

# 持続可能エネルギーシナリオの検討

## A Study of a Sustainable Energy Scenario

キーワード: 世界エネルギーシステム、再生可能エネルギー、持続可能性、  
最適化型世界エネルギーモデル、革新的発電技術

山本博巳

工業化社会による大規模な化石燃料の消費は、将来的な化石燃料の資源枯渇だけでなく、地球温暖化ガスを排出する問題があるが、化石燃料消費をゼロとする持続可能エネルギーシステムとそれへの移行パス、定量的に評価されていない。本研究の目的は、長期的な世界エネルギーシステム分析による、持続可能エネルギーシステムへの移行パスの定量的評価である。このため、世界土地利用エネルギーモデル(GLUE)を改良し、シミュレーションを実施し、以下の結果を得た。持続可能エネルギーシナリオの2060年(その時点で化石エネルギー消費ゼロを達成と仮定)において、世界の支配的な一次エネルギー源は、水分解プラント直結太陽光発電(428 EJ/年)である。2番目、3番目に大きな一次エネルギー源は、それぞれバイオエネルギー(316 EJ/年)、大容量貯蔵設備付き太陽光発電(91 EJ/年)である。このとき、電力供給における支配的なエネルギー源は、大容量貯蔵設備付き太陽光発電(91 EJ/年)である。BGCC(バイオガスガス化複合発電)、水力発電、および、小容量貯蔵設備付き太陽光発電の発電量は、それぞれ53, 46, 38 EJ/年である。しかしながら、持続可能エネルギーシナリオのエネルギーシステムコスト(2060年、世界)は19兆米国ドル/年に達し、ベースシナリオ(化石燃料消費量あるいはCO<sub>2</sub>排出量の制約無し)のコスト(7兆米国ドル/年)の約3倍になる。

1.はじめに

2.GLUE3.0の概要

2.1 モデルの概要

2.2 再生可能エネルギーと主要エネルギーデータ

2.3 持続可能エネルギーシナリオ

3.シミュレーション結果

4.まとめ

## 1. はじめに

化石燃料消費とそれに付随するCO<sub>2</sub>排出は、資源枯渇だけでなく地球温暖化に代表される環境問題を引き起こす。化石燃料をすべて消耗し尽くすか、人類にとって破滅的な気候変化に結びつく前に、我々は化石燃料を消費せず、完全に再生可能な新しいエネルギーシステムを開発する必要がある。

短期的には、化石燃料消費およびCO<sub>2</sub>排出量を劇的に削減し、再生可能エネルギーに置き換えることは、経済的にも技術的にも、非常に困難である。しかし、長期的には、化石燃料消費およびCO<sub>2</sub>排出量をゼロとし、再生可能エネルギーを主

体とする持続可能なエネルギーシステムを、我々は実現しなければならない。

しかしながら、化石燃料消費をゼロとする持続可能エネルギーシステムとそれへの移行パスは、これまで定量的に評価されていない<sup>1</sup>。そこで、著

<sup>1</sup>文献[2][3]は、256の世界CO<sub>2</sub>シナリオをまとめている。このうち、世界の年間CO<sub>2</sub>排出量をゼロまたは負とするエネルギーシナリオが4種類存在する。このうち、IMAGE2.1 Stab350 Allシナリオ、WorldScan/EMF14 Ecosystemシナリオ、IIASA/EMF14 Scenario#18シナリオの3種類は、CO<sub>2</sub>濃度が農業やエコシステムへ与える影響を調べるため、エネルギーシステムとの整合性の無いCO<sub>2</sub>シナリオである。LDNE/SRES A1 550シナリオは、CO<sub>2</sub>回収処分技術によりCO<sub>2</sub>排出量ゼロを実現するシナリオであり、CO<sub>2</sub>排出量ゼロの時点(2100年)でも石炭を36.3 EJ/年消費する。文献[2][3]および著者のこれまでの調査の範囲内では、エネルギーシステムと整合性のある化石燃料消費ゼロの世界エネルギーシナリオは存在しない。

者は世界土地利用エネルギーモデル(GLUE)を改良したモデル(GLUE3.0)を開発し、持続可能エネルギーシステムへのパスを定量的に評価可能とした。

モデルは、世界エネルギーシステムのコスト最小化により、そのときのエネルギーフローを明示する。モデルは、化石燃料と再生可能エネルギーを含む包括的なエネルギー資源と、ガス化技術、液化技術、発電技術を含む包括的なエネルギー転換技術を含む。さらに、本研究では、間欠性発電(太陽光発電および風力発電)に小容量の電力貯蔵設備を付加したシステム、間欠性発電に大容量の電力貯蔵設備を付加したシステム、間欠性発電・水電気分解直結システム、さらには革新的発電システム(宇宙太陽光発電を想定)を検討に含める。

本研究で設定する「持続可能エネルギーシナリオ」では、モデル内ループにおける 2030 年時点において、2040 年から 2060 年のエネルギーシナリオを決定し、特に、2060 年以降に化石燃料消費ゼロの持続可能エネルギーシステムの実現を決定する、と仮定する。そして、GLUE3.0 を用いて、ベースシナリオ(化石燃料消費およびCO<sub>2</sub>排出量の制約無し)、および持続可能エネルギーシナリオを実行し、再生可能エネルギーシステムのエネルギー構成とコストについて議論する。

