

2050年再エネ100%シナリオ



原発ゼロ・再エネ100%
ロードマップ
原子力市民委員会
オンライン・ワークショップ

2020年7月22日

システム技術研究所
所長 槌屋 治紀

100%再生可能エネルギーシナリオ 目次

- 1) 100%再エネシナリオの構成
- 2) 人口減少と活動度
- 3) 産業の構造変化
- 4) 2つのシナリオ
- 5) エネルギー需要の推定
- 6) 再エネの賦存量・導入可能量
- 7) 水素製鉄・壁面PV・車上PV
- 8) ダイナミック・シミュレーション
- 9) エネルギー供給構成、設置面積
- 10) 転換コスト

100%再生可能エネルギーシナリオ

目的

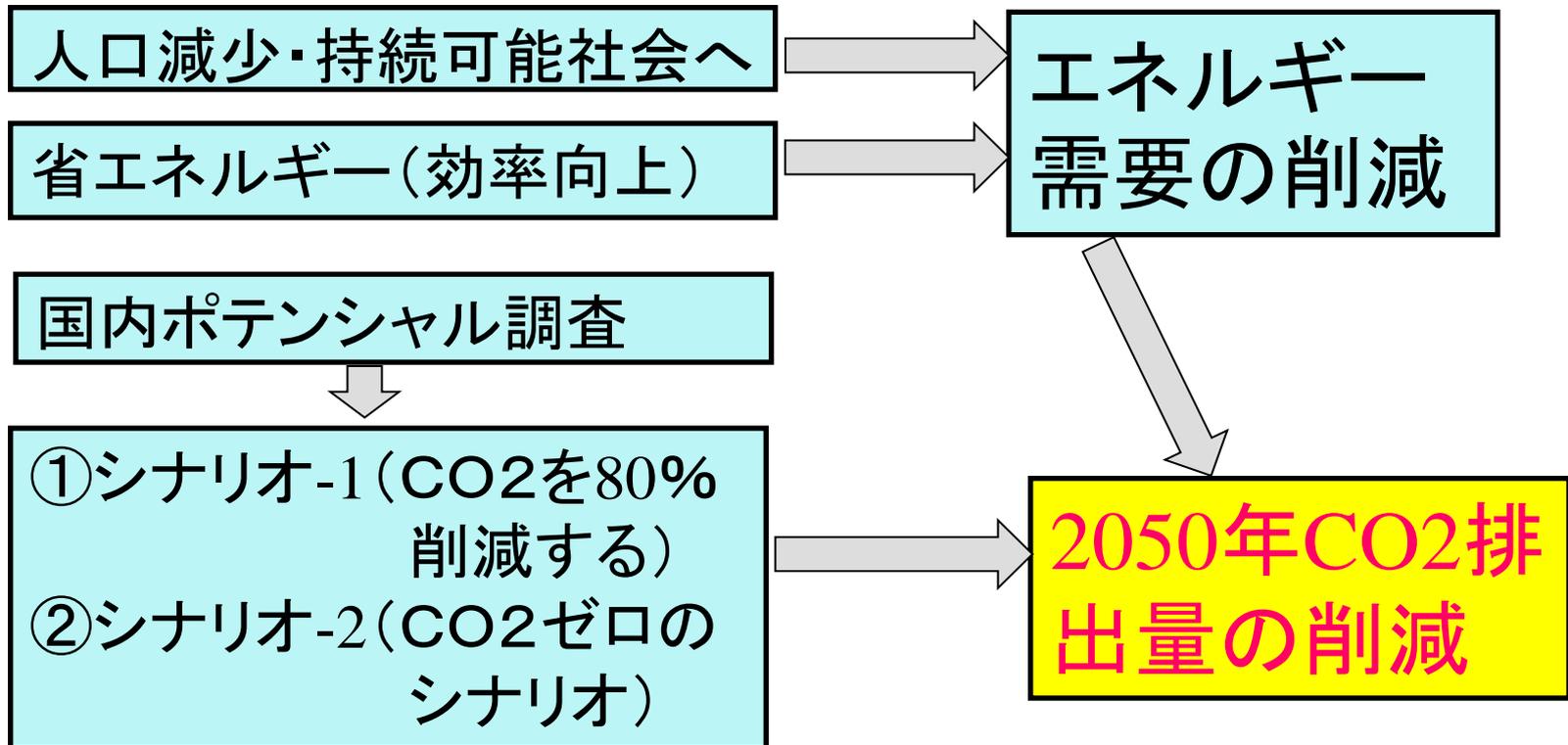
- 安全性
- セキュリティ向上
- エネルギー自立
- CO2排出ゼロ
- サステナブルである
- 核拡散の減少

問題点？

- 安定供給可能か？
(太陽や風力は変動する)
- エネルギー資源は国内に充分あるか？
- 大きなエネルギー貯蔵が必要か？
- コストは非常に大きい？

システム技術研究はエネルギー分析の研究を行っている。2011～2017年、WWFジャパンから「2050年の日本の100%自然エネルギーシナリオ」の作成を委託され、その結果は「脱炭素社会に向けた長期シナリオ2017」として公表されている。さらに本報告はJUSTのメンバーとの議論によって、その内容をさらに進展させたものである。

100%再エネシナリオの作成プロセス



人口減少と効率向上によりエネルギー消費は縮小してゆく可能性が高い。経済性の高い省エネルギーにより需要を削減すれば、再エネの供給を行う場合の問題が小さくなり、効果的にCO2削減が実現する。

