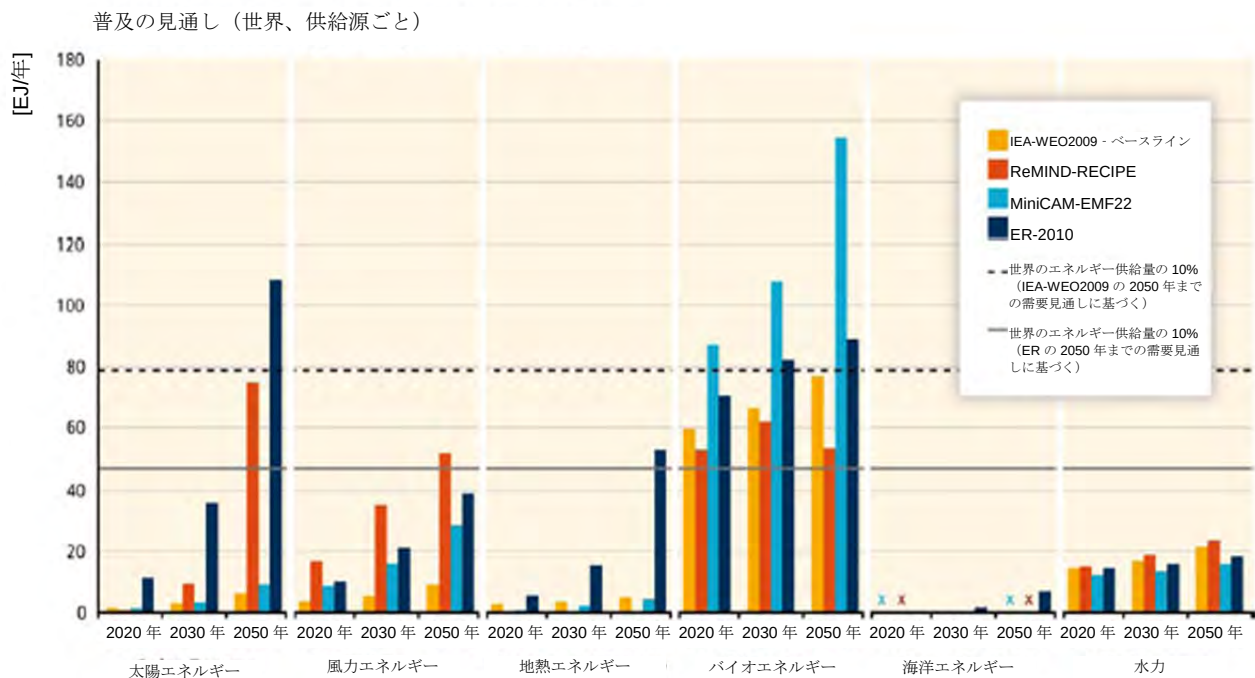


図 10.14: 4 つのシナリオにおける供給源ごとの世界の再生可能エネルギー普及の予測と一次再生可能エネルギーの割合（直接等価法）例示。予測されている 2050 年の総合的な再生可能エネルギーの普及は、それぞれ 117EJ/年（IEA-WEO2009-ベースライン）、214EJ/年（ReMIND-RECIPE）、323EJ/年（MiniCAM-EMF22）、及び 314EJ/年（ER-2010）である。出典：IEA-WEO2009-ベースライン（IEA, 2009; Teske et al., 2010）、ReMIND-RECIPE（Luderer et al., 2009）、MiniCAM-EMF22（Calvin et al., 2009）、ER-2010（Teske et al., 2010）

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

本セクションは地域的展望に焦点を当て、4 つのシナリオにおいて示された地域市場浸透の道筋の概要を示す。各技術に関する地域ごとの技術的ポテンシャルとの比較は、地域の技術的ポテンシャルがどの程度まで利用されるのかを示している。さらに、3 つの地域（中国、インド、及びヨーロッパ）の綿密なコスト曲線分析によって、想定される再生可能エネルギー発電のコストの発生に関してより深い洞察を得ることが出来る。

10.3.2.1 地域の再生可能エネルギー供給曲線

地域のエネルギー供給コスト曲線は、選択されたシナリオの「スナップ写真」として機能するため、シナリオの結果に関するもう 1 つの側面となる。以下の曲線（図 10.15、10.16、及び 10.17）は説明に役立つ例であり、4 つのシナリオの内 3 つの断面図を表している（この分析では MiniCAM-EMF22 に特定したデータは利用できない）⁹。地域のエネルギー供給コスト曲線は特定の目標年次に焦点を当て、様々な地域における特定の再生可能エネルギー電力技術の展開（特定のシナリオの結果）を個々の段階におけるコスト水準と関連付けている。そのため、この曲線は、シナリオの結果（潜在的な展開）を示しており、再生可能エネルギーの技術的ポテンシャルを反映したものではない。

この説明によって、コスト曲線法の 2 つの主な欠点（10.4 でより一般的かつ包括的に解説する）を多少なりとも解決することが出来る。まず、コスト削減曲線（abatement cost curves）の最終形における炭素排出係数、エネルギー価格決定、及び化石燃料政策の重要かつ決定的な役割を認識して、再生可能エネルギー供給コスト曲線のみが作られる（緩和コスト曲線は作らない）。次に、コスト予測における不確実性を把握するため、いくつかのシナリオを検討する。より長い対象期間にわたる動的シナリオを用いて曲線を作ることで（ここでそうしているように）、静的な側面に従う場合の問題も回避出来る。

10.4 で詳述しているコスト曲線に関する一般的な問題以外にも、曲線を正しく解釈するために念頭に置いておくべき点がいくつかある。1 つ目は、ER-2010 及び IEA-WEO2008-ベースラインシナリオ・データは、コスト・データが ReMIND-RECIPE シナリオほど詳細に記述されていないことである。前者 2 つのシナリオでは、ある地域の各技術は、単一の平均コストによって表されている。2 つ目は、地域全体の技術の平均コストは、技術や場所についてのより費用対効果の高い下位の区分を、平均のなかに隠してしまう可能性があるということである。そのため、このアプローチの場合、より安い（またはより高い）場所及び下位技術に光を当てることが不可能である。

コスト水準によって、再生可能エネルギーの普及度から既存の最大容量を推定することは不可能である。そのため、数値には、想定される様々な制約を考慮した上で目標年次に導入されている可能性のあるすべての最大容量が含まれている。なお、空間及びデータの制約により、3 つの地域及び電力部門の曲線のみを示している。

図は、いくつかの重要な傾向を示している。おそらく最も重要な情報は、再生可能エネルギーの長期的展望の重要性である。OECD ヨーロッパを除いて、すべての地域及びシナリオにおいて、再生可能エネルギーの普及は一貫して、2030 年と比較して 2050 年の方がかなり拡大しており（コスト削減効果が原因）、中間コスト水準では 2 倍になっているケースが多い。OECD ヨーロッパにおいても、これらの 2 つの期間の間に再生可能エネルギーの普及は大きく拡大している。ただし、ER-2010 シナリオでは、ほとんどのコスト水準において再生可能エネルギーの普及の約 50%以上の拡大は予想されていない。一方、この期間における中国及びインドでの潜在的な普及はどちらのシナリオにおいても 2 倍以上になる可能性があるという予想されている。