## 2. GLUE 3.0 の概要

### 2.1 モデルの概要

ここでは、持続可能エネルギー戦略を評価可能な世界土地利用エネルギーモデル(GLUE3.0)の構造を概説する。

本モデルでは、世界は 11 の地域に分割される(表1)。シミュレーション期間は 2010 年から 2200 年であり、10年おきに計算される。ただし、本研究では、2060 年までのシミュレーション結果を示す。

本モデルは2つのパート(土地利用パートとエ

表1 モデルの地域区分

番号	地域
1	北アメリカ
2	西ヨーロッパ
3	日本
4	オセアニア
5	計画経済圏アジア
6	中東北アフリカ
7	サブサハラアフリカ
8	ラテンアメリカ
9	旧ソ連・東欧
10	東南アジア
11	南アジア

ネルギーパート)から構成される(図1)。土地利用パートは世界土地利用エネルギーモデル(GLUE)を基にする[1]。エネルギーパートは、世界エネルギーモデル New Earth 21(NE21)[4]を基に、エネルギー資源とエネルギー利用技術の追加、および、データ見直しにより作成した。土地利用パートは、広範囲の土地利用を対象とし、バイオマスフロー(食料チェーン、リサイクル、カスケード利用などを含む)を考慮する。

これら2つのパートは、バイオエネルギー供給可能量および太陽光発電供給可能量を共通変数として、結合されている(図1)。本モデルでは、環境制約下(例えば、CO<sub>2</sub> 排出量制約や化石燃料生産量制約)の、世界のエネルギーシステムコストを最小化する。

本研究では、NE21 モデルが含んでいる「省エネルギー」(エネルギー需要の長期価格弾力性)を割愛する。その理由は、エネルギー需要の価格弾力性に不確実性が大きいこと、および、問題設定をエネルギー供給問題に単純化することである [1]。

改良した世界土地利用エネルギーモデル(GLUE 3.0)では、オーバーラッピング リカージブ(overlapping recursive)と呼ばれる新しい計算手法を用いている。オーバーラッピング リカージブ手法では、ある期(t)では、当期(t)から指定され

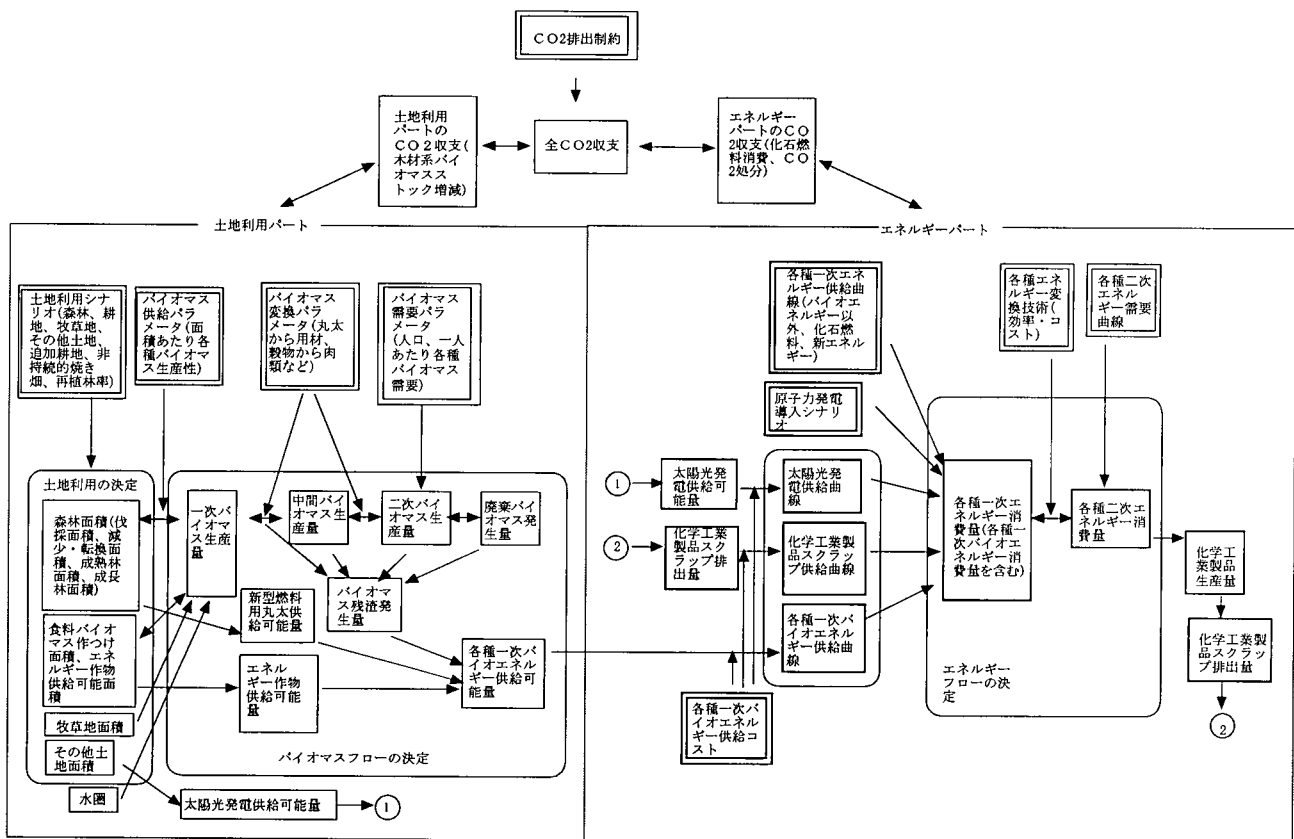


図1 モデルへの構造

た期間(a)のインターテンポラル最適化(t から t+a)を行う。その結果は、当期(インターテンポラル最適化中の第1期)(t)だけをアウトプットとして使用するとともに、資源消費や設備ストックを計算して次期(t+1)に持ち越す。そして、次期(t+1)では、当期(t+1)から指定された期間(a)のインターテンポラル最適化(t+1 から t+a+1)を行う。こうしたリカーシブ手続きにより、シミュレーション期間(b とする)のシミュレーション(t から t+b)を行う。

