

# 再生可能エネルギーによる 原子力発電代替プラン ver.2.2

2011年5月

千葉大学法経学部 倉阪研究室

# 試算の目的

- 再生可能エネルギーによる発電で、原子力発電を代替しようとしたら、どのような設備をどの程度設置しなければならないかを具体的に把握すること。
- その導入量が、技術的なポテンシャルや導入コストからみて、実現可能な範囲に収まるものかどうかを把握すること。
- 地球温暖化対策と、原発からの脱却が両立するかどうかを把握すること。

# 試算結果の概要

- 本試算の分量だけの設備が入れば、**2009年の原発電力分を再生可能エネルギーで賄える。**
  - 再生可能エネルギー設備の内訳にはいろいろな解があり、この試算が正解ということではない。
- 今回の試算で開発目標とする再生可能エネルギー量は、すべて**環境省ポテンシャル調査の範囲内に収まる。**
  - 環境省ポテンシャル調査のうち、風力発電の19億kWについては、現状の設置台数からみて過大評価と感じたので、今回は、その2%にあたる3850万kWの設備を導入する案としている。
- 必要な**事業費は、年間道路事業費の範囲内。**
  - 平均年間事業費23,612億円、最大年間事業費30,188億円(2033)。これは、2011年度の年間道路事業費30,982億円の範囲内。
  - これを固定価格買い取り制度で引き出される民間投資と公共投資の双方で賄う。
- **2040年までに原子力発電所を全廃し、かつ、化石燃料による電力供給量を、2040年に現在に比較して約58%減にできる。**

# 試算の手順

- 第一段階（再生可能エネルギーでの代替可能性の検討）
  - 2040年までに、2009年段階で原子力発電が供給していた電力相当分を、再生可能エネルギーでまかないうるのかどうかを試算。その際、再生可能エネルギーの設備ごとに、環境省のポテンシャル調査との比較、永続地帯研究で把握した現況の設備容量との比較などを行い、実現可能性を検討。
- 第二段階（化石燃料でまかなう需要分の試算）
  - 耐用年数40年で原子力発電所を順次閉鎖し、新設しない場合の原子力発電所による電力供給量の年次推移を計算。
  - 電力需要の減少要因として、人口減、節電の定着、各種機器の省エネ性能の向上、再生可能エネルギー熱による電力代替のそれぞれを想定し、電力需要の今後の見通しを計算。
  - 大規模水力発電を2009年並みに維持すると仮定して、化石燃料でまかなわなければならない電力需要分を計算。
- 第三段階（2040年までの事業費総額の試算）
  - 2040年までに再生可能エネルギー設備を徐々に導入すると仮定し、習熟効果を加味して、2040年までの年間事業費総額を試算。

