

2050年脱炭素社会に向けた 100%自然エネルギーシナリオ



WWFジャパン主催ウェビナー
WWF「脱炭素社会に向けた2050
年ゼロシナリオ」発表会
～2030年エネミックスとパリ協定
への温室効果ガス削減目標を考
える～

2020年12月11日

システム技術研究所
所長 槌屋 治紀

100%自然エネルギーシナリオ 目次

- 1) エネルギーシナリオ作成プロセス
- 2) 人口減少と活動度
- 3) 産業の構造変化
- 4) エネルギー需要の推定
- 5) 自然エネルギーの導入可能量
- 6) 2030年のシミュレーション
- 7) 2030年石炭火力の廃止
- 8) 2050年のシミュレーション
- 9) 水素製鉄、周囲熱、車上PV
- 10) エネルギー供給構成
- 11) 自然エネルギー設置面積
- 12) CCUS (CO₂捕獲と再利用)

100%自然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？

100%自然エネルギーシナリオの作成プロセス

人口減少・持続可能社会へ

産業構造変化、効率向上

エネルギー
需要の削減

国内自然エネルギーポテンシャル調査

- ①2030年自然エネルギーが電力のおよそ50%
- ②2050年100%自然エネルギーの供給

2050年CO2
排出量ゼロ

人口減少、産業構造の変化、効率向上によりエネルギー消費は縮小してゆく。エネルギー需要が削減できれば、自然エネルギーの供給を行う場合の問題が小さくなり、無理なく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
2015年

×

活動度
人口、素材
輸出、建物
の長寿命
化、情報化

×

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、将来の活動度、効率向上の積でできる。活動度は、最終用途ごとに適切な指標から推定する。

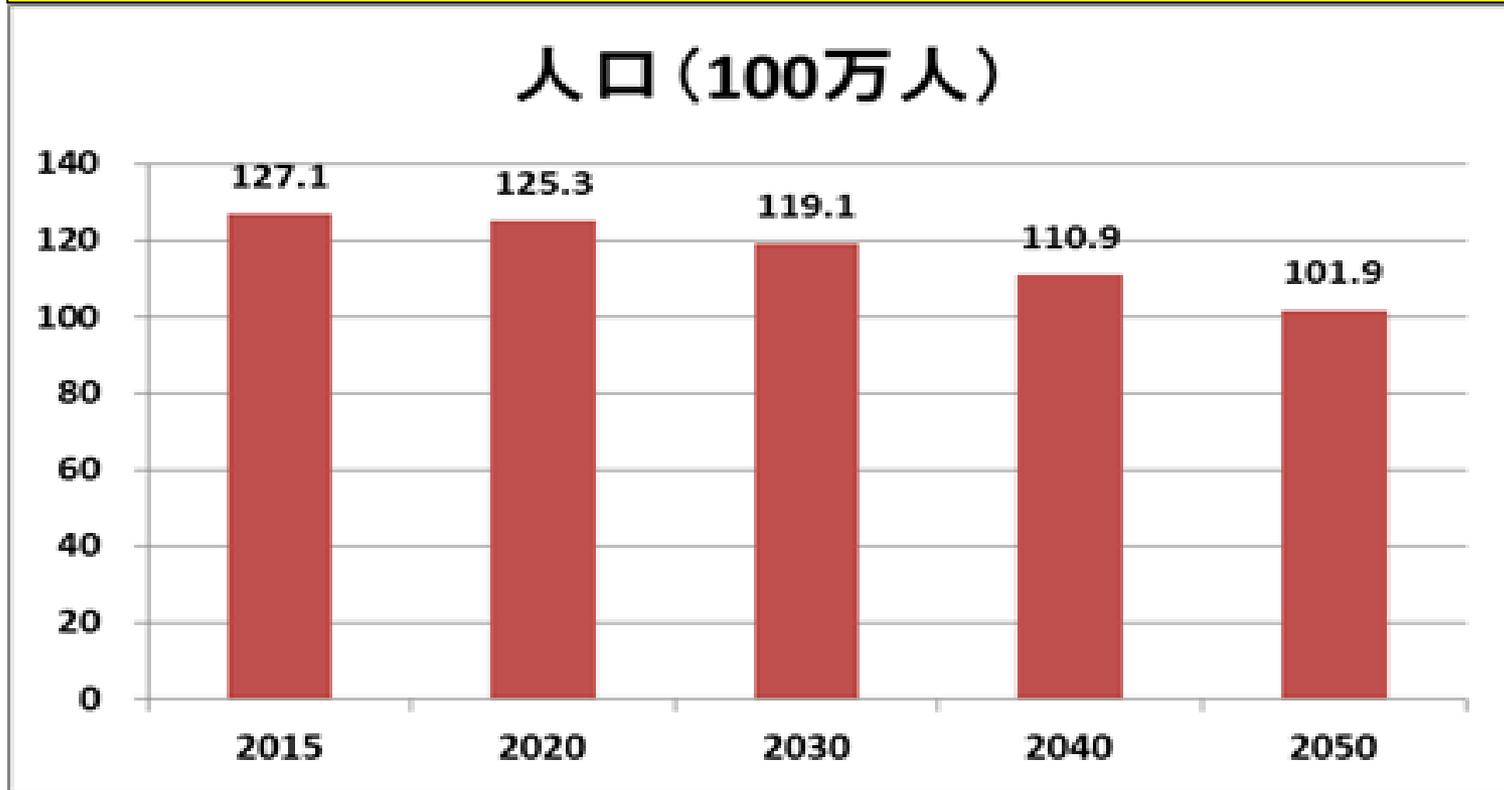
エネルギーシナリオ

	2030年	2050年
目標	2013年レベルからCO2排出をおよそ50%に削減する	すべてのエネルギー用途に自然エネルギーを供給し、CO2排出をゼロにする
エネルギー需要	人口減少により活動度が減少、効率化が進み、これに比例してエネルギー需要も減少	人口減少80%と産業構造変化に伴って活動度はさらに減少、合わせてエネルギー効率向上によりおよそ半分に減少
エネルギー供給	電力はおよそ50%を自然エネルギーから残りをガス、石油、原子力(*)から供給。石炭火力を廃止になる。	太陽光、風力、水力、地熱、バイオマス、周回熱など、100%自然エネルギーを電力と熱・燃料需要に供給
民生部門	効率のよい家電製品が普及。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太陽熱を供給
産業部門	産業構造変化が進展。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	産業構造変化がさらに進展。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加熱またはヒートポンプにより熱需要に供給
運輸部門	乗用車のEV化が進展する。石油をトラック、船舶、航空機に供給	車上PVが普及。乗用車はEVに、トラックはEVとFCVになる。余剰電力から水素を生産して船舶、航空機に供給

(*)原子力についてはすでに再稼働決定したもの、および適合性審査完了済・申請済は稼働するが、新規建設はしない。2030年には3基のみ322万kW(泊、東通、志賀)が稼働、2038年以降ゼロになると想定した。

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度が減少し、エネルギー需要が減少する。

産業部門の構造変化の推定

総合変化量 = 人口減少 * 素材輸出減少 * 建物長寿命化 * 情報化

2015年→2050年	活動量の要因別変化量(%)				総合変化量
	人口減少	輸出増減	建物の長寿命化	情報化	
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%

産業構造の変化

産業	2015	2030	2040	2050	産業の活動度の変化
農林水産鉱建設業	100%	94%	87%	80%	日常生活に関係が深い産業は人口比で80%に減少
食品飲料製造業	100%	94%	87%	80%	
繊維工業	100%	94%	87%	80%	
パルプ・紙・紙加工	100%	87%	76%	65%	材料資源消費に関係が深い産業は60%近くに減少する
化学工業(含 石油)	100%	84%	71%	56%	
プラスチック・ゴム・	100%	84%	71%	56%	
窯業・土石製品製	100%	85%	71%	58%	
鉄鋼・非鉄・金属製	100%	84%	68%	53%	知能情報機械など輸出に貢献する産業が144%に増加する
機械製造業	100%	115%	130%	144%	

紙、プラスチック、セメント、鉄鋼など材料資源を生産する産業の活動度が縮小して、エネルギー消費が小さくなる。これに対して、コンピュータ、自動運転自動車、ロボット、AI機器などを製造する知能情報機械産業の活動度が増大し、輸出を伸ばす。全体として産業のGDPへの寄与は増加する。

省エネルギー

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PCや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	リモート会議	出張などがリモート会議へ移行してエネルギー消費が低減する

