

脱炭素社会に向けた 長期シナリオ2017

～パリ協定時代の2050年日本社会像～

WWFジャパン委託研究

2017年2月

株式会社システム技術研究所

著作：株式会社 システム技術研究所

題名：脱炭素社会に向けた長期シナリオ2017

発行者：WWFジャパン（公益財団法人 世界自然保護基金ジャパン）

発行年月：2017年2月

DTPデザイン：荒川俊児

※図のカラーについては『カラーユニバーサルデザイン推奨配色セット』
（<http://jfly.iam.u-tokyo.ac.jp/colorset/>）に準拠しました。

Author: Research Institute for Systems Technology

Title: Long-Term Scenarios for Decarbonizing Japan

Publisher: WWF Japan

Publishing Date: February 2017

Cover Design and Layout: Shunji Arakawa

Copyright 2017 © WWF Japan. All rights reserved.

本報告書の内容に関するお問い合わせ先：

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/>

Email: climatechange@wwf.or.jp

WWFジャパン

脱炭素社会に向けた 長期シナリオ2017

2017年2月16日

株式会社システム技術研究所

内容

脱炭素社会に向けた長期シナリオ	9
第1章 はじめに	10
1.1 本報告の構成	10
1.2 BAUシナリオ	11
第2章 省エネルギーの可能性	15
2.1 家庭部門の省エネルギー	15
2.2 業務部門の省エネルギー	17
2.3 産業部門の省エネルギー	18
2.4 運輸部門の省エネルギー	20
第3章 将来のエネルギー需要	24
3.1 活動指数の変化	24
3.2 各最終用途のエネルギー需要	26
第4章 自然エネルギーの可能性	29
4.1 太陽光発電	29
4.2 風力発電について	31
4.3 バイオマスについて	33
4.4 水力発電	35
4.5 地熱発電	36
4.6 海洋エネルギー	36
4.7 自然エネルギーについてのまとめ	37
第5章 その他ガスについて	38
第6章 WWFシナリオ	40
6.1 ふたつのWWFシナリオの基本的な考え方	40
6.2 ダイナミックシミュレーション	42
6.3 ブリッジシナリオの一次エネルギー供給構成	42
6.4 ブリッジシナリオの電力供給構成	45
6.5 ブリッジシナリオのCO ₂ 排出量	46
6.6 100%自然エネルギーシナリオの一次エネルギー供給構成	47
6.7 100%自然エネルギーシナリオの電力供給構成	49
6.8 100%自然エネルギーシナリオのCO ₂ 排出量	51
6.9 各シナリオの温室効果ガス（GHG）削減率	52

第7章 CO2削減コストの検討	53
7.1 エネルギー価格の将来	53
7.2 太陽光発電システムのコスト低下	54
7.3 削減コストカーブ	56
7.4 削減コストカーブの作成	57
第8章 費用算定	59
8.1 エネルギー価格	59
8.2 費用算定の方法	59
8.3 省エネルギー費用	60
8.4 自然エネルギーの費用	60
8.5 費用算定のまとめ	60
第9章 なぜ政府シナリオより大きく削減できるのか	62
9.1 政府の長期エネルギー需給見通し	62
9.2 WWFシナリオと日本政府の長期エネルギー需給見通しとの比較	63
第10章 WWFジャパンからの提言	65
参考文献	67
参考資料	69
1. 一次エネルギーについて	69
2. CO ₂ 排出係数	70
3. 削減コストカーブの問題点	71
4. 活動指数とエネルギー需要の推定	76
5. 原子力について	78
6. 車上太陽光発電	78
7. ダイナミックシミュレーション	79

本文中の表一覧

表1.1	本報告の構成.....	10
表1.2	BAUシナリオのエネルギー・経済指標.....	12
表1.3	将来の人口.....	12
表1.4	一次エネルギー供給.....	12
表1.5	最終エネルギー需要・供給.....	13
表2.1	冷却水ポンプのインバータによる制御.....	19
表2.2	排気ファンのインバータによる制御.....	19
表2.3	自動車用エネルギー需要の構成と変化要因.....	22
表2.4	自動車の省エネルギー.....	23
表3.1	主要な活動指数の変化（2010～2050）.....	24
表3.2	各最終用途の活動指数と省エネルギー.....	25
表3.3	最終用途エネルギー需要の推定.....	27
表3.4	活動指数の変化と効率向上から計算した将来のエネルギー需要 （100%自然エネルギーシナリオ）.....	28
表4.1	太陽光発電導入見込み量.....	29
表4.2	太陽光発電の導入ポテンシャル.....	29
表4.3	JPEAの太陽光発電見込み量.....	30
表4.4	風力発電導入ポテンシャル調査.....	31
表4.5	風力発電導入見込み量.....	31
表4.6	日本の風力発電将来ビジョン.....	32
表4.7	バイオマス事業化戦略2012年度（農林水産省）.....	33
表4.8	バイオマス発電導入見込み量.....	33
表4.9	バイオマス熱利用の導入見込み量.....	33
表4.10	日本におけるバイオマス資源の利用可能量.....	34
表4.11	水力発電の導入見込み量.....	35
表4.12	包蔵水力調査.....	35
表4.13	地熱発電の導入見込み量.....	36
表4.14	海洋エネルギーのポテンシャル.....	36
表4.15	日本の自然エネルギーの実績、ポテンシャル、WWFシナリオの導入見込み量.....	37
表5.1	その他ガスのCO ₂ 換算値.....	38
表5.2	その他のガスを含めた温室効果ガスのCO ₂ 換算排出量.....	39
表6.1	最終用途エネルギー需要の変化.....	41

表6.2	ブリッジシナリオにおける化石燃料とCO ₂ 排出量	43
表6.3	ブリッジシナリオの一次エネルギー供給構成	43
表6.4	ブリッジシナリオの電力供給構成	45
表6.5	ブリッジシナリオの電力供給容量と発電量 (2050年)	46
表6.6	ブリッジシナリオの電力供給、蓄電量、余剰電力 (2050年)	46
表6.7	ブリッジシナリオのCO ₂ 排出量	47
表6.8	100%自然エネルギーシナリオの一次エネルギー供給構成	48
表6.9	100%自然エネルギーシナリオの電力供給構成	49
表6.10	100%自然エネルギーシナリオの電力供給容量と発電量 (2050年)	50
表6.11	100%自然エネルギーシナリオの電力供給、蓄電量、余剰電力 (2050年)	50
表6.12	100%自然エネルギーシナリオのCO ₂ 排出量	51
表6.13	各シナリオのGHG排出量とGHG削減率	52
表7.1	代表的な石油価格の予測 (単位:ドル/バレル)	53
表7.2	CO ₂ 削減コストカーブの概要 (回収年数3年)	58
表8.1	省エネルギーと自然エネルギー設備投資・運転費用・正味費用	61
表9.1	自然エネルギー供給量についての見通しの比較 (2030年)	64
表A-1	自然エネルギーによる発電と熱利用に関する一次エネルギーの計算方法	69
表A-2	10電力会社のCO ₂ 排出係数	70
表A-3	活動指数のみが変化したケースの最終用途エネルギー需要 (2010 ~ 2050)	76
表A-4	ブリッジシナリオの最終用途エネルギー需要の推定 (2010 ~ 2050)	77

本文中の図一覧

図1.1	一次エネルギー供給構成	13
図1.2	最終エネルギー消費構成	14
図1.3	最終エネルギー供給構成図	14
図1.4	CO ₂ 排出量	14
図2.1	産業用モータの推定台数の割合 (合計1億台)	18
図2.2	インバータ制御の導入効果 (年間電力消費量)	19
図2.3	自動車用の台数比とエネルギー効率の変化	22
図2.4	将来の自動車用台数 (乗用車+貨物車)	22
図3.1	最終用途エネルギー需要の推移 (100%自然エネルギーシナリオ)	27
図4.1	太陽光発電の導入ポテンシャル	29
図5.1	その他ガスの試算例	38

図6.1	最終用途エネルギー需要の変化.....	41
図6.2	ブリッジシナリオの一次エネルギー供給構成（2030年）.....	44
図6.3	ブリッジシナリオの一次エネルギー供給構成（2050年）.....	44
図6.4	ブリッジシナリオの一次エネルギー供給構成遷移図.....	44
図6.5	ブリッジシナリオの電力供給構成遷移図.....	45
図6.6	ブリッジシナリオのCO ₂ 排出量.....	47
図6.7	100%シナリオの全エネルギー供給構成（2030年）.....	48
図6.8	100%シナリオの全エネルギー供給構成（2050年）.....	48
図6.9	100%シナリオの一次エネルギー供給遷移図.....	49
図6.10	100%自然エネルギーシナリオの電力供給遷移図.....	50
図6.11	100%自然エネルギーシナリオのCO ₂ 排出量.....	51
図6.12	各シナリオのGHG削減率の推移.....	52
図7.1	想定するエネルギー価格（2010年を100とした場合）.....	54
図7.2	太陽光発電システムの価格と累積導入量（1990～2014年）.....	54
図7.3	太陽光発電システムのコストと太陽電池モジュールの 総出荷量（1998～2015年）.....	55
図7.4	将来の累積総出荷量とPVシステムコストの予測.....	55
図7.5	CO ₂ 削減コストカーブ（回収年数3年）.....	57
図7.6	削減コストカーブ（回収年数：ZEH10年、機器類5年、自然エネルギー10年、 その他3年）.....	57
図9.1	政府の長期エネルギー需給見通し（一次エネルギー）.....	62
図9.2	政府の長期エネルギー需給見通し（電力）.....	63
図A-1	10電力会社のCO ₂ 排出係数.....	70
図A-2	10電力会社の発電量（2015年度）.....	71
図A-3	環境省 削減ポテンシャルと削減コストの精査について 2013.....	73
図A-4	削減コストカーブ（環境省、同上）.....	74
図A-5	削減コストカーブ（環境省、同上）.....	74
図A-6	フォード社が発表したソーラーパネル搭載の電気自動車（2014年）.....	79
図A-7	トヨタが発表したソーラーパネル搭載のプリウスPHV（2016年）.....	79
図A-8	ダイナミックシミュレータの入力と出力.....	79
図A-9	ダイナミックシミュレータの構成.....	80
図A-10	ダイナミックシミュレータの3日間の挙動.....	80
図A-11	太陽光と風力の月別発電量.....	81
図A-12	太陽光と風力の1年間の時刻別発電量.....	81

WWFジャパン 脱炭素社会に向けた長期シナリオ2017

2017年2月16日
システム技術研究所

WWFジャパンは、東日本大震災に続く東京電力福島第一原発事故後に、2011年から2013年にかけてWWFジャパン『脱炭素社会に向けたエネルギーシナリオ提案』4部作「省エネルギー」「100%自然エネルギー」「費用算定編」「電力系統編」を発表し、自然エネルギー100%でまかなう社会像を提起した。この中でWWFジャパンが提起したいくつか（電気自動車／燃料電池車の本格化、余剰電力からの水素製造によって熱・燃料需要を満たす、自然エネルギー中心の電力システムのあり方など）は、2011年以降に自然エネルギーの普及が急ピッチで進む中で、すでに実現されつつある。2016年11月にパリ協定が発効し、世界が一致して脱炭素社会へ向かうことが明確になった現在、改めて日本の2050年社会像を示すべく、アップデート版として「WWFジャパン 脱炭素社会に向けた長期シナリオ2017」を提言する。

本報告の目的は2050年を目標年として、日本の温室効果ガス排出量、特にCO₂排出量削減の可能性を検討することである。日本のCO₂排出量の9割以上はエネルギー利用を起源としているため、エネルギーの需給シナリオをまずは検討する。具体的には、省エネルギーが進展し、自然エネルギーが大量に普及している日本の将来エネルギーシナリオを作成する。ここでは、2つのシナリオを検討する。ひとつは、エネルギーをすべて自然エネルギーから供給する「100%自然エネルギーシナリオ」であり、CO₂排出量をゼロにするシナリオである。もうひとつは、日本政府が掲げる2050年温室効果ガス排出量80%削減を達成することに重きを置いた「ブリッジシナリオ（橋渡しシナリオ）」である。これらのシナリオ作成に関連する課題として、CO₂削減コストカーブについても検討を行う。

本報告ではエネルギーの単位は、主として次を使用している。また、本報告で使用している図表は、特別な出所表記がある場合を除き、すべてシステム技術研究所による作成である。

1 Jule (ジュール) = 1 W秒、kJ=1000J、MJ=1000kJ、1 kWh=3.6MJ

1 GJ=1000MJ、1 TJ=1000GJ、1 PJ=1000TJ

K=1000、M=100万、G=10億、T=1兆、P=1000兆

1 TOE=4万1868MJ、1 MTOE=4万1868TJ

TOE (石油換算トン)、MTOE (石油換算百万トン) 1 TOE=1万1630kWh

1 TWh=1000GWh、1 GWh=1000MWh、1 MWh=1000kWh

なお本報告での一次エネルギーについては「総合エネルギー統計」をベースとしている。電力の一次エネルギー換算については、火力発電の40%効率を基準とした。このため、自然エネルギーの電力1kWhはその物理量の2.5倍を一次エネルギーとして計上している。

第1章 はじめに

昨今、日本の将来のエネルギーを考える際には、CO₂排出量削減、エネルギー自給率の向上、地域の資源の活用、持続可能な社会の建設などの目標が重要になってきている。これらの目標を達成する方法として、省エネルギーと自然エネルギーの利用拡大が大きな注目を集めている。変動する自然エネルギーを効率よく利用するにあたっては、複雑に関連する課題を検討する方法として、将来のエネルギーシナリオの作成は有効な方法である。

1.1 本報告の構成

本報告は、省エネルギーと自然エネルギーの利用を中心とした日本のエネルギーシナリオ（WWFシナリオ）の作成を行うことで、具体的に将来の社会のエネルギー像を描き出すことを狙っている。

WWFシナリオ作成にあたっては、2050年を目標年として省エネルギーによるエネルギー需要の低減、将来のエネルギー需要、自然エネルギーのポテンシャル、CO₂以外の温室

表1.1 本報告の構成

章	タイトル	概要
1	BAUシナリオ	現状の傾向が続くとした参照シナリオについて説明している
2	省エネルギーの可能性	効率の高い住宅、モータ、自動車などの各種の省エネルギー技術を検討している
3	将来のエネルギー需要	2050年までのエネルギー需要の削減を活動度と効率向上の点から検討している
4	自然エネルギーの可能性	太陽光、風力、水力、地熱、バイオマスなど日本における自然エネルギーの導入見込み量を検討する
5	その他ガスについて	メタンやフロンガスなどCO ₂ 以外の温室効果ガスの排出量を検討している
6	WWFシナリオ	2050年にCO ₂ 排出を80%削減する「ブリッジシナリオ」と「100%自然エネルギーシナリオ」を作成している
7	CO ₂ 削減コストの検討	石油価格の将来コスト、省エネルギーや自然エネルギーの導入のコストを評価するコストカーブについて検討している
8	費用算定	シナリオの実現にどれくらい費用がかかるのかを計算している
9	なぜ政府シナリオより大きく削減できるのか	政府の2030年までのエネルギーの長期見通しとWWFシナリオを比較検討している
10	WWFからの提言	シナリオ検討結果を受けてのWWFジャパンからの提言を記載している

効果ガス排出削減を検討している。そのうえで、太陽光・風力発電などの自然エネルギーの大量導入によるCO₂の80%削減を実現するシナリオ（以下「ブリッジシナリオ」）および最大限導入した「100%自然エネルギーシナリオ」を作成している。さらにCO₂削減コストの分析と政府の長期エネルギー需給見通しとの比較検討を行っている。

表1.1には、本報告の構成を簡単に示している。

WWFシナリオは2010～2050年の期間を対象にしている。途中経過として2020、2030、2040年の各年についても検討する。ここで作成する「ブリッジシナリオ」と「100%自然エネルギーシナリオ」の比較対象として、2050年までの期間の家庭、業務、産業、運輸の各部門のエネルギー需要について、日本エネルギー経済研究所の「アジア／世界エネルギーアウトルック2015」内の日本のレファレンスシナリオ（後述）をBAU（Business As Usual）シナリオとして参照する。また2つのWWFシナリオで想定する将来エネルギー需要は、2050年にいたる経済成長、産業構造の変化についてBAUシナリオと同様の前提を置いて検討する。

1.2 BAUシナリオ

公式に発表されている長期エネルギーシナリオを探すと、日本エネルギー経済研究所が発表している「アジア／世界エネルギーアウトルック2015」と、政府の「長期エネルギー需給見通し」がある。

ここでは最近につくられたもので、かつ比較的長期までのデータが公開されている「アジア／世界エネルギーアウトルック2015」の中の、日本についてのレファレンスケースをBAUシナリオとする。ただし、このアウトルックは、2040年までの数値を示しているが、2050年については言及していない。ここでは2040年までの傾向を延長して2050年の数値とした。なお政府の「長期エネルギー需給見通し」は、2030年までの数値を示しているだけなので、ここでは参考として扱っている。

表1.2には、「アジア／世界エネルギーアウトルック2015」の基本的な考え方を示す、エネルギーと経済に関する指標を示した。

ここで「アジア／世界エネルギーアウトルック2015」は、世界のエネルギーの将来を検討するために、国際比較ができるようになっている。そのため、人口の数値は国連の人口統計に沿ったものであり、日本についてはやや古いデータであり2050年に1億800万人になっている。しかし、日本の最新の人口白書（2016（H28）年）では表1.3のように、2050年には9708万人になっている点には留意するべきである。WWFシナリオではこの最新の人口の数値を用いている。

「アジア／世界エネルギーアウトルック2015」では、実質GDPは2013年から2050年まで

に1.6倍になり、1人あたりGDPは1.88倍になる。また、一次エネルギーは、2020年に向けて少し増大するが、以降は減少してゆき、2050年には2013年の90.3%になるとしている（表1.4）。

表1.2 BAUシナリオのエネルギー・経済指標

	2013	2020	2030	2040	2050	2050/2013 (%)
GDP (2010年価格10億ドル)	5,656	6,547	7,566	8,369	9,172	162.2
人口 (100万人)	127	125	120	114	108	85.0
エネルギー起源CO ₂ (100万トン)	1,234	1,120	1,105	1,034	963	78.0
1人あたりGDP (1000ドル)	44	52	63	73	83	188.6
1人あたり一次エネルギー (TOE)	3.6	3.8	3.8	3.8	3.8	105.6
GDPあたり一次エネルギー消費	80	72	61	52	43	53.8
GDPあたりCO ₂ 排出量 (トン/TOE)	218	171	146	124	102	46.8
一次エネルギーあたりCO ₂ (トン/TOE)	2.7	2.4	2.4	2.4	2.4	88.9
自動車保有台数 (100万台)	77	77	74	71	68	88.3
1000人あたり自動車保有台数 (台)	601	611	613	623	633	105.3

出所：日本エネルギー経済研究所（2015）

表1.3 将来の人口

単位：万人	2010	2013	2020	2030	2040	2050	2050/2013 (%)
人口	12,806	12,729	12,410	11,662	10,728	9,708	76.3

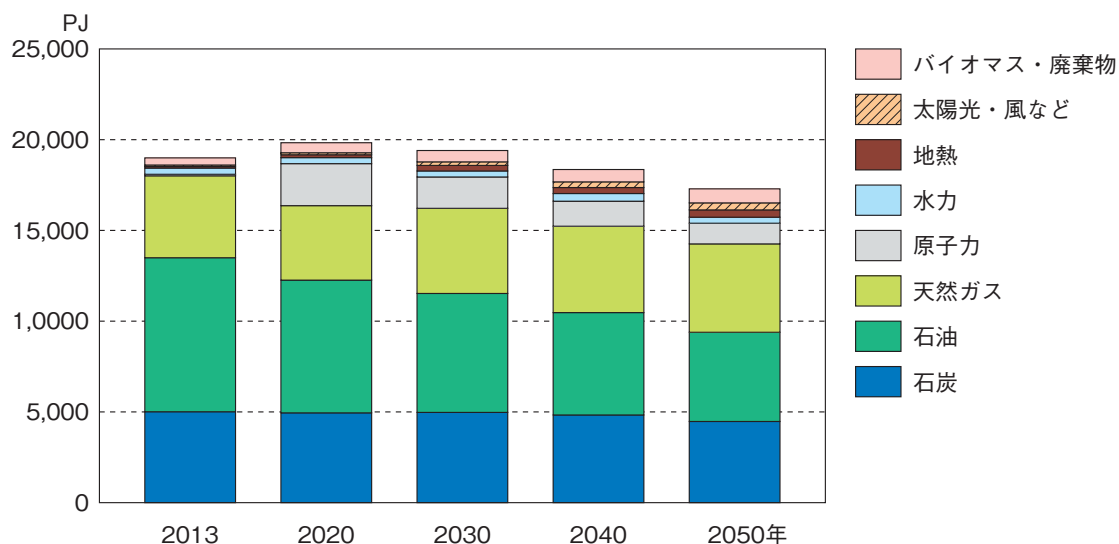
出所：国立社会保障・人口問題研究所（2012）。ただし、2010年、2013年は総務省統計より実績値。

表1.4 一次エネルギー供給

単位：PJ	2013	2020	2030	2040	2050	2050/2013 (%)
一次エネルギー	19,050	19,720	19,301	18,254	17,208	90.3
石炭	5,066	4,940	5,066	4,857	4,647	91.7
石油	8,457	7,327	6,490	5,652	4,815	56.9
天然ガス	4,438	4,061	4,605	4,689	4,773	107.5
原子力	100	2,261	1,717	1,424	1,130	1125.0
水力	281	339	339	339	339	120.9
地熱	100	159	322	377	431	429.2
太陽光・風力など	84	130	197	276	356	425.0
バイオマス・廃棄物	461	544	586	670	754	163.6

出所：日本エネルギー経済研究所（2015）

図1.1 一次エネルギー供給構成



出所：日本エネルギー経済研究所（2015）

最終消費エネルギーについては、表1.5のように示している。2020年以降は減少してゆき、2050年には2013年の87.8%になるとしている。

表1.5 最終エネルギー需要・供給

単位：PJ	2013	2020	2030	2040	2050	2050/2013 (%)
最終エネルギー消費	13,021	13,105	12,770	12,100	11,430	87.8
需要						
産業	3,433	3,726	3,726	3,643	3,559	103.7
民生・農業ほか	4,940	4,940	4,982	4,773	4,564	92.4
運輸	3,056	2,931	2,596	2,303	2,010	65.8
非エネルギー消費	1,591	1,507	1,465	1,382	1,298	81.6
供給						
石炭	1,089	1,089	1,047	963	879	80.8
石油	6,950	6,490	5,736	4,940	4,145	59.6
天然ガス	1,424	1,549	1,633	1,633	1,633	114.7
電力	3,433	3,684	3,977	4,061	4,145	120.7
熱	21	109	197	272	348	1660.0
水素	0	0	8	17	25	—
再生可能	151	155	176	209	243	161.1

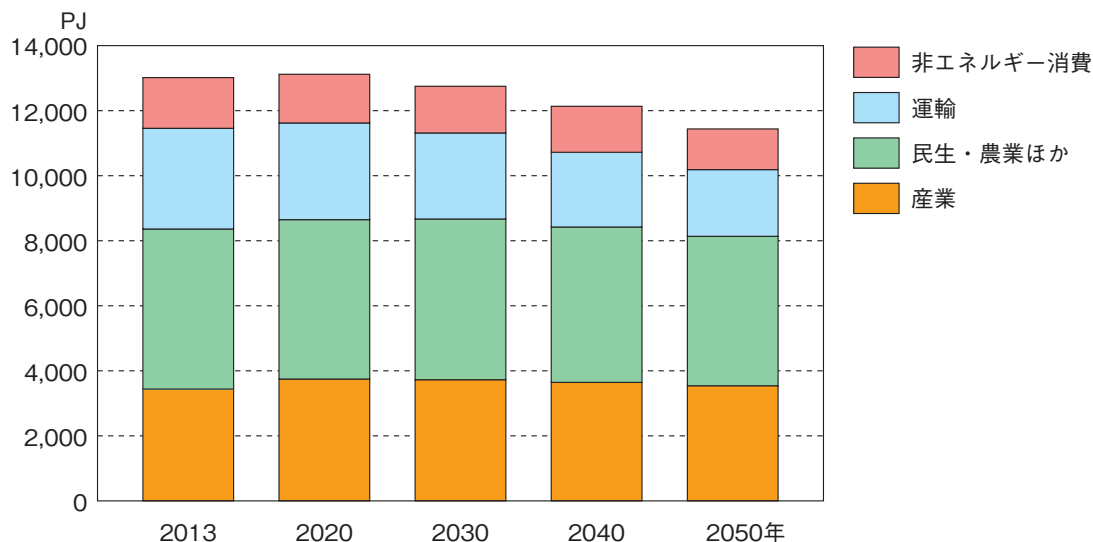
出所：日本エネルギー経済研究所（2015）

CO₂排出量をみると、2050年には2013年の78%になるとしている。

このように、公式に発表されたシナリオにおいても、将来のエネルギー需要は高度経済成長時代と異なり、2050年に向かってゆるやかに減少してゆくものとみていることがわかる。