将来のエネルギー需要の推定方法

将来のエネルギー需要

=

基準年のエネルギー需要

×

活動指数
人口、世帯数、産業構造変化、主要資源の消費量

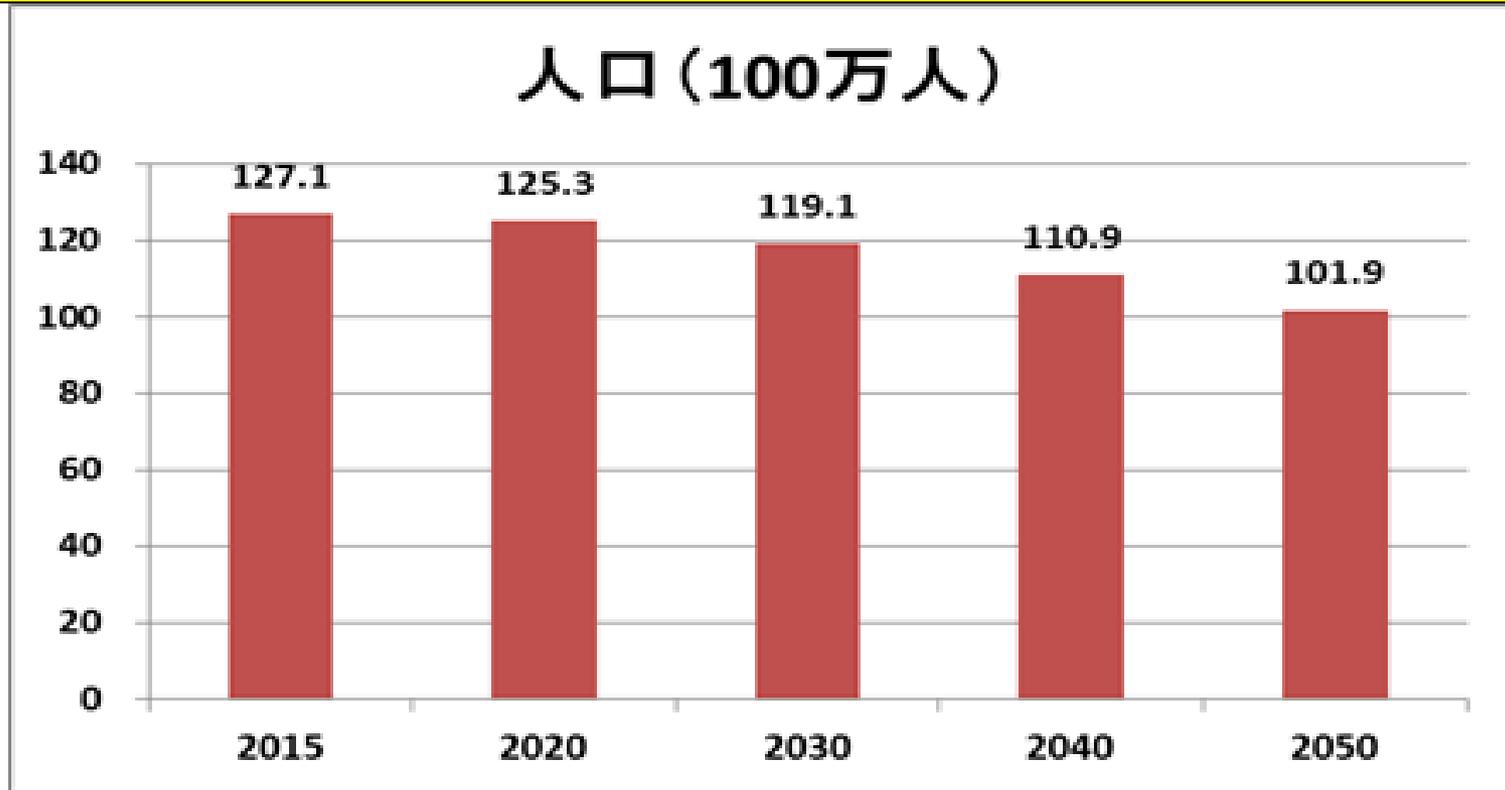
×

効率向上
断熱住宅、LED照明、ヒートポンプ、電気自動車など

将来の最終エネルギー需要は、基準年のエネルギー需要、将来の活動指数、効率向上の積でできる。活動指数は最終用途ごとに適切な指標から推定する。

日本の将来人口推計、中位推計

国立社会保障・人口問題研究所 2017



日本の人口は2050年には2015年の80%に減少すると予測されている。人口に比例して社会の活動指数が減少し、エネルギー需要が減少する可能性がある。

産業部門の構造変化の推定

2015 → 2050

2015 → 2050	活動量の要因別変化量(%)				
総合変化量=人口減少* 輸出減少*ペーパーレス* 建物長寿命化	人口減少	輸出増減	建物の長寿命化	情報化	総合変化量
産業					
農林水産鉱建設業	80%	100%	100%	100%	80.0%
製造業					
食品飲料製造業	80%	100%	100%	100%	80.0%
繊維工業	80%	100%	100%	100%	80.0%
パルプ・紙・紙加工品製造業	80%	95%	98%	85%	64.6%
化学工業(含 石油石炭製品)	80%	70%	98%	100%	54.9%
プラスチック・ゴム・皮革製品製造業	80%	70%	98%	100%	54.9%
窯業・土石製品製造業	80%	90%	80%	100%	57.6%
鉄鋼・非鉄・金属製品製造業	80%	70%	95%	100%	53.2%
機械製造業	80%	150%	100%	120%	144.0%

2つのエネルギーシナリオ

	シナリオ-1	シナリオ-2
2050年の目標	1990年レベルからCO2排出を80%削減する	CO2排出をゼロにする
2050年のエネルギー需要	人口減少により活動度が80%に減少、比例してエネルギー需要も減少	人口減少に伴って80%に減少、さらにエネルギー効率向上によりおよそ半分以下に減少
2050年のエネルギー供給	石油・石炭・ガスを利用。電力は90%を再エネから、10%をガスから供給	太陽光、風力、水力、地熱、バイオマス、周囲熱など、100%再エネにより供給する
民生部門	暖房・温水需要にはガスを供給する	暖房・温水には余剰電力+ヒートポンプまたはバイオマスを供給
産業部門	石炭を鉄鋼・紙パルプ・セメント産業に、ガスを熱需要に供給。	余剰電力から水素を生産して鉄鋼業にさらに余剰電力を直接またはヒートポンプにより熱需要に供給する
運輸部門	乗用車はすべてEVになり、石油をトラック、船舶、航空機に供給	自動車はEVまたはFCVとなり、余剰電力から水素を生産して船舶、航空機に供給する

シナリオ-1は80%削減の政府の目標に沿ったもので、無理なく実現可能なものであり、シナリオ-2はCO2排出ゼロの目標を設定した

省エネルギー(シナリオ-2)

効率向上の可能性: 家庭部門と業務部門

家庭部門		業務部門	
断熱化	ZEH(ゼロエネルギーハウス)や次世代の省エネ基準が普及し、戸建+集合住宅の暖冷房需要が現状の36%に低下する。	暖冷房	ZEB(ゼロエネルギービル)や断熱化により、現状から50~75%に低下。エアコンCOPが2倍になり、暖冷房需要は35%に低減
エアコンCOP	COPが現状の3~4から6~7へ、効率が2倍になる	照明	暖冷房を除く電力の50%が照明。LEDタスク+アンビエント照明の普及で効率4倍に
照明	白熱灯と蛍光灯はなくなり、LED電球が広く普及。現状の4倍の効率になる	OA機器	ハードディスクに代わってフラッシュメモリーが普及しデータセンターの電力消費は1/3に低下。OA機器の電力消費が50%に低減
電気製品	高効率の電気冷蔵庫の普及。家電製品は半導体の電力損失低減により、現状の半分の電力消費になる	TV会議	出張などがリモート会議へ移行するとエネルギー消費が低減する

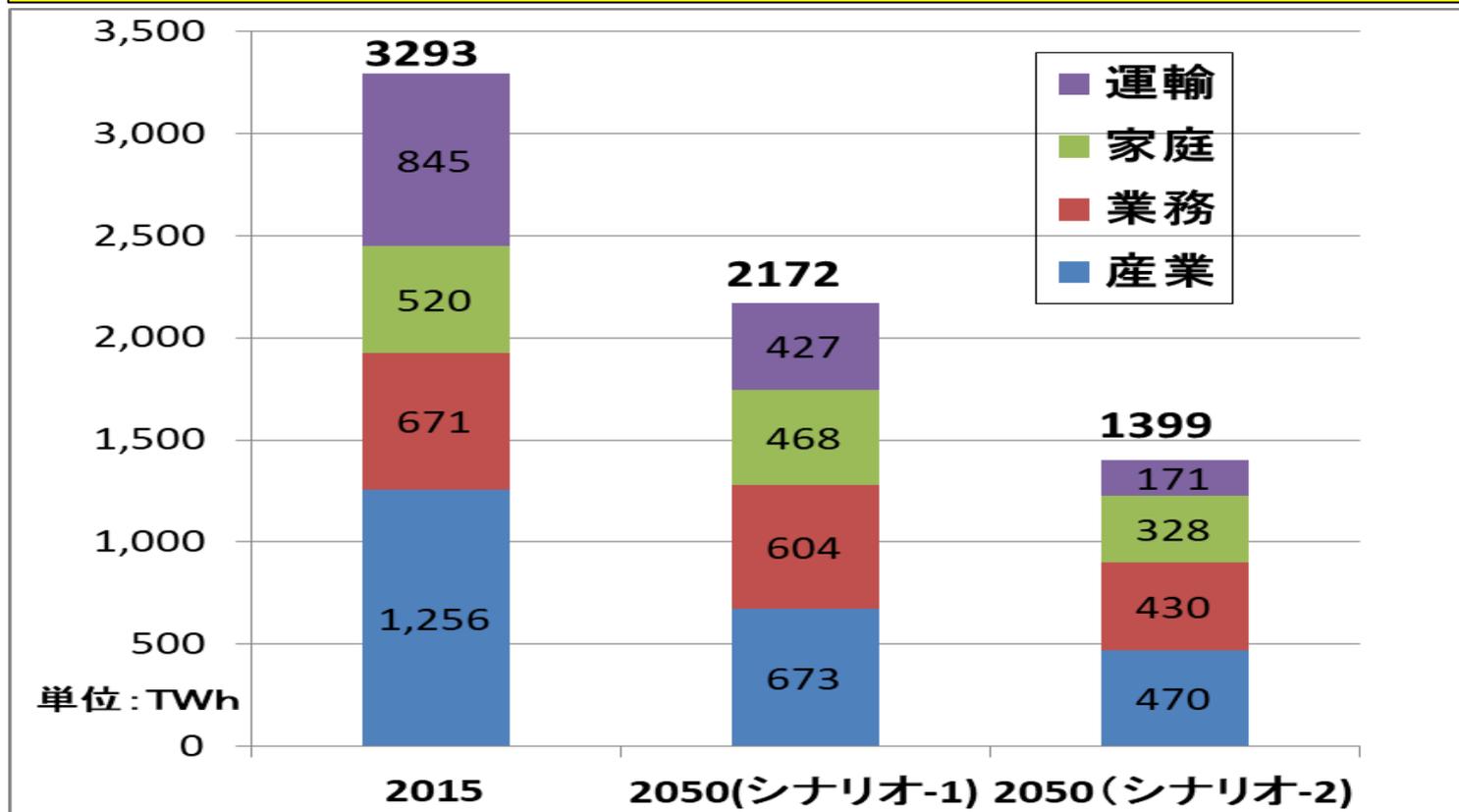
省エネルギー（シナリオ-2）

効率向上の可能性：産業部門と運輸部門

	産業部門
鉄鋼業	鉄鋼生産は2015年の1億400万トンから2050年には5300万トンへ減少し、リサイクル率は43%になり、水素製鉄で3000万トン、電炉で2300万トンの生産。
化学・窯業・紙パルプ	生産量が減少してゆくが、省エネルギー機器の導入により効率が30%向上する。
分野横断技術	インバータ制御モータの広範な導入により、効率が30%向上する