# 試算の結果

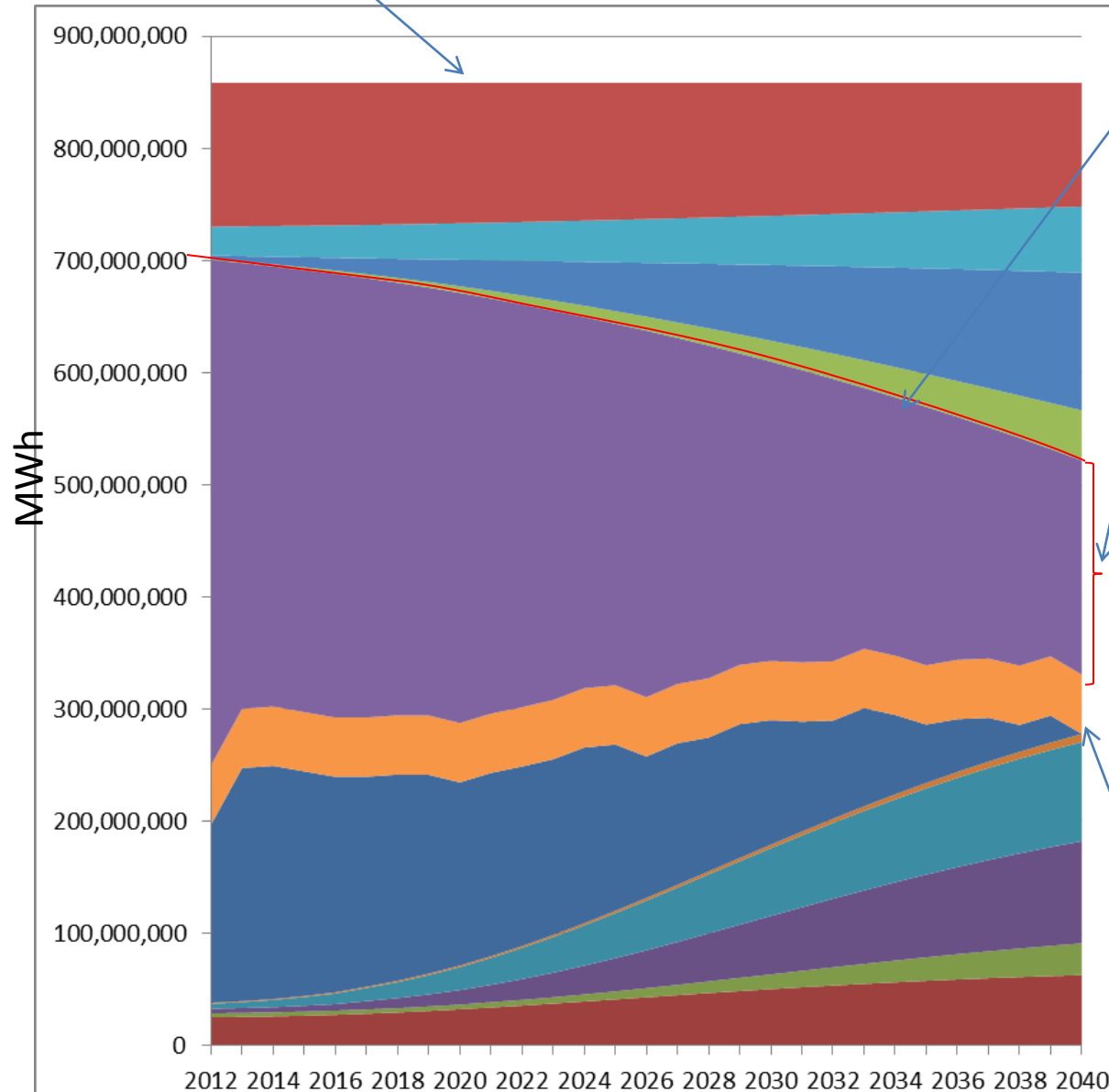
2009年の電力供給量水準

対策を講じた場合の電力供給量水準

化石燃料によって補う電力需要分は、2040年に現状に比べて57.6%減。

- 一人あたりの省エネによる電力需要減
- 各種機器の省エネ効率向上による電力需要減
- 人口減による電力需要減
- 自然エネルギー熱代替による電力需要減
- 化石燃料によって補う電力需要
- 大規模水力発電
- 原子力発電
- バイオマス発電
- 太陽光発電
- 風力発電
- 地熱発電
- 中小水力発電

原子力発電は、2040年に終了。



# 再生可能エネルギー発電設備の 必要導入量

	出力(kW)	稼働率	箇所	総出力(万kW)	発電量(MWh)	構成比
原子力発電所(2009)	48847000	65.7	54	4884.7	277,470,149	99.87%
福島第一原発					32,948,357	11.86%
水力発電				1,044	63,089,520	22.71%
水力発電所(3kW級)	3	80	80,000	24	1,681,920	0.61%
水力発電所(30kW級)	30	80	40,000	120	8,409,600	3.03%
水力発電所(100kW級)	100	75	10,000	100	6,570,000	2.36%
水力発電所(1000kW級)	1000	70	2,000	200	12,264,000	4.41%
水力発電所(10000kW級)	10000	65	600	600	34,164,000	12.30%
地熱発電				430	28,294,800	10.18%
地熱発電所(中規模)	3000	70	500	150	9,198,000	3.31%
地熱発電所(大規模)	50000	80	50	250	17,520,000	6.31%
地熱発電所(温泉発電)	50	60	6,000	30	1,576,800	0.57%
風力発電				3,850	90,666,000	32.63%
風力発電所(1000kW級)	1000	20	6,000	600	10,512,000	3.78%
風力発電所(2000kW級・陸上)	2000	24	5,000	1,000	21,024,000	7.57%
風力発電所(2500kW級・洋上)	2500	30	9,000	2,250	59,130,000	21.28%
太陽光発電				7,429	88,417,330	31.82%
太陽光発電所(一般住宅)	3.47	13.6	7,000,000	2,429	28,909,099	10.41%
太陽光発電所(共同住宅・オフィス・工場)	10	13.6	2,000,000	2,000	23,803,293	8.57%
太陽光発電所(メガソーラー)	3000	13.6	10,000	3,000	35,704,939	12.85%
バイオマス発電				120	7,358,400	2.65%
バイオマス発電(中小規模)	3000	70	200	60	3,679,200	1.32%
バイオマス発電(大規模)	12000	70	50	60	3,679,200	1.32%
水力+地熱+風力					182,050,320	65.53%
水力+地熱+風力+太陽光+バイオマス					277,826,050	100.00%

# 水力発電(小水力)

- 環境省ポテンシャル調査 1400万kW
  - この調査は、河川から取水して水路で落差を得ることができる地点を集計したもので、農業用水など水の流れの中で発電する水力発電を想定していない。
- 本試算での到達目標 1044万kW
  - 30年間で、現状(約955万kW)の約2.1倍。
  - うち、3kW級 8万箇所、30kW級 4万箇所
    - 日本における昭和17年の農事用水車数 78482箇所
    - たとえば、土地改良区管轄の農業用水延長260000kmの3.3kmごとに3kW級1基、6.5kmごとに30kW級1基に相当。
  - うち、100kW以上の設備容量 900万kW
    - 経済産業省未開発水力(100kW以上)2004年3月調べ1212万kW

# 3kW級、30kW 級の小水力

- 3kW級
  - 3kwは、たとえば毎秒約200リットルの水が2m落下する箇所で得られる出力。
  - 自宅前用水路に設置した有効落差45cm、水量 $0.2\text{m}^3/\text{s}$ の川上水力(大町市)は出力0.3kW
  - <http://www.pref.nagano.jp/nousei/nochi/suiryoku/jirei15.htm>
- 30kW級
  - たとえば、有効落差2m、水量 $2.4\text{m}^3/\text{s}$ の百村第一発電所(那須野が原土地改良区)が30kW。
  - <http://j-water.jp/database/detail.php?no=11>



川上水力発電所



百村第一発電所



# 100kW ~ 10000kW の 小水力

- 100kW級
  - たとえば、有効落差21m、水量 $0.695\text{m}^3/\text{s}$ の星野温泉第二発電所が出力100kW
  - <http://www.pref.nagano.jp/nousei/nochi/suiryoku/jirei4.htm>
- 1000kW級
  - たとえば、有効落差6.97m、水量 $18.09\text{m}^3/\text{s}$ の福沢第二発電所が出力1030kW
  - <http://www.suiryoku.com/gallery/kanagawa/fukuzaw2/fukuzaw2.html>
- 10000kW級
  - たとえば、有効落差107.7m、水量 $9.2\text{m}^3/\text{s}$ の氷川発電所(奥多摩)が、出力8200kW
  - <http://www.suiryoku.com/gallery/tokyo/hikawa/hikawa.html>