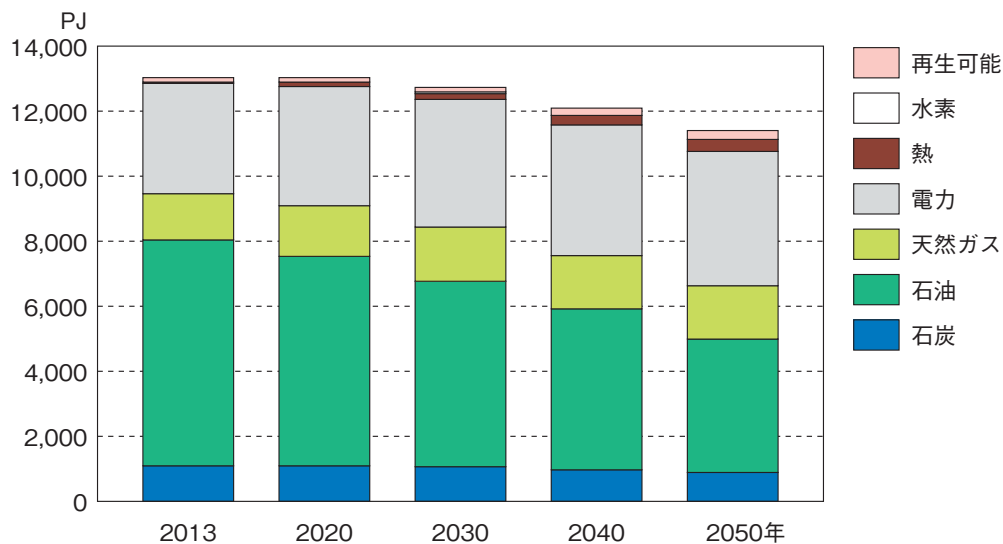
このほかに政府の「長期エネルギー需給見通し」があるが、これについては9章で取り扱っている。

図1.2 最終エネルギー消費構成



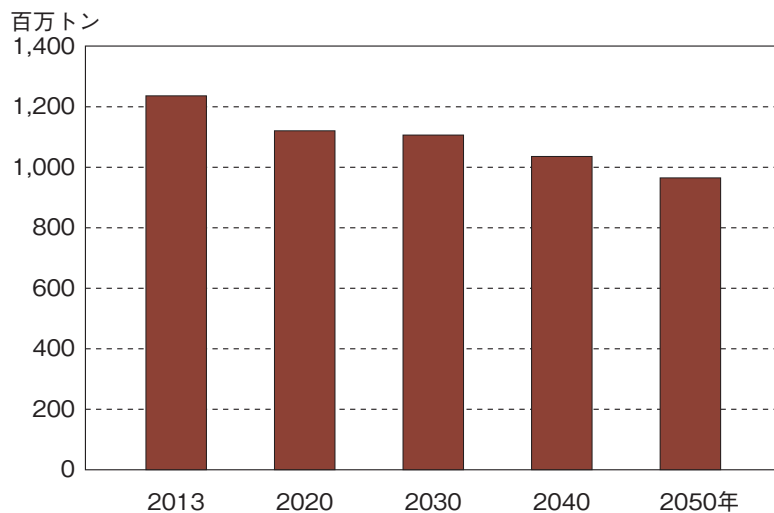
出所：日本エネルギー経済研究所（2015）

図1.3 最終エネルギー供給構成図



出所：日本エネルギー経済研究所（2015）

図1.4 CO₂排出量



出所：日本エネルギー経済研究所（2015）

第2章 省エネルギーの可能性

ここでは、家庭・業務・産業・運輸の各部門について、各種の省エネルギーまたはエネルギー効率の向上技術について、その可能性を検討する。

対象としては、家庭部門のゼロエネルギーハウス（ZEH）や電気冷蔵庫など、家庭・業務部門に共通するLED照明、業務部門ではゼロエネルギービル（ZEB）とコンピュータの省エネルギー、産業部門については、モータを利用するポンプやファンの効率向上と鉄鋼業のリサイクル率の向上について、また輸送部門のエコドライブ、カーシェアリング、電気自動車（EV）と燃料電池車（FCV）を取り上げる。エコドライブとカーシェアリングは技術そのものではなく活動指数の変化であるが、通信技術の発達が可能にしたものであるため、ここで取り扱うものとする。

2.1 家庭部門の省エネルギー

家庭部門の省エネルギー対策としては、断熱化、ゼロエネルギーハウス、電気冷蔵庫、ヒートポンプなどがあり、省エネルギーが進展しており、2050年に向けてエネルギー消費をさらに削減できる可能性が残っている。

ゼロエネルギーハウス（ネットゼロ・エネルギーハウス、ZEH）

家庭部門では、壁や窓の断熱基準の強化によって暖房用エネルギーが50～60%削減できることが知られている。段階的に厳しくした断熱基準は3種類あり、新築住宅はこれらの基準を満たすように勧められているが、強制的基準ではない。平成24年の調査によると、平成11年基準の住宅の普及率は5%、次は平成4年基準住宅であり普及率は19%、続いて昭和55年基準住宅の普及率は37%になっている。それ以外の39%は無断熱の住宅であると報告されている。それぞれの1戸あたりの年間暖冷房エネルギー消費は、22、32、39、56GJである。無断熱の住宅が平成11年基準になれば、年間暖冷房需要は39%に低下するわけである。平成25年および平成28年における法改正によって、住宅に関しては新たな省エネルギー基準が設定された。新基準は、従来と違い、住宅の総合的な省エネルギー性能の向上を意図しているが、実質的な外皮性能に関する基準は平成11年の次世代省エネルギー基準と変わらないと言われている。このため、本報告書では新基準の普及による省エネルギーの進展を平成11年基準の値を用いて計算する。

以上是新築の場合であり2050年までにどれだけ普及するかは政府の政策にかかっている。断熱化コストは、平均的な120m²の住宅でフルに実施すると50～110万ほどの追加費用になるが、主要な部屋に限定して行えば10～30万円程度で可能とされている。住宅の

寿命は30～40年と長いので、リフォーム時に断熱対策が誘導されれば、省エネルギーを加速できると思われる。最近では断熱性の高い窓用フィルムや、部屋の内側にもうひとつ窓を設置するように工夫した断熱内窓が商品化されており、このような方法も有効である。

さらに最近では、住宅で消費するエネルギーがゼロになるゼロエネルギーハウス（ZEH）が開発されている。ZEHまたはNearly ZEHは、高断熱、太陽光発電、バッテリーおよびHEMS（Home Energy Management System）を駆使することで、正味のエネルギー消費がゼロより小さくなる（創出されるエネルギーが消費エネルギーより大きくなる）住宅である。これはガスを燃料とする燃料電池コジェネであるエネファームを含むものもある。

ZEHの建設費用は、現状では一般住宅の場合で350～500万円程度の追加であるが、エネルギー消費の削減により年間20～25万円を節約できる。単純に回収期間を計算すると、20年程度になる。しかし、多くの住宅メーカーが取り組んで大量生産を行って普及が進めば10年程度に短縮できるようになるとと思われる。

電気冷蔵庫

家電製品のエネルギー効率の向上も進展している。最近の電気冷蔵庫は、10年前の製品と比較すると電力消費が非常に小さくなっている。電気冷蔵庫は家庭内で一年中スイッチが入っている家電製品であり、その効率向上は重要である。大量に普及しているタイプとして内容積が400～500リットルクラスの電気冷蔵庫は、10年前には年間電力消費が600kWh以上であったが、最近では280～320kWhと半分程度に減少している。断熱性の向上や動力の効率化によって小型の電気冷蔵庫よりも大型のものでも電力消費が小さいケースも生じている。調査によれば、電気冷蔵庫の電力消費は家庭の電力消費の14%となっている。年間の家庭用電力消費が4500kWhとすると、これは630kWhに相当するので、高効率冷蔵庫はまだ広く普及していないことがわかる。2050年に向けて高効率冷蔵庫が広く普及すれば電気冷蔵庫の電力消費は現状の半分以下になる。2050年までにはさらに効率の高い製品が使われることになると考えられる。

ヒートポンプ

都市部での暖冷房は電力を使用するヒートポンプエアコンが多く利用されるようになってきている。ヒートポンプのCOP（成績係数、電力消費に対する輸送できる熱量の比）は、3.0から増加しており、将来的には5～6になるものと予想されている。ヒートポンプは、将来的には自然エネルギーから得る余剰電力で100℃以下の低温熱需要を効率よく満たすのに利用されると思われる。

待機電力

家電製品の待機電力は、家庭の電力消費の5～6%と推定されている。これは1990年ごろにこの問題が指摘されたころと比較すると半減した模様である。年間の家庭用電力消費が4500kWhとすると、年間の待機電力は225～270kWhであり、高効率の冷蔵庫の年間電力消費と同じレベルにあるので、さらに削減する必要がある。テレビ、エアコン、ガス給湯器などの待機電力を削減する余地があり、電子回路の工夫が必要である。

LED照明

家庭部門と業務部門に共通する照明技術の進展がある。LED照明(発光ダイオード照明)は、経済性のある「高性能照明」として現在、爆発的に進展している省エネルギー技術である。すでに2012年には白熱電球の生産が停止されている。60Wの白熱灯を6WのLEDに代替でき、ほぼ同じ明るさで寿命は1000時間から5万時間に延びる。電力消費は10分の1になる。

照明器具メーカーの東芝ライテックは、ハロゲン電球や蛍光灯など管球商品の販売を、2017年3月末で終了し、今後はLED中心の製品開発にすることを発表した。LEDの効率向上と低コスト化が進展しており、蛍光灯に対してもコストの点で有利になっている。20Wの蛍光灯を8WのLEDに代替でき、10年間のライフサイクル費用はおよそ60%程度に低下する。2014年には、LEDの発光効率は、1Wあたり160ルーメンになり、蛍光灯の1.5倍、白熱電球の10倍になっている。さらに効率の向上が進みそうである。

2.2 業務部門の省エネルギー

業務部門のエネルギー消費は、オフィスビルの断熱化、ゼロエネルギービル、エアコンの効率向上、BEMS(ビルエネルギーマネジメントシステム)、高効率の半導体によるOA機器の省エネルギーによって大きく削減可能である。

ゼロエネルギービル (ZEB)

ZEHと同様にオフィスビルでも正味のエネルギー消費がゼロかマイナスになるものを追求する試みが始まっている。断熱化のみではエネルギー消費を減らすだけであるが、太陽光発電のような自然エネルギーが含まれば、正味でマイナスにすることもできる。平均的なオフィスの床面積あたりのエネルギー消費は一次エネルギーで年間1500～2000MJ/m²であるが、断熱性を向上させてこれをおよそ半分の800MJ/m²まで低下させると、これは1m²あたり最終用途電力90kWh/年の消費量であり、バッテリーを装備した太陽光発電なら0.5m²の100Wのパネルで供給可能になる。高層ビルになると階数が増加して床面積が大きくなっていくが、壁面にも太陽光パネルを設置できるので理論的には実現可能性がある。実際にゼロエネルギー消費にならないとしてもWWFシナリオでは2050年までにはこのような省エネルギー型のエコ建築が一般的になるものと想定している。

ハードディスクのフラッシュメモリーによる代替

最近ではコンピュータ利用の増大によって電力消費が増大することが懸念されているが、半導体の効率の向上やモータで回転するハードディスクを可動部分のない半導体に置換する静かな変化が進行している。データセンターのコンピュータの電力消費はかなり大きく、特に電力消費が引き起こす発熱があるために、冷房用電力が大きいことが知られている。しかし、最近では、低電力消費のサーバーが使用されつつあり、またハードディスクが可動部分のない半導体のフラッシュメモリーに代替される可能性が生まれている。この半導体メ

モリーは、消費電力が小さく高速であり、携帯可能なノートパソコンにはすでにハードディスクに代わって搭載されつつある。オフィスで大量に利用されるパソコンの電力消費が小さくなることは重要である。またデータセンターのハードディスクがこのようなフラッシュメモリーに代替されると、電力消費は3分の1以下になると推定されている。

以上のほかにも多くの省エネルギーの可能性はある。パソコンを利用したテレビ会議または電話会議は飛行機による出張を減らして、省エネルギーであるだけでなく、時間を有効に利用することができる。都市の緑化は建物の暖冷房エネルギー消費を削減するのに有効である。ライフスタイルの変化は、クールビズやウォームビズを定着させており、真夏にネクタイを締めるビジネスマンが激減している。このような変化は2050年に向かってエネルギー消費をさらに削減する可能性を示している。

2.3 産業部門の省エネルギー

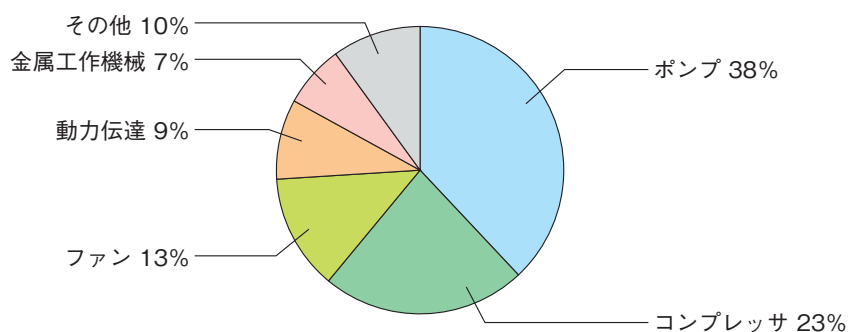
産業部門では多くの省エネルギーの可能性はある。「日本の省エネルギーは国際的に最も進展しており、これ以上雑巾を絞る余地がない」という表現は過去のものになってしまった。現在では、日本の産業の省エネルギー水準は欧米に後れをとり、場合によっては中国にも後れをとっているような状態である。この主たる理由は、1990年代からの「失われた20年」といわれる景気低迷の状態が影響している。企業は成長を望めないために新規設備投資をためらっており、そのなかで省エネルギー投資は最初に検討対象から外されているような状態であった。そのために、逆説的であるが、多くの省エネルギーの投資機会がここに残されている。以下には産業分野の省エネルギーの可能性を検討する。

モータのインバータ制御による冷却水ポンプの省エネ

産業部門の省エネルギー技術については、様々なものがある。工場の電力消費のうち多くはモータの使用である。推定によれば、電力消費の最大の用途は3相誘導モータの使用であり、産業用電力消費の70%を占め、日本の電力需要のおよそ55%を占めている。

使用されている3相誘導モータは、推定で1億台あり、その台数の内訳は、ポンプ38%、コンプレッサ23%、ファン13%、動力伝達9%、金属工作機械7%となっている。(エネルギー総合工学研究所 2010)

図2.1 産業用モータの推定台数の割合 (合計1億台)



出所：エネルギー総合工学研究所（2010）をベースに、システム技術研究所にて作成

このモータを使用する場合にインバータ制御を使って効率を上げる方法として、ポンプとファンについて、表2.1（冷却水）と表2.2（排気ファン）のような結果が報告されている。

この冷却水ポンプは、ダンパーとバルブで水量を調節していた。操業状態や季節によって必要な冷却能力に大きな差が生じるのにもかかわらず、多くの場合、ダンパーを100%開いた状態で運転されていた。インバータを用いて常に適切な量に制御することで、50%の大幅な省エネルギーを達成している。単純に計算すると、回収期間＝7014 / (928 + 774) = 4.12年である。

表2.1 冷却水ポンプのインバータによる制御

冷却水ポンプ (動力)	実負荷 (kW)	年間稼働時間 (h)	年間消費電力 (kWh)	インバータ導入後の効果 (年間)		インバータの 導入コスト (千円)
				消費電力の削減 (kWh)	電気料金の削減 (千円)	
ポンプNO.1	45	2,353	106,000	53,000	928	7,014
ポンプNO.2	45	1,966	88,500	44,250	774	

出所：京都産業エコ・エネルギー推進機構（2015）

モータのインバータ制御による排気ファンの省エネ

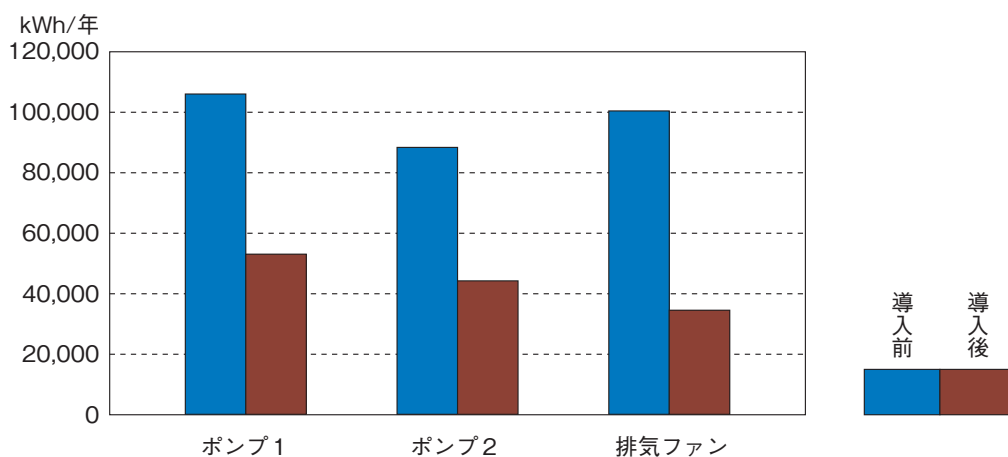
モータと同様に、ファンのインバータ制御についても検討が行われている。風量を手動で設定している排気ファンに、風量をインバータで制御・調整するようにした。その結果、65%の省エネルギーが達成されている。効果は現在確認中であるが、推定回収年数は2.6年としている。

表2.2 排気ファンのインバータによる制御

動力	モータ容量 (kW)	消費電力 (kW)	年間稼働時間 (h)	年間消費電力 (kWh)	年間電気料金 (千円)	備考
導入前	75	50	2,000	100,600	1,750	
導入後	75	17.3	2,000	34,600	606	
推定効果	—	-32.7	—	-65,400	-1,144	回収年推定2.6年

出所：京都産業エコ・エネルギー推進機構（2015）

図2.2 インバータ制御の導入効果（年間電力消費量）



出所：京都産業エコ・エネルギー推進機構（2015）をベースに、システム技術研究所にて作成

図2.2には、ふたつのインバータ制御の導入前後の年間電力消費の変化を示している。いずれも34～50%の省エネルギーを達成している。

鉄鋼のリサイクル

かつて産業分野の最大のエネルギー消費産業は鉄鋼業であったが、最近では化学工業が40%となっている。しかしそれでも鉄鋼業は産業分野のエネルギー消費の30%を消費しており、鉄鋼生産には大きな省エネルギーの可能性がある。鉄鋼生産においては、鉄鉱石をコークスで還元する高炉を利用する生産方法だけでなく、スクラップ鉄を電炉で熔融する生産が行われている。電炉で生産する鉄鋼の割合を電炉比と呼んでいる。

電炉による生産の鉄鋼1トンあたりエネルギー消費は高炉による生産の25～30%とされている。したがって電炉比が増加すると鉄鋼業のエネルギー消費は劇的に減少する。2014年の日本の電炉比は25%であり、日本で使用されているスクラップ鉄は2564万トンである。スクラップ鉄の発生量は、国内にある鉄鋼蓄積量13億トンの2%程度とされている。発生したスクラップ鉄は、国内での消費に加えて、年間約1000万トン程度を輸出しているため、実際のリサイクル鉄の量はかなり大きなものとなりうる。ヨーロッパでは2050年ごろには電炉比は70%になると予想されている。すでに米国では、電炉比は70%を超えており、不足するスクラップ鉄を年間1400万トンも輸入している。WWFシナリオでは、2050年に向かって、日本の鉄鋼生産の電炉比は70%になるものと想定して省エネルギーを検討している。

産業部門には、このほかにも様々な省エネルギーの可能性がある。熱利用プロセスの場合には、排熱回収と再利用、炉壁や配管の断熱性の向上、燃焼の効率向上などが知られている。断熱材の劣化のために工場のエネルギー消費の11%が失われているという報告も行われている。大きすぎるモータの定格容量、生産量の増減に無関係に最大電力で運転する製造工程など、実際に工場の担当者は非効率であることを知っていながら、これを防止するためのコスト増加のことを考えると乗り出せないことが多い。しかし、多くの場合に投資したコストは十分に回収される。

2.4 運輸部門の省エネルギー

運輸部門のエネルギー消費は、最先端のイノベーションとライフスタイルの変化の可能性が関係している。イノベーションは電気自動車（EV）と燃料電池車（FCV）であり、ライフスタイルの変化はカーシェアリングとエコドライブである。カーシェアリングは「シェアリングエコノミー」のひとつとして若い人々から受け入れられているようである。

エコドライブ

運輸部門のエネルギー消費の節減に有効なものとしてエコドライブがある。エコドライブを推進している交通エコロジー・モビリティ財団は、最近のエコドライブ活動コンクール¹の優秀事例集を発表している。2015（H27）年度のデータによると、受賞者の燃費の向

上の度合いは、事業者分野で8.9%、一般分野では8.7%となっている（交通エコロジー・モビリティ財団 2015）。

事業者がエコドライブに熱心な理由は、燃費の向上だけでなく、事故の減少があり保険料の負担が減少することがあげられる。

事業者におけるエコドライブの費用は、データの取得とその管理であり、自動車に取り付けるデータ収集装置の1台あたり初期費用が20000円程度、毎月の費用は1000～3000円程度である。輸送業者などの車両の年間走行距離は長いので、年間の燃費が10%向上すれば経済性があるようである。

カーシェアリング

自動車の利用に関する新しい試みとして知られるカーシェアリングは通信技術によってレンタカーの仕組みを高度化したものである。その効果は、一概には言えないが、必要とときだけ自動車を利用できればよいとすることから、走行距離が80%低下するという例が知られている。

この場合の経済性は以下ようになる。代表的なカーシェアリングの料金を調べてみると、個人の場合には月額1000円程度の会費が必要であり、使用時に10分あたり130～240円程度（車種によって異なる。燃料代を含む）の費用がかかる。

自動車を利用して年間1万km走行している個人が、カーシェアリングを利用して走行距離が20%、2000kmに減少するときには、以下のような経済性がある。

毎月の会費を1000円とすると年間1万2000円。年間平均走行時間は、時速20kmとすると、100時間であり、時間料金が150円/10分の場合には、 $100\text{時間} \times 150\text{円} \times 6 = 9\text{万円/年}$ である。したがってカーシェアリングの年間経費は、10万2000円である。

クルマを所有している場合には、車両購入費=180万円、これは10年の寿命とすれば、年間18万円であり、燃費は20km/Lで1万km走行するとすれば、年間ガソリン消費は $10000\text{km} / 20\text{km} = 500\text{L}$ となり、ガソリン単価を120円/Lとすると $500\text{L} \times 120\text{円/L} = 6\text{万円}$ であり、年間経費は $18 + 6 = 24\text{万円}$ になる。したがってカーシェアリングの場合には、年間費用の差 $= 24 - 10.2 = 13.8\text{万円}$ だけ有利になる。

電気自動車（EV）と燃料電池車（FCV）

WWFシナリオでは、2050年にはほとんどの自動車がEVとFCVになり、電力と水素が主要な供給源になると想定している。両者の技術には長短があり、比較が難しいので2050年にはEVとFCVの台数が半分ずつになるものとした。

WWFシナリオでは、2010年に対する人口比で自動車台数が変化するものとしている。BAUシナリオによると、2010年には乗用車と貨物車で7700万台がある。WWFシナリオでは、2050年には人口の減少にともなって5840万台になると想定した。2050年の自動車用エネルギー需要は、2010年の $5840 / 7700 = 0.758$ 倍になる。

次に効率の変化をみてみる。

最近の日産自動車のEV「リーフ」のデータでは、30kWhのバッテリーをフル充電する

と280km走行すると報告している。これは107Wh/kmに相当する。軽量化が行われるとみて、EVとFCVは走行段階での燃費はともに2050年に100Wh/kmになるものとした。FCVは水電解効率90%、燃料電池の発電効率60%を考慮して、 $100 / 0.6 / 0.9 = 185.2\text{Wh/km}$ と想定した。

2010年の自動車の平均燃費15km/Lは、1kmあたり651Whに相当する。

1km走行に必要なエネルギーは、EVについては $100\text{Wh} / 651 = 0.154$ 倍、FCVについて

表2.3 自動車用エネルギー需要の構成と変化要因

WWFシナリオ	2010	2020	2030	2040	2050
人口比 (2010年比)	1.00	0.97	0.91	0.84	0.76
車両台数 (100万台)	77.0	74.6	70.1	64.5	58.4
効率変化 (2010年比)	1.000	0.950	0.750	0.420	0.219
乗用車エネルギー (PJ)	1,703	1,568	1,163	599	283
貨物車エネルギー (PJ)	1,150	1,059	785	405	191
合計 (PJ)	2,853	2,627	1,949	1,004	474

図2.3 自動車用の台数比とエネルギー効率の変化

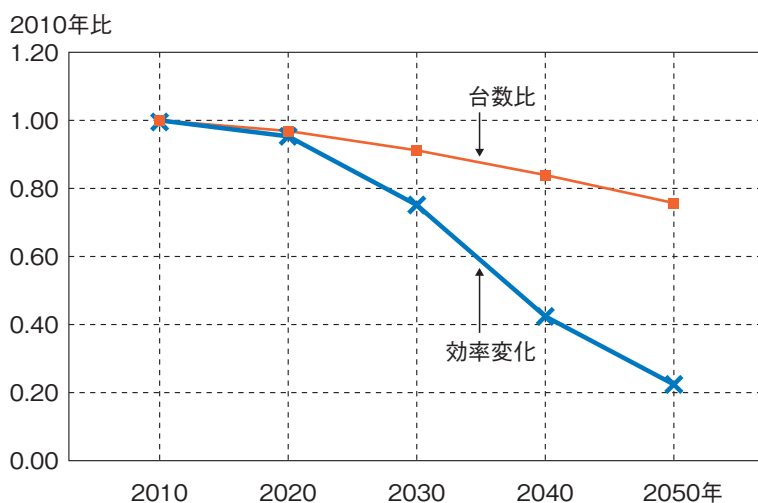
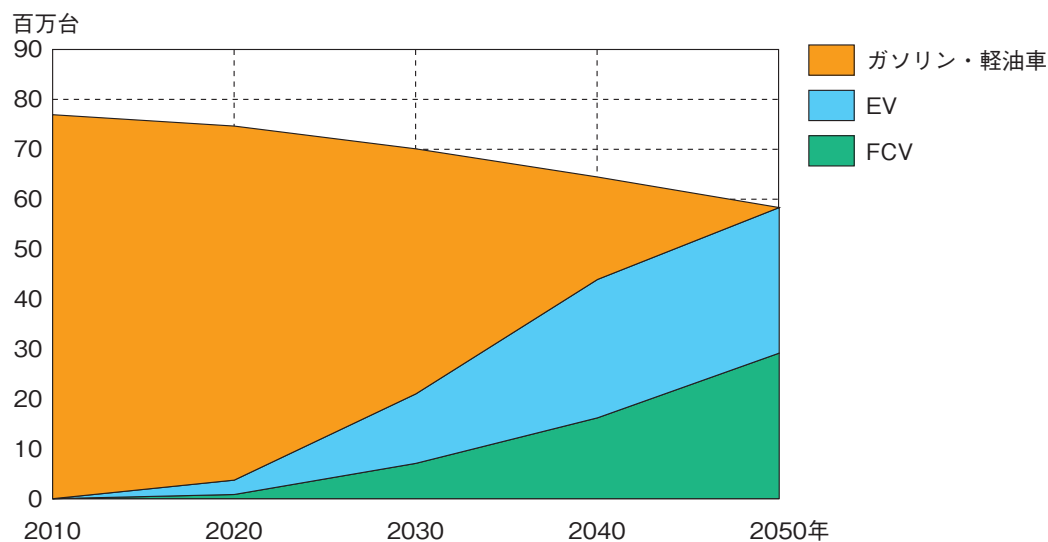


