

# 脱炭素社会に向けた エネルギーシナリオ提案

〈最終報告 100% 自然エネルギー〉

WWFジャパン委託研究

2011年11月  
株式会社 システム技術研究所



# 脱炭素社会に向けた エネルギーシナリオ提案

〈最終報告 100% 自然エネルギー〉

WWFジャパン委託研究

2011年11月

(株) システム技術研究所



---

## 目次

---

### 脱炭素社会に向けたエネルギーシナリオ提案

#### <最終報告 100% 自然エネルギー>

第1章 自然エネルギー	3
1.1 太陽光発電	3
1.2 風力発電	4
1.3 水力発電	4
1.4 地熱発電	5
1.5 太陽熱	5
1.6 バイオマス	5
1.7 水素／電力	6
1.8 自然エネルギーによる発電の最大規模	7
第2章 WWFシナリオのエネルギーの需要と供給	8
2.1 産業部門	10
2.2 家庭部門	12
2.3 業務部門	13
2.4 運輸部門	14
第3章 WWFシナリオのエネルギー供給構成	16
第4章 2050年の電力供給	21
4.1 気象データ	21
4.2 電力需要の月別・時刻別パターン	21
4.3 太陽光発電と風力発電の規模	23
4.4 電力貯蔵システム	25
4.5 電力のダイナミック・シミュレーション	25
第5章 CO <sub>2</sub> 排出量	29
参考文献	31
参考資料	32
1) 鉄鋼産業のエネルギー需要	32
2) 地熱発電のポテンシャルに対する考え方	33
3) 原子力発電の想定	35
4) 太陽光発電と学習曲線	37
5) バイオマスの扱いについて	38
6) ダイナミック・シミュレーションの方法	39
7) 電力貯蔵システムとバックアップ電力	40
8) 自動車技術	41
9) 燃料需要の詳細と供給構成	43

---

単位について：1000TOE＝1000トン石油換算、MTOE＝百万トン石油換算

1 TOE＝11,630kWh

本報告では最終用途エネルギーに注目して1次エネルギーは扱っていない。ただし、自然エネルギーからの電力を燃料に転換するときに生じる損失は供給構成に含めている。



## 概要

本報告は、日本におけるエネルギー需給の分析を行って、2020、2030、2050年における二酸化炭素排出削減シナリオの作成を行う。

普及が予想される効率の高い技術、ライフスタイルの変化、自然エネルギーの普及を想定して、エネルギー需給とCO<sub>2</sub>排出量を検討する。

報告は2つに分けて行う。＜中間報告＞は「省エネルギー」を中心にエネルギー最終消費の将来像を作成する。＜最終報告＞はエネルギー供給面について、「100%自然エネルギーによる供給」を検討する。

将来、自然エネルギーが主要な役割を担う持続可能な社会を構想するとき、基本になるのは省エネルギーによる高い効率の資源浪費のない快適な生活であり、必要なエネルギーが少なければ、それだけ自然エネルギーによる供給の実現性が高くなる。

そのため、二酸化炭素排出削減シナリオの作成には、現状のエネルギー消費を見つめなおす「省エネルギー」報告が出発点になる。

## 中間報告 省エネルギー レポート（要約）

日本における既存のエネルギーシナリオ研究を検討して、「アジア／世界エネルギーアウトルック2010」のレファレンスケースをBAUシナリオとして参照した。WWFシナリオとして、2050年までに高効率エネルギー技術を導入し、ライフスタイルに関わる変化も組み込んでゆくときのエネルギー需要を検討した。

省エネルギーの方法としては、LED照明、高性能住宅断熱基準、高効率ヒートポンプ、都市の緑化、TV会議による交通の代替、鉄鋼リサイクルの進展、インバータ制御モータの利用、カーシェアリング、エコドライブ、電気自動車／プラグインハイブリッド／燃料電池車などを幅広く検討し、エネルギー需要を削減するWWFシナリオを算出した。

WWFシナリオの2050年の最終用途エネルギー需要は、BAUシナリオと比較して、2億7352万トン石油換算から1億6729万トン石油換算へ、61.2%に減少した。1990年と比較すると、2050年には、3億2286万トン石油換算からの減少であり、51.8%に低下している。2020年をみると、1990年から83.4%に減少している。

WWFシナリオの2050年のCO<sub>2</sub>排出量は、BAUシナリオと比較すると、7億1200万トンCO<sub>2</sub>から4億3500万トンCO<sub>2</sub>へ61.1%に減少している。1990年と比較すると10億5900万

トンCO<sub>2</sub>からの減少であり、2050年には41.1%に低下している。2020年を見ると、1990年から78.5%に減少している。

これには自然エネルギーによる供給面が含まれていないが、適切な政策が実施できれば、2020年の1990年比25%削減の実現可能性を見ることができる。

## 最終報告 100%自然エネルギーによる供給（要約）

中間報告で作成したエネルギー需要に対して、国内にある自然エネルギーによる供給シナリオを検討した。自然エネルギーは、水力発電、太陽光発電、風力発電、地熱発電、太陽熱、バイオマスである。

最初に、中間報告で作成したエネルギー需要を、電力と燃料に区分して、それぞれのエネルギー供給方法を検討した。最終用途の電力については、太陽光、風力、水力、地熱、バイオマスにより供給可能であるが、時間的に変化する需要に対応して適切な供給を行う必要がある。日本全国842地点の1年間の気象データを用いて、1時間ごとの太陽光や風力によるエネルギー供給を計算し、生じた過不足については、揚水発電とバッテリーの適切な電力貯蔵について、シミュレーションによって検討している。

最終用途の燃料のうちの200℃以下の中低温熱は、太陽熱とヒートポンプ（電力）で効率よく供給可能であり、電力による部分的代替を検討した。さらに高温熱については、バイオマスと水素による供給を検討した。次に輸送用の燃料であるが、自動車については電気または水素による供給を、航空機と船舶についてはバイオマスの利用を検討した。ここで水素は、電力供給システムで生じる余剰電力を利用して、水の電気分解で製造する。

2050年には、太陽光4億7705万kW、風力1億912万kW、水力発電2760万kW、地熱発電1410万kWの規模が必要になった。これにより純粋電力需要627TWhを供給し、CO<sub>2</sub>の排出量はゼロにすることができる。

さらに余剰電力406TWhを利用して、産業用、民生用、輸送用の水素などの燃料用電力として供給することとした。燃料用にはこのほかにバイオマスと太陽熱により、産業用と民生用の熱を供給する。このほかに、自動車用に、ルーフトップ太陽光発電が1年間の走行用電力の一部を供給することも含めている。

# 脱炭素社会に向けたエネルギーシナリオ提案 最終報告 100% 自然エネルギー

## 第1章 自然エネルギー

100%自然エネルギーによる日本の将来のエネルギー供給を検討するのが、本報告の目的である。

ここでは、日本国内にある自然エネルギーの供給可能性を概観する。対象にしたのは、太陽光発電、風力発電、水力発電、地熱発電、太陽熱、バイオマスである。

このほかにも波力発電、海洋温度差発電、潮流発電、潮汐発電、地熱の直接利用などがあるが、これらのエネルギー技術について詳細な情報が入手できなかったため、本報告では扱っていない。これらのエネルギー技術の将来の普及の可能性を否定するものではない。

### 1.1 太陽光発電

日本における太陽光発電の導入規模は、すでに約300万kWになっている。3kW程度の家庭用と数千kWクラスのメガソーラーの普及が始まっている。騒音がなく、市街地でも設置でき、どこでも屋根や未利用地があれば設置可能である。

日本における設置可能な潜在量は、戸建住宅1.01億kW、集合住宅1.06億kWであり、2030年ごろの現実的な導入ポテンシャルは、戸建住宅5310万kW、集合住宅2210万kWとされている。このほかに公共建物、工場、未利用地、耕作放棄地などに1億5000万kWが設置可能となっている。<sup>(1)</sup>

これらを合計すると2050年ごろには、3億5000万kW規模が可能となる。この計算に利用している面積あたり出力は67W/m<sup>2</sup>であり、これから必要な面積を計算している。発電効率は、現在すでに最高のもものでは20%を超えており、2050年には最低でも25%を超えると考えられる。発電効率が25%になり、パネル周辺の無効面積が減少すれば、同じ面積で2倍、およそ7億kWの設置が可能になる。2050年ごろには最大規模はさらに拡大すると予想される。

現状では、経済性が難点であるが、固定価格買取制度により、導入が加速されている。生産規模が大きくなってきており、大量生産に関する学習曲線によって将来のコスト低下の可能性を検討することができる。(参考資料4)

## 1.2 風力発電

日本における風力発電の導入規模は220万kWである。北欧では電力需要の一定割合を供給し、ドイツやアメリカでは2000万kWを超えている。世界的には2億kWを超えており、すでに経済性のある投資と考えられている。欧米諸国と比較すると、日本の導入量は10分の1程度にとどまっている。

風力発電については、環境省の風力発電のポテンシャル調査により、表1-1に示すように電力会社別10地域における建設可能規模が示されている。<sup>(1)</sup> 設定した風速は、陸上では5.5m/秒、洋上では6.5m/秒である。

風力発電の合計規模は、陸上ポテンシャル2億8293万kW、洋上ポテンシャル15億7262万kWになっている。陸上ポテンシャルでもっとも大きな規模を示すのは北海道であり、東北地方、九州、関西がこれに続いている。洋上ポテンシャルでは、九州が最大であり、北海道、東北、中国がこれに続いている。

本シナリオでは、風力発電の許容可能な最大規模は、陸上で1億4000万kW、洋上で3億2000万kWと想定した。

表1-1 風力発電の地域別ポテンシャル(万kW)

地域	陸上	洋上
北海道	13,966	40,314
東北	7,263	22,479
東京	411	7,938
中部	481	6,212
北陸	795	3,869
関西	1,290	2,542
中国	924	15,199
四国	491	4,167
九州	2,098	45,467
沖縄	574	9,074
合計	28,293	157,262

## 1.3 水力発電

現状では、2016万kWの規模であるが、小水力を含めて最大可能な規模は、2760万kWとされている。今後の開発余地は、ほかの自然エネルギーと比較するとそれほど大きく残っていない。

水力発電の年間設備利用率は、45～50%程度であり、太陽光発電の12%、風力発電の20～30%と比較すると、水力発電の設備利用率は高い。

## 1.4 地熱発電

現状では52万kWであるが、今後、急速に開発が行われるとして期待が高まっている。年間設備利用率が70%ほど期待でき、環境に配慮したうえでの開発余地もかなり大きい。本シナリオでの想定は、最大1419万kW、設備利用率は70%としている。(参考資料2)

## 1.5 太陽熱

1980年代に家庭用太陽熱温水器が500万台以上、広く普及した。しかし、1990年代には、その普及は低下してゆき、現在では、設置規模が減少し、メーカーの数も少なくなっている。太陽熱温水器は経済性があり、低温熱を供給する良好な手段であり、政策的な援助を行って、技術開発を奨励して広く普及させる必要があると考えられる。

太陽熱コレクターと循環ポンプを組み合わせたソーラーシステムは、産業用にも広く利用可能な潜在力を持っている。ソーラーシステムで80℃の熱を供給し、この低温熱を使って電気ヒートポンプで165℃の蒸気を供給するシステムが、日本のメーカーによって開発されており、産業用にボイラ需要を代替する可能性があるとして期待されている。本シナリオでは、このような可能性を熱利用の部分の計算に組み込んでいる。

## 1.6 バイオマス

日本国内で利用可能な廃棄物バイオマスと未利用バイオマスは、表1-2に示すような

表1-2 バイオマスの可能性

バイオマスの種類	内容	現状	年間発生量(万トン)	未利用分(万トン)
廃棄物バイオマス	家畜排泄物	90%は堆肥などに利用	8,900	890
	食品廃棄物	20%は肥料・飼料に利用	2,200	1,760
	廃棄紙	回収されず焼却されている	1,600	1,600
	パルプ廃液(黒液)	乾燥重量(製紙産業で利用)	1,400	0
	製材工場等残材	90%は堆肥・燃料などに利用	500	50
	建設発生木材	60%は製紙原料・家畜敷料	460	184
	下水汚泥	濃縮汚泥ベース	7,500	2,700
未利用バイオマス	林地残材	ほとんど未利用	370	370
	農作物非食用部	30%は堆肥、飼料に利用(稲わら、もみがら)	1,330	910
エネルギー作物	森林	現状ではほとんどなし。今後積極的に生産する		6,000
合計(乾重量)			24,260	14,464
合計(石油換算)				6,727

(バイオマス・ニッポン総合戦略などをベースに、システム研にて試算)

規模になっている。

バイオマスは、発電、産業用燃料、民生用燃料、輸送用燃料（自動車、航空機、船舶）として利用する。とくに航空機には質量あたりのエネルギー密度の高い液体燃料としてのバイオマスが最も適しており、重要な供給源である。

上記の数値は、乾燥重量であり、石油換算するとおおよそ2分の1のエネルギー量になる。本シナリオでは、廃棄物と未利用バイオマスで3000万TOE、さらにエネルギー作物を3000万TOEを国内で生産するものとして、バイオマス合計で最大6000万TOE／年の利用を見込めるとした。

バイオマスの利用を推進するには、廃棄物の回収利用、農林業の活性化、未利用耕地でのエネルギー作物の生産など国内のバイオマス産業を育成する必要があることは言うまでもない（参考資料5）。

## 1.7 水素／電力

産業用、民生用の燃料需要に水素を供給することを検討した。本シナリオで扱う水素は、太陽光発電と風力発電の余剰電力を使って水の電気分解により得られる水素である。

このほかに輸送用に水素を供給する。ただし、輸送用にEV（電気自動車）とFCV（燃料電池車）の両者の技術革新が進展中であるが、その優劣をつけがたいところである。

EVは、電力を直接利用可能であり効率が高いが、走行距離と充電時間に課題が残っている。暖冷房時や夜間の照明による負荷の増大があるとEVの走行距離は短くなる。（参考資料8）

FCVはこの課題を解決できるが、水素を利用するときに効率が低下する。ともに電気モーターで走行するため、走行時の効率が現状の内燃機関の3倍ほどになるが、水素への変換効率によってその必要なエネルギー量には、違いが生じる。

ここでは、乗用車と貨物車について、FCVとEVが同程度に利用されるものとした。FCVへの水素、EVへの電力は、発電システムの余剰電力から供給するものとした。

ここでは、輸送用の最終用途として100のエネルギーが必要な場合に、EVとFCVの利用割合をそれぞれ50と想定した。以下のような効率を適用した。

図 1 - 1 輸送用水素／電力のエネルギー変換過程

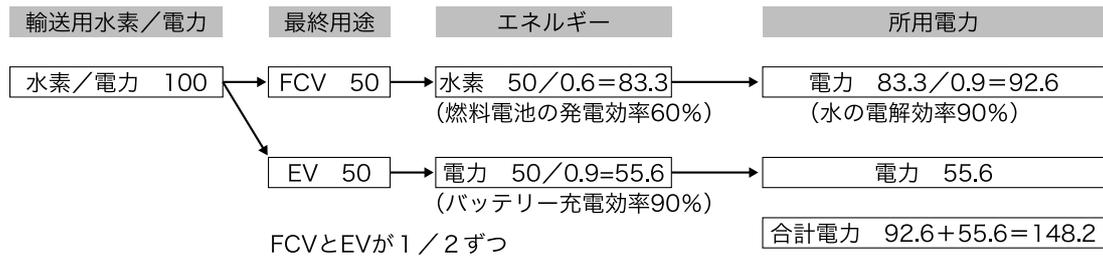


図 1 - 1 に示すように、必要な変換過程をさかのぼると、FCVとEVに50の最終用途エネルギーが供給されるときに必要な電力は、FCVへ92.6、EVへ55.6であり、合計で148.2となる。この計算過程を適用して輸送用水素／電力の計算を行っている。