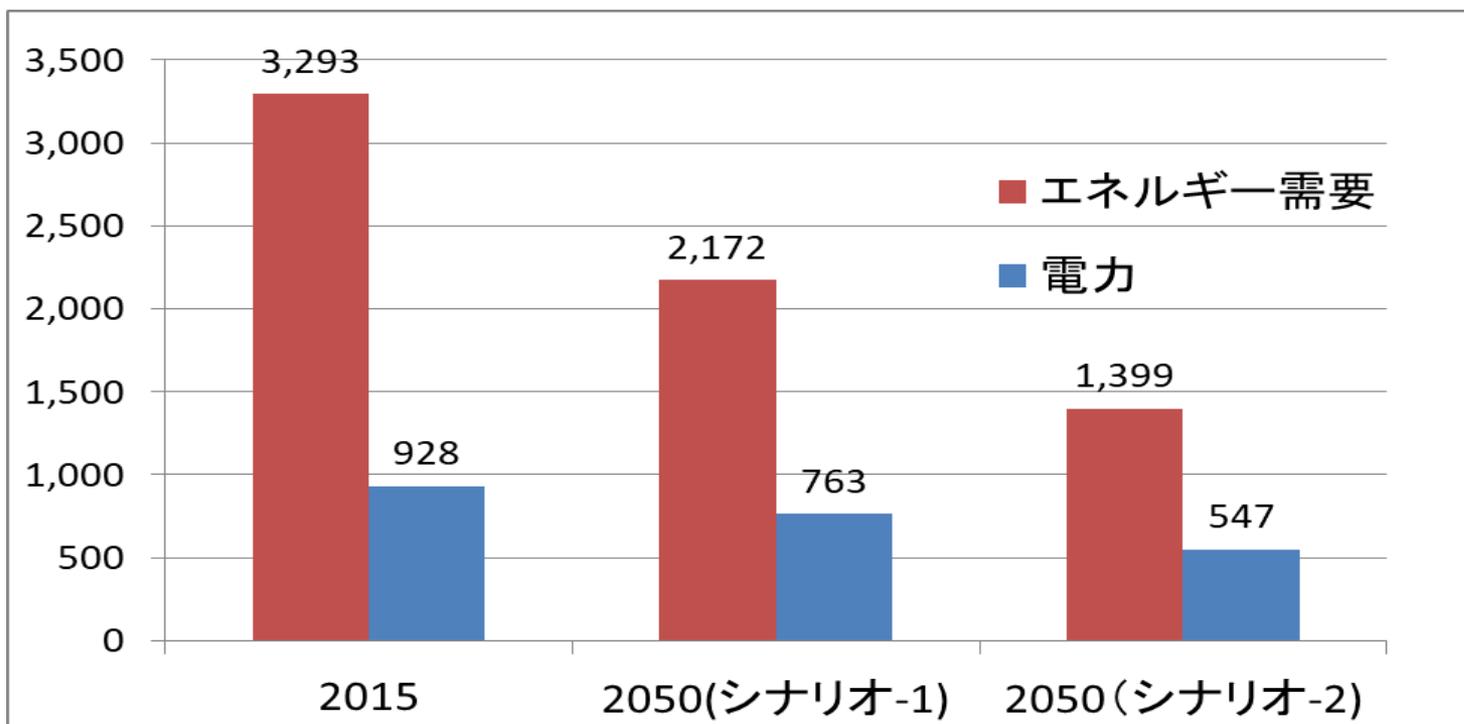
	運輸部門
カーシェアリング	普及するがエネルギー消費への影響は不明。
エコドライブ	6～15%の省エネになる
軽量化、PHVからEV/FCVへ	すべての自動車が、軽量化され、効率向上したEVとFCVになる。乗用車は5280万台から3690万台に減少する。
モーダルシフト	貨物自動車の需要の15%が鉄道と海運へモーダルシフト
航空機	CFP軽量化により30%の効率向上、旅客の一部がリモート会議へ移行

エネルギー需要の推定 (TWh)



2050年のエネルギー需要は、2015年と比較すると、シナリオ-1では活動度の変化と産業構造の変化から66%に、シナリオ-2ではさらに効率向上を加えて42%に減少する。EVの効率化のため運輸部門の減少が大きい。EVにより自動車の効率が3~4倍になる。

エネルギー需要とそのうちの電力需要



2050年の電力需要は、シナリオ-1では82%に、シナリオ-2では59%に減少する。ここで示す電力需要は、その時刻に必ず供給されるべき電力需要Aであり、このほかに余剰電力により時間的に柔軟に供給できる電力需要Bが生じる(後述)。

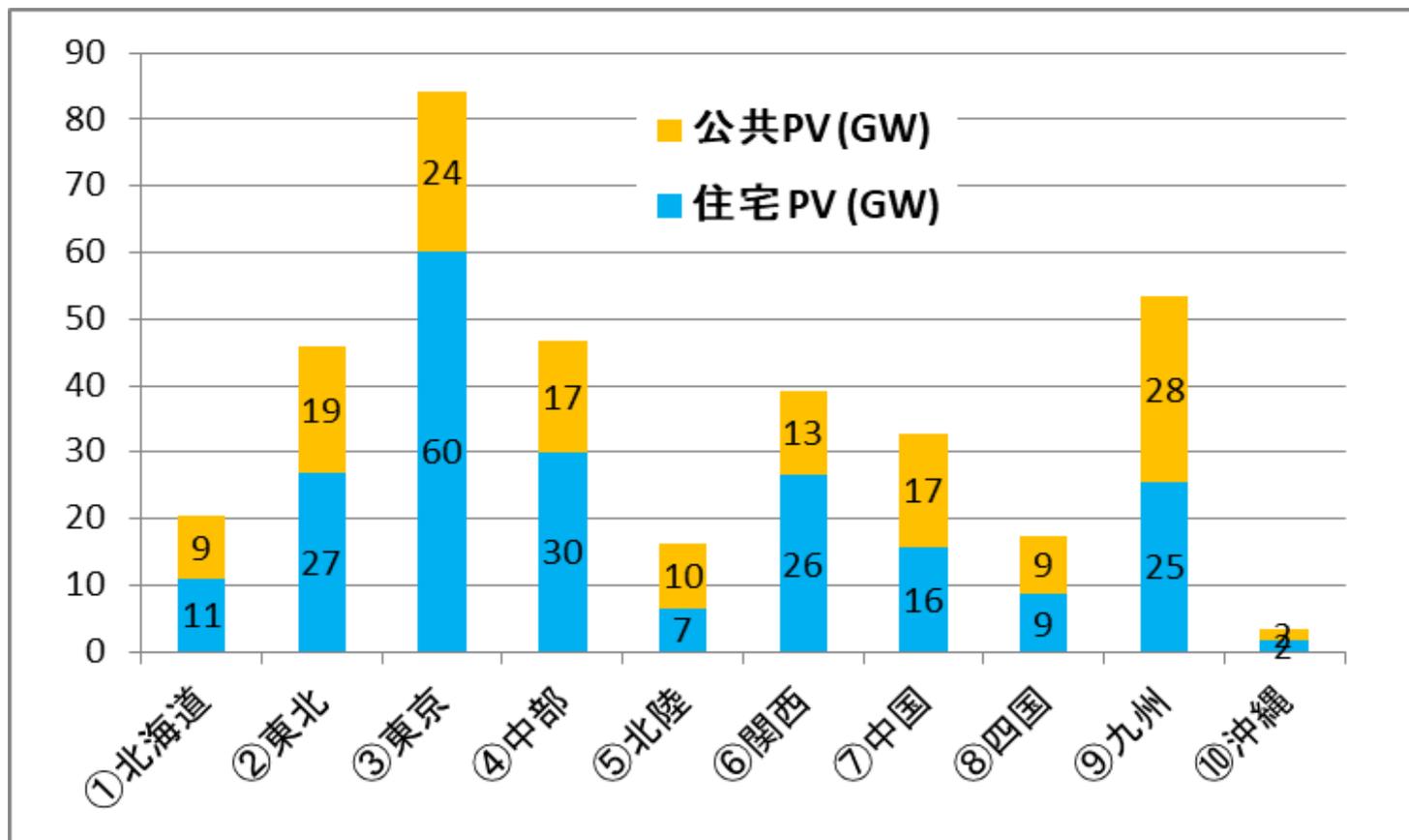
再エネの賦存量、導入可能量

	導入量	賦存量	導入ポテンシャル2050
中小水力	--	9.8 GW	9 GW
住宅PV	11.2 GW	700 GW	213 GW
公共PV	40.6 GW		147 GW
陸上風力	3.2 GW	1486 GW	286 GW
洋上風力	--	2785 GW	1413 GW
地熱	0.54 GW	14.1 GW	11.9 GW
バイオマス(電力)	4.1 GW	--	7.4 GW
バイオマス(熱)	52TWh	438TWh	127 TWh
太陽熱	5.8TWh	--	136 TWh
地中熱	--	1403 TWh	1050TWh