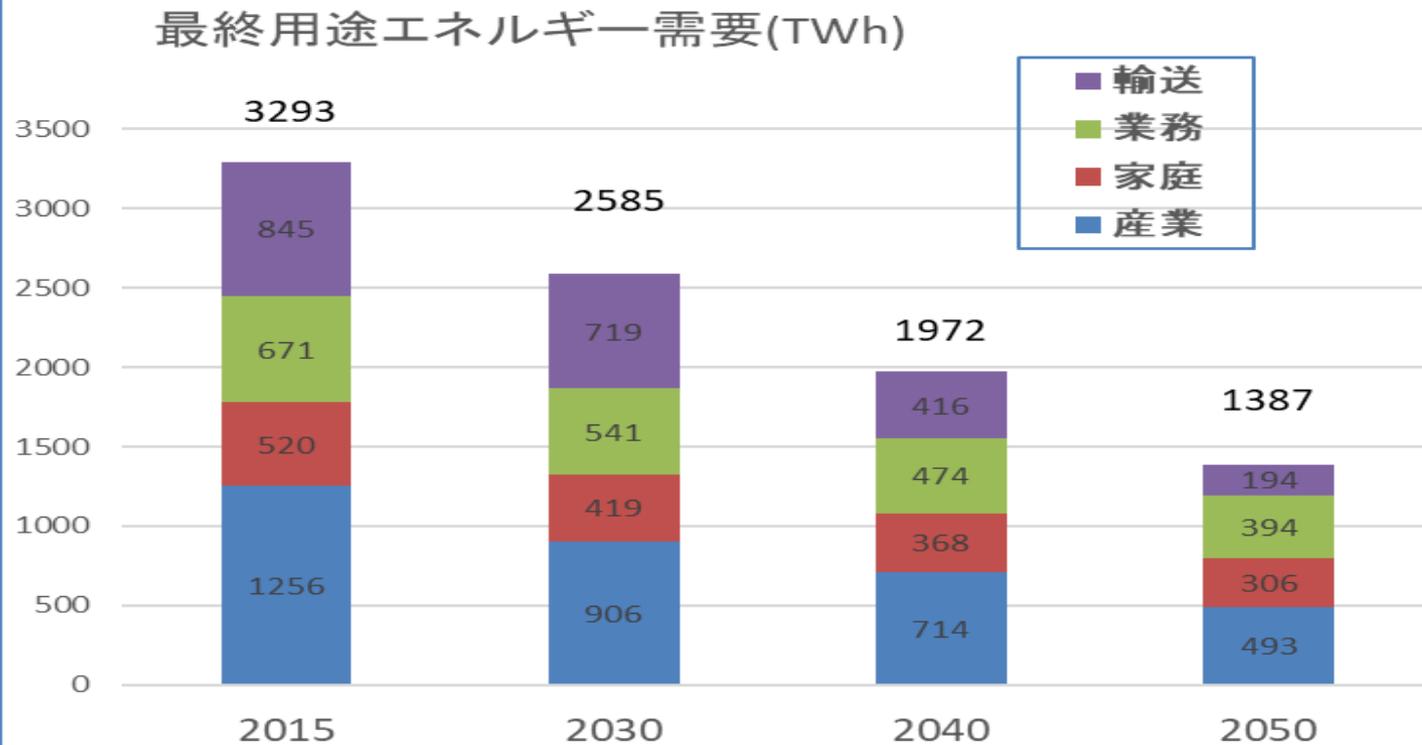
省エネルギー

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5512万トンへ減少し、リサイクル率は70%になり、水素製鉄で1653万トン、電炉で3858万トンの生産
化学・窯業・紙パルプ	生産量が減少してゆくが、高効率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

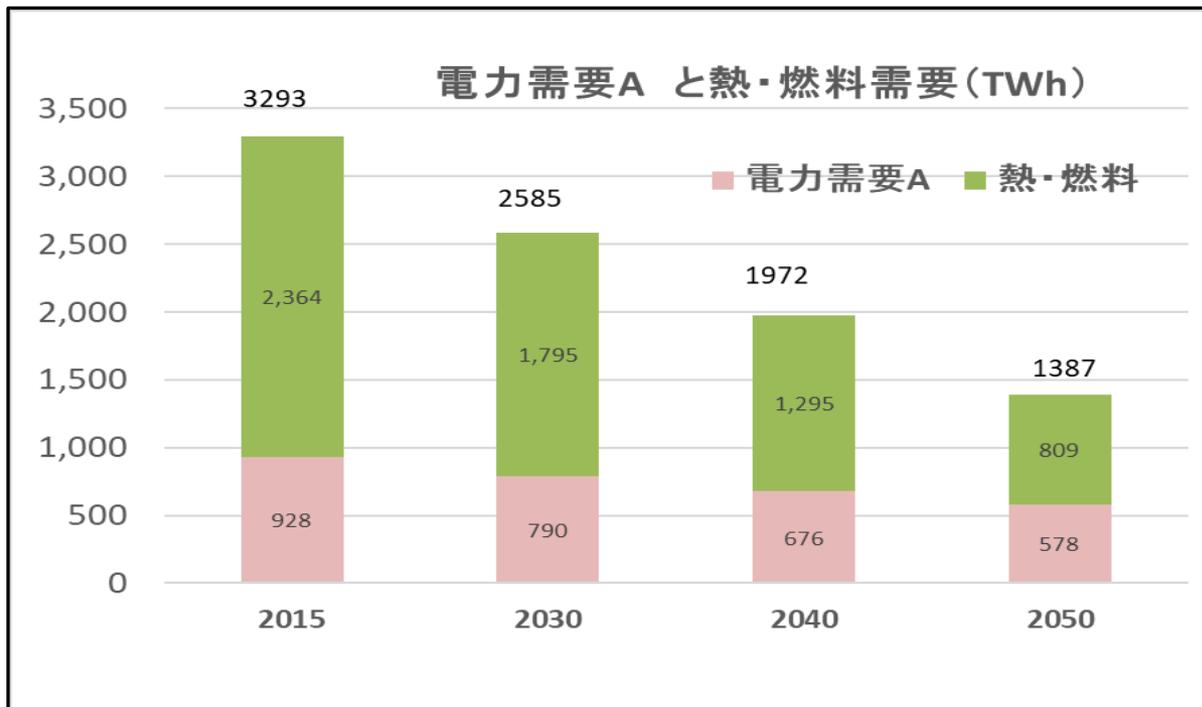
	運輸部門
カーシェアリング	普及するがエネルギー消費への影響は不明。
エコドライブ	6~15%の省エネになるが影響は考慮していない。
軽量化、EV/FCVへ	すべての自動車が、軽量化され、乗用車はEVに、トラックは半分ずつEVとFCVになる。乗用車は5280万台から2050年には3690万台に減少する。
船舶	小型機はバッテリーまたは水素+FC駆動、大型機は水素+FCに移行
航空機	小型機はバッテリーまたは水素+FC駆動、大型機は水素ジェットに移行

エネルギー需要の推定 (TWh)



2015年と比較すると、2030年のエネルギー需要は活動度の変化と産業構造の変化から78%に、2050年にはさらに効率向上を加えて42%に減少する。EVの導入により自動車の効率が3~4倍になるため運輸部門の減少が特に大きい。

電力需要Aと熱・燃料需要



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、このほかに時間的に柔軟にシフトできる電力需要Bがあり、余剰電力から供給される。

電力需要Aは2015年から2030年には85%に、2050年には62%に減少する。熱・燃料需要は産業構造の変化と輸送の効率化により大きく減少し、2015年から2030年には76%に、2050年には42%に減少する。2050年には熱・燃料需要の一部は電力需要Bとして、余剰電力から供給される。

