



脱炭素社会に向けた長期シナリオ

概要版

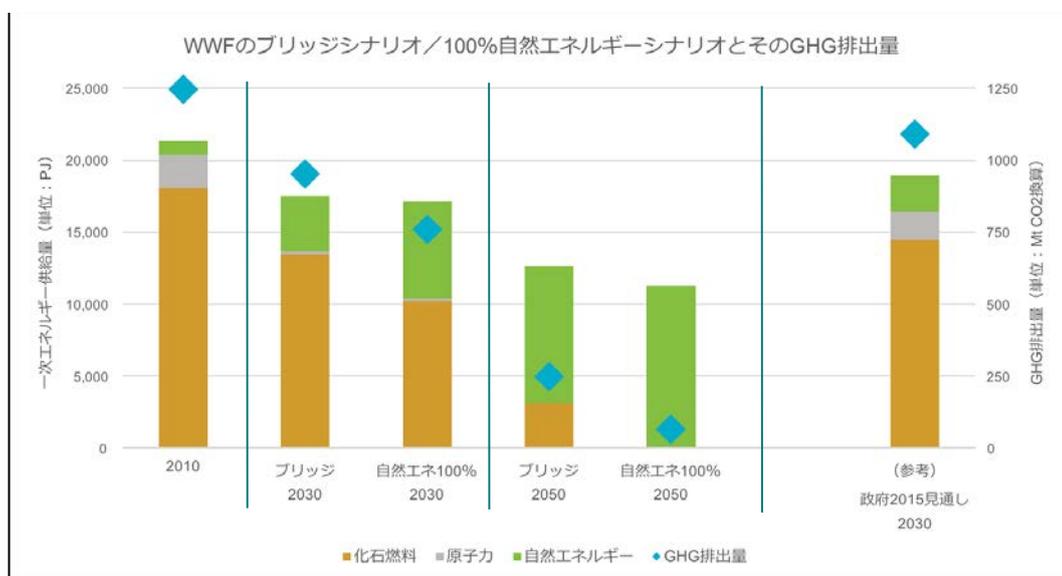
2017年4月13日改訂

WWF ジャパン

主なポイント

WWF ジャパンは、日本が世界の諸国に先駆けてパリ協定の下で求められる「脱炭素化」を達成することを前提として、長期のエネルギーおよび温室効果ガス排出量削減の可能性を検討しました。具体的には、以下の2つのWWFシナリオを検討しました。

- **100%自然エネルギーシナリオ**：2050年に、日本のエネルギーが全て自然エネルギー（再生可能エネルギー）によって供給されていることを前提としたシナリオです。
- **ブリッジシナリオ**：政府が掲げている「2050年までに温室効果ガスを80%削減する」という目標を達成することを前提としたシナリオです。上の100%自然エネルギーシナリオを達成する橋渡しになるという意味で、「ブリッジ」シナリオと呼んでいます。



	2030年		2050年		2030年
	ブリッジ	100% 自然エネ	ブリッジ	100% 自然エネ	2015年の政府 長期需給見通し
省エネ（最終エネ消費削減率・2010年比）	16%	21%	39%	47%	14%
自然エネ（一次エネの割合）	22%	39%	74%	100%	13~14%
GHG排出量削減率（2010年比）【2013年比】	26%【32%】	42%【46%】	81%【82%】	95%【95%】	20%【26%】

