

# 温暖化対策の基本的考察

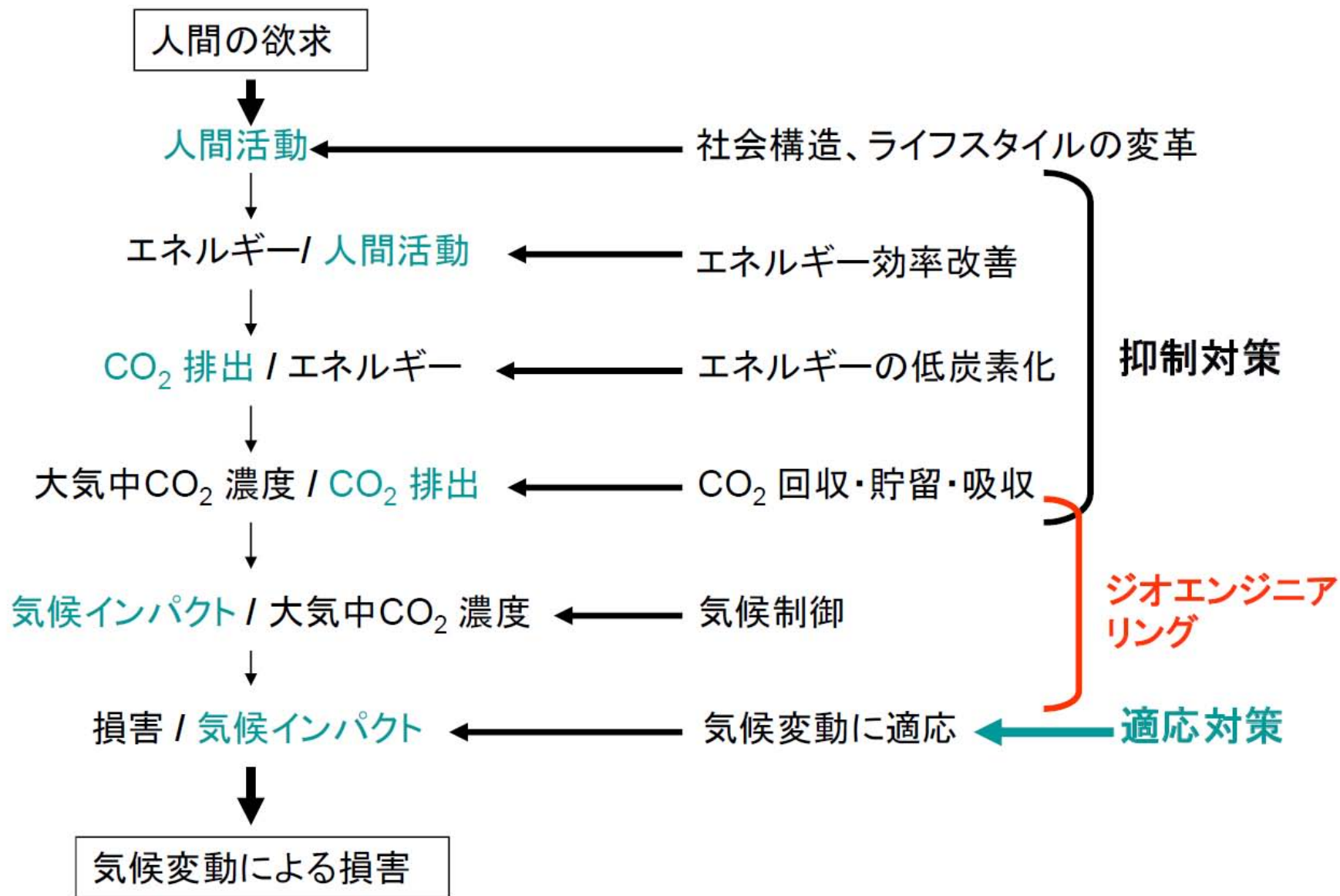
山地憲治

@第2回東大エネルギー・環境シンポジウム

「地球温暖化問題を考える」

2010年11月5日

1. 地球温暖化対策の基本構造
2. 低炭素社会へのエネルギー技術シナリオ
  - ・化石燃料の高度利用
  - ・原子力
  - ・再生可能エネルギー
3. エネルギーと情報のシステム統合
4. 温暖化対策の選択基準