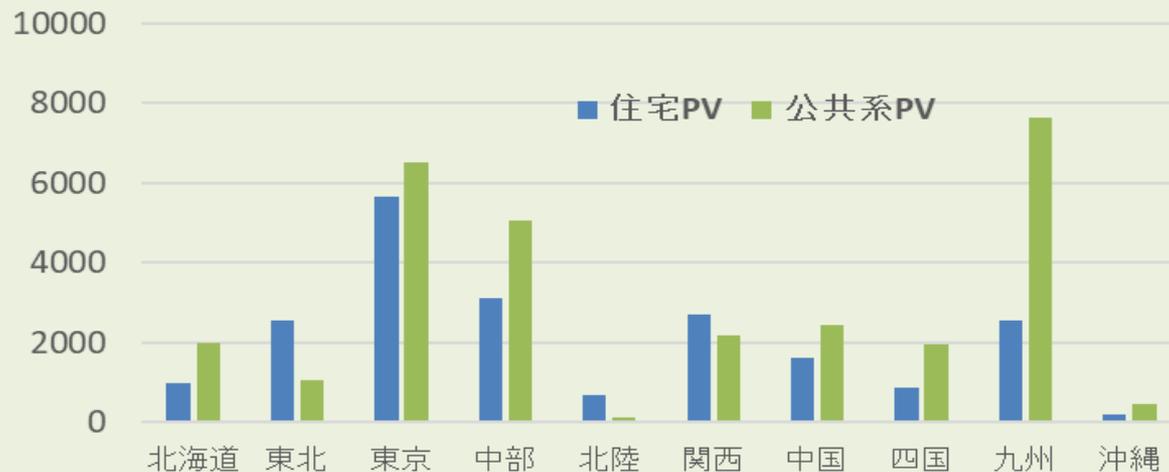
自然エネルギーの賦存量、導入可能量

	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	非常に大きい	209 GW
公共PV	40.6 GW		2536 GW
陸上風力	3.2 GW	1486 GW	284 GW
洋上風力	--	2785 GW	1120 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	181 TWh
太陽熱	5.8TWh	--	136 TWh
地中熱	--	1403 TWh	1050TWh

出典：H29年度自然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

太陽光のポテンシャル(万kW)



{設置場所}

公共PV:

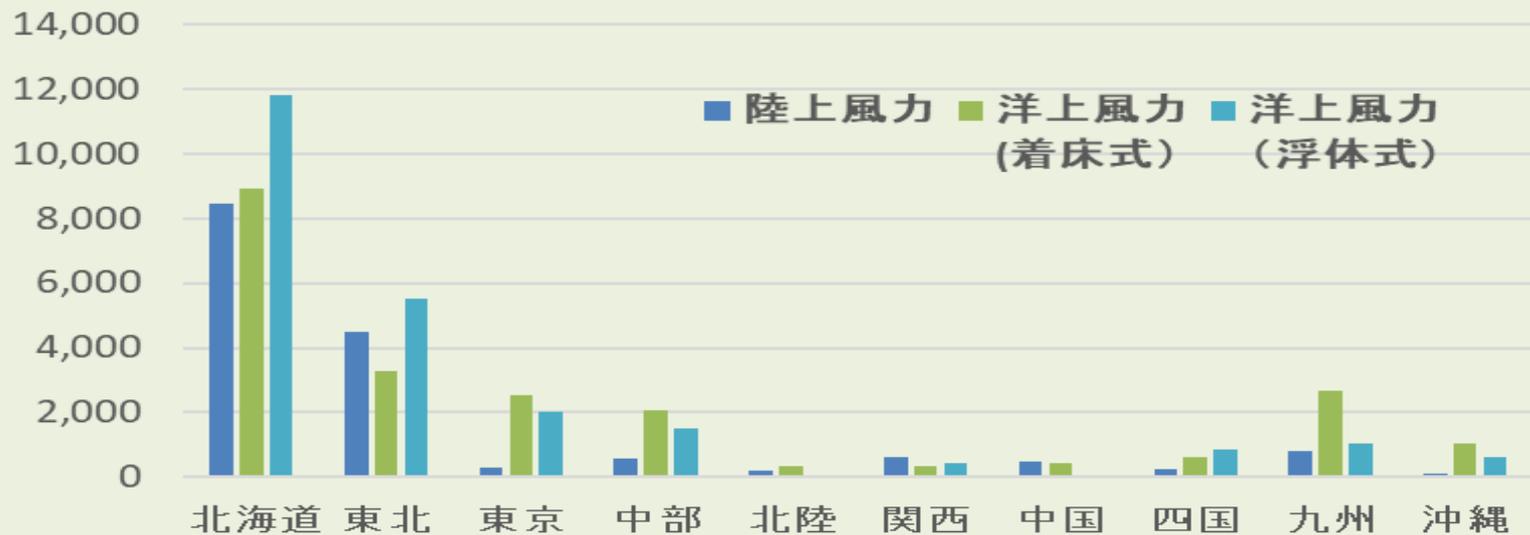
学校、鉄道、道路、河川敷および耕作放棄地

住宅PV: 独立住宅および集合住宅の屋根と壁

環境省調査(H29)によると、太陽光はどこでも日射があれば設置できるので、その賦存量は大きすぎて調査しないとある。導入ポテンシャルは、設置場所により公共PVと住宅PVに区分されている。シナリオでは2050年にはふたつの合計で360GWに設定した。

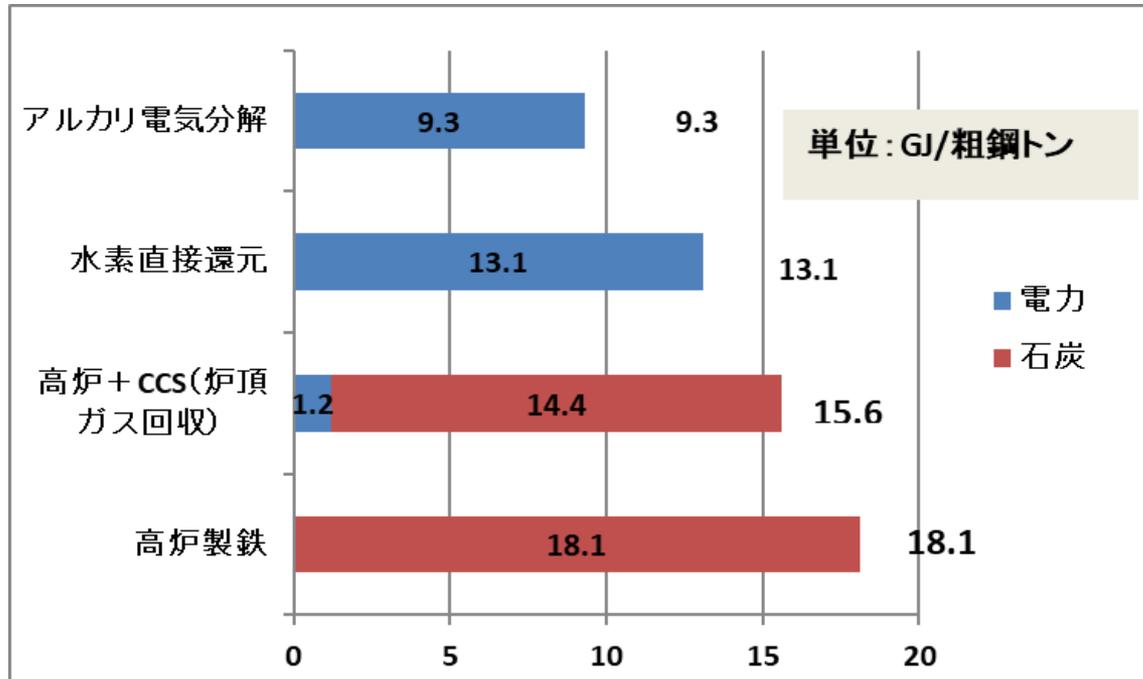
風力発電の導入ポテンシャル

風力発電ポテンシャル(万kW)



環境省調査(H29)の風力導入ポテンシャルは非常に大きく、合計で陸上284GW、洋上1120GWである。2050年にはその一部、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



水素による製鉄は高炉製鉄と比較して鉄1トンを製造するのに必要なエネルギー原単位は大きく変わらない。将来は、北海道や九州の豊富な風力を利用して実現されるだろう。

図はブッパータル研究所の研究例。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。自然エネルギー電力が主流になれば、実現可能性がある。2050年には、鉄鋼生産5512万トンのうち、1653万トン(30%)を余剰電力70TWhで水素還元製鉄で生産、3858万トン(70%)を電炉で生産する。

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。

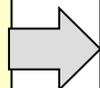
入力:

地域の気象データ
(AMEDAS2000)