検討の結果、**100%自然エネルギーシナリオ**は、以下の特徴を持つシナリオとなりました。

- 現在想定できる省エネルギー技術・対策の普及・進歩により、日本の最終エネルギー消費量（需要量）は2050年までに約半分に減らすことができる（2010年比47%減）。これは、決して無理な想定をおくものではない。たとえば、前提としている省エネは、産業部門の主要な業種において、2050年までの約40年間に2～3割の効率改善が行われること、全ての住宅および建築物の4割が少なくとも今の最新省エネ基準を満たしていること、全ての車両が、現在普及が始まっているEV・FCVへシフトしていることなどである。
- 2050年時点で必要になる上述のエネルギー需要は、日本で供給可能な自然エネルギーのポテンシャルの範囲内である。2050年までに、100%を達成するために、自然エネルギーの割合がほぼ直線的に増えると想定した場合、2030年時点では、電力の37%（純粋な電力需要に対する割合；下記参照）、一次エネルギー供給の39%を自然エネルギーで供給している必要がある。
- 自然エネルギーの一部（特に風力と太陽光）は、発電出力が変動するため、電力需要とのマッチングが難しいと言われる。しかし、シミュレーションの結果、2050年時点の電力需要を、自然エネルギー100%で365日間切れ目無く供給することは可能である。ただし、その際には、全国の電力システムが一体的に利用できる必要があり、また、太陽光・風力の発電量が2：1になっていることが望ましい。
- エネルギー全体を考えると、電力需要を自然エネルギーで供給すること自体は論理的には大きな課題ではなく、むしろ、熱・燃料需要をどのように満たすかが課題となる。この課題に対しては、バイオマス利用の大幅な普及と、余剰電力を水素に転換し、水素を活用することが鍵を握る。
- このシナリオを達成するために必要な2010～2050年までの約40年間の設備費用(CapEx)は365兆円となるが、運転費用(OpEx)は449兆円のマイナス（つまり節約）となり、正味(Net)の費用は、84兆円の節約となる。
- 2050年時点での最終的なエネルギー起源のCO2排出量はゼロに、GHG排出量は、95%削減される。

ブリッジシナリオは、100%自然エネルギーのシナリオを、一定の遅れをとって達成するイメージになります。省エネルギーについては5年程度、自然エネルギー供給については、10年程度の遅れをもって達成するイメージになります。具体的には、以下の特徴を持ちます。

- 省エネルギー技術・対策の普及により、2050年までに2010年比で約40%のエネルギー消費量が削減される。

- 自然エネルギーは、2050年時点で、一次エネルギー供給のうちの約74%を供給しており、電力のうちの約90%を供給している（純粋電力ベース；後述）。2030年時点では、一次エネルギー供給のうちの約22%、電力のうちの約37%となる。
- 2050年時点で「残り20%」を排出する化石燃料については、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ている。
- このシナリオを達成するために必要な2010～2050年までの約40年間の設備費用(CapEx)は296兆円となるが、運転費用(OpEx)は392兆円のマイナス（つまり節約）となり、正味(Net)の費用は、96兆円の節約となる。

基本的な考え方

2つのWWFシナリオに共通する基本的な考え方と検討ステップは、以下のように整理できます。

1. 現在想定することができる技術・対策やその進歩の度合いを想定し、省エネルギーによって需要を大幅に絞る。
2. 原発の段階的な廃止を想定する。
3. 各自然エネルギーについて、利用できるポテンシャルを吟味した上で、需要をどのように満たせるのかを検討する。
4. 別途、2050年における24時間365日間の変動する電力需要を、自然エネルギーを中心とする電力供給で満たせるかを、気象データなどを元に行うダイナミック・シミュレーションを用いて確認する
5. 上記の進展にともない、化石燃料は段階的に廃止されていくものとする。

WWFシナリオが、他の類似のエネルギーシナリオと大きく違う1つの特徴は、自然エネルギーの活用の仕方です。WWFシナリオでは、自然エネルギーによって、電力供給の全てを将来的にはまかなうだけでなく、余剰電力を活用して製造する水素で、電力以外の熱や燃料需要をも満たしていくことを想定しています（バイオマスや太陽熱による熱・燃料供給も含まれます）。これによって、変動する自然エネルギー電力の余剰が問題になることを防ぎつつ、熱や燃料需要を満たしていくことが可能になると考えています。

エネルギー需要 ～省エネルギーでどこまで減らせるか～

省エネルギーの可能性検討のステップ

WWFシナリオでは以下のようなステップで省エネルギーの可能性について検討しています。

1. 産業・家庭・業務・運輸という各部門の中で、代表的な省エネルギー対策・技術を決めて、エネルギー効率改善の度合いを検討する（例：LED 電球の高性能化と大量普及）。
2. 個々の省エネルギー対策・技術が、各部門の用途別（例：家庭部門における照明、給湯など）のエネルギー消費量を引き下げることにどれくらい貢献し、結果としてどの位のエネルギー需要になるかを、以下の計算式で計算する（この際の活動量とは、たとえば、車の台数は人口に比例するなど、個別に想定を置いています）。

$$\begin{aligned}
 & T \text{年での最終用途エネルギー需要} \\
 & = 2010 \text{年の各部門の最終用途エネルギー需要} \times \\
 & \quad T \text{年での各部門の活動量の 2010 年からの変化} \times \\
 & \quad T \text{年時点での省エネルギーによる効率向上度合い}
 \end{aligned}$$