## 1.8 自然エネルギーによる発電の最大規模

本シナリオで扱う自然エネルギーによる発電の最大規模の概要をまとめると以下のようになる。

表 1 - 3 自然エネルギーによる発電の最大規模の概要

供給源	供給容量 (kW)	設備利用率 (%)	発電量 (TWh)
太陽光	7億	12	736
風力	4億8000万	25	1,051
水力	2760万	46	111
地熱	1419万	70	87
バイオマス	800万	70	49

水力発電、地熱発電、バイオマス発電の2050年の規模は上記の表 1 - 3 に示した数値を使用している。太陽光発電と風力発電については、2050年において上記の規模の範囲内に収まることを確認することにする。

## 第2章 WWFシナリオのエネルギーの需要と供給

日本のエネルギー需要を分析すると、以下の2つのエネルギーの需要にあわせた供給が必要である。ひとつは電力であり、もうひとつは熱を供給する燃料である。これらを供給するための自然エネルギー源としては、以下の各項がある。

電力：水力発電、太陽光発電、風力発電、地熱発電、バイオマス発電

燃料：太陽熱、バイオマスなど

燃料は、貯蔵したエネルギーであり、必要なときに取り出して利用できる。これに対して、電力は、短い時間間隔で需要に応じて供給できるのが望ましい。しかし、自然エネルギーからの電力では、変動する気象条件により供給量が決まるので需要側の要求に常に対応できるわけではない。

2011年2月に発表されたWWFグローバルエネルギー報告では、電力を以下のように2つに区分している。<sup>(2)</sup>

### 1) サプライ・ドリブン電力（供給対応型電力）

太陽光や風力など供給側の条件によって供給がきまる電力

### 2) デマンド・ドリブン電力（需要対応型電力）

水力、地熱、バイオマスなど、需要に応じて柔軟に供給を行える電力

このサプライ・ドリブン電力は、需要と供給の変動に応じて、電力貯蔵装置による充電・放電が必要になり、そのためには、既存の揚水発電に加えてバッテリーが必要になると予想される。この点についての検討は第4章で扱っている。

また、電力に関しては、需要が供給を上回り、電力貯蔵システムからの供給（放電）を加えても不足するときには、バックアップ電力が必要になる。この問題に関しては、ダイナミック・シミュレーションを通じて、太陽光や風力により発生する余剰電力を大きくすれば、バックアップ電力を小さくできることがわかった。（参考資料7）

そこで、ここでは、サプライ・ドリブンの電力容量を大きくとり、一定の電力需要を満

たし、さらに余剰電力が発生するようにした。この余剰電力から生産した水素を、自動車や産業用など、時間的な制約から自由で、単位時間に大きな出力を必要とする燃料需要に供給することを検討した。水素は、バッテリーに比較して、大量貯蔵技術として経済性の高いことが知られているからである。

以上のような方針により、本報告で検討するエネルギーの供給システムの全体構成を、**図 2-1** のように構成した。

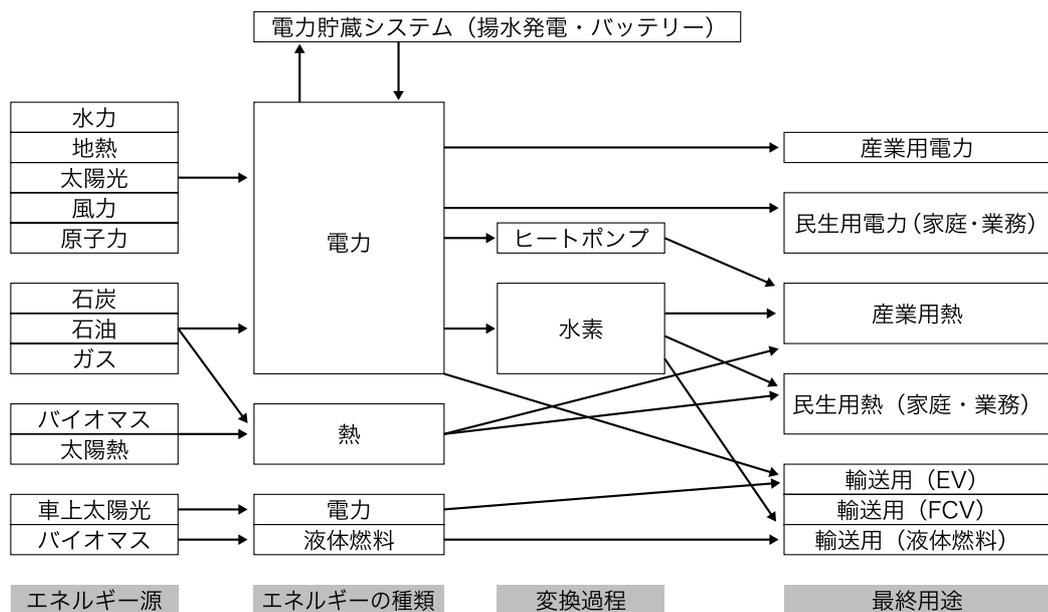
電力は、太陽光、風力、水力、地熱、石油、石炭、原子力から供給し、産業用と民生用の電力需要を満たす。電力の一部は電気自動車の動力源としても利用される。

太陽光と風力の時間変動性によって電力需要を上回る余剰電力は、揚水発電と蓄電池に充電し、電力供給が不足のときには放電する。電力の余剰が揚水発電と蓄電池の容量を上回ったときにはこれを水素に転換して貯蔵し、産業と民生用の燃料、あるいは輸送用燃料として利用する。

このほかに、太陽熱、バイオマス、さらにはヒートポンプによって、産業用と民生用の燃料需要に熱を供給する。また、自動車の屋根に取り付けたルーフトップ太陽電池は、自動車用の電力を供給する。(参考資料 8)

このような考察にもとづいて、自然なエネルギー供給源を増やしてゆき、2050年には自然エネルギー100%のエネルギー供給システムを構成することを検討した。

**図 2-1 エネルギー供給システムの全体構成**



以下はここで実施した作業の方法である。

まず、中間報告で作成したエネルギー需要を、電力と燃料に区分した。基本的には2008年のエネルギーバランス表にある電力と燃料の構成比をベースにして、2020、2030、2050年の各最終用途エネルギー需要を電力と燃料に分離する作業を行った。この際には、燃料需要における電力化の進展についても検討を行っている。

つぎに、燃料については需要の特性を考慮して自然エネルギーの導入構成を検討した。燃料の最終用途の特性とそれに適する自然エネルギーの割合を決定した。

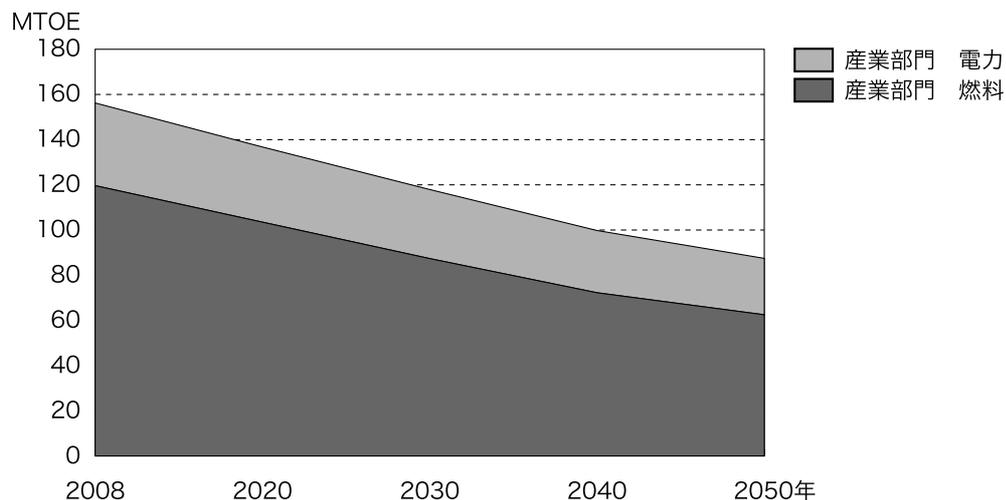
電力については、各部門に共通なので、その供給構成とダイナミックな特性を、第4章で別途に検討している。

以下には、産業部門、家庭部門、業務部門、運輸部門の各部門の最終用途エネルギー需要と供給について述べる。

## 2.1 産業部門

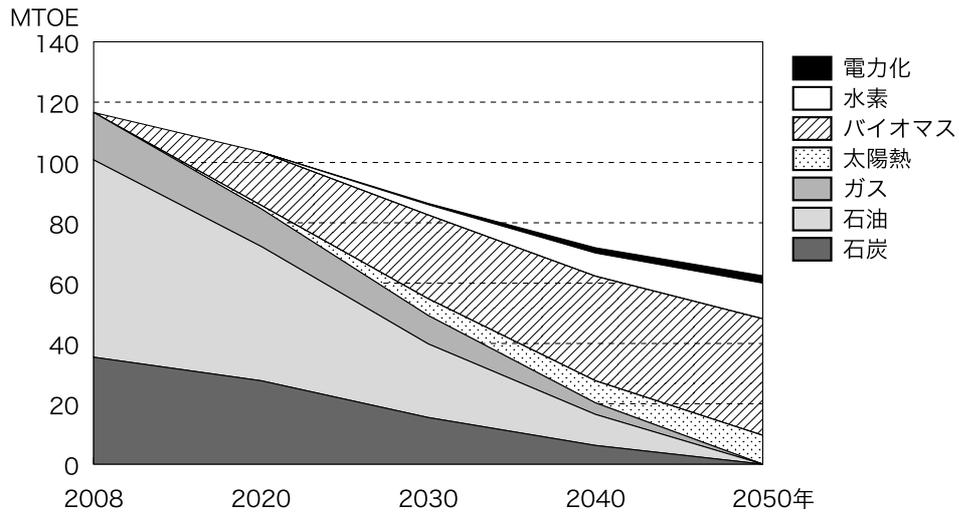
産業部門の需要構成は、図2-2に示すように、電力よりも燃料のほうが大きい。効率化の進展によってしだいに燃料の比重が小さくなっている。

図2-2 産業部門の電力と燃料 (MTOE)



燃料用途のうち、200℃以下の中低温熱は、太陽熱と電気ヒートポンプで供給できる。ヒートポンプのCOPは3.5が実現している。このため、燃料の一部を電力で代替することになり、その規模を電力化として示している。さらに高温熱などの燃料需要には、バイオマスと水素を利用するものとした。

図 2-3 産業部門の燃料構成 (MTOE)



紙パルプ産業は、木材パルプ生産からの廃棄物である黒液をボイラ用に利用しており、生産に必要なエネルギーの40%になっている。紙パルプ産業は、将来的にはバイオマスに依存するものとした。

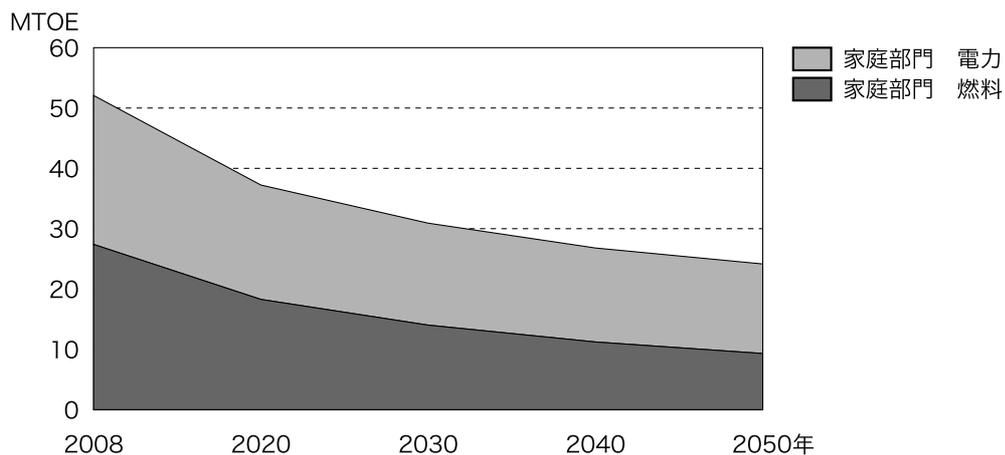
セメント産業や化学産業もバイオマスを多く利用するようになる。鉄鋼業については、前回の〈中間報告 省エネルギー〉の内容を見直して、将来のエネルギー需要を再計算した。(参考資料1)

高炉鋼の生産用には原料炭が利用されているが、将来的にはこれを水素で代替するものとした。しかし、その技術は未開発であり、未知の点が残っているため、自然エネルギー利用を適用できずに残される可能性もある。

## 2.2 家庭部門

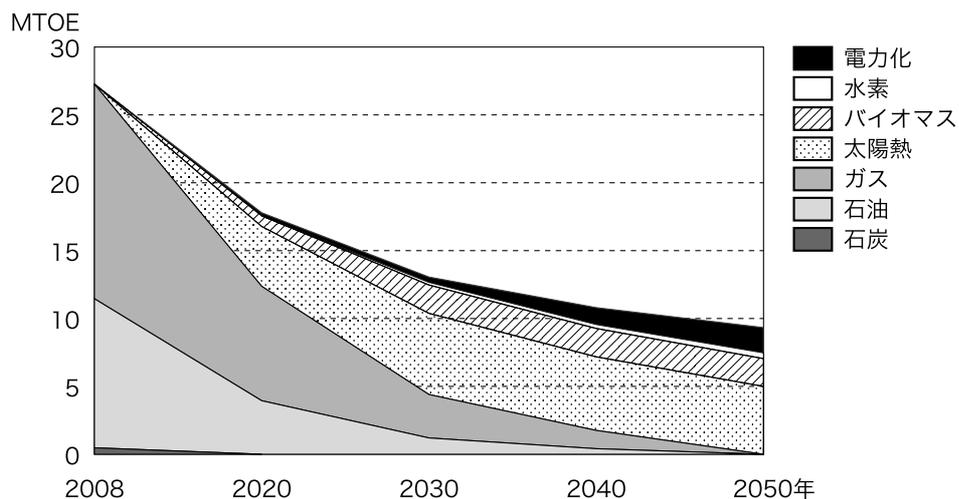
家庭部門では、燃料の効率化は進展するが、電力については需要減少の程度が低いのが特徴である。その理由は、電力については効率化が進展しても、情報化などにより各種の活動が電力消費を増加させるためである。

図 2-4 家庭部門の電力と燃料 (MTOE)



家庭部門の燃料需要のうち暖房、給湯には太陽熱と電気ヒートポンプが広範に利用されるようになる。厨房用にはバイオマスと水素が利用されるものと想定した。

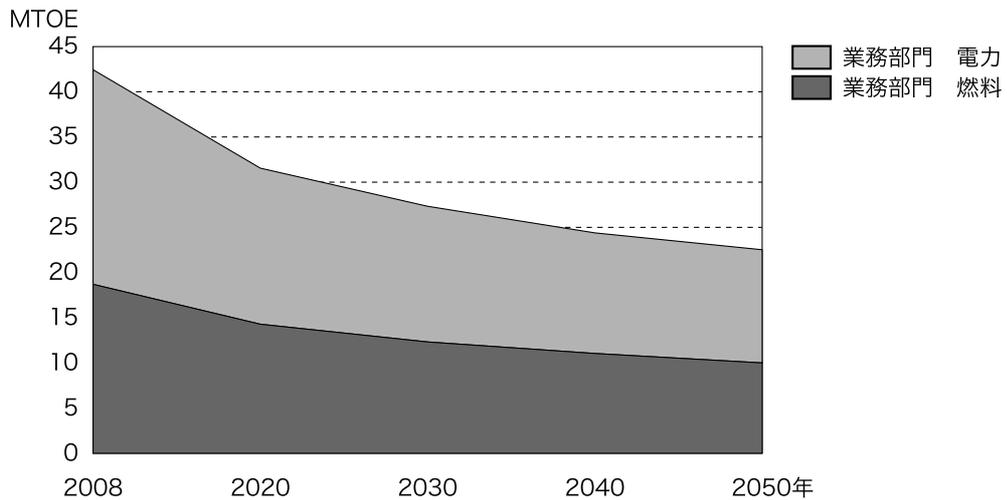
図 2-5 家庭部門の燃料構成 (MTOE)