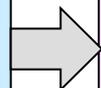
地域の電力需要A

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(容量260GWh)、バッテリー100~300GWh

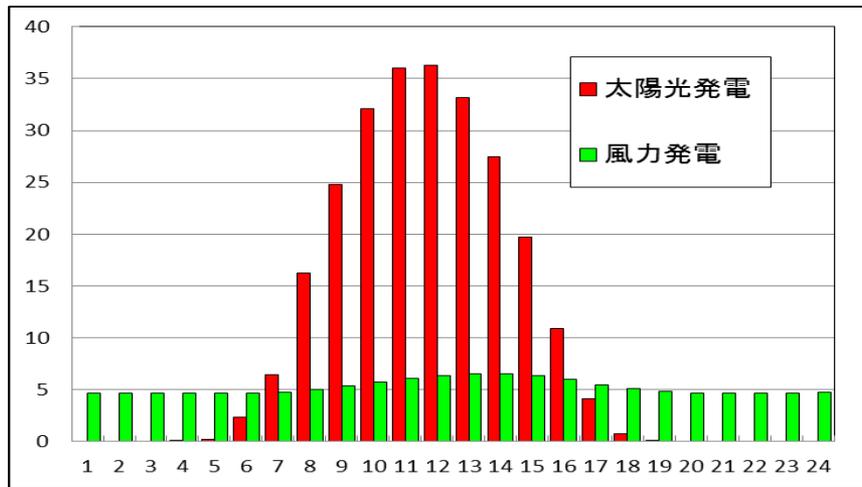
電力の不足が生じないように電力需要Aの110~190%を供給可能な発電設備を想定し、太陽光と風力の変動から生じる余剰電力を電力需要B(水素、高温熱、低温ヒートポンプ用)に供給する。

風力と太陽光発電のユニットと設置条件

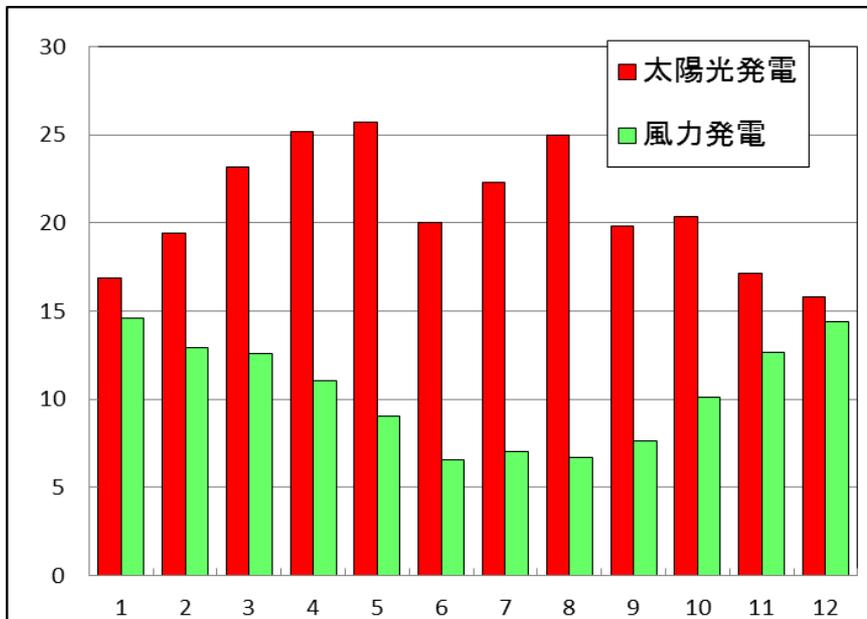
自然エネルギー	地点数 設備利用率	ひとつのユニットの 設置条件
太陽光発電	842地点,設備 利用率12.6%	10kW,南向き,傾斜 角=緯度-5度
風力発電	842地点から設 備利用率20% 以上の114地点 を抽出,設備利 用率30.1%	定格容量4MW,直径 115m,ハブ高さ86m, 風速毎秒3mで発電 開始,毎秒25m以上 で停止

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)



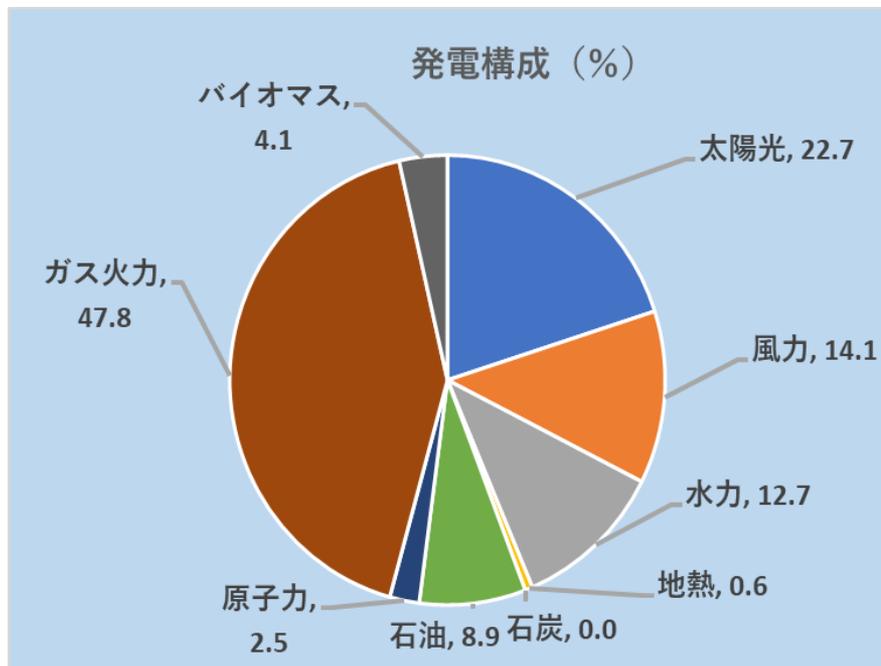
太陽光と風力を組み合わせると効果的

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。

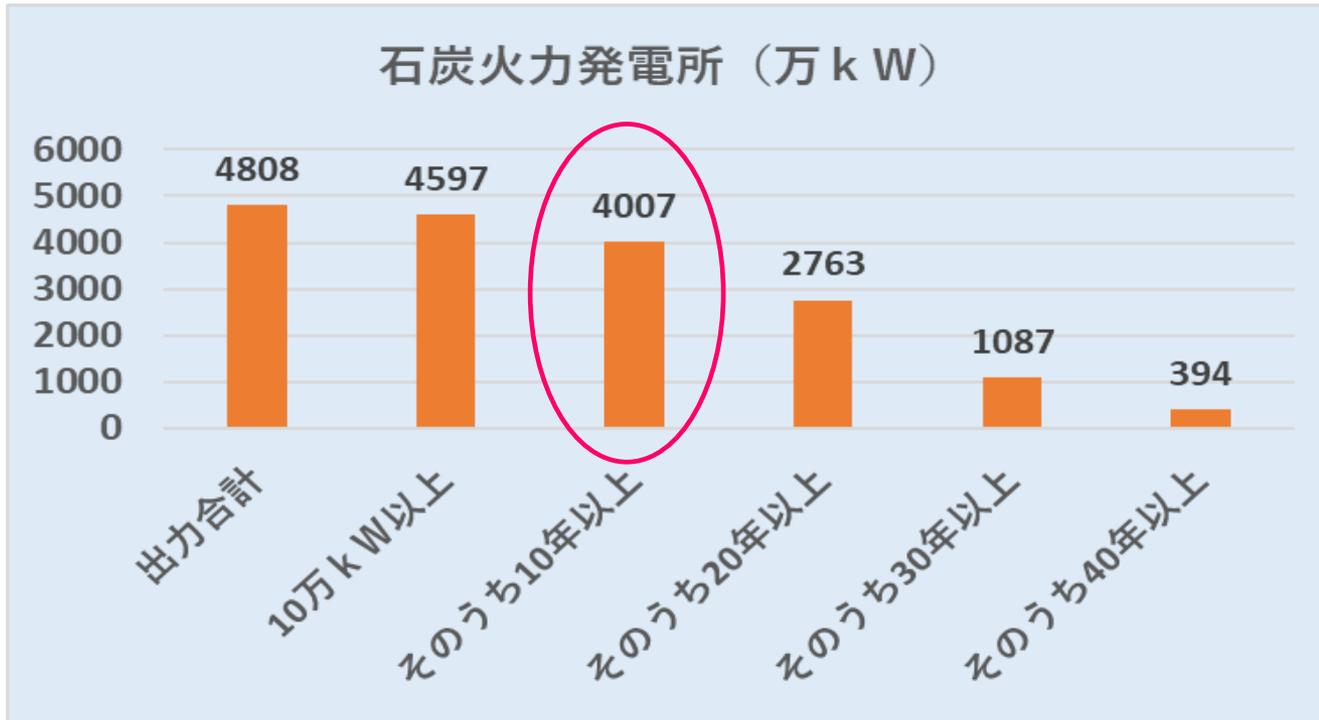
2030年のシミュレーション 電力供給構成



	TWh/年	規模	単位
太陽光	180	太陽光発電容量	161 GW
風力	111	風力発電容量	42 GW
水力	100	揚水発電/バッテリー容量	260/ 100 GWh
地熱	5		
石炭	0		
石油	71	年間電力需要	790 TWh/年
原子力	20	年間平均電力	90 GW
ガス火力	378	ピーク電力需要	137 GW
バイオマス	32		
合計	896	発電量合計	896 TWh/年