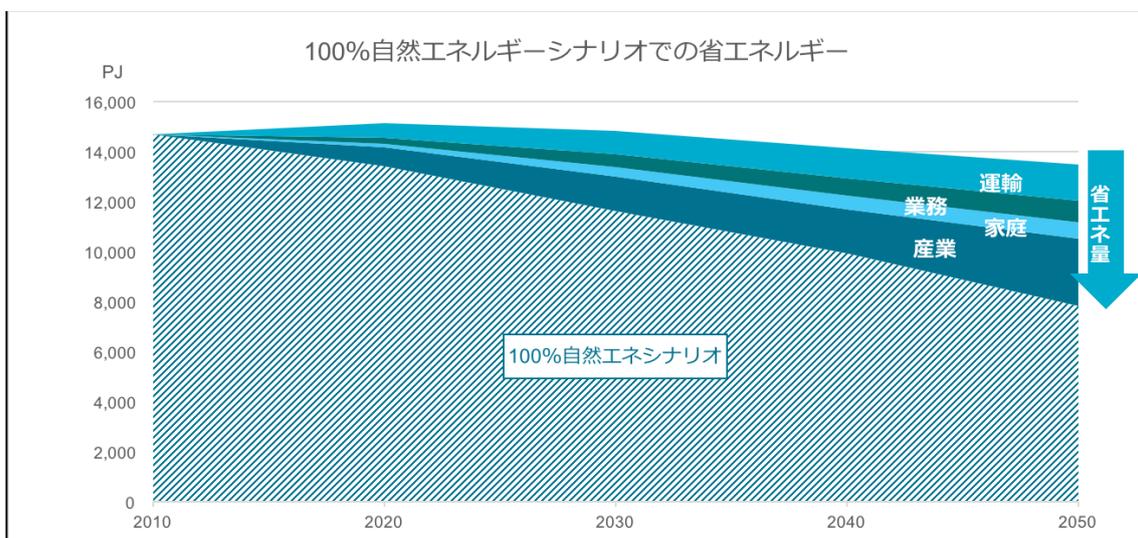
3. 各部門・各分野のエネルギー消費量を足し合わせ、全体のエネルギー消費量を求める。

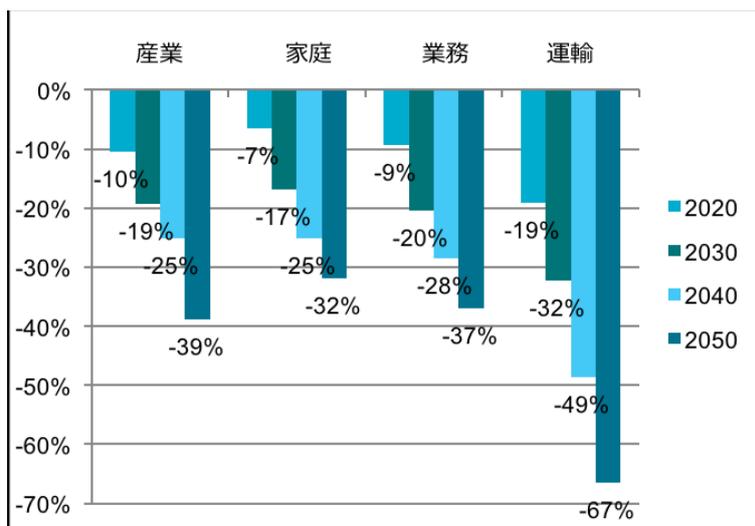
示された省エネルギーの可能性

社会全体として、活動量については、「2010 年比で 76%への人口減少」と「持続可能な社会への変化」などの動向から、資源消費に関する活動量が 2010 年比でおよそ 80%に低下すると想定しました。このため、多くの他のエネルギーシナリオがそうであるように、2050 年にかけては、なりゆきケース（BAU）でもエネルギー消費は減少していきます。

WWFのシナリオでは、そこからさらに 20-30%のエネルギー効率をあげる省エネルギーによって、以下のようなエネルギー需要の削減が達成できると考えています（個別の部門で想定している技術・対策は後述）。

100%自然エネルギーシナリオの場合、2050 年時点では、2010 年と比較して 47%、なりゆきケース（BAU）と比較して 42%のエネルギー消費量を削減することができます（最終エネルギー消費ベース）。量としては産業部門が最も大きくなりますが、削減率としては、運輸部門が最大になります。以下の 2 つのグラフは、いずれも BAU からの削減量・率を表したものです。





