日本の2050年の
100%自然エネルギーシナリオとその背景

主催: JUST

日本のエネルギー・ミックスと温暖化対策目標を考える研究者グループ

2017年9月25日

日本橋ライフサイエンスビル会議室

システム技術研究所
槌屋　治紀

最近のニュース

- トランプ大統領は、6月1日パリ協定から脱退を表明。しかし実際にはすぐには脱退できず3年後になる。フランス・ドイツは再交渉を拒否。
- ハワイ、ペンシルバニア、カリフォルニア州などの自治体、アップルとグーグルなど企業が「We are still in」と、パリ協定にとどまると表明
- 企業の生産に使用するエネルギーを自然エネルギー100%とする企業連合「RE100」が作られ、主要企業が参加している。
- フランスは7月6日、2040年までにガソリン車、デイーゼル車の販売を禁止すると発表。7月26日、英国も同じ方針を発表。
- スエーデンのボルボ社は7月5日、2019年までに、ガソリン車を廃止し、全車種を電気自動車またはハイブリッド車にすると発表。
- 台湾は2016年11月に、韓国は2017年6月19日に、原子力発電から撤退表明
- 九州電力では、4月23日(日)午後1時に、電力需要800万kWのうち太陽光発電の割合が607万kW(76%)に達した。

自然エネルギー大量供給計画

2050年ごろに必要なエネルギーの80～100%を自然エネルギーで供給する研究が続々と発表されている

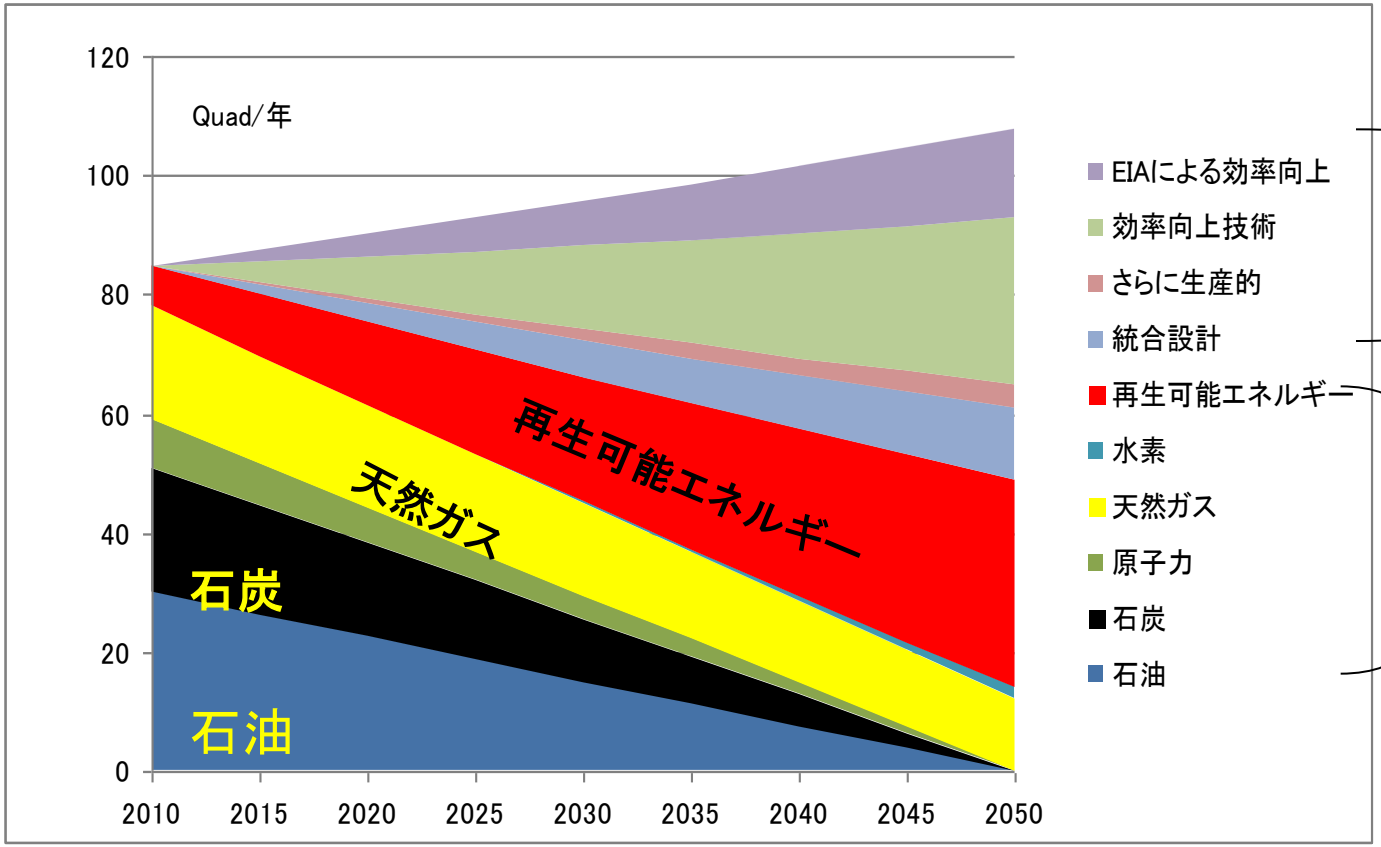
スタンフォード大学「世界の化石燃料全廃計画」 (2010年1月） ジェイコブソンらは2030年までに世界のエネルギーを太陽光・風力・水力などで満たすWWSシナリオ（Energy Policy誌、日経サイエンスに翻訳）

WWFインターナショナル(世界自然保護基金、2011年2月） 2050年のグローバルなエネルギー供給を100%自然エネルギーで供給する研究（委託先：シンクタンク Ecofys社）

米国・国立再生可能エネルギー研究所（NREL、2012年6月）、2050年の米国の電力の80~90%を自然エネルギーで満たすシナリオ研究

米国・ロッキーマウンテン研究所代表エイモリーロビンスは、「ソフトエネルギーパス」の著者として知られているが、2011年「新しい火の創造」（翻訳ダイヤモンド社、2012年）を発表。2050年の米国のエネルギー需要を自然エネルギー70%と天燃ガス30%で満たすシナリオ研究。

米国のエネルギー将来図（2010～2050）
（ロビンス、新しい火の創造、2011）



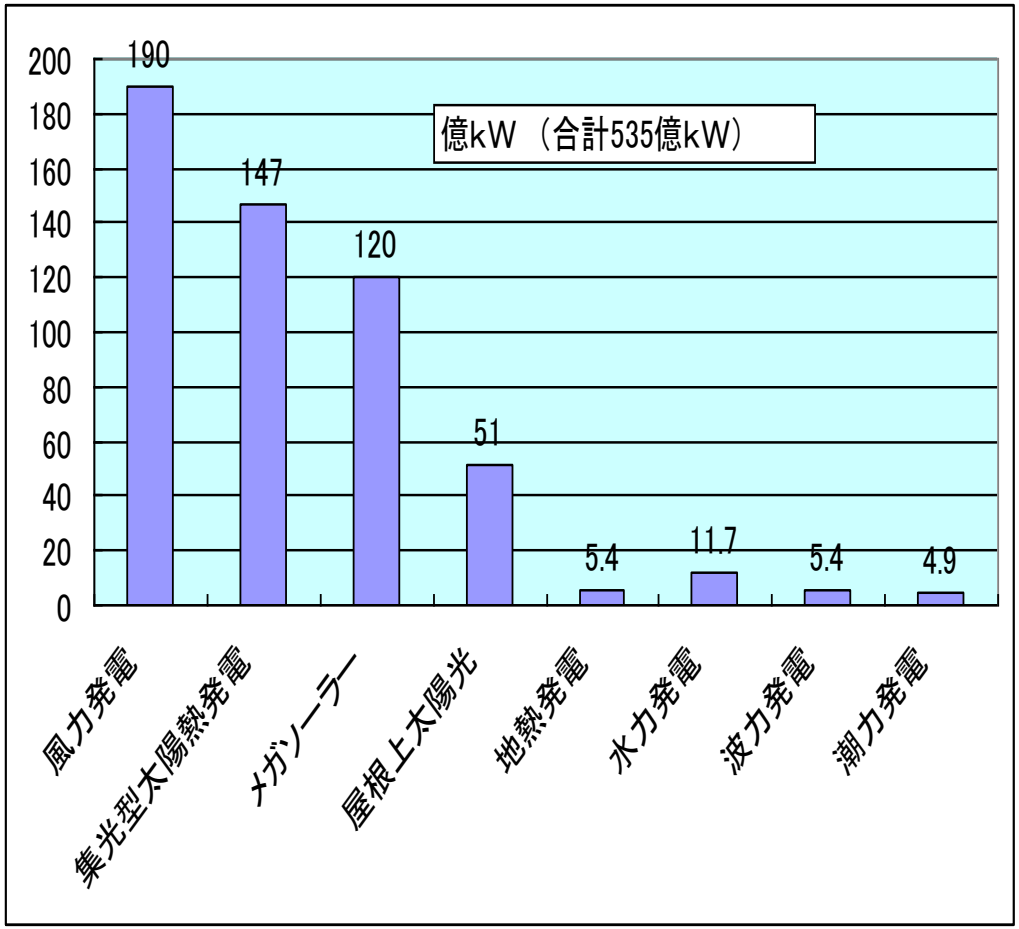
効率向上で削減

再生可能エネルギーと天然ガスで供給する

2050年にGDPは2.6倍になるが、効率向上によりエネルギー需要を現状の70%に削減、これを天然ガスと太陽光・風力・水力など再生可能エネルギーで供給する

世界化石燃料全廃計画

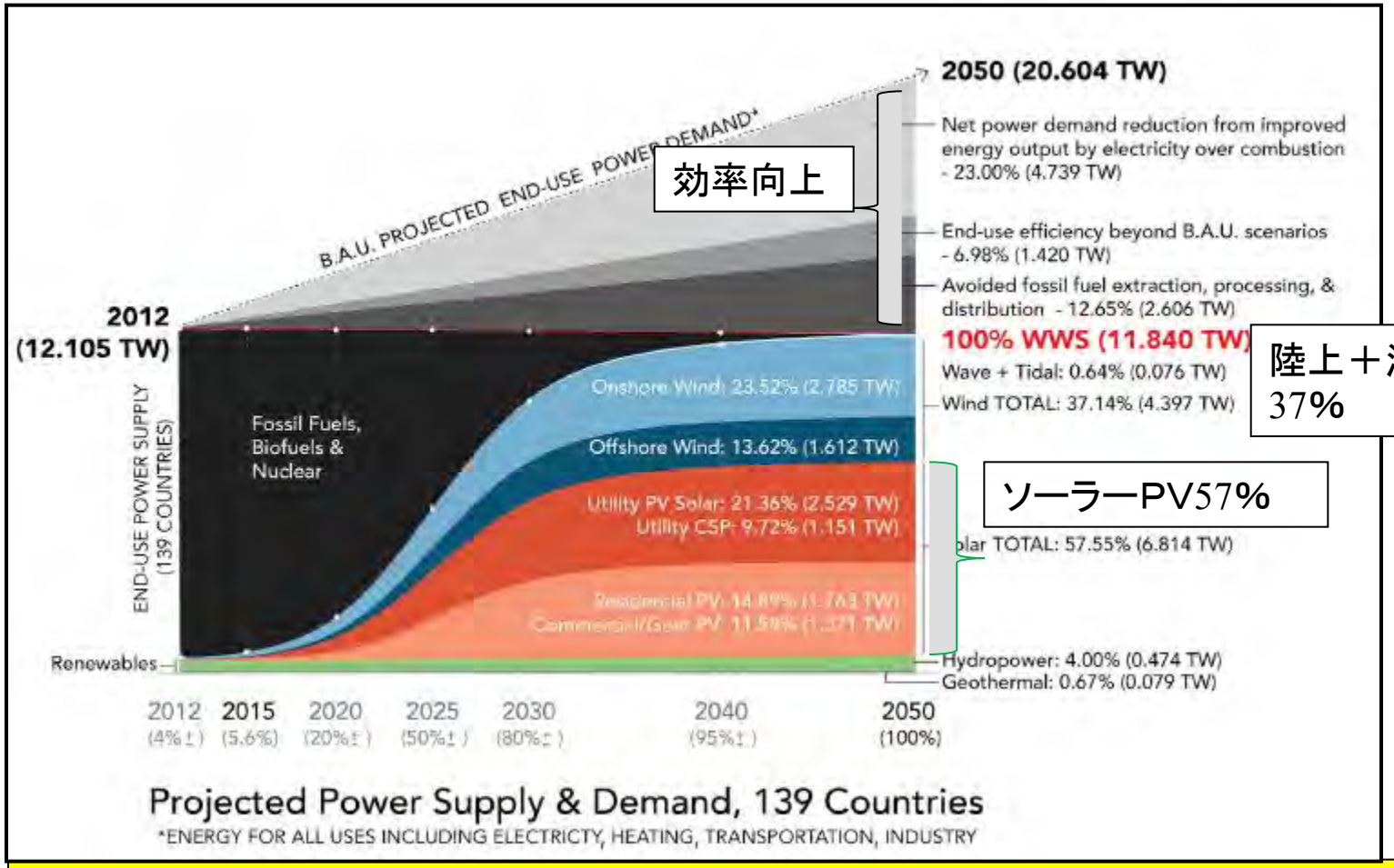
（Jacobson、スタンフォード大学）



WWSシステム（Water, Wind, Solarシステム）

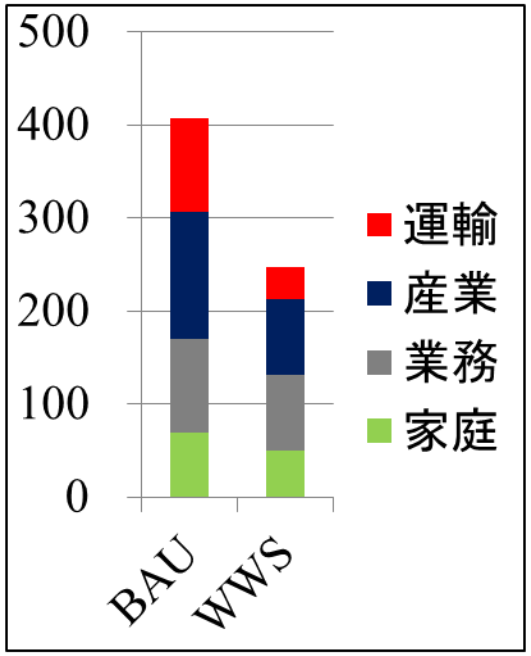
2030年の全世界のエネルギー消費構造を分析し、およそ115億kWの供給には地球上の土地面積の1.16%で充分。必要となる材料資源の検討：セメント、鉄は問題なし、EVと風力発電機用にネオジム、太陽光発電用やEV用のレアアース、リチウムも大きな問題はない。FCVに必要なプラチナはリサイクルする。エネルギー設備の容量は535億kW。「現在、世界中で自動車が年間7000万台製造されており、1台あたり50kWとすると、年間35億kWの規模に相当する。製造能力は十分にある」としている。