図2.4 将来の自動車用台数 (乗用車+貨物車)



は $185.2 / 651 = 0.284$ 倍になる。EVとFCVの台数が50%ずつとすると必要なエネルギーは、 $(0.154 + 0.284) / 2 = 0.219$ 倍になる。以下の表2.3に示すように、車両台数の変化と効率変化を考慮すると、乗用車+貨物車の自動車用エネルギーは、2050年には、 $0.758 \times 0.219 = 0.166$ 倍になる。

以上から2050年の自動車用エネルギー需要は、474PJとなり、これを供給する電力は131.6TWhになる。この需要を以下の省エネルギーによって削減することを検討した。

表2.4 自動車の省エネルギー

単位：PJ	2010	2020	2030	2040	2050
カーシェアリング（-4%）		5	79	44	19
車上太陽光（-20%）		1	31	66	95
差引エネルギー需要	2,853	2,621	1,839	895	360

カーシェアリングが表2.4に示すように5%の自動車に採用されるとして、80%の省エネルギーになれば、全体として4%の省エネルギーになる。これはEVにもFCVにも適用できる。また、車上太陽光は、電気駆動のEVとFCVにのみ適用可能であるが、年間走行エネルギーの20%を供給するものとした。この結果、2050年の自動車用のエネルギー需要は、360PJ（100TWh）となった。

以上の各部門における代表的な省エネ技術による削減量の目安を次章にて、将来のエネルギー需要の推計に用いている。



①水素燃料バス（アイスランド）②水素燃料スタンド（アイスランド）③電動トラック（ロンドン）④充電ポイント（ロンドン）⑤電気自動車・日産リーフ（ロンドン）

© Global Warming Images / WWF

第3章 将来のエネルギー需要

将来の絵姿を描くエネルギーシナリオにおいては、まずエネルギー需要を検討することが重要である。人々の要求を満たしながらも、エネルギー需要を小さくできれば、それに応じる供給設備を小さくでき、ひいては環境に対する負荷を小さくできる。

将来のエネルギー需要を求める方法は一般的に以下のように行われており、本報告でもこれに準じている。

各最終用途のエネルギー需要

$$= \text{開始年の各最終用途エネルギー需要} \times \text{各最終用途の活動指数の変化} \\ \times \text{省エネルギー（効率向上）}$$

この式は、エネルギー需要は、人口やGDPなど人間社会の活動の大きさによって変化し、また効率の高いエネルギー技術を利用して需要を小さくすることができることを示している。

3.1 活動指数の変化

将来の活動指数の変化を検討する。人口、世帯数、GDP、各種資源消費などが各エネルギー消費部門の活動指数を示すと考えられる。将来のエネルギー需要は、2010年の各部門のエネルギー需要を出発点にして、これに各年における各最終用途ごとに影響を及ぼすと

表3.1 主要な活動指数の変化（2010～2050年）

	2010	2020	2030	2040	2050
人口（万人）	12,806	12,410	11,662	10,728	9,708
人口比（2010年比）	1.00	0.97	0.91	0.84	0.76
実質GDP（2005年価格、兆円）	512.7	529.8	613.3	708.7	783.9
実質GDP比（2010年比）	1.00	1.03	1.20	1.38	1.53
世帯数（万世帯）	5,378	5,305	5,123	4,713	4,519
世帯数比（2010年比）	1.00	1.02	0.99	0.91	0.87
鉱工業生産指数（2010年＝100）	99.4	123.6	135.9	142.1	155.6
粗鋼生産（万トン）	10,550	11,458	10,595	10,164	8,870
エチレン生産（万トン）	652	705	687	678	571
セメント生産（万トン）	6,590	5,564	5,315	5,190	4,169
紙・板紙生産（万トン）	2,879	3,085	3,058	3,045	2,827
材料資源指数（2010年比）	1.00	1.007	0.951	0.923	0.795

出所：各種統計を参照してシステム技術研究所が独自に推計

考えられる活動指数の変化をかけて求める。このエネルギー需要は省エネルギーによる効率向上を含まないものである。

表3.1には、2010～2050年の主要な活動指数の変化を示した。表3.2には、各エネルギー最終用途についての活動指数の変化を示している。

表3.2 各最終用途の活動指数と省エネルギー

エネルギーの最終用途	活動量	2050年の省エネルギーの内容
産業部門		
非製造業	人口に比例	効率20～30%向上
製造業		
食品飲料製造業	人口に比例	効率20～30%向上
繊維工業	人口に比例	効率20～30%向上
パルプ・紙・紙加工品製造業	生産量に比例	効率20～30%向上
化学工業（含石油石炭製品）	生産量に比例	効率20～30%向上
プラスチック・ゴム・皮革製品製造業	材料資源指数に比例	効率20～30%向上
窯業・土石製品製造業	生産量に比例	効率30%向上
鉄鋼・非鉄・金属製品製造業	材料資源指数に比例	リサイクル率70%
機械製造業ほか	人口とGDPに比例	効率30%向上
民生部門		
家庭部門		
冷房	世帯数に比例	断熱化、ヒートポンプのCOPが2倍
暖房	世帯数に比例	断熱化、ヒートポンプのCOPが2倍
給湯	世帯数に比例	ヒートポンプ給湯器のCOPが2倍
厨房用	世帯数に比例	効率10%向上
動力ほか	建物：人口に比例 通信：GDPに比例	22%は照明用で4分の1に低下、残りは効率50%向上
業務部門		
冷房	人口に比例	断熱化、ヒートポンプのCOPが2倍
暖房	人口に比例	断熱化、ヒートポンプのCOPが2倍
給湯	人口に比例	ヒートポンプ給湯器のCOPが2倍
厨房用	人口に比例	効率10%向上
動力ほか	建物：人口に比例 通信：GDPに比例	50%が照明用で4分の1に低下、残りは効率50%向上
運輸部門計		
旅客		
自家用乗用車	人口に比例／カーシェアリング・エコドライブが影響	FCVまたはEVで効率が4～6倍
バス	人口に比例	効率20～30%向上
鉄道	人口に比例	効率10%向上
海運	人口に比例	効率30%向上
航空	人口に比例	効率30%向上
貨物		
貨物自動車	材料資源指数に比例・カーシェアリング・エコドライブ	FCVまたはEVで効率が4～6倍
鉄道	材料資源指数に比例	効率10%向上
海運	材料資源指数に比例	効率30%向上
航空	人口に比例	効率30%向上

各エネルギー最終用途の活動指数の変化は、人口、世帯数、実質GDP、材料資源指数を、2010年を起点とする比で表わし、これを利用して計算している。材料資源指数は、粗鋼、エチレン、セメント、紙・板紙の生産量を合計した数値を、2010年を1として指数化したものである。それぞれのエネルギー最終用途に最も関係が深いと考えられる指数を利用して将来の活動指数の変化を表現するようにした。

GDPは2050年に向けて1.53倍に増大するが、持続可能な社会へ向けて進化してゆく世界を想定しているため、資材関連の製造業の生産規模は減少する。2050年の鉄鋼、エチレン、セメント、紙・板紙など基礎資材の生産をみると、2050年には2010年に比較して、いずれも減少している。鉄鋼は84%に、エチレンは88%に、セメントは63%に、紙・板紙は98%に低下している。先進国ではこうした基礎資材の生産が飽和して、重厚長大産業から知識集約型のサービス産業への移行が進展していることはよく知られている。したがって、産業のエネルギー消費についてみると、鉄鋼、セメントなどのエネルギー集約型産業については減少し、情報産業や電子機械などの産業の活動が増大するGDPを生み出すと想定される。

たとえば、素材系の産業の活動指数は、鉄鋼、化学、セメント、窯業・土石、紙パルプのそれぞれの年間生産量に比例するとした。非製造業は具体的には農林・水産業であり、その活動指数は人口に比例するとした。繊維工業の活動指数も人口に比例するとした。機械製造は情報産業に関する成長分野であり、その活動指数は人口とGDPに比例するとした。

3.2 各最終用途のエネルギー需要

産業部門のエネルギー需要は、生産活動が重厚長大なものから情報化・サービス化へ向かうため関連する物質資源量が小さくなり、鉄鋼・化学・セメント・紙パルプの分野が縮小する。

家庭部門では、人口に比例して最終用途エネルギー需要が減少してゆく。WWFシナリオではさらに効率の向上によって削減が大きくなる。業務部門のエネルギー需要の多くは人口に比例して減少してゆくと想定している。

運輸部門においては、人口の減少、資源輸送の減少によってエネルギー需要が減少するが、さらにEV、FCVなど電動車両によって効率が格段に向上する。このようにして最終用途エネルギー全体もBAUシナリオに対してWWFシナリオでは大きく減少してゆく。

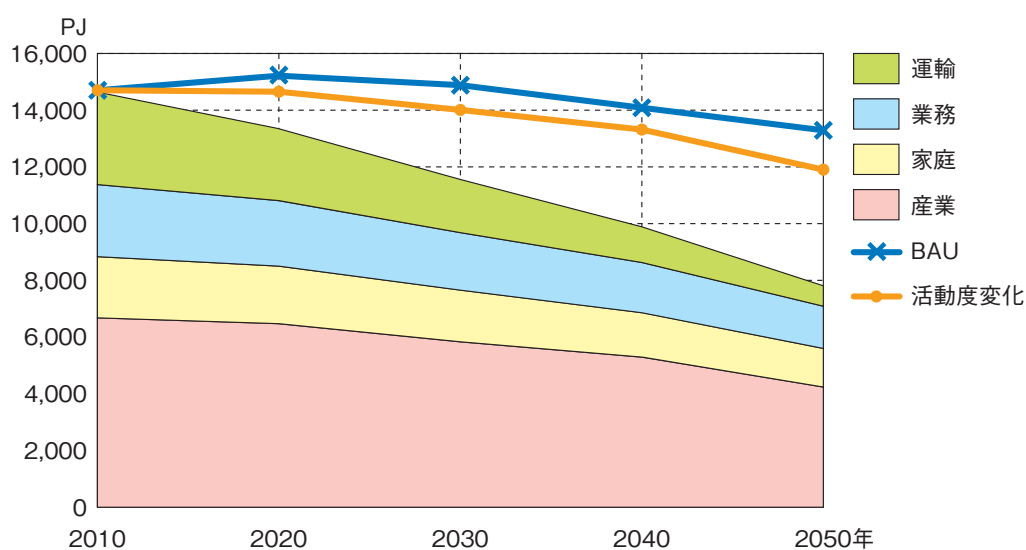
ここでBAUシナリオは、日本エネルギー経済研究所「アジア／世界エネルギーアウトック2015」の数値を示している。BAUシナリオは活動指数の変化を見込んでいるが、省エネルギーについてはあまり進展しないとしている。これに対してWWFシナリオでは、省エネルギーが経済的であり、エネルギー価格が上昇してゆく時代には、省エネルギーが主要な役割を果たすと考えている。

以上の検討の結果得られた各最終用途のエネルギー需要は、表3.3と図3.1のようになった。表3.3には、BAUシナリオ、活動度変化のみのケースに加えてWWFシナリオとして第

表3.3 最終用途エネルギー需要の推定

単位：PJ	2010	2020	2030	2040	2050	2050/2010 (%)
BAUシナリオ	14,698	15,215	14,892	14,084	13,272	90.3
活動指数の変化	14,698	14,663	14,010	13,314	11,886	80.9
100%シナリオ	14,698	13,398	11,606	9,918	7,822	53.2
産業	6,683	6,497	5,849	5,308	4,241	63.5
家庭	2,174	2,032	1,821	1,571	1,368	62.9
業務	2,556	2,320	2,049	1,767	1,490	58.3
運輸	3,285	2,549	1,887	1,272	724	22.0

図3.1 最終用途エネルギー需要の推移（100%自然エネルギーシナリオ）



6章で説明する、「100%自然エネルギーシナリオ」の最終用途エネルギー需要を部門別に示している。

「100%自然エネルギーシナリオ」の最終用途エネルギー需要の詳細を、表3.4（次ページ）に示した。なお、活動指数の変化によって推定した最終用途エネルギー需要と、「ブリッジシナリオ」の最終用途エネルギー需要の詳細については、参考資料に示している。

BAUシナリオでは、2020年ごろまで最終エネルギー需要はやや増加するがその後、減少に向かう。100%自然エネルギーシナリオとブリッジシナリオでは、人口の減少、世帯数の減少、産業構造の情報化とサービス化によって、また省エネルギーの進展により、2010年から2050年に向かって減少すると想定している。

**表3.4 活動指数の変化と効率向上から計算した将来のエネルギー需要
(100%自然エネルギーシナリオ)**

単位：PJ	2010	2020	2030	2040	2050
最終エネルギー消費合計	14,698	13,398	11,606	9,918	7,822
産業（計）	6,683	6,497	5,849	5,308	4,241
農林水産鉱建設業	302	274	241	206	172
製造業（計）	6,381	6,223	5,609	5,103	4,069
食品飲料製造業	253	233	207	180	153
繊維工業	140	129	115	100	85
パルプ・紙・紙加工品製造業	385	387	358	331	284
化学工業（含 石油石炭製品）	2,773	2,848	2,630	2,451	1,943
プラスチック・ゴム・皮革製品製造業	95	90	79	71	57
窯業・土石製品製造業	410	325	289	262	195
鉄鋼・非鉄・金属製品製造業	1,987	1,851	1,606	1,421	1,106
機械製造業	395	361	325	286	247
家庭（計）	2,174	2,032	1,821	1,571	1,368
冷房	260	246	219	183	159
暖房	347	329	292	245	212
給湯	331	322	295	256	231
厨房用	193	194	184	166	157
動力ほか	1,042	940	832	721	609
業務（計）	2,556	2,320	2,049	1,767	1,490
冷房	306	274	237	199	162
暖房	408	366	316	265	217
給湯	389	359	319	277	236
厨房用	227	216	198	179	158
動力ほか	1,225	1,106	978	847	716
運輸（計）	3,285	2,549	1,887	1,272	724
旅客（計）	2,005	1,561	1,163	790	461
乗用車	1,703	1,284	917	578	282
バス	67	62	55	48	41
鉄道	71	67	61	55	48
船舶	49	45	40	35	30
航空	115	103	89	75	61
貨物（計）	1,280	988	724	482	263
貨物自動車/トラック	1,150	867	620	390	190
鉄道	5	5	5	4	4
船舶	103	96	83	74	57
航空	22	20	17	14	12

第4章 自然エネルギーの可能性

最近の調査資料をもとに太陽光、風力、地熱、水力、バイオマスの導入可能性を検討する。国内における自然エネルギーのポテンシャルや導入見込み量は、調査が進むにつれて次第に大きくなってきている。以下には、主に環境省とNEDOによる調査・研究の数値をとりまとめて示している。なおWWFシナリオでは、ここに示している自然エネルギーのポテンシャル量のすべてを利用するものではなく、その一部のみを利用するように計画している。ただしバイオマスについては、ポテンシャル量が公式に示されていないので、WWFシナリオでは将来開発される可能性を考慮してその利用量を設定している。

4.1 太陽光発電

太陽光発電のポテンシャルや導入見込み量が各種発表されるようになってきている。以下にはそれらを示す（表4.1、4.2）。

表4.1 太陽光発電導入見込み量

単位：万kW	2020年高位	2030年高位	2050年高位
戸建住宅	1,702	3,060	16,950
非住宅・集合住宅	2,150	4,400	10,300
メガソーラー	2,460	3,414	
合計	6,312	10,874	27,250

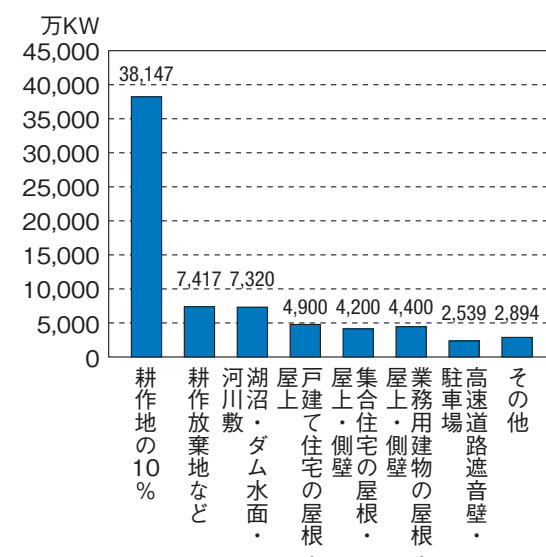
出所：新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）（2014）

表4.2 太陽光発電の導入ポテンシャル

設置場所	設置容量(万kW)
耕作地の10%	38,147
耕作放棄地等	7,412
湖沼・ダム水面・河川敷	7,320
戸建て住宅の屋根・屋上	4,900
集合住宅の屋根・屋上・側壁	4,200
業務用建物の屋根・屋上・側壁	4,400
高速道路遮音壁・駐車場	2,539
その他	2,894
合計	71,812

出所：新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）（2014）

図4.1 太陽光発電の導入ポテンシャル



出所：新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）（2014）

この環境省報告では2050年の導入量として2億7250万kW（高位）を示している。このような導入可能性の数値は新報告書の発表のたびに増加している。

NEDOの報告では、表4.2のように、日本における太陽光発電システムの最大ポテンシャルはさらに大きく、7.2億kWになる。2015年末での実際の導入量は3340万kWであり、まだ最大ポテンシャルの4.6%でしかない。

最大のポテンシャルは耕作地の10%で3.8億kWとしている。このほかに耕作放棄地7400万kW、建物の屋上と壁面で1.4億kWなどがある。これは発電効率15%での計算である。太陽光パネルの最大発電効率はすでに20%を超えており、2030年ごろ平均25%になれば、ポテンシャル容量はここに示した数値の1.66倍になる。

JPEA（日本太陽光発電協会）は太陽光発電見込み量を、2050年に2億5000万kWとなり、また根拠は示されていないが、100年後の2115年には7億kWとしている（表4.3）。

表4.3 JPEAの太陽光発電見込み量

単位：万kW	2015	2020	2030	2050	～	2115
太陽光発電	3,440	7,000	10,000	25,000	～	70,000

出所：太陽光発電協会（JPEA）（2015）



© Shutterstock / Norikazu / WWF

4.2 風力発電について

風力発電に関しては、導入ポテンシャルや将来の導入見込み量が各所から発表されている。特に導入ポテンシャルは、環境省が2009（H21）年度から毎年ポテンシャルを発表してきている。最新の2015（H27）年度では、風力の導入ポテンシャルは陸上で約2.8億kW、洋上では約14億kW、合わせて約17億kWとなっている（表4.4）。

表4.4 風力発電 導入ポテンシャル調査

単位：万kW	陸上	洋上
導入ポテンシャル	28,576	141,276

出所：環境省（2014）

ただし、これらの導入ポテンシャルは、必要最低限の立地不可条件をもとに開発可能な場所（ポテンシャル）を算定したものとなっている。他の再生可能エネルギーと比較して特に環境への配慮が求められる風力については、環境負荷低減のため導入ポテンシャルをさらに絞り込むことが重要と考えられる。そのため本シナリオの試算では、陸上風力について特に影響が懸念される鳥類の重要生息地等を除外して導入ポテンシャルをさらに絞り込んでいる。一方で洋上に関しては、陸上と異なり海上の環境調査等の知見に乏しく、現時点では陸上と同様に生息重要地を導入ポテンシャルから控除することは難しい。実際のポテンシャルはより小さくなると考えられるものの、空間に占める鳥類の重要生息地の割合は陸上より低くなると想定されるため、導入ポテンシャルの多くが活用できると考えられる。

各機関による風力の将来の導入見込み量については、よく知られたものに環境省とJWPA（日本風力発電協会）の試算があげられる（表4.5）。

表4.5 風力発電導入見込み量

単位：万kW	2020年高位	2030年高位	2050年高位
陸上	1,100	2,370	3,500
洋上（着床）	140	320	800
洋上（浮体）	83	560	2,700
合計	1,323	3,250	7,000

出所：環境省（2014）

環境省の風力ポテンシャル調査では陸上と洋上を合わせると17億kWとなっているが、導入見込み量としては、2050年に高位で陸上、洋上合わせて7000万kWである。JWPAの発表しているビジョンでは、2050年までの風力についての現実的な導入見通しは表4.6のとおり、陸上・洋上の合計で7500万kW、現状の電力需要の20%以上を供給するとしている。

表4.6 風力発電将来ビジョン

単位：万kW	陸上	洋上（着床）	洋上（浮体）	合計
2010	245	3	0	248
2020	1,020	60	10	1,090
2030	2,660	580	380	3,620
2040	3,800	1,500	1,290	6,590
2050	3,800	1,900	1,800	7,500

出所：日本風力発電協会（JWPA）（2016）

この数字は環境省の調査結果とほぼ同等である

以上から、本シナリオの試算では、最大限利用可能な導入見込み量として、陸上と洋上の合計で最大1億4000万kW程度を想定している。



© Shutterstock / brook / WWF

4.3 バイオマスについて

バイオマスのポテンシャルについては、農林水産省が2012年度に出した「バイオマス事業家戦略」において、表4.7のようなデータが発表されている。

表4.7 バイオマスの導入ポテンシャル

	2020年の利用目標	すべてを利用するとき
条件	カスケード利用、 持続可能性基準を考慮せず	未利用分をすべて利用、 持続可能性基準を考慮せず
総発熱量	460PJ	720PJ
電力利用量	130億kWh	220億kWh
世帯の電力消費分	280万世帯分	460万世帯分
熱量換算	1180万kL	1850万kL
自動車台数分	1320万台	2080万台
CO ₂ 削減量	4070万トンCO ₂	6340万トンCO ₂
CO ₂ 削減割合 (日本のCO ₂ 排出量に対する割合)	3.20%	5%

出所：農林水産省（2012）

この数字は、燃料にするか電力にするかの数字であり両方同時に使える量ではない。ここでの最大見込み量の総発熱量は720PJである。バイオマス発電については、別に見込み量が表4.8のように示されている。

表4.8 バイオマス発電導入見込み量

単位：万kW	2020年高位	2030年高位	2050年高位
黒液・廃材	409	409	409
その他バイオマス	242	273	329
バイオマス発電総合	651	682	738

出所：環境省（2014）

この表4.8の最大の発電導入見込み量は738万kWであり、発電量は431億kWhとしている。これは発熱量としては155PJに相当する。

表4.9 バイオマス熱利用の導入見込み量

単位：万kL	2020年高位	2030年高位	2050年高位
バイオマス熱利用	757	837	2587

出所：環境省（2014）

表4.9の最大の導入見込み量は2587万KLであり、973PJに相当する。

日本のバイオマスの過去の最大利用量

日本における過去のバイオマス最大利用量は、1940（昭和15）年に662万トン石油換算、これは716万kL（270PJ）に相当する（薪炭の消費量、日本エネルギー経済研究所 2016）。

1940年は太平洋戦争の直前であった。この統計に載っている数字は「商業的エネルギー」として流通していたものであり、実際には周囲の森林から切り出して流通過程を通らずに消費していた木材などがかなりあり、実際の消費量はこの数字の2～3倍以上になると推察される。

1940年の人口は7193万人、実質GNPは37兆2850億円、名目GNPは41兆2690億円である。2014年のGDPの524兆円と比較すると、7.1%に相当する。

その年の1次エネルギー消費は6340万トン石油換算であり、2014年のエネルギー消費量の4億7350万トン石油換算の13.4%である。そのときの最大のエネルギー供給源は石炭であり、66%を占めていた。薪炭の占める割合は10.44%であった。1人あたりエネルギー消費は、2014年の22.5%に相当する。1940年のCO₂排出量は1億6580万トンであった。

木材のバイオマスとしての供給可能性について

国内の森林資源の蓄積は50億m³に達しており、8000万m³（乾燥重量約3200万トン）が毎年増加している。これから国産材供給量1937万m³（1600万トン）を差し引くと6063万m³（2425万トン）となる。この中には林地残材（未利用間伐材）2000万m³（800万トン）が含まれるという（埴藤徳 2016）。

この木材資源が建築材として利用されたあとでエネルギーとして回収できれば、上記の森林資源の年間生育量がすべてエネルギーとして利用可能であろう。これは年間3200万ト

表4.10 日本におけるバイオマス資源の利用可能量

バイオマスの種類	内容	現状	年間発生量 (乾燥量万トン)	未利用分 (乾燥重量万トン)
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
	建築発生木材	60%は製紙原料・家畜飼料	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（乾燥重量）			24,260	14,464
合計（石油換算）				石油換算6,727万トン