オーバーラッピング リカーシブ手法は、インターテンポラル(inter-temporal) およびダイナミックリカーシブ(dynamic recursive)に比べて、現実的な意志決定に近いプラグマティックな手法と考えられる。インターテンポラル最適化期間終了後のサドンデスシナリオにならない、超長期の割引率の非現実性(例えば、割引率 5%で 100 年後の価値 1.0 は現在価値換算で 0.006)を避ける、などのメリットもある。ただし、オーバーラッピング リカー

シブ手法と他の手法の詳細比較は、論文論旨の明確化のため、別の論文で記述する<sup>2</sup>。

なお、本モデルでは指定された期間(a)を3期30年とした。その理由は、エネルギー関連企業が、おおよそ 30 年先までを予測して投資(探鉱や公益事業の投資)するといわれるためである。なお、期間(a) に対する計算結果の感度分析は今後の課題である。

<sup>2</sup>文献[5]などで提案される「オーバーラッピングジェネレーション手法」は、重複する世代が、世代間の経済取引により、世代間の公平性、資源の配分、および最適成長などを分析するものである。モデル計算の期間内で、各世代は完全情報を得ている。それに対して、「オーバーラッピングリカーシブ手法」は、各期の意志決定者が、独立して投資の意志決定をするモデルである。各期の意志決定者は、各期以前の計算結果と予測可能期間(本モデルでは3期30年)に関する完全情報を得て、次期のエネルギーシステムを決定する。ただし、時系列的な逐次計算を行うため、各期の計算結果が各期以前の計算結果に影響を及ぼすことはない。「オーバーラッピングリカーシブ手法」は「ダイナミックリカーシブ(逐次最適化)手法」に2期以上の予測可能期間を付加した手法とも言える。

## 2.2 再生可能エネルギーと主要エネルギーデータ

本モデルでは、以下の再生可能エネルギーを検討に含める。

バイオエネルギー(14種類から構成される)、水力発電と地熱発電(本研究ではまとめて水力発電で代表する)、風力発電、太陽光発電、革新的発電(宇宙太陽光発電システム)。

さらに、間欠性再生可能エネルギー(風力発電および太陽光発電)を、それぞれ4種類に分類する。

タイプ1: 電力貯蔵設備のない在来型設備。

タイプ2: 小容量電力貯蔵と直結。短期の出力変動による系統安定性と導入量の制約を緩和する。

タイプ3: 大容量電力貯蔵と直結。電力需要に応じて発電可能。系統安定性の問題なし。

タイプ4: 水電気分解プラント直結。電力系統とは接続しない。

さらに、間欠性再生可能エネルギー発電には、以下のような制約を置いた。

$$aw \cdot WD(i, k) + ap \cdot PV(i, k) \leq ad \cdot (DM1(k) + DM2(k))$$

ただし、式の単位はGW(ギガワット);iは間欠性再生可能エネルギー発電のタイプ(タイプ1、タイプ2);kは電力需要の区分(ベース、ミドル、ピーク);WDは風力発電の設備容量;PVは太陽光発電の設備容量で;DM1は外生の電力需要;DM2は内生の電力需要;aw、apおよびadは係数(表2)。

タイプ2の実現により、系統安定性確保のための導入量制約がどの程度緩和されるかは、現在のところ明らかで無いが、本研究では仮定に基づいた議論を行う(表2、ad=0.5)。タイプ3はダム式水力のイメージに近い。タイプ3の導入が実現さ

表2 本研究で設定した間欠性発電制約式の係数

I	k	aw	ap	ad
type1	peak	1 (or 0) <sup>a</sup>	1	0.1
type1	middle	0 (or 1) <sup>a</sup>	1	0.1
type1	base	0	1	0.1
type2	peak	1 (or 0) <sup>a</sup>	1	0.5
type2	middle	0 (or 1) <sup>a</sup>	1	0.5
type2	base	0	1	0.5

a カッコ内の値は、寒冷地(西欧、旧ソ連東欧)の値である。

れるには、十分な貯蔵容量(kWh)が安価(\$/kWhの単位)に実現されることが必要である。十分大容量の電力貯蔵設備を付加すれば、間欠性発電を、貯留式水力のように扱うことが可能である。タイプ3(間欠性発電+大容量電力貯蔵)システムでみれば、安定電源と見なせるので、特別な設備制約式は必要ない<sup>3</sup>。タイプ4は、電力系統と接続しないため、系統安定性の制約を受けない。ただし、水電気分解プラントの設備利用率は、電力系統と接続されていないため、間欠性再生可能エネルギー発電プラントの設備利用率に制限される。

ただし、風力発電の資源量は文献[4][7]に従い、太陽光発電の資源量は内生的に決定される(図1)と仮定した。太陽光発電の資源量は、土地利用・その他土地(森林、耕地、牧草地、水圏以外)の一部が太陽光発電に利用可能と仮定して求めた。その他土地は、光合成を必須とする土地が少ないため、太陽光発電の適地となる可能性がある。その他土地の太陽光発電に利用可能な比率は明らかでないが、過大な太陽光発電設置が地域の気候変動要因になる可能性も考慮して、本研