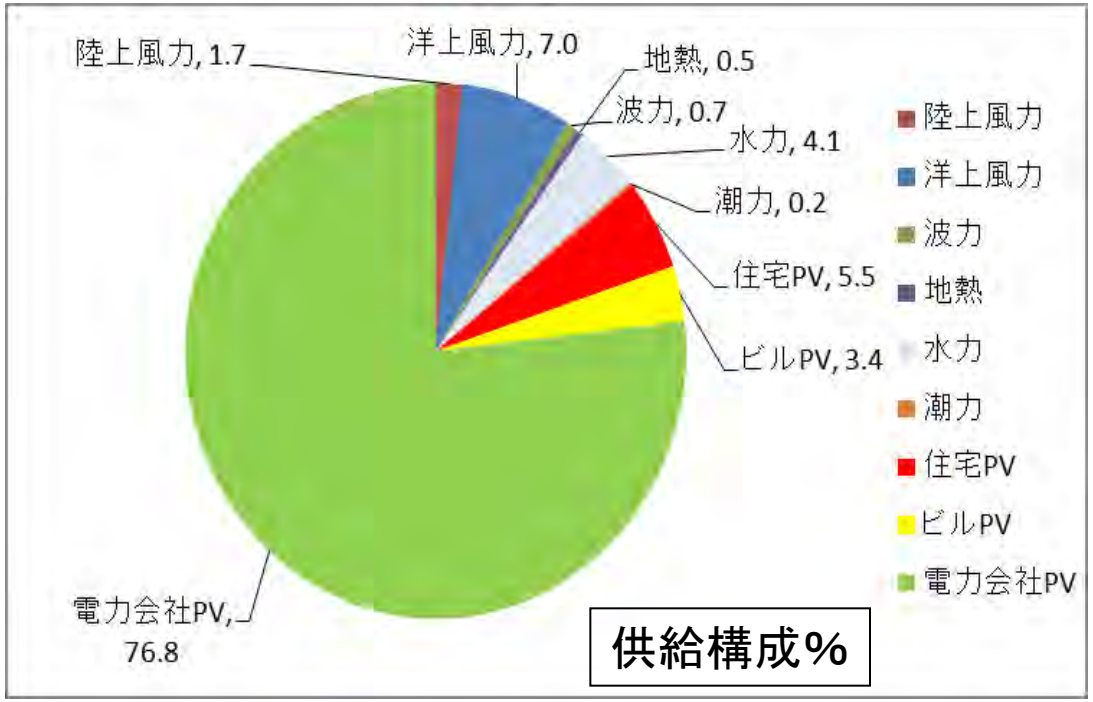
WWSシナリオ（Water,Wind and Solar）2050年
139ケ国で100%REが可能 （Jacobson,スタンフォード大,2017）



139ケ国のエネルギー需要は12,105TW（2012）→11,840TW（2050）になり、ソーラーPV57%、風力37%、水力4%で供給する。

WWSシナリオの中の日本（2050年）, Jacobson





2050年には、日本の最終エネルギー需要はBAUで412GWから 効率向上などによりWWSでは251GWに減少する。GWは容量ではなくて年間需要／8760時間を示す。

日本のすべてのエネルギーを電力で供給する。その構成は、電力会社PV77%、ビルPV3.4%、住宅PV5.5%であり、PVのみで86%（およそ14億kW）になり、国土面積の3.4%が必要。他には水力4.1%、風力8.7%、波力0.7%などである。原子力は安全性に問題がありゼロ、バイオマスは大気汚染があるのでゼロ。CCSは使わない。

WWFジャパン・脱炭素社会エネルギーシナリオ

目標

- 安全性
- セキュリテイ向上
- エネルギー自立
- CO2排出なし
- 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?

WWFは1961年設立の世界最大の国際環境保護団体、World Wide Fund for Nature, 自然と野生動物保護活動、地球温暖化に対する活動を行っている。2011年には、2050年に世界全体が100%自然エネルギーとするシナリオを発表した。WWFジャパンはその日本支部で、システム技術研究所に「脱炭素社会・100%自然エネルギーシナリオ」の作成を依頼した（2017年2月）

WWF ジャパン・脱炭素社会エネルギーシナリオ

人口減少・持続可能社会へ

省エネルギー（効率向上）

エネルギー需要の削減

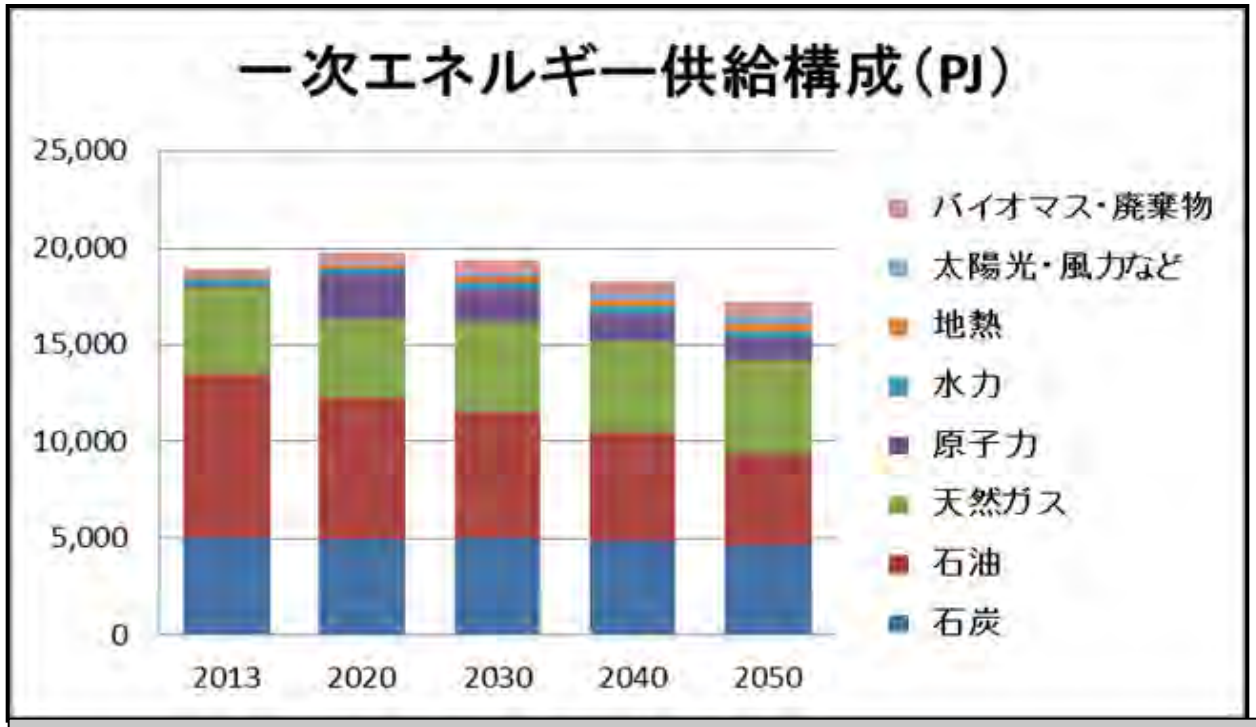
国内ポテンシャル調査

①100％自然エネルギーシナリオ
②ブリッジシナリオ（GHGを80％削減）

2050年CO2排出量の削減

人口減少により資源消費は縮小してゆく。経済性の高い省エネルギーにより需要を削減すれば、自然エネルギーの供給を行う場合の問題が小さくなり、効果的にCO2削減が実現。2017年2月にふたつのシナリオの検討結果を発表した。

BAUシナリオ　一次エネルギー供給構成

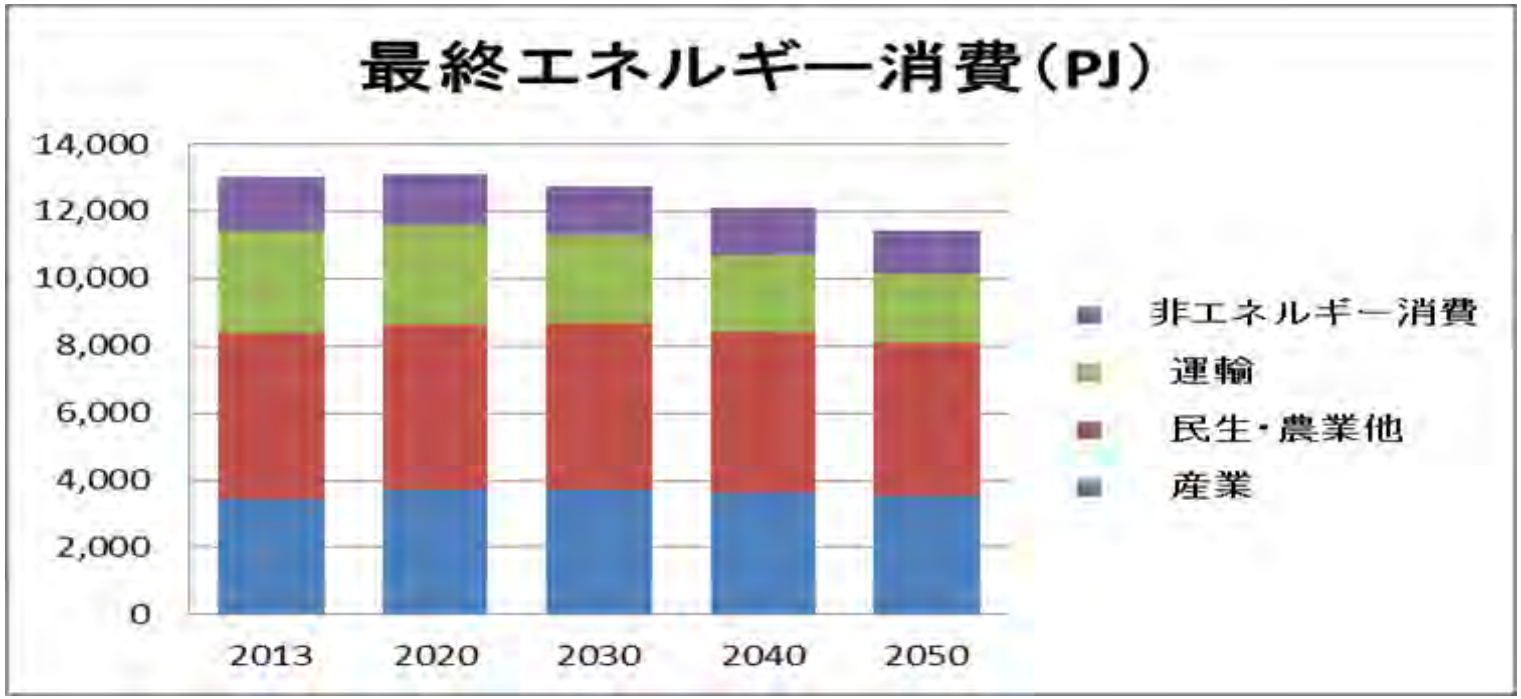


アジア/世界エネルギーアウトルック2015（日本エネルギー経済研究所）

BAU(business as usual)：現状の傾向がこのまま進んだらどうなるかを示すもの。シナリオは将来の様子を実際に描き出して可能性や課題を検討するためのもの。

BAUシナリオでは、実質GDPは2013年から2050年までに1.6倍になり、ひとりあたりGDPは1.88倍になる。一次エネルギーは、2020年にむけてすこし増大するが、2030年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。

BAU最終エネルギー消費構成



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）

BAUシナリオの最終消費エネルギーは、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。部門別にみると運輸部門の減少が大きい。

WWFシナリオにおける
将来の最終エネルギー需要の推定方法

将来の最終エネルギー需要	=	基準年の最終エネルギー需要	×	活動指数 人口、世帯数、GDP、主要資源の消費量	×	効率向上 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、効率向上の積できまる。活動指数は最終用途ごとに適切なマクロ経済指標から推定する。

WWF省エネルギーシナリオ
効率向上の可能性：家庭部門と業務部門

	家庭部門
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。
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	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
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

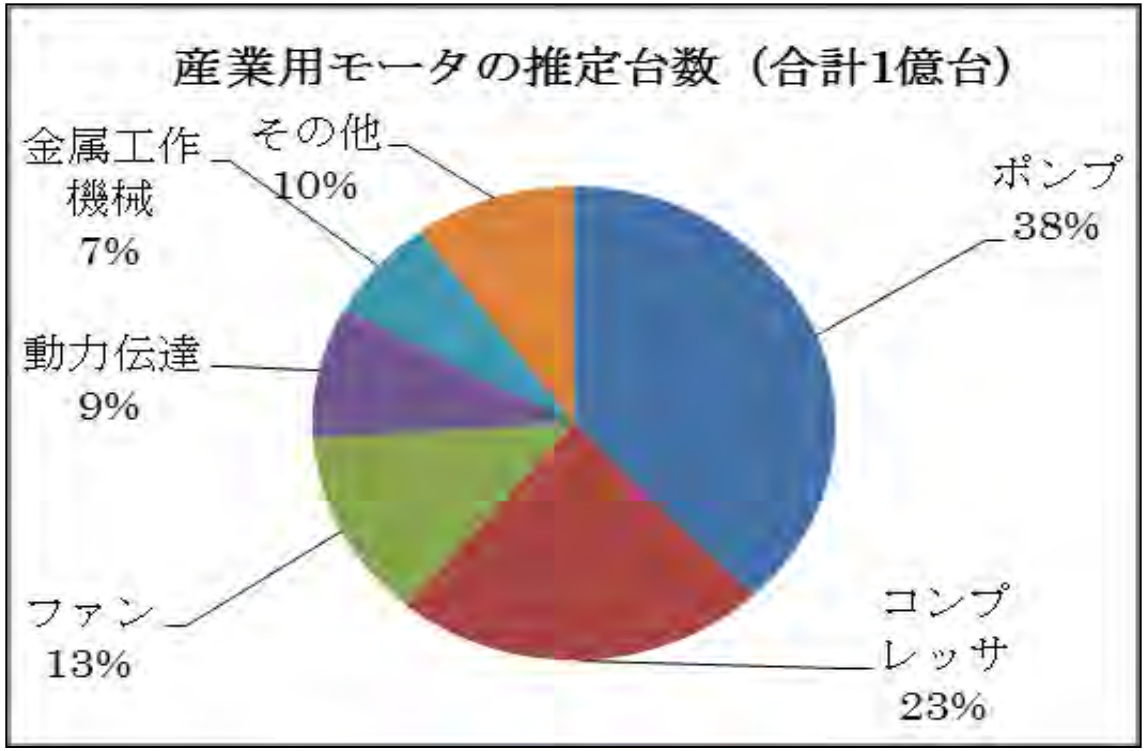
	業務部門
暖冷房	ZEB(ゼロエネルギービル）や断熱化により、現状から50～75%に低下。エアコンCOPが2倍になり、暖冷房需要は35%に低減
照明	暖冷房を除く電力の50%が照明。LEDタスク＋アンビエント照明の普及で効率4倍に
OA機器	ハードディスクに代わってフラッシュメモリーが普及しデータセンターの電力消費は1/3に低下。OA機器の電力消費が50%に低減
TV会議	航空機利用の10%がスカイプ会議へ移行するとエネルギー消費が2%に低減、ここへ計上

WWF省エネルギーシナリオ
効率向上の可能性：産業部門と運輸部門

	産業部門
鉄鋼業	電炉のエネルギー原単位は高炉の1/4に、リサイクル率は70%になり、エネルギー消費は 35%に低減する
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	5%に普及、80%の省エネになる
エコドライブ	20～40%に普及、6～15%の省エネ。
軽量化、PHVからEV/FCVへ	すべての自動車が、軽量化され、効率70%以上に向上したEVとFCVになる
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10%がスカイプ会議へ移行