出所：農林水産省（2006）をもとにシステム技術研究所が試算

ンになり、発熱量計算から1422万トン石油換算（594PJ）になる。

表4.10にはこれらの計算のもとになった各種バイオマスの概要を示している。

以上のバイオマスの内容はいずれも潜在量（ポテンシャル）ではなく、ある条件のもとに実現できる最大導入見込み量を示している。このうちで最大のバイオマスの導入見込み量は、表4.9に示した973PJである。これは現在あるバイオマスについて検討したものであり、将来国内で行われるバイオマス生産として、農作地を利用したエネルギー作物や海洋を利用した海洋バイオマスや海藻の栽培などは含まれていない。

WWFシナリオでは、2050年ごろに国内の地上と海洋で生産可能なエネルギー作物として、3000万トン石油換算（1254PJ）が利用可能であると想定して、上記の既存のバイオマス973PJと合わせて合計でおよそ2200PJが利用可能と想定した。もちろん、このためには日本の農林漁業が大きく変わる必要があると思われる。

4.4 水力発電

水力発電については、環境省報告書において、導入見込み量が発表されている。2050年の高位見込みで3135万kWになっている（表4.11）。

また、表4.12に示すように、資源エネルギー庁の包蔵水力調査では、4606万kW、135TWhの発電量が見込まれている。包蔵水力とは、発電水力調査により明らかとなった我が国が有する水資源のうち、技術的・経済的に利用可能な水力エネルギー量と説明されている。

表4.11 水力発電の導入見込み量

単位：万kW	2020年高位	2030年高位	2050年高位
大規模水力	1,146	1,146	1,251
中小規模水力	1,188	1,420	1,884
合計	2,334	2,566	3,135

出所：環境省（2014）

表4.12 包蔵水力調査

区分	地点数	出力（万kW）	年間発電量（億kWh）
既開発	1,984	2,795	952
工事中	54	37	11
未開発	2,718	1,897	472
合計	4,753	4,606	1,356

（工事にともなって廃止される発電所があるため合計は一致しない）

出所：資源エネルギー庁（2016）

4.5 地熱発電

環境省の調査によると、導入の見込みは2050年高位で792万kWとなっている（表4.13）。

表4.13 地熱発電の導入見込み量

単位：万kW	2020年高位	2030年高位	2050年高位
大規模地熱	59	168	636
温泉	23	73	156
地熱発電（総合）	82	241	792

出所：環境省（2014）

一方で環境省の2014（H26）年度のゾーニング基礎情報整備報告書では、地熱発電の導入ポテンシャルは3063万kW（条件1：国立公園不可、傾斜掘削可）となっている。

WWFシナリオでは、環境省の2014（H26）年度のゾーニング基礎情報整備事業報告書を参考にして、示されるポテンシャルのうち2050年に実現性のある規模として1000万kW程度を想定している。

4.6 海洋エネルギー

海洋エネルギーには、海洋温度差発電、潮流発電などがあるが、波力発電の導入見込み量があげられている。技術的には未知の部分が多いが、ここでは波力発電を2050年に1000万kWとして、シナリオの中に取り入れている。年間の設備利用率は30%と想定している。

表4.14 海洋エネルギーのポテンシャル

単位：万kW	2020年高位	2030年高位	2050年高位
海洋エネルギー	0	349	1395

出所：環境省（2014）

波力発電のポテンシャル調査には、3600万kW（NEDO 2014）、あるいは3000万kW（波力発電検討会 2010）がある。

WWFシナリオでは、2050年の波力発電の最大導入見込み量を1000万kWと想定した。

4.7 自然エネルギーについてのまとめ

現状では、自然エネルギーについてのポテンシャル量と導入見込み量については、以上のような結果である。これらの結果は、自然エネルギーへの期待が高まるにつれて増大しているため、これが上限であるとは言い切れない。しかしここでは、これらの調査結果を考慮してWWFシナリオでは、以下のように2050年における最大導入見込み量を設定して、この範囲でシナリオの検討を行った。

表4.15には、日本の自然エネルギーの2013年の実績、ポテンシャル、そしてここで報告するWWFシナリオに用いた数値を示している。WWFシナリオの自然エネルギーの導入見込み量は公表されているポテンシャルの範囲としたが、バイオマスだけが公表されている導入見込み量の数値より大きなものになっている。バイオマスのポテンシャルは公表されておらず、WWFシナリオでは将来的には大きく開発できるという推定にもとづいている。

表4.15 日本の自然エネルギーの実績、ポテンシャル、WWFシナリオの導入見込み量

エネルギー源	2013年（実績）	最大ポテンシャル	WWFシナリオ
水力発電	2073万kW	4606万kW	4606万kW
地熱発電	54万kW	3063万kW	1000万kW
太陽光発電	3340万kW	7億kW以上	4億5000万kW
風力発電（陸上・洋上）	317万kW	16億9800万kW	1億400万kW
波力発電	0	3600万kW	1000万kW
バイオマス発電	409万kW	738万kW	600万kW
バイオマス熱利用	161万TOE	973PJ*	2200PJ

出所：最大ポテンシャルデータ：環境省（2014）およびNEDO（2014）等による。

* バイオマス熱利用の最大ポテンシャルは環境省調査による導入見込み量、TOE＝石油換算トン

第5章 その他ガスについて

CO₂以外の温室効果ガスとしては、メタン、亜酸化窒素 (N₂O)、ハイドロフルオロカーボン (HFC)、パーフルオロカーボン (PFC)、六フッ化硫黄 (SF₆) などがある。これらの温室効果ガスの削減については、表5.1のように環境省から見通しが発表されている。2050年の排出量はCO₂換算6400万トンと推定されている。

表5.1 その他ガスのCO₂換算値

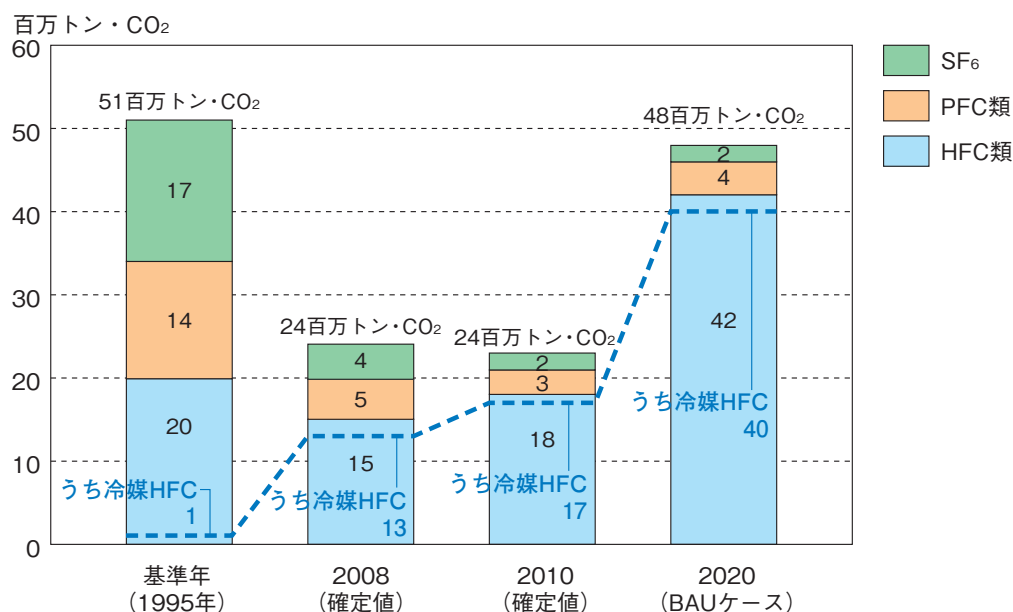
単位：百万トンCO ₂ 換算	基準年	2010年	～	2050年
工業プロセスからのCO ₂	72	42		64
農林水産業 (CH ₄ 、N ₂ O)	32	25		
HFC類、PFC類、SF ₆	51	24		
廃棄物分野 (CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O)	37	36		
合計	192	127		64

出所：環境省（2012a）。本来は、NF3も対象として検討するべきであるが、データ不足のため、今回は除外した。

2050年にはセメント生産などの工業プロセス起源のCO₂はゼロになっているが、二酸化炭素貯留 (CCS) などにより固定されるとしている。

図5.1は、HFC、PFC、SF₆についての排出量の試算を示している。2020年まで増加する

図5.1 その他ガスの試算例



出所：環境省（2012b）

が、2050年までには削減されると想定されている。

WWFシナリオ作成のために、表5.2に、エネルギー起源のCO₂を含めた温室効果ガス全体をとりまとめた。

表5.2 その他のガスを含めた温室効果ガスのCO₂換算排出量

単位：百万トンCO ₂ 換算	1990	2010	～	2050	
エネルギー起源CO ₂	1066.8	1138.8		190	
工業プロセス起源CO ₂	87.6	72.8		0	
その他5ガス	115.8	92.8		64	
合計	1270.2	1304.4		254	1990年比△80%

その他5ガス=CH₄、N₂O、SF₆、HFC、PFC

以下に示すブリッジシナリオ（80%削減シナリオ）と100%自然エネルギーシナリオのいずれにおいても、2050年には温室効果ガスとして、その他ガスのCO₂換算6400万トンの排出が残るものとした。2050年に90年比で80%削減するには、CO₂換算の合計排出量は2億5400万トンにする必要があり、エネルギー起源のCO₂排出量は1億9000万トンに抑えることを目標に設定した。

第6章

WWFシナリオ

自然エネルギーの開発と普及には時間がかかる。日本政府は2050年に温室効果ガスの排出の80%削減を行うことを2010年に閣議決定している。そこでWWFシナリオとしては、「100%自然エネルギーシナリオ」を検討するだけでなく、80%削減シナリオ（以下、ブリッジシナリオという）を検討することにした。これは「100%自然エネルギーシナリオ」の実現につなげてゆくシナリオと考えている。

6.1 ふたつのWWFシナリオの基本的な考え方

「100%自然エネルギーシナリオ」と「ブリッジシナリオ」との基本的な考え方は以下のとおりである。

- 1) 「100%自然エネルギーシナリオ」に対して「ブリッジシナリオ」では、省エネルギー技術と自然エネルギーの導入がやや遅くなることを想定している。将来のエネルギー需要については、「100%自然エネルギーシナリオ」は2010年に比較して半分程度になるが、「ブリッジシナリオ」ではそれほど低下しないものと想定した。

表6.1と図6.1には、BAUシナリオ、活動指数変化のみ、ブリッジシナリオ、100%自然エネルギーシナリオの4つの最終用途エネルギー需要の遷移を示している。BAUシナリオでは、2050年の最終用途エネルギー需要は、2010年比で90%であるが、WWFシナリオで想定している活動指数の変化のみ（効率向上など省エネルギーを含まない）では、2050年の最終用途エネルギー需要は2010年比で81%になるものと想定している。そしてブリッジシナリオでは、効率の向上が20%ほどあり、2050年の最終用途エネルギー需要は61%になる。100%自然エネルギーシナリオでは、効率の向上をさらに見込んで最終用途エネルギー需要は53%まで低下すると想定した。

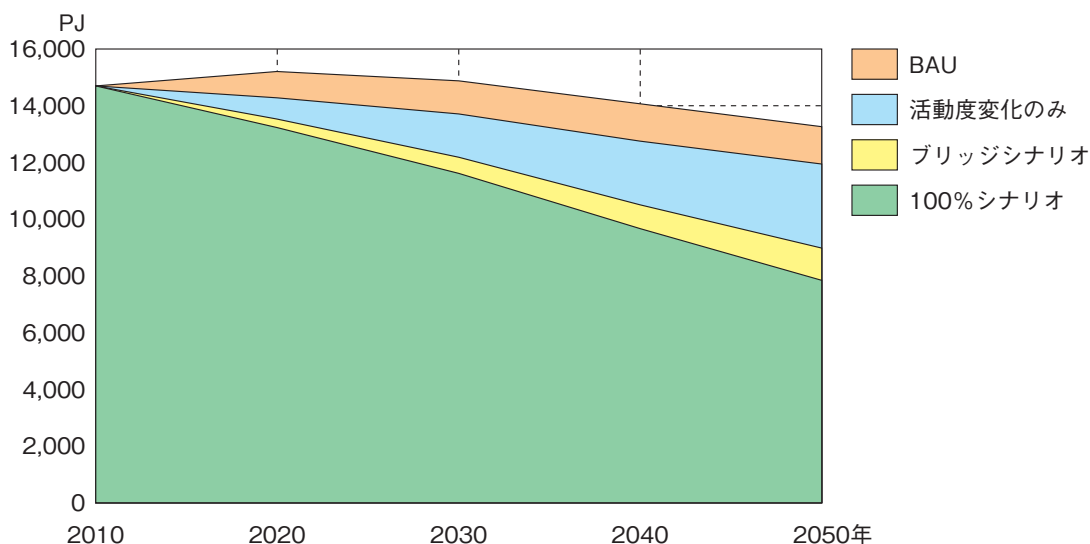
- 2) 「100%自然エネルギーシナリオ」では2050年のエネルギー起源のCO₂排出量はゼロになる。これに対して「ブリッジシナリオ」では、2050年のエネルギー起源のCO₂排出量が1990年レベルの20%になるものとした。このシナリオではCO₂を排出する化石燃料として、石炭、石油、天然ガスをそれぞれの特性に適した用途に使用する。石炭は鉄鋼生産に、石油は産業分野の熱需要や航空燃料などに、ガスは発電バックアップと家庭・業務用の燃料に利用する。

単位エネルギー熱量あたりのCO₂排出が小さいエネルギー源は天然ガスであるが、20%の排出が許容されるシナリオであるので、現実的には用途に応じて石炭や石油を含

表6.1 最終用途エネルギー需要の変化

単位：PJ	2010	2020	2030	2040	2050	2050/2010 (%)
BAUシナリオ	14,698	15,215	14,892	14,084	13,272	90.3
活動指数変化のみ	14,698	14,663	14,010	13,314	11,886	80.9
ブリッジシナリオ	14,698	13,751	12,275	10,858	8,951	60.9
100%シナリオ	14,698	13,398	11,606	9,918	7,822	53.2

図6.1 最終用途エネルギー需要の変化



めた化石燃料が選択されるものとしている。

3) 自然エネルギーの状況をみると熱需要に対する技術の普及に時間がかかりそうである。

いずれのシナリオでも、熱需要に対してはバイオマス、太陽熱、余剰電力+ヒートポンプを利用する。「ブリッジシナリオ」では化石燃料を特に熱需要に向けて利用する。

4) 原子力については、2010年に4000万kW、発電量288TWhであり、これを2020年には1902万kW、発電量108TWhとし、2030年には542万kW、発電量33TWhと想定する。2040年および2050年には原子力は廃止されるので発電量はゼロとした（参考資料参照）。原子力の規模は、「ブリッジシナリオ」でも「100%自然エネルギーシナリオ」でも同様である。

なお、WWFシナリオでは、電力供給において、電力に対する純粋な需要以上の発電を行い、生じた余剰電力を熱・燃料需要にあてることを想定している。具体的には、一部の熱・燃料需要を電化させたり（例：電気自動車）、水電解によって製造した水素を使用したりすることを想定している。こうすることで、自然エネルギーによる供給が難しい熱・燃料分野のエネルギー需要も満たすという考え方をとっている。

以下の説明では、純粋な電力需要に対応した発電量を「純粋電力」と呼び、熱・燃料需要向けの余剰電力も含んだ発電量を「熱・燃料向けを含む電力」と呼ぶ。

6.2 ダイナミックシミュレーション

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、波力）から供給する場合に、1年間の供給可能量を知るためには、気象条件の検討が必要である。太陽光発電や風力発電について、実際にどれだけの容量の設備を準備すればよいのかについては、気象データによる分析を必要とする。

太陽光や風力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。

この検討のため、「ダイナミックシミュレーション」を行って、気象データをもとにした太陽光・風力を中心とする自然エネルギー源と化石燃料電源による1年間（1時間ごと8760時間）の発電量のシミュレーションと電力需要とのマッチングを検討した。

ダイナミックシミュレーションでは、自然エネルギーの供給量が最も大きくなる2050年の電力供給を行う場合を例にとって、以上の問題を検討している。以下では、太陽光と風力の発電量の比をおよそ2：1として規模を設定し、気象データとしては、AMEDAS 2000標準気象データを用いている。この気象データには全国842地点の1年間の1時間ごとの気象データがある。この気象データを用いて1時間ごと1年間のシミュレーションを行った結果、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27.2%になった。なお風力発電の設置サイトは、18%以上の設備利用率を満たす90地点を選択している。

6.3 ブリッジシナリオの一次エネルギー供給構成

ブリッジシナリオの化石燃料構成を以下のように検討した。

温室効果ガスが20%に削減されるので、CO₂排出合計が1億9000万トンCO₂になるものと想定した。化石燃料としては、石炭、石油、ガスをその特性に応じて適切な用途へ利用するものとした。石炭は高炉鉄生産用に、石油は、化学産業をはじめとする各種産業の熱需要や航空燃料に、ガスは家庭・業務部門における熱需要に供給するものとした。

まず石炭需要については、鉄鋼用石炭需要を満たす石炭を検討した。2014年の高炉鉄生産は8458万トン（77%）、そのとき原料炭需要は6187万トン、コークス転換を含んでいる。

2050年の粗鋼生産は8870万トンであり、リサイクル率を60%と想定すると高炉鉄40%（3584万トン）、電炉鉄60%（5322万トン）になる。この3584万トンの高炉鉄生産に必要な原料炭は2622万トンであり、これは1805万トン石油換算に相当する。（原料炭は0.6957 kgOE/kg原料炭）

表6.2 ブリッジシナリオにおける化石燃料とCO₂排出量

項目	石炭	石油	ガス	合計
2010年 (PJ)	4,981	8,819	4,243	18,043
CO ₂ 排出量 (百万トンCO ₂)	402	544	193	1,139
2050年 (PJ)	764	971	1,505	3,239
熱需要向け	764	971	875	2,609
発電用 (ロス含)	0	0	630	630
CO ₂ 排出量 (百万トンCO ₂)	62	60	68	190

残りの化石燃料については、石油とガスでCO₂排出量をほぼ同量ずつ負担するものとした場合の検討結果を表6.2に示した。2050年の消費量は、石炭は764PJ、石油は971PJ、ガスは1505PJとなった。CO₂排出量は、石炭約6200万トン、石油約6000万トン、ガス約6800万トン、合計で1億9000万トンとなっている。

ブリッジシナリオでは、エネルギー需要に化石燃料と自然エネルギーを供給する。太陽光、風力、水力、地熱、波力、バイオマス、バックアップとしてガス火力発電を含めて純粋電力需要よりも大きな電力を生産し、純粋電力需要への供給の余剰を使って、自動車用の電力と水素を供給する。このほかに、熱需要に対してバイオマスと太陽熱を供給するものとして計画している。

表6.3 ブリッジシナリオの一次エネルギー供給構成

単位：PJ	2010	2020	2030	2040	2050
石炭	4,981	4,727	3,605	2,302	764
石油	8,819	8,012	6,092	3,641	971
ガス	4,243	4,365	3,937	3,248	1,505
水力	747	810	873	949	1,215
原子力	2,322	801	207	0	0
地熱	28	33	66	331	552
バイオマス	153	300	744	1,391	1,640
太陽光	20	477	1,422	2,340	3,374
風力	30	158	627	1,046	1,696
波力	0	0	2	118	237
太陽熱	0	20	120	444	600
合計	22,157	19,704	17,696	15,811	12,553

表6.3に示した一次エネルギーは、最終用途に供給されるエネルギーとその転換部分で消費されるエネルギーから計算している。電力は火力発電の効率40%にならって、その物理的な値の2.5倍を一次エネルギーとして計上している（詳細は巻末参考資料を参照）。そして化石燃料の場合には転換部門においてコークス転換や石油精製などの転換ロスを計上している。余剰電力から、EVへの電力供給、FCVへの水素供給を行っている。

図6.2は、ブリッジシナリオの2030年の一次エネルギー構成を示している。2030年の段階では石炭、石油、天然ガスが合計で77%を占めている。太陽光と風力は合計でまだ12%

図6.2 ブリッジシナリオの一次エネルギー供給構成（2030年）

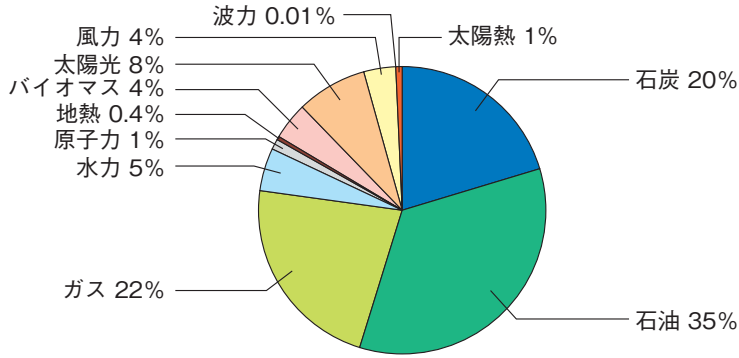
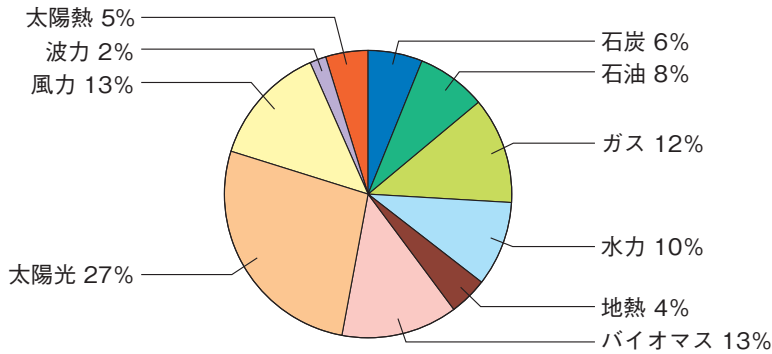


図6.3 ブリッジシナリオの一次エネルギー供給構成（2050年）

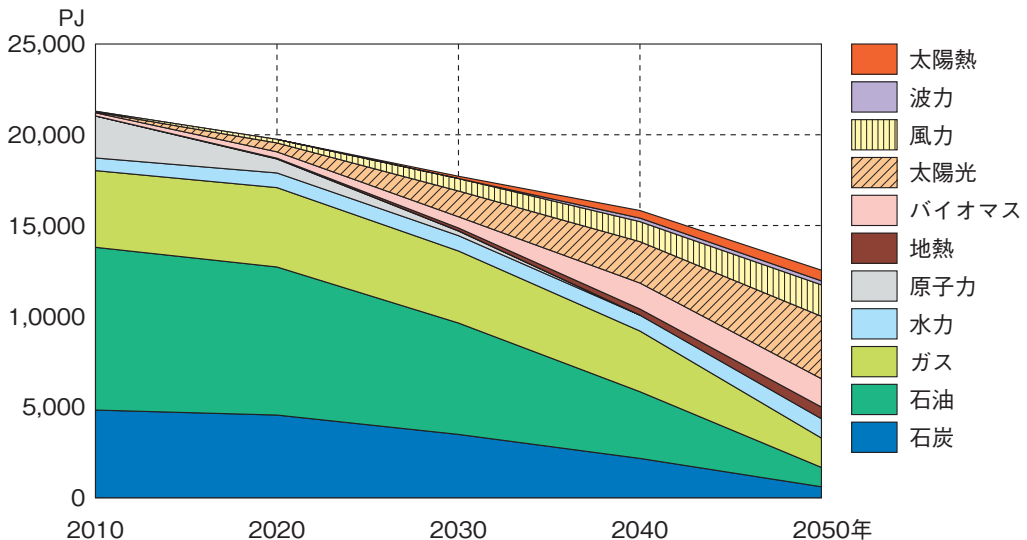


とシェアは大きくないが、これから増加してゆく状況にある。

図6.3には、2050年の一次エネルギー供給構成を示している。石炭、石油、天然ガスの化石燃料合計は26%に低下しており、代わって太陽光と風力の合計は41%に増加している。

図6.4に示すように「ブリッジシナリオ」では、2050年には部分的に化石燃料が利用され、主として熱需要を満たしている。その結果、1990年に比較してCO₂排出量が20%だけ残っている。

図6.4 ブリッジシナリオの一次エネルギー供給構成 遷移図



6.4 ブリッジシナリオの電力供給構成

ブリッジシナリオの電力供給は、表6.4のようにになっている。純粋な電力需要は690TWhであり、これに対して太陽光、風力、水力、地熱、波力、バイオマスなどの自然エネルギーの発電量が供給されるようになってきている。バックアップ電力として、ガス火力発電が10%の電力を供給している。

図6.5に示す電力供給構成の時間経過をみると、2030年まで電力需要が減少しているものの、2030年ごろから増加に転じている。これは、熱・燃料用に供給する電力が増加し始めるためである。この電力は、純粋電力需要への供給にともなって変動する太陽光と風力から生じる余剰電力であり、EVとFCVへ供給する電力と水素、ヒートポンプによる低温熱供給に向けられる。

表6.4 ブリッジシナリオの電力供給構成

単位：TWh	2010	2020	2030	2040	2050
石炭	322	250	190	100	0
石油	107	85	70	60	0
ガス	233	225	180	130	70
水力	83	90	97	110	135
原子力	288	108	33	0	0
地熱	3	4	7	37	61
バイオマス	15	23	32	42	45
太陽光	0	50	98	150	235
風力	0	16	40	66	118
波力	0	0	0	13	26
純粋電力需要への供給計	1,051	850	747	708	691
太陽光（熱・燃料用を含む）	0	3	60	110	148
風力（熱・燃料用を含む）	0	2	30	50	74
熱・燃料用を含む電力計	1,051	855	837	868	901