バイオマスの賦存量は未知であり、上記には森林が含まれていない。

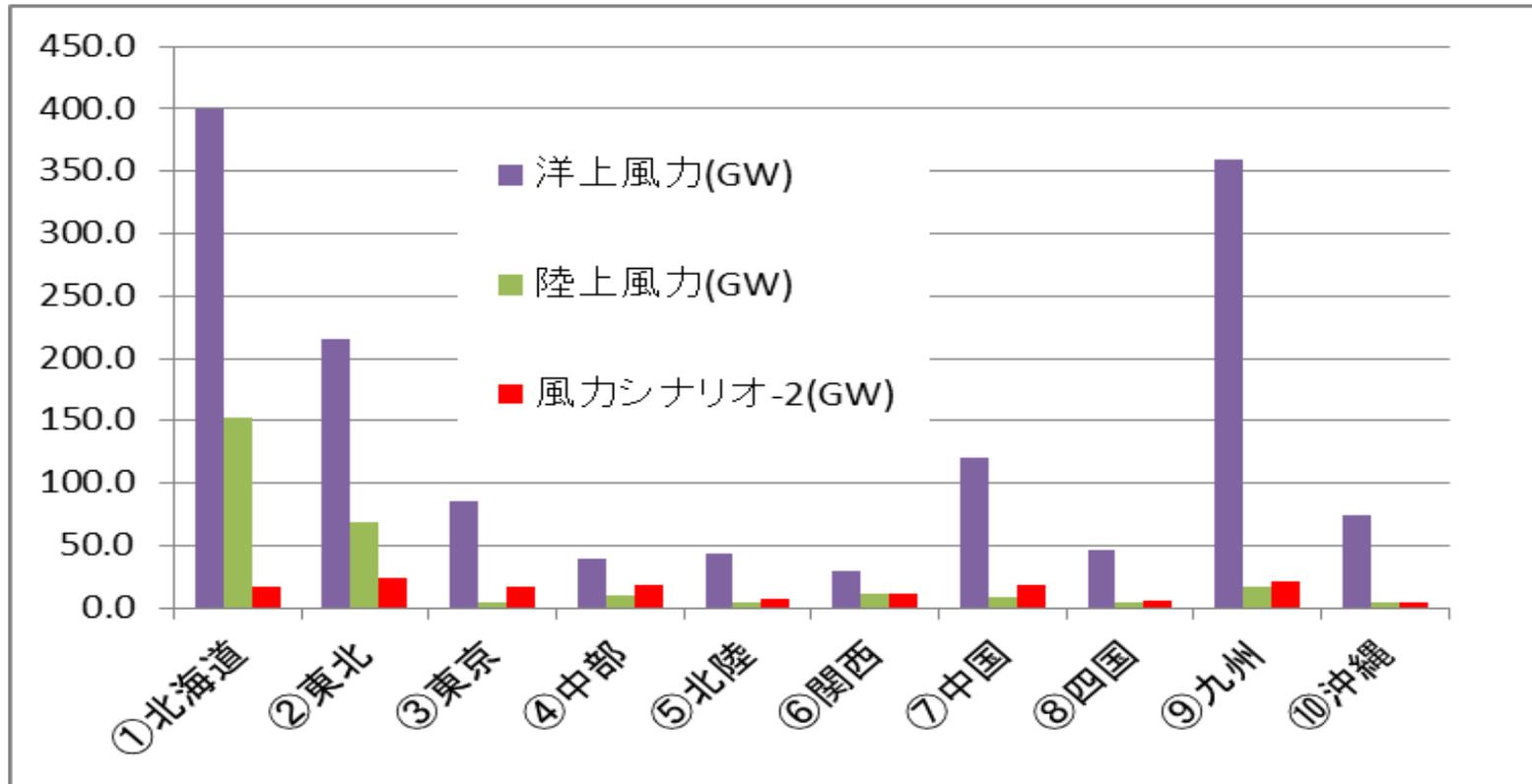
文献：H29年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報の整備・公開などに関する委託業務報告書(H30年3月 環境省)など

太陽光発電の導入ポテンシャル(シナリオ-2)



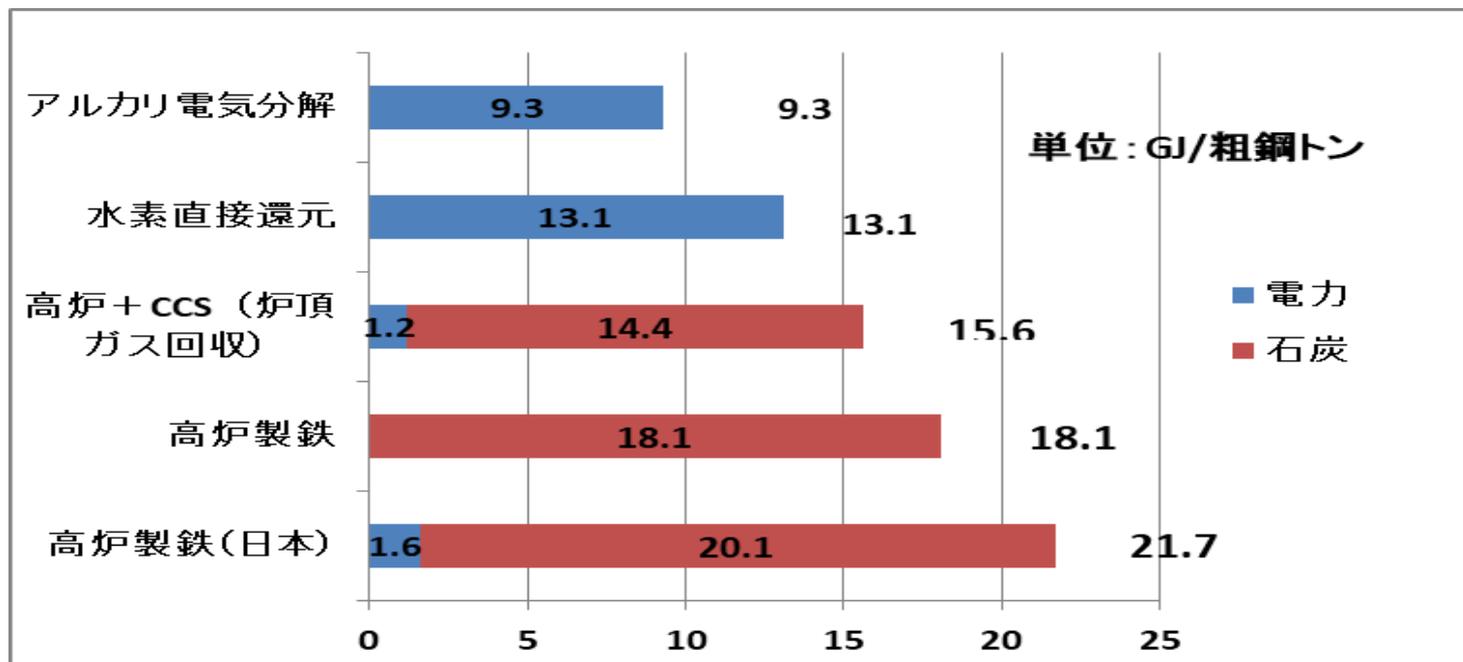
環境省調査(H29)によると、導入ポテンシャル合計は地域別には上記のように合計360GW、これをシナリオ-2で使用

風力発電の導入ポテンシャル



環境省調査(H29)の導入ポテンシャルは非常に大きく、シナリオ-2ではその一部、合計で145GWを使用している。

高炉製鉄の代替：水素還元製鉄とアルカリ電気分解



出展はブッパータル研究所の研究例。高炉製鉄(日本)は現状データを付加した。同一条件の比較ではない。電気分解はアルカリ溶液を用いる。水素直接還元は現在行われている天然ガス還元製鉄に類似のプロセスであり、水素生産の水電解電力を含む。アルカリ電気分解と水素直接還元のプロセス原単位は小さく見えるが、電力を火力発電で供給すれば大きくなるため現状では行われていない。再エネ電力が主流になれば、実現可能性がある。