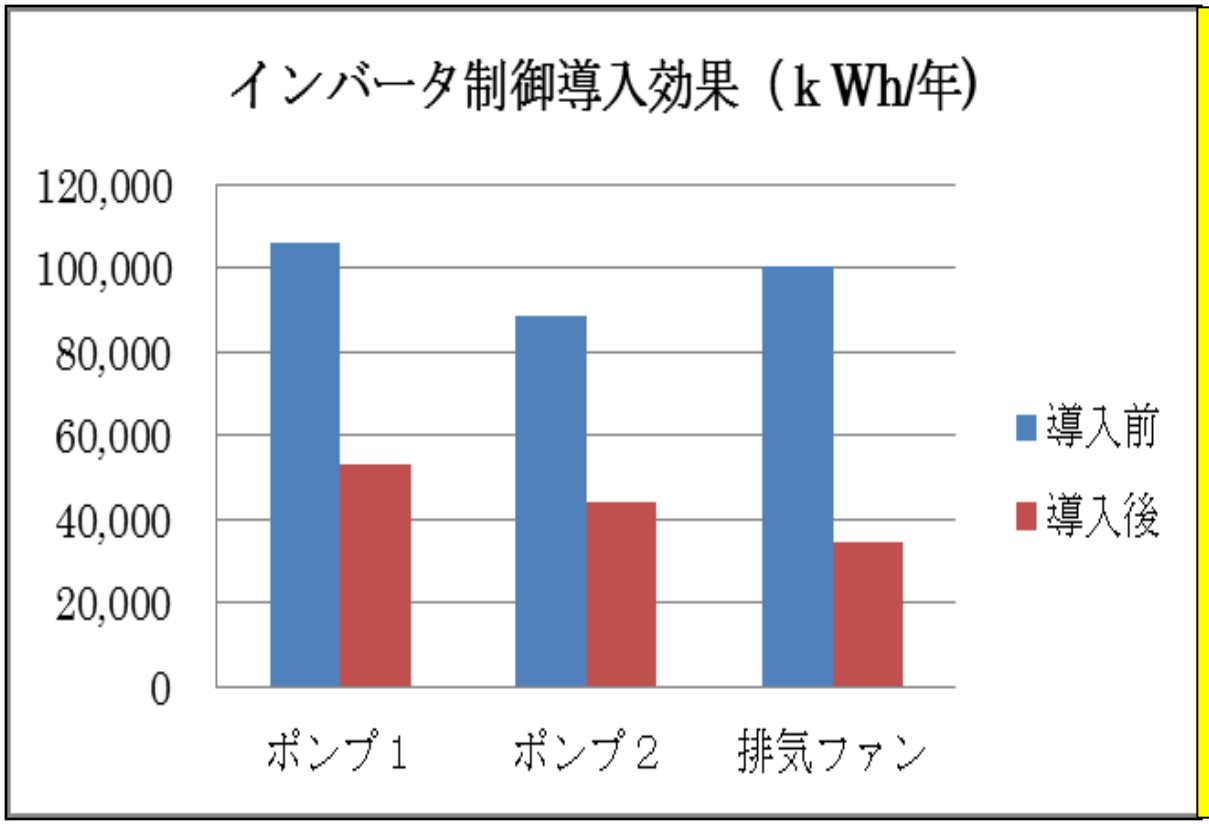
産業用モータの用途と省エネルギー



モータをポンプやファンのような回転機械に利用している場合、インバータを用いて回転数を適切に制御すれば、エネルギー消費は1/2~1/3程度に小さくなることが知られている。投資回収期間は3～5年と言われている。

工場の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。

ポンプとファンのモータのインバータ制御



冷却水ポンプ（45kWx2基）をインバータを用いて常に適切な水量に制御、50%の省エネルギーを達成。投資額は701万円、年間170万円を回収、投資回収期間は4.12年。

風量を手動で設定してる75kWの排気ファンにインバータ制御を導入した。その結果、65%の省エネルギーが達成され、投資額は296万円、年間114万円を回収、投資回収期間は2.6年である。

出典：FEMS事例集、平成26年度　京フェムス推進事業、一般社団法人 京都産業エコ・エネルギー推進機構

ソーラーアシスト・カー

EVまたはFCVに太陽電池を搭載。捕獲した電力を直接またはバッテリーに貯蔵して利用。

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月トヨタも太陽電池搭載型プリウスPHVを発表している。 180Wの太陽光パネルで1日充電で平均2.9km、最大6.1kmを走行可能。

FV,FCVの効率が高いので、少ない発電量でも有効に利用できる。自動車用燃料は高価な電力でも経済性がある。

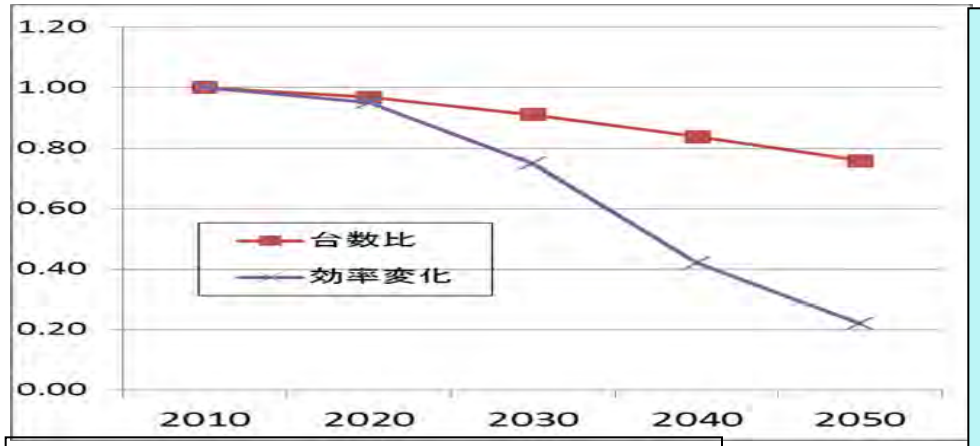
ルーフとボンネットに設置した3m^{2}の太陽光パネル600Wから年間に600kWhを発電する。年間の太陽依存率は20～30%。

年間走行距離　1万kmのとき、年間走行エネルギー＝1200～1500kWh

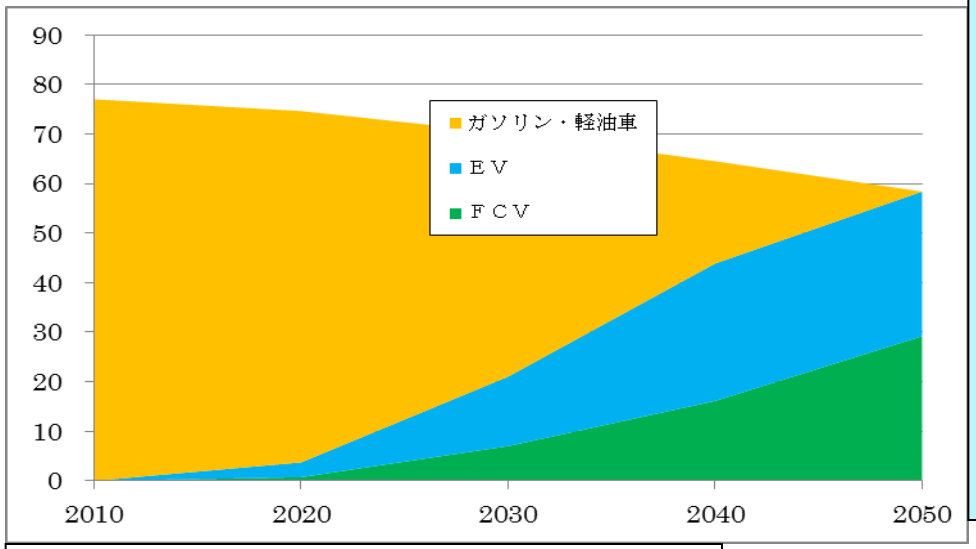
参考文献：槌屋、「ソーラーアシスト・ビークルの設計」、日本太陽エネルギー学会誌、Vol.32, No.3, 2006年

H.Tsuchiya, **Innovative Renewable Energy Solution for Hydrogen Vehicles**、International Journal of Energy Research, 2008;32:427-435, Wiley Inter Science, John & Wiley and Sons

自動車の変化（2050年にはEVとFCVへ移行）



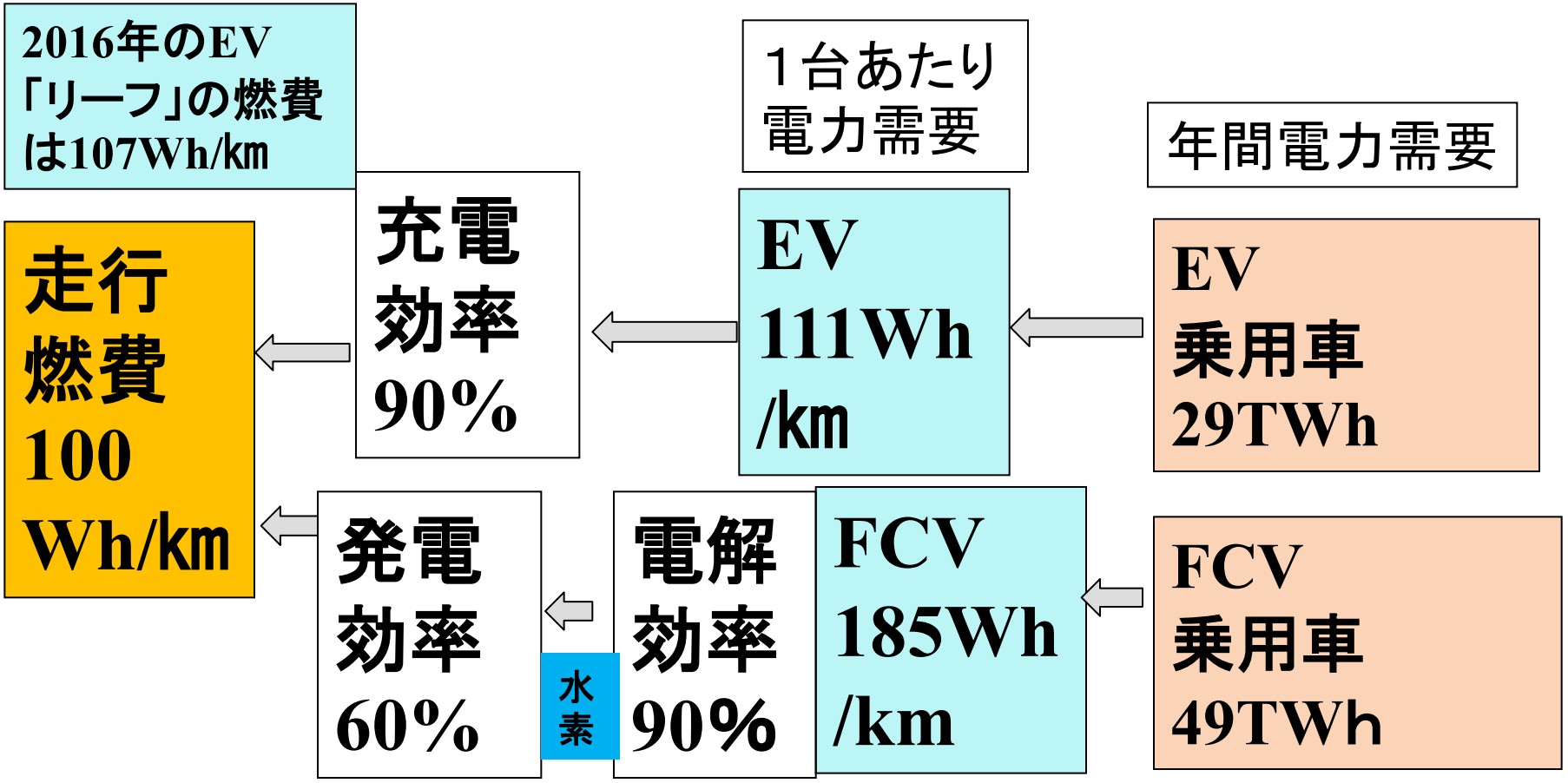
乗用車と貨物車の台数比と効率変化



車両台数の推移 （2010年～2050年）

2050年までに乗用車と貨物自動車は、EV（電気自動車）とFCV（燃料電池車）に移行すると想定した。このときエネルギー効率は4.8倍になる。車両台数は2010年の7700万台から2050年には5840万台になる。乗用車は6600万台から5000万台に、貨物車は1100万台から834万台に減少する。EVとFCVとは1/2づつと仮定している。

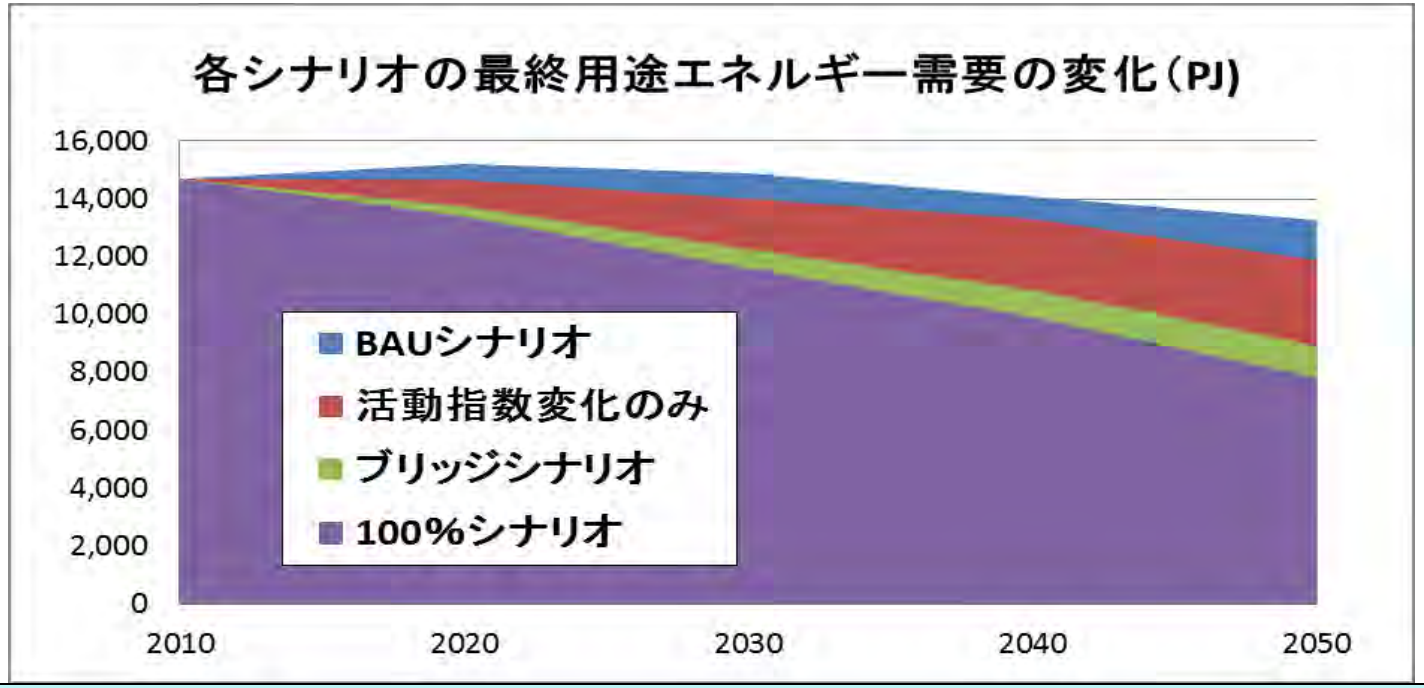
余剰電力による乗用車燃料の生産：電力と水素



2050年に乗用車＋貨物自動車は5840万台になり、EVとFCV は各2920万台を想定した。乗用車の走行燃費100Wh/kmになるが、水素生産の効率の違いから、乗用車の電力需要はEVで29TWh、FCVで49TWhと推定した。

各シナリオの最終エネルギー需要

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



2050年の最終エネルギー需要は、2010年比で81%（活動指数のみ効率変化を含まない）、61%（ブリッジシナリオ）、53%（100%自然エネルギーシナリオ）に減少する。

自然エネルギーの特徴

自然エネルギー	エネルギー利用密度と特徴
太陽光発電	太陽エネルギー（ 1kW/m2）の13～20%を電力に変換。日本では年間平均1000時間利用可能
太陽熱	太陽エネルギーの30～70%を熱として捕獲。気温との差があれば利用価値が大きい
風力	1～20kW/m2、風速の3乗に比例。風のエネルギーの25～40%を有効に利用可能
バイオマス	年間の太陽エネルギーの1～2%を固定。空気中のCO2を捕獲する貯蔵可能なエネルギー。
波力	海岸線1mあたり5～25kW。エネルギー密度はもっとも大きく設備の強度が問題になる

エネルギー密度の大きさは、波力＞風力＞太陽熱・光＞バイオマスの順である。波力はかかる力が大きく設備は破壊されている。風力は現状の機械技術で適切に実現できるため大きな普及を示している。太陽光は、設備の耐久性があり、コストも低下している。騒音がなく住宅地域でも設置でき、垂直壁や道路にも設置できるので広く普及する可能性がある。