星野温泉第二



福沢第二



氷川

# 地熱発電

- 環境省ポテンシャル調査 1400万kW
- 本試算での到達目標 430万kW
  - 30年間で現状(53万kW)の約9.1倍。
  - 3000kW級(中規模)地熱発電 500箇所
  - 50000kW級(大規模)地熱発電 50箇所
    - 上記設備容量 400万kW
    - 経済産業省「地熱発電に関する研究会」中間報告による地熱発電出力累計
      - 発電コスト20円/kWhのとき348.6万kW、同30円/kWhのとき819.6万kW
    - 上記地熱発電は、運転開始までのリードタイム8～10年を想定。
  - 温泉発電(50kW) 6000箇所
    - 温泉源泉数(2009年3月) 23,886箇所の約1/6に設置

# 地熱発電の例

- 3000kW級の地熱発電
  - たとえば、八丈島地熱発電所が出力3300kW
  - [http://www.tepco.co.jp/hachijojima-gp/hachijo/g\\_ps-j.html](http://www.tepco.co.jp/hachijojima-gp/hachijo/g_ps-j.html)
- 50000kW級の地熱発電
  - たとえば、澄川地熱発電所が出力50000kW
  - [http://www.tohoku.meti.go.jp/s\\_shigen\\_ene/geo/sumikawa.html](http://www.tohoku.meti.go.jp/s_shigen_ene/geo/sumikawa.html)
- 温泉発電50kW級
  - たとえば、大島御神火温泉を活用した50kWのプロジェクトが提案されている（東京都環境局、平成23年度導入予定）。
  - [http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/climate/other/municipal\\_support/case\\_study/project\\_oshima.html](http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/climate/other/municipal_support/case_study/project_oshima.html)



八丈島地熱発電所



澄川地熱発電所



大島御神火温泉のプロジェクト

# 風力発電

- 環境省ポテンシャル調査 190000万kW
- 本試算での到達目標 3850万kW
  - 30年間で現状(219万kW)の約18.6倍。
  - 年平均の必要伸び率は、約10.4%
    - 2007年度伸び率13.6%、2008年度伸び率12.6%
  - 1000kW級風力発電(陸上) 6000箇所(現状約600基の10倍)
  - 2000kW級風力発電(陸上) 5000箇所(現状約600基の8.3倍)
  - 2500kW級風力発電(洋上) 9000箇所(2016年から実用開始と想定)
    - すでにノルウェーで2300kWの浮体式洋上風力が稼働。日本でも2016年からの実用開始に向け、環境省が2000kW級の実験を長崎で実施することを2010年12月に公表している。

# 風力発電の例

- 1000kW級
  - たとえば佐多岬風力発電所(タワー高68m)が1基あたり1000kW(既建設9基)
  - [http://www.daiwahouse.co.jp/topix/release\\_178.html](http://www.daiwahouse.co.jp/topix/release_178.html)
- 2000kW級
  - たとえば浜松風力発電所(タワー高78m)が1基あたり2000kW(既建設10基)
  - <http://www.reetech.co.jp/33/51.html>
- 洋上風力
  - 長崎五島列島で環境省が実証実験(2000kW級)
  - 2500kW級の浮体式洋上風力も開発されつつある。
  - 写真は京都大学HP( [http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/news\\_data/h/h1/news6/2009/090908\\_2.htm](http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/news_data/h/h1/news6/2009/090908_2.htm) )から



佐多岬風力発電所



浜松風力発電所



浮体式洋上風力(2MW級)

# 太陽光発電

- 環境省ポテンシャル調査 15000万kW
- 本試算での到達目標 7429万kW
  - 30年間で現状(263万kW)の約29.2倍。
  - 年平均の必要伸び率は、約12.2%
    - 2007年度伸び率14.0%、2008年度伸び率13.6%(これらは固定価格買い取り制度導入前の値)
  - 3.47kW(一般住宅用)を700万軒に設置
    - 居住専用住宅年間新築数(48万4千軒)の14.4倍。全世帯数の14.3%。
  - 10kW(共同住宅・オフィス用)を200万軒に設置
    - 事業所年間新築数(7万9千軒)の25.4倍。
  - 3000kW(メガソーラー)を10000箇所に設置
    - 関西電力が堺市で、6290kWのメガソーラーを2011年3月から運転開始。
- 太陽光発電の設備容量が7,900万kWを超えると、コストが火力発電なみの7円/kWhまで低下する見込み
  - 習熟効果が働くため(環境省「低炭素社会構築に向けた再生可能エネルギー普及方策検討会」2009年2月)



# 太陽光発電の例

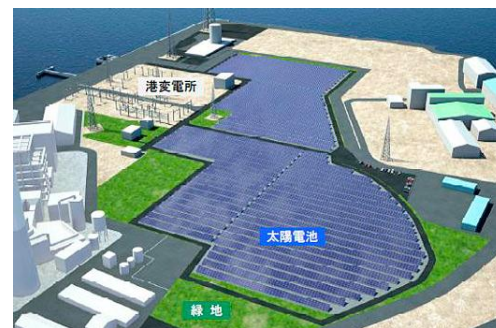
- 3.47kWの太陽光発電
  - たとえば、右上の図(設置面積28.4m<sup>2</sup>)  
(<http://www.sharp.co.jp/sunvista/inquire/product/example/>)
- 10kWの太陽光発電
  - たとえば、福岡市本庁舎屋上に設置されたもの(設置面積約75m<sup>2</sup>)
  - <http://www.city.fukuoka.lg.jp/kankyoushinene/contents/energy01.html>
- 3000kWの太陽光発電
  - たとえば、九州電力「メガソーラー大牟田発電所」が出力3000kW(設置面積約8万m<sup>2</sup>: ヤフードームとほぼ同じ)
  - <http://eco.nikkeibp.co.jp/high-ecology/news/29/index.shtml>