<sup>3</sup> タイプ3に必要な電力貯蔵設備容量を求めるには、間欠性発電の運転パターンを所与として、許容可能な発電出力ロスの確率を満たす、電力貯蔵設備容量を得るためのモンテカルロシミュレーションなどを実施する必要がある。必要な電力貯蔵容量は、各地域の間欠性発電の運転特性により異なるだろう。これらの計算は今後の課題である。必要な電力貯蔵容量が決まったとしても、将来の単位貯蔵容量当たりコストにも、現時点では不確実性が大きい[6]。

究では各地域 25%を上限と仮定した<sup>4</sup>。

また、革新的発電(宇宙太陽光発電システム)とは、エネルギー資源量制約が無く、発電出力(kW)が時間によらず一定のシステムと仮定する。

本研究における主要な再生可能エネルギー発電関連システムのデータ設定を表3に示す。特に、新コンセプトの発電技術のデータ設定は不確実なため、感度分析の実施が今後の課題である。

これ以外の各種一次エネルギー(バイオエネルギーを含む)、二次エネルギー(水素を含む)の生産コスト、エネルギー輸送コスト、変換コストなどの設定は文献[1]と同一である。なお、化石燃料価格は現時点の化石燃料価格[9]とNE21の化石燃料供給コスト曲線の形状[4]から設定した。化石燃料資源量は[10][11]から設定した。化石燃料発電コストは文献 [12]から設定した。

また、最終エネルギー需要は、文献[2]の B2 シナリオ(B2 Marker Scenario)を基に、文献[13]の B

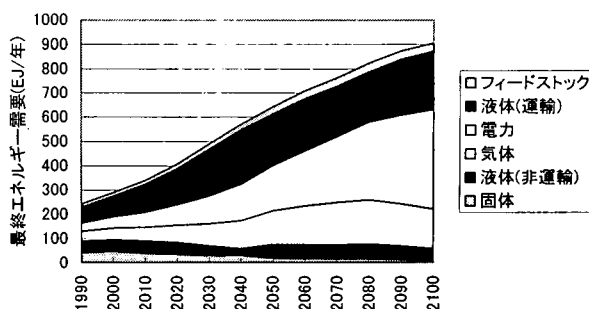


図2 最終エネルギー需要シナリオ  
(世界、需要区分別) a)

a) 文献[2]の B2 シナリオを基に、文献[13][14]を参考に補正して作成した[1]。

シナリオと、文献[14]の現在の最終エネルギー需要データを参考に、11 地域シナリオに変更して、作成した(図2)[1]。

最終エネルギー需要中のフィードストックは、石油製品、メタノール、メタンにより供給されると仮定した。バイオマスと石炭は、一旦、石油製品、メタノール、メタンに変換された後に、フィードストックに利用されて、化学工業製品が生産される[1]。化石燃料ゼロの時点(2.3 節参照)では、化学工業製品スクラップはバイオマス起源で生産される。バイオマス起源の化学工業製品スクラップをサーマルリサイクルしてもネット CO<sub>2</sub> 排出量はゼロである。

また、各二次エネルギー需要(個体、液体、気体、電力、輸送用液体)内の燃料シェア変動の上限は1期(10年)間に33.4%と仮定した。言い換えれば、3期で新規燃料や新規技術がシェア 100%を得られるという仮定ある。シェア変動の下限は設定していない<sup>5</sup>。

<sup>4</sup>本研究では、PVの設置可能面積を「その他土地」の25%と仮定した。その大前提は、傾斜地であっても、南面の地形はおおむね25%以上存在することである。

「その他土地」の中で、特に25%以上のPV設置が難しいのは、道路、空港、ゴルフ場等、公園である。世界11地域の中で最も土地利用の稠密なわが国でこれらの土地の面積を計算しておく。わが国の道路面積は東京23区で全面積の13.6%であるが、北海道、東北地方では2%を下回り、全国平均では全面積の2~3%程度である

(<http://www.ne.jp/asahi/hamamatsu/seiji/kyodo/kotutush/doro/doro.html>)。なお、道路においても、側壁や、自然光採取に差し障りない低い割合の上空部分はPVを設置可能であろう。空港面積は大規模空港で1065ha(成田)、894(羽田)、中・大規模空港で566ha(新福岡)である

(<http://www.transport.or.jp/jffi/panfu/pdf/cost4.pdf>)。定期便を運行する空港は全国に67カ所あり、平均面積を500haと仮定すると、33500ha(335km<sup>2</sup>)存在する。これは全国土の0.1%に相当する。ゴルフ場、スキー場、キャンプ場の面積は、全国で1076km<sup>2</sup>であり、全国土の0.3%である(<http://tochi.mlit.go.jp/kakuho/a-2.html>)。公園の面積は98974ha(989km<sup>2</sup>)であり、全国土の0.3%である

([http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha02/04/040821\\_3/040821\\_3.pdf](http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha02/04/040821_3/040821_3.pdf))。一方、わが国の「その他土地」面積は7,500,000ha(75,000km<sup>2</sup>)で全国土の約20%に相当する[8]。これらから、その他土地に占める道路、空港、ゴルフ場等、公園の面積比率は、道路10~15%、それ以外合計3.5%であり、合計しても20%を下回る。残りのその他土地(宅地、商業地、荒地など)の約30%にPVを敷き詰めれば、「その他土地」全体の25%を実現できる。これは不可能ではないと著者は考える。わが国以外では、わが国に比べて土地利用が粗放のため、比較的楽に25%を達成可能だろう。なお、モデル計算されたPV設置面積は、再生可能エネルギーシナリオ2060年に、日本9,125km<sup>2</sup>、世界406,007km<sup>2</sup>であり、それぞれの「その他土地」面積の約12%、1%強に相当する(3節のシミュレーション結果から計算)。