この 3 つのモデルを比較すると、IEA-WEO2008-ベースラインは、3 つの地域すべてにおいて最高のコストと最低の再生可能エネルギーの普及を予測しているのに対し、ReMIND-RECIPE シナリオは概して最低のコスト水準及び最高の再生可能エネルギーの普及を予想している¹⁰。一部の地域では、異なるモデルからの曲線が互いに接近しており、同様のコスト水準においてよく似た普及水準を予測しているが、それらが最も有望であるとしている技術は異なっていることが多い。たとえば、ReMIND-RECIPE シナリオは、太陽光が最も有望で、2050 年には、3 つの地域すべてにおいて、費用対効果の高い再生可能エネルギーの普及の一番大きい部分がこの技術によるものであると見ている。ER-2010 シナリオで予測された再生可能エネルギーの普及は、風力（陸上及び洋上）、太陽光、集光型太陽熱発電（CSP）、水力、及び地熱エネルギーの組み合わせによって構成されている。IEA-WEO2008-ベースラインは、主に 2030 年を通して風力及び水力と予測しており、すべての地域において太陽熱は高価すぎるとしている。コスト及び普及水準の両方においてシナリオが最も異なっているのはこの技術である。たとえば、ReMIND-RECIPE における OECD ヨーロッパの 2050 年に最も高い太陽光コスト幅は、2030 年までの IEA-WEO2008-ベースラインによって予測された平均太陽光コストの約 4 分の 1 であり、2030 年の最も高いコスト幅ですら IEA-WEO2008-ベースラインによって予測された平均太陽光コストの半分である。

⁹ ここでは、本セクションの他の部分とは違い、データの制約により、ベースライン・シナリオを示すために、IEA-WEO2009-Baseline ではなく IEA-WEO2008-Baseline が利用されている。

¹⁰ ReMIND-RECIPE は、再生可能エネルギー技術が産業規模で最適な場所に導入され、需要中心まで長距離（最大で大陸規模）輸送されると想定している。これは、系統インフラに関するボトルネックなどは初期及び先行計画によって回避されることを暗に想定している。そのため、他のシナリオを比べて ReMIND-RECIPE における設備利用率が高くなっており、これは発電コスト及び普及水準に大きく影響している。

再生可能エネルギー電力ポテンシャルの供給曲線 - 中国（2030 年及び 2050 年）

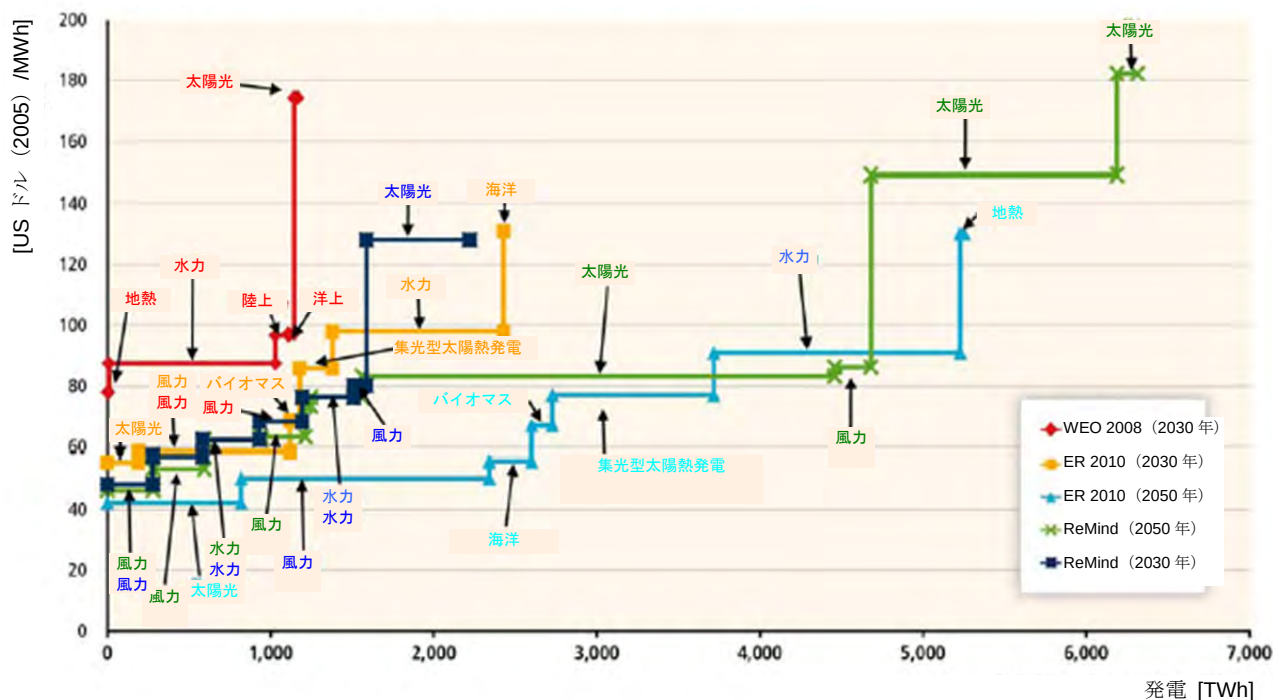


図 10.15: 2030 年及び 2050 年の中国における再生可能エネルギー電力供給曲線の例。この曲線は、シナリオの結果（普及の水準）を示しており、再生可能エネルギーの技術的ポテンシャルを反映したものではない。

様々なシナリオが、集光型太陽熱発電について異なる役割及びコストを想定している。ReMIND-RECIPE は、太陽光に基づいてパラメータ化された一般的な太陽エネルギー技術を検討しているため、このシナリオにおいては、この技術は特にモデル化されていない。ER-2010 シナリオは、長期的に中国とインド両方において、コストが高くなっても、太陽光よりも集光型太陽熱発電の果たす役割がより大きくなると予想している。これらのモデルはどちらも、地熱エネルギーの大規模な普及は想定していないが、そのコストについての予想は大きく異なっている。IEA-WEO2008-ベースラインにおけるこの発電源のコストは、同じ目標年次（2030 年）における ER-2010 シナリオの約半分であり、2050 年でも、ER-2010 のコスト予測はこの技術に関して、2030 年の IEA-WEO2008-ベースラインシナリオよりもかなり高くなっている。ただし、このコストにおける普及水準は他のシナリオの予測よりも数倍高く、検討された地域の中でもインド及び OECD ヨーロッパにおける 2050 年の総普及率に著しく貢献している。なお、ReMIND-RECIPE シナリオは、地熱発電を考慮していない。

また、電力供給の質に関して、提示された供給曲線は変動性が高く、予測不可能な場合もあるエネルギー源と配分可能なエネルギー源を区別していないことに留意すべきである。この面で、必要となる可能性がある高い信頼性水準のためのコスト・プレミアムも、変動性の高い再生可能エネルギー源の追加的なバックアップ・コストとなるとは考えられていない。

再生可能エネルギー電力ポテンシャルの供給曲線 - 中国 (2030 年及び 2050 年)