## 2.3 業務部門

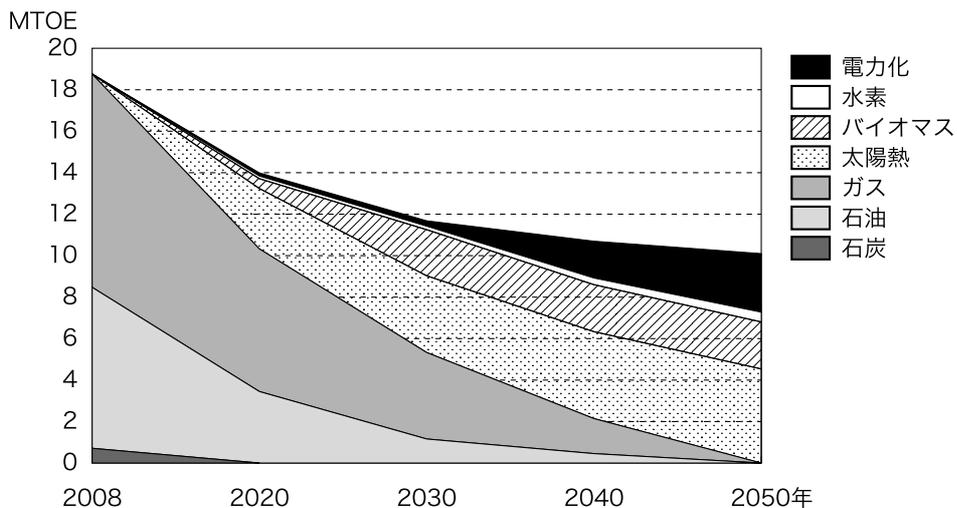
業務部門の特徴は電力の比重が高いことであり、燃料よりもその割合は大きくなっている。

図 2-6 業務部門の電力と燃料 (MTOE)



業務部門の燃料需要のうち暖房・給湯需要は、低温の熱であり太陽熱が広範に利用可能である。ここでは太陽熱の積極的な利用とバイオマス利用を検討し、補助的に水素の利用を想定した。もちろん、「電力化」として示すヒートポンプによる効率的な熱供給も考慮している。

図 2-7 業務部門の燃料構成 (MTOE)



## 2.4 運輸部門

運輸部門の主要なエネルギーは燃料であり、電力は鉄道向けにごく一部である。

将来的には、乗用車としてEV（電気自動車）とFCV（燃料電池車）が利用されるので、燃料需要の一部を電力で代替することになる。

図 2 - 8 運輸部門の電力と燃料 (MTOE)

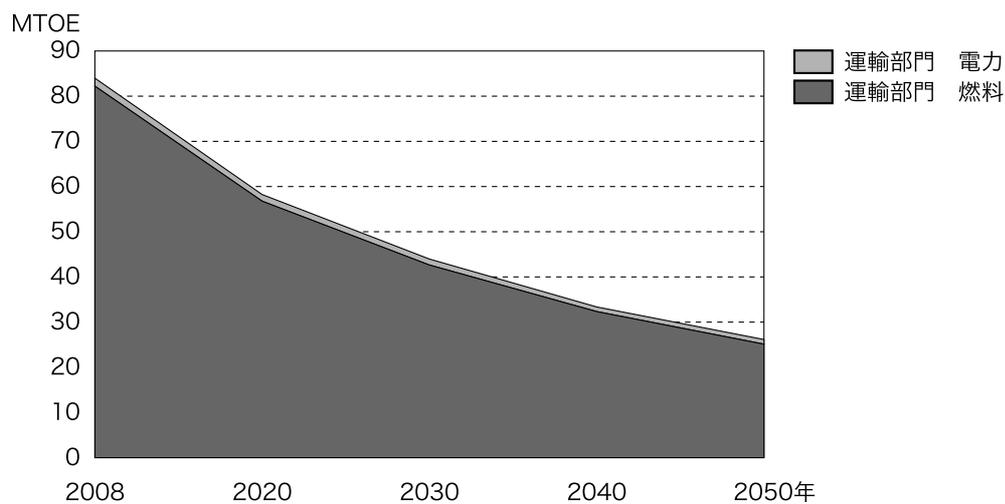
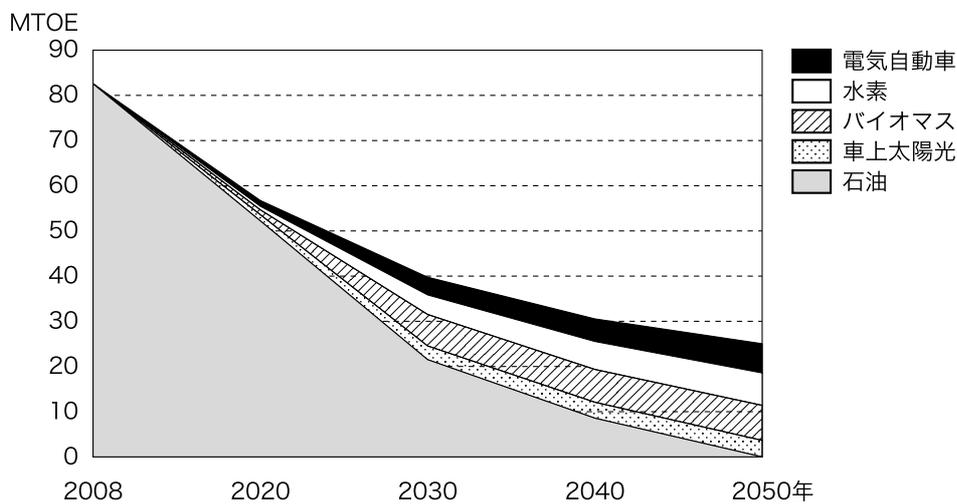


図 2 - 9 運輸部門の燃料構成



運輸部門の燃料構成を検討すると、以下のようになった。

航空、船舶には液体燃料であるバイオマスが使用される。

乗用車と貨物車にはEVとFCVがほぼ同じ割合で利用されるものとした。バッテリーの

重量あたり密度が飛躍的に増大し、コストも低下すればすべてがEVに転換することになるが、今のところは不明である。FCVにすると電力を使って水の電気分解をするため、効率が低下するが、ここではこのように想定している。

さらに乗用車などの車上に設置した太陽光発電が、走行用エネルギーの一部を負担するものとしている。

以上の検討により、最終的に電力と燃料の最終用途エネルギーとその供給構成をまとめることができた。詳細な数値データは参考資料9に示している。

## 第3章 WWFシナリオのエネルギー供給構成

以上に示したエネルギー需給の内容を、2008年から2050年についてとりまとめると、以下のようなになる。

まず、エネルギー供給構成は燃料と電力とするが、電力には元来のデマンドドリブン（需要対応型）の電力需要があり、ここではこれを純粋電力需要とよぶことにする。

つぎに、もともとの燃料需要のうちの一部が、電力からの変換により供給されるものがある。そのプロセスは、水素への転換（燃料水素とFCV用）、電力ヒートポンプを利用する熱供給、EVの駆動用動力、車上太陽光であり、これらを燃料用の電力と呼ぶ。そして残りの燃料需要がもともとある燃料需要（正味の燃料）であり、バイオマスと太陽熱によって供給されることになる。

表 3-1 燃料と電力の最終用途の構成

1000TOE	2008	2020	2030	2040	2050
燃料	247,989	188,218	134,711	95,922	70,063
電力（燃料用）	0	2,555	16,576	27,563	34,887
電力（純粋電力）	86,494	70,853	63,991	57,959	53,938
合計	247,989	190,773	151,287	123,485	104,950

図 3-1 燃料と電力の最終用途の構成

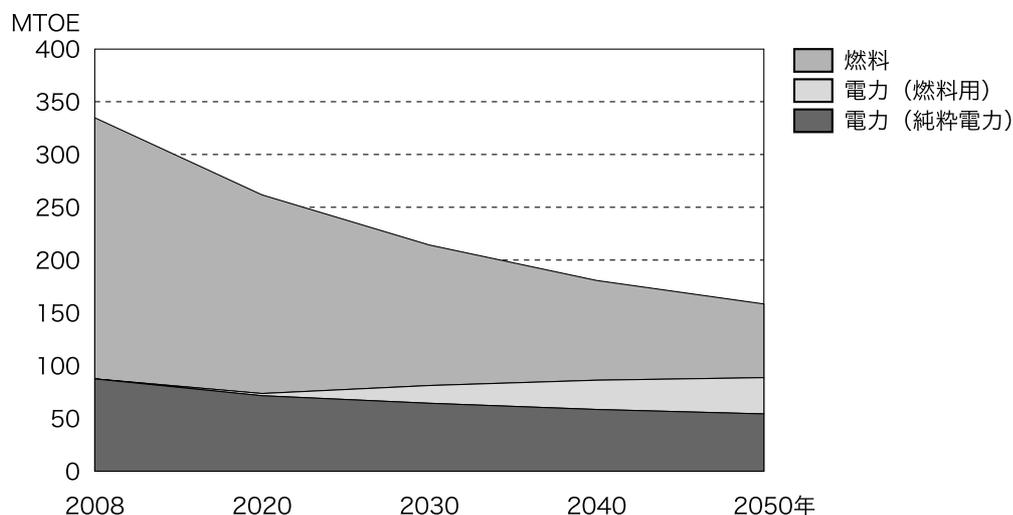


表3-1には、燃料（正味の燃料）、電力（燃料用）、電力（純粋電力用）の3種類の最終用途別の数値をとりまとめている。

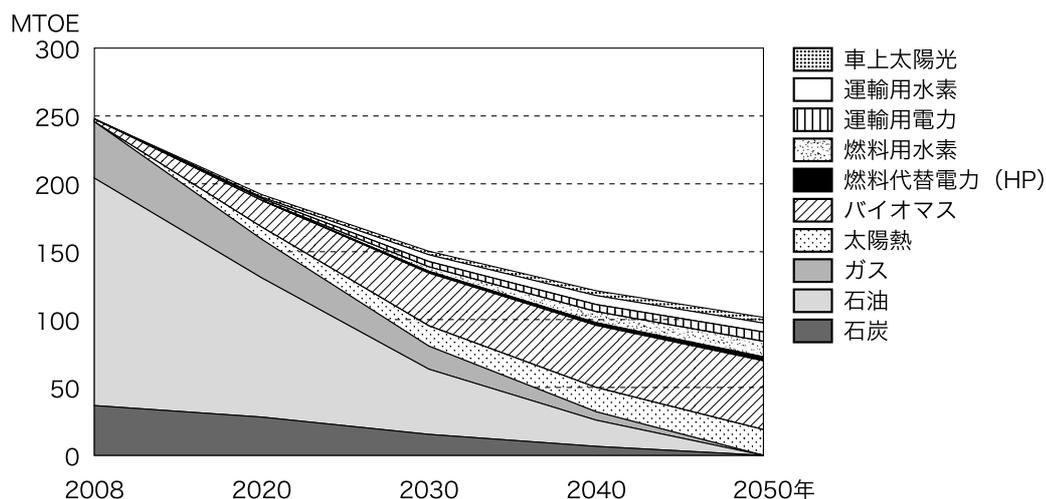
2020年以降は、燃料の一部が電力（燃料用）から供給されるので、正味の燃料需要を代替してゆき、2050年には、電力（燃料用+純粋電力用）が最終的にやや増加する結果になっている。しかし、全体として燃料の減少は大きく、燃料と電力の合計は減少している。

このうち燃料と燃料用電力の供給構成は以下ようになる。

表3-2 燃料の供給構成（1000TOE）

燃料構成（1000TOE）	2008	2020	2030	2040	2050
石炭	36,536	27,558	14,858	5,943	0
石油	166,939	104,159	48,874	19,550	0
ガス	42,120	28,398	16,902	6,761	0
太陽熱	0	7,788	14,807	17,004	18,468
バイオマス	2,395	20,315	39,270	46,665	51,594
燃料代替電力（ヒートポンプ）	0	106	321	1,407	2,131
燃料用水素	0	79	3,595	8,598	11,934
運輸用電力		1,472	3,900	5,217	6,095
運輸用水素	0	528	4,515	6,148	7,237
車上太陽光	0	1,345	3,132	3,481	3,714
合計	247,989	191,748	150,173	120,773	101,173

図3-2 燃料の供給構成



次に「燃料用電力」を含む電力の供給構成を示す。純粋電力だけであれば、2050年にむけて減少してゆくが、「燃料用電力」を含めると、燃料の一部を太陽光と風力で発電した電力でまかなうために、電力が増加する。

表 3-3 「燃料用電力」を含む電力

電力構成 (TWh)	2008	2020	2030	2040	2050
石炭	322	220	140	56	0
石油	107	85	70	28	0
ガス	233	190	110	44	0
水力	83	90	97	105	111
原子力	258	89	23	0	0
地熱	3	24	45	70	87
バイオマス	15	23	32	42	49
太陽光	2	68	151	219	253
風力	3	34	76	109	127
純粋電力への供給計	1,006	824	744	674	627
太陽光 (燃料むけ)	0	20	128	214	270
風力 (燃料むけ)	0	10	64	107	135
燃料用を含む電力合計	1,006	854	937	994	1,033

図 3-3 電力の供給構成 (燃料用電力を含む)

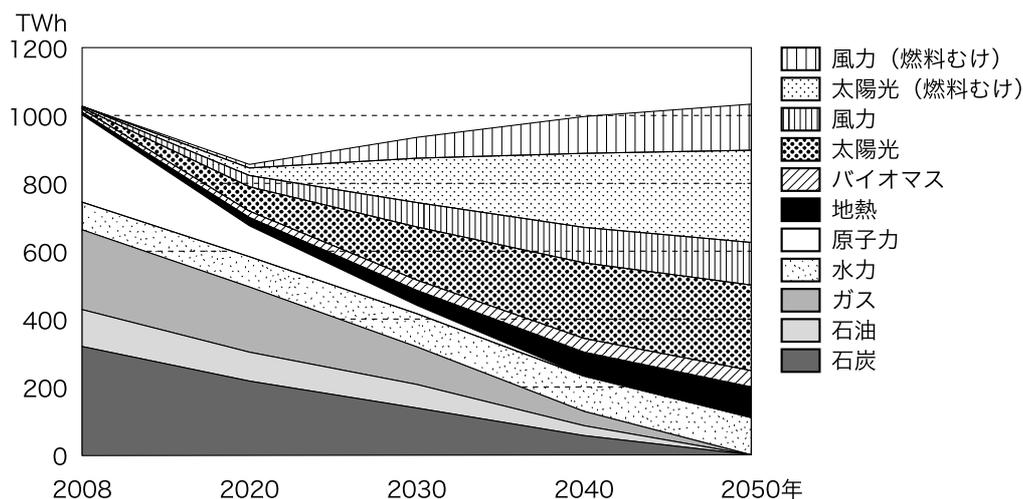


図 3-3 に示すように、2020年までは、効率向上により電力需要は低下するが、それ以降には、化石燃料代替のための燃料用の水素生産が始まるので、追加的に太陽光と風力の発電量が必要になり、結果として、電力供給全体は2050年に、2008年の水準と同程度になることがわかる。