<sup>5</sup>本研究では、採掘費は全て可変費としている。設備費を考えるのはエネルギー転換設備だけである。設備耐用年数を水力以外の設備は30年(水力は50年)と仮定し、それに合わせた年経費率を設定している。水力以外の設備は、インターテンポラル最適化期間(3期、30年)と耐用年数が一致しており、耐用年数を通じた最適化が行われる。水力の場合は、耐用年数50年が、インターテンポラル最適化期間(30年)を上回るため、設備運転開始後40年後、50年後の設備年経費は各期のインターテンポラル最適化の範囲外となる。このため、次期の最適化では当該の設備年経費がサンクコスト化し、システムコストへ反映しないが、本モデルでは特別な調整はしていない。

### 2.3 持続可能エネルギーシナリオ

持続可能エネルギーシナリオとは、2030年時点で、2060年(2030年の30年後)までに化石燃料消費ゼロの実現を意志決定するシナリオである。言い換えれば、持続可能エネルギーシナリオでは、2060年以降、再生可能エネルギー(バイオエネルギー、水力発電、風力発電、太陽光発電)、革新的発電(宇宙太陽光発電)、原子力(軽水炉、LWR)だけの使用が許される。

ただし、間欠性再生可能エネルギー発電は、電力貯蔵や水電気分解と組み合わせた使用が可能と仮定される(2.2 節照)。また、原子力(LWR)の導入量に関しては、モラトリアム、つまり、2020年まで IAEA[15]のシナリオを採用し、2020年以降は2020年レベルで一定と仮定した。

なお、本研究では、持続可能エネルギーシナリオだけでなく、ベースシナリオにおけるシミュレーションも行う。ベースシナリオは、化石燃料消費量およびCO<sub>2</sub>排出量に関する制約の無いシナリオである(もちろん、化石燃料の資源量の制約は考慮する)。

著者は、これら2つのシナリオに関して、エネルギーシステムの構造およびコストに関して検討する。

### 3. シミュレーション結果

GLUE3.0 モデルを使用して、2つのシナリオ(ベースシナリオと持続可能エネルギーシナリオ)のシミュレーションを実施し、以下の結果を得た。

著者は、持続可能エネルギーシナリオ(2060年における化石燃料消費ゼロ)においても、実現可能なシミュレーション結果を得ることが出来た(図3、図4)<sup>6</sup>。

<sup>6</sup>本研究では2060年までの結果を示すが、モデル内部的には最終的に2060年から2080年までの持続可能性エネルギーシナリオを得たのち、2060年の結果を表示している。なお、本研究の条件(化石燃料ゼロ、原子力軽水炉(LWR)モラトリアム)よりも厳しい条件(化石燃料ゼロ、LWRゼロ)の条件で、2200年までのフィジブル解を得ている(2100年以降の最終エネルギー需要は2100年レベルで一定と仮定、図3参照)。これらから、本モデルの持続可能エネルギーシナリオは長期的に成立する。

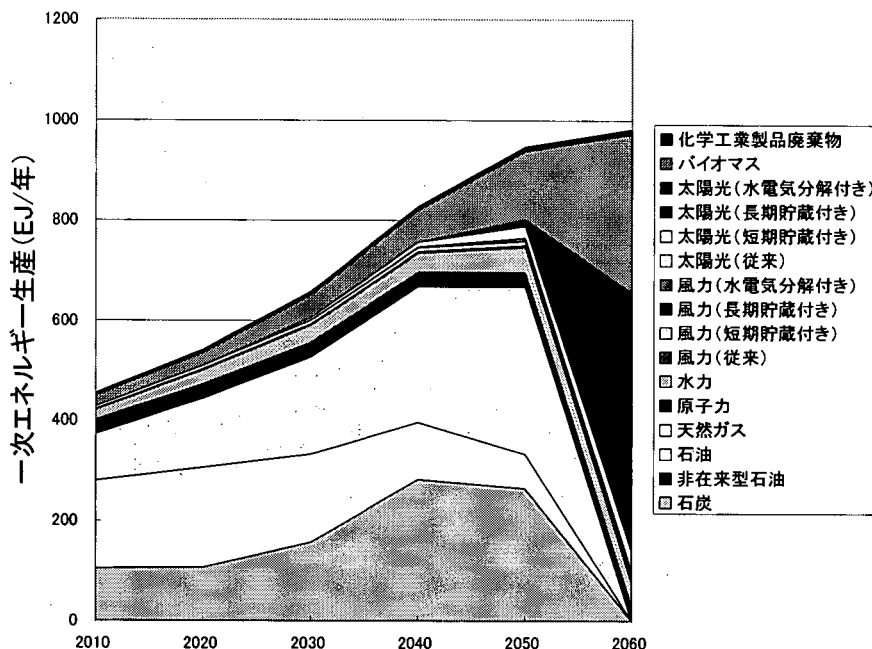


図3:一次エネルギー生産(世界、持続可能エネルギーシナリオ)