南



福岡市本庁舎屋上



メガソーラー大牟田発電所

# バイオマス発電

- 環境省ポテンシャル調査 記述なし
- 本試算での到達目標 120万kW
  - 30年間で現状(3万kW)の約40倍。
  - 3000kW級の設備を現状の14箇所から200箇所に
  - 12000kW級の設備を現状の6箇所から50箇所に
- バイオマス活用設備については、熱供給と合わせて、さらに小型の設備を、特に寒冷地のコミュニティに配置していくことも考慮すべき。



# バイオマス発電所の例

- 3000kWのバイオマス発電所
  - たとえば、能代バイオ発電所(秋田県:能代森林資源利用協同組合)が出力3000kW
  - 施設概要は、  
<http://www2.jarus.or.jp/biomassdb/static/6/05/605060100.html#top>
  - 写真は  
<http://delarie.exblog.jp/7890441/>
- 12000kWのバイオマス発電所
  - たとえば、日田ウッドパワー日田発電所(大分)が出力12000kW
  - <http://www.fesco.co.jp/hwp/index.html>



能代バイオ発電所



日田ウッドパワー日田発電所

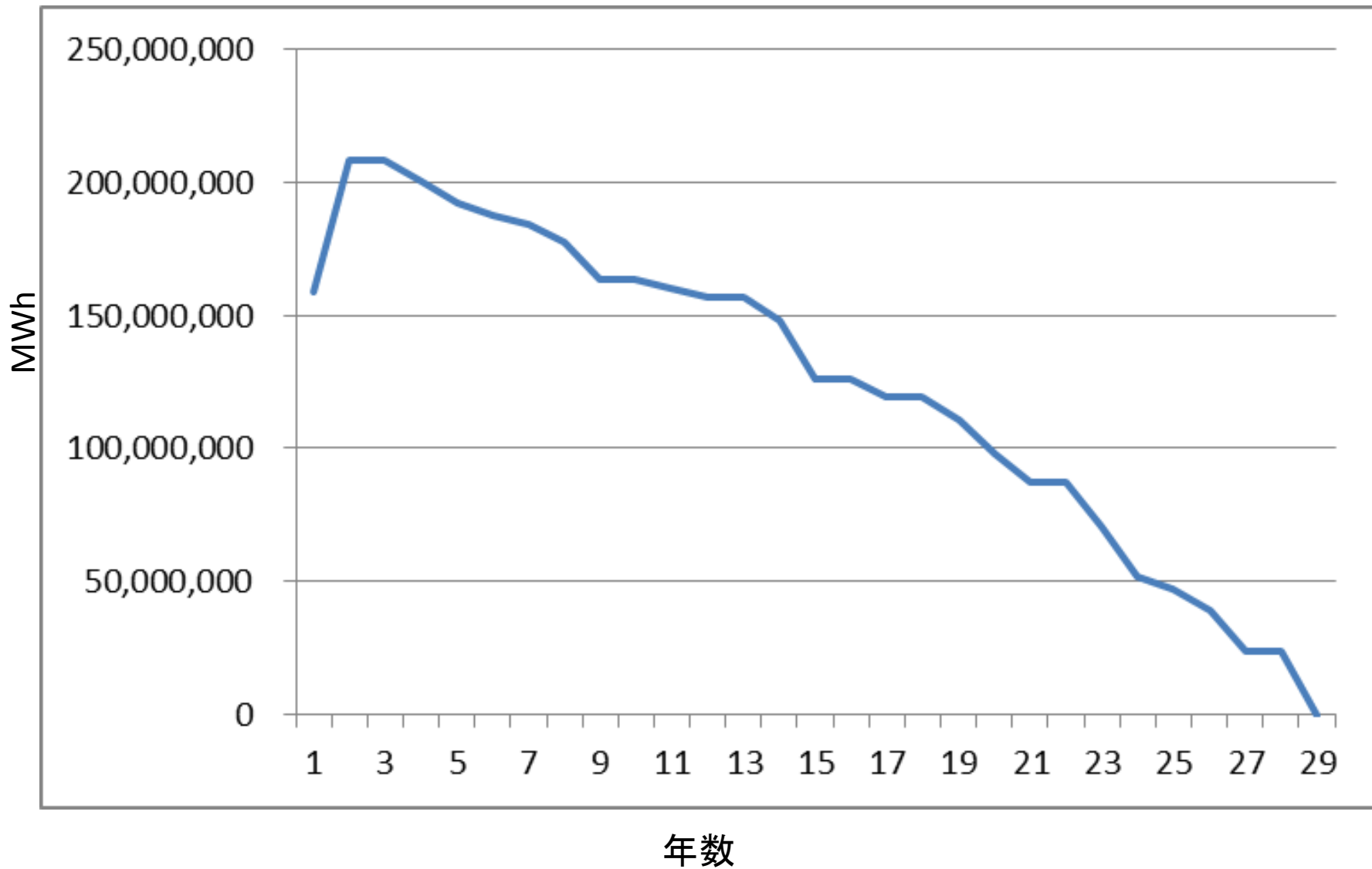
# 安定的再生可能エネルギー比率

- 本試算では、小水力、地熱、風力といった、比較的安定的に、24時間発電することができる再生可能エネルギー比率は、65.5%に上る。
  - 風力は稼働率は低い(20-30%)ものの、多くの風力発電を送電網につなげば、均し効果が生じて、安定的な電源となる。
- ただし、需給調整などのために、揚水発電などを活用することが必要。スマートグリッドも必要。