太陽光発電のポテンシャルと導入見込み量

太陽光発電の導入ポテンシャル （NEDO自然エネルギー技術白書2014）

発電容量（万ｋW）	2015	2020	2030	2050	2115
太陽光発電	3,440	7,000	10,000	25,000	70,000

PV Outlook 2030 （JPEA（太陽光発電協会），2015）

太陽光発電見込み量（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

H26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（環境省）

太陽光発電のポテンシャルには、限界はないとする見方がある。
NEDOは耕作地の10%を含めて7億kWのポテンシャルを示しており、JPEAは2050年に2億5000万kW、100年後の2115年に7億kWとしている。
環境省は2050年高位として2億7250万kWを示している。

風力発電の導入見込み量(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

H26年度2050年自然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（環境省）

風力発電の将来ビジョン（単位：万kW)

年	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

日本風力発電協会（JWPA)

いずれも2050年には、陸上と洋上を合計すると7000～7500万kWの規模の数値が示されている

水力発電

水力発電　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

H26年度2050年自然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（環境省）

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

包蔵水力（一般水力と混合揚水の合計）　H27年3月31日現在（資源エネルギー庁HPより）（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）

資源エネルギー庁の包蔵水力によれば1356億kWhあり、これは現状の1.42倍になる

地熱発電

地熱発電　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
合計	82	241	792

H26年度2050年自然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（環境省）　ゾーンニング調査では導入ポテンシャルは3063万kWになっている。

海洋エネルギー

海洋　万kW	2020年高位	2030年高位	2050年高位
海洋エネルギー	0	349	1,395

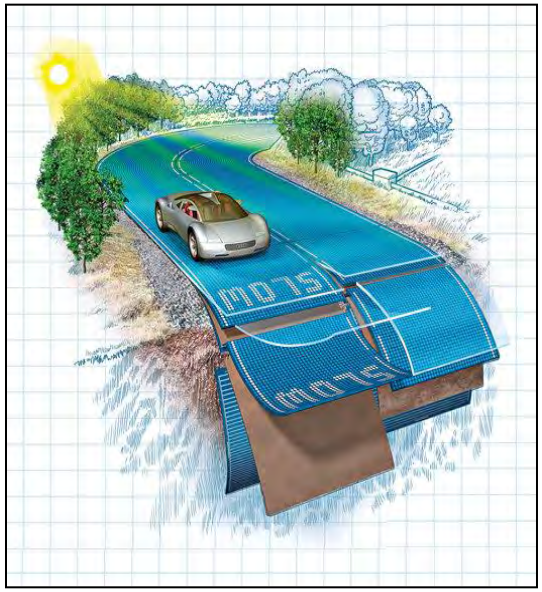
H26年度2050年自然エネルギー等分散型エネルギー普及可能性検証検討受託業務（環境省）みずほ総研の報告ではポテンシャル1800万kWとしている。

ここでは、海洋エネルギーとしては波力発電を検討した

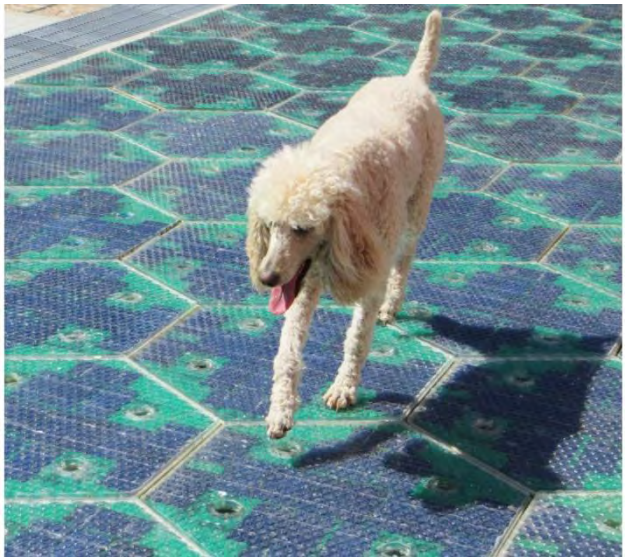
自転車道路で太陽光発電（オランダ）

オランダ北部のクロメニーでは、2014年11月、自転車道路に、2.5mx3.5mのコンクリート製発電モジュールを設置、長さ70mで140kWの発電を開始、電力網へつないでいる。モジュールは高強度で耐久性が高いガラス材料を利用。

道路に太陽光発電(米国)



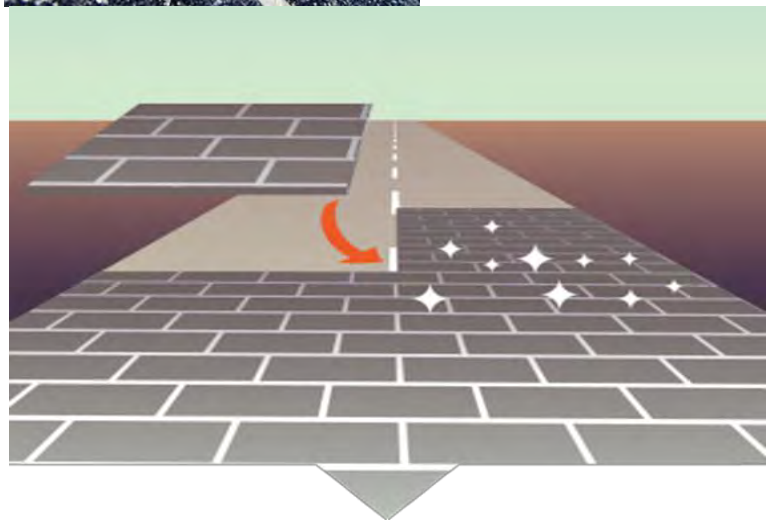
Phase II Prototype Solar Parking Lot

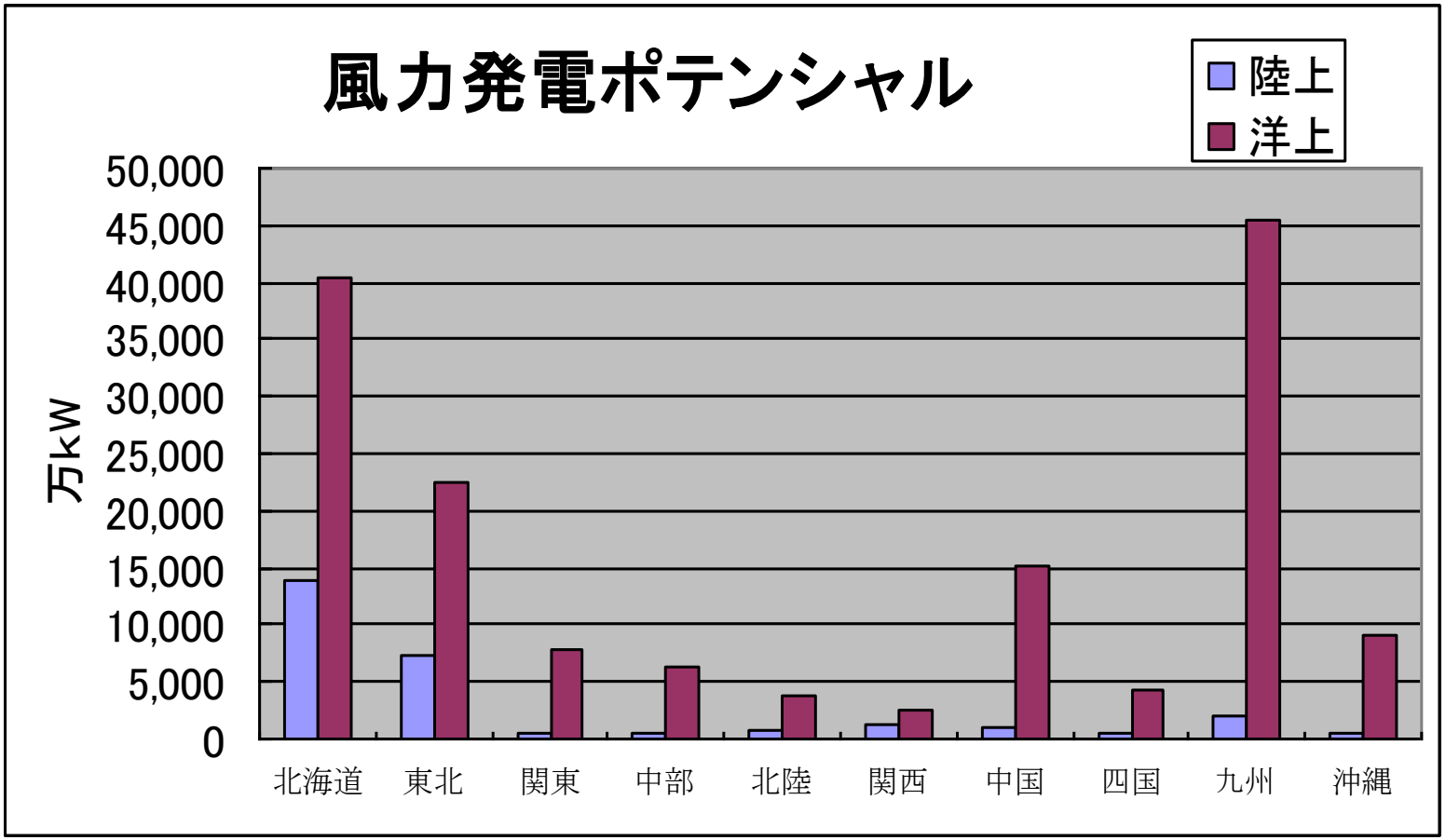


ソーラー・ロードウエイ社（米国）は、道路に耐久性の高いガラスを使用した太陽光発電パネルを埋め込んで発電する計画を立てている。道路や駐車場で発電した電力で米国の全電力需要を満たせるとしている。
試作した六角形のソーラー・ロードウエイ・パネルを敷き詰める。１日に4時間の太陽光によって12フイート平方の面積で7.6kWhの電力を発電する。最初はスーパーマーケットの駐車場などが適地だが、2014年、運輸省の予算を獲得して、アイダホ州サンドポイントで実際の設置を開始している。

道路が発電するWattway（Colas社、フランス）

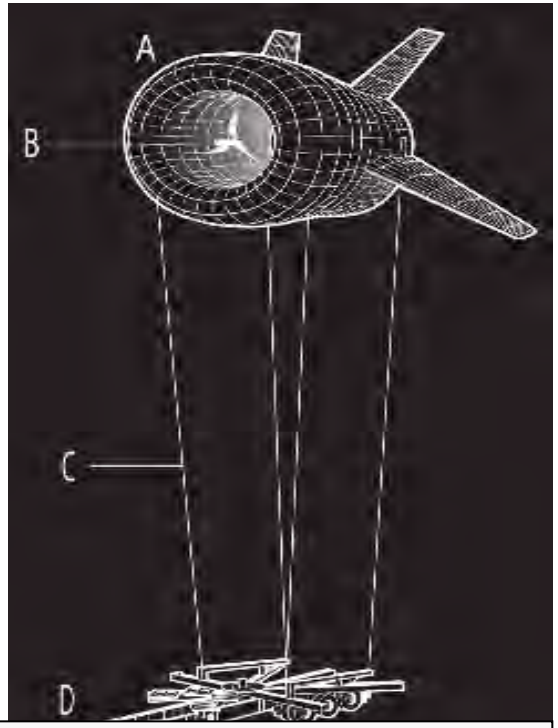
Colas社は大手の道路舗装企業であり、フランス国立太陽エネルギー研究所と5年間の共同研究の結果、道路で太陽光により発電する「Wattway」（特許）を開発した。道路は時間の10%しかクルマに占有されていないので活用できるという。タイヤのグリップを保持する安全性と耐久性が高い数ミリの厚さの太陽光発電材料を層状に採用している。普通の道路に特別な工事なしに施工できるとしている





陸上計2億8300万kW、洋上計15億7300kWのポテンシャルがある。
H22年度　再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査（環境省）

気球型風力発電



ヘリウム入りの気球をおよそ600m上空へ浮かべ、30m/秒の強風を受けて気球の中央にあるタービンを回転し発電する。上空では風速が大きく、出力は風速の3乗に比例して増大するので経済性が向上する可能性がある。既存の風車と異なりタワーが不要だが、地上からロープを制御して気球の位置と発電を維持する必要がある。アルテラスエネルギー社（ボストン）が開発中。2014, Popular Science

風力発電

茨城県神栖（鹿島灘）の沖合50mに建設された2MWx7基。4km先まで深度25mあり、着床型で50万kWの計画進行中。

福島沖の洋上浮体風車2MW（直径80m）、東京湾を輸送中の様子。さらに7000kWの浮体式が設置される。

洋上風力発電所は全国で9港が導入を検討。北九州港内の2700ヘクタールを洋上風力発電の区域に設定、出力は23万kW。 秋田、能代両港で丸紅、大林組や東北電力子会社、秋田銀行も参加、出力は14万5000kW。丸紅は鹿島港（茨城県）でも事業化を検討。石狩湾新港（北海道）ではグリーンパワーインベストメント（東京・港）が、出力10万kW規模を計画（2016）

世界の風力発電規模は現在およそ3億7000万kW、既に経済性のある投資となっている。しかし、日本の導入量は陸上320万ｋＷ。ドイツは国土面積は日本より小さいのに3920万ｋＷある

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	2015年度	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
太陽光発電	3340万kW	7億kW	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
地熱発電	54万kW	3063万kW	1000万kW
波力発電	0	1800万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	66PJ	973PJ(＊)	2200PJ

(最大ポテンシャルデータ: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(環境省)、NEDOの調査、「PV2030+」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であり、WWシナリオではエネルギー作物を含めその2.26倍を想定した。 日本における過去のバイオマスの最大利用量は1940年に270PJ(石油換算662万トン)。

自然エネルギーの供給

・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

・余剰電力からEV用電力、FCV用水素、ヒートポンプ用電力

・自然エネルギーによる燃料製造

太陽熱、バイオマス、車上太陽光

純粋電力需要

照明、モータ、ポンプ、エアコン、エレクトロニクス

燃料

EV・FCV・航空機・船、産業用熱需要、暖房・厨房、

ダイナミックシミュレータ

地域ごとのエネルギー需給を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
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

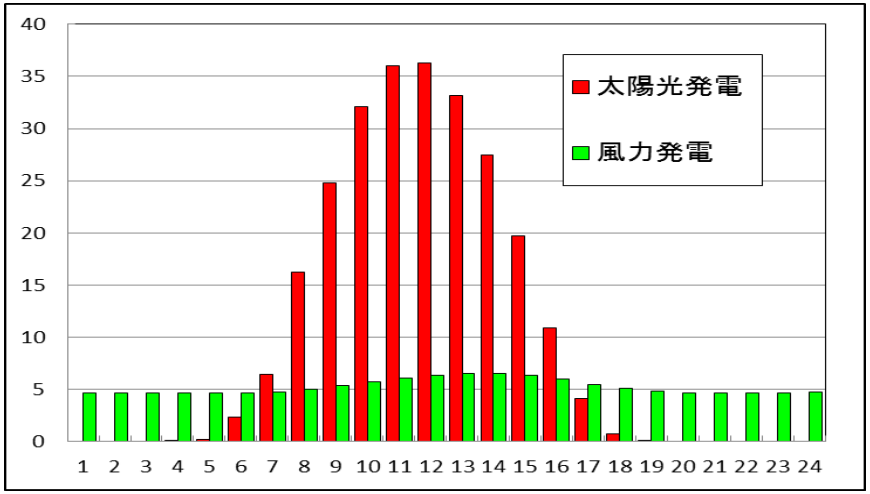
発電の不足が生じないように電力需要の130～160%を供給可能な発電設備を想定し、太陽光と風力の変動から生じる発電余剰を燃料用に供給する。