2030年の電力供給構成は、石炭はゼロであるが、ガス火力が大きく、石油と原子力も含まれている。太陽光22.7%、風力14.1%、水力12.7%、バイオマス4.1%、地熱が0.6%となっている。発電量合計は896TWh(113%)であり、これは電力需要Aを100%としている。太陽光161GW、風力42GW、蓄電用に揚水発電260GWh、バッテリー100GWhの利用を想定している。

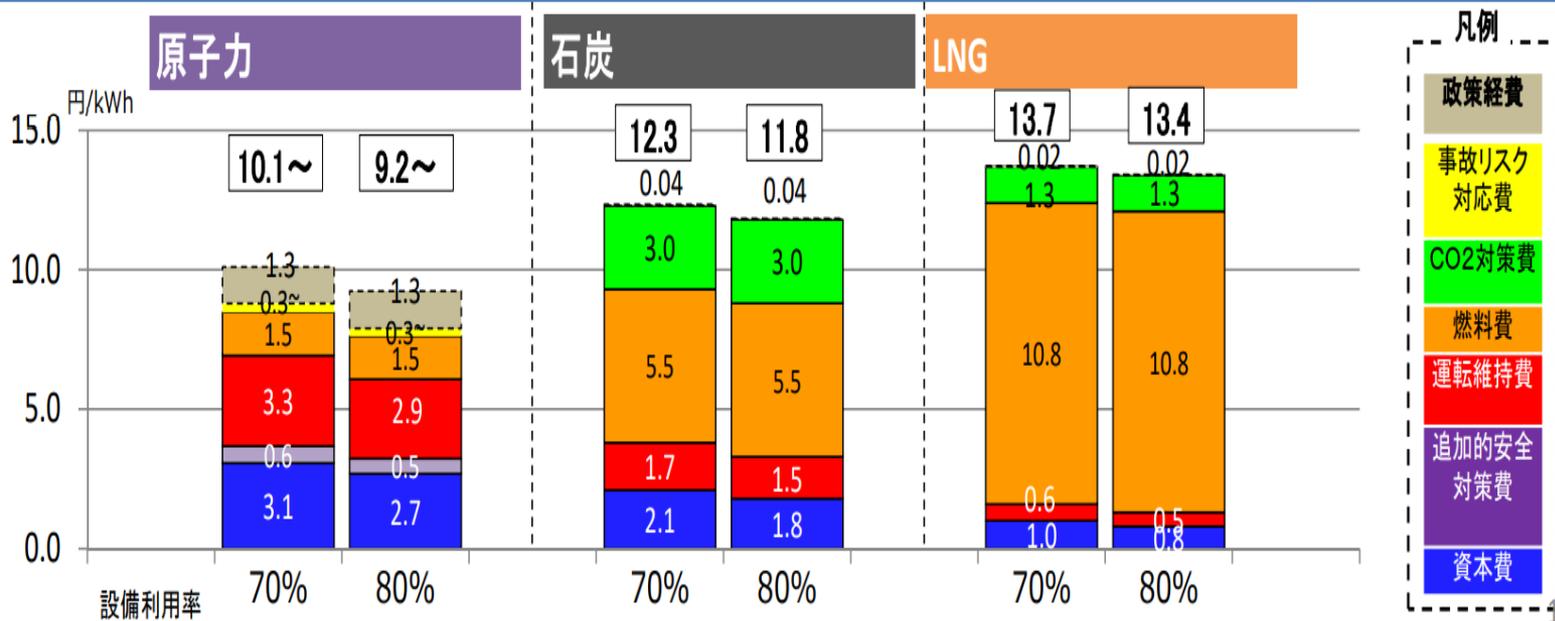
石炭火力の設備寿命



全国の10万kW以上の発電所の2019年現在の年齢別構成を示す。10年後の2030年には、20歳以上の発電所が4007万kWになり、30歳以上のプラントが2763万kWになる。**2030年時点で寿命20年以上の発電所をすべて閉鎖とすると4007万kWの廃止**であり、83%の廃止になる。

石炭火力→ガス火力への代替費用

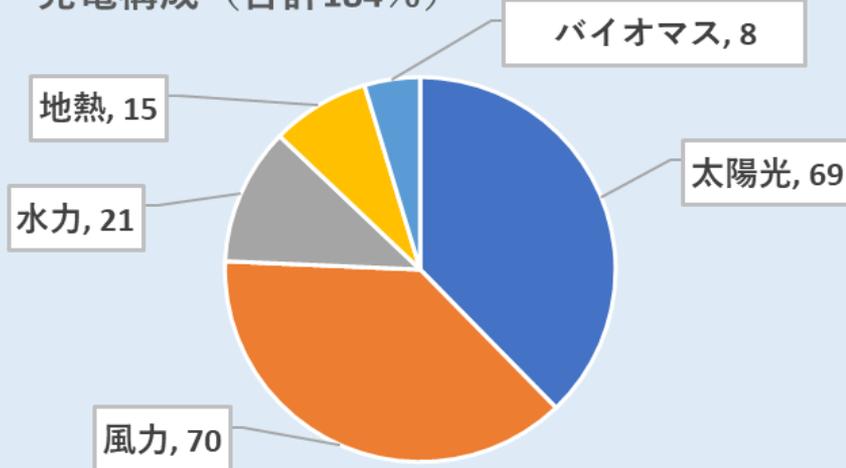
2014年モデルプラントにおける設備利用率70%と80%の試算結果の比較



- 石炭火力とLNG火力の1 kWhあたりのコスト差を比較すると
 - 設備利用率が70~80%のとき、1.4円~1.6円
 - 石炭火力→ガス火力に転換した場合の年間費用の差は、
 $260\text{TWh} \times (1.4 \sim 1.6\text{円}) = 3640 \sim 4160\text{億円}$
 - 2030年には太陽光や風力のコストが低下してこの費用の差は縮小
- (出典: 発電コスト検証ワーキンググループ、長期エネルギー需給見通し小委員会
平成27年5月、資源エネルギー庁)

2050年のシミュレーション

発電構成 (合計184%)

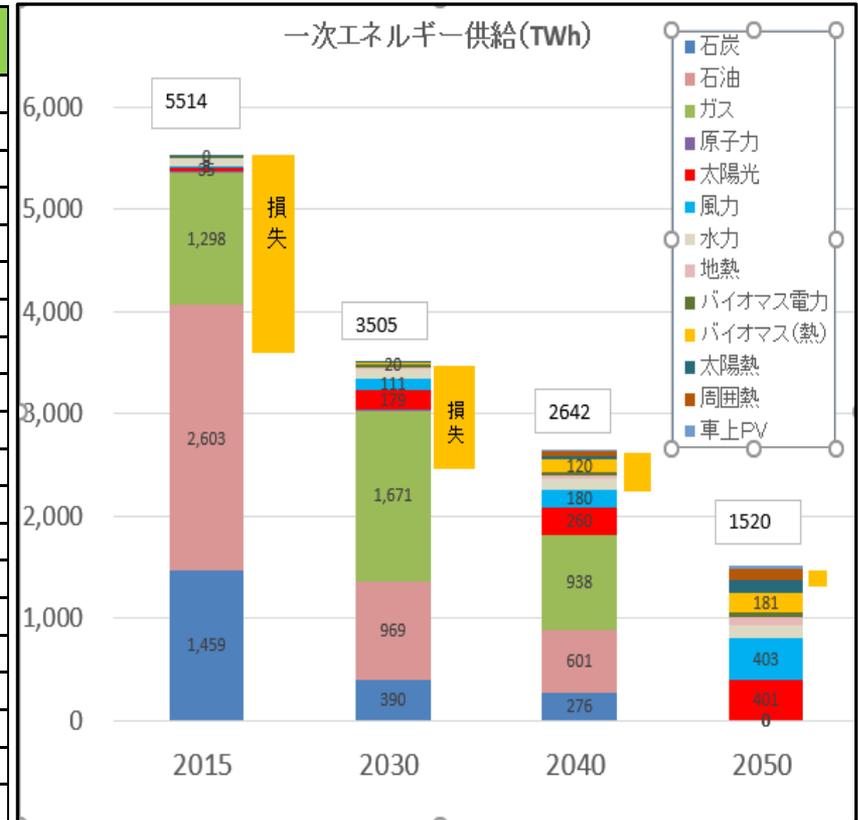


2050年の電力供給はすべて自然エネルギーである。太陽光69%、風力70%、水力21%、バイオマス8%、地熱が15%となっている。発電量合計は1063TWh(184%)であり、これは電力需要Aを100%として、余剰が84%になる。太陽光359GW、風力153GW、蓄電用に揚水発電260GWh、バッテリー300GWhの利用を想定している。