# 原子力発電の扱い

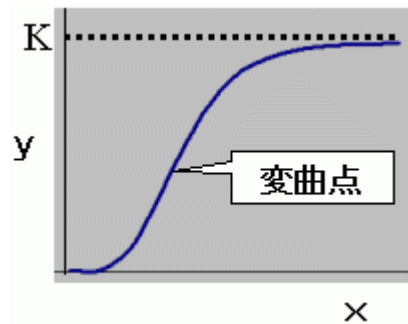
- 耐用年数40年で終了させ、新規開発は行わない。
  - 福島第一原発、福島第二原発は再開しない。
  - 柏崎刈羽、女川、東通は2年目から再開し、耐用年数40年で終了させる。
  - 建設中、計画中の原発は停止させる。
  - 浜岡原発は2011年に停止・終了させる。
  - 2040年に、耐用年数を迎えない原発についても終了させる。

# 原子力発電による発電量推移



# 再生可能エネルギー発電量の 推移の試算

- 現状の設備量から、2040年の目標設備量になだらかに到達するように、シグモイド曲線を適用して、中間年の設備量を仮定した。

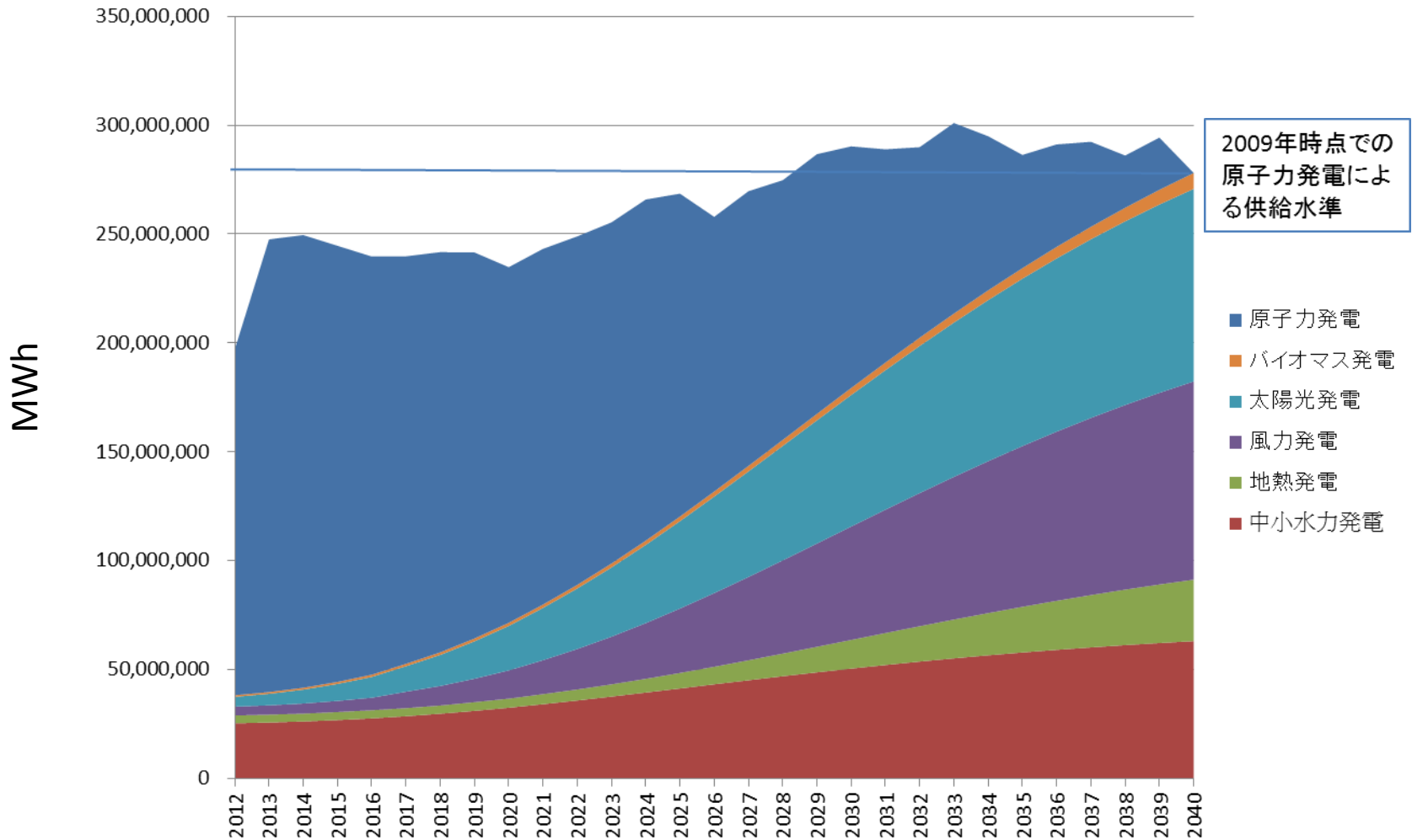


シグモイド曲線のイメージ

[http://home.a02.itscom.net/coffee/takoImages/gom\\_curve.gif](http://home.a02.itscom.net/coffee/takoImages/gom_curve.gif)

- 中間年の発電量を、稼働率や発電効率などを仮定して、試算した。

# 発電量推移



省エネ、熱による電気の代替なども実施しないと、温暖化対策の観点から不適

# 電力需要抑制の可能性

- 人口減少に伴う需要抑制
  - 人口は、2040年に、2009年の85.7%に減少。
- 一人あたりの節電の定着による需要抑制
  - 節電率15%が定着すると仮定。
    - 震災後、前年比でほぼ20%の節電が行われている(東京電力管内)。
- 照明や動力の効率向上による需要抑制
  - 年平均3%ずつ効率が向上すると仮定
- 再生可能エネルギー熱による電力代替
  - ペレットストーブ、ペレットボイラー、太陽熱温水器、ソーラーシステムなどによって電力を代替。