太陽光発電と風力発電の導入率について多くの条件でのシミュレーションを試みた。その結果、太陽光発電量と風力発電量の相対的な割合は、おおよそ太陽光：風力=2：1程度にするのが望ましいという結果を得ている。これは日本における太陽光+風力発電の発電量に対する電力需要の1年間の変動の特性から来ている。<sup>(15)</sup>

原子力発電は、安全性、廃棄物の処理、核拡散に関して根源的な問題があり、長期的に

は核燃料の枯渇の問題もあるため持続可能なエネルギー供給源ではない。WWFシナリオでは、2020年に1561万kW、2030年に404万kW、2040年以後はゼロにするものとした。設備利用率は65%として発電量を求めている。詳細は、参考資料3を参照。

表3-3には、各電力供給源の2008年から2050年までの設備容量と設備利用率から、発電量をもとめて示している。太陽光発電と風力発電の発電量は、2：1に設定して計算を行っている。図3-3には、そのグラフを示している。

参考までに純粋電力のみの場合には、図3-4のようになる。この場合には、図3-3の上部にある、風力（燃料むけ）と太陽光（燃料むけ）の2者を除いたものを示している。

両者の違いは、発電した電力の余剰分を燃料製造用に使用することであり、図3-3の

図3-4 純粋電力のみの供給の場合

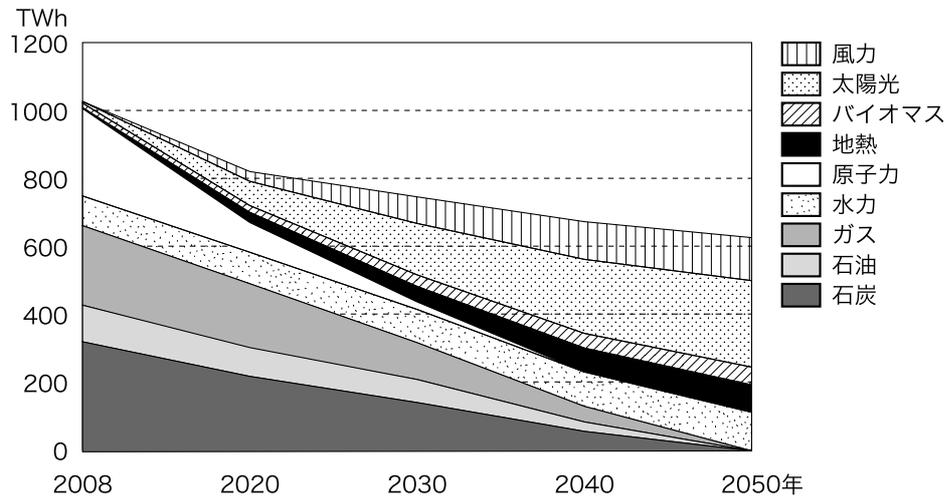
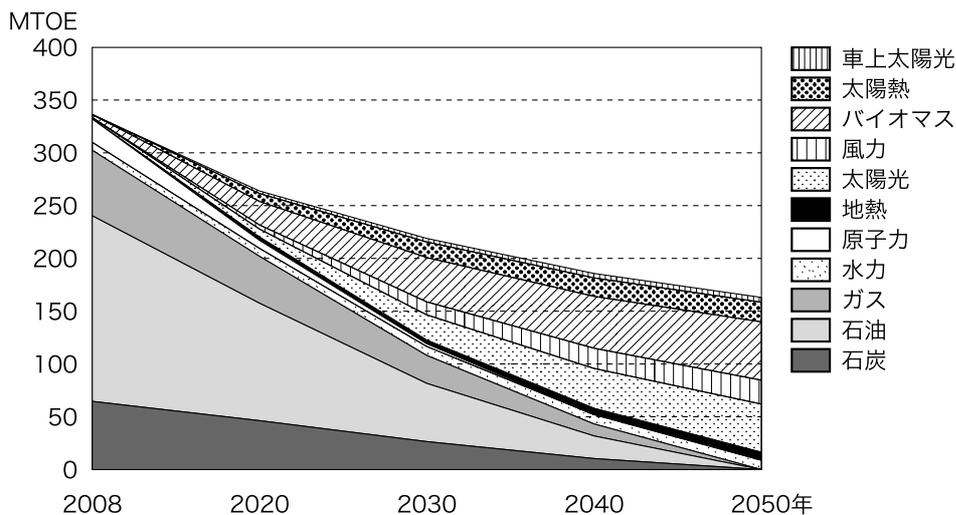


表3-4 全エネルギー供給構成 (1000TOE)

供給源	2008	2020	2030	2040	2050
石炭	64,228	46,478	26,898	10,759	0
石油	176,141	111,469	54,894	21,958	0
ガス	62,158	44,738	26,362	10,545	0
水力	7,138	7,740	8,342	9,064	9,546
原子力	22,188	7,654	1,978	0	0
地熱	284	2,076	3,878	6,040	7,482
太陽光	189	7,584	24,076	37,189	45,052
風力	275	3,792	12,038	18,595	22,526
バイオマス	3,645	22,307	42,004	50,290	55,813
太陽熱	0	7,788	14,807	17,004	18,468
車上太陽光	0	1,345	3,132	3,481	3,714
合計	336,245	262,971	218,409	184,925	162,602

図 3-5 全エネルギー供給構成 (MTOE)



場合には、そのために太陽光発電と風力発電の変動余剰分を利用している。

全体のエネルギー供給構成は、表 3-4、図 3-5 のように変化してゆく。

全供給量は、2008年の 3 億3624万TOEから、2050年の 1 億6260万TOEまで、おおよそ 48.4%に低下してゆく。

原子力が2040年までにゼロになり、石炭、石油、ガスの化石燃料が2050年までにゼロに減少してゆくのに代わって、水力がすこし増加し、地熱、太陽光発電、風力発電、バイオマス、太陽熱、車上太陽光が急速に増加してゆく様子がわかる。

2050年には、バイオマスが5581万TOE、太陽熱が1847万TOE利用される。

## 第4章 2050年の電力供給

日本のエネルギーの多くを自然エネルギー源（太陽、風力、水力、バイオマス、地熱）から供給する場合に、1年間の発電量は、第3章に示すように計算することができる。

ただし、太陽光発電や風力発電からの必要な発電量（kWh）はわかっても、実際にどれだけの容量（kW）の設備を準備すればよいのかは、気象データによる分析を必要とする。

さらに、太陽光発電や風力発電は時々刻々変動する供給源であり、需要との関係から、過不足や貯蔵の必要性の問題が生じると予想される。

これらの問題を検討するには、ダイナミックな分析が必要であり、日本の国内電力を自然エネルギーで供給するときの、短い時間間隔ごとの需要と供給の変動から生じるバックアップ電力、電力貯蔵、余剰電力の関係を分析することが重要である。

ここでは、自然エネルギーの供給量をもっとも大きくなる2050年の電力供給を行う場合を例にとって、以上の問題を検討する。

日本の全国各地の気象データをベースとして、電力供給ダイナミック・シミュレータを用いて1年間のシミュレーションを行った。以下にその概要を示す。

### 4.1 気象データ

日本の1時間ごとの気象データとして、日本建築学会の拡張アメダス気象データの標準EA気象データ2000年版を使用した。これは1990～2000年における代表的な気象を再現したデータであり、北海道から沖縄まで、日本全国842地点の日射データと風速データが利用可能である。この842地点を、10電力会社の地域により区分して利用した。<sup>(3)</sup>

### 4.2 電力需要の月別・時刻別パターン

現状の一般電気事業者10電力会社の1ヶ月ごとの電力需要（2008年）を表4-1と図4-1に示す。<sup>(4)</sup>これを基礎にして、将来の電力需要を検討した。

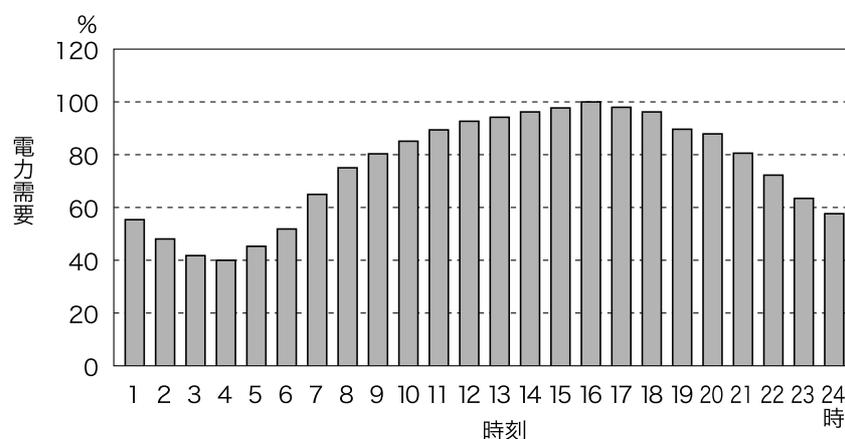
表 4 - 1 日本の10地域の電力需要量（2008年、GWh）

月	北海道	東北	関東	中部	北陸	関西	中国	四国	九州	沖縄	合計
1	3,362	7,945	27,491	11,794	2,788	13,830	5,715	2,871	8,292	624	84,714
2	3,094	7,101	24,598	10,262	2,413	12,131	4,924	2,486	6,951	556	74,516
3	3,129	7,384	25,632	10,843	2,475	12,655	5,079	2,518	7,305	613	77,633
4	2,786	7,161	24,322	11,206	2,491	12,099	5,257	2,460	7,054	592	75,429
5	2,735	7,064	24,470	11,270	2,408	12,339	5,242	2,465	7,196	679	75,868
6	2,698	7,096	24,924	11,697	2,454	12,837	5,397	2,542	7,476	799	77,920
7	2,914	7,919	30,070	14,039	2,961	15,957	6,599	3,170	9,585	914	94,128
8	2,889	7,730	29,421	13,266	2,834	15,314	6,386	3,088	9,120	888	90,938
9	2,860	7,314	26,840	12,357	2,623	13,564	5,793	2,707	8,143	825	83,026
10	2,918	7,259	24,848	11,545	2,256	12,534	5,338	2,503	7,388	768	77,627
11	3,027	7,360	24,794	11,205	2,575	12,404	5,364	2,519	7,341	639	77,228
12	3,377	7,800	26,753	11,738	2,699	13,426	5,721	2,782	8,066	620	82,982
合計	35,790	89,133	314,164	141,221	31,248	159,090	66,816	32,111	93,918	8,515	972,008

10電力会社のうち、沖縄電力はほかの電力網と接続されていない。残りの9電力会社は互いに電力融通可能な送電ルートを持っているが、現状ではその規模は小さい。ここでは10電力の送電網をひとつの送電網と考えて、電力の融通が可能になるものと想定した。

1日24時間の1時間ごとの電力の需要変化として図4-1に示すようなパターンを推定した。電力需要は深夜から早朝に低下し、その後、朝から午後にかけて増大し、午後2時から4時ごろに最大になり、夜間に向けて減少してゆく。図4-1には電力需要について最大値を100%とする指数で表現し、毎月の電力需要にもとづいて1時間ごとの需要を配分した。

図 4 - 1 1日の電力需要パターン



### 4.3 太陽光発電と風力発電の規模

太陽光発電と風力発電の規模を設定するには以下の方法をとった。ここで2050年の年間電力需要は、第3章で求めたように、627TWhとなるものとしている。

太陽光発電については、ユニットとして定格出力1kWの太陽電池パネルを各サイトで年間最大発電量になるように設置した。すなわち、南向き、傾斜角を「緯度-5」度に設定し、1時間ごとの水平面日射データを直達光と散乱光に分離し、設定した傾斜面に対する日射量をもとめ、1年間の発電量を計算して保存した。

太陽光については、842地点について10地域のそれぞれの年間電力需要に比例した電力を供給するように地域ごとにユニット数を計算した。

風力発電については、各サイトにユニットとして出力2000kW、直径80m、プロペラ中心高さ（ハブ高さ）65mの風車を設置した。カットイン風速（利用開始風速）3m/s、カットアウト風速25m/s（運転停止風速）として、842地点の風速データを用いて、1/4乗法則によりハブ高さの風速を計算し、効率40%で1時間ごとの発電量を計算して保存した。風力発電の年間設備利用率が18%以下の地点は除外して、90サイトを有効とした。風力のサイトには離島が含まれているが、洋上風力の開発が進展しているため、そのまま使用している。

風力発電については、第1章に示した風力発電のポテンシャル調査により、表1-1に示すように10地域の潜在的な建設可能規模が調査されている。この表の陸上のポテンシャル値の相対値を各地域の建設可能規模の配分比とみなして、必要な風力発電のユニット数を地域ごとに計算した。この結果をみると、表4-2のようになり、北海道や東北地方における風力発電の規模が大きくなっている。

本シナリオでは、日本全国がひとつの送電網に統一されて、各地域で生産された電力が自由に国内の他の地域に供給されるものと想定した。このため、送電網についての見直しが必要になる。

以下では、太陽光と風力の比を2：1として規模の設定を行っている。表4-2には、電力需要に対して太陽光の導入率40%、風力の導入率20%の場合の供給容量の計算結果を示している。

太陽光発電の設備利用率は、全国平均で12.6%、風力発電の設備利用率は全国平均で27.55%になっている。

表 4-2 太陽光と風力の発電容量と設備利用率（太陽40%、風力20%のとき）

地域	太陽光発電			風力発電			電力需要 (GWh)	太陽光+風力 の割合 (%)
	容量 (MW)	発電量 (GWh)	設備利用率 (%)	容量 (MW)	発電量 (GWh)	設備利用率 (%)		
1 北海道	9,584	9,235	11.00	23,310	61,971	30.35	23,088	308.41
2 東北	23,811	23,000	11.03	14,611	32,159	25.13	57,500	95.93
3 関東	70,453	81,067	13.14	709	1,820	29.31	202,667	40.90
4 中部	31,388	36,441	13.25	889	2,130	27.35	91,103	42.34
5 北陸	8,294	8,063	11.10	2,127	3,520	18.89	20,158	57.46
6 関西	37,854	41,052	12.38	2,872	5,712	22.70	102,629	45.57
7 中国	15,855	17,241	12.41	2,147	4,091	21.76	43,103	49.49
8 四国	6,964	8,286	13.58	569	2,174	43.64	20,715	50.50
9 九州	21,037	24,235	13.15	3,798	9,290	27.92	60,586	55.33
10 沖縄	1,928	2,197	13.01	930	2,542	31.21	5,493	86.27
11 電力計	227,169	250,817	12.60	51,962	125,408	27.55	627,042	60.00

表の右端には、各地域の電力需要に対する太陽光と風力の発電量の割合を示している。北海道は300%以上であり、東北は95%、沖縄は86%になっているが、他の地域は40～60%付近にある。

太陽光発電と風力発電の変動をみるために、1日の24時間についての時刻別と月別の発電量を検討した。図 4-2 には時刻発電量を示す。図 4-3 には月別発電量を示す。