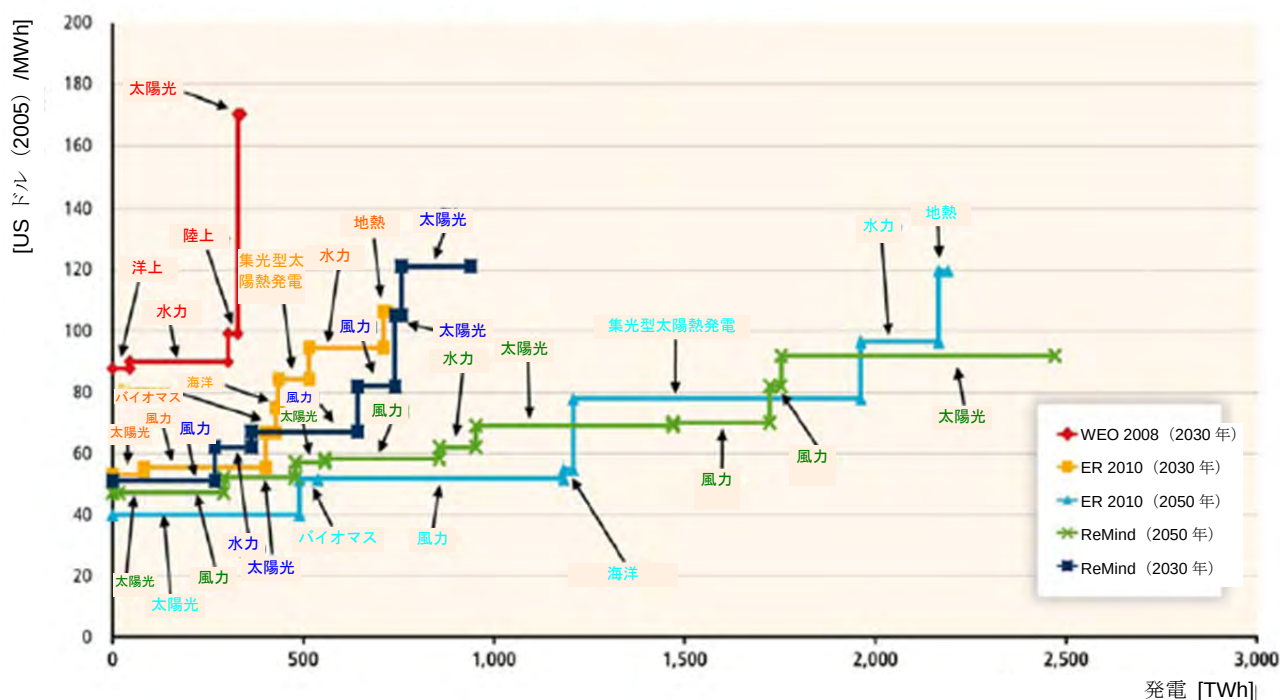


図 10.16: 2030 年及び 2050 年のインドにおける再生可能エネルギー電力供給曲線の例。この曲線は、シナリオの結果（普及の水準）を示しており、再生可能エネルギーの技術的ポテンシャルを反映したものではない。

再生可能エネルギー電力ポテンシャルの供給曲線 - OECD ヨーロッパ (2030 年及び 2050 年)

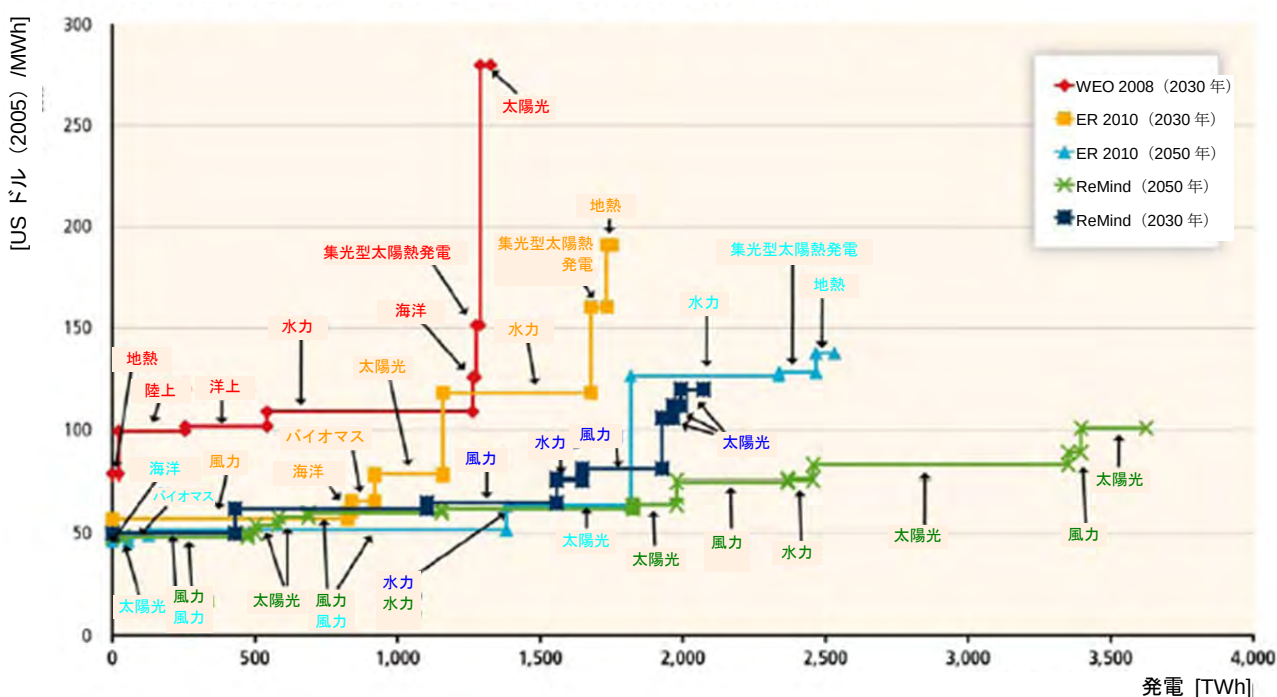


図 10.17: 2030 年及び 2050 年の OECD ヨーロッパにおける再生可能エネルギー電力供給曲線の例。この曲線は、シナリオの結果（普及の水準）を示しており、再生可能エネルギーの技術的ポテンシャルを反映したものではない。

10.3.2.2 地域、技術、及び部門ごとの一次エネルギー

本セクションでは、4つのシナリオで与えられた潜在的な普及の道筋と地域ごとの技術的ポテンシャルの比較に関する概要を示す。各技術の普及割合は、地域の技術的ポテンシャルがどの程度まで活用されているかを示している。

図 10.19 は、4つのシナリオの地域及び技術ごとの技術的ポテンシャルに関して、再生可能エネルギーの一次エネ

ルギーにおける寄与の結果を比較している。一方、図 10.18 は、2050 年までの需要予測及び現在の地域的一次エネルギー需要と比較して、地域ごとにすべてのシナリオ（再生可能エネルギーについて）の概要を示している。