	規模	単位	発電量	TWh/年
太陽光発電容量	359	GW	太陽光	401
風力発電容量	153	GW	風力	403
揚水発電/バッテリー容量	260/ 300	GWh	水力	122
年間電力需要	578	TWh/年	地熱	87
年間平均電力	66	GW	バイオマス	49
ピーク電力需要	100	GW	合計	1063
発電量合計	1,063	TWh/年		

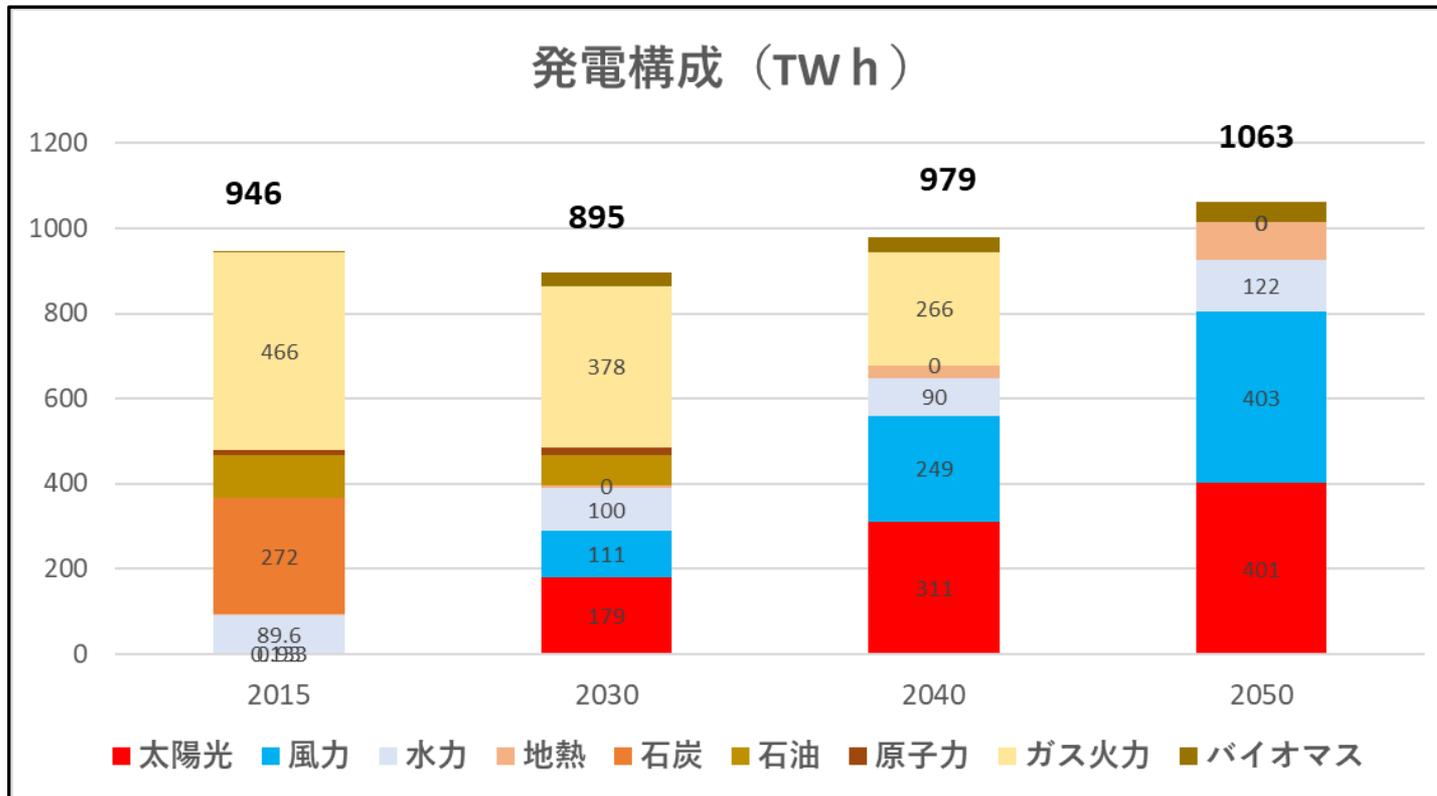
エネルギー供給構成

TWh		2015	2030	2040	2050
供給	石炭	1,459	390	276	0
	石油	2,603	969	601	0
	ガス	1,298	1,671	938	0
	原子力	9	19	0	0
	太陽光	35	179	260	401
	風力	8	111	180	403
	水力	87	100	110	122
	地熱	4	5	30	87
	バイオマス電力	8	31	32	49
	バイオマス(熱)	0	20	120	181
	太陽熱	3	10	40	133
	周囲熱	0	0	50	104
	車上PV	0	0	5	40
	供給計	小計	5,514	3,505	2,642
損失	発電・水素転換ロス	-2,220	-920	-658	-46
	余剰電力ロス			-12	-87
最終需要	電力需要	928	790	676	578
	熱・燃料需要	2,364	1,795	1,295	809
	合計	3,293	2,585	1,972	1,387
電力のRE割合(%)		15.3	53.9	90.5	183.7



2030年には合計3505TWh、2050年には1520TWh。棒グラフの右の黄色Boxは損失を示す。2030年までは発電損失が大きいですが、次第に小さくなり、水素転換ロスと余剰電力ロスに代わってゆく。電力以外に、車上PV、太陽熱、ヒートポンプ利用の周囲熱を供給源として計上している。

電力供給システムの構成

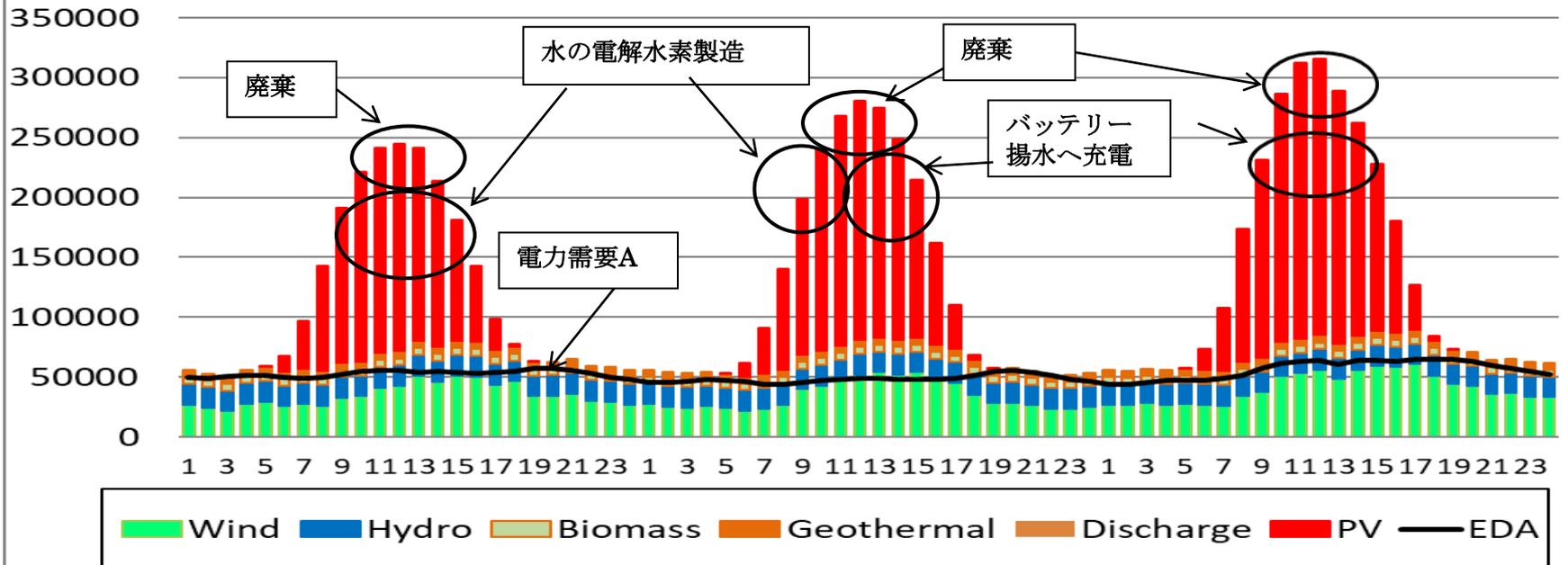


電力供給システムは、時間的制約のある電力需要Aと、時間的にシフト可能な電力需要Bに供給する。電力需要Bは、産業用水素、産業・民生熱需要むけヒートポンプ、自動車・船舶・航空機むけ電力または水素。2050年には電力需要Bが大きくなり、これに対応して発電量全体が大きくなっている。