## 地球温暖化対策の基本構造

出所：山地憲治, 2006:「エネルギー・環境・経済システム論」、岩波書店、図3. 11を修正

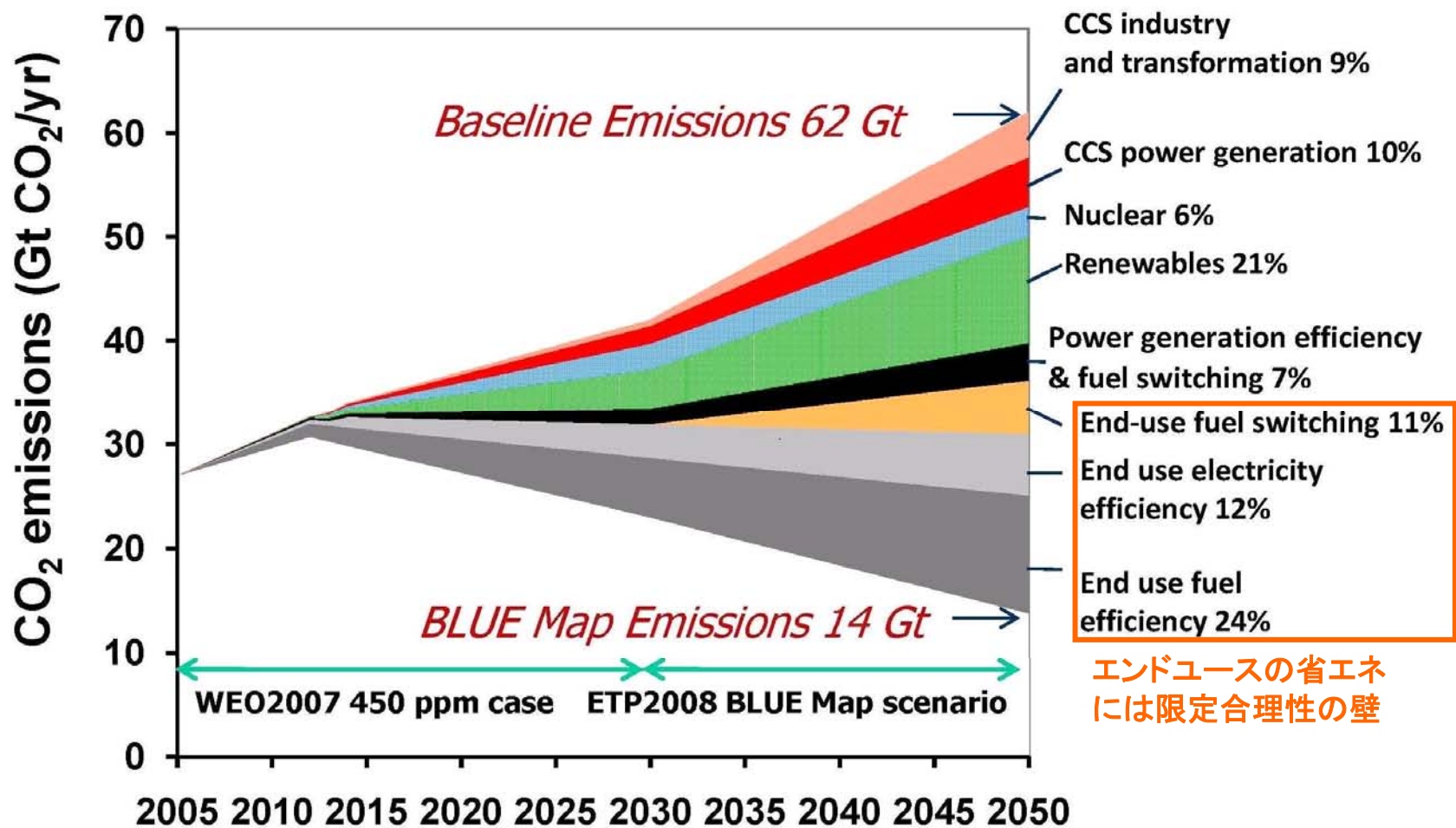
## 適応対策の類型と事例

システム	予見的・計画的適応	事後的・対症療法的適応
自然システム	<ul style="list-style-type: none"> <li>・自然自体に予見的な適応はない</li> <li>・人間社会の側は、保護区・保全区域の拡大、動植物の移動経路の確保、人工繁殖、土地利用・水管理といった適応的な統合的生態系管理手法を実施する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・成長期間の変化</li> <li>・生態系構成要素の変化</li> <li>・湿地の移動</li> <li>・動植物の移動（高緯度・高高度）</li> </ul>
人間システム： 民間、個人	<ul style="list-style-type: none"> <li>・保険の購入</li> <li>・高床式建物の建築</li> <li>・油井掘削装置の設計変更</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・農耕法の変更</li> <li>・保険掛金の変更</li> <li>・空調設備の設置</li> </ul>
人間システム： 公共	<ul style="list-style-type: none"> <li>・早期警戒システム（洪水、熱波）</li> <li>・建築基準や設計基準の変更</li> <li>・再配置の促進策</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・補償金、補助金</li> <li>・建築基準の施行</li> <li>・養浜</li> </ul>

出所：地球温暖化問題に関わる知見と施策に関する分析委員会：「地球温暖化問題解決のために—知見と施策の分析、我々の取るべき行動の選択肢—」、報告、日本学術会議（2009）

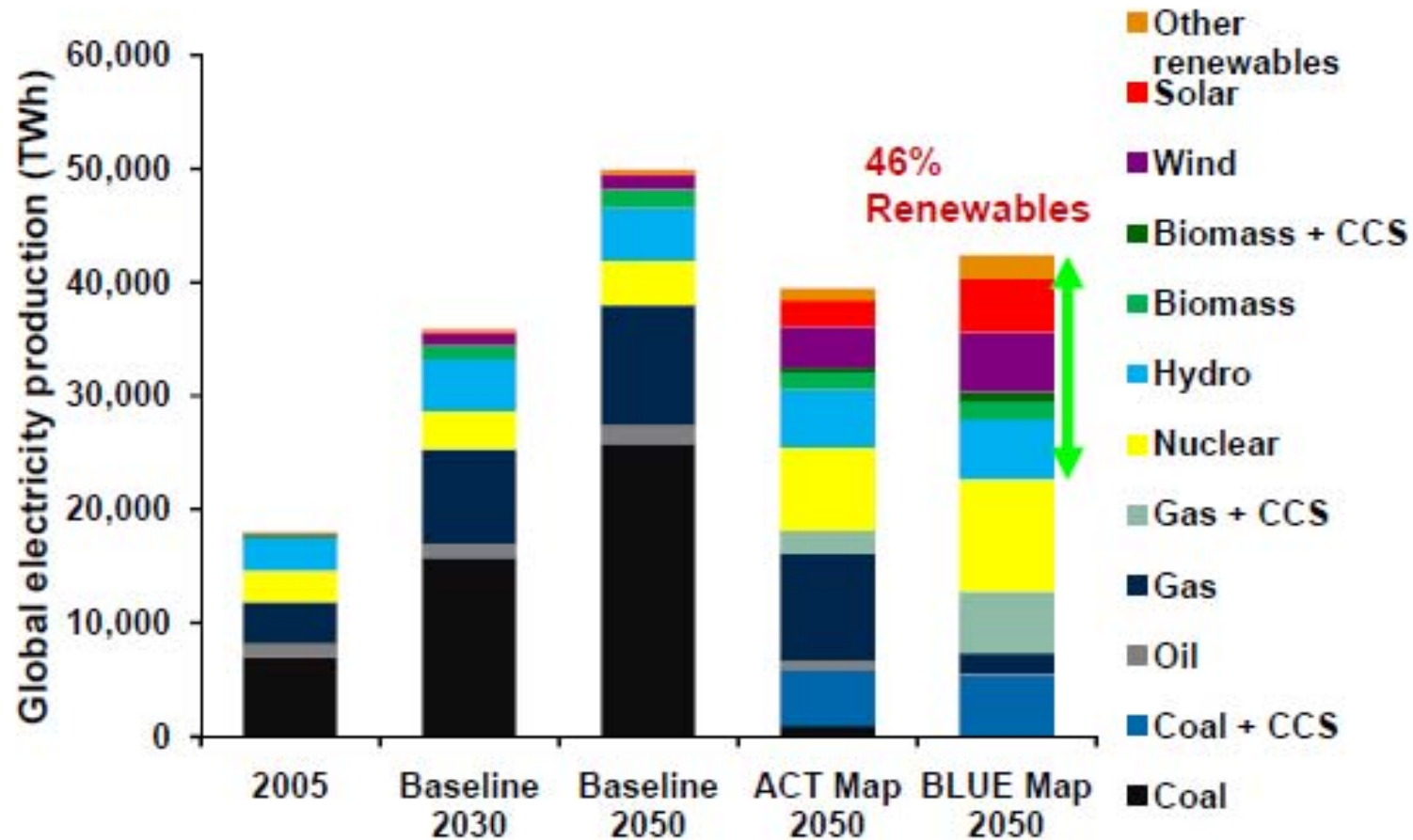
# 2050年温室効果ガス排出半減？

エネルギー起源CO<sub>2</sub>排出半減の技術シナリオ



Energy Technology Perspectives 2008 (IEA)