風力と太陽光発電のユニットと設置条件

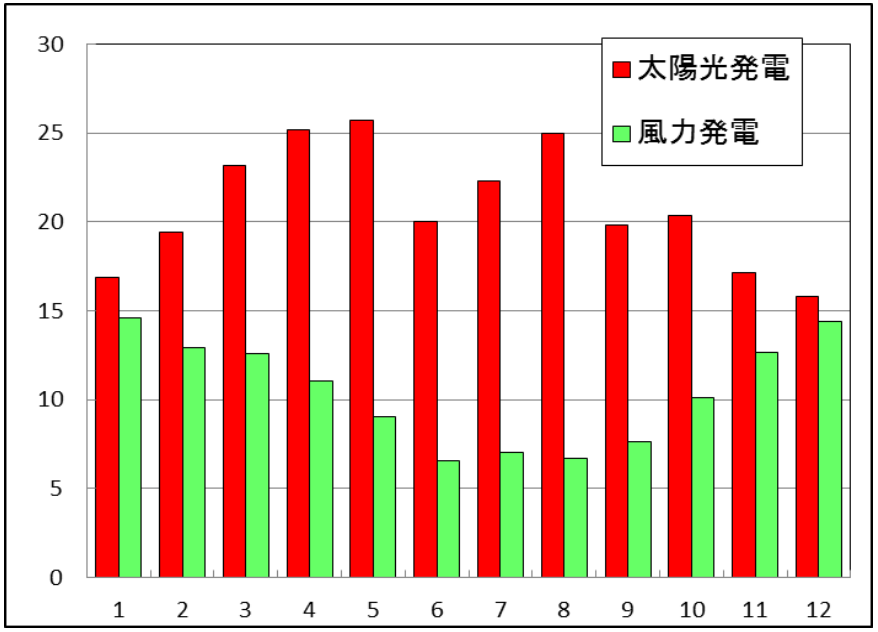
再生可能エネルギー	地点数 設備利用率	ひとつのユニットの設置条件
太陽光発電	842地点,設備利用率12.6%	10kW,南向き, 傾斜角＝緯度－5度
風力発電	842地点から設備利用率18%以上の90地点を抽出,設備利用率27.6%	定格容量2MW,直径80m,ハブ高さ56m,風速毎秒3mで発電開始,毎秒25m以上で停止

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）



太陽光と風力を組合わせると効果的

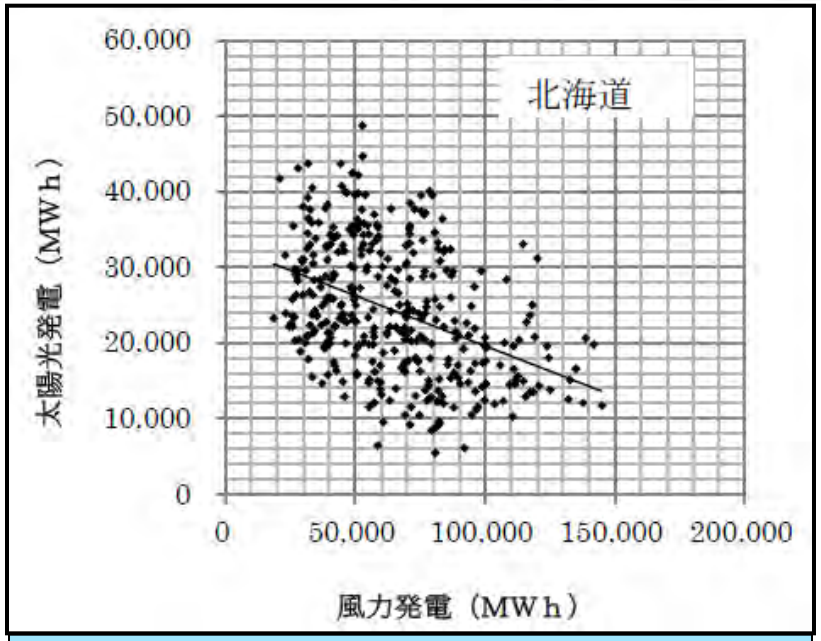
太陽光は6~18時に有効、春から夏にかけて大きくなり冬は小さい。風力発電は24時間どの時間でも発電しているが、季節的にみると、太陽光と逆であり、夏に小さく冬が大きい。
拡張AMEDAS2000の気象データから太陽光については842地点すべて、風力は風況のよい90地点を使用した。回帰分析により、電力需要に対して、発電量が太陽光：風力＝2：1 としている。

槌屋治紀(2015)「太陽光発電と風力発電の分担比の最適化」、日本太陽エネルギー学会誌、41(2):45-48

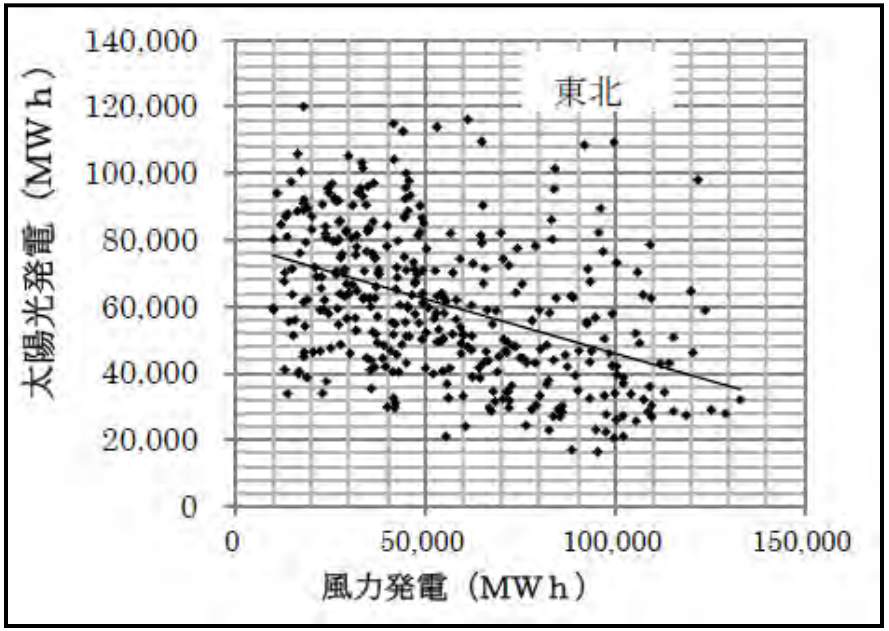
太陽光発電と風力発電の相関関係

太陽光発電と風力の相関(1日単位)			
地域	相関係数	地域	相関係数
北海道	−0.4132	関西	−0.2573
東北	−0.4324	中国	−0.2176
関東	−0.1475	四国	−0.2360
中部	−0.0826	九州	−0.2283
北陸	−0.3777	沖縄	−0.4864
		全国計	−0.2748

各地域ごとの太陽光発電と風力発電について一日単位で相関関係を分析すると、両者は逆相関があり、補完的な関係にあると考えられる

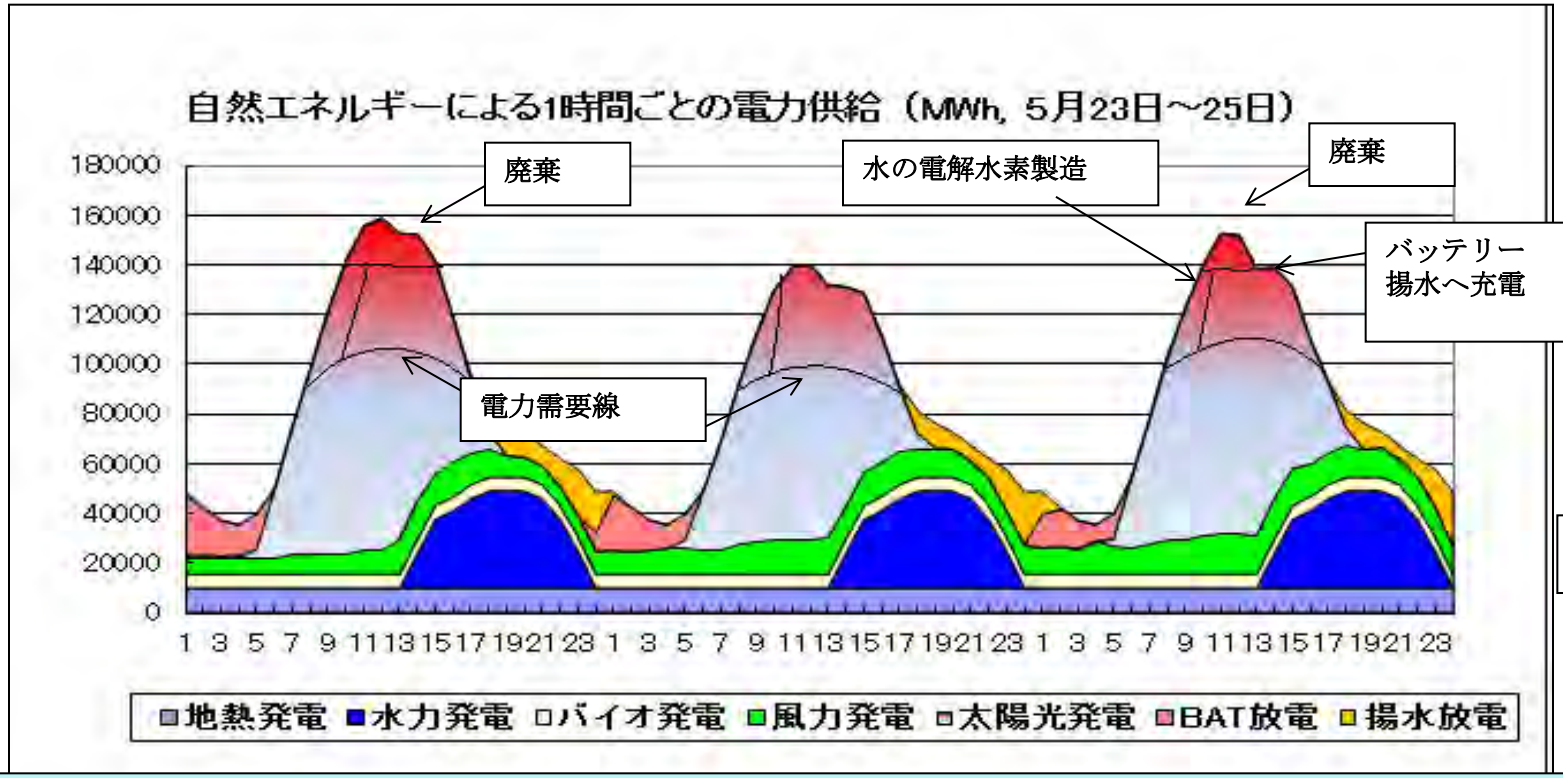


北海道の太陽光と風力の関係



東北地方の太陽光と風力の関係

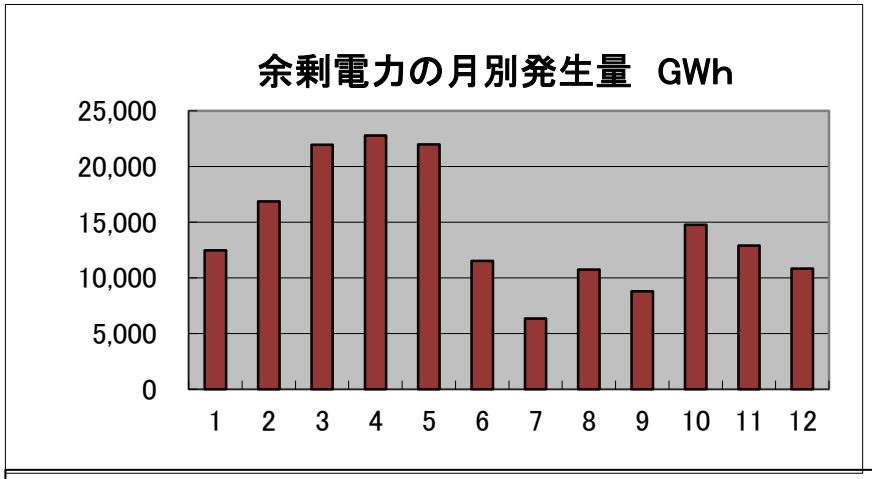
2050年自然エネルギーによる電力供給（3日間）
（日本全国842地点の拡張アメダス2000気象データを使用）



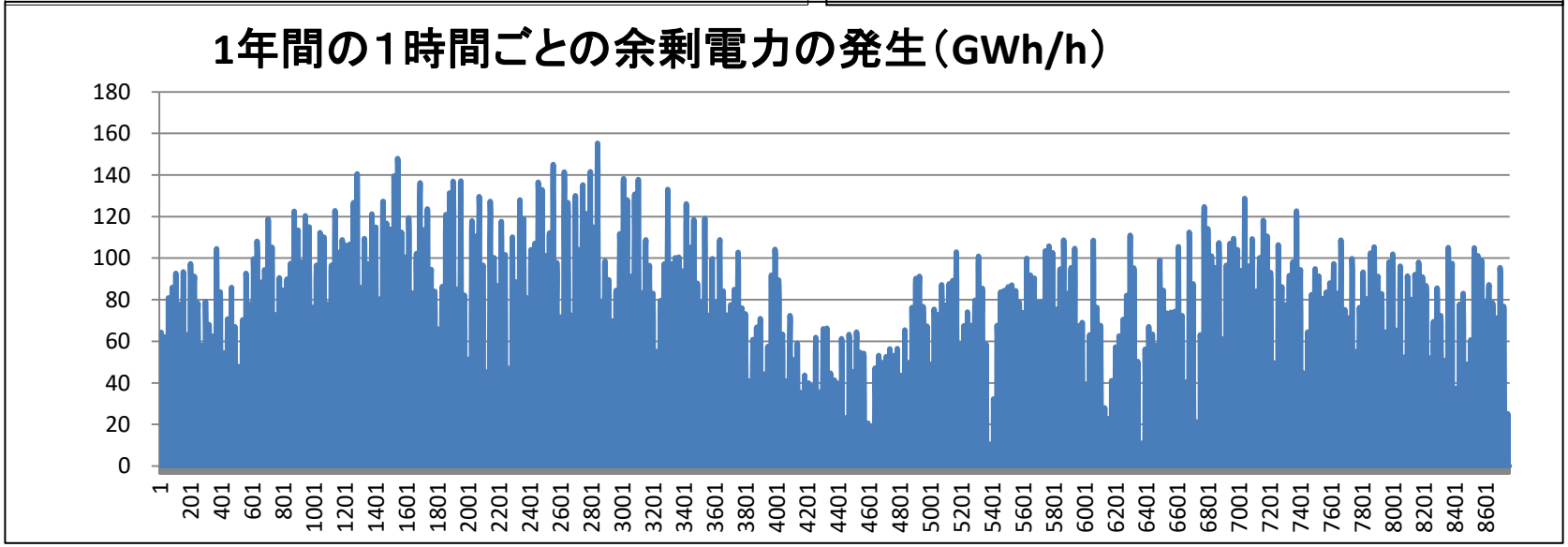
動作

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：乗用車用電力、高温加熱、ヒートポンプ用



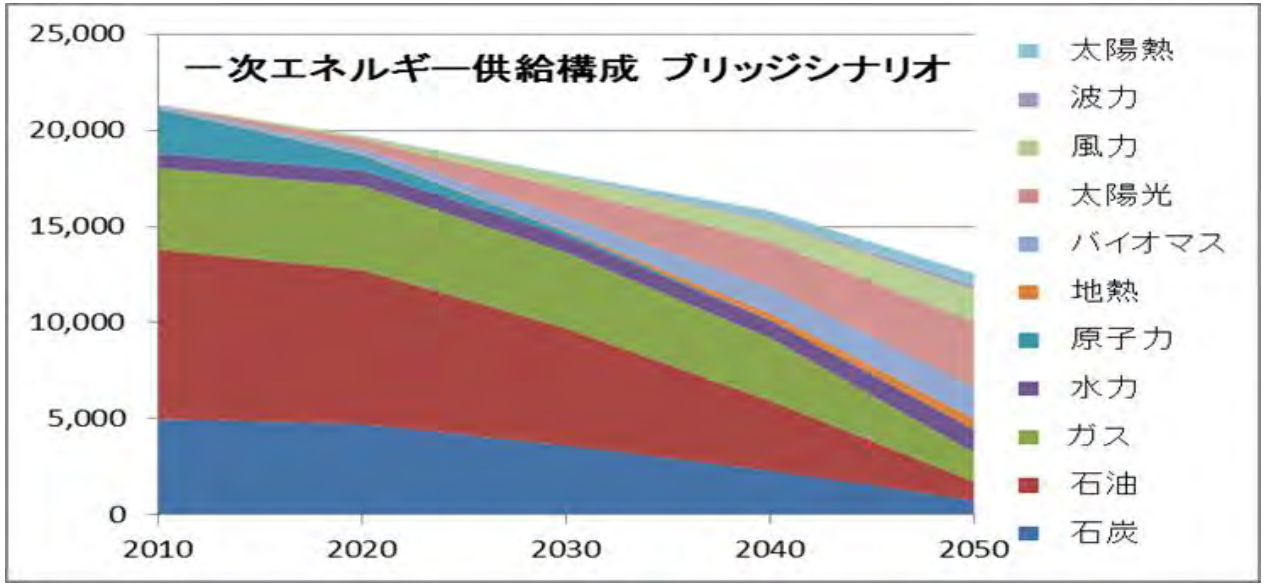
変動する太陽光と風力のため純粋な電力需要より大きな発電量（余剰電力）が生じる。その発生は4月に最大、7月に最小となっている。これは4~5月に太陽光発電が最大になり、6~8月には風力発電が最小になることに起因する。