ブリッジシナリオでは、省エネルギーは、2050年時点では、2010年と比較して39%、なりゆきケース（BAU）と比較して34%のエネルギー消費量を削減することができます（最終エネルギー消費ベース）。100%自然エネルギーシナリオと同じく、最大削減量は産業部門ですが、削減率としては、運輸部門が最大になります。100%自然エネルギーシナリオよりも、毎年の原単位改善率（最終エネルギー消費／実質GDP）が少し低くなります（100%自然エネルギーシナリオの2.6%からブリッジシナリオは2.3%へ）。この数字は、過去1970～90年にかけての改善率である2.3%とほぼ同じ水準です。しかも人口減少等にともない、BAUでも同じ期間の年平均の原単位改善率は1.3%になりますので、日本の省エネポテンシャルを加味すれば、ブリッジシナリオの達成はより容易であると言えます。

鍵となる省エネルギー対策・技術

以下のような省エネルギー技術・対策をWWFシナリオでは想定しています。これらは、現在想定できる技術の普及等を想定しており、革新的な技術への過度な依存がなくとも、充分達成できます。

部門	代表的技術・対策
産業	ポンプのインバーター制御、ファンのインバーター制御、鉄鋼のリサイクル
家庭	ゼロエネルギーハウス（ZEH）の普及、電気冷蔵庫の効率化、ヒートポンプの普及、待機電力の減少、LED照明の普及
業務	ゼロエネルギービル（ZEB）の普及、データセンターのハードディスクのフラッシュメモリーによる代替
運輸	エコドライブの普及、カーシェアリングの普及、電気自動車（EV）・燃料電池車（FCV）の普及

エネルギー供給 ～自然エネルギー100%に向けて～

自然エネルギーの想定については、環境省のポテンシャル調査を参考にしつつ、持続可能性を考慮して、活用する量に一定の制限を与えています。

また、本シナリオで「自然エネルギー」として検討しているのは、水力発電（今後増やすのは中小水力のみ）、太陽光発電、風力発電、地熱発電、バイオマス発電、波力発電、太陽熱、バイオマスなどです。

電力供給

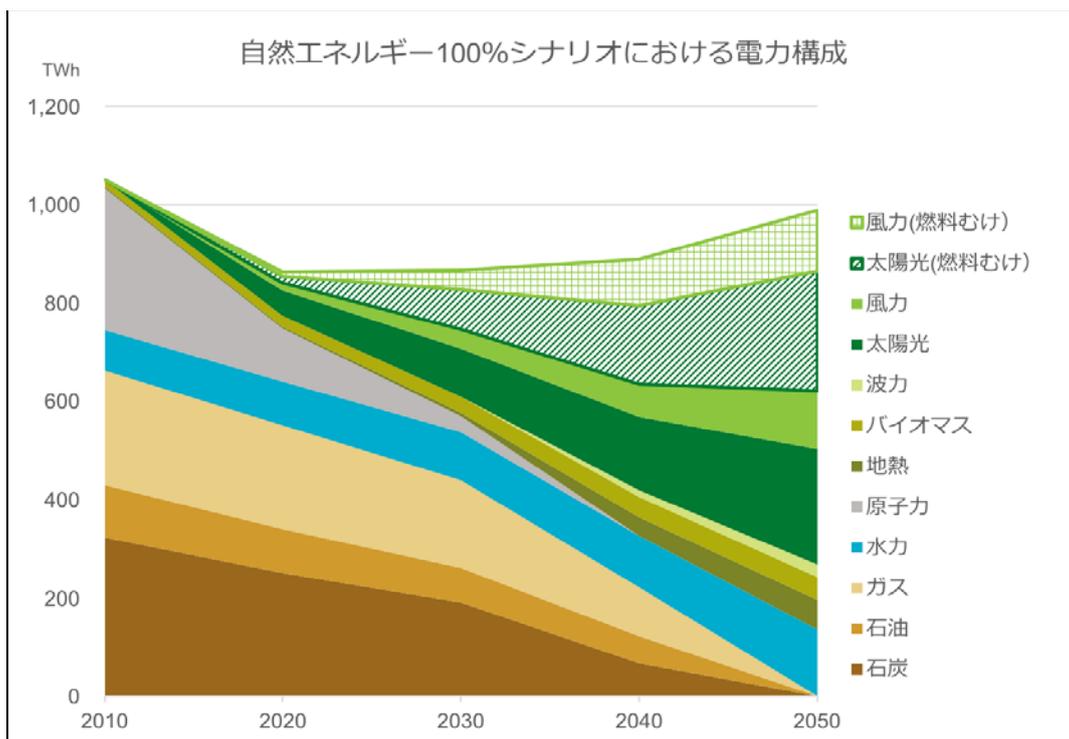
電力の中では、太陽光、風力のポテンシャルが大きいため、それらの利用割合が大きくなります。365日間、電力を切れ目無く供給するためには、シミュレーションの結果、太陽光と風力の割合がおおよそ2対1になることが望ましいと分かりました。このため、WWFシナリオでは、2050年時点での供給量がそのような割合になることを想定しています。