太陽光の発電量は、春から夏にかけて増大してゆき、冬には小さくなる。時刻別にみると、当然であるが、朝から正午にかけて増大し、午後には減少してゆく。

風力の発電量は1日24時間の時間別にはほとんど違いがないが、図 4-3 に示すように、

図 4-2 太陽光（40%）と風力（20%）の時刻別発電量（TWh）

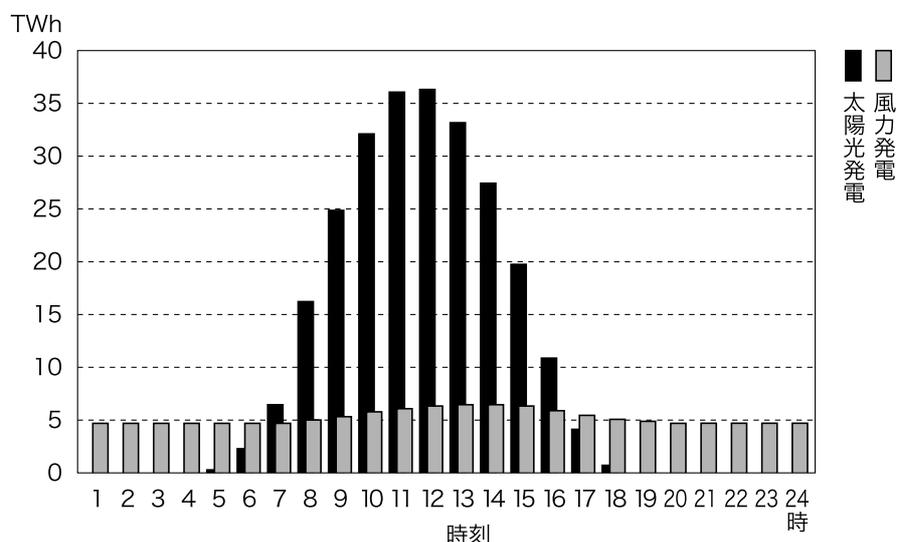
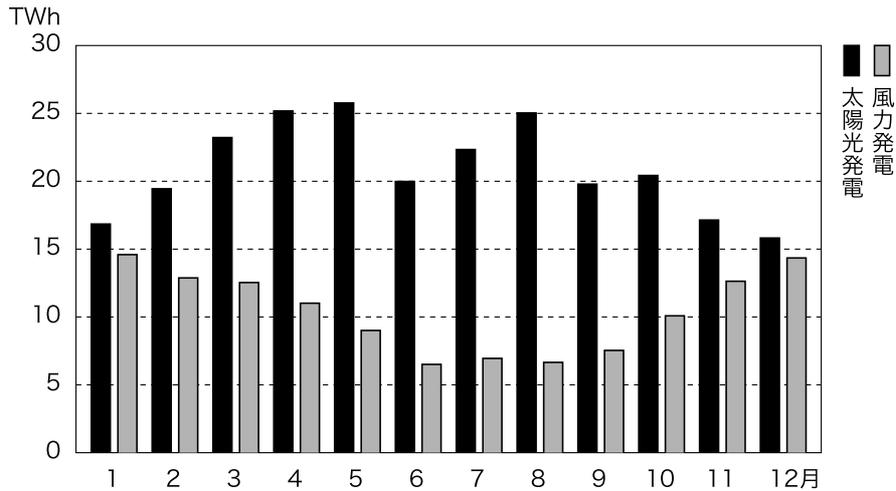


図 4 - 3 太陽光（40％）と風力（20％）の月別発電量（TWh）



月別をみると夏季に小さく、冬季には大きくなっている。太陽光と風力は互いに相補的な関係にあることが理解できる。

#### 4.4 電力貯蔵システム

すでに国内には電力貯蔵装置として、揚水発電が2513万kWあり、原子力発電の出力一定運転に対応するために、夜間に電力を貯蔵して昼間に放出することが行われている。これを自然エネルギーによる電力の変動を吸収する手段として利用する。

揚水発電の損失は貯蔵電力の30%になっている。揚水発電の貯蔵能力を、2513万kW×4.5時間=113GWhと推定した。

発電量が需要を上回るとき、揚水発電への充電だけでは不足ならバッテリーへの貯蔵を行う。バッテリーの充放電効率は90%と想定し、10kWhの貯蔵量に対して2kWのインバータを装備する。バッテリーの容量はシミュレータによって変化させて検討した。

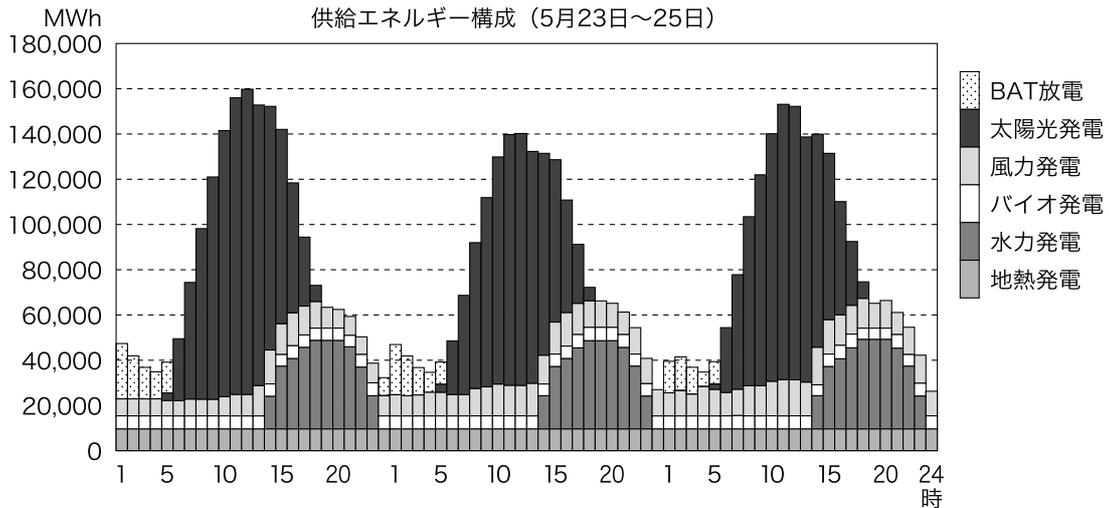
電力貯蔵システムの容量が小さいと、自然エネルギーによる発電が不足のときにはバックアップ電力が必要になる。また、貯蔵容量が小さいと、余剰電力が増大する。しかし、貯蔵容量をどこまで増やすのが適切かは、現実的な検討が必要である。

#### 4.5 電力のダイナミック・シミュレーション

拡張アメダス標準EA気象データ2000年版より1時間ごとの日射データと風速データを得て、1時間ごとの発電と電力供給のシミュレーションを行った。<sup>(15)</sup>

図 4 - 4 に示すのは、例として、5月23日～5月25日という3日間の1時間ごとのシミュ

図 4-4 3日間の供給エネルギー構成の例 (MWh)



レーションの詳細である。

地熱とバイオマス発電が一定の電力を供給し、水力は太陽光が減少する夕方にピークが生じるように供給する。太陽光と風力はできる限り需要に対応し、過剰の時には揚水発電またはバッテリーに充電し、不足のときはそこから放電する。供給が不足するときにはバックアップ電力を使用している。ただし図中にはバッテリーへの充電量は示していない。

シミュレーションとしては、①純粋な電力需要に対して供給するケースと、②水素など燃料分にも電力を供給するケースについて示す。

本シナリオを実現する発電システムとしては、ケース②が必要である。ケース①はその場合の純粋電力需要のみの供給を行う場合の発電システムを理解するために示すものである。その結果は、表 4-3 のようになった。

いずれも年間電力需要（純粋電力分のみ）は、第 3 章の表 3-3 に算出したように 627 TWh であり、以下では、他の変数の大きさをこれに対する割合（%）で表現している。

#### ケース①：純粋電力需要のみを対象とするケース

627TWhの純粋電力需要に対して太陽光40%、風力20%とすれば、ほぼ適当な発電量にすることができる。

結果をみると、年間電力需要627TWh、平均電力7158万kW、太陽光発電 2 億2717万kW、風力発電5196万kW、揚水発電に加えてバッテリー300GWhを使用している。

発電量合計は661TWh、電力需要の105%あり、バックアップ電力が5.99%、余剰電力が

3.61%発生している（％は年間電力需要に対する割合を示す）。最大バックアップ電力は4078万kWになっている。バッテリー容量を300GWhに増やしたときも、バックアップ電力が必要になることを示している。

バックアップの稼働率は低いが、その容量はかなり大きい。バックアップ電力を小さく

表 4-3 シミュレーションのまとめ

項目	単位	ケース 1	ケース 2
太陽光発電容量	MW	227,169	477,054
風力発電容量	MW	51,962	109,119
揚水発電／バッテリー容量	GWh	113／300	113／300
年間電力需要	GWh／年	627,042	627,042
年間平均電力	MW	71,580	71,580
ピーク電力需要	MW	109,982	109,982
発電量合計	GWh／年	661,039	1,037,357
太陽光発電量	GWh／年	250,817	526,715
風力発電量	GWh／年	125,408	263,358
水力発電量	GWh／年	111,214	111,214
地熱発電量	GWh／年	87,014	87,014
バイオマス発電量	GWh／年	49,056	49,056
バックアップ発電量	GWh／年	37,530	0
発電シェア合計	%	105.42	165.44
太陽光発電シェア	%	40	84
風力発電シェア	%	20	42
水力発電シェア	%	17.74	17.74
地熱発電シェア	%	13.88	13.88
バイオマス発電シェア	%	7.82	7.82
バックアップ発電シェア	%	5.99	0
バックアップ発電最大出力	MW	40,783	0
BAT充電量	GWh／年	28,942	13,907
BAT放電量	GWh／年	27,421	13,102
BAT損失	GWh／年	2,894	1,387
BAT損失／電力需要	%	0.46	0.22
最大BAT充電レベル	%	100	100
平均BAT充電レベル	%	42.79	96.1
揚水発電充電量	GWh／年	36,183	23,136
揚水発電放電量	GWh／年	27,834	17,753
揚水発電損失	GWh／年	8,350	5,326
揚水発電損失／電力需要	%	1.33	0.85
最大揚水充電レベル	%	100	100
平均揚水充電レベル	%	32.35	77.91
余剰電力量	GWh／年	22,605	403,398
余剰電力量／電力需要	%	3.61	64.33

する制御方法が重要であることがわかる。そのひとつの方法は、以下のケース②のように水素など燃料生産用に余剰電力を増大する方法である。

## ケース②：燃料生産を含む電力を供給するケース

燃料生産を含む電力需要は、第3章の表3-3に示したように1037TWhの発電量が必要になる。これは、純粋電力需要に対して太陽光84%、風力42%とした場合に相当する。

結果をみると、年間電力需要627TWh、平均電力7158万kW、太陽光発電4億7705万kW、風力発電1億912万kW、揚水発電に加えてバッテリー300GWhを使用している。

発電量合計は1037TWh、純粋電力需要の165%あり、バックアップ電力はゼロであるが、余剰電力が64%発生している。（%は年間電力需要に対する割合を示す） 純粋電力のみのケースと比較すると、燃料用電力需要は406TWhだけ大きくなっている。

この余剰電力が、サプライ・ドリブン電力として、燃料用電力を供給する。このケースでは、余剰電力が大きくなっており、バッテリー容量を300GWhとすると、バックアップ電力をゼロにすることができる。（参考資料7）

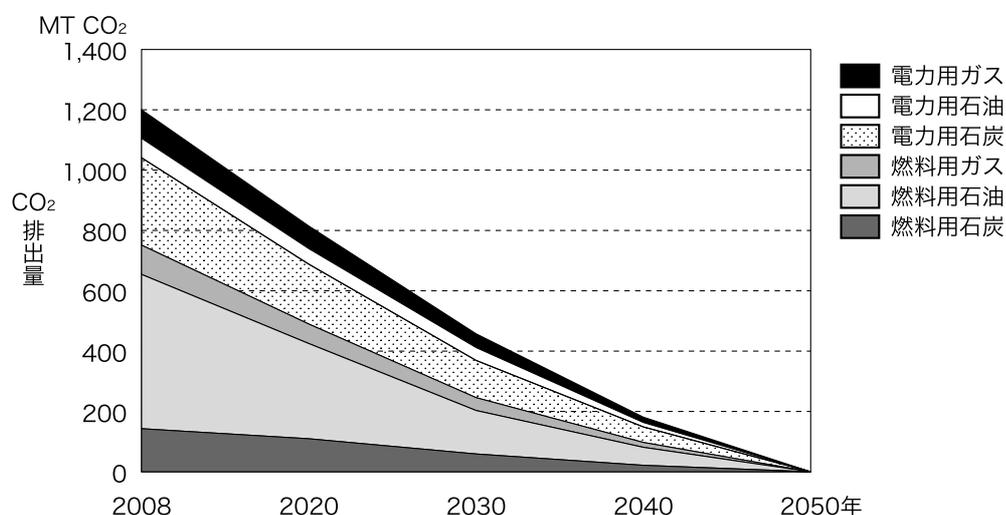
ケース②の条件で、2050年のエネルギー供給を行うことにより、電力と燃料の双方を自然エネルギーから供給することができる。もちろん、すでに述べたように、燃料に対しては、このほかに太陽熱、バイオマスからの供給を行う。

## 第5章 CO<sub>2</sub>排出量

WWFシナリオのCO<sub>2</sub>排出量をまとめると以下のようなになった。

図5-1には、化石燃料別のCO<sub>2</sub>排出を示している。

図5-1 CO<sub>2</sub>排出量（2008～2050年）（100万トンCO<sub>2</sub>）



BAUとの比較を示すと以下のようなになる。

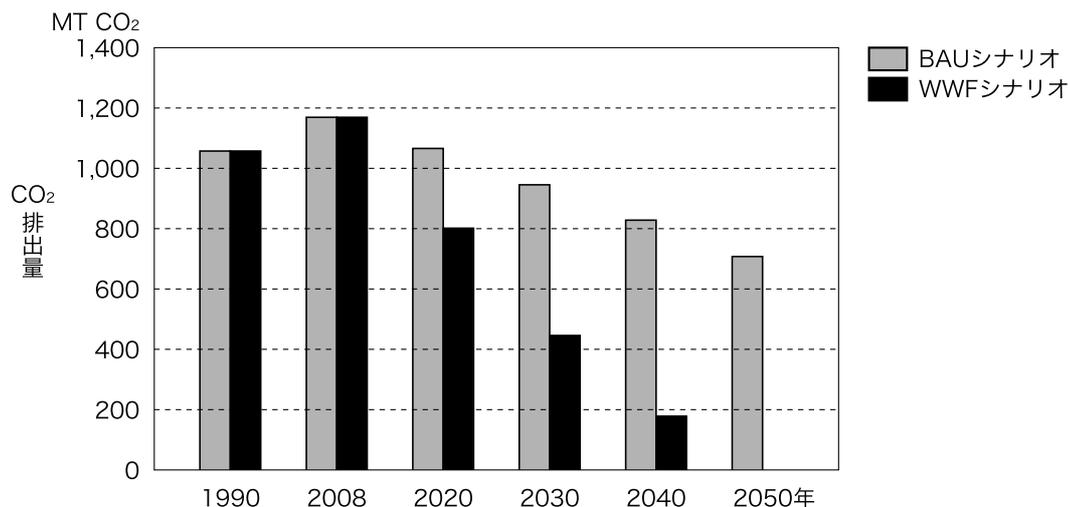
表5-1 CO<sub>2</sub>排出量のBAUとの比較（MTCO<sub>2</sub>）

CO <sub>2</sub> (MTCO <sub>2</sub> )	1990	2008	2020	2030	2040	2050
BAUシナリオ	1,059	1,168	1,067	946	829	712
WWFシナリオ	1,059	1,168	797	447	179	0
1990年比 (%)	100.0	110.3	75.2	42.2	16.9	0.0