様々なシナリオにおける 2050 年の地域ごとの再生可能エネルギーの予測普及度

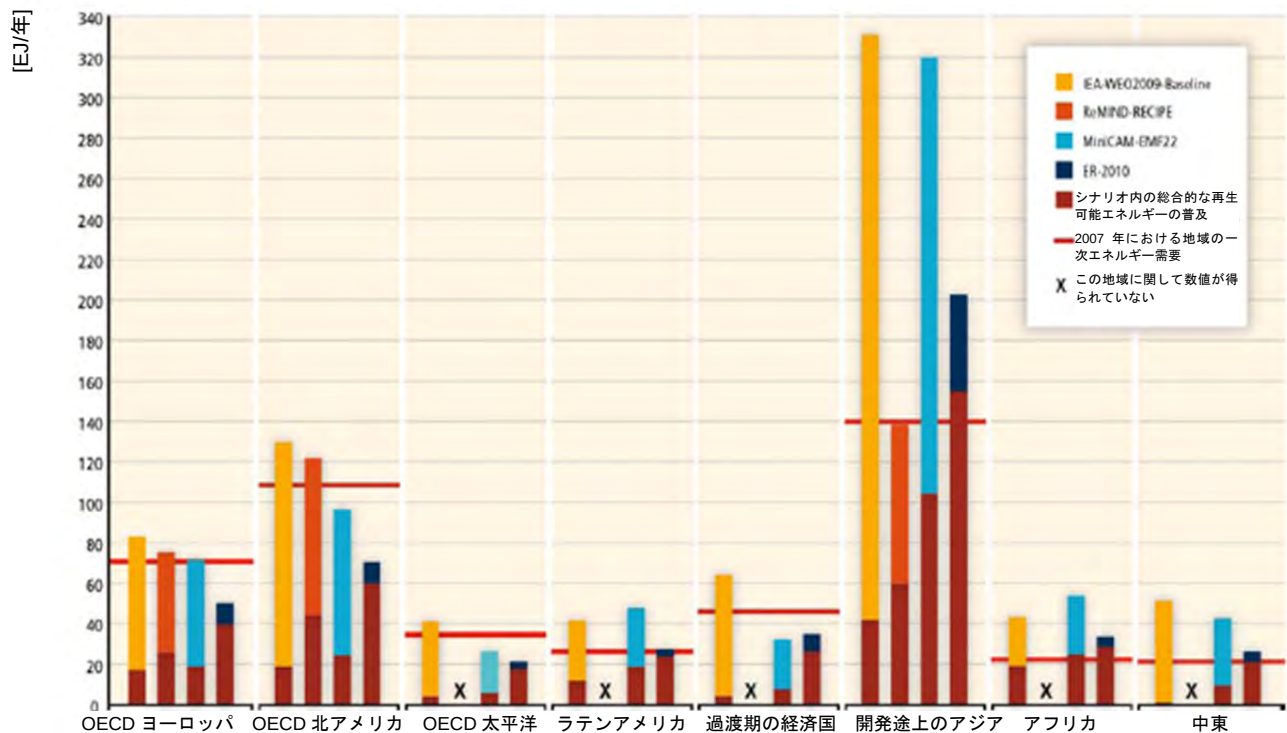
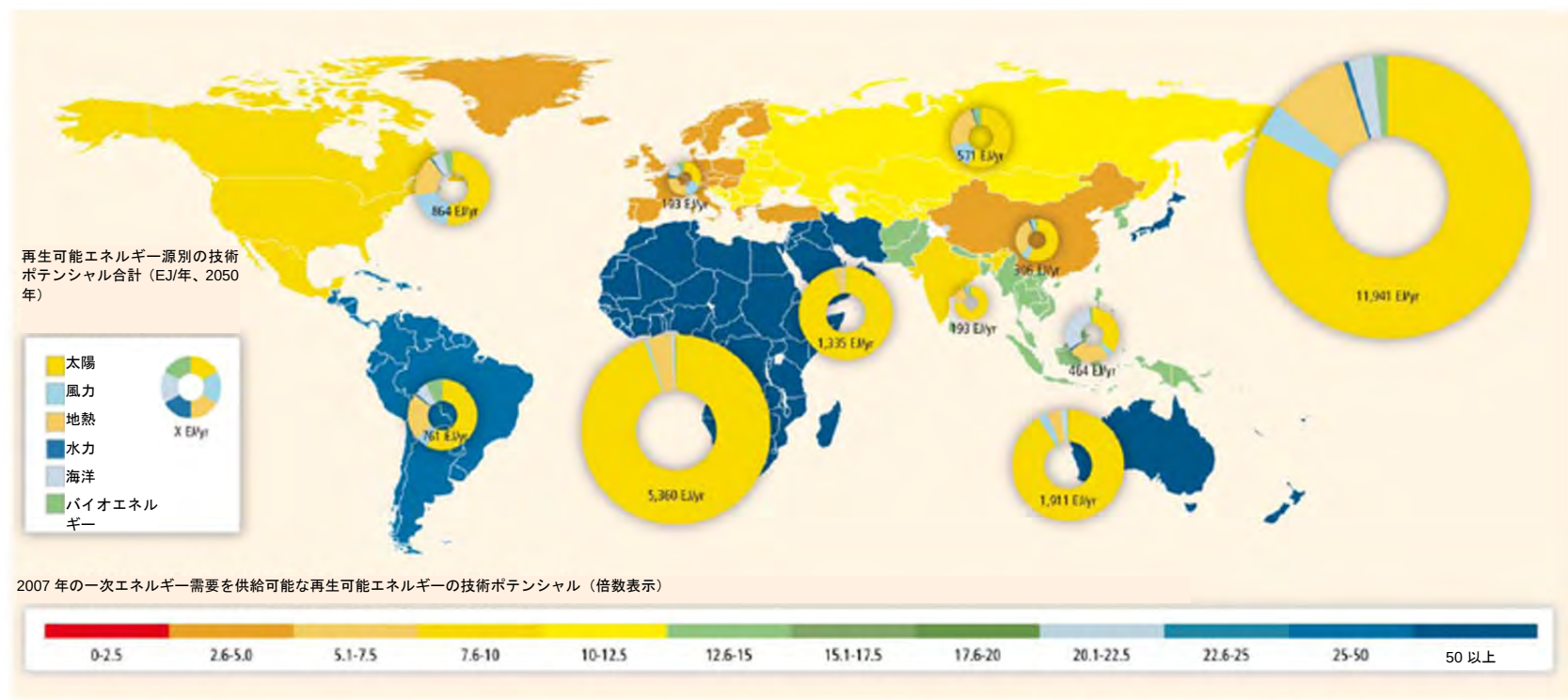


図 10.18: 2050 年における選択された 4 つのシナリオの潜在的なエネルギー需要及び再生可能エネルギーの潜在的普及度の地域別内訳（直接等価）。出典：IEA-WEO2009-ベースライン（IEA, 2009; Teske et al., 2010）、ReMIND-RECIPE（Luderer et al., 2009）、MiniCAM-EMF22（Calvin et al., 2009）、ER-2010（Teske et al., 2010）。比較のため、2007 年の一次エネルギー総需要が与えられている（IEA, 2009）。

2050 年における再生可能エネルギーの全体的な技術的ポテンシャルの内、最大の普及率はインドの計 22.1%（ER-2010）で、中国の 17.7%（ER-2010）及び OECD ヨーロッパの 15.3%（ER-2010）がそれに続いている。2050 年までに、2 つの地域が、地域的に利用可能な技術的再生可能エネルギーポテンシャルの約 5～7%の普及率を持つ。それは、開発途上のアジアの 6.9%（MiniCAM-EMF22）及び OECD 北アメリカの 5.5%（ER-2010）である。残りの 5 つの地域は、再生可能エネルギーの利用可能な技術的ポテンシャルの 4.5%未満を利用する。風力エネルギーは、すべての地域において太陽エネルギーよりも大規模に活用されている。地熱エネルギーは、分析されたどのシナリオにおいても技術的ポテンシャルの限界には達しておらず、地域レベルでも世界レベルでも普及率が 5%以下に留まっている。いくつかの特定の地域（中国、インド、ヨーロッパなど）以外では、非常に新しい技術形態である海洋エネルギーに関しても同じことが言える。世界レベルで確立された水力ポテンシャルの展開は、技術的ポテンシャルの約 3 分の 1 をカバーしており、いくつかの特定の地域では、2050 年の推定最大出力はすでに潜在的な最大出力の限界に非常に近くなっている。



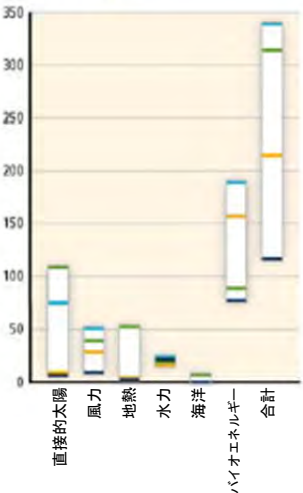
再生可能エネルギーのポテンシャル分析：本ページの再生可能エネルギーの技術ポテンシャルは、Krewitt et al. (2009) が 2009 年以前に公表した研究のレビューに基づき、世界合計と地域のポテンシャルを示す。エネルギー生産に既に活用されているポテンシャルは差し引いていない。研究の間に見られる方法論の相違や計算方法によって、技術、地域、あるいは一次エネルギー需要に対してこれらの推定値を厳密に比較することは出来ない。2009 年以降に公表された再生可能エネルギーの技術ポテンシャルの分析は一部のケースで高くなっているが、この図では含んでいない。しかしながら、一部の再生可能エネルギー技術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