2050年自然エネルギーによる電力供給(3日間)

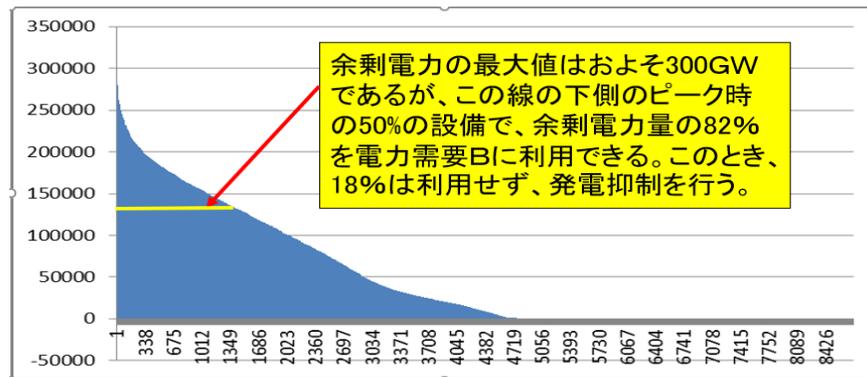
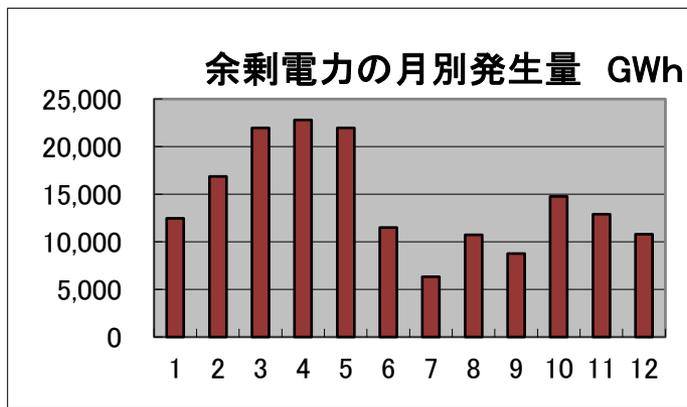
(日本全国842地点の拡張アメダス気象データを使用)

ダイナミックシミュレーション (MWh, April 15-17)

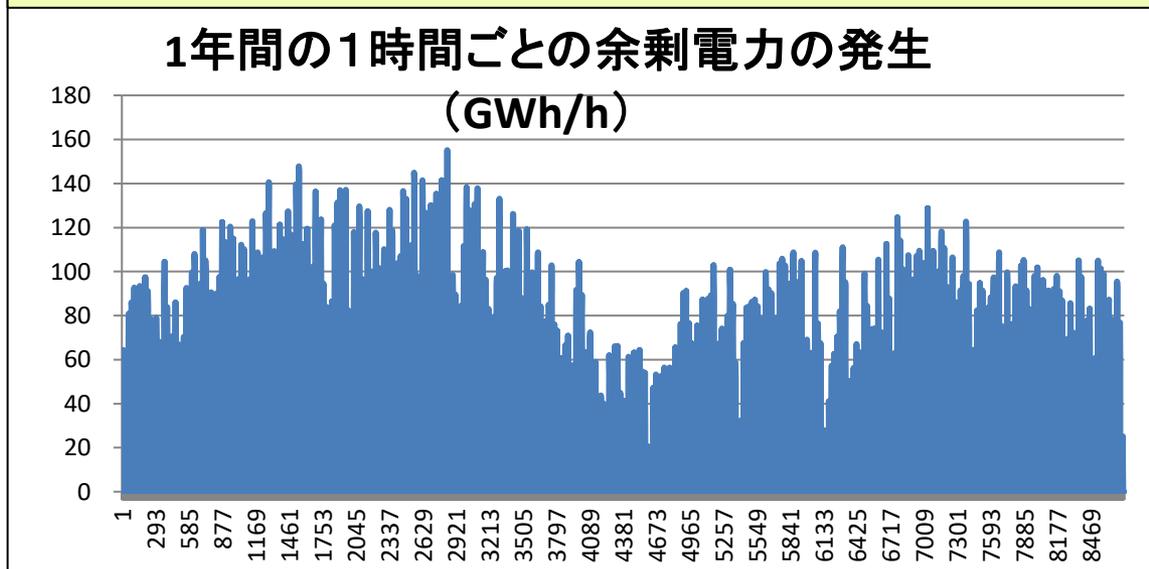


太陽光発電と風力発電の変動を、揚水発電(260GWh)とバッテリー(300GWh)からの放電が補う。地熱発電は1年中一定の電力を供給する。ピークの一部は廃棄するが、余剰分は揚水発電/バッテリーへの充電、FCV用電解水素の生産、EVの充電、産業用高温熱、ヒートポンプで熱需要に使う。

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



すべてを捕獲することは経済的ではない。負荷持続曲線(右)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。



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。

車上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44.5kmの走行が可能であった。バッテリーをフル充電すると56km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30%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70TWhに減少する。

AirBus社の水素ジェット機の開発

Introducing Airbus ZEROe

Turboprop 	 <100 Passengers	 1,000+nm Range
Blended-Wing Body 	 <200 Passengers	 2,000+nm Range
Turbofan 	 <200 Passengers	 2,000+nm Range

AIRBUS

水素で飛行する3種類の設計の航空機 (AIRBUS社のHP, 2020,9月)

エアバスの発表では、3種の設計がある。

- ①ターボプロップ・エンジンで8枚羽根プロペラを使う機体で、乗客最大100人、1600キロメートル以上航行。
 - ②主翼と胴体が一体となったタイプで、3種の中で最も目を引く。
 - ③ターボファン・エンジンで水素燃焼ガスを噴き出して航行する。
- ②と③は、乗客数と航行距離がターボプロップ型の2倍になる。いずれも液体水素から動力を得る、機内電力は水素燃料電池から作り出すとしている。2035年までに製造する予定と発表。

自然エネルギーの供給 (2050年、数値はTWh)

自然エネルギーによる発電

水力、太陽光、風力、地熱、バイオマス

余剰電力

太陽光、風力

太陽熱(133)、バイオマス(181)、周囲熱(104)
車上PV(40)

電力需要Bは、時間的に柔軟にシフト可能な需要であり、デマンドレスポンス、天気予報に応じて生産調整を行う。

電力需要A⁽⁵⁷⁸⁾

照明、モータ、エアコン、エレクトロニクス

電力需要B⁽³⁹²⁾

EV⁽⁴⁹⁾・FCV⁽²³⁾、水素製鉄⁽⁷⁰⁾、船舶⁽²⁰⁾、
中温・高温熱⁽¹⁷³⁾、
航空機燃料⁽²⁰⁾

低温熱、ヒートポンプ⁽³¹⁾、民生用COP=5、産業用COP=3)、家庭・業務用

余剰電力とその他の供給源

unit=TWh	余剰電力				その他の供給				
2050	熱需要	電力加熱 /EV	水素		ヒート ポンプ	周囲熱	車上PV	バイオマ ス	太陽熱
			H ₂	Loss					
産業									
高温熱(製鉄)	138	68	70						
中温熱	72	37						35	
低温熱	101				10	20		71	
					(COP=3)				
業務部門									
低温熱(温水・暖房)	176				12	48		53	63
					(COP=5)				
家庭部門									
低温熱(温水・暖房)	137				9	36		22	70
					(COP=5)				
運輸部門									
		EV	FCV						
旅客									
乗用車	98								
バス	70	49					21		
鉄道	4	4							
海運	1	1							
航空	6	3	3	2					
貨物									
トラック	17		17	15					
鉄道	82								
海運	65	23	23	22			19		
航空	0								
合計	14	7	7	5					
	3		3	2					
合計	804	192	123	46	31	104	40	181	133
余剰電力合計		346 + 46 (H ₂ loss)							
余剰電力損失		87							