ブリッジシナリオの一次エネルギー供給構成

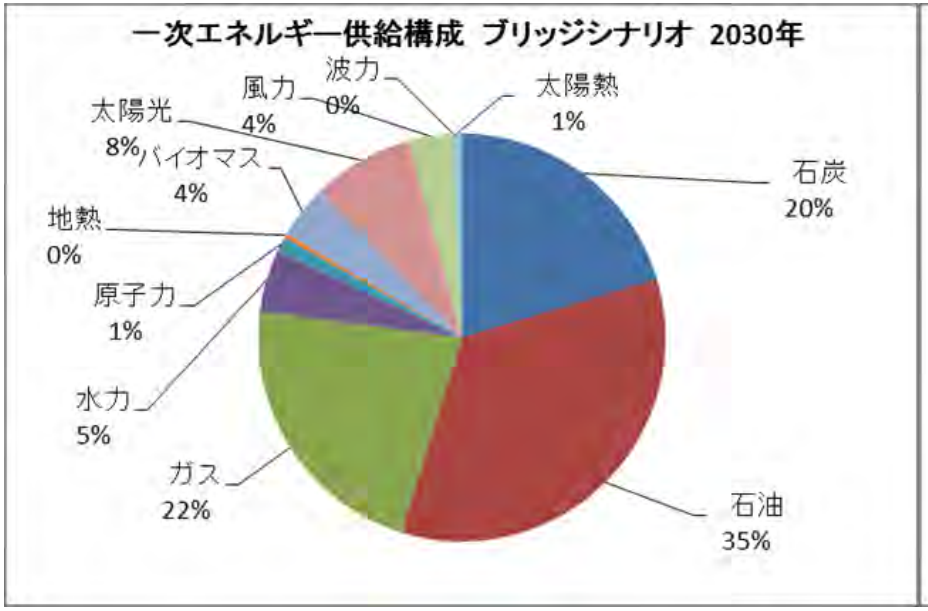
	ブリッジシナリオ				
PJ	2010	2020	2030	2040	2050
石炭	4,981	4,727	3,605	2,302	764
石油	8,819	8,012	6,092	3,641	971
ガス	4,243	4,365	3,937	3,248	1,505
水力	747	810	873	949	1,215
原子力	2,322	801	207	0	0
地熱	28	33	66	331	552
バイオマス	153	300	744	1,391	1,640
太陽光	20	477	1,422	2,340	3,374
風力	30	158	627	1,046	1,696
波力	0	0	2	118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

2050年には、石油、石炭、ガスが残り、メタンなどを含めて20%のCO_2排出がある。その他は、太陽光、風力、バイオマスが主要な供給源になる

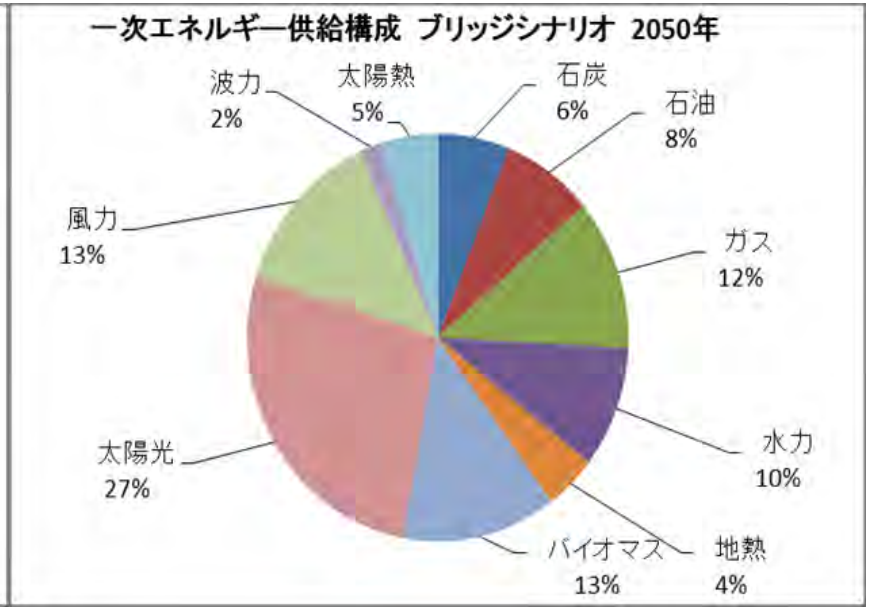


ブリッジシナリオの一次エネルギー供給構成

2030年



2050年

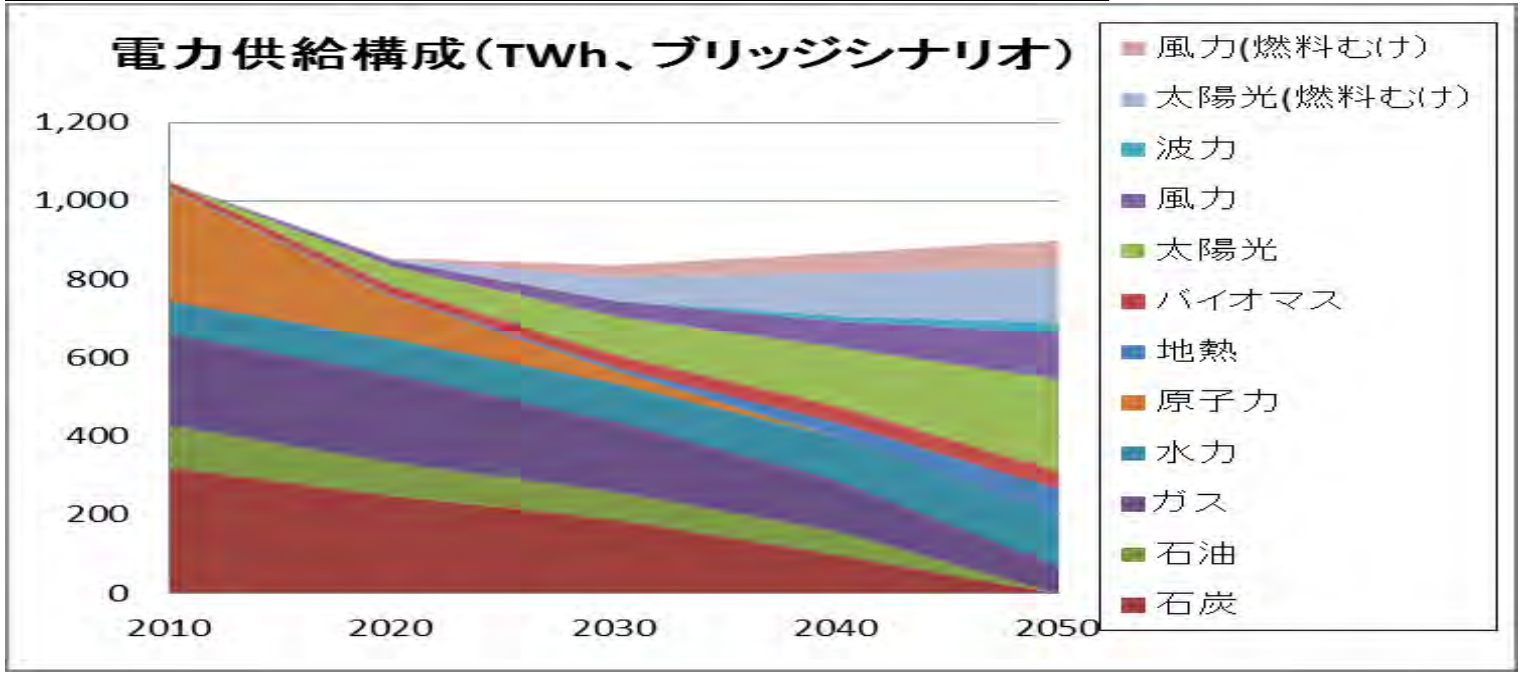


ブリッジシナリオの一次エネルギー供給構成は、2030年には石炭、石油、天然ガスが合計で77%を占めている。太陽光と風力は合計でまだ12%とシェアは大きくない。2050年になると、石炭、石油、天然ガスの化石燃料合計は26%に低下し、代わって太陽光と風力の合計は40%に増加している。

ブリッジシナリオの電力供給構成

発電構成（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
純粋電力への供給計	1,051	850	747	708	691
太陽光(燃料むけ)	0	3	60	110	140
風力(燃料むけ)	0	2	30	50	70
燃料用を含む電力合計	1,051	855	837	868	901

電力供給構成の時間経過を見ると、2030年ごろから、燃料用に供給する電力が増加し始める。変動する太陽光と風力から生じる余剰電力を、EV用電力とFCV用水素へ供給する。さらにヒートポンプにより低温熱供給に向けられる。



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	発電量	シェア（%）
発電構成	GW	GWh／年	%
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

ブリッジシナリオでは、
2050年には、
太陽光3億5930万kW、
風力8360万kW
の規模になる。

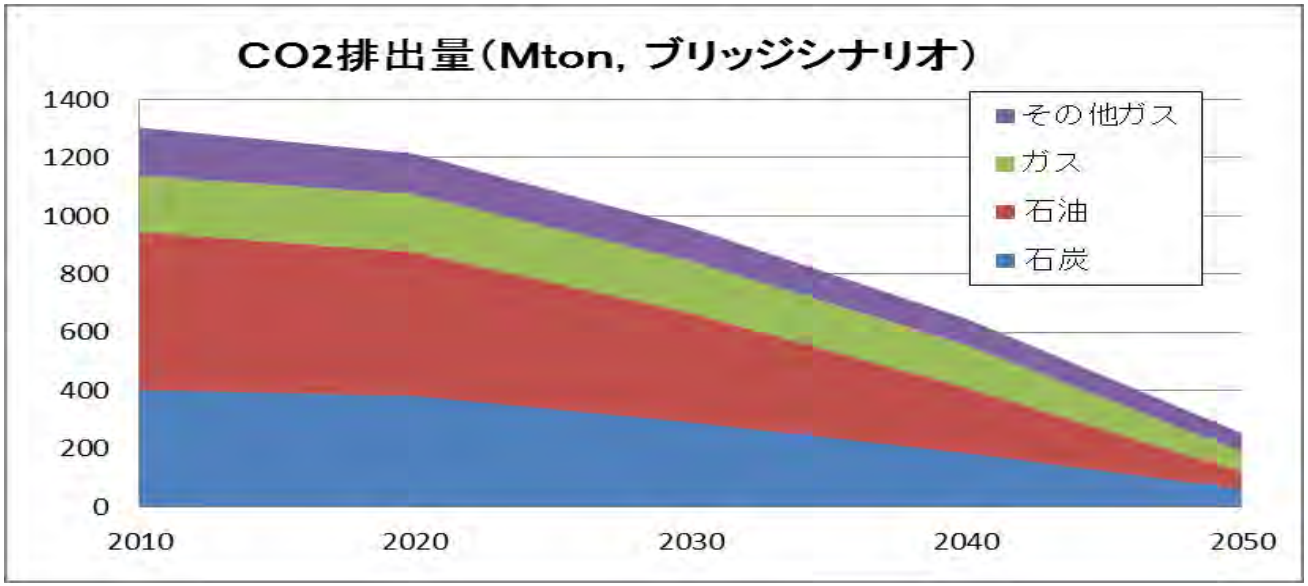
ブリッジシナリオの電力供給、蓄電量、余剰電力(2050年)

年間電力需要	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	223169
余剰電力量／電力需要	%	32.35
最大余剰電力	MW	221890

ブリッジシナリオでは、
2050年には、年間電力需要は689TWhになる。
揚水発電とバッテリーにより充放電損失が生じる。
余剰電力は、電力需要の32%に達している。

ブリッジシナリオのCO2排出量

CO2排出量(MtCO2)	2010	2020	2030	2040	2050
ブリッジシナリオ計	1304	1214	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

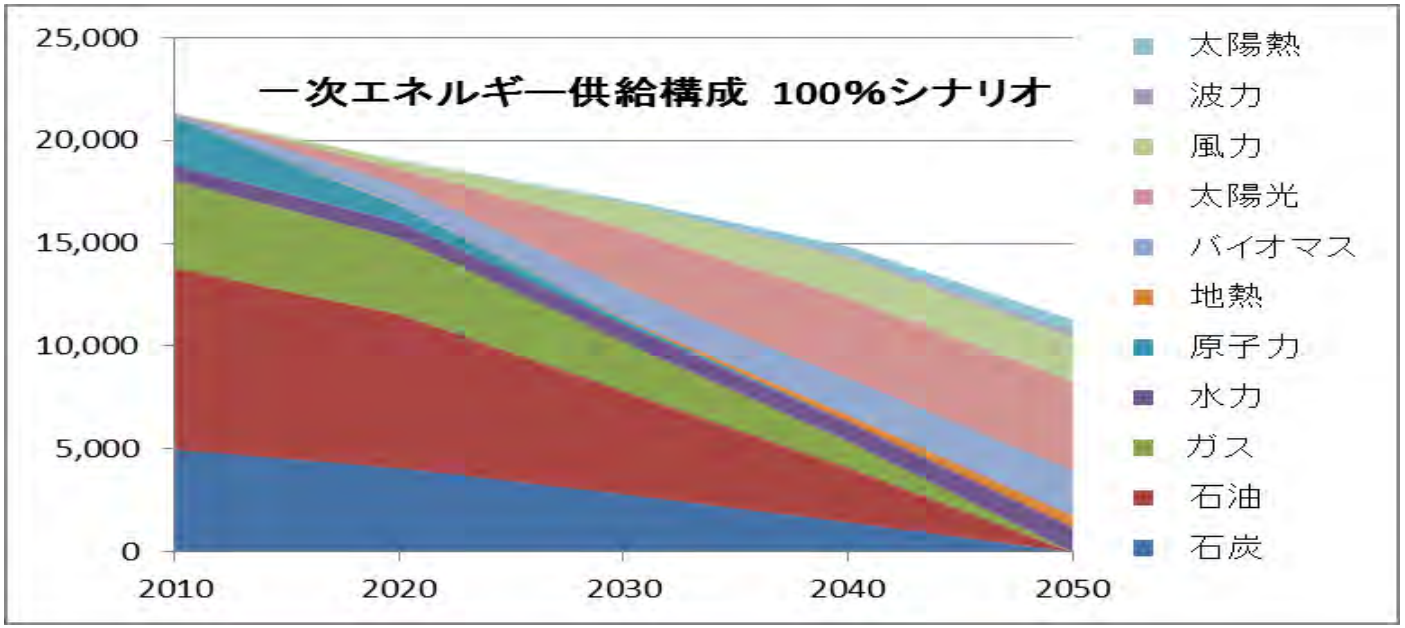


ブリッジシナリオにおける2050年のCO2排出量は、石炭から6200万トン 、石油から6000万トン、天然ガスから6800万トン。合計は1億9000万トンであり、「その他ガス」からの6400万トンを加えると、2億5400万トンになる。これは、1990年のCO2排出量の20%に相当する。