また、WWFシナリオでは、一部の熱・燃料需要を、自然エネルギーからの電力で供給することを想定しています。これには2つの方法があり、1つは、電気自動車やヒートポンプでの冷暖房のように、今までガソリンやガスなどで供給されることが多かった燃料・熱需要を電気で代替する（電化）という方法です。

もう1つは、電気から水素を作り出し、その水素で燃料（燃料電池車も含みます）や熱と燃料需要を満たすということです。余剰電力を全て水素に転換して貯蔵しておく、と想定することで、変動のある自然エネルギー電源が、需要をオーバーして発電してしまう時間帯でも、その電気を有効に活用できます。これは、電力システムの運用上、大きなメリットとなります。

以下のグラフでは、**100%自然エネルギーシナリオ**における電力供給の姿を示しています。これには燃料用の水素の製造に使う電力を含んでいます。そのため2050年に向けては、純粋に必要な電力の需要は、人口減や省エネによって、2010年から約4割減っていきませんが、熱・燃料の需要も電力で補っていくため、発電量そのものは、現在とほぼ同じ水準になります。途中経過である2030年時点においては、純粋電力に占める自然エネルギーのシェアは約37%、熱・燃料用も含めた電力供給に占めるシェアは約45%となります。この中で、主力となるのは太陽光および風力となります。

ブリッジシナリオでは、2050年時点においても、ガスの利用が残っていることを想定しています。具体的には、熱・燃料用を含む電力供給の8%、純粋電力の10%がガスによって供給されています。ここでガスを想定しているのは、同じ量の電力を得る際に排出されるCO₂が少ないことに加え、自然エネルギーの変動に柔軟に対応できるからです。ただし、逆の見方をすれば、ブリッジシナリオにおいても、2050年時点において、電源の約9割が脱炭素化していることが求められる、と言えます。途中経過である2030年時点においては、純粋電力に占める自然エネルギーのシェアは約37%、熱・燃料用も含めた電力供給に占めるシェアは約43%となります。