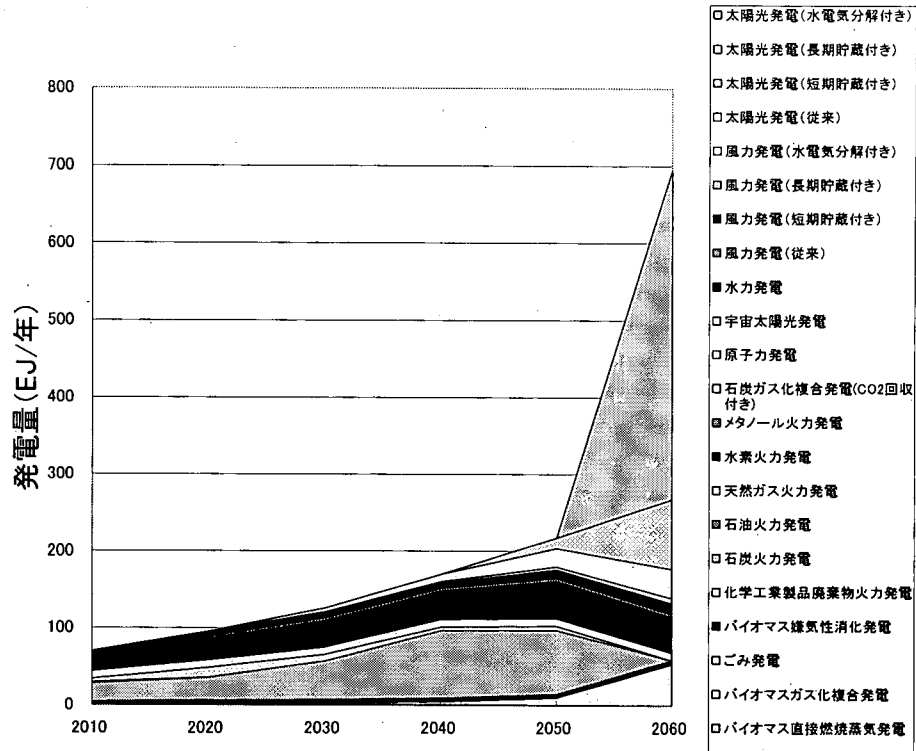


図4:発電量(世界、持続可能エネルギーシナリオ)

持続可能エネルギーシナリオでは、2030年に、2040年から2060年のエネルギーシナリオ(ここでは化石燃料ゼロ)を意志決定する。このため、2040年以降、一次エネルギー供給構造が、ベースケースと比べて変化し始める。

持続可能なエネルギーシステムを達成する2060年において、最大の一次エネルギー源は、太陽光発電タイプ4(PV4、水電気分解直結)で428 EJ/年である(図3)。2番目、3番目の一次エネルギー源は、それぞれ、バイオエネルギー(316 EJ/年)、太陽光発電タイプ3(PV3、大容量蓄電池直結、91 EJ/年)である。

このとき、発電用燃料のうちで最大の物は、太陽光発電タイプ4(PV4、428 EJ/年)であるが、PV4は電力供給ではなく、水素生産システムと考えることができる。このため、電力供給の中で、最大のエネルギー源は、太陽光発電タイプ3(PV3、大容量蓄電池直結、91 EJ/年)である。次いで、BGCC(バイオマスガス化複合発電)、水力発電、

太陽光発電タイプ2(PV2、小容量蓄電池直結)が、それぞれ53、46、38 EJ/年である。

しかしながら、太陽光発電タイプ1(PV1、在来型太陽光発電)、および風力発電タイプ1から4は、それぞれ10 EJ/年もしくはそれ以下である。PV1は、系統安定性のために、導入量の制約が大きい(表2参照)。風力発電は、もともと資源量が世界で28 EJ/年と大きくない[4][7]。

これらの再生可能エネルギーの大規模な導入により、石炭を中心とする化石燃料の導入量は2050年以降急速に減少して、2060年にゼロになった<sup>7</sup>。

なお、革新的発電は、コスト設定が高かったため(表3参照)、導入量はゼロになった(図4)。革

<sup>7</sup>図4においては、2040年(計算上は2040年から2060年の3期のインターテンポラル最適化)に、モデル計算上、(再生可能エネルギー発電コスト) > (石炭発電コスト、2040年に新設、新設の当期、2期目のみ運転、3期目は運転休み)になったため、2060年に設備容量は存在する(1873 GW)が、石炭発電量はゼロになった(2.2節)。

表3 主要な再生可能エネルギー発電関連システムのデータ設定(2060年)

	設備利用率	設備費(\$/kW) <sup>a</sup>	年経费率	発電コスト(\$/kWh) <sup>a</sup>
風力発電 <sup>b</sup>	0.38	626	0.10	0.019
太陽光発電 <sup>c</sup>	0.21	884	0.10	0.05
小容量電力貯蔵 <sup>d</sup>	-	1000	0.13	-
大容量電力貯蔵 <sup>d</sup>	-	1500	0.13	-
革新的発電 <sup>e</sup>	0.85	-	-	0.16

a 1990年換算米国ドル

b 文献[1][16]より。設備利用率は高度10mの平均風速5.8m/sの場合。

c 文献[1][16]より。設備利用率は入射光1800kW/m<sup>2</sup>/年の場合。

d 文献[6]の揚水発電設備費1,000\$/kW、貯蔵量あたり設備費10\$/kWhを参考に仮定。小容量電力貯蔵の容量は10時間、大容量発電の容量は60時間と仮定した。ただし、このデータには不確実性が大きいと見られ、引き続き、必要な容量と単位容量当たりコストの調査を進めるとともに、電力貯蔵設備のコストに対するシミュレーション結果の感度解析を実施していく計画である。

e 文献[17]に紹介されたNASA「FLS報告書」中の数値。

新的発電の技術開発が順調に進みコスト低減が大きい場合、世界エネルギーシステムに対する感度解析は今後の課題である。

参考のため、世界のCO<sub>2</sub>排出量を図5に示す。持続可能エネルギーシナリオでは、2060年の化石燃料消費量ゼロの制約をおいたため、結果的に2060年のCO<sub>2</sub>排出量がゼロになった。化石燃料消費量ゼロの制約だけで、CO<sub>2</sub>排出量の制約