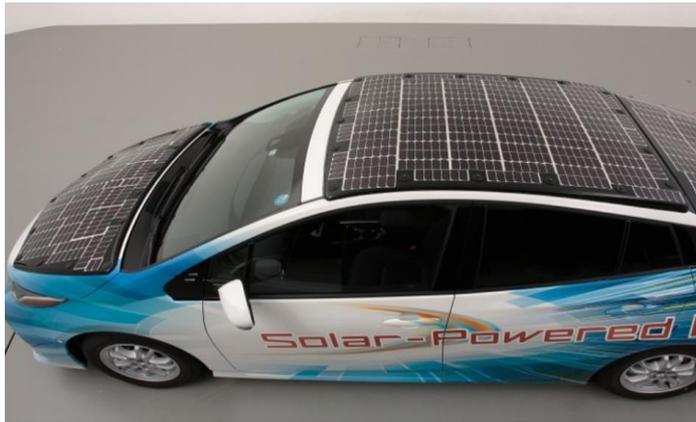
シナリオ-2では、鉄鋼生産5300万トンのうち、3000万トン(56%)を余剰電力109TWhで水素製鉄生産、2300万トン(44%)を電炉で生産するものとした。

ビルの壁面に太陽光発電(PV) CIGSソーラーファサード(ドイツ)



ビルの屋上にPVを置くのが普通だが壁面(ファサード)に設置する例が始まっている。CIGS薄膜のPVが使われている。BIPV(Building Integrated PV)と呼んでいる。3階建て以上のビルでは、屋上に設置するより多くのPVパネルを設置できる。特徴としては、正午ではなく、午前と午後に発電量が大きくなるので、屋上のPVと組み合わせれば出力を平均化できる。冬には雪の照り返しや、低い高度の太陽光を捕えることができる。シュツットガルト大学で開発中。

PVを装備したソーラーアシストカー



NEDO、シャープ、トヨタは2019年7月、プラグインハイブリッド車プリウスPHVの屋根、フード、後部ハッチドアに効率34%以上の0.03mm厚の太陽電池をとりつけ自立走行する自動車の実験を公開した。

PVの出力は860Wで、1日の充電量で44.5 kmの走行が可能であった。バッテリーをフル充電すると56 km走行可能。電気自動車として、バッテリー切れのときに、充電スタンドがなくても太陽光があれば走行可能である。

シナリオ-2では、2050年には600WのPVを搭載するソーラーアシストカーが導入され、自動車の年間走行エネルギーの20%をまかなうと想定した。乗用車は2015年から70%減少して2050年には3690万台になり、年間エネルギー需要は50TWhになる。

ダイナミックシミュレータ

地域ごとの電力需給を1時間ごとに1年間計算する

地域として、日本全体あるいは、沖縄以外の9電力地域を設定できる。9電力地域のうちのいくつかのグループを一つの地域として設定して計算できる。

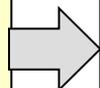
入力:

地域の気象データ
(AMEDAS2000)

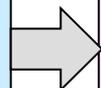
地域の電力需要A

火力・水力など既存発電設備、蓄電容量

太陽光・風力発電設備



Dynamic
Simulator



出力:

各発電設備の発電量

最大不足電力

余剰電力

揚水発電使用量

バッテリー使用量

蓄電の想定: 揚水発電2600万kW (蓄電容量260GWh)、バッテリー300GWh

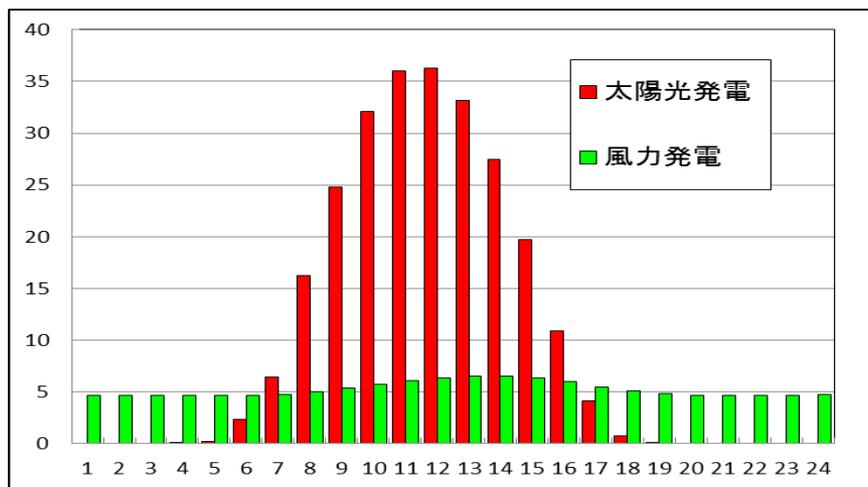
電力の不足が生じないように電力需要Aの130~190%を供給可能な発電設備を想定し、太陽光と風力の変動から生じる余剰電力を電力需要B(水素、高温熱、低温ヒートポンプ用)に供給する。

風力と太陽光発電のユニットと設置条件

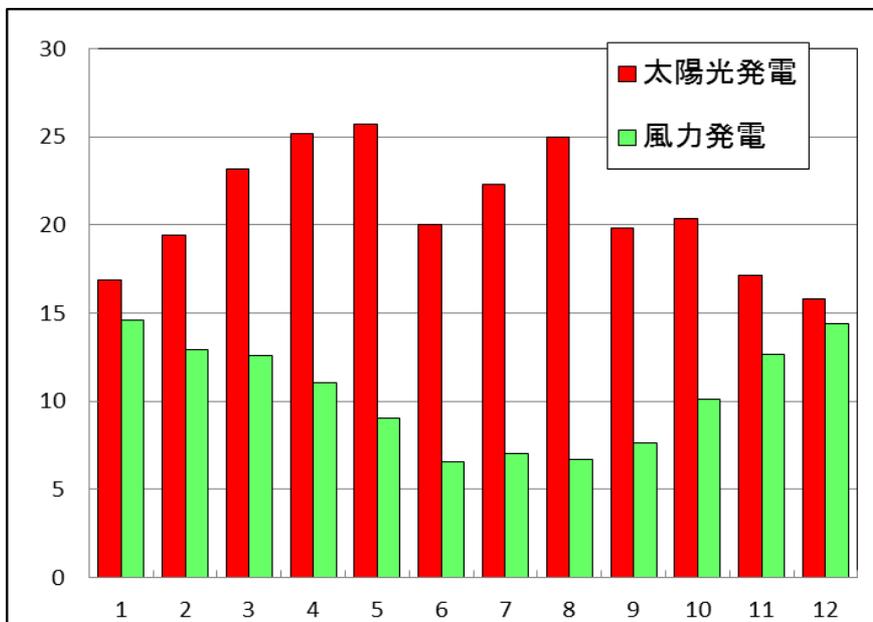
再生可能エネルギー	地点数 設備利用率	ひとつのユニットの 設置条件
太陽光発電	842地点,設備 利用率12.6%	10kW,南向き,傾斜 角=緯度-5度
風力発電	842地点から設 備利用率20% 以上の114地点 を抽出,設備利 用率30.1%	定格容量4MW,直径 115m,ハブ高さ86m, 風速毎秒3mで発電 開始,毎秒25m以上 で停止

拡張AMEDAS2000の時刻別気象データは全国842地点あり、太陽輻射と風速データを利用して計算。

1年間の時刻別発電量(TWh)



1年間の月別発電量(TWh)