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

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



世界 - EJ/年



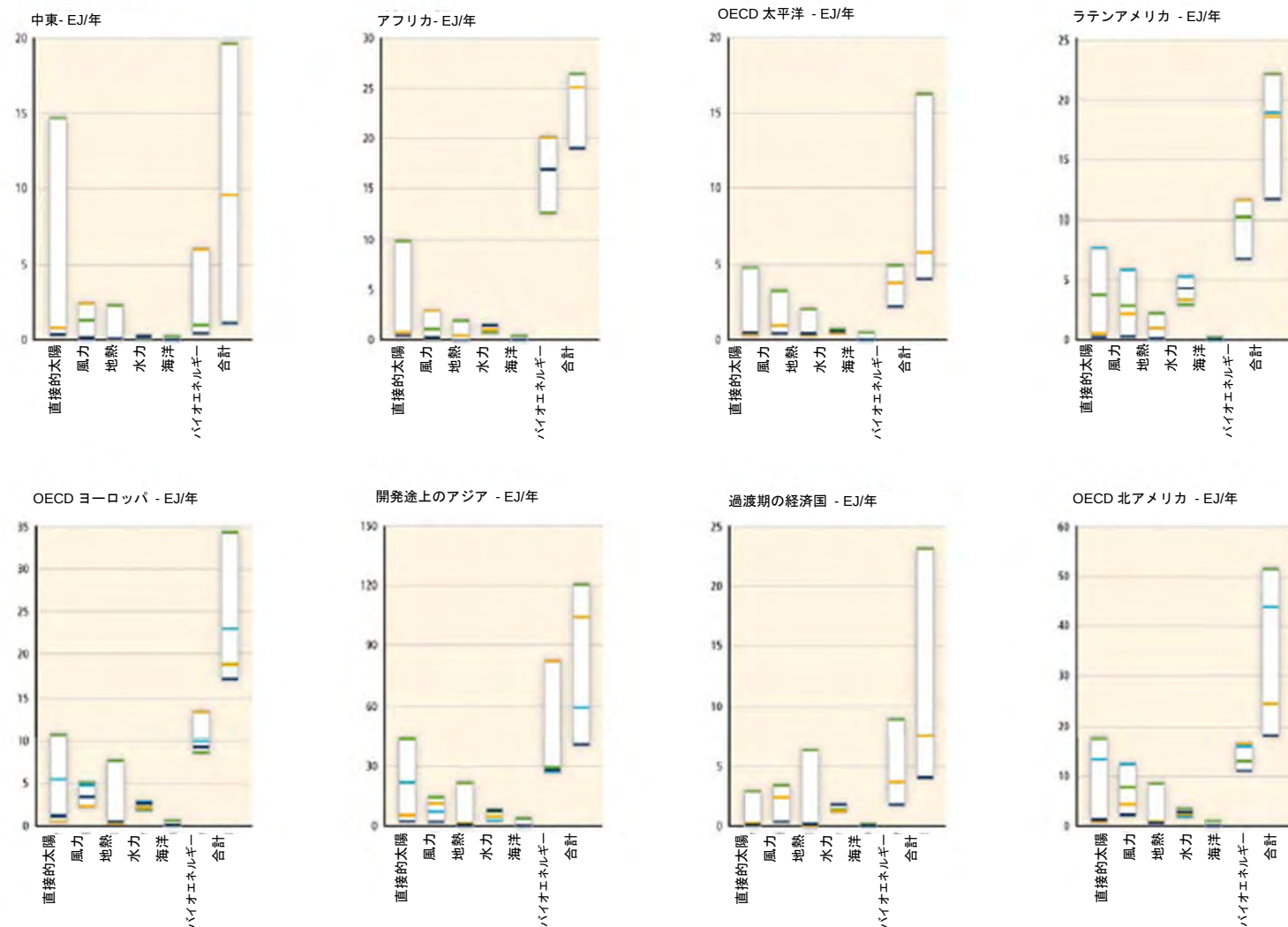


図 10.19: 4 つの選択されたシナリオにおける、2050 年の様々な技術及び地域に関する再生可能エネルギーの一次エネルギーへの寄与（直接等価法）と、対応する技術ポテンシャルの関係の概観。地域の集合が異なるため、すべてのモデルがあらゆる地域に関するデータを提供しているわけではない。

注: 第 2 章から第 7 章で示した技術ポテンシャルのデータは、評価した研究や基礎となる手法が異なるため、Krewitt et al. (2009) の数値とは一致しない可能性がある（第 1 章も参照。第 1 章では、Krewitt et al. (2009) の世界規模の再生可能エネルギーの技術ポテンシャル推定値を、第 2 章から第 7 章で示す文献の数値の幅と比較している）。

再生可能エネルギーの全体的な技術的ポテンシャルは、現在の世界の一次エネルギーよりも1桁大きい（第1章）、同等の高い再生可能エネルギーの成長率を示す、再生可能エネルギーの普及に関して最も野心的な2つのシナリオでさえ、世界レベルでの2050年の再生可能エネルギーの技術的ポテンシャルの2.5%（ER 2010: 2.3%; MiniCAM-EMF22: 1.8%）を超えていない。

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

本セクションは、全体及び個別の技術の両面から、再生可能エネルギーが気候変動緩和にどの程度貢献出来るかという問題に焦点を当てている。本セクションで示す数値は、4つの例示シナリオ（様々な再生可能エネルギー技術の基礎となる普及の道筋など）の結果に由来する。再生可能エネルギー技術によって緩和される温室効果ガスの量は、混合エネルギーにおける温室効果ガスの量に加え、再生可能エネルギーが代替するのは化石燃料だけと想定するか、またはその他のエネルギー生産技術（原子力、その他の再生可能エネルギーなど）の代替にもなると想定しているかに大きく依存している。そして、特定の不確実性を反映するため、本セクションでは一定の範囲にわたって温室効果ガス緩和ポテンシャルを示している。数値を示しているシナリオの数は限定的であるということに加え、以下の計算は必然的に単一化した前提に基づいており、指標としての参照のみ可能であるという点に留意する必要がある。

電力部門では、以下の3つのケースによって範囲が定義されている。

- ・上位のケース：化石燃料発電構成の具体的かつ平均的な二酸化炭素の排出。ベースラインシナリオに基づく。
- ・中位のケース：発電合成全体の具体的かつ平均的な二酸化炭素の排出量の置換。ベースラインシナリオに基づく。
- ・下位のケース：特定の分析シナリオの発電合成の具体的かつ平均的な二酸化炭素の排出

電力部門に関して、表 10.7 は二酸化炭素緩和ポテンシャルの計算の基礎となる想定を示している。選択された緩和シナリオにおける2050年の特定の炭素排出係数の幅は、716g CO₂/kWh（199g CO₂/kJ）（上位ケース）から123～190g CO₂/kWh（34～53g CO₂/kJ）の間（下位ケース）である。表で示すように、排出係数の幅は、暖房及び冷房用途に利用される再生可能エネルギーに関しても想定されている。発電とは対照的に、これらの用途に関しては、これらのシナリオから利用可能な具体的な情報は得られない。この計算の背景に基づき、中位ケースでの石油の代替に始まり、不確実性の幅を考慮して、基礎となる排出係数のために実践的なアプローチが取られている。

輸送部門のバイオ燃料とその他の再生可能エネルギーは、データの利用可能性が限定的なため、計算から除外した。加えて、直接暖房に使用されるバイオエネルギーのため節約された組み込まれた温室効果ガスの排出を反映するため、計算で考慮されるのは理論的な二酸化炭素削減の半分のみである。高い不確実性と組み込まれた温室効果ガスの変動性を考えると（バイオマスプロセス・チェーン全体からの間接的温室効果ガス排出量の解説については第2章を、様々な再生可能エネルギー源のライフサイクル評価に関するより一般的な解説については第9章を参照）、前提をもう一度単純化することは必然である。

表 10.7: 二酸化炭素緩和ポテンシャル計算における想定: 様々なシナリオにおいて代替される発電または熱供給からの特定の平均二酸化炭素排出量。基となる再生可能エネルギーの普及の出典: IEA-WEO2009-ベースライン (IEA, 2009; Teske et al., 2010)、ReMIND-RECIPE (Luderer et al., 2009)、MiniCAM-EMF22 (Calvin et al., 2009)、ER-2010 (Teske et al., 2010)