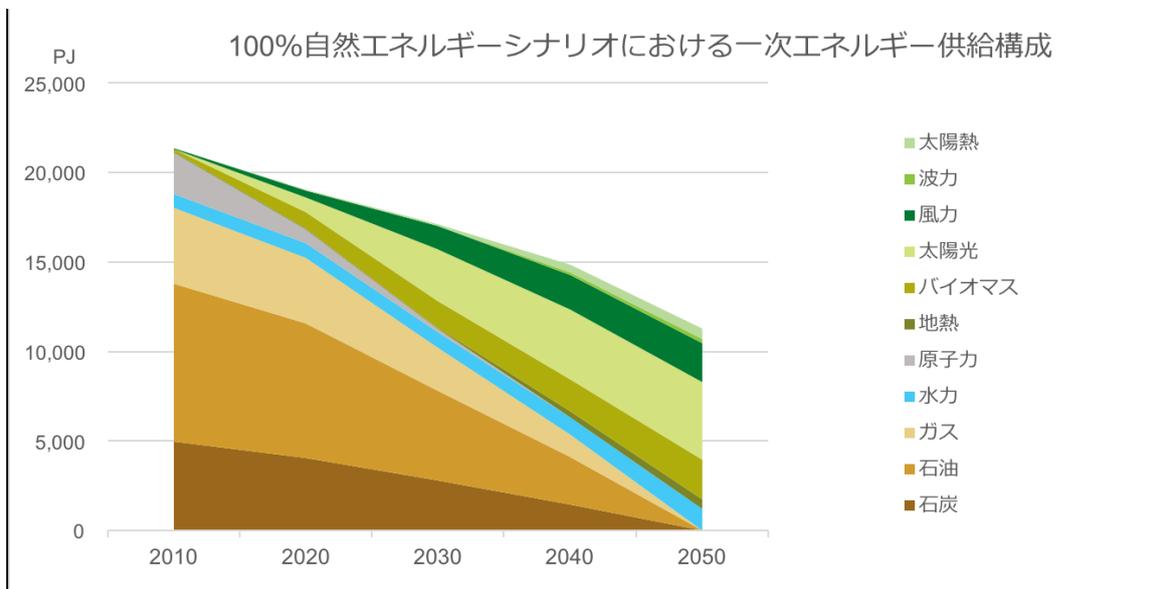


	発電電力量 (TWh)					シェア (純粋電力)		シェア (含熱燃料用)	
	2010	2020	2030	2040	2050	2030	2050	2030	2050
石炭	322	250	190	66	0	25%	0%	22%	0%
石油	107	90	70	55	0	9%	0%	8%	0%
ガス	233	210	180	100	0	24%	0%	21%	0%
水力	83	90	97	105	135	13%	22%	11%	14%
原子力	288	108	33	0	0	4%	0%	4%	0%
地熱	3	4	7	37	61	1%	10%	1%	6%
バイオマス	15	23	32	42	45	4%	7%	4%	5%
太陽光	0	50	98	150	235	13%	38%	11%	24%
風力	0	16	40	66	118	5%	19%	5%	12%
波力	0	0	0	13	26	0%	4%	0%	3%
純粋電力計	1,051	840	747	635	621	100%	100%	86%	63%
熱燃料用太陽光	0	15	80	160	245			9%	25%
熱燃料風力	0	8	40	95	122			5%	12%
電力含熱燃料計	1,051	863	867	889	988			100%	100%
自然エネルギー計 (純粋電力)	101	182	274	414	621	37%	100%		
自然エネルギー計 (含熱燃料)	101	205	394	668	988			45%	100%

一次エネルギー供給

100%自然エネルギーシナリオにおいては、電力だけを見た場合と同じく、風力、太陽光の割合が大きくなりますが、熱・燃料需要に対応するため、バイオマスの役割も大きくなるのが特徴的です（2050年時点で全エネルギーの約20%）。バイオマスや太陽熱に加え、太陽光および風力から得られた水素の活用も想定しています。途中経過である2030年時点では、自然エネルギーのシェアは全体の39%となります。

ブリッジシナリオの場合には、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て想定しています。結果、2050年時点では、自然エネルギーのシェアが74%となる一方、石炭・石油・ガスが、それぞれ6%、8%、12%の割合で残っています。途中経過である2030年の時点では、自然エネルギーのシェアは、22%となります。



	一次エネルギー供給量 (PJ)					シェア	
	2010	2020	2030	2040	2050	2030	2050
石炭	4,981	4,076	2,814	1,443	0	16%	0%
石油	8,819	7,474	5,009	2,657	0	29%	0%
ガス	4,243	3,682	2,380	1,278	0	14%	0%
水力	747	810	873	949	1,215	5%	11%
原子力	2,322	801	207	0	0	1%	0%
地熱	28	33	66	331	552	0%	5%
バイオマス	153	938	1,500	1,778	2,200	9%	19%
太陽光	20	794	2,890	3,900	4,316	17%	38%
風力	29	397	1,260	1,946	2,167	7%	19%
波力	0	0	2	118	237	0%	2%
太陽熱	0	20	120	444	600	1%	5%
合計	22,157	19,025	17,122	14,844	11,287		
自然エネルギー計	976	2,992	6,711	9,466	11,287	39%	100%

費用

100%自然エネルギーシナリオで、2010年～2050年の40年間にかかる設備費用の総額は、省エネルギーに191兆円、自然エネルギーに174兆円となり、合計で365兆円の投資が必要です。ただし、省エネルギーの推進および自然エネルギーの普及によって、化石燃料消費が抑えられる効果によって、設備の運転費が大幅に下がり、同時に便益も生じます。この節約額は、省エネルギーで281兆円、自然エネルギーで168兆円となり、合計で449兆円となります。このため、正味の40年間の費用は、合計で-84兆円、つまり84兆円のお得となります。