をおこななかったため、CO<sub>2</sub>処分技術は導入されていない。

2060年の世界のエネルギーシステムコストは、ベースシナリオで7兆米国ドル/年、持続可能エネルギーシナリオで19兆米国ドル/年である。後者は前者の約3倍である。我々は、持続可能エネルギーシステムが高価なエネルギーシステムであることを認識しなければならない。

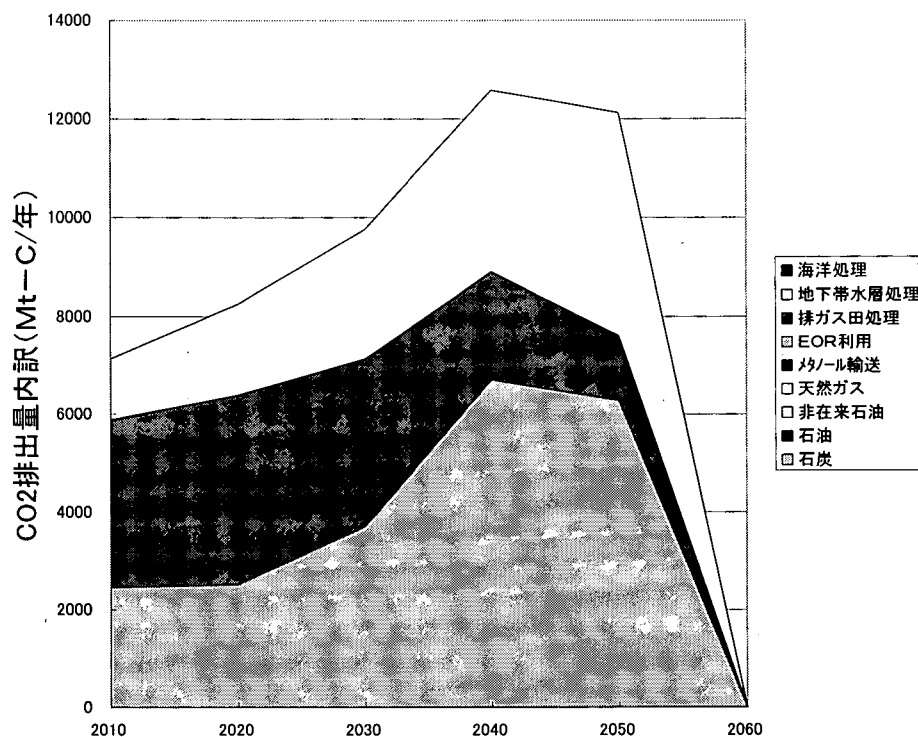


図5:CO<sub>2</sub>排出量(世界、持続可能エネルギーシナリオ)



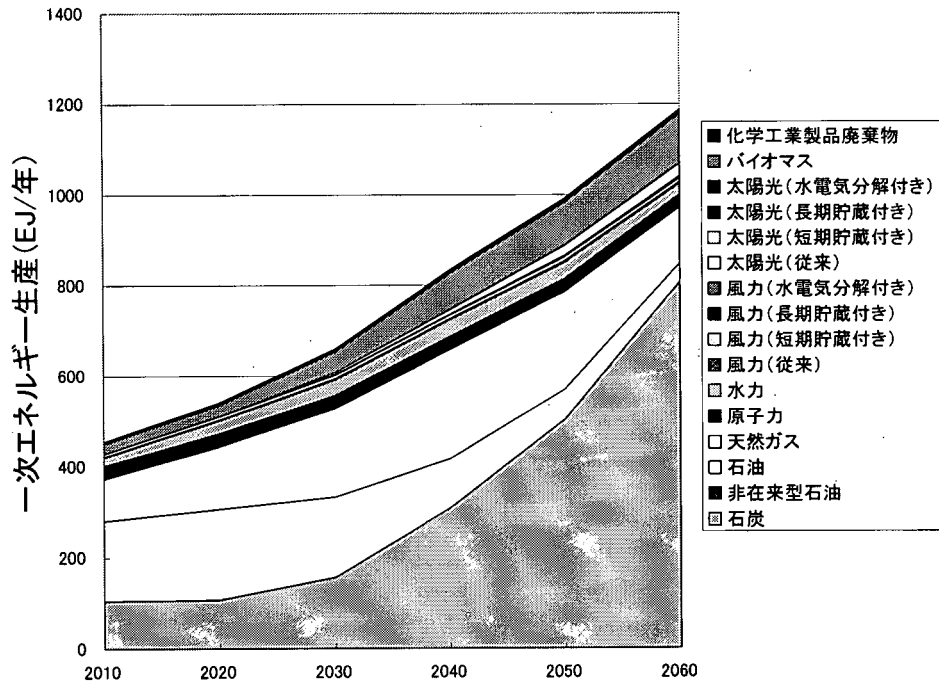


図6 一次エネルギー生産(世界、ベースシナリオ)