# Power Generation Mix



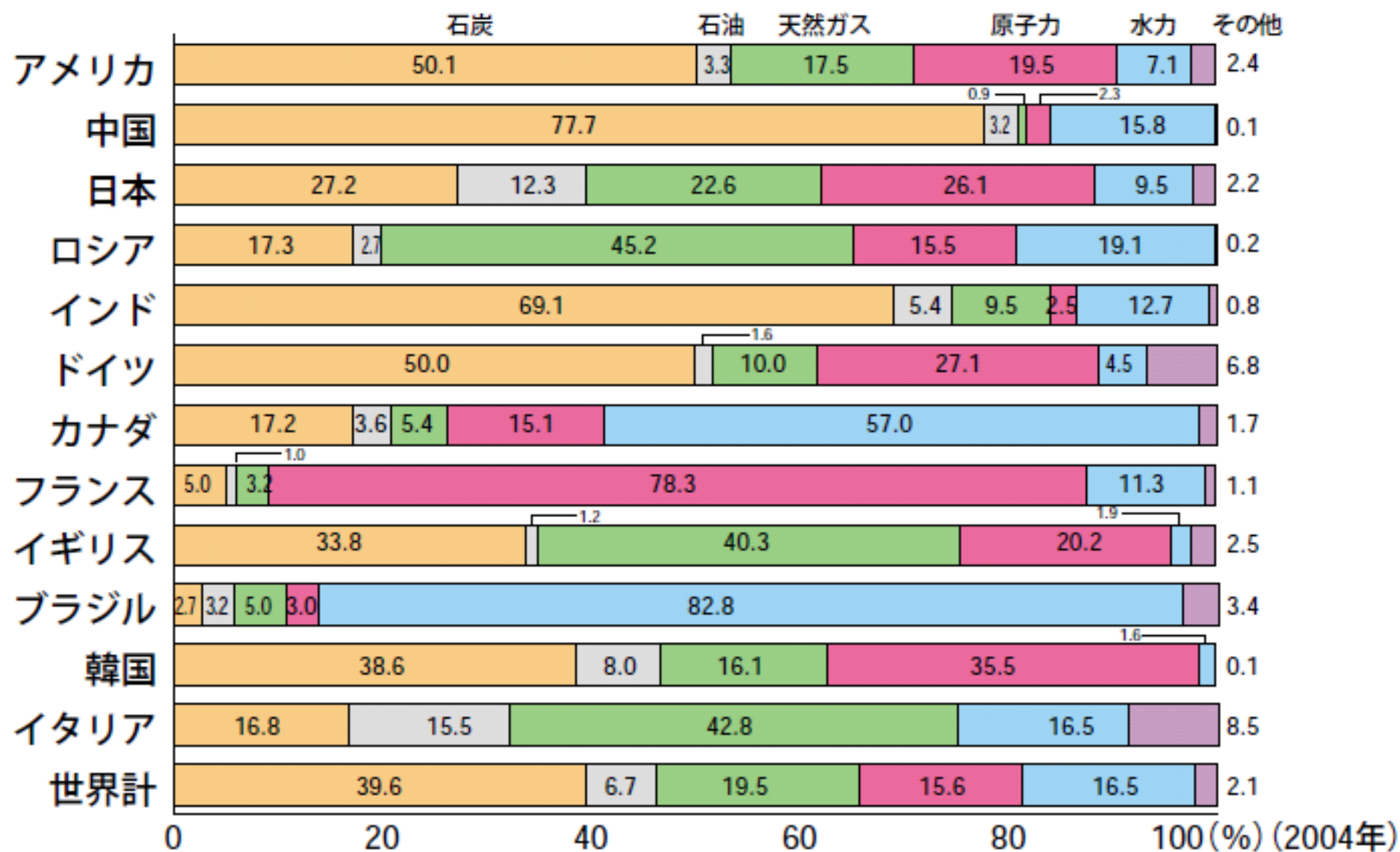
# 電力部門の大きな役割

- 一次エネルギーの40%以上が電力に変換
- 多様なエネルギー資源から生産可能
- 利用時にクリーンで制御性がよく高効率
- ヒートポンプによる高効率低温熱供給（空調、給湯）
- 電気駆動自動車(PHEV, EV)の可能性

ただし、

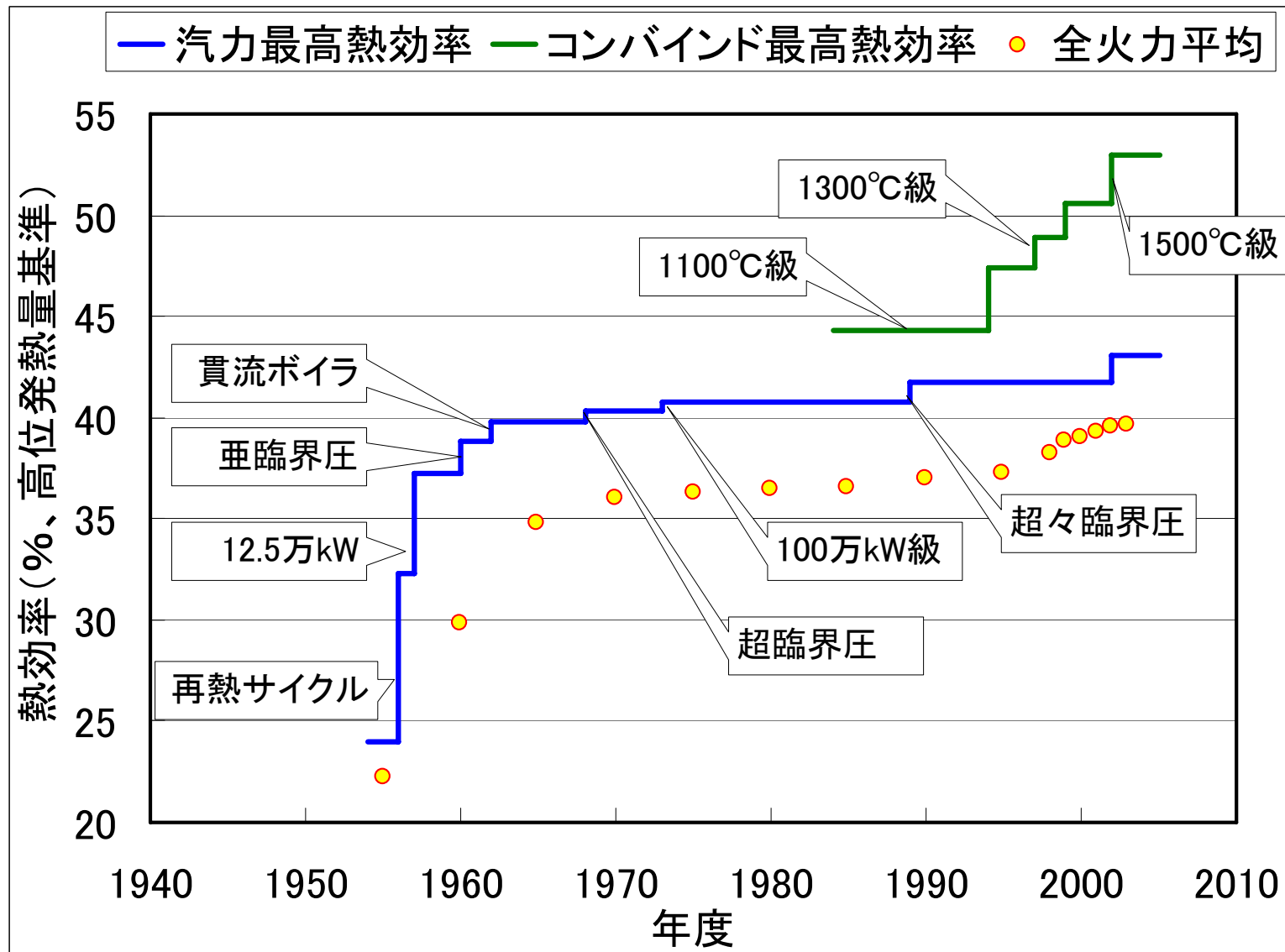
- 大量長距離輸送に不向き：→超電導直流送電、水素？
- 時々刻々の需給バランスが必要：→**smart grid**、パワエレ？
- 貯蔵性が悪く、移動体利用に向かない：→電池？