太陽光と風力を組み合わせると効果的

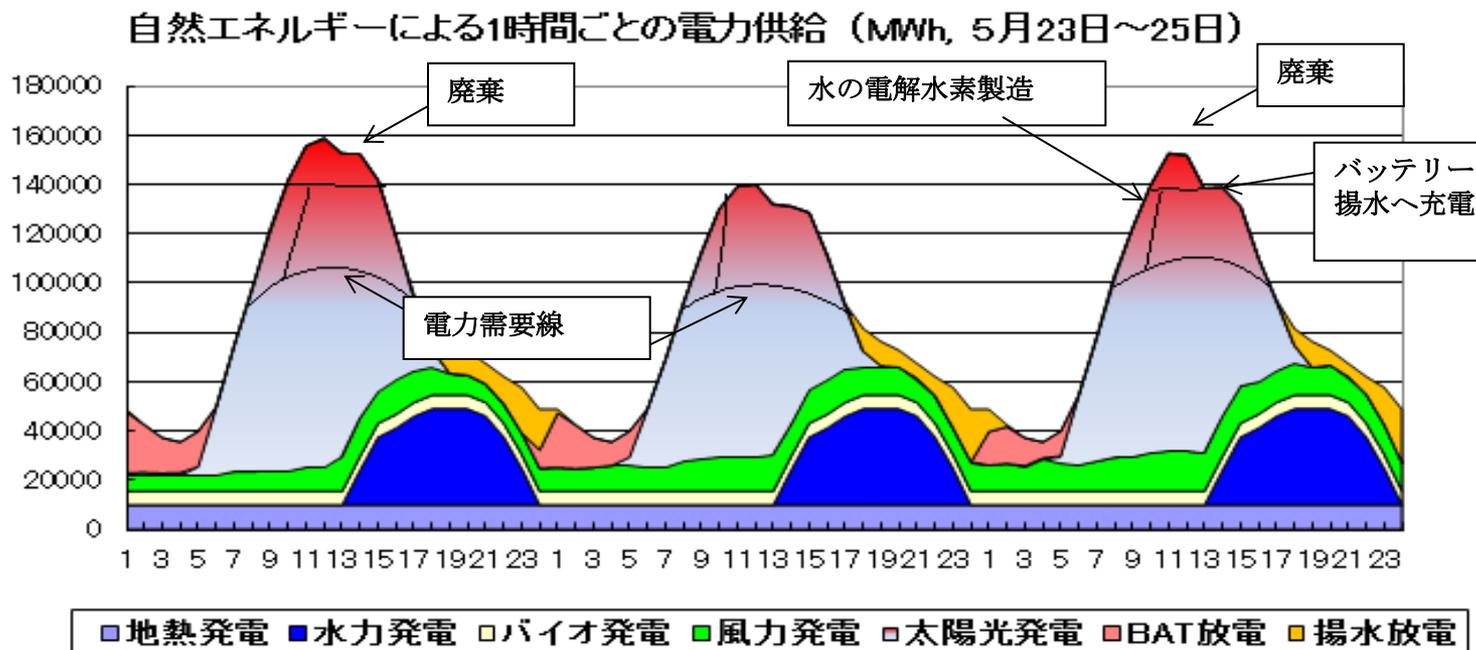
拡張AMEDAS2000の気象データから太陽光については842地点すべて、風力は風況のよい114地点を選択した。

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。風力発電は24時間どの時間でも発電しているが、季節的にみると、太陽光と逆であり、夏に小さく冬が大きい。

風力の割合が大きくなると、時間的な供給は安定し、不足が生じる可能性は少なくなってくる。

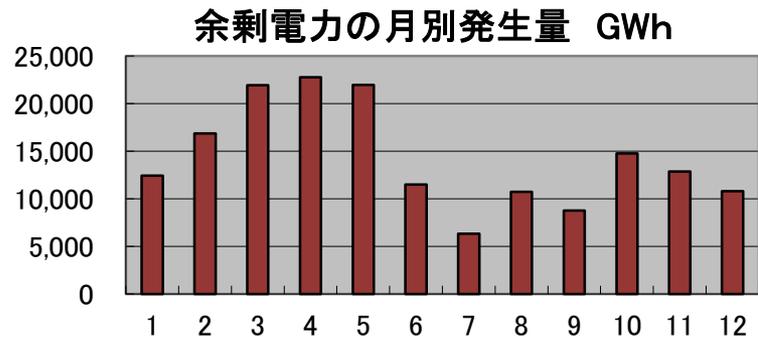
2050年再エネによる電力供給(3日間)

(日本全国842地点の拡張アメダス2000気象データを使用)



太陽光発電と風力発電の変動を、揚水発電(260GWh)とバッテリー(300GWh)からの放電が補う。水力発電は午後から夜間のピークに当てる。地熱発電は1年中一定の電力を供給する。余剰分は揚水発電/バッテリーへの充電、FCV用電解水素の生産、EVの充電、産業用高温熱、ヒートポンプで熱需要に使う

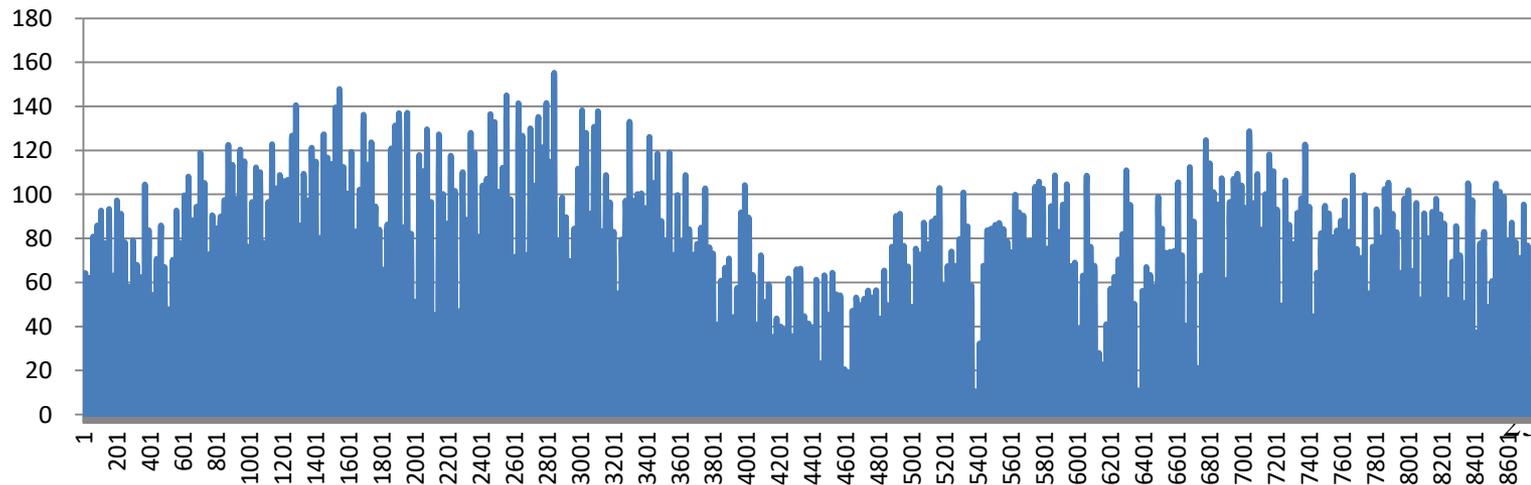
余剰電力の利用: 時間的に柔軟な電力需要Bへの供給 (EV・FCV、水素製鉄、中高温加熱、ヒートポンプ用)



変動する太陽光と風力のため余剰電力が生じる。これを電力需要Bに利用する。その発生は4月に最大、7月に最小となっている。6~7月には梅雨で太陽光が小さく、夏に風力が最小になるため。

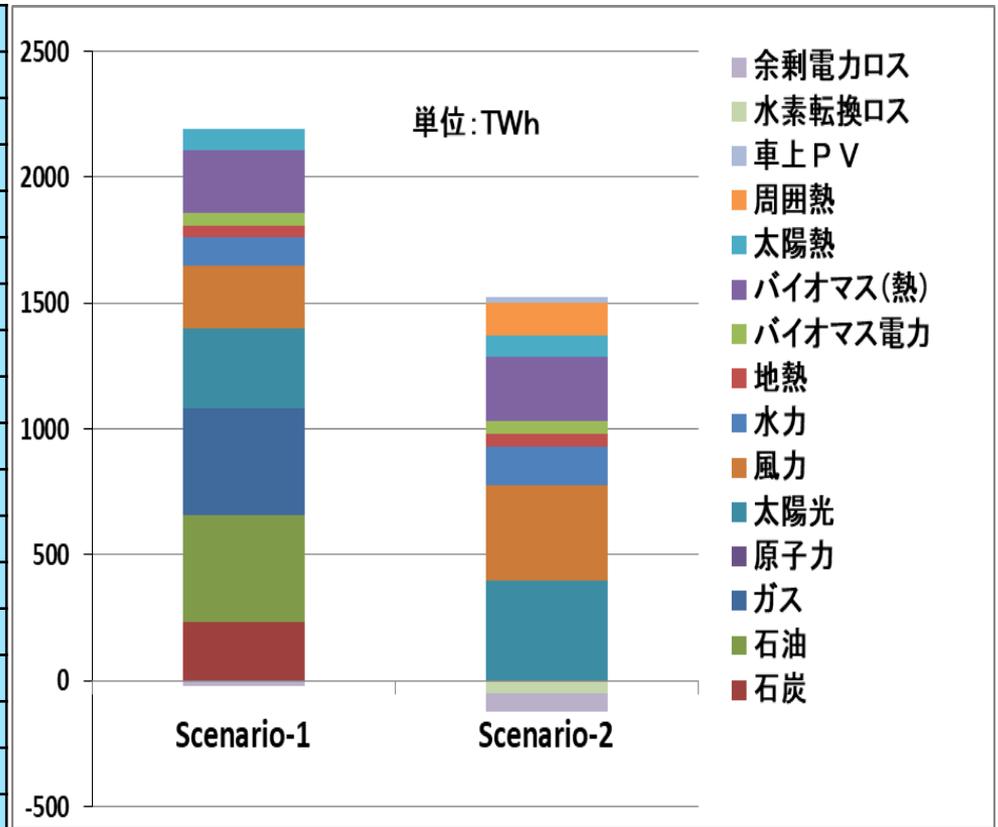
すべてを捕獲することは経済的ではなく、負荷持続曲線を作成して検討し、ピーク時の50%の規模の設備で、82%を捕獲、18%はロスになる。