図6.5 ブリッジシナリオの電力供給構成 遷移図

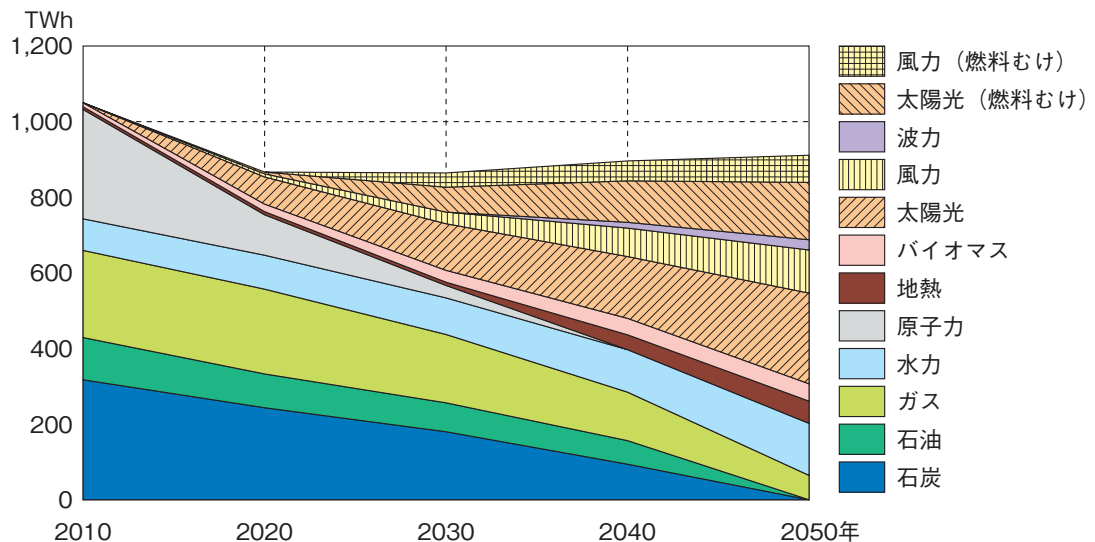


表6.5および表6.6には、2050年の「ブリッジシナリオ」の電力供給のダイナミックシミュレーションの詳細な内容を示している。

純粋電力需要に対して発電量は太陽光57%、風力28%を想定している（熱・燃料用電力を含むため、合計100%を超える）。発電容量は、太陽光3億5930万kW、風力8356万kWになっている。揚水発電を260GWh、バッテリーを300GWh利用している。熱・燃料用電力を含む発電量は930TWhあり、このうち、純粋な電力需要が690TWh、電力貯蔵損失が17TWhあるため、余剰電力は223TWhである。この余剰電力を、EV用電力とFCVのための水素生産、ヒートポンプによる低温熱供給、高温加熱需要に供給する。

表6.5 ブリッジシナリオの電力供給容量と発電量（2050年）

	発電容量 (GW)	発電量 (GWh/年)	シェア (%) *
太陽光発電	359.3	393,235	57.0
風力発電	83.6	194,268	28.2
水力発電	46	135,241	19.6
地熱発電	14	60,997	8.8
波力発電	10	25,999	3.8
ガス火力発電	20	71,341	10.3
バイオマス発電	10	49,053	7.1
合計		930,134	134.8

* 純粋電力需要に対する割合を示している。発電量には、熱・燃料需要に向けられる余剰電力も含むため、合計は100%を超える。

表6.6 ブリッジシナリオの電力供給、蓄電量、余剰電力（2050年）

年間純粋電力需要	GWh/年	689,931
年間平均電力	MW	78,759
ピーク電力需要	MW	121,013
揚水発電/バッテリー容量	GWh	260/ 300
充電量	GWh/年	83,367
放電量	GWh/年	66,338
貯蔵損失	GWh/年	17,519
貯蔵損失/電力需要	%	2.54
最大揚水充電レベル	%	100
平均揚水充電レベル	%	61.05
余剰電力量	GWh/年	223,169
余剰電力量/電力需要	%	32.35
最大余剰電力	MW	221,890

6.5 ブリッジシナリオのCO₂排出量

ブリッジシナリオにおける2050年のCO₂排出量は、石炭から6200万トン、石油から6000万トン、天然ガスから6800万トンとなった（表6.7）。これらの合計は1億9000万トンであり「その他ガス」からの6400万トンを加えると、2億5400万トンになる。これは、1990年のCO₂排出量12億7000万トンの20%に相当する。

表6.7 ブリッジシナリオのCO₂排出量

単位：MtCO ₂	2010	2020	2030	2040	2050
ブリッジシナリオ計	1,304	1,214	961	648	254
石炭	402	382	291	186	62
石油	544	494	376	224	60
ガス	193	199	179	148	68
その他ガス	166	140	115	89	64

図6.6 ブリッジシナリオのCO₂排出量

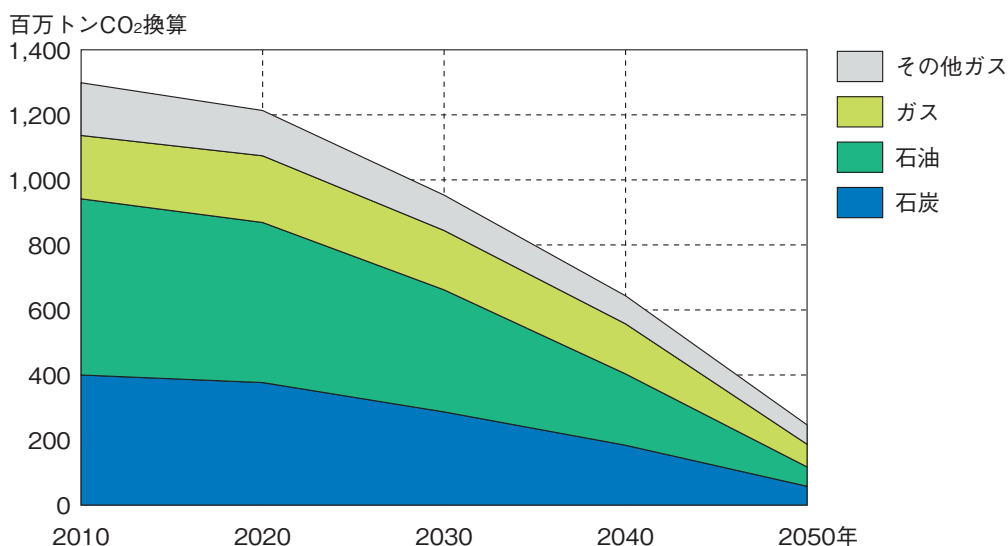


図6.6には、2050年までのCO₂排出量の変化の過程を示している。

6.6 100%自然エネルギーシナリオの一次エネルギー供給構成

「100%自然エネルギーシナリオ」では、エネルギー需要のすべてを自然エネルギーで供給する。「100%自然エネルギーシナリオ」においても、気象データの扱い、太陽光、風力発電を含めたシミュレーションの方法は、「ブリッジシナリオ」で示した方法と同様である。

太陽光、風力、水力、地熱、波力、バイオマスによって純粋電力需要よりも大きな電力を生産し、純粋電力需要への供給の余剰を使って、自動車用の電力と水素、さらに直接的に高温熱需要に、そしてヒートポンプを利用して中低温熱需要に熱を供給する。このほかに、2050年には、熱需要に対して2200PJ（5300万トン石油換算）のバイオマスと、太陽熱600PJを供給するものとして計画している。

産業用エネルギー需要のうち、鉄鋼業の石炭に代わる燃料として水素を想定したが、その技術には未知の点があり、2050年までに実用化されるかは不明であり、化石燃料が残る可能性がある。しかし、鉄鋼生産はリサイクルの割合が増加して70%に達して、電炉生産が大きくなるので、イノベーションが進まず、石炭が必要である場合でも、その量は1966万トン（573PJ）であり、CO₂排出量は4627万トン、2010年のCO₂排出量の4%にとどまる。

表6.8 100%自然エネルギーシナリオの一次エネルギー供給構成

単位：PJ	2010	2020	2030	2040	2050
石炭	4,981	4,076	2,814	1,443	0
石油	8,819	7,474	5,009	2,657	0
ガス	4,243	3,682	2,380	1,278	0
水力	747	810	873	949	1,215
原子力	2,322	801	207	0	0
地熱	28	33	66	331	552
バイオマス	153	938	1,500	1,778	2,200
太陽光	20	794	2,890	3,900	4,319
風力	29	397	1,260	1,946	2,167
波力	0	0	2	118	237
太陽熱	0	20	120	444	600
合計	22,157	19,025	17,122	14,844	11,287

100%シナリオの一次エネルギー構成を図6.7と図6.8に示している。図6.7には2030年の供給構成を示している。ここで化石燃料は、石炭17%、石油29%、ガス14%であり、合計で60%になっている。太陽光は17%、風力は7%である。

図6.8には2050年の供給構成を示している。化石燃料はゼロとなり、太陽光38%、風力19%、バイオマス20%、地熱が5%となっている。

図6.7 100%シナリオの全エネルギー供給構成（2030年）

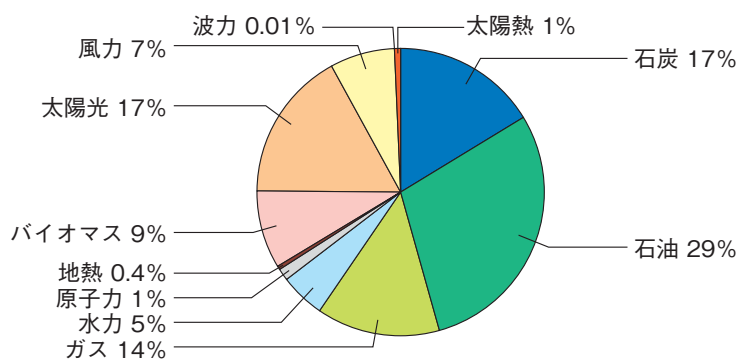


図6.8 100%シナリオの全エネルギー供給構成（2050年）

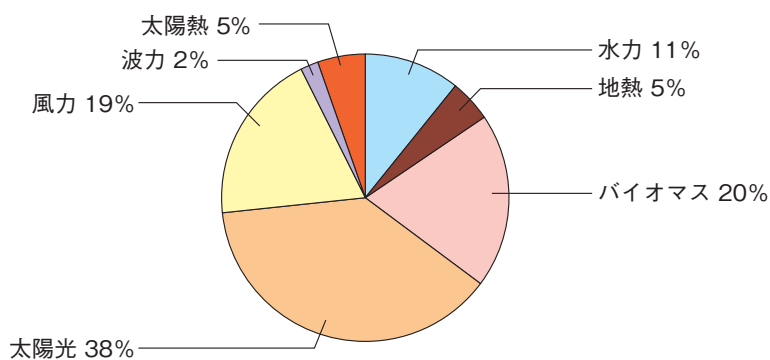


図6.9 100%シナリオの一次エネルギー供給 遷移図

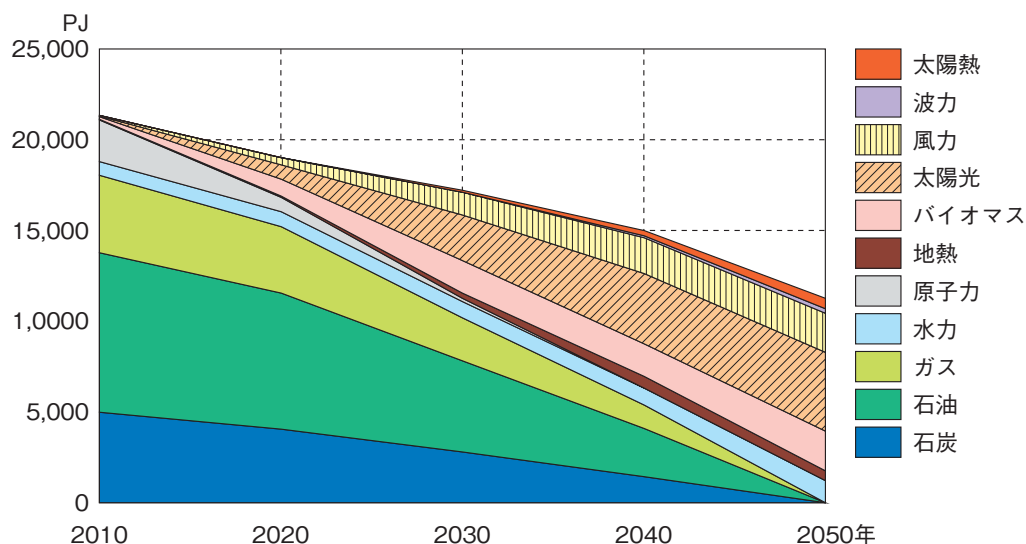


図6.9には100%シナリオの一次エネルギー供給の遷移を示している。2050年に向かって石炭、石油、ガスに代わって自然エネルギーが増大してゆく様子を示している。

6.7 100%自然エネルギーシナリオの電力供給構成

表6.9と図6.10には、100%シナリオの電力供給構成を示している。

人口減少や効率のよい技術の普及により電力需要の減少が生じるので、需要は小さくなってゆくが、2020年ごろから、電力供給容量が増加し始める。これは燃料用電力の供給のために、余剰電力を供給する太陽光と風力が増加することによるものである。

表6.9 100%自然エネルギーシナリオの電力供給構成

単位：TWh	2010	2020	2030	2040	2050
石炭	322	250	190	66	0
石油	107	90	70	55	0
ガス	233	210	180	100	0
水力	83	90	97	105	135
原子力	288	108	33	0	0
地熱	3	4	7	37	61
バイオマス	15	23	32	42	45
太陽光	0.03	50	98	150	235
風力	0.05	16	40	66	118
波力	0	0	0	13	26
純粋電力需要への供給計	1,051	840	747	635	621
太陽光（熱・燃料用を含む）	0	15	80	160	245
風力（熱・燃料用を含む）	0	8	40	95	122
熱・燃料用を含む電力計	1,051	863	867	889	988

図6.10 100%自然エネルギーシナリオの電力供給 遷移図

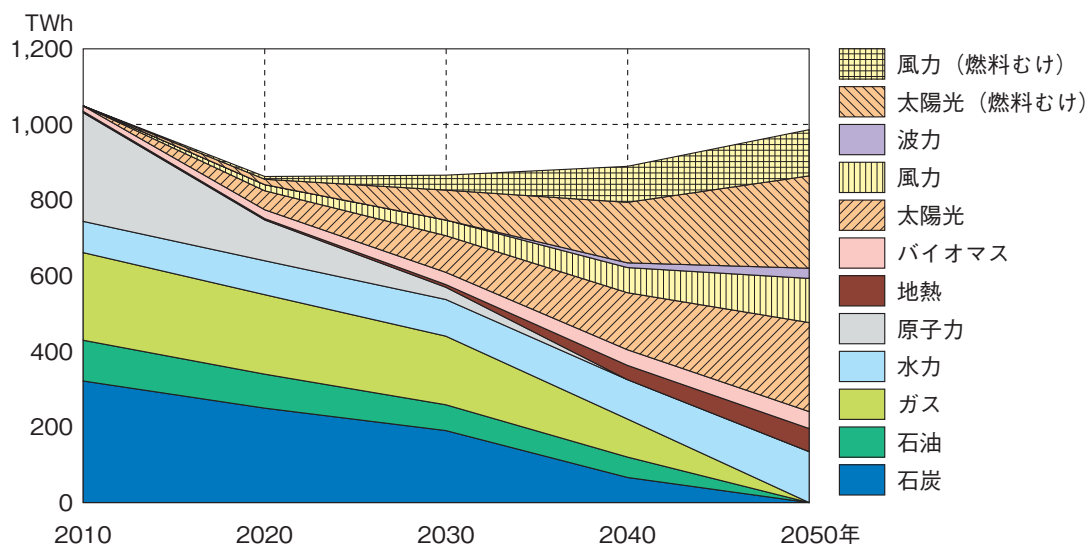


表6.10および表6.11には2050年の電力供給のこのシミュレーション結果の詳細を示している。純粋な電力需要は1000TWhであり、純粋な電力向けの需要は620TWhであるが、熱・

表6.10 100%自然エネルギーシナリオの電力供給容量と発電量（2050年）

	発電容量 (GW)	発電量 (GWh/年)	シェア (%) *
太陽光発電	444.7	486,696	79.3
風力発電	104.1	242,027	39.04
水力発電	46	135,241	21.81
地熱発電	10	60,997	14.03
波力発電	10	25,999	4.19
ガス火力発電	0	0	0
バイオマス発電	10	49,056	7.91
合計		1,000,016	166.28

* 純粋電力需要に対する割合を示している。発電量には、熱・燃料需要に向けられる余剰電力も含むため、合計は100%を超える。

表6.11 100%自然エネルギーシナリオの電力供給、蓄電、余剰電力（2050年）

年間純粋電力需要	GWh/年	619,946
年間平均電力	MW	70,770
ピーク電力需要	MW	108,738
揚水発電/バッテリー容量	GWh	260/ 300
充電量	GWh/年	63,809
放電量	GWh/年	49,968
貯蔵損失	GWh/年	13,908
貯蔵損失/電力需要	%	2.24
最大揚水充電レベル	%	100
平均揚水充電レベル	%	71.17
余剰電力量	GWh/年	366,226
余剰電力量/電力需要	%	59.07
最大余剰電力	MW	289,381

燃料需要に向ける電力量も含めると1000TWhとなる。これを供給するのに、太陽光79%、風力39%を利用している。平均電力需要7077万kW、太陽光発電4億4470万kW、風力発電1億400万kWを利用している。加えて、揚水発電260GWh、バッテリー300GWhを使用している。

熱・燃料用を含めた発電量合計は純粋電力需要の166%、揚水発電やバッテリー利用時の電力貯蔵損失が14TWhあるため、余剰電力は366TWhとなっている。この余剰電力をEV用電力、FCV用水素、中低温および高温熱需要に供給する。中低温熱需要には、COP（成績係数）3.0以上のヒートポンプを利用して高効率な熱供給を行う。

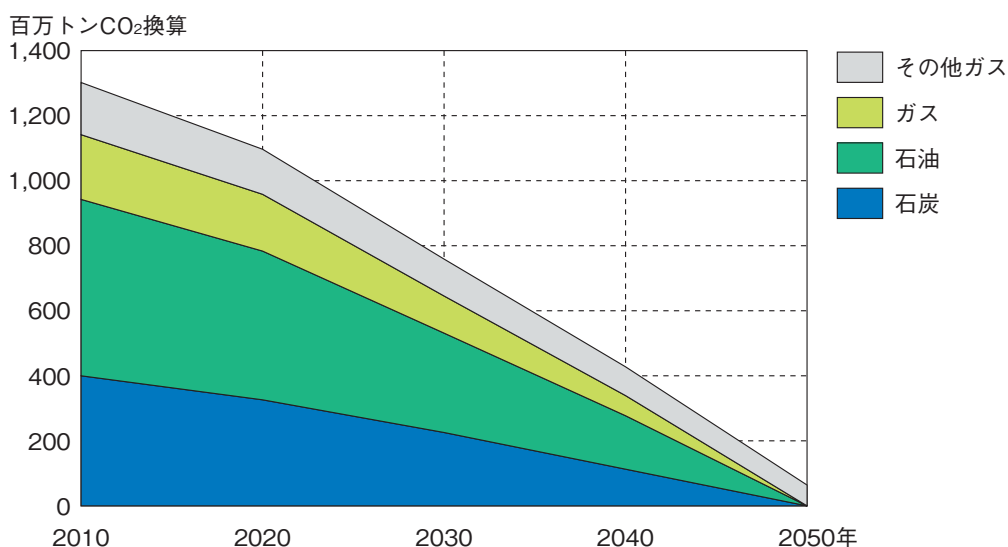
6.8 100%自然エネルギーシナリオのCO₂排出量

100%自然エネルギーシナリオでは、2050年のCO₂排出量は、「その他ガス」の6400万トンCO₂換算のみである。図6.11にみるように、CO₂排出量は2050年までゆるやかに減少してゆく。

表6.12 100%自然エネルギーシナリオのCO₂排出量

単位：百万トンCO ₂ 換算	2010	2020	2030	2040	2050
100%シナリオ計	1,304	1,098	759	428	64
石炭	402	329	227	117	0
石油	544	461	309	164	0
ガス	193	167	108	58	0
その他ガス	166	140	115	89	64

図6.11 100%自然エネルギーシナリオのCO₂排出量



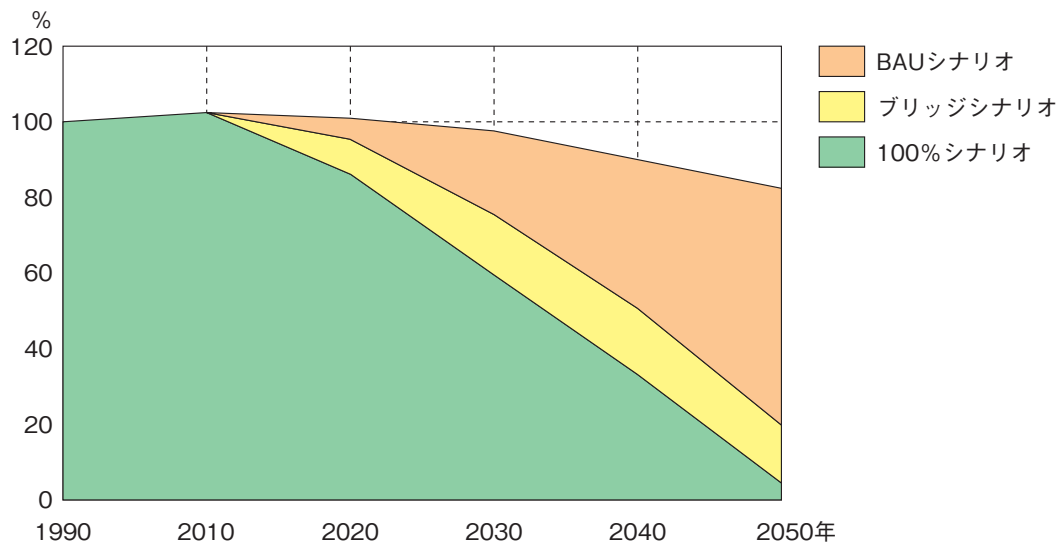
6.9 各シナリオの温室効果ガス（GHG）削減率

BAUシナリオ、ブリッジシナリオ、100%自然エネルギーシナリオのGHG排出量とGHG削減率を示すと、表6.13、図6.12のようになっている。1990年から2050年にかけて、BAUシナリオでは17%の削減（90年の83%に）となっているのに対して、ブリッジシナリオでは80%削減（90年の20%に）へ、100%シナリオでは95%削減（90年の5%に）する結果になっている。

表6.13 各シナリオのGHG排出量とGHG削減率

GHG排出量（百万トンCO ₂ 換算）	1990	2010	2020	2030	2040	2050
BAUシナリオ	1,270	1,304	1,286	1,245	1,149	1,052
ブリッジシナリオ	1,270	1,304	1,214	961	648	254
100%シナリオ	1,270	1,304	1,098	759	428	64
削減率（%）	1990	2010	2020	2030	2040	2050
BAUシナリオ	100	102.7	101.2	98.0	90.5	82.9
ブリッジシナリオ	100	102.7	95.6	75.6	51.0	20.0
100%シナリオ	100	102.7	86.4	59.8	33.7	5.0

図6.12 各シナリオのGHG削減率の推移



第7章

CO₂削減コストの検討

ここでは、将来のエネルギー価格を概観し、WWFシナリオにおけるエネルギー価格の想定を行い、また現在進行している太陽光発電のコスト低下の様子を紹介し、さらにCO₂削減コストカーブについて検討している。

7.1 エネルギー価格の将来

将来のエネルギー価格は、省エネルギーを検討するとき重要な要素になる。一般にエネルギー価格が高くなれば省エネルギーが進展する。

公的なエネルギー価格予測の例は、表7.1のように①米国エネルギー省EIAのデータ、②アジア世界エネルギーアウトック（BAUシナリオ）、③World Energy Outlook IEA 2016がある。いずれも2040年までの1バレルあたりの石油価格であるが、2050年については示されていない。

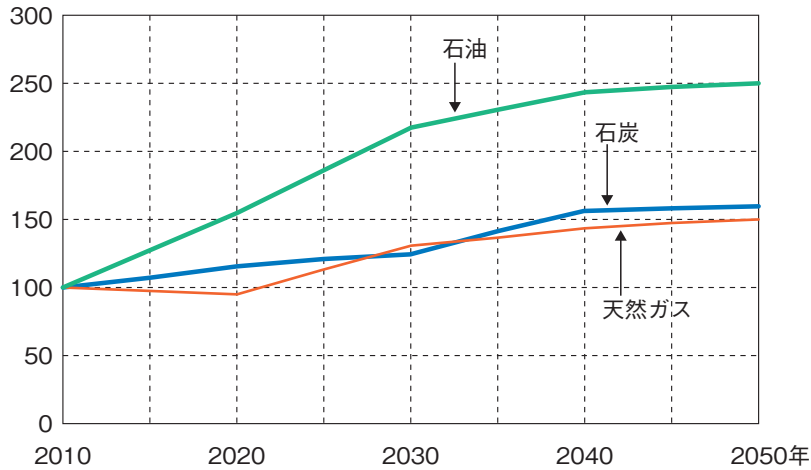
表7.1 代表的な石油価格の予測（単位：ドル/バレル）

① US/DOE EIA 2016	2012	2020	2030	2040	2040/2012 (%)
参照ケース	113	79	106	141	125
低位ケース	113	58	69	76	67
高位ケース	113	149	194	252	223
② アジア世界エネルギーアウトック	2015	2020	2030	2040	2040/2015 (%)
参照ケース	60		100	125	208
低位ケース	60		75	80	133
③ World Energy Outlook IEA 2016	2015	2020	2030	2040	2040/2015 (%)
現行政策シナリオ	51	82	127	146	286
新政策シナリオ	51	79	111	124	243
450シナリオ	51	73	85	78	153