なお、ベースシナリオでは、一次エネルギーと発電用エネルギーの最大シェアを占める資源は、共に石炭である。2060年において、石炭の使用量は807EJ/年、全一次エネルギーに占める石炭の比率は68%、全化石燃料の比率は71%である。発電量に関しては、石炭発電量は179EJ/年(二次エネルギー換算)、全発電量に占める石炭の比率は76%(全化石燃料の比率も同じ76%)である(図6)。石炭の約半分(410 EJ/年)は、石炭ガス化により、ガス燃料(水素)や液体燃料合成されて最終消費される。約半分(380 EJ/年)は発電燃料として消費される。残りは固体燃料需要に用いられる。本研究の枠組み・データ設定(2節参照)では、環境外部性を考えなければ、豊富な資源量を持つ石炭は将来の最も安価なエネルギー資源である。

#### 4. まとめ

本研究の目的は、長期的なエネルギーシステム分析を行い、化石燃料エネルギーシステムから

持続可能なエネルギーシステムへの移行のパスを、定量的に評価することである。

本研究では、著者は世界土地利用エネルギーモデル(GLUE)を改良し、新概念のエネルギー技術を追加した。新概念のエネルギー技術とは、間欠性発電(太陽光発電および風力発電)に小容量の電力貯蔵設備を付加したシステム、間欠性発電(太陽光発電および風力発電)に大容量の電力貯蔵設備を付加したシステムなどである。

モデルを使用して、シミュレーションを実施し、以下の結果を得た。持続可能エネルギーシナリオの2060年(その時点で化石エネルギー消費ゼロを達成と仮定)において、世界の支配的な一次エネルギー源は、水分解プラント直結太陽光発電(428 EJ/年)である。2番目、3番目に大きな一次エネルギー源は、それぞれバイオエネルギー(316 EJ/年)、大容量貯蔵設備付き太陽光発電(91 EJ/年)である。このとき、電力供給における支配的なエネルギー源は、大容量貯蔵設備付き太

陽光発電(91 EJ/年)である。BGCC(バイオガスをガス化複合発電)、水力発電、および、小容量貯蔵設備付き太陽光発電の発電量は、それぞれ 53, 46, 38 EJ/年である。しかしながら、持続可能エネルギーシナリオのエネルギーシステムコスト(2060年、世界)は19兆米国ドル/年に達し、ベースシナリオ(化石燃料消費量あるいはCO<sub>2</sub>排出量の制約無し)のコスト(7兆米国ドル/年)の約3倍になる。

本研究の残された課題をまとめておく。オーバーラッピング リカーシブ手法の、インターテンポラル期間に対する計算結果の感度分析は今後の課題である。本研究で導入した新概念の発電技術(大容量電力貯蔵付き間欠性発電や革新的発電など)のデータ設定は不確実なため、データ変動に対する計算結果の感度分析は今後の課題である。特に、大容量電力貯蔵付き間欠性発電の電力貯蔵容量の合理的な推計は今後の課題である。今後、原子力(LWR)をゼロにした完全な再生可能エネルギーシステムのシミュレーション結果も報告していく計画である。

## 謝辞

東京大学 山地憲治教授、および、匿名の査読者お二人から、多くの有益なご助言をいただき感謝いたします。

## 参考文献

1. 山本博巳、藤野純一、山地憲治(2001)、最適化型世界土地利用エネルギーモデルによるバイオエネルギー評価、電力中央研究所研究報告 Y01005。
2. Nebojsa Nakicenovic, et al., Special Report on Emission Scenarios, Cambridge University Press (2000)
3. IPCC Scenario Database (<http://www-cger.nies.go.jp/cger-e/db/ipcc.html>).
4. 山地憲治、藤井康正(1995)、グローバルエネルギー戦略、電力新報社。
5. Richard B. Howarth and Richard, B. Norgaard, Intergenerational Resource Rights, Efficiency, and Social Optimality, Land Economics, Vol.66. No.1, pp.1-11 (1990)
6. Johansson, T.B. et al., Renewable Energy, Island Press (1993).
7. Nakicenovic, N. et al. (1993), Long-term Strategies for Mitigating Global Warming, Energy, 18(5):401-609.

8. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), FAOSTAT-PC, 1995.
9. IEA, Energy prices & taxes 2000/n.2 in diskettes, 2000.
10. World Energy Council (WEC), editor. Survey of Energy Resources 1995. World Energy Council (WEC), 1995.
11. World Energy Council (WEC), editor. Survey of Energy Resources 1998. World Energy Council (WEC), 1998.
12. Anonymous. Projected costs of generating electricity update 1998. OECD, 1998.
13. Nebojsa Nakicenovic, et al., editors, Global energy perspectives, Cambridge University Press, 1998.
14. OECD and IEA, OECD statistical compedium 2000-2 in CD-ROM, 2000.
15. IAEA, Power reactor information system (PRIS) (<http://www.iaea.org/programmes/a2/>).
16. DeMeo, E.A. et al., Renewable Energy Technology Characterizations, TR-109496, EPRI and USDOE (1997).
17. 桜井淳、プルサーマルの科学、朝日選書 688、朝日新聞社 (2001).

山本 博巳(やまもと ひろみ)  
地球環境産業技術研究機構(RITE)  
電力中央研究所 経済社会研究所