# 主要国の電源別発電電力量の構成比



(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある。

# 火力発電熱効率の変遷(国内)

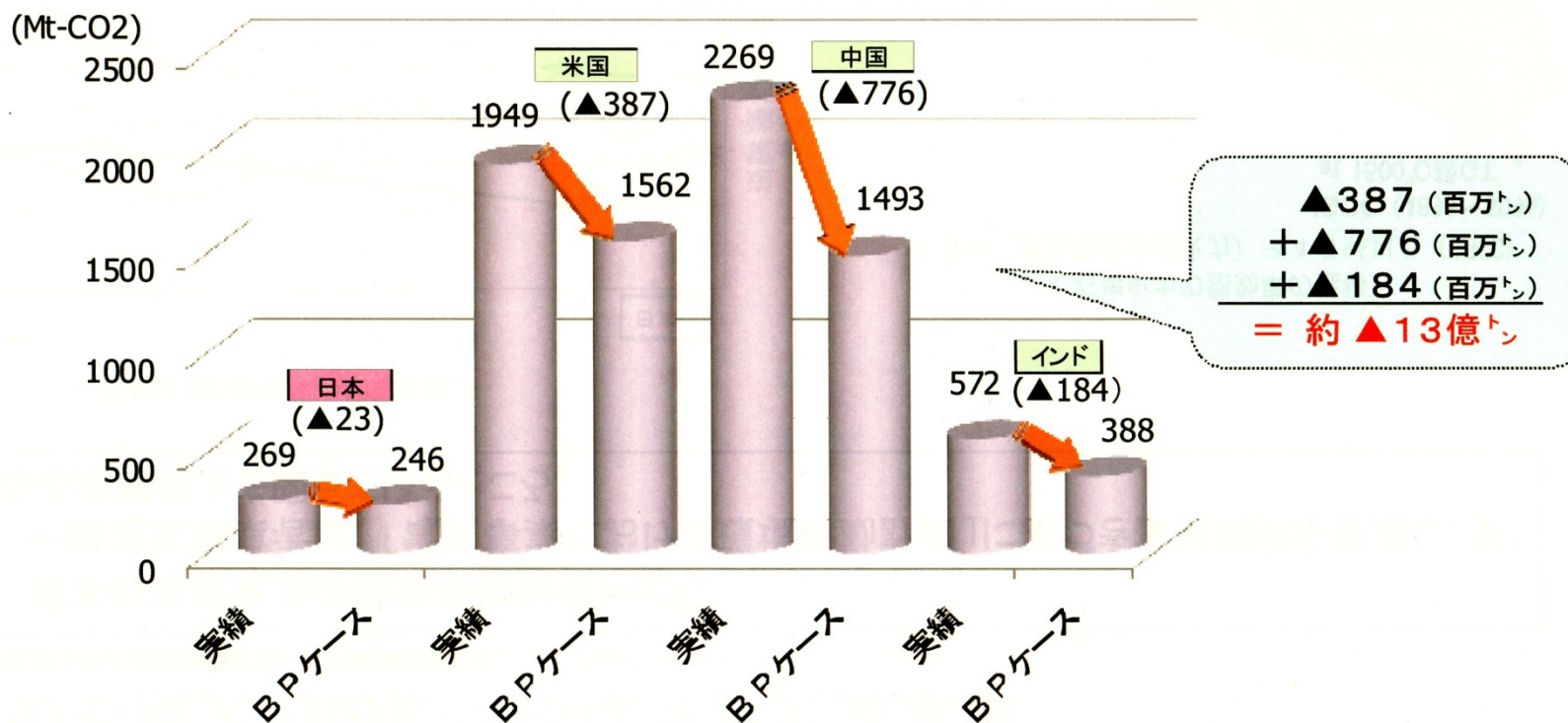




# 石炭火力発電の効率改善のインパクト

- 日本で運転中の最新式の石炭火力発電の効率を米、中、インドの石炭火力発電に適用すると、CO2削減効果は、約13億トン。
- これは、日本一国のCO2排出量に相当。

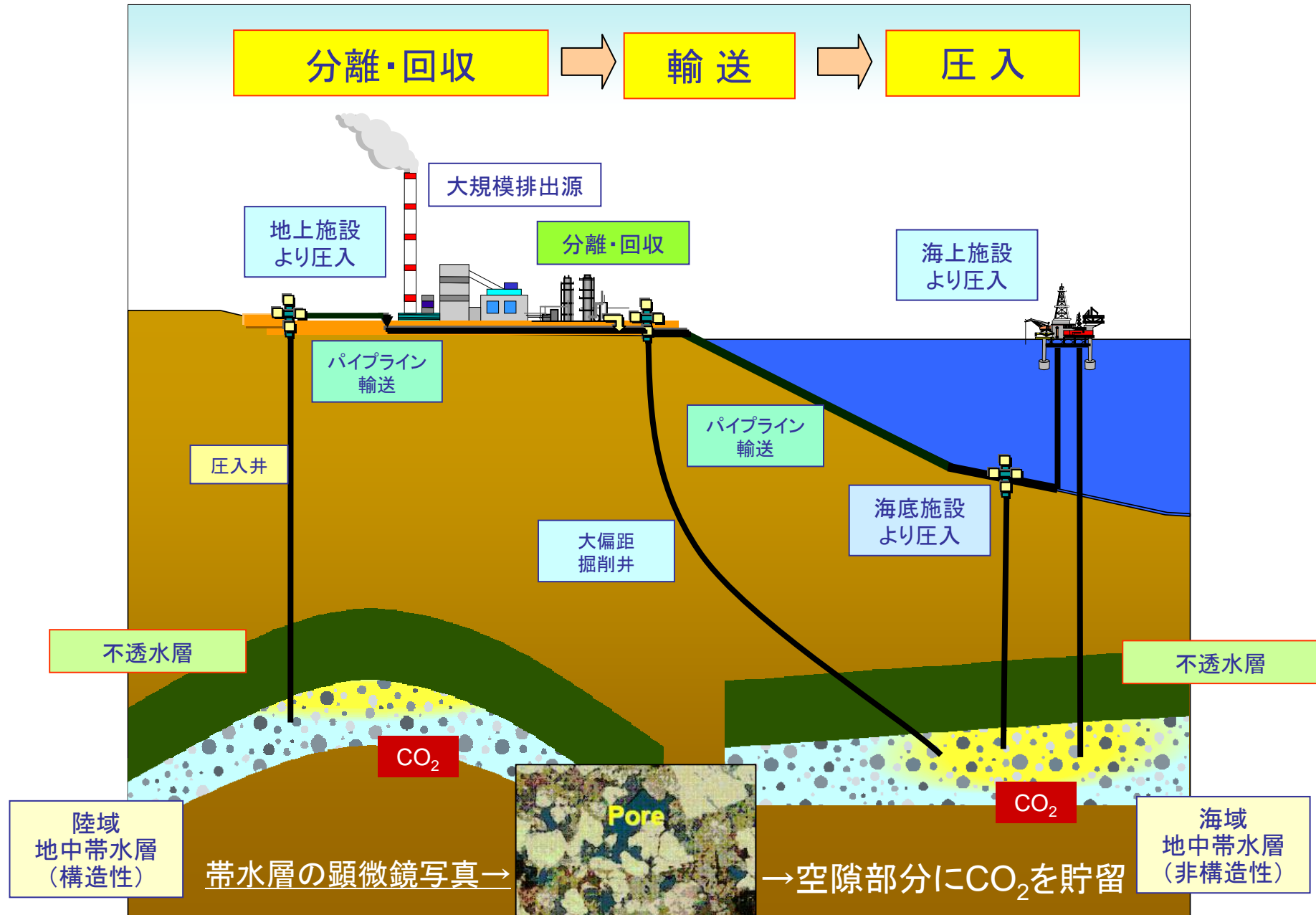
石炭火力発電からのCO2排出量 (2004年)  
 - 実績 vs 日本のベスト・プラクティス(商業中の最高効率)適用ケース -