特定の平均二酸化炭素排出量			IEA-WEO2009 – ベースライ ン	ReMIND - RECIPE	MiniCAM – EMF22	ER - 2010
電力部門						
上位ケース	2020 年	[g CO ₂ /kWh]	812			
	2030 年	[g CO ₂ /kWh]	768			
	2050 年	[g CO ₂ /kWh]	716			
中位ケース	2020 年	[g CO ₂ /kWh]	625			
	2030 年	[g CO ₂ /kWh]	580			
	2050 年	[g CO ₂ /kWh]	531			
下位ケース	2020 年	[g CO ₂ /kWh]	599	543	487	544
	2030 年	[g CO ₂ /kWh]	564	370	374	345
	2050 年	[g CO ₂ /kWh]	500	190	147	123
暖房及び冷房部門						
上位ケース (中位 + 10%)	2020 年	[kt CO ₂ /PJ]	78, 1 ⁽¹⁾			
	2030 年	[kt CO ₂ /PJ]	78, 1 ⁽¹⁾			
	2050 年	[kt CO ₂ /PJ]	78, 1 ⁽¹⁾			
中位ケース	2020 年	[kt CO ₂ /PJ]	72 ⁽²⁾			
	2030 年	[kt CO ₂ /PJ]	72 ⁽²⁾			
	2050 年	[kt CO ₂ /PJ]	72 ⁽²⁾			
下位ケース (中位 – 10%)	2020 年	[kt CO ₂ /PJ]	63, 9 ⁽³⁾			
	2030 年	[kt CO ₂ /PJ]	63, 9 ⁽³⁾			
	2050 年	[kt CO ₂ /PJ]	63, 9 ⁽³⁾			

注: 電力部門の中位ケースは、IEA-WEO2009、ReMIND-RECIPE、及び MiniCAM-EMF22 (ER-2010 は IEA-WEO2009 に基づいており、独自のベースラインを持っていない) のベースラインシナリオの平均を取って定義されている。上位ケースは、上述のベースラインシナリオの化石燃料要素のみを取って定義されている。下位ケースは、特定の分析されたシナリオにおける発電ミックスの特定の平均二酸化炭素排出量の代替を想定している。直接熱バイオエネルギーの現実的な想定として、暖房及び冷房に関して 50%の排出係数を適用し、関連する温室効果ガス排出がプロセス・チェーンにおいて発生するとしている。(1) 39kt CO₂/PJ (2) 36kt CO₂/PJ (3) 32kt CO₂/PJ

図 10.20 は、2030 年及び 2050 年のすべてのシナリオにおける再生可能エネルギー源ごとの年間二酸化炭素削減量のポテンシャルの結果を示している。2.9Gt CO₂/年にある黒い線は、世界のエネルギー関連二酸化炭素排出量の 10%を示しており、赤い線は世界のエネルギー関連二酸化炭素排出量の 33%を示している（これらの線のベース年次は 2008 年）。

例示シナリオにおける 3 つの緩和シナリオが示す潜在的な再生可能エネルギーの寄与の幅はかなり広い。3 つすべてにおいて、水力及び風力エネルギーが 2030 年に主要な役割を果たしているが、このシナリオの内 2 つ (ReMIND-RECIPE, ER-2010) において、2050 年までに太陽エネルギーが他の技術に取って代わっている。それに対し、先に述べたように、特殊な一次エネルギーの計算アプローチにより、一次エネルギーにおける割合の順位ではバイオエネルギーが先頭に立っている (10.3.1.4 を参照)。これは、再生可能エネルギー技術の寄与 (及び有効性) は、どのような視点で見ると (温室効果ガス緩和または一次エネルギーの視点) によって異なることを示している。さらに、影響の結果の基となる想定への依存性も非常に重要である。

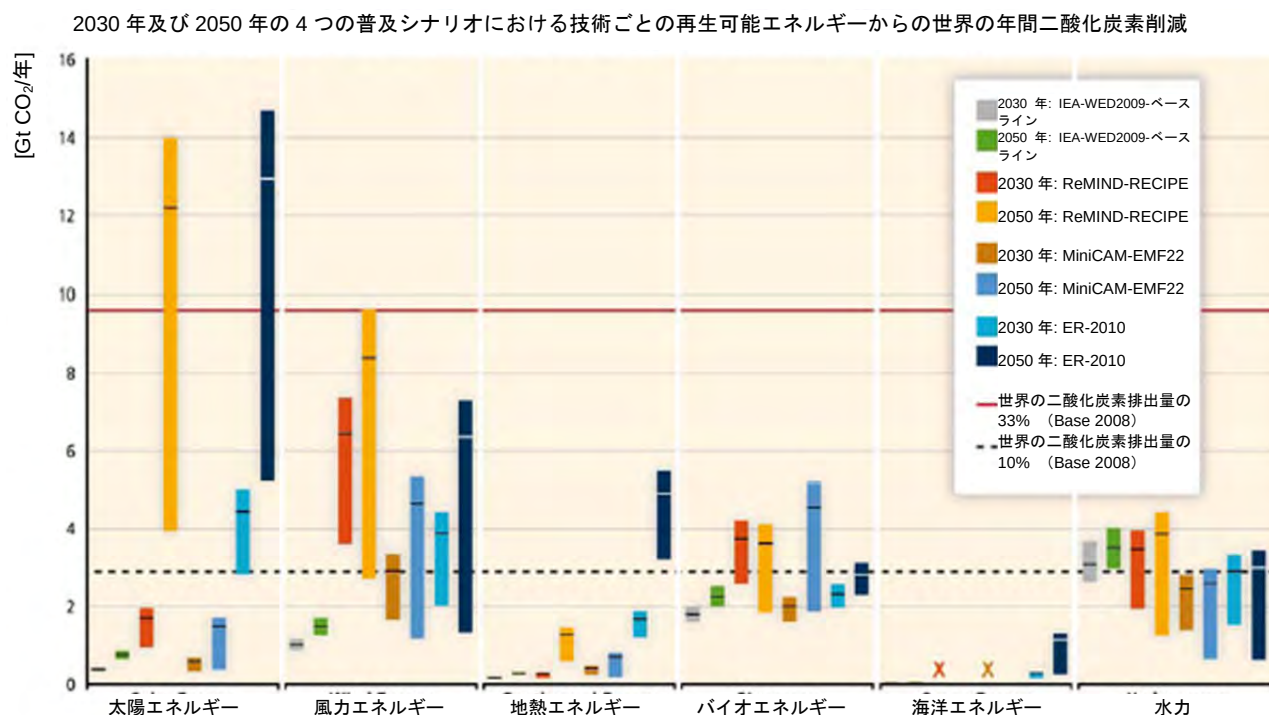


図 10.20: 2030 年及び 2050 年の 4 つの例示シナリオにおける再生可能エネルギーからの世界の年間二酸化炭素削減の予想される幅。輸送用のバイオ燃料は除外されており、バイオエネルギーからの組み込まれた温室効果ガスの排出量があるため、直接暖房用に利用されるバイオマスは二酸化炭素削減量の半分しか占めていない。提示された幅は、置換されたエネルギー源に関する高い不確実性を表している。上限は高炭素化石燃料の完全な置換を想定しているが、下限は分析されたシナリオの特定の二酸化炭素排出量を考慮している。出典: IEA-WEO2009-ベースライン (IEA, 2009; Teske et al., 2010)、ReMIND-RECIPE (Luderer et al., 2009)、MiniCAM-EMF22 (Calvin et al., 2009)、ER-2010 (Teske et al., 2010)。比較のため、2008 年における世界の二酸化炭素排出量が与えられている (IEA 2010d)。