# 再生可能エネルギー熱の導入見込み

- ペレットストーブ(0.827MWh/台・年)
  - 現状12602台を379万7千台に(新築一戸建ての3割に30年間導入)
  - 石油機器(ストーブ、温風暖房機など)年間販売台数4842907台
- ペレットボイラー(53.029MWh/台・年)
  - 現状528台を70.8万台に(新築事業所の3割に30年間導入)
- 太陽熱温水器(0.7MWh–1.3MWh/台・年)
  - 現状年間販売台数3万7千台を379万7千台に(新築一戸建ての3割に30年間導入)
- その他、地中熱利用なども推進する必要がある。
- 2040年までの再生可能エネルギー熱の年成長率は、約7.3%。



# 大規模水力発電の取り扱い

- 本試算では、10MWを超える大規模水力発電は再生可能エネルギーとしてカウントしていない。
  - 再生可能エネルギーの定義に関する国際標準に合わせたため。
- 本試算では、2040年まで、大規模水力発電による発電量は2009年水準を維持するものとして試算した。
  - 日本においては、ダム式の水力発電は徐々に砂で埋まっていく一方、既設の水力発電所を増強することによってさらに発電能力を向上させることができる。これらの効果が相殺するものと仮定した。
- これらにより、化石燃料による電力供給量は、2040年には、現在に比較して、約58%減となる。