1年間の1時間ごとの余剰電力の発生 (GWh/h)



エネルギー供給構成

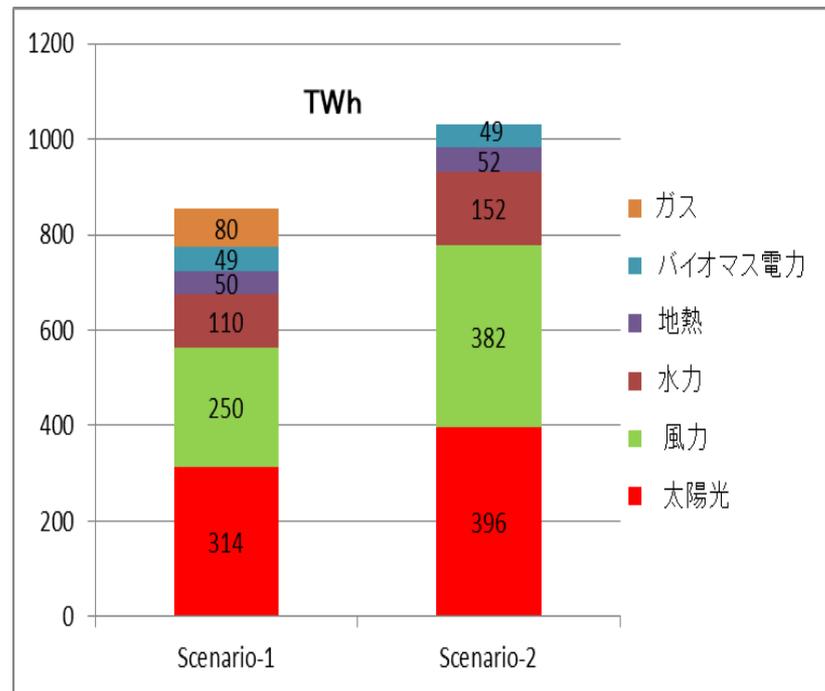
TWh	Scenario-1	Scenario-2
石炭	233	0
石油	423	0
ガス	429	0
原子力	0	0
太陽光	314	396
風力	250	382
水力	110	152
地熱	50	52
バイオマス電力	49	49
バイオマス(熱)	248	257
太陽熱	84	84
周囲熱	0	128
車上PV	0	23
小計	2190	1523
水素転換ロス	0	-50
余剰電力ロス	-18	-74
Total	2172	1399



シナリオ-1は合計2172TWh、シナリオ-2では1399TWh。シナリオ-2では、ヒートポンプ利用のために周囲熱(128Twh)を熱源として計上している。シナリオ-2では、水素転換ロスと余剰電力ロスが発生している。

電力供給システムの構成

2050	Scenario-1		Scenario-2	
電力需要A	763TWh		547TWh	
電力需要B	74TWh		361TWh	
電力ロス	15TWh		74+50TWh	
発電量	TWh	GW	TWh	GW
太陽光	314	283	396	360
風力	250	95	382	145
水力	110	37	152	46
地熱	50	8	52	9
バイオマス電力	49	12	49	12
ガス	80	10	0	0
合計	853		1031	



電力供給システムは、時間的制約のある電力需要Aと、時間的に柔軟な電力需要Bに供給する。電力需要Bは、産業用水素、産業・民生熱需要むけヒートポンプ、自動車・船舶・航空機むけ電力または水素である。シナリオ-2では、シナリオ-1よりも電力需要Bが大きく、これに対応して発電量全体が大きくなっている

再生可能エネルギーの供給(シナリオ-2)

再生可能エネルギーによる発電

水力、太陽光、風力、地熱、バイオマス

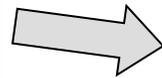


電力需要A⁽⁵⁴⁷⁾

照明、モータ、エアコン、エレクトロニクス

余剰電力

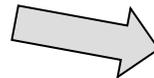
太陽光、風力



電力需要B⁽³⁶¹⁾

EV⁽⁴⁴⁾・FCV⁽²⁶⁾、水素製鉄⁽¹⁰⁹⁾、中温・高温熱⁽⁶⁵²⁾、船舶⁽²⁰⁾、航空機燃料⁽²⁰⁾、低温

太陽熱⁽⁸⁴⁾、バイオマス⁽²⁶⁷⁾、周囲熱⁽¹²⁸⁾、車上PV⁽²³⁾



ヒートポンプ⁽³⁷⁾、民生用COP=5、産業用COP=3

電力需要Bは、時間的に柔軟であり、デマンドレスポンス、天気予報により生産調整に対応する。数値はシナリオ-2のケースをTWhで示している

余剰電力とその他の供給源 (シナリオ-2)

unit=TWh		余剰電力				その他の供給				電力需要A
2050	熱需要	電力加熱	水素	ヒートポンプ	周囲熱	車上PV	バイオマス	太陽熱		
産業			H ₂ Loss						148	
高温熱(製鉄)	141	32	109							
中温熱	72	37					35			
低温熱	109				10	20	79			
					(COP=3)					
業務部門									218	
低温熱(温水・暖房)	212	5			15	60	109	23		
家庭部門					(COP=5)				169	
低温熱(温水・暖房)	159	4			12	48	34	61		
					(COP=5)					
運輸部門		EV	FCV						12	
旅客	78									
乗用車	50	40				10				
バス	4	4								
鉄道	1	1							11	
海運	6	3	3	2						
航空	17		17	17						
貨物	82									
トラック	65	26	26	24		13			1	
鉄道	0								1	
海運	14	7	7	6						
航空	3		3	1						
合計	853	159	165	50	37	128	23	257	84	547
余剰電力合計		361 + 50 (H ₂ loss)								
余剰電力損失		74								

余剰電力は熱需要Bに供給される。この表は、太陽熱、バイオマス、車上PVを含めてその分配の様子を示している。ヒートポンプ用電力は、周囲熱を利用して、民生用はCOP=5、産業用はCOP=3で効率よく熱供給を行う。バイオマスは産業用中温熱、および低温熱を供給する。太陽熱は低温熱を供給する。

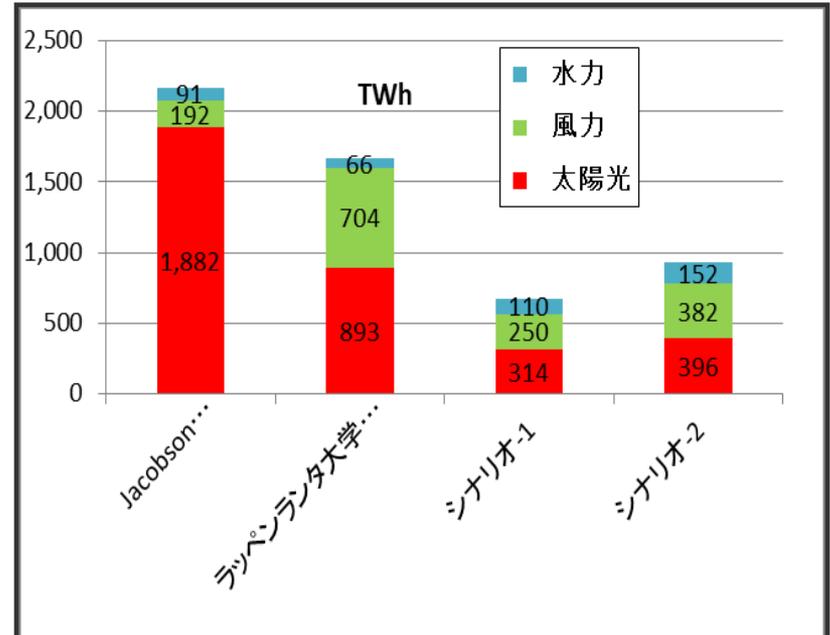
太陽光と風力の設置面積

シナリオ	供給源	GW	単位面積 (W/m ²)	面積 (km ²)	国土に占める割合 (%)
シナリオ -1	住宅PV	167	66W/m ²	2530	0.67
	公共PV	116	100W/m ²	1160	0.31
	風力	95	20MW/100ha (*)	4750	1.26
シナリオ -2	住宅PV	213	66W/m ²	3227	0.85
	公共PV	147	100W/m ²	1470	0.39
	風力	145	20MW/100ha (*)	7250	1.92
国土は37.8万km ²				(*) Eurus Energy	