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。

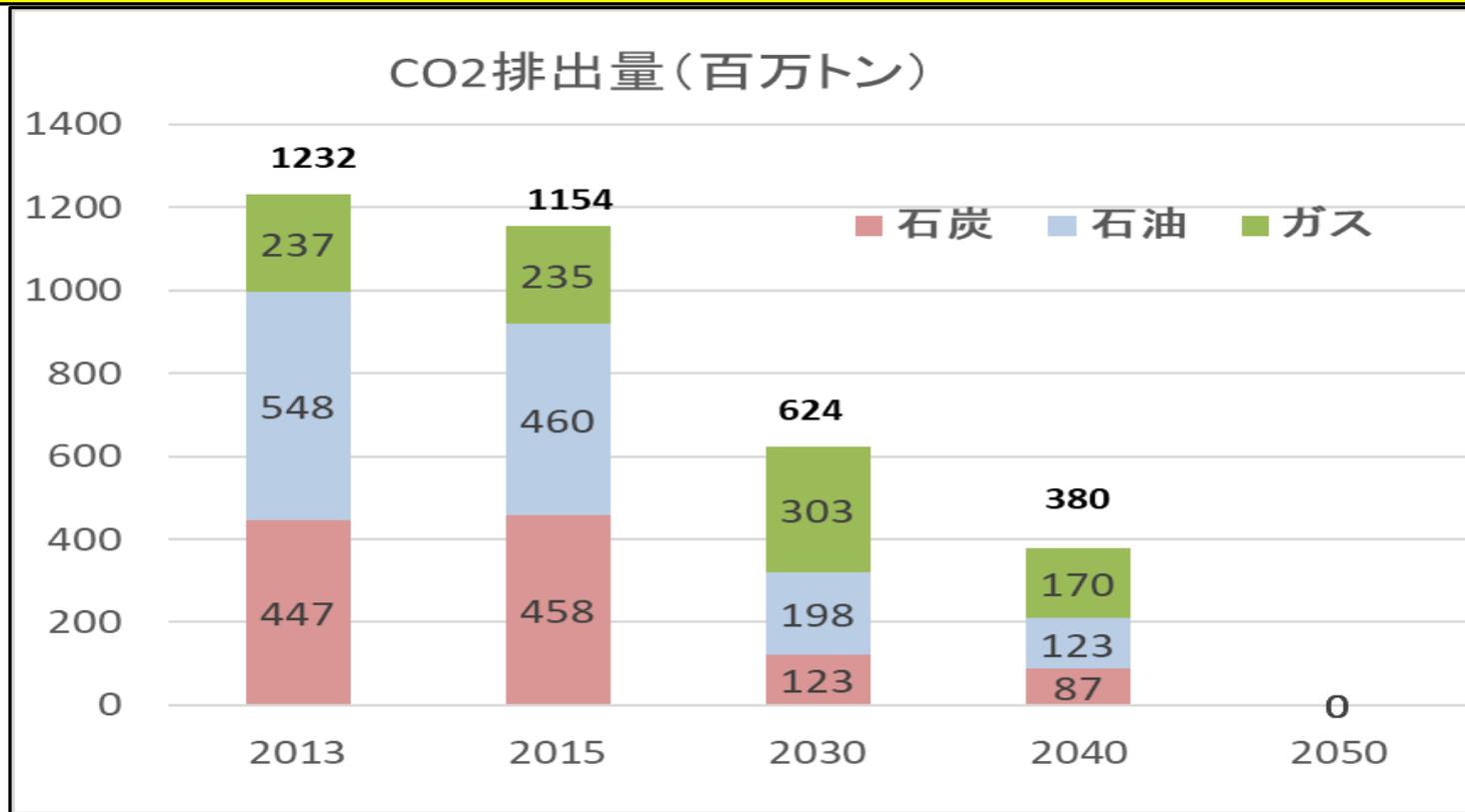
太陽光と風力の設置面積

供給源	GW	単位面積 (W/m ²)	面積 (km ²)	国土に占める割合 (%)
住宅PV	213	66W/m ²	3227	0.85
公共PV	147	100W/m ²	1470	0.39
風力	153	20MW/100ha	7650	2.02

国土は37.8万km²

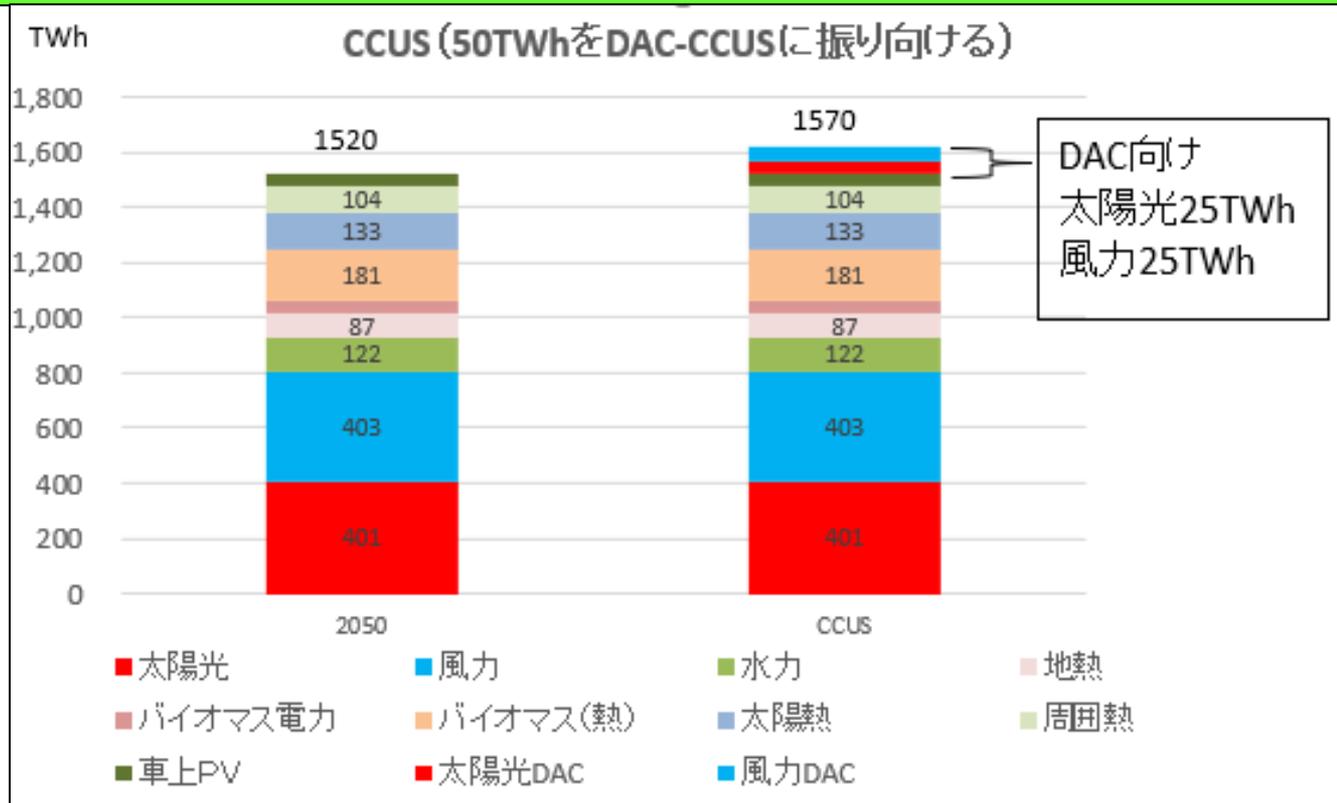
2050年、太陽光360GWの設置に必要な面積は、国土面積に対して住宅0.85+公共0.39=1.24%であり、風力153GWでは2.02%である。現在の国土の利用状況は、森林66%、農地13%、住居5%、道路3%であり、自然エネルギーの設備に必要な面積は、国土の1~2%の程度になる。

二酸化炭素排出量



2013年には12.3億トン、2030年には6.24億トン、2040年には3.8億トン、2050年にはゼロ。2013年からみると2030年にはマイナス49%、2040年にはマイナス69%になる。

CCUS (Carbon Capture Use, Storage)



2050年以降には太陽光と風力の余剰5%を25TWhずつ、合計50TWhを利用して、DAC(空気中から直接CO₂を回収)と水素の製造を行って合成して年間に数百万トンほどの建築材料が製造できる、これを長い期間続ければ大気中のCO₂濃度を下げてゆき、最終的には温暖化の影響をゼロにできる。

Thank you