▲387 (百万トン)  
 + ▲776 (百万トン)  
 + ▲184 (百万トン)  
 = 約 ▲13億トン

「BPケース」：日本のベスト・プラクティス(商業中発電所の最高効率)を適用した場合の試算。  
 「実績」データの出典：IEA "World Energy Outlook 2006"

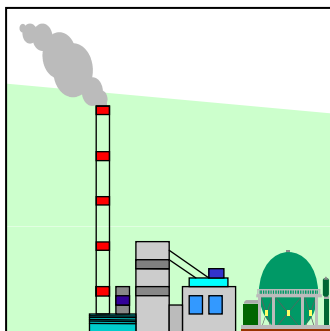
# CO<sub>2</sub>地中貯留のイメージ



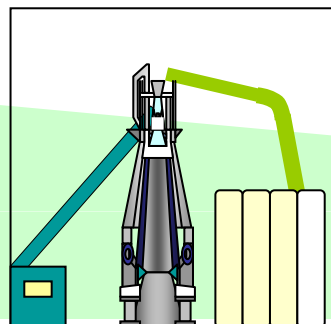
# 各種発生源に適したCO<sub>2</sub>回収技術

発生源の規模・CO<sub>2</sub>ガス圧により最適な回収技術の開発

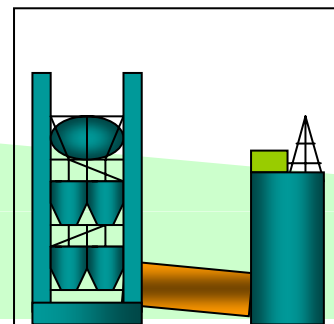
火力発電所



製鉄所(高炉等)



セメント工場



製油所等



国内CO<sub>2</sub>発生量  
(億トン/年)

3.7

1.8

0.5

0.1

CO<sub>2</sub>ガス圧力 低圧、高圧(IGCC)

低圧

低圧

高圧、低圧

適用

大規模  
低圧

大～中規模  
高圧

中規模  
高圧

方法

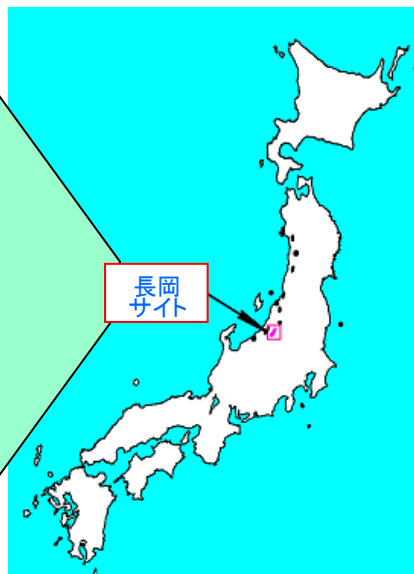
化学吸収法

膜分離法

吸着法

# 長岡プロジェクト(CO<sub>2</sub>地中貯留実証試験)

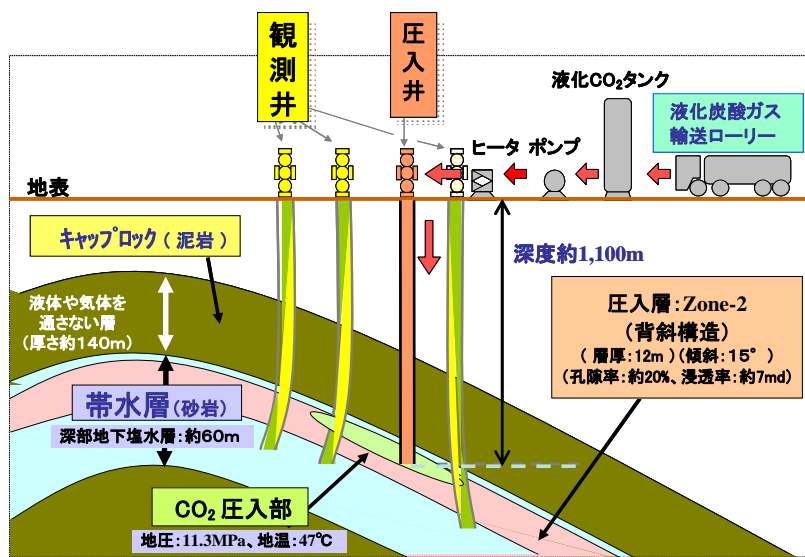
〔試験サイト〕



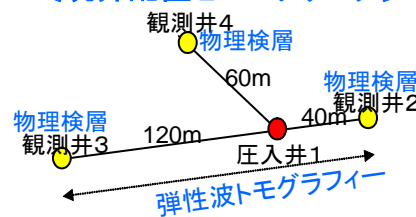
〔プロジェクト概要〕

実施主体	(財)地球環境産業技術研究機構
プロジェクト期間	2000年FY~2007年FY
CO <sub>2</sub> 圧入期間	2003/7~2005/1
CO <sub>2</sub> 圧入量	約10,400t-CO <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub> 圧入レート	20~40t-CO <sub>2</sub> /日
CO <sub>2</sub> 調達	市販品購入
モニタリング	物理検層、弾性波トモグラフィー、 微動観測、地層水サンプリング他
その他	2004/10/23に発生した新潟県中越 地震(震度6)による影響なし

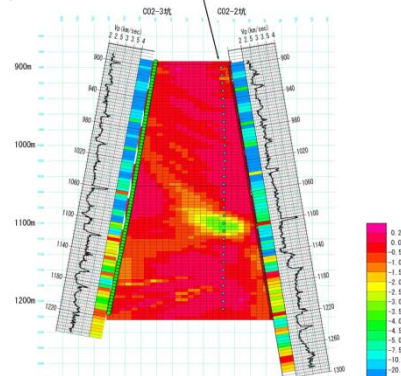
〔圧入実証試験の概略〕



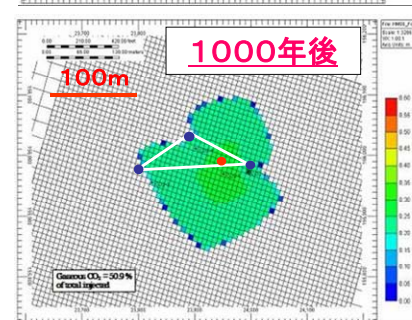
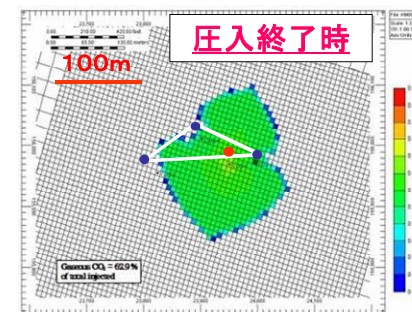
〔坑井配置とモニタリング〕