合計CO<sub>2</sub>排出量は、2008年には11億6800万トンCO<sub>2</sub>である。WWFシナリオでは2020年には7億9700万トンであり、1990年の10億5900万トンCO<sub>2</sub>に対しては、75.2%になる。1990年比では、2030年には42.2%に、2040年には16.9%に減少し、2050年には自然エネルギー100%になるため、CO<sub>2</sub>排出量はゼロになる。

ただし、鉄鋼業の石炭を水素で代替することに関して未知の点があるため、石炭利用が

図 5 - 2 CO<sub>2</sub>排出量のBAUとの比較 (MTCO<sub>2</sub>)



残り、全体として5%ほどCO<sub>2</sub>が残る可能性がある。

なお、WWFシナリオを実現し、以上のようなCO<sub>2</sub>の削減を行うためには、以下の各項が必要である。

- 1) 高効率照明、断熱住宅、インバータ制御モータ、ヒートポンプ、TV会議、その他の効率向上技術の広範な普及を政策的に支援すること
- 2) 太陽光発電、風力発電、小水力発電、地熱発電、バイオマス利用に対する固定価格買い取り制度、さらに関連する地域に根差した活動を支援すること
- 3) ITと結びついた全国を一元化する送電網システムの建設。地域レベルでは、省エネルギー管理と自然エネルギーの供給・蓄電を結びつけるスマートグリッド。送電網と結びついたエネルギー需要管理システム、EV・FCV充電支援システムなどの建設を進展させること

(以上)

## 参考文献

- 1) 環境省 (2011) 『平成22年度 再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査』
- 2) WWF International/Ecofys (2011) *The Energy Report: 100% Renewable Energy by 2050* (本報告では、WWF グローバルエネルギー報告と記述した)
- 3) 日本建築学会 (2005) 『拡張アメダス気象データ 1981-2000』 日本建築学会
- 4) 経済産業省 (2011) 「平成21年度電力需給の概要」
- 5) 日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット/編 (2011) 『エネルギー・経済統計要覧』 省エネルギーセンター
- 6) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) ・新エネルギー技術開発部 (2009) 「太陽光発電ロードマップ (PV2030+)」 (「2030年に向けた太陽光発電ロードマップ (PV2030) に関する見直し検討委員会」報告書)
- 7) 池上貴志 他 (2008) 『わが国における自然/分散型エネルギー導入戦略への提言』 地球環境センター/国立環境研究所
- 8) 日本太陽エネルギー学会 (1985) 『太陽エネルギーハンドブック』
- 9) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) (2005) 「風力発電導入ハンドブック」
- 10) 総合資源エネルギー調査会需給部会 (2010) 「2030年のエネルギー需給展望」 経済産業省資源エネルギー庁
- 11) 西岡秀三/編著 (2008) 『日本低炭素社会のシナリオ：二酸化炭素70%削減の道筋』 日刊工業新聞社
- 13) 槌屋治紀 (1999) 「新エネルギーコストの学習曲線による分析」 『太陽エネルギー』 (日本太陽エネルギー学会誌) 25 (6) : 37-41
- 14) 槌屋治紀 (2006) 「ソーラーアシスト・ビークルの設計」 『太陽エネルギー』 (日本太陽エネルギー学会誌) 22 (3) : 57-62
- 15) 槌屋治紀 (2011) 「日本における再生可能エネルギーによる電力供給法」 『太陽エネルギー』 (日本太陽エネルギー学会誌) 37 (6) : 掲載予定

## 参考資料

### 1) 鉄鋼産業のエネルギー需要

鉄鋼生産のエネルギー原単位について見直しを行った。

2008年の原単位は、以下ようになる。

表 参 1 - 1 鉄鋼業のエネルギー原単位

2008年	原単位 (GJ/ton)				合計	電炉比24.4%	電力		燃料		エネルギー合計	
	高炉/電炉工程		圧延以後工程				鉄鋼生産量	TJ	1000TOE	TJ	1000TOE	TJ
	電力	燃料	電力	燃料	万トン							
高炉・転炉鋼	0	14.13	2.17	1.581	17.881	7,976	173,079	4,134	1,253,109	29,929	1,426,189	34,062
電炉鋼	2.33	0	2.17	1.581	6.081	2,574	115,830	2,766	40,695	972	156,525	3,738
合計						10,550	288,909	6,900	1,293,804	30,901	1,582,714	37,801

将来の鉄鋼業のエネルギー需要について、WWFグローバルエネルギー報告では、2050年にはOECD諸国ではリサイクルの割合が70%になるとしている。

これを参考にして表 参 1 - 2 のようなエネルギー消費構成を作成した。

表 参 1 - 2 鉄鋼業のエネルギー消費構成

単位	2008年			2020年			2030年			2050年		
	原単位	鉄鋼生産	エネルギー	原単位	鉄鋼生産	エネルギー	原単位	鉄鋼生産	エネルギー	原単位	鉄鋼生産	エネルギー
	GJ/トン	万トン	1000TOE	GJ/トン	万トン	1000TOE	GJ/トン	万トン	1000TOE	GJ/トン	万トン	1000TOE
鉄鋼生産量		10,550			11,458			10,595			8,870	
電炉比 (%)		24.4			35			50			70	
高炉・転炉鋼		7,976			7,448			5,298			2,661	
電力	2.17		4,134	1.93		3,429	1.69		2,132	1.20		763
燃料	15.71		29,928	14.53		25,851	13.36		16,898	11.00		6,991
電炉鋼		2,574			4,010			5,298			6,209	
電力	4.50		2,767	3.94		3,771	3.38		4,270	2.25		3,337
燃料	1.58		972	1.54		1,471	1.49		1,886	1.40		2,076
合計(高炉・転炉+電炉)	15.00		37,800	12.62		34,522	9.95		25,186	6.22		13,166
電力	2.74		6,900	2.63		7,200	2.53		6,402	1.94		4,099
燃料	12.26		30,900	9.98		27,322	7.42		18,784	4.28		9,067

## 2) 地熱発電のポテンシャルに対する考え方

### 環境省ポテンシャル報告書の考え方の整理

環境省のポテンシャル調査(『平成22年度 再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査』)は下記のような推計を行っている。<sup>(1)</sup> 以下は抜粋(強調は筆者)。

賦存量の推計により作成された各温度区分の賦存量分布図にGIS上で各種社会条件を重ね合わせ、地熱発電施設が設置可能な面積を求め、発電コストを考慮しない全体の導入ポテンシャル(kW)を算定する。53~120℃の地熱資源賦存量に対しては「法規制等区分」と「土地利用区分」、120~150℃および150℃以上の地熱資源賦存量に対しては「法規制等区分」、「居住地からの距離」、「土地利用区分」、「都市計画区分」をそれぞれ導入ポテンシャルの算定条件として設定する。開発不可条件を表6-3~4に示す。120~150℃および150℃以上の地熱資源における導入ポテンシャルの算定では、「土地利用区分における建物用地」、「居住地からの距離が100m未満の地域」、「都市計画区分における市街化区域」を開発不可条件として設定している。これは、120℃以上の地熱資源開発は通常居住地から遠い場所で行われることを考慮しているためである。一方、53~120℃の地熱資源開発には温泉を活用するものが含まれ、居住地の近傍で行われても問題がほとんど無いと考えられるため、これらは開発不可条件から除外している。(p.211)

ポイントとなるのは次の2つの表である。

表 参 2 - 1 120℃以上(150℃以上および120~150℃)における開発不可条件

区分	項目	平成22年度調査における開発不可条件	参考：平成 21年度調査
社会条件 (法規制等)	法規制区分	以下の区域の外縁部から1.5km以上離れた内側地域 1) 国立・国定公園(特別保護地区、第1種特別地域、第2種特別地域、第3種特別地域) 2) 都道府県立自然公園(第1種特別地域、第2種特別地域、第3種特別地域) 3) 原生自然環境保全地域 4) 自然環境保全地域 5) 鳥獣保護区のうち特別保護地区(国指定、都道府県指定) 6) 世界自然遺産地域	以下に該当する区域 1) 国立・国定公園(特別保護地区、第1種特別地域、第2種特別地域、第3種特別地域) 2) 原生自然環境保全地域 3) 自然環境保全地域 4) 国指定鳥獣保護区 5) 世界自然遺産地域
社会条件 (土地利用等)	土地利用区分	7. 建物用地、9. 幹線交通用地、A. その他の用地、B. 河川地及び湖沼、F. 海水域	同左
	居住地からの距離	100m未満	同左
	都市計画区分	市街化区域	考慮せず

(出所) 環境省ポテンシャル調査 (p.212)

表 参 2 - 2 53～120℃における開発不可条件

区分	項目	平成22年度調査における開発不可条件	参考：平成 21年度調査
社会条件 (法規制等)	法規制区分	以下の区域の外縁部から1.5km以上離れた内側地域 1) 国立・国定公園（特別保護地区、第1種特別地域） 2) 都道府県立自然公園（第1種特別地域） 3) 原生自然環境保全地域 4) 自然環境保全地域 5) 鳥獣保護区のうち特別保護地区(国指定、都道府県指定) 6) 世界自然遺産地域	以下に該当する区域 1) 国立・国定公園（特別保護地区、第1種特別地域） 2) 原生自然環境保全地域 3) 自然環境保全地域 4) 国指定鳥獣保護区 5) 世界自然遺産地域
社会条件 (土地利用等)	土地利用区分	9. 幹線交通用地、A. その他の用地、B. 河川地及び湖沼、F. 海水域	同左
	居住地からの距離	考慮せず	同左
	都市計画区分	考慮せず	同左

(出所) 環境省ポテンシャル調査 (p.212)

平成21年度調査・平成22年度調査ともに、「法規制区分」において、国立・国定公園や都道府県の自然公園等は全て開発不可条件に入っている。したがって、環境省のポテンシャル調査では、国立公園等の中の資源量は想定されていない。

平成21年度調査と平成22年度調査の違いは、「外縁部から1.5km離れた内側地域」が含まれているかどうか。これは、いわゆる国立公園外から内の地中へ向けての「斜め掘り」が2010年（平成22年）に認められるようになったことを反映されたことによる。

## WWFとしての考え方

1つ目の分かれ目は、国立公園等内部を対象とするか、しないか。国立公園等を、対象外とするのであれば、上記のポテンシャルの数字をそのまま使うことになる。

2つ目の分かれ目は、国立公園内の資源開発を認めない場合、「斜め掘り」も認めるのか、認めないのか。認めるのであれば、平成22年度調査の数字を使用し、認めないのであれば平成21年度調査の数字を使用することになる。

1つ目の分かれ目については、WWFとしては、自然保護の観点および保守的にポテンシャルを見積もる観点から、国立公園等の内部での資源開発すべてを対象外とした数字を検討する。

2つ目の分かれ目については、斜め掘りによる明確な被害例や深刻な影響例はこれまで報告されていないので、懸念される事例があがってこない限りにおいては、認める。

表 参 2 - 3 温度区分別の導入ポテンシャル（全国）

温度区分	導入ポテンシャル (万kW)	参考データ		
		賦存量 (万kW)	平成21年度調査における 導入ポテンシャル(万kW)	H22/H21の比率
150℃以上	636 (賦存量の27.0%)	2,357	220	288%
120～150℃	33 (賦存量の30.6%)	108	20	160%
53～120℃	751 (賦存量の88.5%)	849	742	105%
合計	1,419 (賦存量の42.8%)	3,314	982	148%

(出所) 環境省ポテンシャル調査 (p.222)

したがって、以下の表でいうところの、「導入ポテンシャル」の「合計」、つまり1419万kWを使用するものとする。

ただし、建設可の地域に建設する場合においても、環境影響評価を計画段階から行うことなどを確保した上で実施するものと想定する。

### 3) 原子力発電の想定

原子力発電所については、以下の原則に沿って運転停止・廃炉にしていくものとする。

- 1) 新規の原子力発電所は、(着工中のものも含めて) 建設しない。  
既存の発電所については運転開始から30年経ったものから順次運転停止し、廃炉にしていく。
- 2) ただし、既存の発電所のうち、安全性のリスクが高いと考えられるもの(地震・津波のリスクや福島第一と同じ格納容器形式など)については、2012年の時点で停止し、廃炉工程を開始する。
- 3) また、立地地域および周辺地域の住民から反対の意志が表明されているものについても、早期に停止・廃炉にしていく。
- 4) さらに、今後、省エネルギーや自然エネルギーの普及スピードが早くなる場合は、停止・廃炉時期を早める。

現状では、最初の2つの条件のみが数字化できるため、シナリオでは、以下の原発を「30年」にかかわらず早期停止させることを最低限のラインとして計算する。

- ・女川：1号
- ・福島第一：全基
- ・福島第二：全基
- ・浜岡：全基

- ・東海第二
- ・島根：1号
- ・伊方：全基
- ・敦賀：1号

なお、現時点で事故や定期検査等によって停止している原発の再稼働については、

- 1) 福島第一原子力発電所事故を踏まえた安全基準の再確認や津波対策等の措置が完了していること、
  - 2) 立地地域および周辺地域の住民の同意が得られること、
  - 3) 安全基準作成については、IAEAが原発の安全強化に向けて作成する行動計画などに準拠する国際的な基準を満たし、完了に際しては専門家の相互評価など国際的な評価を仰ぐこと、
- という条件が満たされない限り、再稼働させるべきではない。

**表 参 3 - 1 WWFが想定する原子力発電の規模**

年	実働設備容量 (MW)	発電量 (TWh)
2010	48,847	278
2011	4,4151	251
2020	15,619	89
2030	4,043	23
2040	0	0
2050	0	0

(発電量は設備利用率65%で計算した)

**表 参 3 - 2 原子力発電所の想定**

	2010	2011	2020	2030	2040	2050
残存原子力発電所						
基数	54	48	15	4	0	0
残存設備容量 (1000kW)	48,847	44,151	15,619	4,043	0	0
設備利用率65%を仮定した場合の発電量 (TWh)	278	251	89	23	0	0
一次エネルギー換算値 (PJ)	2,451	2,215	784	203	0	0
運転停止済みの原子力発電所						
基数	0	6	39	50	54	54
運転停止済みの設備容量 (1000kWh)	0	4,696	33,228	44,804	48,847	48,847
設備利用率65%を仮定した場合の発電量 (TWh)	0	27	189	255	278	278
一次エネルギー換算値 (PJ)	0	236	1,667	2,248	2,451	2,451

## 4) 太陽光発電と学習曲線

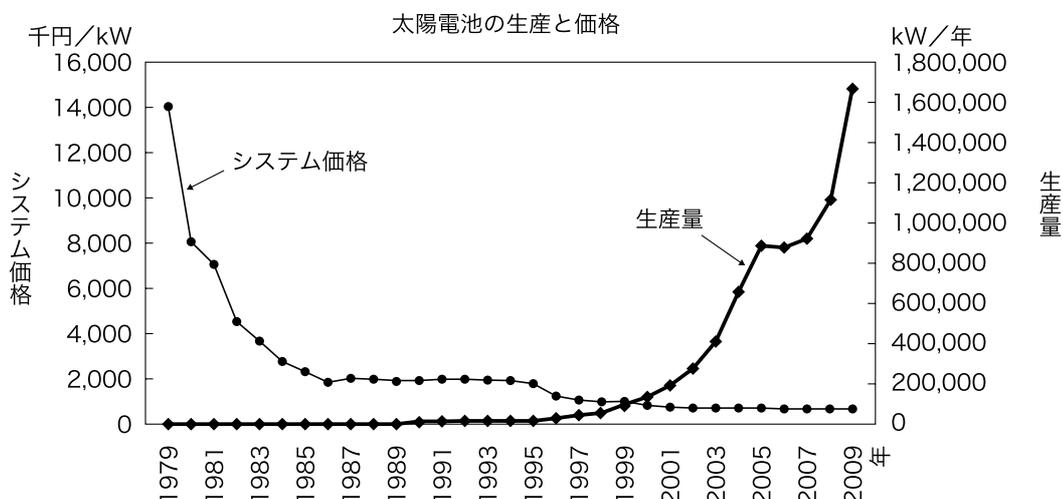
太陽光発電について、将来のコスト低下の可能性を検討する。

太陽光発電パネル価格は、90年代にシステム価格が低下したが、2003年ころから1kWあたり65万円の水準に高止まりしている。最近海外製品に押されてか価格の低下が始まっている。現状における太陽光発電パネルのコスト構成は、1kWの65万円のうち、おおよそ、パネルとコントローラが45万円、販売施工費が20万円程度である。