2040年の石油価格の予測の範囲は、現状の2015年と比較して低いケースでは0.67倍から、高位シナリオでは2.86倍になっている。ここではBAUとして、③World Energy Outlook (IEA) の新政策シナリオを参照することにする。石油価格は2040年に2015年の2.43倍になる。またこの新政策シナリオの石炭とガスの価格を参照値とした。2050年については傾向を外挿して石油価格は現状のおよそ2.5倍になるものと推定した。

図7.1には、想定する化石燃料の価格を示している。2040年までのデータしか入手でき

図7.1 想定するエネルギー価格（2010年を100とした場合）



出所：IEA（2016）よりシステム技術研究所作成

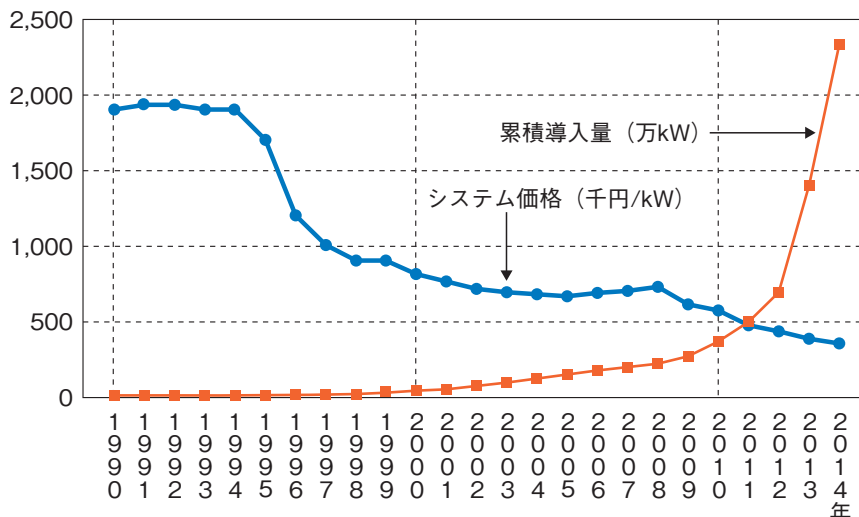
ないため、2050年の値は、外挿したものである。図7.1では、2010年の価格を100とした比を示しているの、2050年の石炭とガスの価格が同程度に見えるが、熱量あたり価格では、石油とガスは石炭のおおよそ4倍以上である。

7.2 太陽光発電システムのコスト低下

太陽光発電については、1979年から2015年までのコストの低下状況を数量的に分析することができる。図7.2には、1998～2015年度（最近の17年間）における総出荷量とシステムコストの様子を示している。2000年から2007年ごろまではコスト低下は停滞していたが、2008年以後はふたたび大きなコスト低下を示している。

学習曲線の分析によって進歩指数（習熟率）を求めることができる。進歩指数は、累積生産量が2倍になったときのコストの低下状況を示すものである。過去のコスト低下曲線

図7.2 太陽光発電システムの価格と累積導入量（1990～2014年）

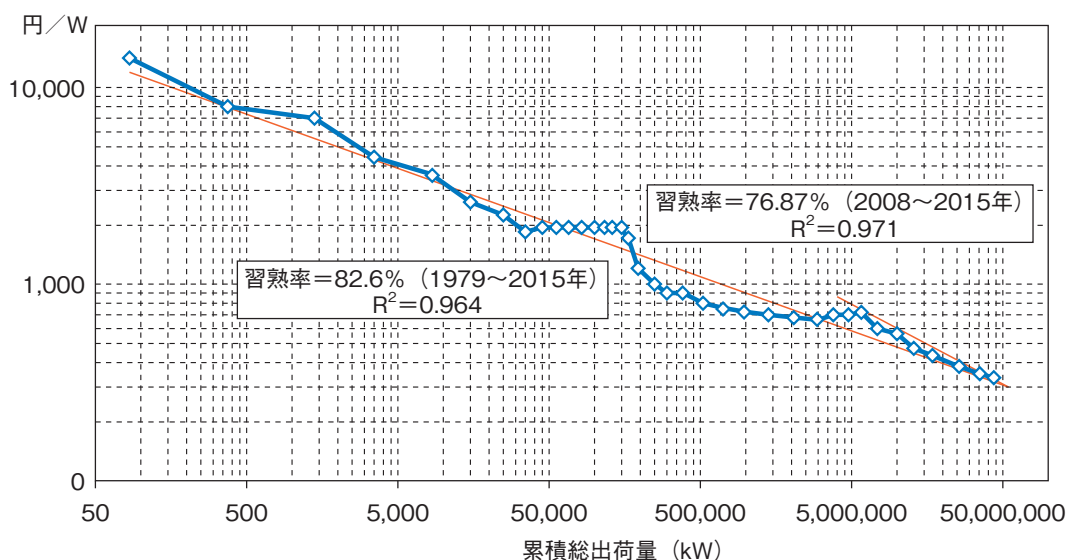


の分析から得られた進歩指数は、**図7.3**に示すように1979～2015年には82.6%、2008～2015年には76.87%になっている。この進歩指数の値を将来の太陽光発電システムコストを検討した。

2008～2015年の進歩指数76.87%の回帰式を将来に適用した結果を**図7.4**に示している。累積生産量は2014年に35GWに達しているが、今後、累積総出荷量が200GW（2億kW）まで増大した場合にはシステムコストは17.7万円/kWに低下することを示している。

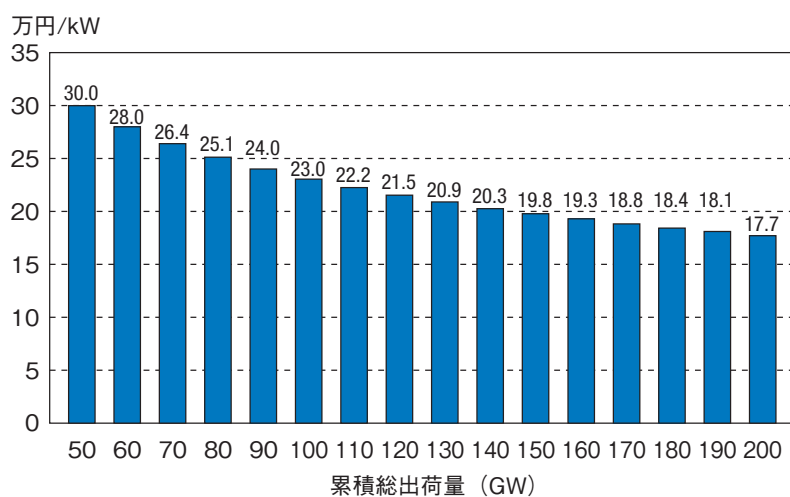
海外の太陽光発電システムコストの低下が進展しており、日本でもこれよりも早くこのコストに到達するものと思われる。

図7.3 太陽光発電システムのコストと太陽電池モジュールの総出荷量 (1998～2015年)



出所：槌屋（2016）

図7.4 将来の累積総出荷量とPVシステムコストの予測



7.3 削減コストカーブ

削減コストカーブまたはサプライカーブは、CO₂削減のための代替エネルギー（省エネと自然エネルギー）の費用について評価するものとして知られている。

削減コストカーブでは、縦軸にエネルギー代替コストをとり、コストの小さい技術（一般には小さいものはマイナスになる）から大きな技術へと順に示してゆく。そのとき対応する横軸には、その技術が代替するエネルギー量（またはCO₂削減量）を累積的に表示する。この結果、あるコストが与えられれば、そのコストの範囲で可能な合計削減量がわかるという形になっている。

コストカーブの計算方法は以下のように行われている。

ある技術について縦軸に示す削減コスト（A）は回収年数をN年とするとき、以下の式から計算する。

$$\text{削減コスト (A)} = (\text{初期投資額の差} / \text{回収年数 (N)} - \text{省エネ後の年間費用の差}) / \text{1年間に削減されるCO}_2$$

例として、

年間に1万km走行するガソリン車が10km/Lの燃費で、年間1000Lの消費、これをハイブリッドカーにして25km/Lの燃費になれば、年間消費量は400Lになる。ハイブリッドカーとガソリン車の初期投資費用の差を50万円、回収年数（N）を5年、ガソリン代を120円/L、ガソリンのCO₂排出量を2.3kgCO₂/Lとする、

$$\text{省エネ後の年間費用の差} = (1000 - 400) \text{ L} \times 120 \text{ 円/L} = 72000 \text{ 円}$$

$$\text{初期投資額の差} / \text{回収年数} = 500000 \text{ 円} / 5 \text{ 年} = 100000 \text{ 円}$$

$$\text{削減CO}_2\text{の量} = (1000 - 400) \text{ L} \times 2.3 \text{ kg/L} = 1380 \text{ kgCO}_2\text{であるので}$$

金利（割引率）を考慮しなければ、

$$\text{削減CO}_2\text{コスト (A)} = (100000 - 72000) / 1380$$

$$= 20.29 \text{ 円/kgCO}_2 = 20,290 \text{ 円/トンCO}_2$$

これがコストカーブの縦軸を表しているものである。横軸には削減量として、ハイブリッドカーが1000万台あれば、1380万トンCO₂の削減量を横幅で示している。

7.4 削減コストカーブの作成

WWFシナリオで検討したいくつかの技術について、以下のようにCO₂削減コストカーブを作成した。回収年数を3年、および3～10年としたふたつの結果を図7.5と図7.6に示した。

表7.2には、計算するにあたって設定した条件を示している。

図7.5は、回収期間を3年としたものであり、削減コストを2万円/CO₂トンとするときに削減可能なCO₂は1億5000万トンになる。

図7.5 CO₂削減コストカーブ（回収年数3年）

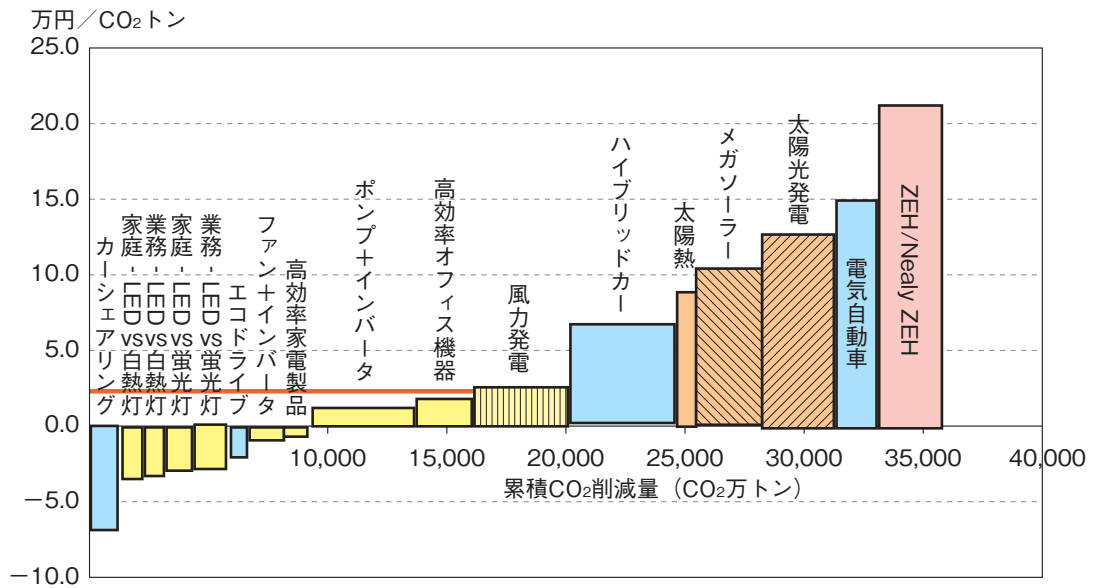


図7.6 削減コストカーブ（回収年数：ZEH10年、機器類5年、自然エネルギー10年、その他3年）

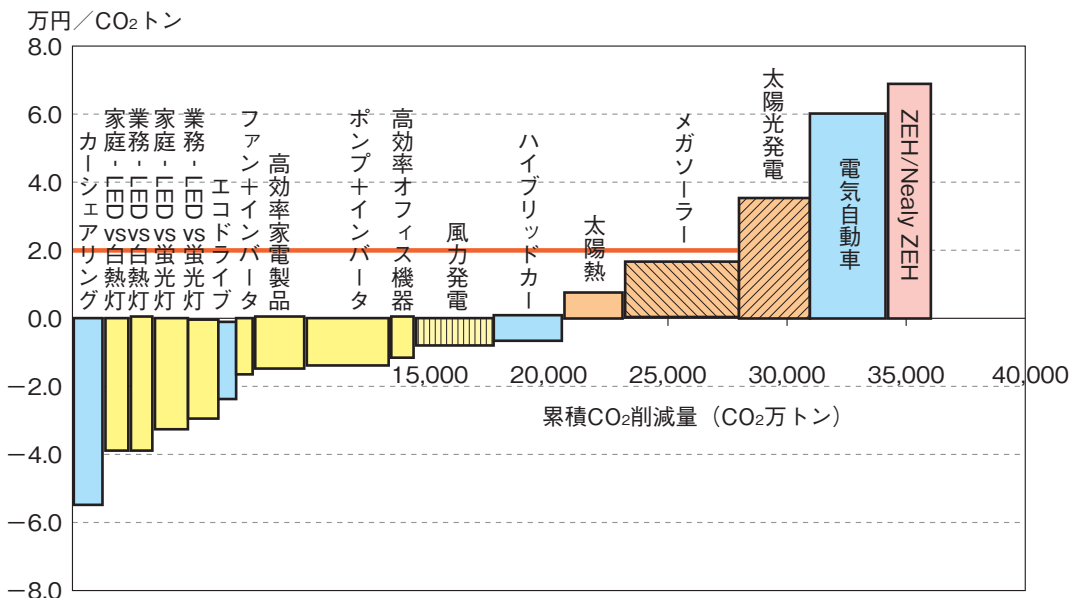


表7.2 CO₂削減コストカーブの概要（回収年数3年）

回収期間 3年	CO ₂ 削減コスト (参照) (万円/CO ₂ トン)	全国規模の CO ₂ 削減量 (万トン)	累積CO ₂ 削減量 (万トン)	設定条件
カーシェアリング	-7.38	715	715	自動車の5%に適用、80%削減
家庭 - LEDvs白熱灯	-3.94	562	1,276	60W白熱灯を6WのLEDに代替
業務 - LEDvs白熱灯	-3.94	549	1,825	60W白熱灯を6WのLEDに代替
家庭 - LEDvs蛍光灯	-3.23	1001	2,826	20W蛍光灯を6WのLEDに代替
業務 - LEDvs蛍光灯	-3.23	1677	4,503	20W蛍光灯を6WのLEDに代替
エコドライブ	-2.73	232	4,735	1000万台に適用
ファン+インバータ	-0.43	1799	6,534	ファンに適用、効率2倍
高効率家電製品	-0.14	825	7,359	30%の効率向上
ポンプ+インバータ	1.19	5349	12,707	ポンプに適用、効率2倍
高効率オフィス機器	1.88	2750	15,457	30%の効率向上
風力発電	2.23	3758	19,215	3000万kW、20万円/kW
ハイブリッドカー	6.37	4176	23,391	ガソリン車+50万円、3000万台
太陽熱	8.76	169	23,561	給湯需要の20%を代替
メガソーラー	10.25	3373	26,933	5000万kW、27万円/kW
太陽光発電	12.54	3469	30,402	3kW、2000万戸に設置
電気自動車	15.09	1933	32,335	ガソリン車+120万円、1000万台
ZEH/Nearly ZEH	21.41	2475	34,810	追加分380万円、500万戸
燃料電池車	185.97	696	35,506	ガソリン車+400万円、1000万台

図7.6は、回収期間を技術ごとに考慮して3～10年として計算したものであり、その結果は、削減コストを2万円/CO₂トンとするときに削減可能なCO₂は2億7000万トンになる。

このように回収年数を変化させると、削減コストは大きく変化する。この理由は、コストカーブがいくつもの仮定によって計算されるためである。

削減コストカーブ中に示した赤い直線は、コストが2万円/CO₂トンになるところを示している。このコストを目安にして議論する場合には、赤線よりも下側にある技術は「現実的」な投資とみなされるので、実際の削減可能な量を知ることができる。

削減コストカーブは、このように計算することができるが、回収年数の設定が結果を左右することがわかる。また計算のなかで仮定することが多いので不透明になりやすい。巻末にこの問題点についての分析を示した。

第8章

費用算定[※]

この章では上記2つのWWFシナリオ「ブリッジシナリオ」と「100%自然エネルギーシナリオ」について、2010年から2050年にいたる設備投資（CapEx）、運転費用（OpEx）、正味費用（Net）を計算し、必要な費用を検討している。

8.1 エネルギー価格

石炭、石油、天然ガスの価格は2016年のEIA（米国エネルギー省情報局）の想定を用いて、これをBAUエネルギー価格とした。この想定は、エネルギー価格が2050年に向かって上昇してゆくものとしている。省エネルギーと自然エネルギーの費用計算には、BAUエネルギー価格をシナリオの対照評価用に使用している。

8.2 費用算定の方法

以下のような方法で2つのWWFシナリオの省エネルギー費用と自然エネルギーの費用を検討している。

- ①設備投資（CapEx）
- ②運転費用（運転維持費用－省エネまたは代替エネルギーにより回収される金額）（OpEx）
- ③正味費用（設備投資金額＋運転費用）（Net）

設備投資は、BAUシナリオの省エネルギーに対する追加の省エネルギー費用、および太陽光発電などの初期投資の費用を意味している。

運転費用には、まず省エネ設備の運転や、自然エネルギー設備の運転に必要な運転維持費用がある。これから、省エネルギーや自然エネルギー（太陽光や風力発電など）によって削減または代替される化石燃料などの費用を差し引いたものである。これは代替される対象のBAUシナリオの運転費用に相当する。なお金利は考慮していない。

各年について、正味費用を以下のように計算する。

正味費用（Net）＝ 設備投資（CapEx）＋ 運転費用（OpEx）である。

[※] 本章における費用算定の詳細は別冊『脱炭素社会に向けた長期シナリオ2017（補足資料：費用算定編）』を参照されたい（www.wwf.or.jp/re100_2017/）。

設備投資は正の数値であるが、運転費用は省エネまたは自然エネルギーでのエネルギー費用代替により回収される金額を差し引くため、多くの場合はマイナスになる。したがって、一般に投資が適切なものであれば、正味費用は初期の設備投資のため当初はプラスの値であるが、次第に減少してゆき、多くの場合、2050年にいたる以前にマイナスの値になる。これは、設備投資が回収されるだけでなく、利益となることを意味している。

本報告では、利用可能なデータの制限から、各エネルギー需要部門において、代表的な対策・技術の費用を算定することによって、当該部門の費用を推計している。

8.3 省エネルギー費用

費用の推定は、産業、家庭、業務、運輸部門における代表的なエネルギー最終用途についてWWFシナリオの省エネルギー技術の費用を検討した。省エネルギー費用の計算にあたっては、シナリオを実現するために必要な総費用ではなく、BAUシナリオと比較してどれだけの費用が追加的に必要かに着目して計算した。ただし、産業部門の費用についてはBAUシナリオとの比較ではなく、活動指数のみ変化したシナリオと比較して追加的に必要な費用を示している。

8.4 自然エネルギーの費用

自然エネルギーとして、太陽光発電、風力発電、地熱発電、水力発電、太陽熱、バイオマスについてその費用を算定した。「ブリッジシナリオ」と「100%自然エネルギーシナリオ」における自然エネルギーの導入量をもとにエネルギー価格を計算した。一方、BAUシナリオのエネルギー供給構成を使ってエネルギー価格を算出して、WWFシナリオの価格との差を費用として計上している。

8.5 費用算定のまとめ

ふたつのシナリオの費用を、省エネルギーと自然エネルギーについてまとめると表8.1のようになった。

それぞれのシナリオの費用構成は以下のような数値になっている。

100%自然エネルギーシナリオ

2010年から2050年までの40年間の設備投資は、省エネルギーに191兆円、自然エネルギーに174兆円、合計で365兆円であり、運転費用は省エネルギー－281兆円、自然エネルギーが－168兆円、合計で－449兆円である。正味費用は省エネルギー－90兆円、自然エネルギー＋5.9兆円、合計－84兆円となった。省エネルギーの導入がきわめて有効であることを示している。自然エネルギー投資の正味費用の合計がプラスになっているが、この投資は2050年以降に回収される。

表 8.1 省エネルギーと自然エネルギー設備投資・運転費用・正味費用

単位：兆円	100%自然エネルギーシナリオ			ブリッジシナリオ		
	設備投資 CapEX	運転費用 OpEX	正味費用 Net	設備投資 CapE	運転費用 OpEX	正味費用 Net
産業部門 省エネ	26.3	-88.9	-62.6	20.2	-72.1	-51.9
家庭部門 断熱化	41.5	-39.6	1.9	34.0	-37.4	-3.4
照明	2.6	-9.6	-7.1	2.4	-4.8	-2.4
エアコン	2.1	-5.9	-3.7	1.7	-4.8	-3.0
業務部門 省エネビル	16.1	-14.6	1.5	12.9	-11.6	1.2
照明	5.1	-4.4	0.7	5.1	-4.4	0.7
輸送部門 自動車	97.4	-117.6	-20.2	80.1	-107.3	-27.2
省エネ合計	191.1	-280.5	-89.5	156.4	-242.2	-86.1
純電力用 太陽光	53.4	-31.7	21.7	53.4	-31.7	21.7
陸上風力	6.1	-9.2	-3.2	6.1	-9.2	-3.2
洋上風力	8.0	-8.7	-0.7	8.0	-8.7	-0.7
燃料用電力	76.7	-52.6	24.1	44.8	-30.2	14.7
太陽熱	8.9	-40.2	-31.3	8.9	-40.2	-31.3
地熱	6.2	-7.4	-1.2	6.2	-7.4	-1.2
水力	15.1	-18.5	-3.4	15.1	-18.5	-3.4
自然エネルギー合計	174.4	-168.4	5.9	142.5	-146.0	-3.5
省エネ+自然エネ合計	365.4	-448.9	-83.5	298.9	-388.4	-89.5
年間平均	9.1	-11.2	-2.1	7.5	-9.7	-2.2

ブリッジシナリオ

2010年から2050年までの40年間の設備投資は、省エネルギーに156兆円、自然エネルギーに143兆円、合計で299兆円であり、運転費用は省エネルギーが-242兆円、自然エネルギーが-146兆円、合計で-388兆円である。正味費用は省エネルギーが-86兆円、自然エネルギーが-3.5兆円、合計で-90兆円である。

「100%自然エネルギーシナリオ」に対して、「ブリッジシナリオ」の省エネルギー設備投資と自然エネルギー設備投資はともにおよそ80%となっている。

今回の算定は、WWFシナリオに必要な費用の主要部分を扱ったが、すべての費用を分析したものではない。省エネルギーと自然エネルギーにかかる主要な費用について検討したものである。

第9章

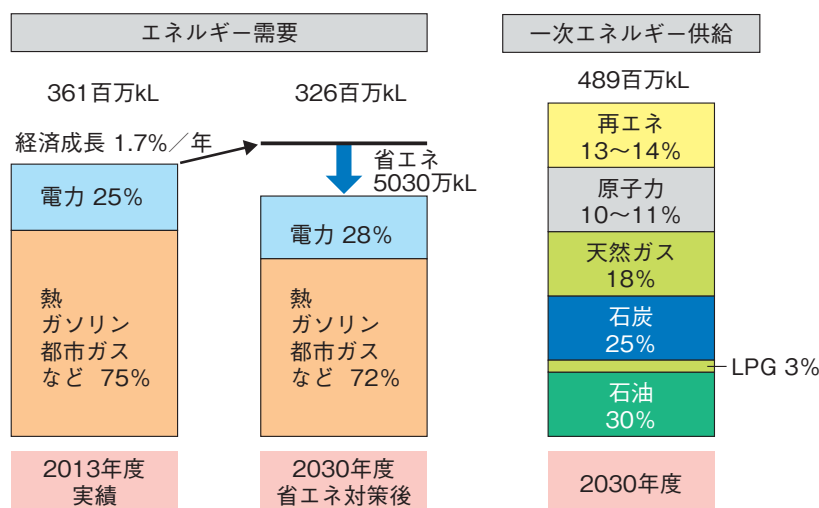
なぜ政府シナリオより大きく削減できるのか

政府の長期エネルギー需給見通しは数年おきに見直されており、最新の見通しは2015年に発表されている。この内容は、2030年までに2013年比で温室効果ガスを26%削減するという案を示している。この目標値は、「パリ協定」にもとづいて日本政府から国連事務局に提出されている。しかし、この削減の目標値は、他の国の草案と比較すると削減幅の小さいものとなっている。

9.1 政府の長期エネルギー需給見通し

政府の長期エネルギー需給見通しでは、2013年から2030年まで、経済成長率が1.7%と想定している。2030年には一次エネルギー供給は4億8900万kL（原油換算）、エネルギー需要は2013年に比較して省エネルギーで13%減少する。供給構成としては再性可能エネルギー13～14%、原子力10～11%、天然ガス18%、石炭25%、石油30%、LPG 3%。CO₂の削減は2013年比でマイナス26%を目標にしている（図9.1）。