すべての再生可能エネルギー技術の温室効果ガス削減のポテンシャルの結果は、置き換えられたエネルギー源を決定する複雑なシステム挙動に大きく依存している。ここで適用された概算の限界を考慮し、4 つのシナリオにおいては、2050 年の対応する年間二酸化炭素削減のポテンシャルは、4.2 (MiniCAM-EMF22 の下位ケース) ~35.3Gt CO₂/年 (ER-2010 の上位ケース) に達している (図 10.21)。上位のレベルでは、これは、2050 年における分析されたベースラインシナリオ (IEA-WEO2009-ベースライン) のエネルギー関連二酸化炭素排出量の約 80%相当である。

2020 年、2030 年、及び 2050 年までの再生可能エネルギー源からの累積二酸化炭素削減のポテンシャル (図 10.22) は、図 10.21 に示す年間平均二酸化炭素削減量に基づいて計算されている¹¹。これに基づけば、分析されたシナリオでは、中位のケースのアプローチで、それぞれ、ベースライン条件に基づき 244Gt CO₂ (IEA WEO 2009 のベースライン)、297Gt CO₂ (MiniCam EMF 22)、482Gt CO₂ (ER 2010)、490Gt CO₂ (ReMIND-RECIPE のシナリオ) の間の累積の削減ポテンシャル (2010~2050 年) の概要を示している。計算されたすべてのケースとシナリオによる全体の範囲は、WEO 2009 参照シナリオによる化石燃料と工業由来の累積二酸化炭素排出量約 1,530Gt CO₂ に対し、同じ期間において、IEA WEO 2009 のベースラインでは 218Gt CO₂ から、ReMIND-RECIPE では 561Gt CO₂ の累積二酸化炭素削減を示す。

また、これらの数字は輸送部門 (バイオ燃料と電気自動車を含む) の再生可能エネルギー使用に関する二酸化炭素削減を除く。このため、全体的な二酸化炭素緩和ポテンシャルはこれ以上になる可能性がある。

¹¹ 統合のため、2020~2030 年及び2030~2050 年の期間は線形補間された。

様々なシナリオに基づく普及の道筋における再生可能エネルギーからの世界の年間二酸化炭素削減量（2030 年及び 2050 年）

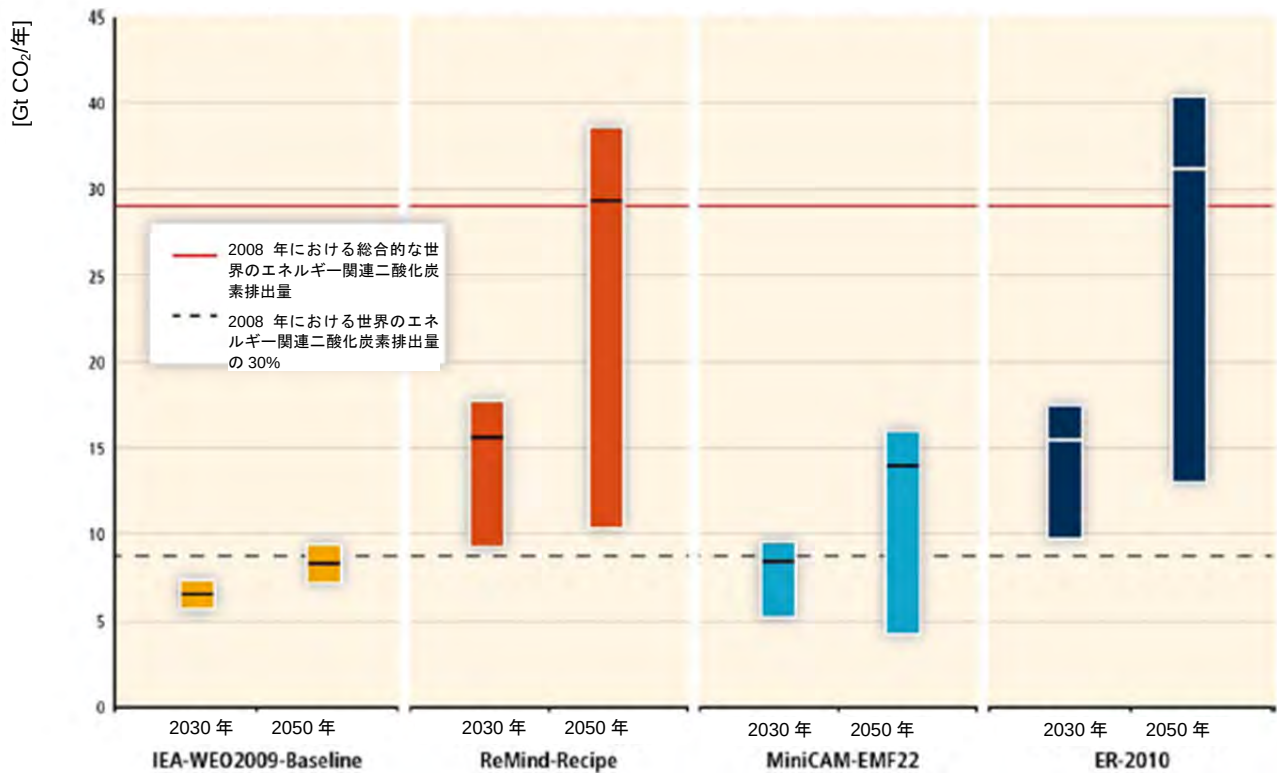


図 10.21: 2030 年及び 2050 年の 4 つの例示シナリオにおける再生可能エネルギーからの総合的な世界の年間二酸化炭素排出量削減量の幅（注: 輸送用のバイオ燃料は除外されており、バイオエネルギーからの組み込まれた温室効果ガスの排出量があるため、直接暖房用に利用されるバイオマスは二酸化炭素削減量の半分しか占めていない）。（表示範囲は、代替されるエネルギー源に関する不確実性を示す。上限は高炭素の化石燃料を完全に代替する想定であるが、下限は分析したシナリオ自体における具体的な二酸化炭素排出を考慮している。）出典: IEA-WEO2009-ベースライン (IEA, 2009; Teske et al., 2010)、ReMIND-RECIPE (Luderer et al., 2009)、MiniCAM-EMF22 (Calvin et al., 2009)、ER-2010 (Teske et al., 2010)。