# 結果再掲

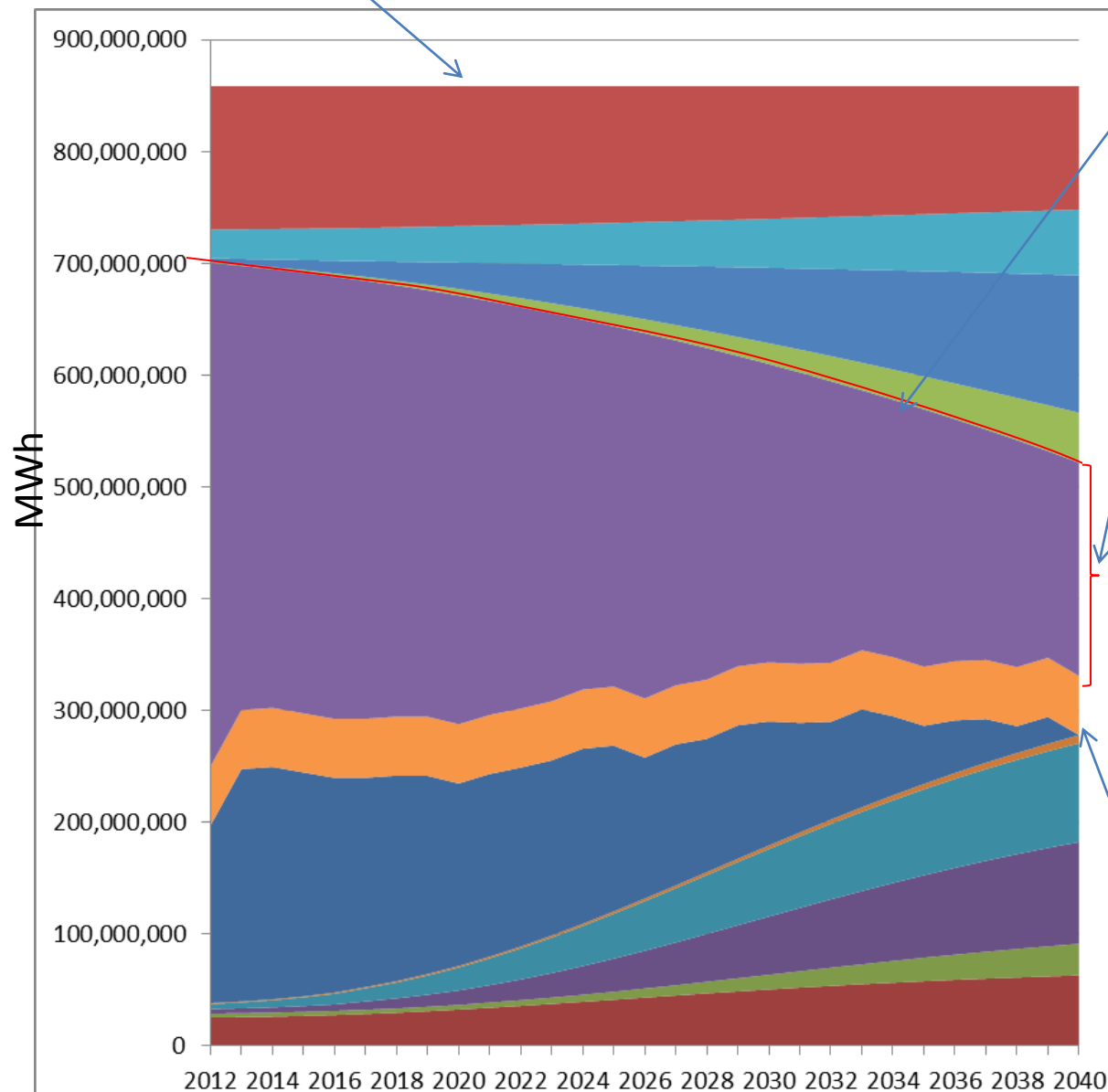
2009年の電力供給量水準

対策を講じた場合の電力供給量水準

化石燃料によって補う電力需要分は、2040年に現状に比べて57.6%減。

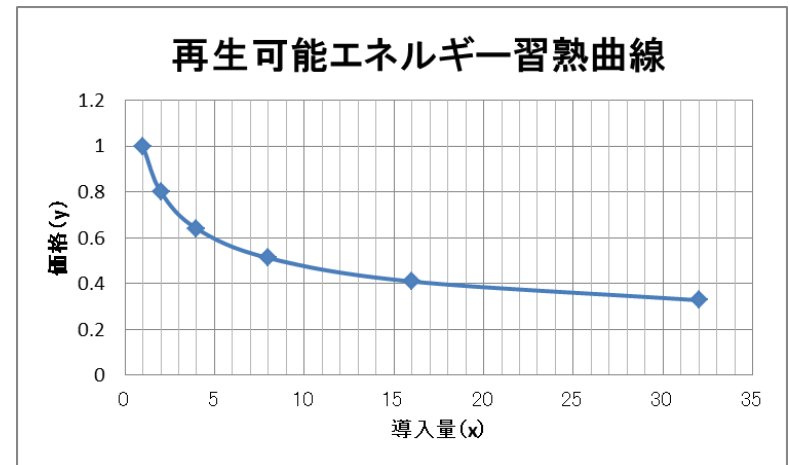
- 一人あたりの省エネによる電力需要減
- 各種機器の省エネ効率向上による電力需要減
- 人口減による電力需要減
- 自然エネルギー熱代替による電力需要減
- 化石燃料によって補う電力需要
- 大規模水力発電
- 原子力発電
- バイオマス発電
- 太陽光発電
- 風力発電
- 地熱発電
- 中小水力発電

原子力発電は、2040年に終了。



# 費用の試算

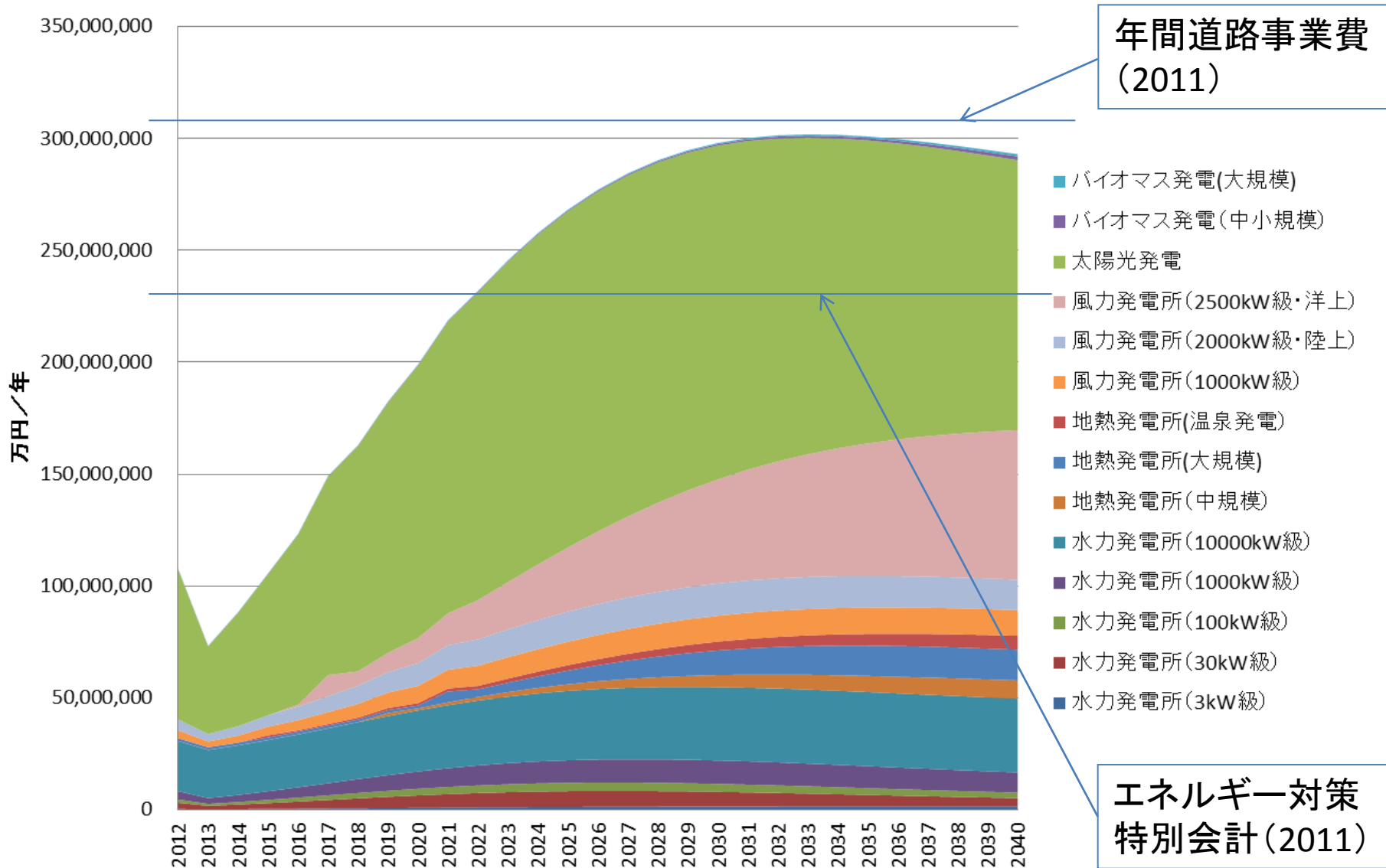
- それぞれの設備ごとの初期投資額と運営コスト額を、具体的な事例などから仮定。
- 初期投資額の一部については、累積投資量が2倍になれば0.8になるという習熟曲線を適用して、徐々にコストが減少していくこととした。
  - 初期投資額中の習熟効果対象比
    - 小水力、地熱、バイオマス 0.5
    - 風力(陸上) 0.6
    - 太陽光、風力(洋上) 0.8