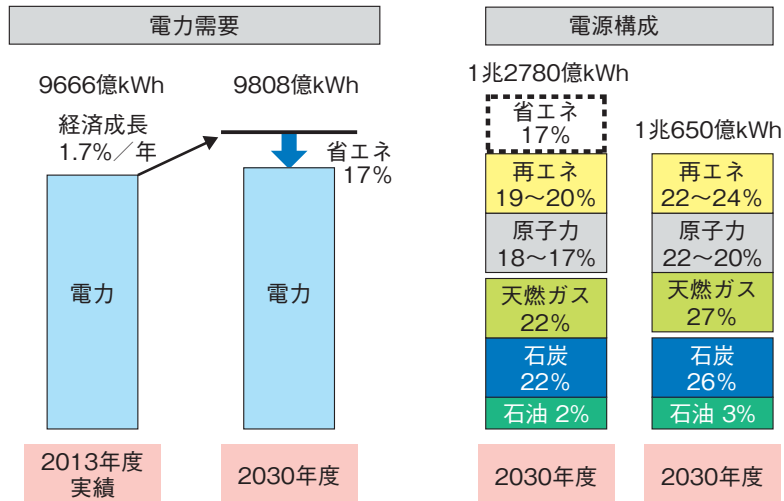
図9.1 政府の長期エネルギー需給見通し（一次エネルギー／単位：原油換算）



出所：経済産業省（2015）

電力については2030年には2013年に比較して17%の省エネ、自然エネ22～24%（太陽光7%、風力1.5%など）、原子力22～20%の構成割合としている。実際に運転可能か不明な原子力と、CO₂排出の大きな石炭火力がかなりの割合を占めている（図9.2）。

図9.2 政府の長期エネルギー需給見通し（電力／単位：TWh）



出所：経済産業省（2015）

9.2 WWFシナリオと日本政府の長期エネルギー需給見通しとの比較

WWFシナリオと日本政府の長期エネルギー需給見通しとの比較を示すと以下のようになる。

政府の見通しの『エネルギー需要面』については、

- 1) 将来の人口減少によりエネルギー需要が減少する可能性が考慮されていない。

WWFシナリオでは、人口の減少が様々な物質資源を消費する経済活動の減少につながり、活動指数の変化のみでエネルギー需要がおおよそ80%に減少することを想定している。

- 2) 省エネルギーについては2030年にBAU比で13%と小さな数字になっている。政府が効率の高い技術の普及を推進する目標を示すことが重要である。目標が示されれば、企業の技術者たちは開発に集中でき、実際に省エネルギーが広く行われるはずである。またすでに多くの省エネ技術は確立されていることを踏まえると、2050年までの33年間に省エネルギー技術が浸透すれば、エネルギー需要は人口減少を原因とする活動指数の変化とは独立に20～30%減少を見込めると考える方がより自然である

- 3) 政府の試算では産業分野のエネルギー消費の30%を占める鉄鋼業において、人口減少にもかかわらず、粗鋼生産量を2010年よりも20%増しの1億2000万トンを見込んでいる。都市鉱山化している日本のような先進国では、鉄スクラップの発生量のさらなる増加が見込まれ、リサイクル率は上がっていくと考えるのが妥当であるのに対し、依然として低く想定している。一部の業界団体の生産量見込みをそのまま受け入れる形での政府のエネルギー見通しは、そもそも排出量の想定が過大であると言わざるを得ない。

政府の見通しの『エネルギー供給面』については、

- 4) 政府の自然エネルギーの将来導入規模は関連の産業団体である、太陽光発電協会（JPEA）の報告や日本風力発電協会（JWPA）の2030年ビジョンより小さな数字を掲げ

ている。政府はなぜ、関連の産業団体である、JPEAやJWPAの見通しを評価しないのだろうか。他の業界団体の見込み量をそのまま受入れていることと比べると違和感が否めない。こういった恣意的な想定にもとづく排出削減の違いは非常に大きなものである。表9.1には、2030年についての見通しの違いを示している。政府の見通しはJPEAの64%、JWPAの27%しかない。

表9.1 自然エネルギー供給量についての見通しの比較（2030年）

	現状 2015年	政府の長期見通し2030年	関連産業の長期見通し2030年
太陽光発電	3340万kW	6400万kW	1億kW（JPEA）
風力発電	317万kW	1000万kW	3620万kW（JWPA）

出所：経済産業省（2015）、JPEA（2015）、JWPA（2016）

政府の見通しの『80%の削減目標』については、

- 5) 政府は、2050年の温室効果ガスの削減目標を1990年比でマイナス80%とすることを、2010年に閣議決定している。しかし、2030年までの「長期エネルギー需給見通し」をみると、2050年のこの目標に対する考慮は全くみられない。2030年の見通しは2050年の80%削減目標との連続性を考慮して行うのが普通である。2030年のあとに急激にCO₂を削減しようとしても時間がかかることなので、簡単ではない。また2030年までは26%を目標としておき、その後に急激に80%の目標までの削減を図ろうとしても、累積的な排出量は大きくなりこれをあとから削減することはできない。

エネルギー政策については、

- 6) 省エネルギーと自然エネルギーへの投資は、化石燃料購入の資金の海外への流出を減らし、エネルギー自給率を高め、エネルギーセキュリティの向上につながる。公共投資のひとつと考えて実施すれば景気浮揚、新産業の創出、雇用の増大、GDP増大に寄与し、投入した資金は回収される。このことを考慮するべきである。

自然エネルギーの電力供給については、旧来の「ベースロード」中心から、自然エネルギーを優先的に利用する方針に転換することが必要である。太陽光発電や風力発電を優先的に系統に接続し、自然エネルギーに対する発電抑制が生じないように推進することが重要である。

- 7) CO₂削減コストについて

本報告に示したように削減コストカーブの推定は非常に恣意的なものになりやすく、背後にある作成者の意図が見えにくいものになっている。実際上は、コストの推定のために仮定した回収年数が結果を左右する。多くの技術について、回収年数を耐久年数より小さく設定することが多いので、そのコストが高くてCO₂削減の経済性がないとの評価がされやすい。実際には、それぞれの技術ごとに異なる回収年数があり、しかも通常はその回収年数を上回って長期に使用されることが多いため、十分に利益を生み出すものである。

第10章

WWFジャパンからの提言

100%自然エネルギーシナリオおよびブリッジシナリオの達成には、計算上、一定の前提条件がおかれている。裏を返せば、それらの前提条件を達成することが、シナリオ実現に必要なことであると言える。以下では、その前提条件の中でも特に重要なものをピックアップしている。

本報告書においてブリッジシナリオは、100%自然エネルギーシナリオを達成する途上にあるシナリオとして位置づけているため、両者の達成のために必要なことには本質的には大きな違いはない。実は、電力を100%自然エネルギーでまかなうことはすでに今ある技術の延長線上にあり、実現が十分想定内に入るが、熱や燃料、鉄鋼などの産業プロセスも含めてすべて自然エネルギーでまかなうことには未知数の面がある。その点、電力部門にガスを残し、現状では代替が難しい分野でガス・石油・石炭の使用を許すブリッジシナリオの「80%削減」は、より実現可能性が高く、最低限2050年80%削減を達成することは十分可能である。しかし、2050年という長期を見据えた場合は、100%自然エネルギーシナリオのような野心的なビジョンを掲げることによって、脱炭素化のプロセスを加速化させる必要がある。

以下では、シナリオの前提条件を踏まえ、達成すべき代表的事項を列挙している。

省エネルギー

- ▶ **ZEH・ZEBなどに代表される住宅・建築物の省エネルギー化の促進**：2050年までには、住宅のほぼすべて、住宅以外の建築物の約4割が、現在の最新省エネ基準を満たしている。
- ▶ **産業の効率化および鉄リサイクル等の促進**：素材系産業は、2010～2050年までの約40年間で、20～30%の効率改善を目指す。また、産業部門中の最大の排出源である鉄鋼業については、電炉の割合を大きくし、70%程度までが電炉となることで、削減に貢献することを目指す。
- ▶ **より急速なEV／FCVの普及**：2050年までにはほぼすべての自動車がEVもしくはFCVとなっている。2030年代には、走行している車の半分以上がEVもしくはFCVになっている必要がある。

自然エネルギー

- ▶ **電力系統運用の改革**：自然エネルギーを、真に優先的に使うことを前提とした電力系統運用の改革。
- ▶ **自然エネルギー水素インフラの整備**：自然エネルギーの余剰電力で、水素を製造するインフラの整備が進むこと。本格的な活用は2030年頃から。

- ▶ **バイオマスの熱利用の拡大**：6000万m³レベルの持続可能なバイオマス供給が可能な体制を整える。

化石燃料のフェーズアウト

- ▶ **化石燃料に対するカーボン・プライシング**：シナリオに必要な設備投資の中には、投資回収までに時間がかかるものが含まれる。シナリオ内において、明示的なカーボン・プライスの設定は行っていないが、脱炭素化の方向に設備投資を誘導するためには、炭素価格を課す制度、特に排出量取引制度の導入を行う。
- ▶ **電力部門の脱炭素化（特に石炭火発の廃止）**：電力部門は、他の部門に先行する形で、脱炭素化が達成される必要がある。たとえば、石炭火力発電の発電量は、2010～2030年の間で、4割以上減少する。発電効率が同じなら、設備容量としても同程度に減っていることが必要であり、現時点から新規建設は考えられない。この点については、100%自然エネルギーシナリオとブリッジシナリオの間に違いはない。

原子力発電の段階的廃止

- ▶ **原子力発電の段階的廃止方針の明確化**：原子力発電については、原則30年で廃止していく。一部、新安全基準をクリアできないものや地域住民の同意を得られないものは即時廃止をしていく。

参考文献

- 歌川学 (2015) 『スマート省エネ：低炭素エネルギー社会への転換』 東洋書店
- エネルギー総合工学研究所 (IAE) (2010) 「平成21年度省エネルギー設備導入促進指導事業 報告書」 エネルギー総合工学研究所 (IAE) 資源エネルギー庁
- 大島堅一 (2010) 『再生可能エネルギーの政治経済学』 東洋経済新報社
- 大島堅一・高橋洋編、植田和弘監修 (2016) 『地域分散型エネルギーシステム：集中型からの移行をどう進めるか』 日本評論社
- 環境省 (2012a) 「各WGの内容について 2013年以降の対策・施策に関する報告書」 中央環境審議会地球環境部会H24年6月資料
- 環境省 (2012b) 「オゾン層を守ろう 2012」 環境省
- 環境省 (2013a) 「平成24年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書 (平成25年3月) 環境省
- 環境省 (2013b) 「削減ポテンシャルと削減コストの精査について」 (排出削減ポテンシャルを最大限引き出すための方策検討会・第4回 2013年1月31日) 環境省
- 環境省 (2014) 「平成26年度2050年再生可能エネルギー等分散型エネルギー普及可能性検証検討受託業務報告書」 環境省
- 環境省 (2015) 「電気事業者別排出係数(特定排出者の温室効果ガス排出量算定用)-平成26年度実績-H27.11.30公表」 環境省
- 環境省 (2016) 「平成27年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書 (平成28年3月)」 環境省
- 京都産業エコ・エネルギー推進機構 (2015) 「FEMS事例集 平成26年度 京フェムス推進事業」 京都産業エコ・エネルギー推進機構
- 経済産業省 (2015) 「長期エネルギー需給見通し」 経済産業省
- 経済産業省 調達価格等算定委員会 (2016) 「平成28年度調達価格及び調達期間に関する意見平成28年2月22日」 経済産業省
- 交通エコロジー・モビリティ財団 (2015) 『平成27年度 エコドライブ活動コンクール 優秀取組事例集』 交通エコロジー・モビリティ財団
- 国立環境研究所AIMプロジェクトチーム (2012) 「2013年以降の対策・施策に関する検討小委員会における議論を踏まえたエネルギー消費量・温室効果ガス排出量等の見通し」 (「2013年以降の対策・施策に関する報告書 (地球温暖化対策の選択肢の原案について) 別冊」) 環境省
- 国立社会保障・人口問題研究所 (2012) 「日本の将来推計人口 (平成24年1月推計)」 国立社会保障・人口問題研究所
- 資源エネルギー庁 (2016) 「発電水力調査・包蔵水力 (平成27年3月31日現在)」 資源エネルギー庁 http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/hydroelectric/database/energy_japan001/ (最終確認日2017年2月1日)
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) (2014) 『NEDO再生可能エネルギー技術白書』 NEDO
- 太陽光発電協会 (JPEA) (2015) 『Japan PV Outlook 2030』 JPEA
- 太陽光発電協会 (JPEA) 「日本における太陽電池の出荷統計2013、2014、2015」 JPEA

- <http://www.jpea.gr.jp/document/figure/index.html> (最終確認日2017/ 2/1)
- WWFジャパン『脱炭素社会に向けたシナリオ提案 (4分冊)』<http://www.wwf.or.jp/re100/>
- ①省エネルギー編 (2011年7月)
 - ②100%自然エネルギー編 (2011年11月)
 - ③費用算定編 (2013年3月)
 - ④電力系統編 (2013年9月)
- 榎屋治紀 (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) 32 (3) : 57
- 榎屋治紀 (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) : 49-54
- 榎屋治紀 (2013)「日本における再生可能な水素供給システム」水素エネルギー協会大会2013
- 榎屋治紀 (2015)「太陽光発電と風力発電の分担比の最適化」『太陽エネルギー』(日本太陽エネルギー学会誌) 41 (2) : 45-48
- 榎屋治紀 (2016)「太陽光発電システム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) 42 (5) : 69-74
- 電機事業連合会 (2017)「電力統計情報」電機事業連合会
<http://www.fepc.or.jp/library/data/tokei/>
- 日本エネルギー経済研究所 (2015)「アジア世界エネルギーアウトルック2015」日本エネルギー経済研究所
- 日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット編 (2008)『エネルギー・経済データの読み方入門 (改定2版)』省エネルギーセンター
- 日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット編 (2016)『エネルギー・経済統計要覧2016』省エネルギーセンター
- 日本風力発電協会 (JWPA) (2016)「JWPA Wind Vision Report ~真に信頼される電源を目指して~」JWPA
- 農林水産省 (2006)「バイオマス・ニッポン総合戦略」農林水産省
- 農林水産省 (2012)「バイオマス事業化戦略 ~技術とバイオマスの選択と集中による事業化の推進~」農林水産省
- 塙藤徳 (2016)「バイオマスのエネルギー利用と100% RE社会の貢献」『太陽エネルギー』(日本太陽エネルギー学会誌) 42 (5) : 43-50
- 波力発電検討会 (2010)「波力発電検討会報告書」東京都環境局
- International Energy Agency (IEA) (2016) *World Energy Outlook 2016*.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2016) *The Power to Change : Solar and Wind Cost Reduction Potential to 2025*.
- Tsuchiya, H. (2008) Innovative renewable energy solutions for hydrogen vehicles , *International Journal of Energy Research*, John Wiley & Sons 32 : 427-43521)
- Tsuchiya, H. (2012) Electricity supply largely from solar and wind resources in Japan, *Renewable Energy* 48 : 318-325
- Tsuchiya, H. (2015) Sustainable energy Strategy primarily involving renewable resources in Japan , *Eco Design 2015 International Symposium 2015*, Tokyo, Japan
- U.S. Energy Information Administration (EIA) (2016) *Annual Energy Outlook 2016*. EIA

参考資料

1. 一次エネルギーについて

自然エネルギーが100%になってくると、火力発電損失はなくなり一次エネルギーの概念と計算方法に問題が生じる。一次エネルギー＝転換部門＋最終用途エネルギーであるが、現状では転換部門の8割は発電損失、2割はコークス転換と石油精製である。日本のエネルギー統計では、火力発電の効率（約40%）を用いて、原子力、水力、地熱、自然エネルギーの発電の一次エネルギーを物理量（電力1 kWh＝3.6MJ）の2.5倍に計上している（日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット編 2008）。欧州の場合、水力発電の効率は100%、地熱は10%としている（日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット編 2016）。

欧州では、一次エネルギーの概念の再検討と自然エネルギーを何倍（PEF：Primary Energy Factor）にして一次エネルギーに計上するべきかを再検討する議論が行われている。PEFは一次エネルギー変換係数、火力発電効率の逆数に相当し、現状ではおよそ2.5である。

物理的に考えると、一次エネルギーの計算は次のようになる。太陽光発電は太陽光からの変換効率を20%とするとPEF＝5、風力発電は風のエネルギーからの変換効率40%としてPEF＝2.5として一次エネルギーに計上することになる。2050年には、火力発電は非常に小さくなっているはずであり、単純に40%の効率で2.5倍して一次エネルギーに計上することでよいのかという問題が生じる。

ある文献では、PEFが現状では2.5（発電効率40%）であるが、将来的には小さくなってゆき、例として2020年には1.59～2.09のように変化すると想定している。

この問題の議論をみると、PEFをめぐる化石燃料消費の増大を抑えること、自然エネルギーの役割を評価すること、電力と熱の質的違いを評価するという課題が浮上している。以下の表A-1は考え方を整理したものである。

本報告では、自然エネルギーの電力をPEF＝2.5として一次エネルギーに計上している。

表A-1 自然エネルギーによる発電と熱利用に関する一次エネルギーの計算方法

方法	概念	一次エネルギー
1	自然エネルギーからの熱損失はゼロなので一次エネルギーはゼロ。	自然エネルギーの一次エネルギーはゼロ
2	自然エネルギーについては、一次エネルギー換算値を用いて計算する。換算係数は別途定める。	換算値によって一次エネルギーを計算する
3	自然エネルギーについては、その運転などに必要な化石燃料のみを含める。原子力についても、輸送や運転にかかわる化石燃料のみを計上する	化石燃料の発電と自然エネルギーの発電を区分する。化石燃料のみを一次エネルギーに計算する

2. CO₂排出係数

本報告における計算では、電力からのCO₂を算出するために、電力のCO₂排出係数を利用している。2011年の原子力発電事故のあとではこの排出係数は増加している。

以下のように（表A-2）、2015年度の10電力会社の排出係数を発電量の加重平均で求めたところ、0.55KgCO₂/kWhであった（発電量は電力統計より入手）。本報告では、これを電力のCO₂排出係数として使用している。

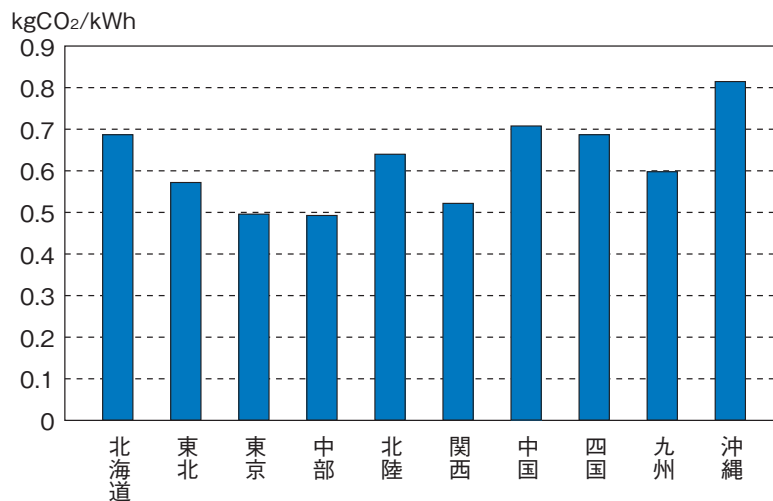
表A-2 10電力会社のCO₂排出係数

電力会社	調整後排出係数 (kgCO ₂ /kWh)	2015年度発電量 (GWh)	発電量加重値 (排出係数×発電量)
北海道	0.688	25,791	17,744
東北	0.573	66,064	37,854
東京	0.496	209,113	103,720
中部	0.494	120,730	59,641
北陸	0.64	28,896	18,494
関西	0.523	102,297	53,501
中国	0.709	40,069	28,409
四国	0.688	17,657	12,148
九州	0.598	62,253	37,228
沖縄	0.816	6,808	5,555
計		679,677	374,293

加重平均排出係数	0.550693
----------	----------

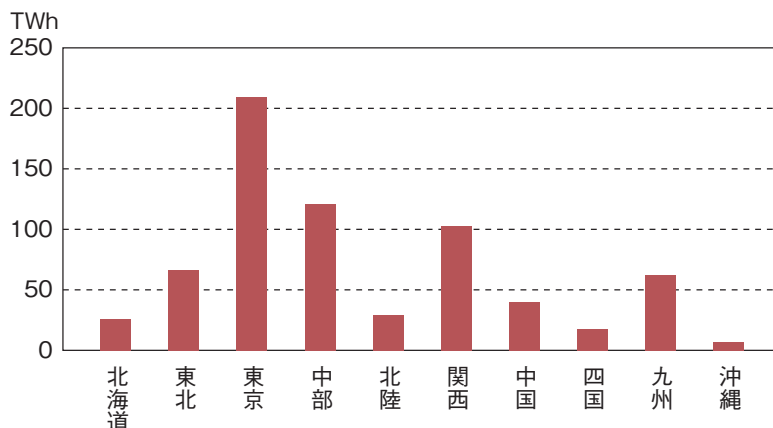
出所：環境省（2015）および電気事業連合会（2017）よりシステム技術研究所作成

図A-1 10電力会社のCO₂排出係数



出所：環境省（2015）

図A-2 10電力会社の発電量（2015年度）



出所：電気事業連合会（2017）

3. 削減コストカーブの問題点

コストカーブの計算におけるひとつの問題点は、回収年数（N）である。省エネ投資の一般的回収年数（T）は、金利なしの場合、次の関係から求められる。

$$\text{初期投資の差} = \text{一般的回収年数 (T)} \times \text{省エネ後の年間費用の差}$$

この式の意味するところは、毎年生じる費用の差を支払いにあてれば、金額の大きな初期投資でもT年間で投資金額を回収できることである。一般に省エネルギー投資の計算はこうして行われている。

これより、ハイブリッドカーの場合には、

$$\begin{aligned} \text{一般的回収年数 (T)} &= \text{初期投資の差} / \text{省エネ後の年間費用の差} \\ &= 500000\text{円} / (72000\text{円/年}) = 6.94\text{年} \end{aligned}$$

ハイブリッドカーは、6.94年で投資を回収できることを示している。車種にもよるが、最近では初期投資の差は、低下しており、4年程度で回収できるものもあるようである。

実際には、この一般的回収年数（T）は機械や装置が利用できる耐久年数（L）に近いのが普通である。L>Tであれば有効な投資であり、L<Tならば投資としては損失になる。上記の削減コストを計算するときの回収年数を評価用回収年数（N）と呼ぶことにして、この一般的回収年数（T）との関係を分析すると以下ようになる。

$$\begin{aligned} I &= \text{初期投資額の差} \\ Y &= \text{省エネ後の年間費用の差} \\ C &= 1\text{年間に削減されるCO}_2\text{として,} \end{aligned}$$

$$\text{削減コスト (A)} = (\text{初期投資額の差} / \text{評価用回収年数 (N)} - \text{省エネ後の年間費用})$$

$$\begin{aligned} & \text{の差}) / 1 \text{年間に削減されるCO}_2 \\ & = (I / N - Y) / C \end{aligned}$$

そこで、一般的回収年数（T）＝初期投資の差／省エネ後の年間費用の差であるから、式で表すと

$$\begin{aligned} T &= I / Y、すなわち T = I \cdot Y \text{であるから、} \\ \text{削減コスト (A)} &= (T \cdot Y / N - Y) / C = Y \cdot (T / N - 1) / C \end{aligned}$$

この式をみれば、もし

T=Nであれば、削減コスト=0となる。

T>Nであれば、削減コスト>0

T<Nであれば、削減コスト<0である。

T=Nであれば、一般的回収年数（T）でコストカーブをつくることになり、削減コストはゼロになり、右肩上がりの曲線にはならない。また、コストカーブ自体は平たんであり、意味のないものになる。

それぞれの技術には、それぞれの一般的回収年数（T）があり、それは技術の特性上なかなか変えにくいものである。これを変えるのは技術革新しかない。評価用回収年数（N）によってコスト評価をするのは、適切ではない。

考察

コストカーブについては、当初から計算プロセスが明示されず、透明性がないことにたいする批判が行われている。コストカーブの目的は、削減効果とコストを政策決定者に理解してもらうことであるともいわれている。

ここで示した問題点は、回収年数に焦点をあてているが、計算に関係する各種条件の設定も問題を含んでいる。回収年数については、すべての技術について同一の評価用回収年数（N）を適用して作成されたコストカーブもあり、あるいは技術ごとに適当な評価用回収年数（N）を設定して比較している場合もある。

環境省の委員会向けに、みずほ情報総研が作成したコストカーブには、「回収年数を3年」に設定としたという断り書きがある（図A-3）。このほかに評価用回収年数（N）を変化させた各種のケースの結果も示しており、評価用回収年数（N）の設定によって結果が変わることを示している（図A-4と図A-5に示す）。

評価用回収年数（N）を小さくすれば、多くの技術はグラフの縦軸方向の上側に移動して「現実的」な投資は少なくなり、回収年数を大きく設定すれば下側に移動して「現実的」な投資対象が増加する。なお横軸のCO₂削減量は、マイナスのコストの技術に対しては大きな導入量が見込めるので、評価用回収年数（N）を大きくとれば大きくなっていく。

企業の省エネルギーの担当者からみれば、一般に3年の投資回収年というのは短すぎると感じるのが普通である。多くの技術は3年よりも長い回収年数を必要とする。優れた経営者は、回収期間が5年でも10年でも必要な技術には投資している。たとえば、高効率トランス、高効率モータ、断熱、自然エネルギーなどである。