2010 年から 2020 年、2030 年、及び 2050 年までの様々なシナリオに基づく再生可能エネルギー普及の道筋における世界の累積二酸化炭素削減量

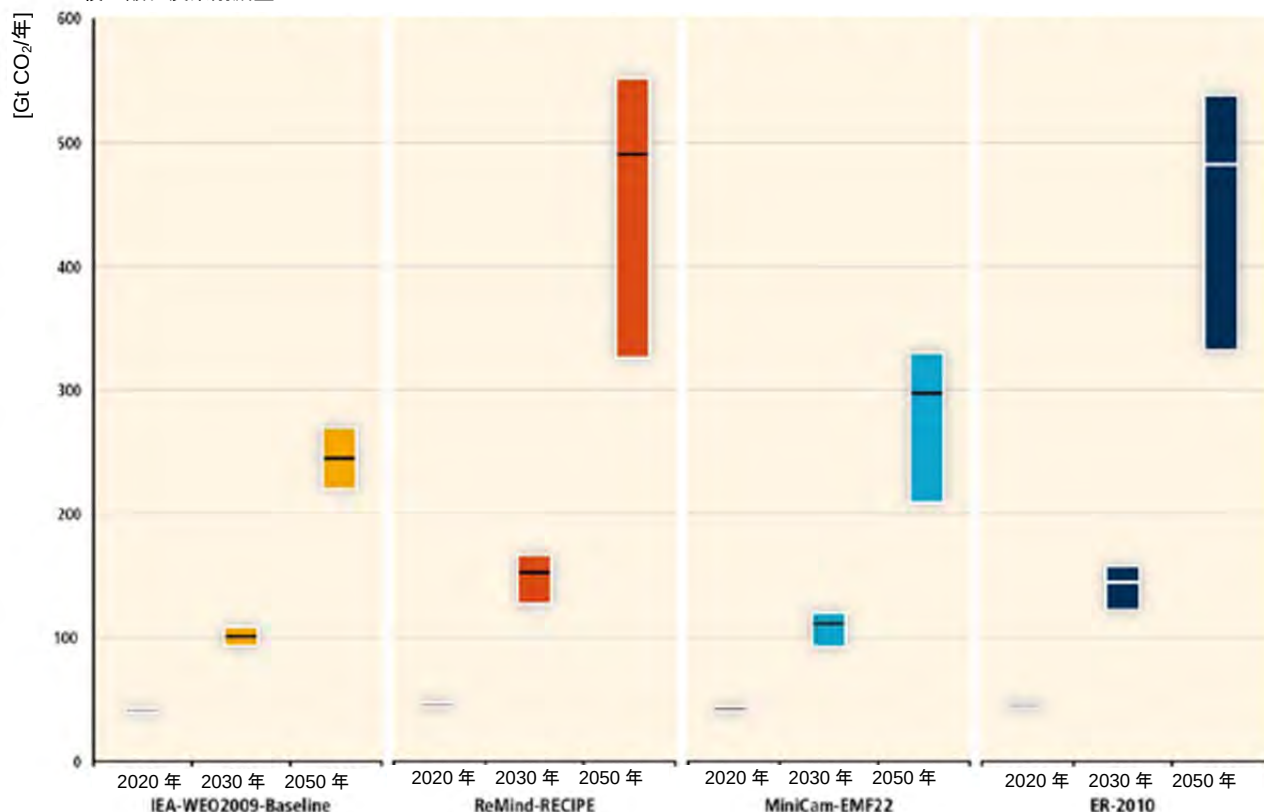


図 10.22: 2020 年、2030 年、及び 2050 年までの世界の累積二酸化炭素削減量の予想される幅。提示された幅は、置き換えられた従来のエネルギー源に関する高い不確実性を表している。上限は高炭素化石燃料が完全に置き換えられることを想定しているが、下限は分析されたシナリオの特定の二酸化炭素排出量を考慮している。出典: IEA-WEO2009-ベースライン（IEA, 2009; Teske et al., 2010）、ReMIND-RECIPE（Luderer et al., 2009）、MiniCAM-EMF22（Calvin et al., 2009）、ER-2010（Teske et al., 2010）。

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

ここで分析した綿密なシナリオはすべて、あらゆる部門で再生可能エネルギー源が増加すると示している。しかし、電力部門はすべての部門の中でも先頭に立っており、再生可能エネルギーの最大出力が最もダイナミックに増加すると予測されている。水力発電は、短期的には世界規模で再生可能エネルギー電力部門における主要な役割を果たすと予想されているが、既存の発電設備容量に大きく依存している。3つの緩和シナリオすべてにおいて、風力発電は、2030年までの世界の電力供給において水力発電を上回ると予想されている。他の技術の結果は、遥かに多様である。2つのシナリオは、2030年以降の電力部門において太陽光発電が重要な役割を果たし、2050年までに10%以上の割合を占めるようになって見ているが、ベースラインシナリオでは、太陽光発電は下限に近いレベルに留まると予測されている。ER-2010シナリオ以外のすべてのシナリオにおいて、地熱エネルギーの果たす役割は、世界の電力供給の5%をはるかに下回る水準に留まると予想されている。例えば地熱ヒートポンプなどに関してはモデルに様々な計算方法が利用されているため、暖房及び冷房部門のシナリオ結果には大きな不確実性が含まれる。一次エネルギーにおける割合で言えば、バイオエネルギーが、特に暖房部門において、最大の割合を占めている。風力及び太陽エネルギーは、2030年までにとどまらず、それ以降も重要な役割を果たすようになると予測されている。

すでに包括的なシナリオ調査で強調したように（10.2を参照）、調査したシナリオによって結果が異なるのには多くの理由がある。綿密なシナリオはそれぞれ異なる方針に従っている。需要予測の大幅な差や、輸送や暖房部門でより多く電力を利用するかどうかということは、選択された技術及びその普及率に大きく影響すると予測されている。さらに、二酸化炭素回収・貯留や原子力等の他の緩和技術は、将来のエネルギーミックスにおける再生可能エネルギー源の役割に大きく影響する。実際には、もしシステムに関連する政策の決定が市場に浸透する何年も前から行なわれた場合にのみ、高い再生可能エネルギー普及率を実現することが出来る。送電系統（第8章を参照）、もしくは地域暖房ネットワークなどの拡張されたエネルギー・インフラの想定が、シナリオにおける再生可能エネルギーの普及を全体として変える可能性がある。分析したモデルにシステム統合を介した系統のモデル化が含まれていない場合でも、これらの問題は少なくともシナリオ内で暗黙的にカバーされている（統合の制限）。

寿命が比較的長く予想されているため、エネルギーシステムは相対的に柔軟性に欠け、投資決定は長期にわたり影響する。相対的に柔軟性の低い「ベースロード」発電所（例えば石炭、褐炭、及び原子力発電所など）の高い割合は、太陽光や風力などの様々な再生可能な発電の技術的及び経済的な「スペース」を減らすだろう。技術の選択及び優先度は、将来の再生可能エネルギーの普及に加え、想定される再生可能エネルギーコストの開発や対応する化石燃料価格予測を前もって決める。3つの綿密な緩和シナリオ内の一次エネルギー需要における再生可能エネルギーの全体的な割合は、2030年までであれば24%（MiniCAM-EMF22）～39%（ER-2010）、2050年までであれば31%（MiniCAM-EMF22）～77%（ER-2010）に及んでいる。再生可能エネルギーの割合が低くなるのは、二酸化炭素回収・貯留や原子力などの競合する低炭素技術の利用可能性が原因であり、これらの技術へのアクセスを認めていないシナリオでは、より高い再生可能エネルギーの割合が予想されているが、必ずしも絶対値が高くなるとは限らない。

前セクションの包括的なシナリオ調査（10.2を参照）に加えて4つの例示シナリオの綿密な分析によって、特定の再生可能エネルギー技術の普及及び対応するドライバーに関してさらに具体的な見通しが得られる。しかし、データの入手可能性によっては、詳細な調査が制約を受ける場合が多い。このような背景のもと、以下の知見のギャップが明らかになる。

- ・ 全世界と、特に開発途上国において矛盾のない再生可能エネルギー技術的ポテンシャルの推定欠如（矛盾のない経済的ポテンシャルの推定値は、モデルにおける重要な入力となる）。
- ・ 既存のモデルの大部分における暖房及び輸送部門のモデル化は、電力部門のモデル化ほど詳細ではない。しかし、暖房及び輸送部門は、両部門とも温室効果ガス排出に大きく寄与する。全体的に、特に部門または地域ベースで、暖房及び輸送部門のデータが大きく欠如している。
- ・ 現在のエネルギーシナリオのほとんどが、海洋エネルギーなどの新しい再生可能エネルギー技術を織り込んでいない。
- ・ 例えば地熱ヒートポンプなどに関して、全てのシナリオで報告のシステムが大きく異なっていて、また不透明な場合もあり、結果の比較が困難になっている。
- ・ 普及コストに対する効果（学習効果）と技術の道筋の相互作用が、シナリオによって異なる扱い方をされており、基礎となる想定または導入されている計算規則が十分に説明されていない場合がある。
- ・ 再生可能エネルギー普及の二酸化炭素緩和ポテンシャルの簡易化された計算によって方向性を得ることは出来るが、それには大きな欠点も伴う。適切な方法でエネルギーシステムの動きを検討するためには、比較モデルの計算（再生可能エネルギーありとなしの両方）が必要となる。