ブリッジシナリオも同様です。2010年～2050年の40年間にかかる設備費用の総額は、省エネルギーに156兆円、自然エネルギーに143兆円となり、合計で299兆円の投資が必要です。省エネルギーの推進および自然エネルギーの普及による節約額は、省エネルギーで242兆円、自然エネルギーで146兆円となり、合計で388兆円となります。このため、正味の40年間の費用は、合計で-90兆円、つまり90兆円のお得となります。

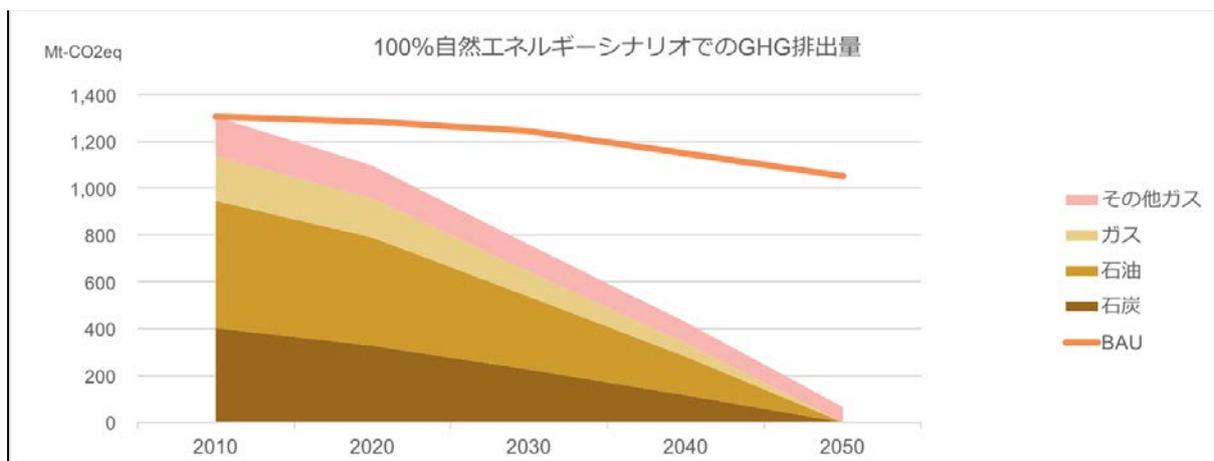
ここでの計算は40年間という期間を通じての投資とその利益を計算していますが、実際の設備投資では、ここまで長期を見通して投資が行われることは稀です。このため、このような長期的な便益を生む方向で投資が行われるようにするためには、政策の導入によって、インセンティブを与えることが重要です。

	100%自然エネルギー			ブリッジシナリオ		
	設備費用	運転費用	正味費用	設備費用	運転費用	正味費用
省エネルギー	191兆円	-281兆円	-90兆円	156兆円	-242兆円	-86兆円
自然エネルギー	174兆円	-168兆円	+5.9兆円	143兆円	-146兆円	-3.5兆円
合計	365兆円	-449兆円	-84兆円	299兆円	-388兆円	-90兆円

GHG 削減量

100%自然エネルギーシナリオでは、当然ながらエネルギー起源 CO₂ の排出量はゼロになります。これに、その他のガスの残余分が加わり、最終的には、2050年に約95%の排出量削減となります。途中経過での2020年/2030年においては、**100%自然エネルギーシナリオ**では、それぞれ、2010年比で約16%削減/約42%削減（1990年比約14%削減/約40%削減；2013年比約22%削減/約46%削減）となります。

ブリッジシナリオでは、2020年/2030年においては、それぞれ、2010年比で約7%削減/約26%削減（1990年比で約4%削減/約24%削減；2013年比約14%削減/約32%削減）となります。



「脱炭素社会」の構築に向けた長期戦略の策定

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ます。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ます。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ます。

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ありません。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りますが、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賄うことには未知数の面があります。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が十分可能であることが明示されました。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ことが必要です。

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ます。

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、住宅のほぼ全て、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 年までにほぼ全ての自動車が 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。

問い合わせ先：

WWF ジャパン 気候変動・エネルギーグループ

〒105-0014 東京都港区芝 3-1-14 日本生命赤羽橋ビル 6F

Tel: 03-3769-3509 / Fax: 03-3769-1717 / Email: climatechange@wwf.or.jp

報告書本体は WWF ジャパンのウェブサイトからダウンロードできます→ http://www.wwf.or.jp/re100_2017/