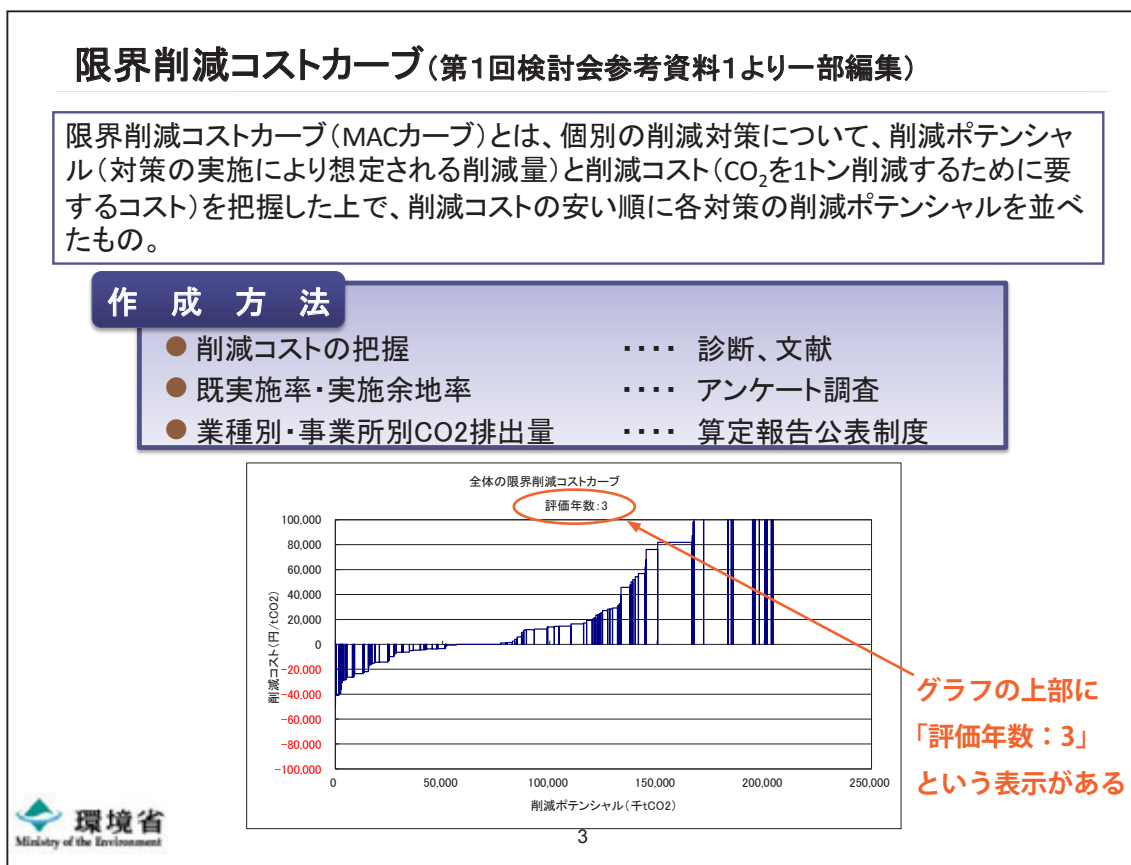
ここで評価用回収年数（N）を3年にすれば、多くの技術は、 $T > N$ であり、プラスのコストの技術として計上される。例外は、LEDランプなどごく限られたものになる。

コストカーブにおいてプラスのコスト側に書き出された技術は、「現実的でない」というイメージがつけられる。図A-4のコストカーブは、3年以上の回収年数になる技術をプラスのコストとして表現している。そして一般にこの結果が流布される場合には、回収年数などの注意書きはないか、あるいはあっても簡単には理解されない。これは古い固定観念を強化するのに役立つ結果になるおそれがある。

以上より、コストカーブは、以下の特徴を持っていることがわかる。

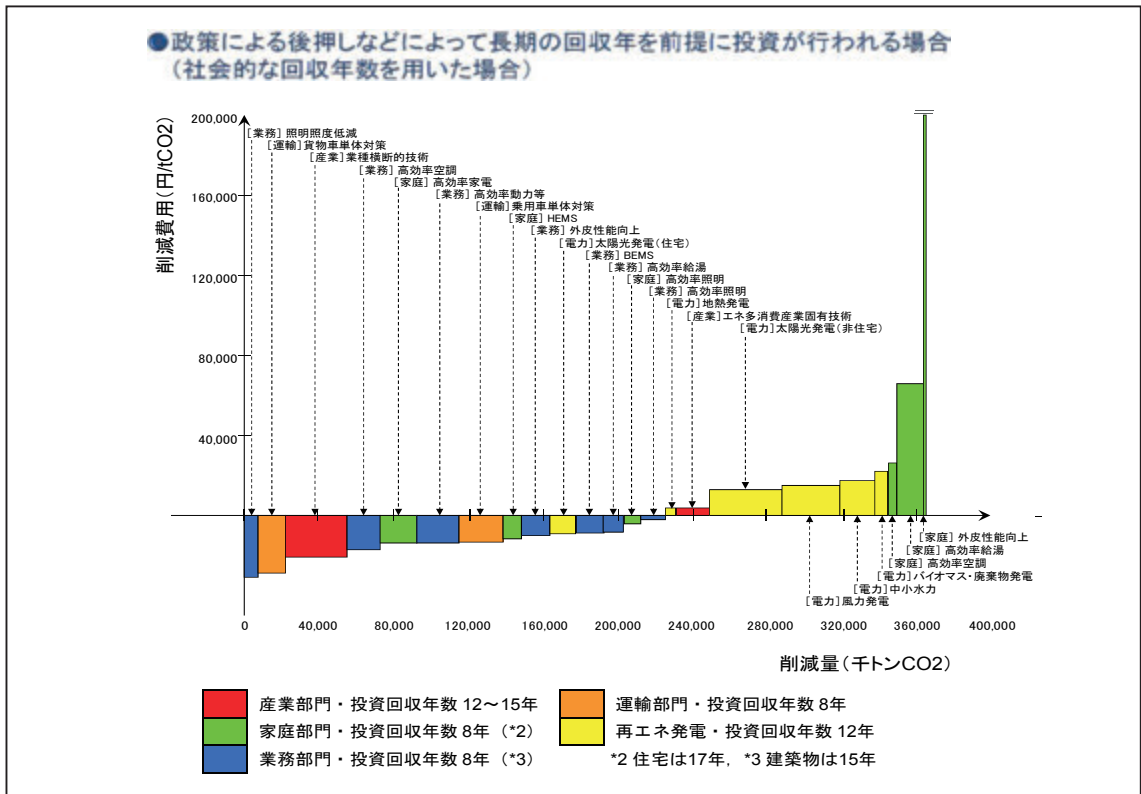
- 1) 各技術について評価用回収年数（N）を決めて計算している。
- 2) 適用する評価用回収年数（N）を長くすれば、多くの技術がマイナスの削減コストと

図A-3 環境省 削減ポテンシャルと削減コストの精査について



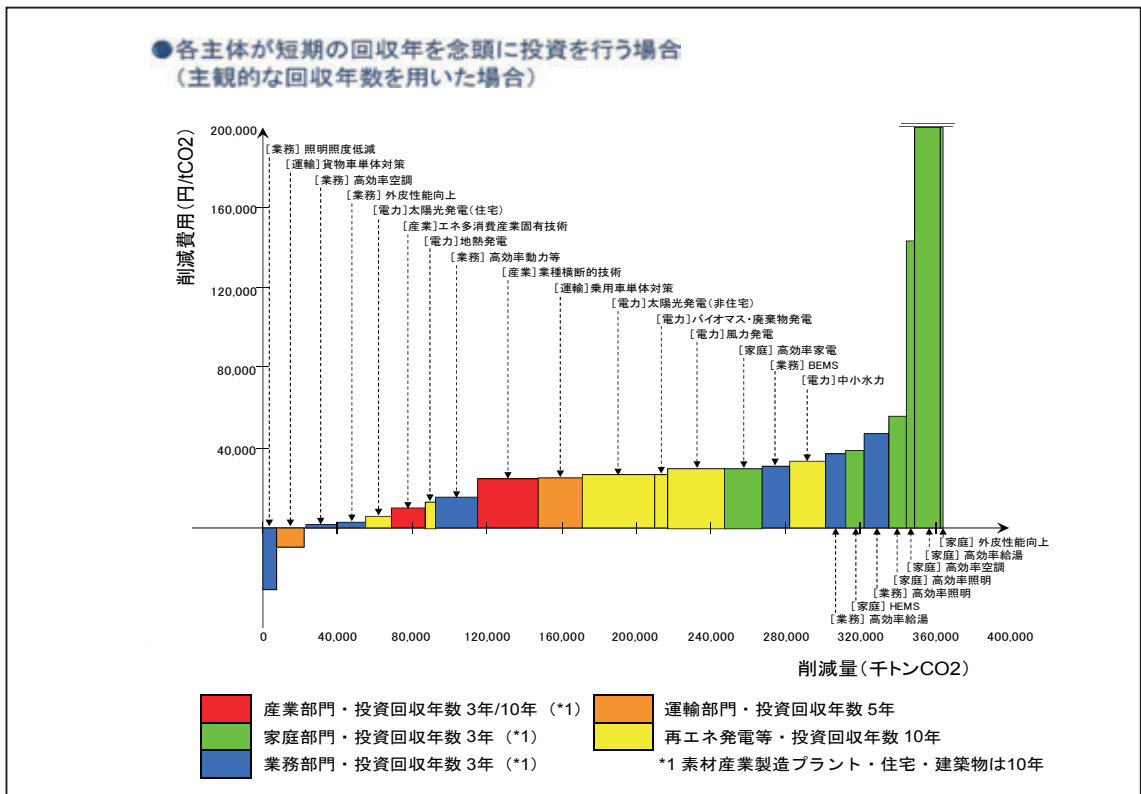
出所：環境省（2013b）。赤字は筆者

図A-4 削減コストカーブ（環境省、同上）



回収年数：産業・家庭・業務部門3年、運輸部門5年、再エネ10年
出所：国立環境研究所AIMプロジェクトチーム（AIM）（2012）

図A-5 削減コストカーブ（環境省、同上）



回収年数：産業部門12～15年、家庭・業務部門8年、運輸部門8年、再エネ12年
出所：国立環境研究所AIMプロジェクトチーム（AIM）（2012）

して計算され、短くとればプラスの削減コストとして計算される。

- 3) 評価用回収年数 (N) は一般的回収年数 (T) より短いことが多く、結果としてこれは削減コストがプラス側であり、高価になり「実現的でない」というイメージを与える。
- 4) コストカーブは、産業界などでいう「3年以内に回収できなければ投資しない」という主張を裏付けるものになりやすい。
- 5) コストカーブは、CO₂削減の費用と削減量についておおよその目安を示すものであり、この結果得られた価格をもちいて厳密な議論をするには適していないと言えよう。

4. 活動指数とエネルギー需要の推定

表A-3 活動指数のみが変化したケースの最終用途エネルギー需要（2010～2050年）

単位：PJ	2010	2020	2030	2040	2050
最終エネルギー消費合計	14,698	14,663	14,010	13,314	11,886
産業計	6,683	6,912	6,645	6,470	5,578
農林水産鉱建設業	302	293	275	253	229
製造業計	6,381	6,620	6,370	6,217	5,349
食品飲料製造業	253	245	230	212	192
繊維工業	140	136	127	117	106
パルプ・紙・紙加工品製造業	385	413	409	407	378
化学工業（含 石油石炭製品）	2,773	2,998	2,922	2,884	2,429
プラスチック・ゴム・皮革製品製造業	95	96	90	88	76
窯業・土石製品製造業	410	346	331	323	259
鉄鋼・非鉄・金属製品製造業	1,987	2,001	1,889	1,834	1,580
機械製造業	395	385	371	352	330
家庭	2,174	2,175	2,097	1,959	1,857
冷房	260	266	257	237	227
暖房	347	355	343	316	303
給湯	331	339	327	301	289
厨房用	193	198	191	176	168
動力ほか	1,042	1,017	979	930	870
業務	2,556	2,485	2,363	2,208	2,032
冷房	306	296	279	256	232
暖房	408	396	372	342	310
給湯	389	377	355	326	295
厨房用	227	220	207	190	172
動力ほか	1,225	1,195	1,151	1,093	1,023
運輸計	3,285	3,091	2,905	2,677	2,419
旅客計	2,005	1,885	1,772	1,630	1,475
乗用車	1,703	1,593	1,497	1,377	1,246
バス	67	65	61	56	51
鉄道	71	69	65	59	54
船舶	49	47	45	41	37
航空	115	111	105	96	87
貨物計	1,280	1,205	1,133	1,048	944
貨物自動車／トラック	1,150	1,075	1,011	930	841
鉄道	5	5	5	5	4
船舶	103	104	98	95	82
航空	22	21	20	18	17

表A-4 ブリッジシナリオの最終用途エネルギー需要の推定（2010～2050年）

単位：PJ	2010	2020	2030	2040	2050
最終エネルギー消費合計	14,698	13,751	12,275	10,858	8,951
産業計	6,683	6,584	6,015	5,549	4,519
農林水産鉱建設業	302	278	248	215	183
製造業計	6,381	6,306	5,767	5,334	4,336
食品飲料製造業	253	234	210	183	157
繊維工業	140	130	117	103	89
パルプ・紙・紙加工品製造業	385	392	368	346	302
化学工業（含石油石炭製品）	2,773	2,863	2,659	2,494	1,991
プラスチック・ゴム・皮革製品製造業	95	91	81	75	60
窯業・土石製品製造業	410	329	298	274	208
鉄鋼・非鉄・金属製品製造業	1,987	1,901	1,700	1,559	1,264
機械製造業	395	366	334	300	264
家庭	2,174	2,078	1,911	1,699	1,528
冷房	260	248	222	189	166
暖房	347	331	297	252	221
給湯	331	325	301	265	243
厨房用	193	195	186	168	159
動力ほか	1,042	978	905	825	740
業務	2,556	2,350	2,106	1,847	1,588
冷房	306	279	245	210	176
暖房	408	372	327	281	235
給湯	389	362	326	287	248
厨房用	227	217	200	181	161
動力ほか	1,225	1,120	1,007	888	767
運輸計	3,285	2,738	2,243	1,763	1,316
旅客計	2,005	1,674	1,374	1,081	813
乗用車	1,703	1,394	1,122	860	623
バス	67	62	56	49	42
鉄道	71	67	62	55	49
船舶	49	45	40	35	30
航空	115	106	94	82	70
貨物計	1,280	1,065	869	682	503
貨物自動車/トラック	1,150	941	758	581	421
鉄道	5	5	5	4	4
船舶	103	99	88	81	66
航空	22	20	18	16	13

5. 原子力について

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。
- 2) 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。
- 3) 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については、可能な限り早期に停止し、廃炉工程を開始する。
- 4) また、立地地域および周辺地域の住民との合意が得られていないものについても、早期に停止・廃炉にしていく。
- 5) 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、再稼働申請も含め、事態が流動的であるため、福島にある原発のみを即時停止するものと想定とする。これは、あくまで計算上の想定をシンプルにするための措置である。

なお、原発の再稼働については、以下の5つの条件を満たした場合のみ、認められるものとする。

- i) 信頼できる原発規制新体制の確立
- ii) 事故原因を踏まえた新安全基準の適用
- iii) 原発事故防災体制と危機管理の抜本的な見直し
- iv) 被害想定範囲に応じた地方自治体との安全協定と地域社会の再稼働への同意
- v) 中長期的な脱原発依存の実現の工程表の提示

6. 車上太陽光発電

EVまたはFCVのルーフとボンネットにソーラーパネルを搭載して、発電した電力を直接またはバッテリーに貯蔵して利用することができる。EVとFCVは電気駆動で効率が高く、走行エネルギーは小さいので、太陽光が大きな役割を果たす。例として600Wのソーラーパネルで年間最大600kWhの発電ができ、年間走行距離1万kmのとき消費電力1200～1500kWhの20～30%を供給できる。

2014年1月フォード社はルーフに太陽電池を搭載するPHVを発表した。2016年8月トヨタもプリウスPHVに180Wのソーラーパネルを搭載した試作車を発表した。名古屋地区の年間日照データをもとにした試算では、1日あたりのソーラー充電で平均2.9km、最大では6.1kmのEV走行ができるという。最も良い条件で充電した日は、自宅から約3km先の目的地まで往復できるエネルギーを貯めることができるとしている。

2050年ごろには現状の約2倍の効率のソーラーパネルがほとんどすべてのEVやFCVに搭載されることになると予想される(槌屋2006)。

図A-6 フォード社が発表したソーラーパネル搭載の電気自動車（2014年）



出所：フォード・モーター社の広報資料より（<https://media.ford.com/>）

図A-7 トヨタが発表したソーラーパネル搭載のプリウスPHV（2016年）

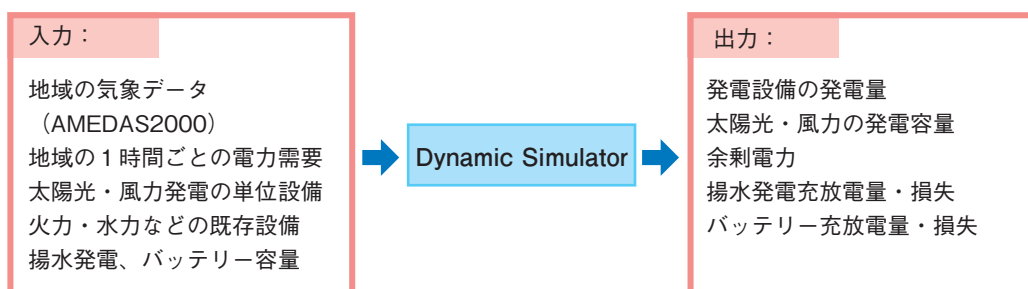


出所：システム技術研究所撮影

7. ダイナミックシミュレーション

本報告では、太陽光や風力など変動する発電システムの性能を確認するために、ダイナミックシミュレーションを用いている。図A-8にはシミュレータの入力と出力を示している。

図A-8 ダイナミックシミュレータの入力と出力

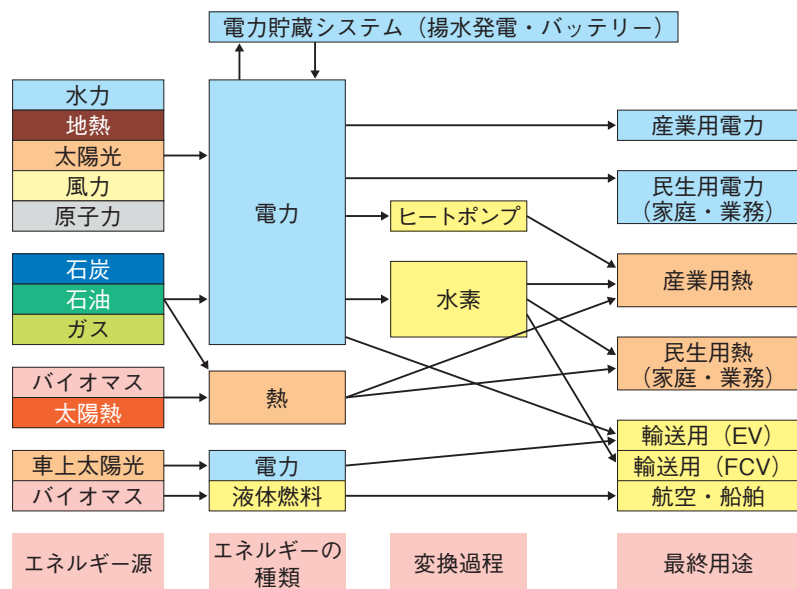


入力は1時間ごとのAMEDAS2000気象データ、電力需要、各種発電設備、揚水発電とバッテリー容量であり、出力は発電量、太陽光と風力の発電容量、余剰電力、揚水発電とバッテリーの充放電量と損失である。

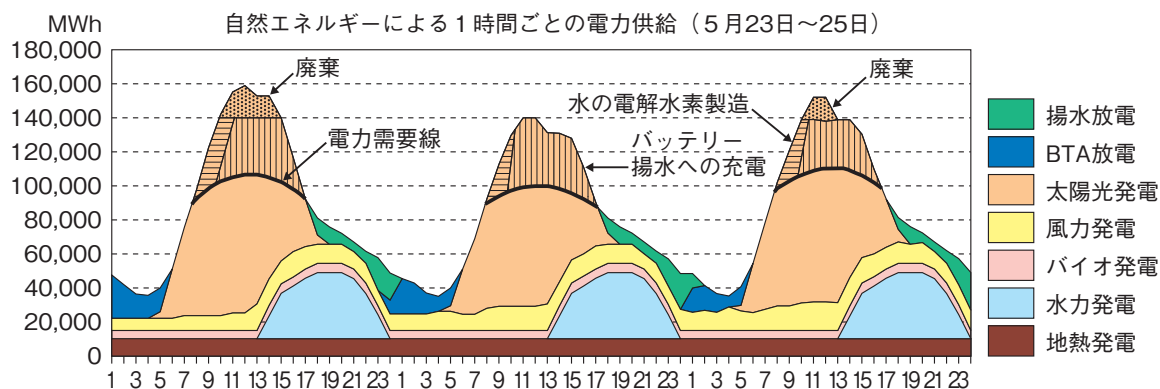
図A-9にはシミュレータの概要を示している。シミュレータは1時間ごとの1年間の電力需要に対して発電量を計算し、揚水発電とバッテリーを利用して電力需要を満たす。さらに余剰電力をEV用電力として、またFCV用水素に変換し自動車に供給する。熱需要には水素とヒートポンプを含めバイオマスと太陽熱で供給する。

図A-10には、3日間の太陽光発電と風力発電の1時間ごとの変動を、揚水発電とバッテリーからの充放電が補うシミュレーションの様子を示している。水力発電は午後から夜間のピークにあて、地熱発電は1年中一定の電力を供給する。電力需要を超える余剰分は、EVの充電、FCV用や高温熱用の水素の生産、ヒートポンプの熱供給などに利用する。

図A-9 ダイナミックシミュレータの構成

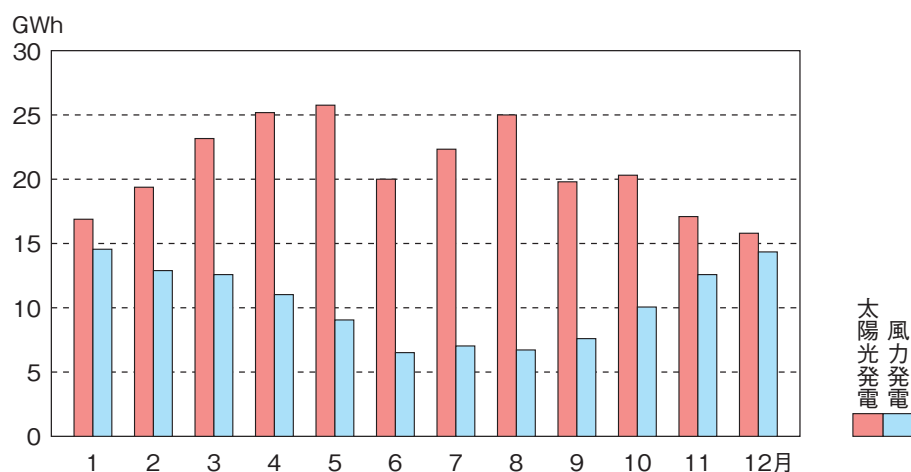


図A-10 ダイナミックシミュレータの3日間の挙動

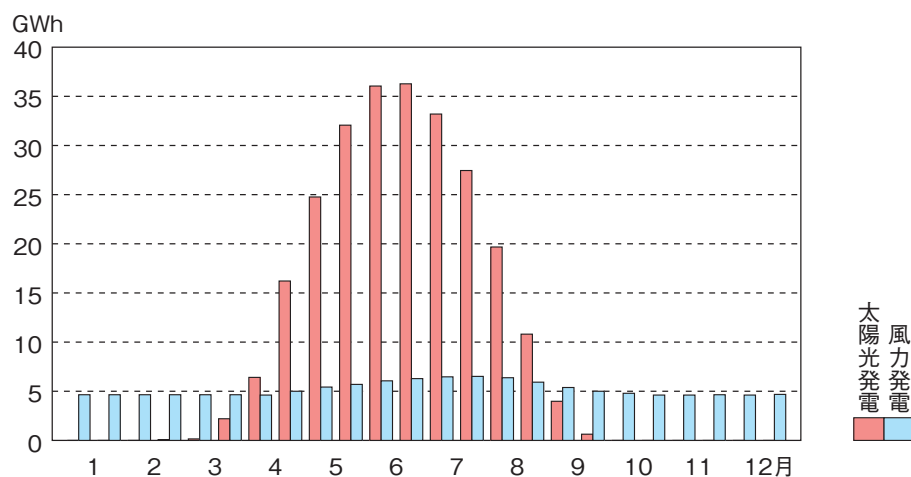


図A-11には、太陽光と風力の月別発電量を示している。太陽光は6～18時に有効、春から夏にかけて大きくなり冬は小さい。これに対し風力は太陽光と逆であり、夏に小さく冬に大きい。図A-12に示すように、風力発電は24時間どの時間でも発電している。したがって、両者を組み合わせると効果的である。拡張AMEDAS2000の気象データの842地点に太陽光パネルを設置し、風力発電の設置地点は風況のよい90地点を選び出している。年間電力需要に対して、発電量の比が太陽光：風力＝2：1とした場合を示している。

図A-11 太陽光と風力の月別発電量



図A-12 太陽光と風力の1年間の時刻別発電量



WWFジャパン 脱炭素社会に向けた長期シナリオ2017

少なくとも政府目標の 「2050年80%削減」は 実現可能

鉄鋼業・化学産業などで化石燃料活用が残ったとしても、それでも電源9割は自然エネ

100%自然エネルギーで 賄う社会は可能!

現在想定できる省エネ技術・対策と
自然エネルギーを真に優先した電力系統運用が鍵



費用は40年間で おとくに

節約される燃料費によって
2010～50年の40年間の累計で
84兆～90兆円のおとくに

脱炭素社会に向けて

カーボン・プライスや省エネ基準の強化など
政策による誘導が必要



私たちはWWFです

人と自然が調和して生きられる未来を目指して、地球環境の悪化をくい止めるさまざまな活動を実践しています。

www.wwf.or.jp