シナリオ-2では太陽光360GWの設置に必要な面積は、国土面積に対して住宅0.85+公共0.39=1.24%であり、風力147GWでは1.92%である。現在の国土の利用状況は、森林66%、農地13%、住居5%、道路3%であり、再エネの設備に必要な面積は、国土の1~2%の程度になる。

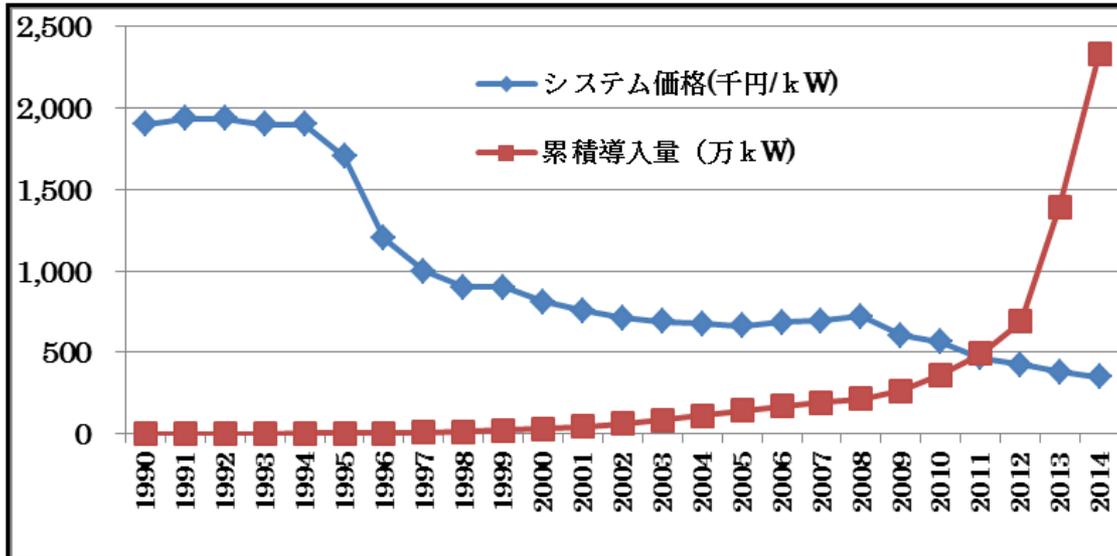
海外の研究との比較

TWh	Jacobson スタンフォード大学	ラッペンランタ 大学 (フィンランド)	シナリオ-1	シナリオ-2
エネルギー需要	2,197	2,356	2,172	1,399
電力需要	2,197	2,356	853	1,031
太陽光	1,882	893	314	396
風力	192	704	250	382
水力	91	66	110	152

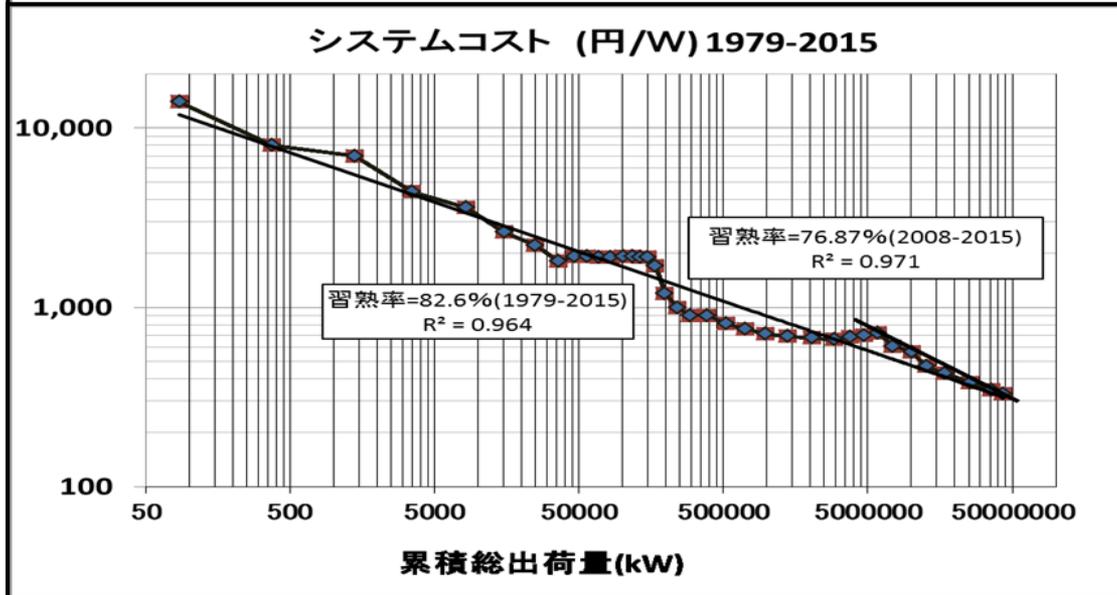


日本の2050年の100%再エネ供給について、スタンフォード大学とラッペンランタ工科大学(フィンランド)の2つの研究が知られている。いずれも太陽光の比重が大きく、太陽熱やバイオマスは含まれていない。

太陽光発電システムのコスト低下



太陽光発電システムの価格と累積導入量(1990~2015)



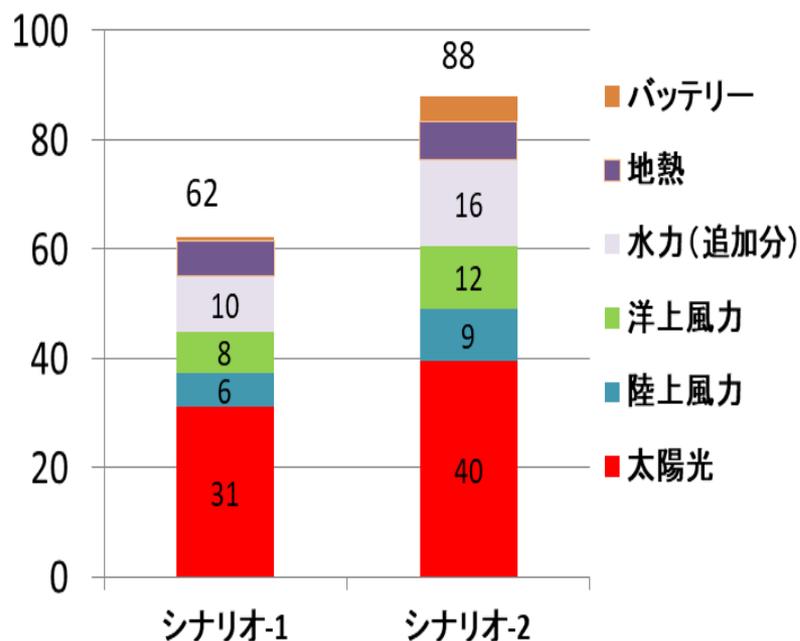
太陽光発電システムの価格と累積導入量(1979~2015).

回帰分析結果は学習曲線に乗っている.累積生産量が2倍になるとコストは80%に低下。

100%再エネシナリオのコスト

	単価	シナリオ-1		シナリオ-2	
	千円/kW	GW	兆円	GW	兆円
太陽光	110	283	31	360	40
陸上風力	130	48	6	73	9
洋上風力	160	47	8	72	12
水力(追加分)	600	17	10	26	16
地熱	800	8	6	9	7
バッテリー	15	50	0.8	300	4.5
合計			62		88

バッテリーコストは千円/kWh、容量はGWh



30年間の再エネの設備投資コストは、シナリオ-1で62兆円、シナリオ-2では88兆円である。再エネコストは世界的に急激に低下しており、既存エネルギーの価格に対して十分な投資効果がある。2020-2050年の30年間の平均年間投資額は2~3兆円になり、GDPの0.4~0.6%である。

Thank you