〔弾性波トモグラフィー:CO<sub>2</sub>分布〕



〔CO<sub>2</sub>挙動の予測シミュレーション〕

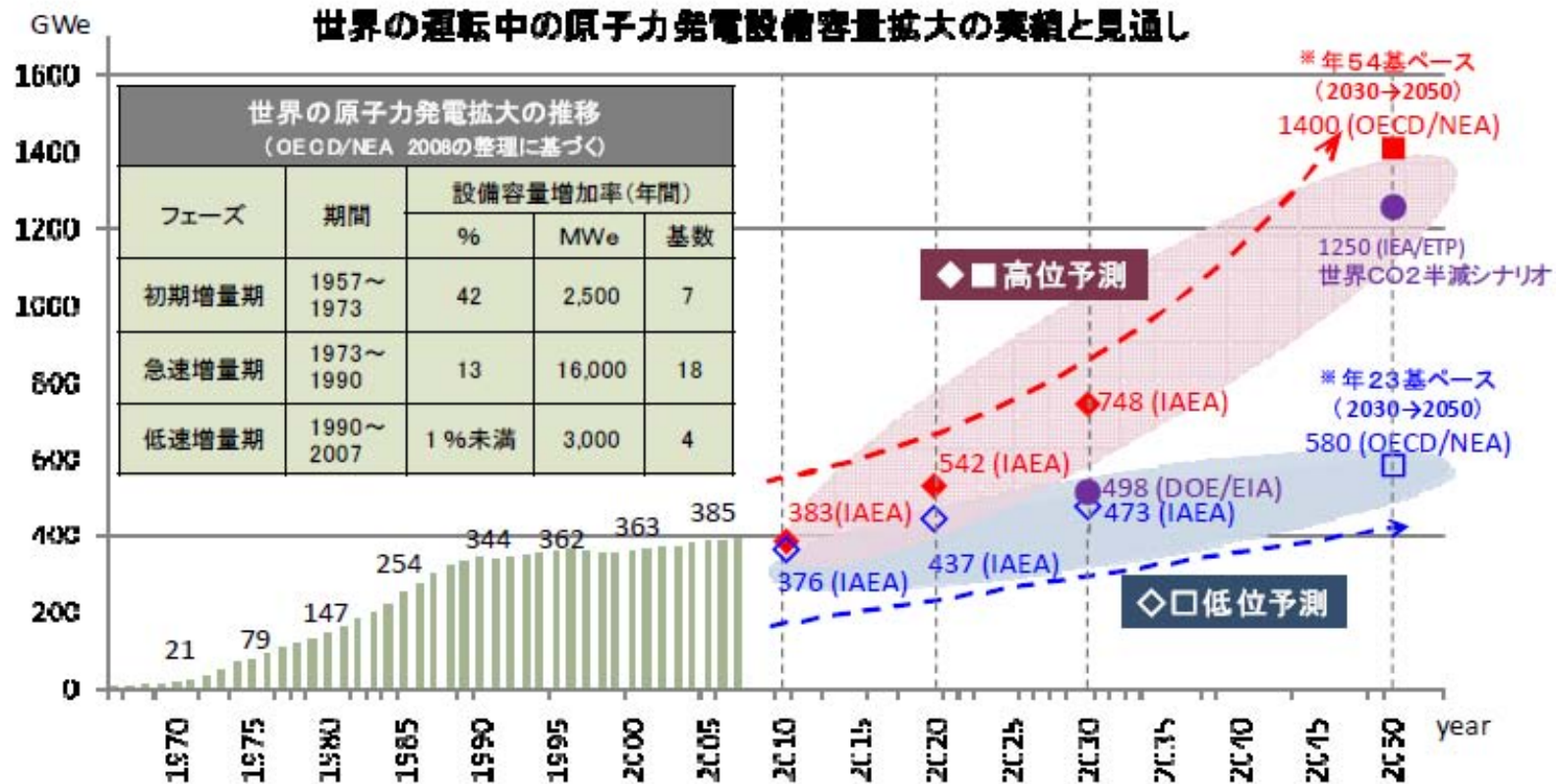


# 化石燃料の高度利用

- 火力発電(特に石炭)の役割は大きい
- 発電効率向上によるCO<sub>2</sub>削減効果は大きい
- CCSを含むクリーンコール技術の役割
- 調整電源としての火力発電は新エネ導入に寄与
- 石炭火力での混燃によるバイオマス利用効率向上
  
- 火力(特に石炭)発電を悪者と考える単純思考からの脱却

## 世界の原子力発電の拡大②

- 将来的な世界の原子力発電の拡大の規模やペースについては、様々な見方。
- 既設炉のリプレースも必要となってくるため、容量拡大ペースが従来並の場合でも、原子力発電所の建設自体はペースアップが必要に。

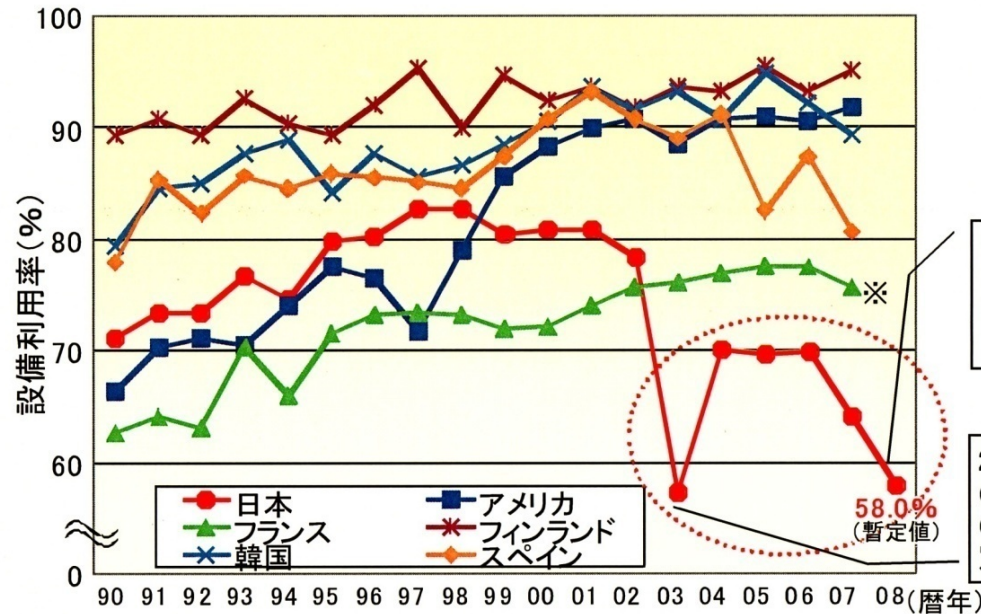


出典: IAEA(2007)、OECD/NEA(2008)、米DOE/EIA(2008)、IEA/ETP(2008)、『世界の原子力発電開発の動向 2007/2008』(社団法人日本原子力産業協会)  
 ※リプレースのための建設分も含む