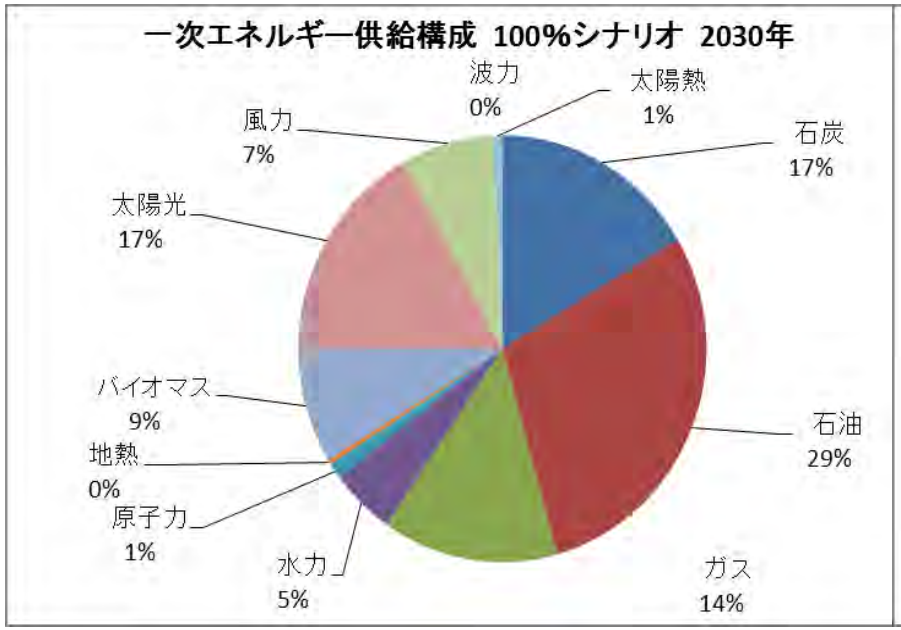
100%自然エネルギーシナリオの一次エネルギー供給構成

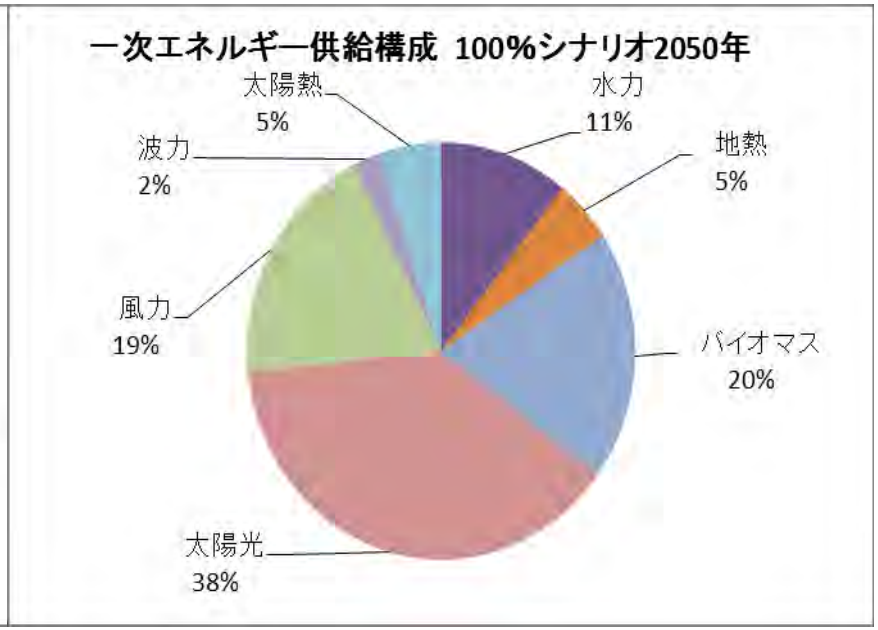
	100%シナリオ				
PJ	2010	2020	2030	2040	2050
石炭	4,981	4,076	2,814	1,443	0
石油	8,819	7,474	5,009	2,657	0
ガス	4,243	3,682	2,380	1,278	0
水力	747	810	873	949	1,215
原子力	2,322	801	207	0	0
地熱	28	33	66	331	552
バイオマス	153	938	1,500	1,778	2,200
太陽光	20	794	2,890	3,900	4,316
風力	29	397	1,260	1,946	2,167
波力	0	0	2	118	237
太陽熱	0	20	120	444	600
合計	22,157	19,025	17,122	14,844	11,287

2050年には化石燃料消費はゼロになり、太陽光、風力、バイオマスが主要な供給源になる



100%自然エネルギーシナリオの一次エネルギー供給構成



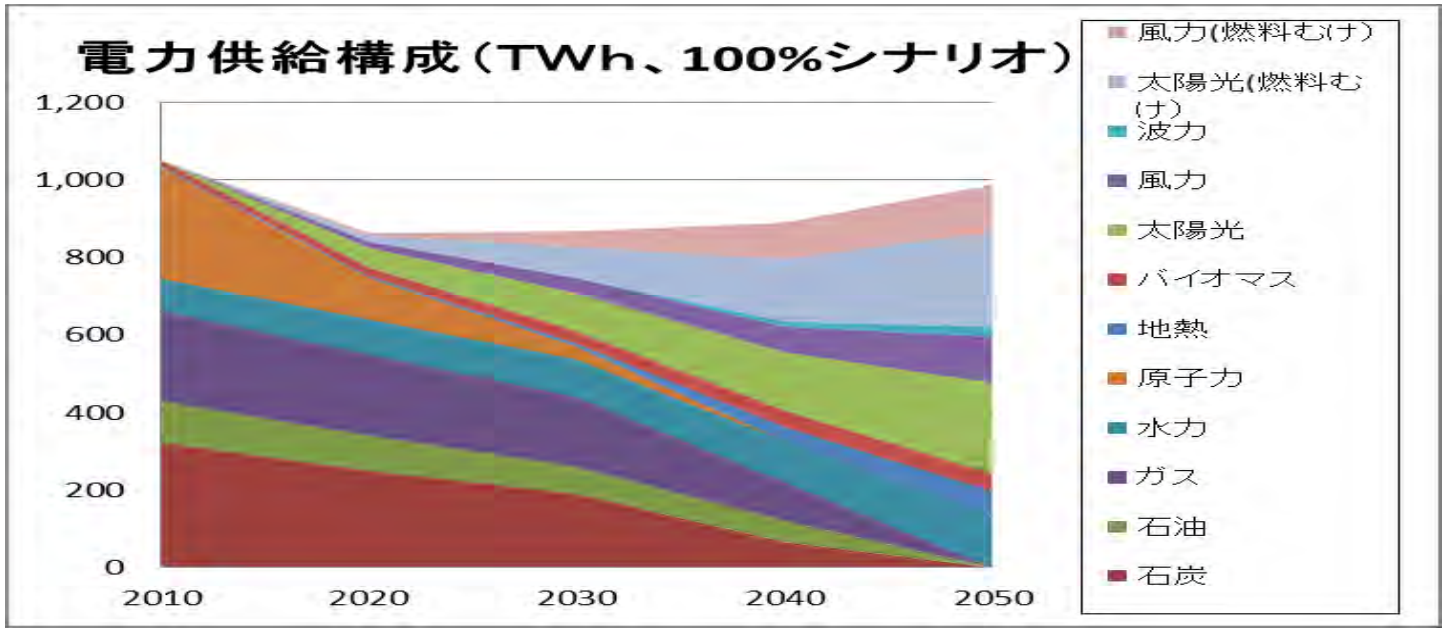


100%自然エネルギーシナリオの一次エネルギー供給構成は、2030年には石炭、石油、天然ガスが合計で60%を占めている。太陽光と風力は合計でまだ24%とシェアは大きくない。2050年になると、化石燃料はゼロとなり、太陽光38%、風力19%、バイオマス20%、地熱が5%となっている。

100%自然エネルギーシナリオの電力供給構成

発電量構成（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	0.0	50	98	150	235
風力	0	16	40	66	118
波力	0	0	0	13	26
純粋電力への供給計	1,051	840	747	635	621
太陽光(燃料むけ)	0	15	80	160	245
風力(燃料むけ)	0	8	40	95	122
燃料用を含む電力合計	1,051	863	867	889	988

ブリッジシナリオと同様に、2030年ごろから、燃料用に供給する電力が増加し始める。この電力は、変動する太陽光と風力から生じる余剰電力を、EVの電力とFCVなどの水素を供給し、さらに、ヒートポンプによる低温熱供給に向けられる。



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	発電量	シェア（%）
発電構成	GW	GWh／年	%
太陽光発電	444.7	486,696	79.3
風力発電	104	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

100%自然エネルギーシナリオでは、
2050年には、
太陽光4億4400万kW、
風力1億400万kW
の規模になる。

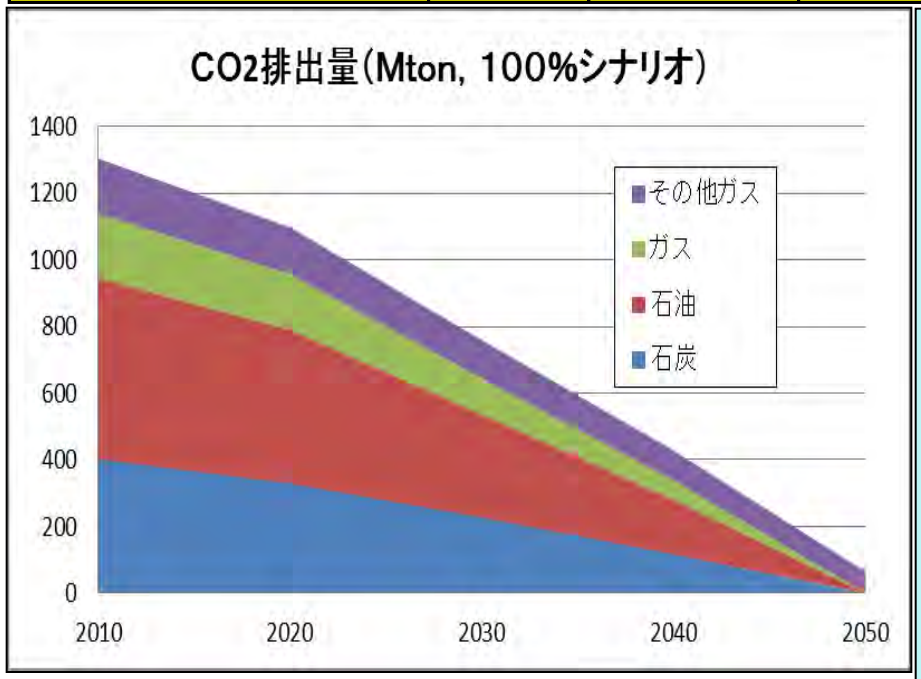
100%自然エネルギーシナリオの電力供給、蓄電量、余剰電力(2050年)

年間電力需要	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

2050年には、年間電力需要は620TWhになる。
揚水発電とバッテリーにより充放電損失が生じる。
余剰電力は、電力需要の59%に達している。これを自動車用電力と水素に、また熱需要向けに活用する。

100%自然エネルギーシナリオのCO2排出量

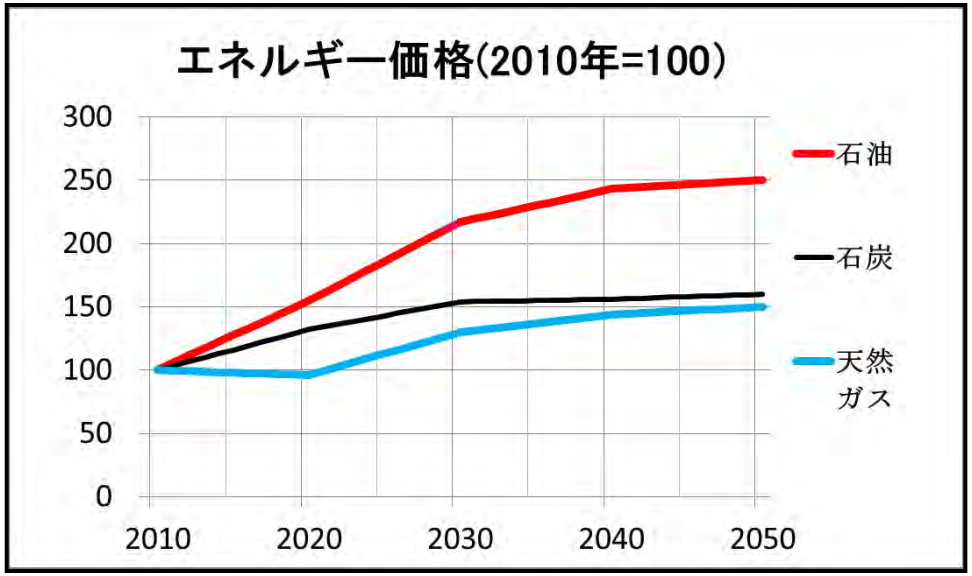
CO2排出量(MtCO2)	2010	2020	2030	2040	2050
100%シナリオ計	1304	1098	759	428	64
石炭	402	329	227	117	0
石油	544	461	309	164	0
ガス	193	167	108	58	0
その他ガス	166	140	115	89	64



100%自然エネルギーシナリオにおける2050年のCO2排出量は、化石燃料からの排出はゼロ、「メタンなどその他ガス」からの排出6400万トンのみになり、1990年のCO2排出量の5%に相当する。ただし、2050年に鉄鋼業の石炭を水素に代替する技術や電気分解製鉄は未知であり、実用化されなければ約5%は残るかもしれない。

代表的な石油価格の予測（石油バレル／ドル）

①US/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ルック	2015	2020	2030	2040	2040/2015(%)
参照ケース	60		100	125	208
低位ケース	60		75	80	133
③World Energy Outlook IEA 2016	2015	2020	2030	2040	2040/2015(%)
新政策シナリオ	51	79	111	124	243
現行政策シナリオ	51	82	127	146	286
450シナリオ	51	73	85	78	153