# 初期投資額(設置コスト)と 運営コストの仮定

水力発電	設置コスト(万円)	習熟効果対象	運営コスト(万円/年)
水力発電所(3kW級)	300	0.5	15
水力発電所(30kW級)	6000	0.5	15
水力発電所(100kW級)	10000	0.5	100
水力発電所(1000kW級)	100000	0.5	3000
水力発電所(10000kW級)	700000	0.5	50000
地熱発電			
地熱発電所(中規模)	150000	0.5	12000
地熱発電所(大規模)	4000000	0.5	120000
地熱発電所(温泉発電)	2400	0.5	1000
風力発電			
風力発電所(1000kW級)	30000	0.6	1500
風力発電所(2000kW級・陸上)	50000	0.6	2000
風力発電所(2500kW級・洋上)	150000	0.8	6000
太陽光発電(1kw)	60	0.8	1
バイオマス発電			
バイオマス発電(中小規模)	49200	0.5	5000
バイオマス発電(大規模)	196800	0.5	10000

# 年間事業費の試算結果



# 年間事業費の実現可能性

- 平均年間事業費 23,612億円
- 最大年間事業費 30,188億円(2033)
  - cf. 道路事業費(2011年度) 30,982億円
  - cf. エネルギー対策特別会計(2011年度)23,873億円[電源開発促進勘定3,286億円、エネルギー需給勘定 20,587億円]
  - cf. 公共事業費(2011年度) 54,799億円(一括交付金化による減少分含む)
- 再生可能エネルギー関係年間事業費は、民間投資と公共投資の双方から賄われる。
  - 太陽光発電、風力発電、地熱発電などについては、固定価格買い取り制度を適切に運用することによって、一定程度、民間投資として事業費を引き出すことができる。
  - それでは足りない部分や、小水力発電、バイオマス発電などについては、公共投資として進めていくことも必要。
    - 太陽光、風力、地熱を除く事業費では、平均年間事業費 4,788億円 最大年間事業費 5,592億円(2029)

# 実現の方向性

- 小水力発電と地熱発電、再生エネルギー熱の導入促進が急務
  - 小水力(降水量世界第6位)、地熱(賦存量世界第3位)は、日本の風土に適した、しかも比較的安定的に供給できる再生可能エネルギー。しかし、2007年度、2008年度とも、前年比横ばいないし減少。
  - 再生エネルギー熱も微増にとどまる。
- 太陽光発電、風力発電、バイオマス発電の現状の伸び率の維持、伸張も必要
  - 太陽光発電、風力発電、バイオマス発電については、2007年度、2008年度ともに前年比10%以上の伸び。この伸びを続けられればよい。

表1 再生可能エネルギー供給の推移(全国)

	2007.3(再集計版)			2008.3(再集計版)				2009.3			
	総量(TJ)	電力のみ比率	全体比率	総量(TJ)	電力のみ比率	全体比率	伸び率	総量(TJ)	電力のみ比率	全体比率	伸び率
太陽光発電	15019	7.11%	5.45%	17123	7.89%	6.08%	114.0%	19451	8.75%	6.75%	113.6%
風力発電	29965	14.18%	10.87%	34037	15.68%	12.08%	113.6%	38322	17.24%	13.30%	112.6%
地熱発電	27450	12.99%	9.96%	27074	12.48%	9.61%	98.6%	24382	10.97%	8.46%	90.1%
小水力発電	133200	63.04%	48.34%	131591	60.64%	46.71%	98.8%	132060	59.40%	45.84%	100.4%
バイオマス発電	5652	2.68%	2.05%	7181	3.31%	2.55%	127.1%	8091	3.64%	2.81%	112.7%
再生エネ発電計	211286	100.00%	76.67%	217007	100.00%	77.03%	102.7%	222305	100.00%	77.17%	102.4%
太陽熱利用	36817		13.36%	37149		13.19%	100.9%	37517		13.02%	101.0%
地熱利用	27458		9.96%	27545		9.78%	100.3%	28241		9.80%	102.5%
再生エネ熱利用計	64275		23.33%	64694		22.97%	100.7%	65758		22.83%	101.6%
総計	275560		100.00%	281701		100.00%	102.2%	288063		100.00%	102.3%
日本全国の民生+農水エネルギー需要に占める比率			3.11%			3.18%				3.25%	

(出典) 千葉大学倉阪研究室+NPO法人環境エネルギー政策研究所「永続地帯報告書2010」  
<http://sustainable-zone.org/>

# 実現するための政策概要

- 全量全種固定価格買い取り制度により、民間投資を引き出すべき。
  - 環境省検討会では、投資回収年数10年の水準で民間投資を引き出し、その民間投資と同じ量だけ公共投資を行えば、2030年に7900万kWの太陽光導入が可能とした。その際の負担増は標準世帯で月額平均260円程度の負担。ちなみに現行の余剰分買い取り制度は投資回収年数は約17年。
    - 環境省「低炭素社会構築に向けた再生可能エネルギー普及方策検討会」2009年2月
  - 地熱発電も、発電コスト20円/kWh強をカバーできれば、目標水準に達する見込み。
    - 経済産業省「地熱発電に関する研究会」中間報告2009年8月
- 公共事業として、小水力発電と、公共施設への太陽光発電導入を進めるべき。
  - これらは、新しい公共事業として、道路予算などを振り向けて、導入を促進すべき。これは、地域密着型の雇用を生み出し、建設業の雇用の受け皿にもなる。
- 地域によって適する再生可能エネルギーに違いがあるため、地方自治体の再生可能エネルギー政策を立ち上げるべき。
  - 市町村レベルで、再生可能エネルギーの開発計画を策定することとし、再生可能エネルギーの導入量に応じて、交付金を支出する仕組みにすべき。エネルギー対策特別会計の新規原発開発に支出する予定額をこの交付金の原資にすべき。



# 今後の課題

- 節電、省エネ、熱代替の試算をさらに詳しく実施する。
- 財源面の政策提言をさらに詳細に行う。
- 永続地帯研究によって把握している再生可能エネルギー設備の現在の地域分布に基づき、2040年の再生可能エネルギーの地域分布を明らかにする。
  - 永続地帯サイト <http://sustainable-zone.org/>