# 設備利用率の動向

- 日本の原子力発電所の設備利用率は近年低迷(08年58.0%)。
- 京都議定書の目標達成にも悪影響。

世界の設備利用率との比較



2007年7月の中越沖地震による柏崎刈羽原発の運転停止等により、58.0%まで低下。

2002年8月の電気事業者の不正に起因する点検等のため、定検前倒し及び定検期間延長。

出典:IAEAホームページPRIS

※:フランスでは、電力需要に応じて出力を低下させる負荷追従運転が取り入れられているため、設備利用率が相対的に低い。

## (参考)設備利用率向上のCO2排出削減効果

2007年度CO2排出量(実績) : 13億7100万トン(90年比+8.7%)

設備利用率が98年水準(84.2%)と仮定 : 13億800万トン(90年比+3.7%)

**90年比5%分改善(6,300万トン)**

約700gCO<sub>2</sub>/kWh(火力発電)→100万kW(原子力)の設備利用率1%分:6万トン→5000万kW設備利用率20%向上=6000万トン

## 設備利用率の試算

	基数	1運転サイクルの運転 期間平均 (月/基)	平均定検停止日数 (日/基)	運転中停止一回あたり の停止日数(日/基)	設備利用率(%)
米国	103	約19	約38	約4.7	約93
日本	53	約13	約143	約34	約70
運転サイクルを米国並に延 長した場合(a)	53	約19	約143	約34	約77
定検日数を米国並に短縮 した場合(b)	53	約13	約38	約34	約87
a、b及びトラブル等による 停止日数全てを米国並みと した場合	53	約19	約38	約34	約93
さらに運転期間を24ヶ月に 延長した場合	53	約24	約38	約34	約95

$$\text{(注) 設備利用率} = \frac{(\text{1基} \cdot \text{1サイクルの平均運転期間}) - (\text{1基} \cdot \text{1サイクルあたりの平均停止日数}^{\ast 4})}{(\text{1基} \cdot \text{1サイクルの平均運転期間}) + (\text{1基} \cdot \text{1サイクルあたりの平均停止日数})} \times 100 [\%]$$

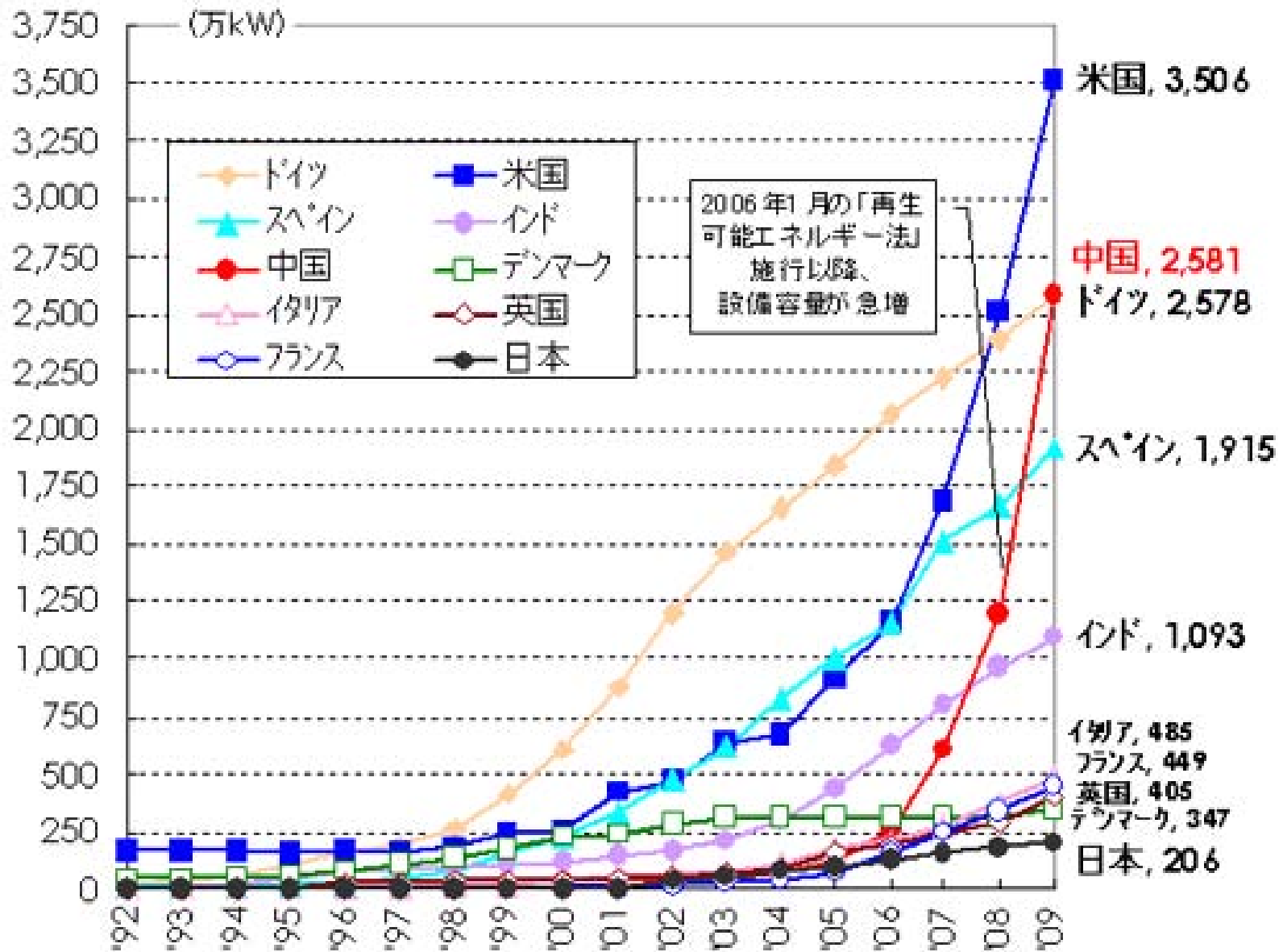
- 注1 「運転サイクル」とは、原則、定検時の調整運転のための原子炉起動から次の定検停止開始までの期間をいう。  
 注2 長期の定検停止後に廃止となった浜岡1・2号の当該定検を除外した値。また、新潟県中越沖地震等の長期間停止したものは除外。  
 注3 各プラントの「主に07～08年に定検停止に入った1運転サイクル」を対象。