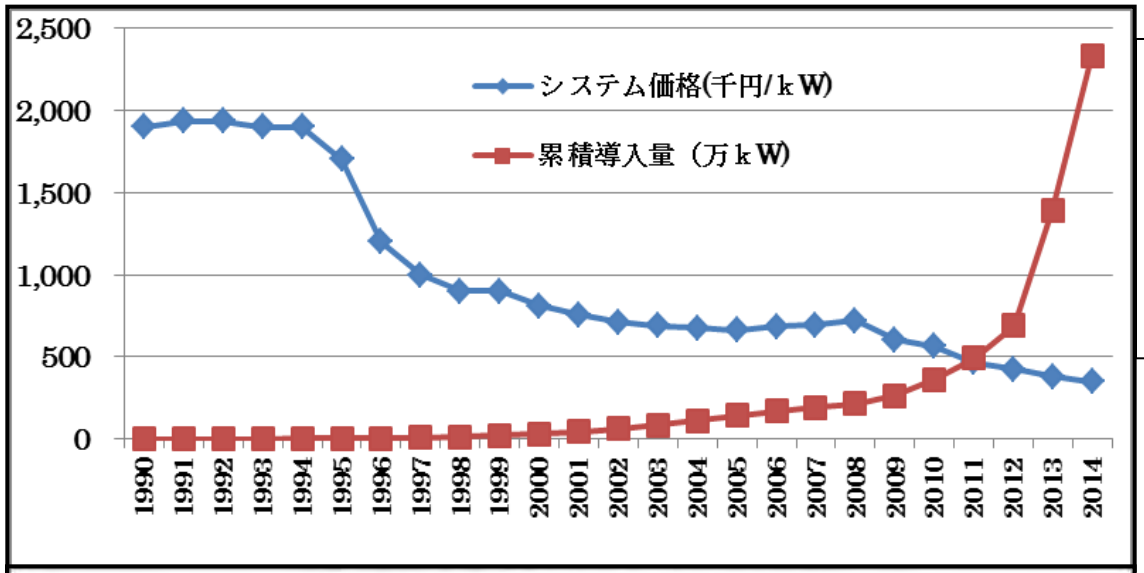


③World Energy Outlook (IEA)の新政策シナリオを参照している。

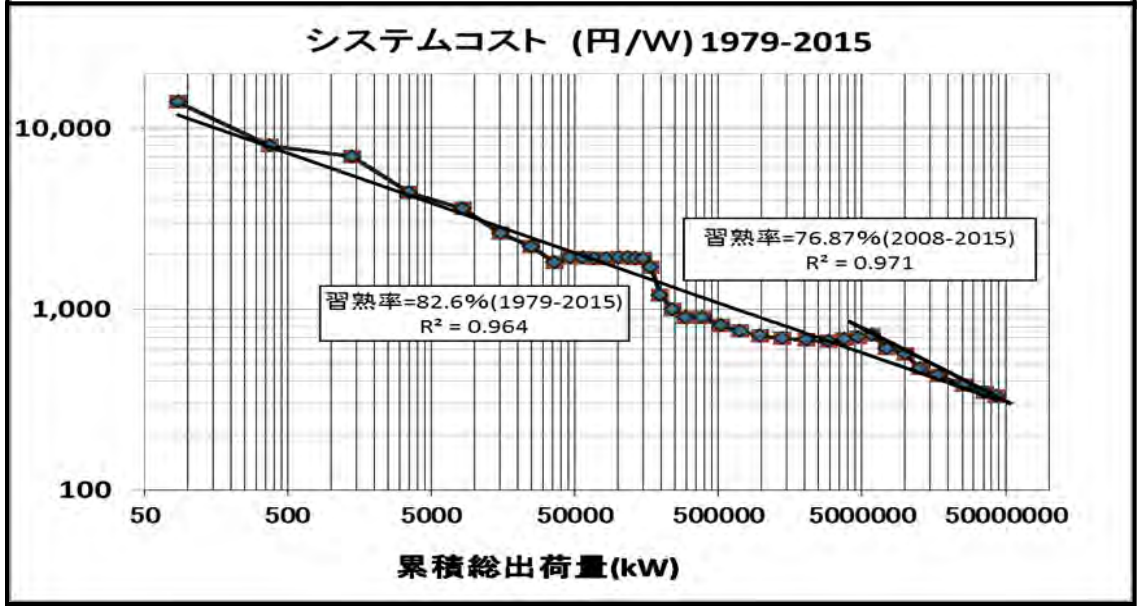
石油価格は2040年に2015年の2.43倍になる。

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。

太陽光発電システムのコスト低下



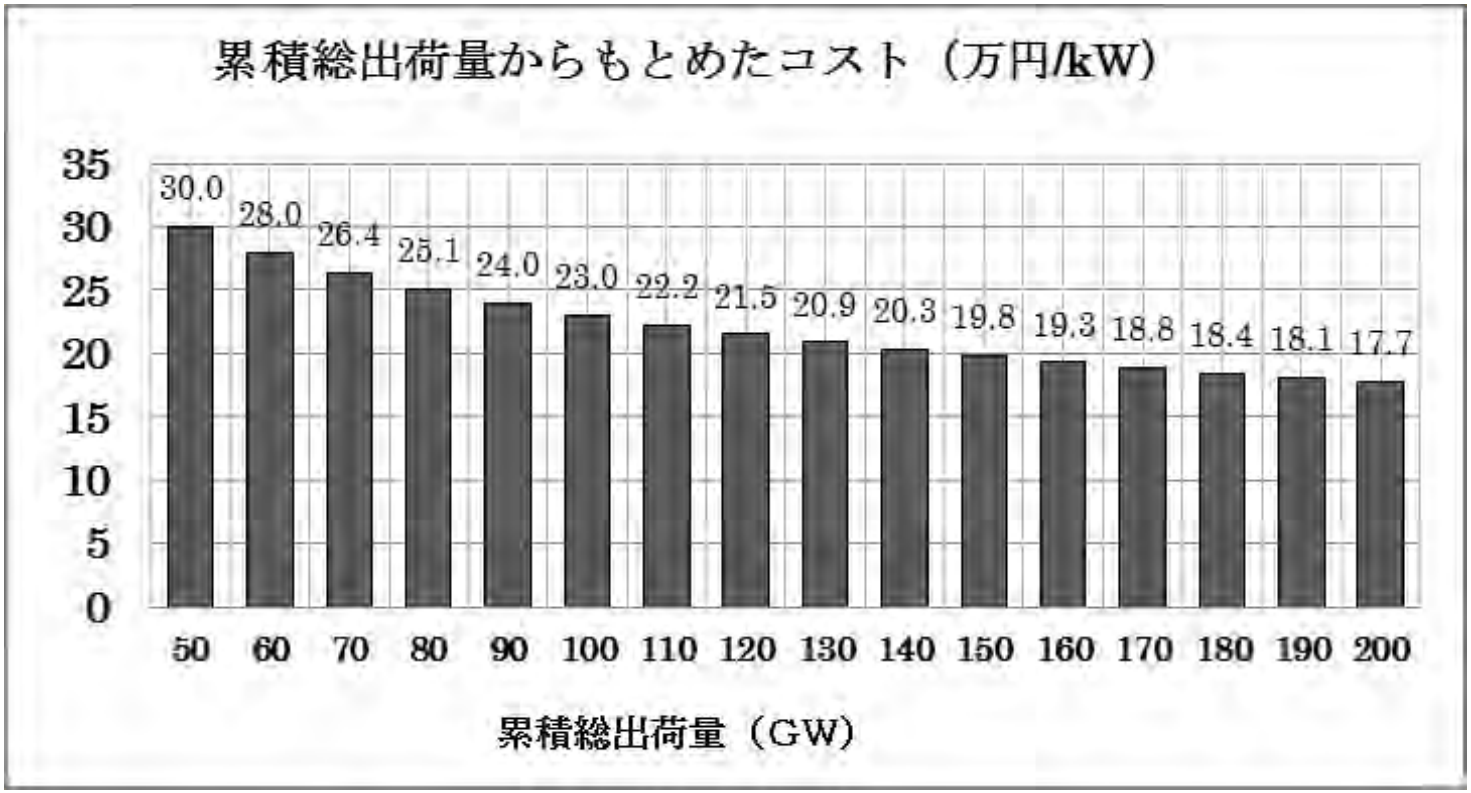
太陽光発電システムの価格と累積導入量(1990～2015)



太陽光発電システムの価格と累積導入量(1979～2015)

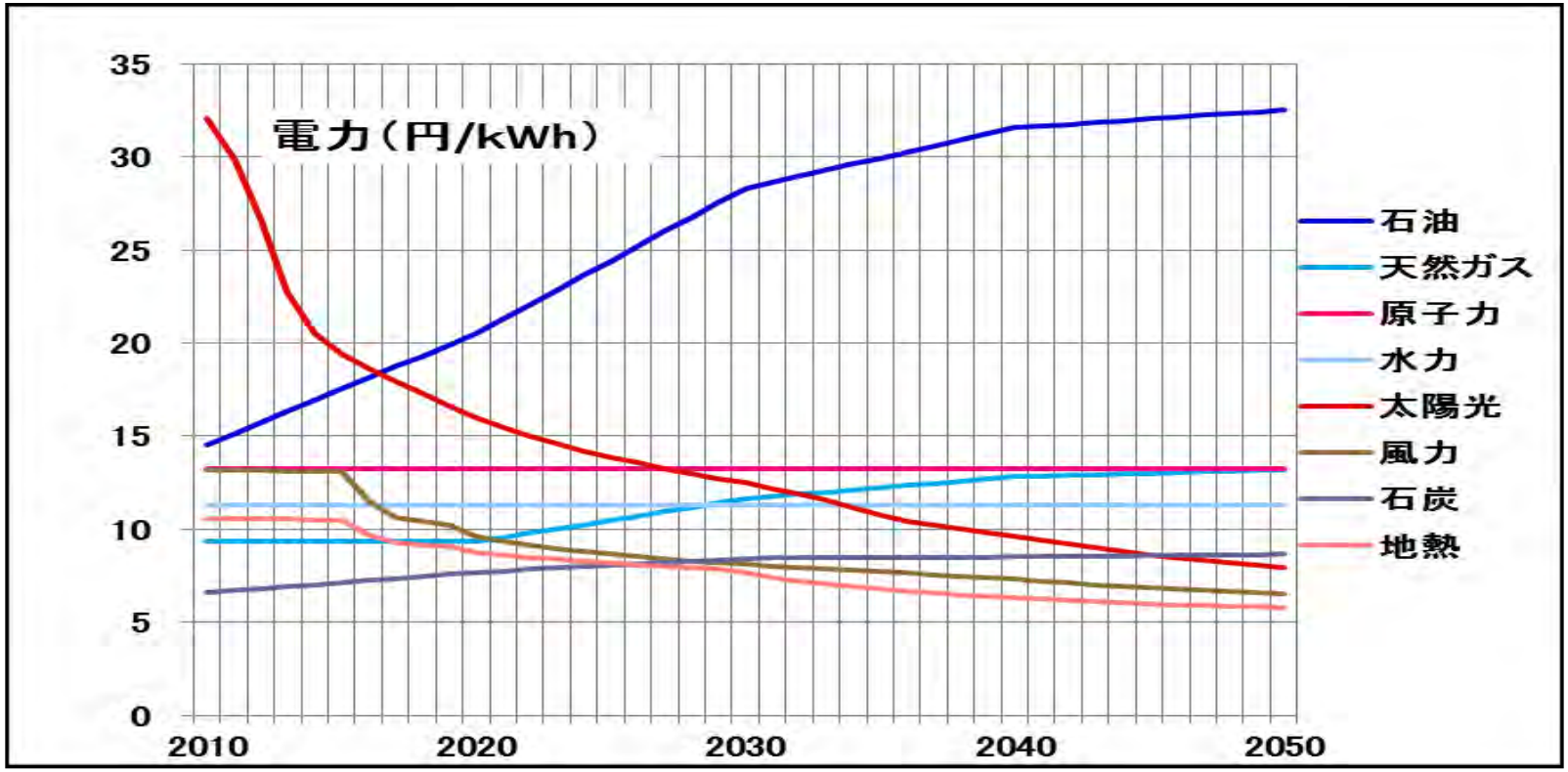
回帰分析結果は学習曲線に乗っている

将来の太陽光発電システムコストの予測



学習曲線による分析：2008－2015年には累積生産量が２倍になるとコストが76.87%に低下している。この低下傾向を延長すると累積生産量が200GW(2億kW)になるとき、17.7万円/kWに低下する。

各種エネルギー源の電力価格

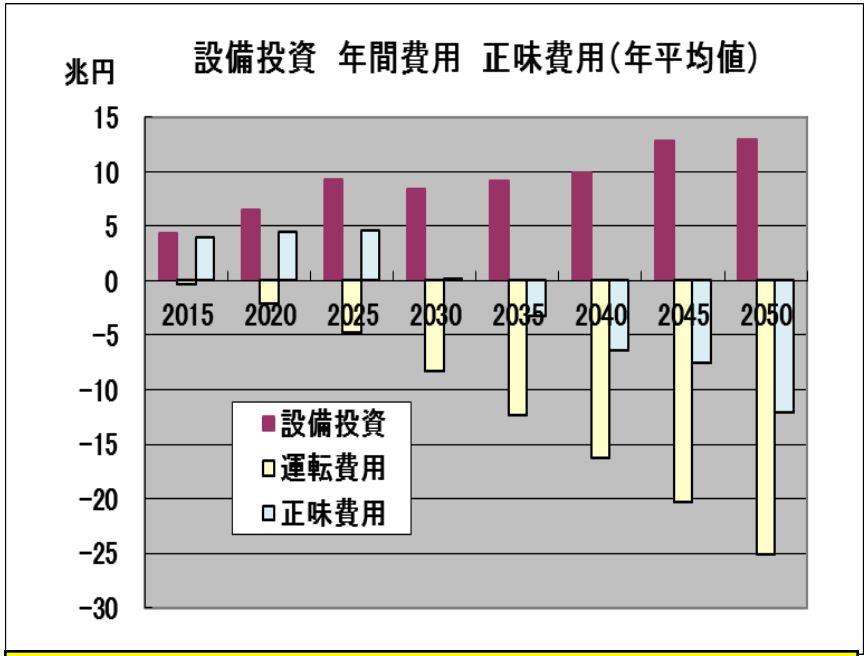


本報告では、2050年までに自然エネルギーが大量に普及してゆくことを想定している。将来のWWFシナリオの自然エネルギーの将来価格は、固定価格買取制度(2012年7月開始)の価格とコスト等検証委員会 を参考にして、学習曲線を利用して計算している。

100%自然エネルギーシナリオの設備投資、年間費用、正味費用（2010～2050）

項目	A 設備投資 CapEX(兆円)	B 運転費用 OpEX(兆円)	C 正味費用 Net(兆円)
産業部門省エネ	26.3	-88.9	-62.6
家庭部門　断熱化	41.5	-39.6	1.9
照明	2.6	-9.6	-7.1
エアコン	2.1	-5.9	-3.7
業務部門　省エネビル	16.1	-14.6	1.5
照明	5.1	-4.4	0.7
乗用車	97.4	-117.6	-20.2
省エネ合計	191.1	-280.5	-89.5
純電力用　太陽光	53.4	-31.7	21.7
陸上風力	6.1	-9.2	-3.2
洋上風力	8.0	-8.7	-0.7
燃料用電力	76.7	-52.6	24.1
太陽熱	8.9	-40.2	-31.3
地熱	6.2	-7.4	-1.2
水力	15.1	-18.5	-3.4
自然エネルギー合計	174.4	-168.4	5.9
合計	365.4	-449.0	-83.5
年間平均	9.1	-11.2	-2.1

40年間の省エネルギーと自然エネルギーは、設備投資365兆円、運転費用は－449兆円、正味費用－84兆円であり、十分な投資効果がある。1年間の投資額は9兆円になり、GDPの2%弱。



正味費用＝設備投資＋運転費用
運転費用はBAUシナリオとの費用の差

狩猟から耕作への転換

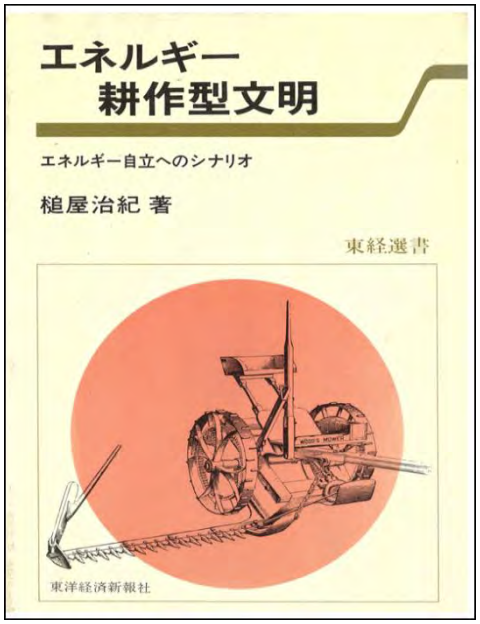
太古の時代に食料に関して狩猟から農耕への文明の転換が生じた

エネルギー狩猟型文明

地下から燃料（石油、石炭、天然ガス、核物質）を掘り出す。
二酸化炭素を排出し気候に影響し、いつの日か枯渇する。

エネルギー耕作型文明

地上で太陽のエネルギーを受けとめ、農業のように太陽光、風力、太陽熱、バイオマスなどを利用する。エネルギー利用効率を高めてエネルギー需要を減少する。 天候に依存するが、気候に影響を与えない。



（東洋経済1980）