太陽電池についての学習曲線による分析を行った。1979～2009の期間に累積生産量が2倍になるとき、コストがおおよそ82%に低下している。1990年と2000年にも同様の分析を行っているが、同様の結論を得ている。<sup>(13)</sup>

1979年から2009年までの生産量とシステム価格は図参4-1のようになる。生産量には、国内出荷分と輸出品も含まれている。(生産量は太陽光発電協会、価格はシステム技術研究所調べ)

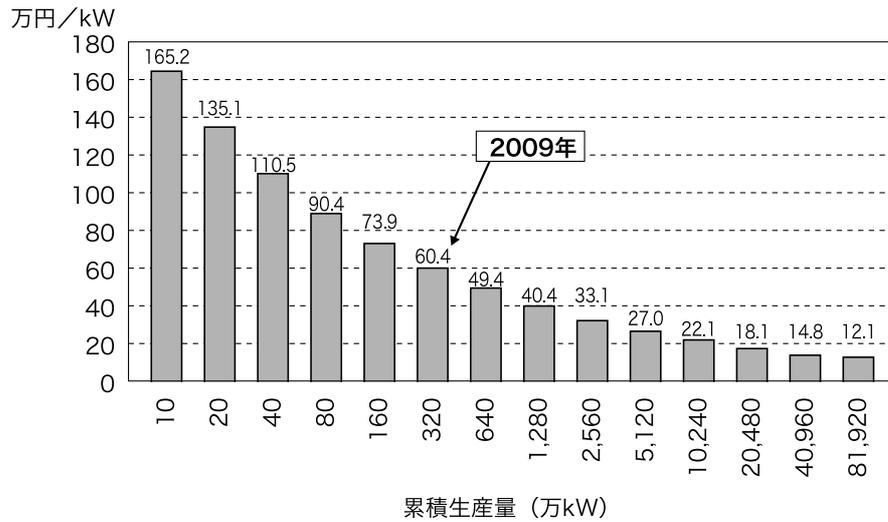
図参4-1 太陽光発電システム価格と生産量



この学習曲線を利用して現在の傾向を将来に延長すると、太陽電池の将来の予想コストは、累積生産量が2倍になるときに、図参4-2のようになる。

2020年ごろには、既存の住宅用電力価格に競合できるようになり、さらにコスト低下が進展するものと予想される。

図 参 4 - 2 学習曲線による太陽光発電コストの経過と予想（2009年までは過去の経過）



## 5) バイオマスの扱いについて

本報告書では、グローバルエネルギー報告に倣い、表 参 5 - 1 のような基準・指標によって、バイオマスは選別を行うことを想定している。しかし、1) 現時点では日本におけるバイオマス利用の絶対量が極めて小さいこと、2) 統計・データにおいて、この選別を

表 参 5 - 1 バイオエネルギーのための持続可能性指標

基準項目	小項目	持続可能性基準項目が対処されていることを保証するための指標
土地利用と食糧安全保障	現在の土地利用	現在、森林／保護地域／農業用地である土地の除外
	農業用水利用	天水農業に適さない地域の除外
	生物多様性保全	部分的に「現在の土地利用」に含まれる加えて、生物多様性価値の高い土地を除外
	人間開発	部分的に「現在の土地利用」に含まれる加えて、人間開発のための土地を除外
農業・生産インプット	生産における水利用	バイオ燃料生産における水の循環利用
	栄養分の農業利用	持続可能なエネルギー／原料を用いた窒素肥料の生産 リン酸／カリウム肥料の使用（循環利用）
補間伐採 (complementary fellings)	追加的な森林成長の持続可能な利用	保護地域／アクセスの困難な地域／未攪乱林の除外 市場価値を有さない植物種の除外 産業用途に必要な森林資源の除外
	伝統的バイオマスの中で、持続可能な利用ができる部分のみを使用	現在使われている、伝統的バイオマスの70%を除外
残渣・廃棄物	残渣の利用可能性	存在しない残渣の除外
	持続可能な廃棄物利用	追加的なリサイクル 再生不能資源から生じた廃棄物の除外

(出所) WWF/Ecofys (2011) <sup>(2)</sup>

行うことが困難であること、という2つの理由により、実際のバイオマス利用可能量試算過程において、持続可能性からの制限を課すことはできていない。

バイオマスの最大限の活用をしつつ、過度に輸入バイオマスに頼らないことを原則として（輸入バイオマス量を個別に想定していない）、試算を行った。

## 6) ダイナミック・シミュレーションの方法

エネルギー需要と自然エネルギーの規模を設定したら、1年間のシミュレーションを実行する。その計算は、1時間ごとのエネルギー需要に対して以下の順序で供給を計算する。各変数は、1時間ごとの電力量（MWh）で表す。<sup>(15)</sup>

D：電力需要、P：太陽光発電量、W：風力発電量、H：水力発電量、G：地熱発電量、BM：バイオマス発電量、Bi：揚水発電またはバッテリーの充電量、Bo：揚水発電またはバッテリーの放電量、BL：揚水発電損失またはバッテリー充放電損失、BP：バックアップ電力量、EX：余剰電力量

1時間ごとの電力需要（D）は、毎月の電力需要を1日の1時間ごとの需要パターンに配分して作成した。

なお電力貯蔵には、放電時・充電時ともに既存の揚水発電を優先して使用し、次に付加してゆくバッテリーを利用するものとした。

1) 電力需要が与えられると、まず一定出力の安定電源である地熱とバイオマスを供給する。

$D = D - G - BM$  この新しいDに対して次の計算を行う（以下同様）

2) 次に水力発電を供給する

$D = D - H$

水力発電は出力調整が比較的容易なため、時刻ごとにあらかじめ定められたパターンで供給するものとした。ここでは、太陽光からの供給の減少による不足分に対応するため、午後4時にピークがあるパターンを与えている。

3) 次のステップは太陽光（P）と風力（W）の発電量と電力需要の大きさにより分岐する

$D > (P + W)$ （電力需要が発電量より大きいとき）

$D = D - (P + W)$

さらにバイオマスで供給する。

$D = D - BM$

もしこれでまだ電力需要があるときは、揚水発電またはバッテリー放電により供給する。

$D = D - Bo$

まだ電力需要があるときには、バックアップ電力から供給する

$$BP=D$$

4)  $D < (P+W)$  のときには、まず揚水発電またはバッテリーに充電する

$$Bi=P+W-D$$

もしバッテリーがフル充電になったら、残りの電力はEXとする

$$EX=(P+W)-D-Bi$$

5) 以下の式でバランスをチェックする。

$$EX=P+W+H+G+BM+BP+Bo-D-Bi-BL$$

以上の操作を1時間ごとに繰り返す。

1年間のシミュレーションは、気象データの4月1日にスタートして、翌年の3月末日に終了する。ただし、気象データは同じ年のデータを使用している。

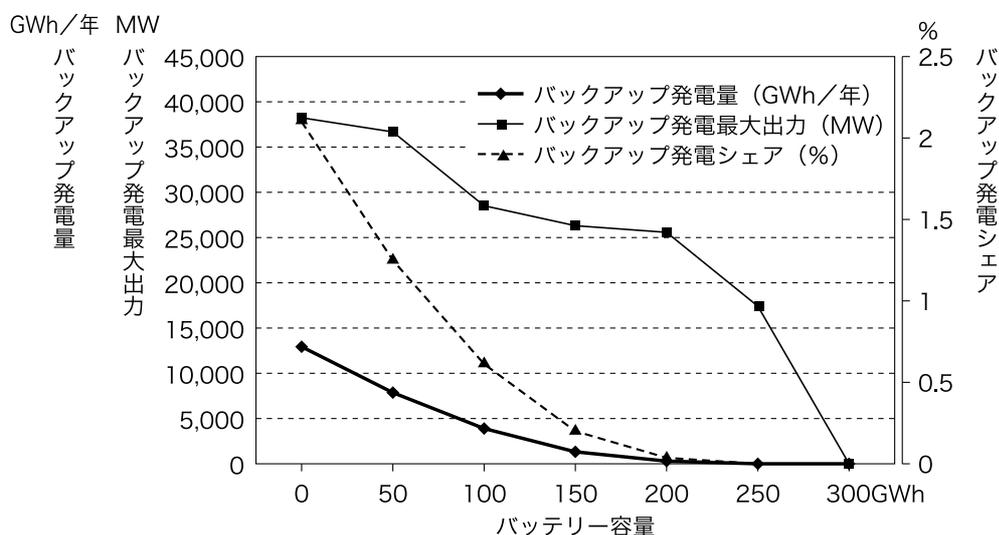
## 7) 電力貯蔵システムとバックアップ電力

電力貯蔵システムとしては、既存の揚水発電とバッテリーがある。既存の揚水発電113 GWhを固定しておき、これにバッテリー容量を追加した場合の、電力需要に対するバックアップ電力の割合(%)の変化を検討した。

表 参7-1 バッテリー容量の変化によるバックアップ電力の大きさ

バッテリー容量	GWh	0	50	100	150	200	250	300
バックアップ発電量	GWh/年	13,102	7,852	3,848	1,223	205	29	0
バックアップ発電シェア	%	2.09	1.25	0.61	0.19	0.03	0	0
バックアップ発電最大出力	MW	38,120	36,586	28,474	26,158	25,444	17,344	0

図 参7-1 バックアップ発電の大きさ



太陽光84%、風力42%の設定のとき、ケース②の計算の場合、バッテリー容量をゼロから、50GWh ずつ増加させると、図 参 7-1 のように、バックアップ発電量は低下してゆく。バッテリー容量が300GWhになると、バックアップ発電量はゼロになる。

バッテリー容量を300GWhより大きくしても効果はないことがわかった。現実的な電力貯蔵規模はこの付近にあると考えられる。

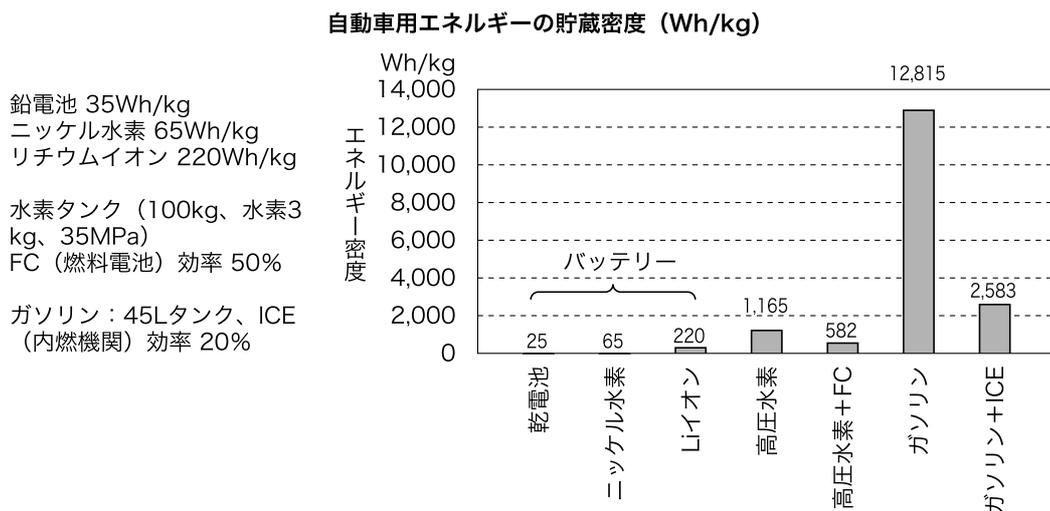
## 8) 自動車技術

### 8-1) 電気自動車

電気自動車用のバッテリーとして、リチウムイオン電池の重量あたりエネルギー密度が高くなってきたため、電気自動車の実現への期待が高まっている。しかし、現状のエネルギー密度では一充電走行距離は200km以下である。エネルギー密度を上げてゆくと、単位時間に発生する出力 (kgあたりkW) が減少することが知られている。自動車用の電池に適切な対応策か可能かは未知である。

EVが1 km走行するのに必要な電力は、100~160Whである。200Wh/kgのエネルギー密度で、100km走行するには、10kWh~16kWh (重量50~80kg)、200km走行するには20kWh~32kWh (重量100~160kg) が必要である。エアコンや暖房用のエネルギー消費を加えると、この重量はさらに大きくなる。

図 参 8-1 質量あたりエネルギー密度 (ガソリン：バッテリー：水素)



リチウムイオンバッテリー：圧縮水素：ガソリンは、1：5：50の密度比である。効率を考慮してリチウムイオン：燃料電池効率を含めた水素：エンジン効率20%を含めたガソリンの比は、1：2.5：12である。リチウムイオンバッテリーは高密度化し、220Wh/kgになっている。しかし、まだバッテリーが重く、長距離走行は難しく、充電時間が長い。

最近、リチウムイオン電池では、220Wh/kgが実現されている。図 参7-1には、自動車用のエネルギー（バッテリー、圧縮水素、ガソリン）の質量あたり密度の比較を示している。利用効率を考慮しても液体燃料のガソリンのエネルギー密度は非常に大きい。

このため、電気自動車（EV）で高速道路を長距離走行することには、不安が残っている。EVのもうひとつの問題は、充電時間が長いことである。

最近ではEVへの関心が高まったため、燃料電池車（FCV）については相対的に期待が低下している。しかし、燃料の水素は高压タンクに入れた状態で、バッテリーより大きな質量あたりエネルギー密度をもち、一充電走行距離は400～500kmが可能である。すでにFCVの技術的な問題の多くはクリアされているが、燃料電池に使用する触媒のプラチナ量の低減と、燃料である水素供給インフラ建設、コストの低下が課題である。

## 8-2) ソーラーアシストカー（車上太陽光発電）

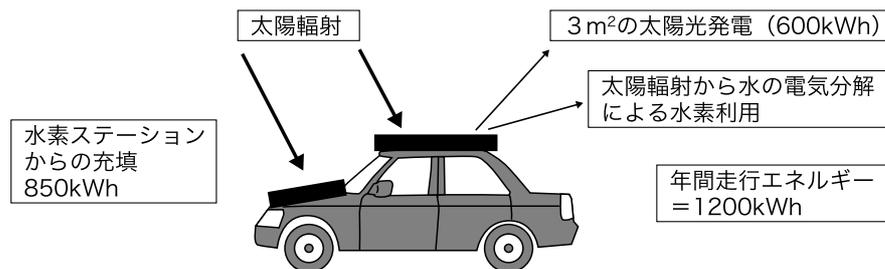
将来の自動車の多くは、電気自動車であれ、燃料電池車であれ、効率の高い電気モーターを利用し、ブレーキから電力を回収するもので、電池をもつ電気駆動のものになる。

そこで、自動車のルーフトップに太陽光発電パネルを取り付ければ、走行中あるいは駐車中に発電した電力を走行に使用することができる。平均的な乗用車のルーフトップとボンネットの面積は、2～3m<sup>2</sup>あり、パネルの発電効率20%太陽電池を取り付けると、400～600Wの容量にすることができる。このパネルの発電量は、年間400～600kWhである。

乗用車の年間走行距離は、平均すると1万kmであり、1kmあたり120～150Whの燃費とすると年間走行用電力は1200～1500kWh程度である。すると25～50%のエネルギーを車上太陽光発電から得ることができる。<sup>(14)</sup>

### 図 参8-2 ソーラーアシスト・カー

- ・燃料電池車、電気自動車、ガソリンハイブリッド車に太陽電池を搭載
- ・捕獲した電力をバッテリーに貯蔵または水電解により圧縮タンクに貯蔵して利用
- ・太陽電池600W（3m<sup>2</sup>、効率20%）により捕獲できる電力=600kWh/年
- ・バッテリーへ200kWh/年を充電し
- ・燃料電池車の場合には、水電解してサブタンクへ水素を貯蔵し、燃料電池で発電=150kWh/年
- ・年間の太陽依存率=20～30%が可能



2050年ころには、太陽電池の発電効率は25%以上になることが期待できるので、太陽依存率はさらに大きくできそうである。

## 9) 燃料需要の詳細と供給構成

燃料需要の各最終用途の構成割合については、EDMCエネルギー統計要覧を参照して配分している。さらに、燃料需要については、石炭、石油、ガスの供給が、将来は、太陽(太陽熱と車上太陽光)、バイオマス、水素、電力化(ヒートポンプと電気自動車)に転換してゆくときの供給構成を検討した。その転換の様子は、2020年以降の自然エネルギーなどの配分割合(%)によって示している。

表 参 9 - 1 エネルギー需要（電力と燃料）2008～2020年

単位：1000TOE	2008年	2008電力	2008燃料	2020年	2020電力	2020燃料
産業部門計（BAU）	155,988	36,500	119,488	166,309	38,915	127,394
産業部門計（WWF）	155,988	36,500	119,488	136,668	33,237	103,431
非製造業	9,123	613	8,510	8,336	560	7,776
製造業	146,865	35,887	110,978	128,332	32,677	95,655
素材系	103,928	16,776	87,152	91,220	15,587	75,633
鉄鋼	37,801	6,900	30,901	34,522	7,200	27,322
化学	48,056	5,297	42,759	42,609	4,697	37,913
窯業・土石	9,604	1,789	7,815	6,649	1,239	5,411
紙パルプ	8,467	2,790	5,677	7,440	2,451	4,988
非素材系	42,937	19,111	23,826	37,112	17,090	20,022
食品・タバコ	5,827	2,642	3,185	4,596	2,084	2,512
繊維	2,073	541	1,532	1,635	427	1,208
非鉄金属	3,377	1,802	1,575	2,992	1,597	1,395
金属機械	10,656	8,039	2,617	10,548	7,957	2,590
その他	21,004	6,087	14,917	17,341	5,025	12,315
民生部門計（BAU）	92,117	48,156	43,961	101,780	53,207	48,573
民生部門計（WWF）	92,117	48,156	43,961	68,759	36,049	32,710
家庭計（BAU）	51,902	24,529	27,373	54,957	25,973	28,984
家庭計（WWF）	51,902	24,529	27,373	37,211	18,888	18,323
冷房	1,132	1,132	0	615	615	0
暖房	12,739	1,826	10,913	6,920	992	5,929
給湯	15,014	1,785	13,229	10,938	1,300	9,638
厨房用	4,267	1,037	3,230	3,641	885	2,757
動力他	18,750	18,750	0	15,097	15,097	0
業務計（BAU）	42,338	23,627	18,711	46,823	26,130	20,693
業務計（WWF）	42,338	23,627	18,711	31,548	17,161	14,387
冷房	5,068	2,089	2,979	3,650	1,505	2,146
暖房	6,765	582	6,183	4,957	426	4,531
給湯	6,451	254	6,197	5,274	208	5,066
厨房用	3,761	408	3,353	2,966	321	2,645
動力他	20,294	20,294	0	14,700	14,700	0
運輸部門計（BAU）	84,255	1,838	82,417	73,707	1,547	72,160
運輸部門計（WWF）	84,255	1,838	82,417	58,271	1,567	56,705
旅客計（BAU）	54,771	1,745	53,026	45,784	1,459	44,325
旅客計（WWF）	54,771	1,745	53,026	35,474	1,477	33,997
自家用乗用車	45,447		45,447	28,414		28,414
営業用乗用車	1,376		1,376	860		860
バス	1,447		1,447	1,141		1,141
鉄道	1,905	1,745	160	1,612	1,477	135
海運	166		166	131		131
航空	4,430		4,430	3,315		3,315
貨物計（BAU）	29,485	93	29,392	27,923	88	27,835
貨物計（WWF）	29,485	93	29,392	22,798	90	22,708
貨物自動車	25,040		25,040	19,110		19,110
鉄道	128	93	35	124	90	34
海運	3,771		3,771	3,113		3,113
航空	546		546	451		451
非エネ	0	0	0	0	0	0
合計（BAU）	334,483	86,494	247,989	341,796	92,564	249,232
合計（WWF）	334,483	86,494	247,989	263,699	70,853	192,846
電力合計（BAU） TWh		1006			1076	
電力合計（WWF） TWh		1006			824	
合計の2008年比（BAU）	1.000	1.000	1.000	1.022	1.070	1.005
合計の2008年比（WWF）	1.000	1.000	1.000	0.788	0.819	0.778

表 参 9 - 2 エネルギー需要（電力と燃料）2030～2050年

単位：1000TOE	2030年計	2030電力	2030燃料	2050年計	2050電力	2050燃料
産業部門計（BAU）	158,732	37,142	121,590	136,499	31,940	104,559
産業部門計（WWF）	118,185	30,792	87,393	87,764	25,415	62,349
非製造業	7,380	496	6,884	5,441	366	5,076
製造業	110,805	30,296	80,509	82,322	25,049	57,273
素材系	76,661	14,082	62,579	52,699	10,056	42,643
鉄鋼	25,186	6,402	18,784	13,166	4,099	9,067
化学	38,483	4,242	34,241	29,460	3,247	26,213
窯業・土石	5,886	1,097	4,790	4,253	792	3,461
紙パルプ	7,106	2,341	4,764	5,820	1,918	3,902
非素材系	34,144	16,214	17,930	29,623	14,993	14,631
食品・タバコ	3,980	1,805	2,176	3,041	1,379	1,662
繊維	1,416	370	1,046	1,082	282	800
非鉄金属	2,697	1,439	1,258	2,148	1,146	1,002
金属機械	10,872	8,202	2,670	11,661	8,797	2,864
その他	15,179	4,399	10,780	11,691	3,388	8,303
民生部門計（BAU）	99,025	51,767	47,258	87,093	45,530	41,563
民生部門計（WWF）	58,307	31,793	26,514	46,854	27,394	19,460
家庭計（BAU）	51,906	24,531	27,375	43,228	20,430	22,798
家庭計（WWF）	30,940	16,849	14,091	24,262	14,901	9,361
冷房	376	376	0	176	176	0
暖房	4,233	607	3,626	1,980	284	1,696
給湯	9,071	1,078	7,993	6,483	771	5,712
厨房用	3,265	793	2,472	2,579	627	1,953
動力他	13,995	13,995	0	13,044	13,044	0
業務計（BAU）	47,120	26,296	20,825	43,805	24,446	19,359
業務計（WWF）	27,367	14,944	12,423	22,592	12,493	10,099
冷房	3,144	1,296	1,848	2,597	1,070	1,526
暖房	4,323	372	3,951	3,649	314	3,335
給湯	4,343	171	4,172	3,102	122	2,980
厨房用	2,749	298	2,451	2,532	274	2,258
動力他	12,807	12,807	0	10,712	10,712	0
運輸部門計（BAU）	64,206	1,299	62,908	46,916	873	46,043
運輸部門計（WWF）	43,824	1,406	42,418	25,820	1,130	24,690
旅客計（BAU）	38,187	1,217	36,971	25,262	805	24,457
旅客計（WWF）	26,511	1,317	25,193	16,624	1,041	15,583
自家用乗用車	20,545		20,545	12,196		12,196
営業用乗用車	622		622	369		369
バス	988		988	755		755
鉄道	1,438	1,317	121	1,136	1,041	95
海運	113		113	87		87
航空	2,803		2,803	2,081		2,081
貨物計（BAU）	26,019	82	25,937	21,654	68	21,586
貨物計（WWF）	17,313	89	17,225	9,196	89	9,107
貨物自動車	14,072		14,072	6,670		6,670
鉄道	122	89	33	122	89	33
海運	2,725		2,725	2,099		2,099
航空	395		395	304		304
非エネ	0	0	0	0	0	0
合計（BAU）	321,965	89,267	232,697	270,448	77,688	192,760
合計（WWF）	220,316	63,991	156,325	160,438	53,938	106,500
電力合計（BAU） TWh		1,038			903	
電力合計（WWF） TWh		744			627	
合計の2008年比（BAU）	0.963	1.032	0.938	0.809	0.898	0.777
合計の2008年比（WWF）	0.659	0.740	0.630	0.480	0.624	0.429

表 参 9 - 3 燃料需要の詳細と供給構成 (2008~2020年)

WWFシナリオ	2008年供給構成				2020年 (構成比)							
	燃料	石炭	石油	ガス	燃料	石炭	石油	ガス	太陽	バイオマス	水素	電力化
単位	1000TOE	1000TOE	1000TOE	1000TOE	1000TOE	%	%	%	%	%	%	
産業部門計	119,488				105,733							
非製造業	8,510	0	8,510	0	7,776	0	85	0		15		
製造業	110,978				97,956							
素材系	87,152				77,935							
鉄鋼	30,901	27,191	1,811	1,899	27,322	85	6	6		3		
化学	42,759	1,640	37,666	3,452	37,913	3	70	7		20		
窯業・土石	7,815	4,943	2,035	837	5,411	40	22	9		29		
紙パルプ	5,677	795	1,696	791	4,988	12	25	12		51		
非素材系	23,826				20,022							
食品・タバコ	3,185	0	676	2,509	2,512	0	18	67		15		
繊維	1,532	27	850	655	1,208	1	47	34		18		
非鉄金属	1,575	233	757	585	1,395	1	40	32		27		
金属機械	2,617	97	305	2,215	2,590	1	10	72		17		
その他	14,917	411	11,427	3,079	12,315	2	45	25	5	23		
民生部門計	43,961				32,710							
家庭計	27,373				18,323							
冷房	0	0	0	0	0							
暖房	10,913	0	8,207	2,706	5,929	0	46	21	20	8		5
給湯	13,229	523	2,826	9,880	9,638	0	13	52	32			3
厨房用	3,230	0	0	3,230	2,757	0	0	85	0	10	0	5
動力他	0	0	0	0	0							
業務計	18,711				14,387							
冷房	2,979	0	282	2,697	2,146	0	7	70	20			3
暖房	6,183	111	4,480	1,592	4,531	0	38	22	30	5		5
給湯	6,197	419	2,993	2,784	5,066	0	30	40	22	5		3
厨房用	3,353	145	0	3,208	2,645	0	0	92	0	0	3	5
動力他	0				0							
運輸部門計	82,417				56,705							
旅客計	53,026				33,997							
自家用乗用車	45,447		45,447		28,414		90		4		1	5
営業用乗用車	1,376		1,376		860		92		2		1	5
バス	1,447		1,447		1,141		99			0	1	
鉄道	160		160		135		95				0	5
海運	166		166		131		99				1	
航空	4,430		4,430		3,315		95			5		
貨物計	29,392				22,708							
貨物自動車	25,040		25,040		19,110		93		1	5	1	
鉄道	35		35		34		95				0	5
海運	3771		3771		3,113		99				1	
航空	546		546		451		90			10		
非エネ	0				0							
合計	245,866	36,536	166,939	42,120	193,315	27,558	104,159	28,398	9,133	20,315	607	1,843

太陽：輸送部門では車上太陽光、そのほかの部門では太陽熱。

水素：燃料用水素への転換

電力化：電気ヒートポンプによる熱供給、運輸部門では電気自動車への転換。

紙パルプ：2008年にバイオマス黒液が42%あり、将来的にはすべてバイオマスで供給。

表 参 9 - 4 燃料需要の詳細と供給構成 (2030~2050年)

WWFシナリオ	2030年供給構成								2050年 (構成比)				
	燃料	石炭	石油	ガス	太陽	バイオマス	水素	電力化	燃料	太陽	バイオマス	水素	電力化
単位	1000TOE	%	%	%	%	%	%	%	1000TOE	%	%	%	%
産業部門計	88,089							0	67,134				
非製造業	6,884	0	50	0	0	50			5,076	20	80		
製造業	81,205								58,057				
素材系	63,275								43,427				
鉄鋼	18,784	74	3	3	0	15	5		9,067		20	80	
化学	34,241	0	50	4	10	29	5	2	26,213	15	70	10	5
窯業・土石	4,790	20	18	5	0	57	0	0	3,461		100	0	0
紙パルプ	4,764	0	15	15	0	70			3,902	20	80		
非素材系	17,930								14,631				
食品・タバコ	2,176	0	5	42	10	40	0	3	1,662	30	60		10
繊維	1,046	0	8	39	10	40	0	3	800	30	60		10
非鉄金属	1,258	0	5	40	5	45	2	3	1,002	20	60	10	10
金属機械	2,670	0	0	55	10	25	5	5	2,864	20	60	10	10
その他	10,780	0	20	30	10	30	5	5	8,303	20	60	10	10
民生部門計	26,514								19,460				
家庭計	14,091								9,361				
冷房	0								0				
暖房	3,626	0	12	12	54	12	0	10	1,696	60	20		20
給湯	7,993	0	10	20	50	10	0	10	5,712	70	10	0	20
厨房用	2,472			50		35	5	10	1,953		60	20	20
動力他	0								0				
業務計	12,423								10,099				
冷房	1,848	0	5	65	20	0		10	1,526	50	0	0	50
暖房	3,951	0	16	24	42	8		10	3,335	60	10	0	30
給湯	4,172	0	10	25	40	20		5	2,980	60	20		20
厨房用	2,451			40		45	5	10	2,258		60	20	20
動力他	0								0				
運輸部門計	42,418								24,690				
旅客計	25,193								15,583				
自家用乗用車	20,545		65		15	0	10	10	12,196	30	0	35	35
営業用乗用車	622		60		8	12	10	10	369	15	25	30	30
バス	988		50			20	30		755		40	60	
鉄道	121		50					20	95			50	50
海運	113		50			35	15		87		70	30	
航空	2,803		60			40			2,081		100		
貨物計	17,225								9,107				
貨物自動車	14,072		45		0	30	12.5	12.5	6,670	0	50	25	25
鉄道	33		50					50	33			100	
海運	2,725		50			40	10		2,099		70	30	
航空	395		60			40			304		100		
非エネ	0								0				
合計	157,021	14,858	48,874	16,902	17,938	39,270	8,110	5,024	107,284	22,183	51,594	19,171	13,552

## 発行元・お問い合わせ先

WWFジャパン 気候変動・エネルギーグループ

Tel : 03-3769-3509 Fax : 03-3769-1717

URL: [http://www.wwf.or.jp/change\\_en/](http://www.wwf.or.jp/change_en/)

Email : [climatechange@wwf.or.jp](mailto:climatechange@wwf.or.jp)

2011年11月発行