## 原子力に実力を発揮させる条件

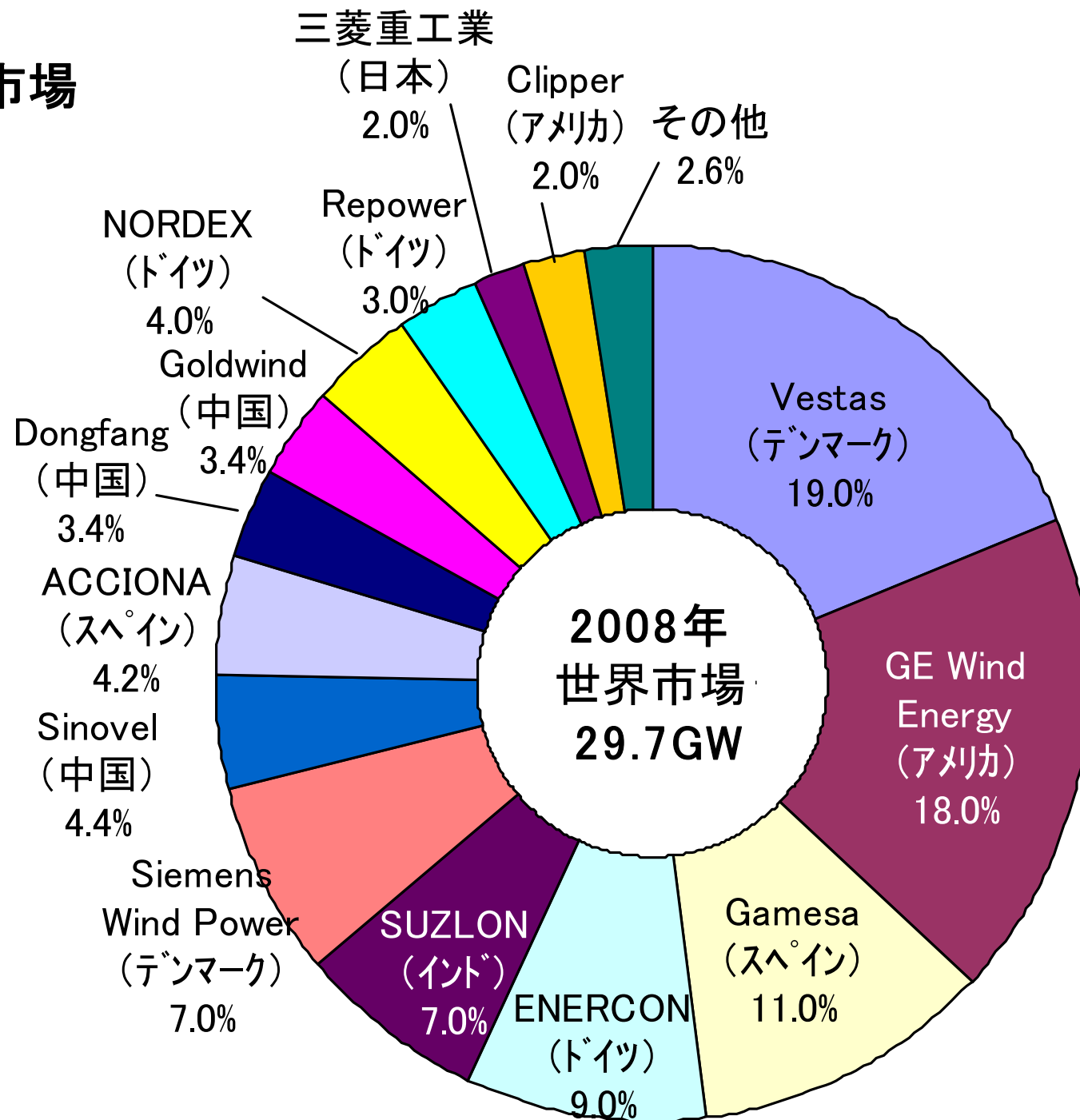
- 既存軽水炉の最大活用と着実なリプレイス
  - 設備利用率の向上・既設炉の出力増強
  - 核不拡散体制の維持・強化
  - 世界的な安全運転実績による信頼確保
  - 長期的な核燃料サイクル確立
- 
- 原子カルネッサンスに浮かれず足元を固めよ

【図3】主要国の風力発電設備累積導入量推移

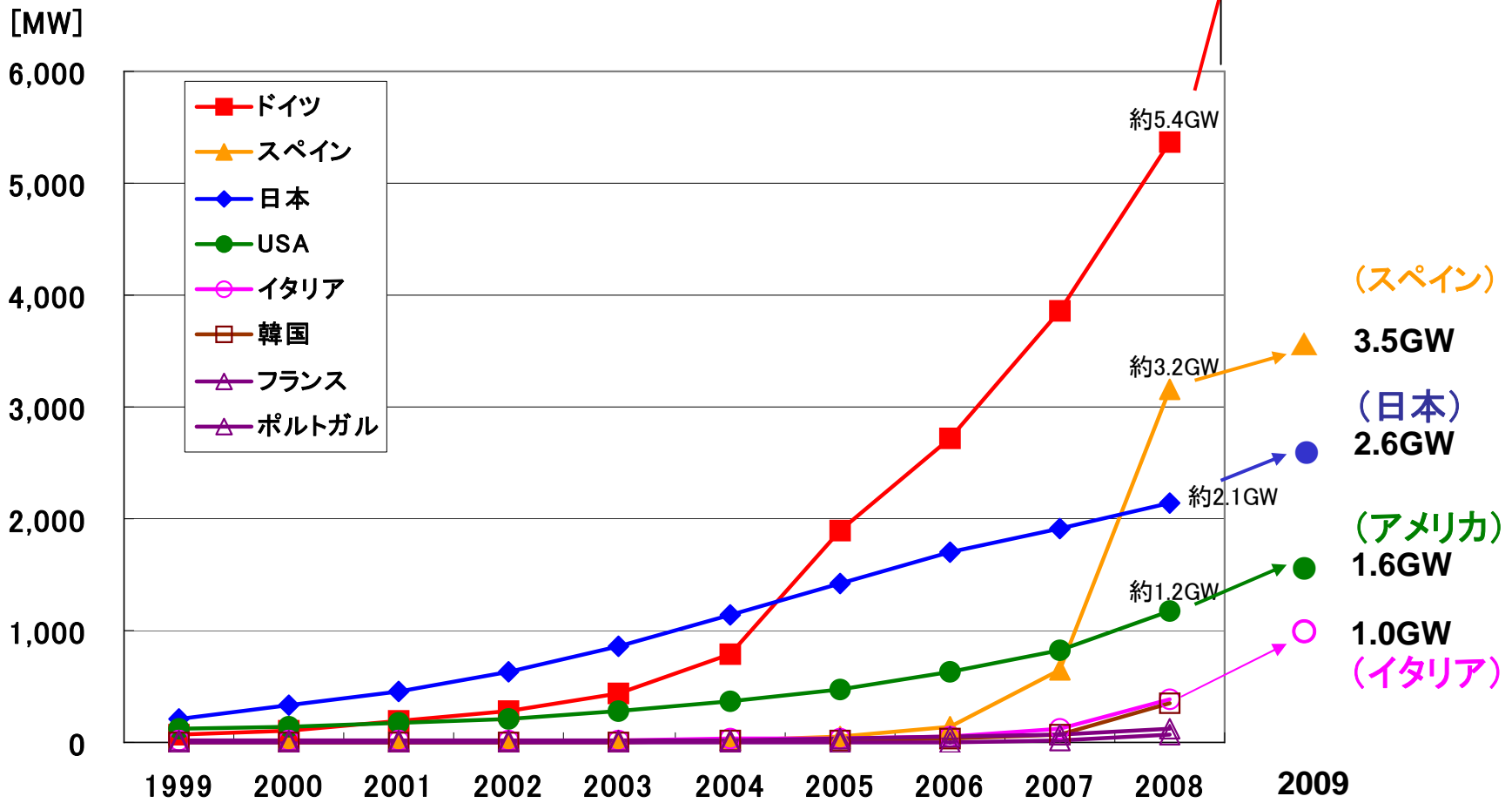


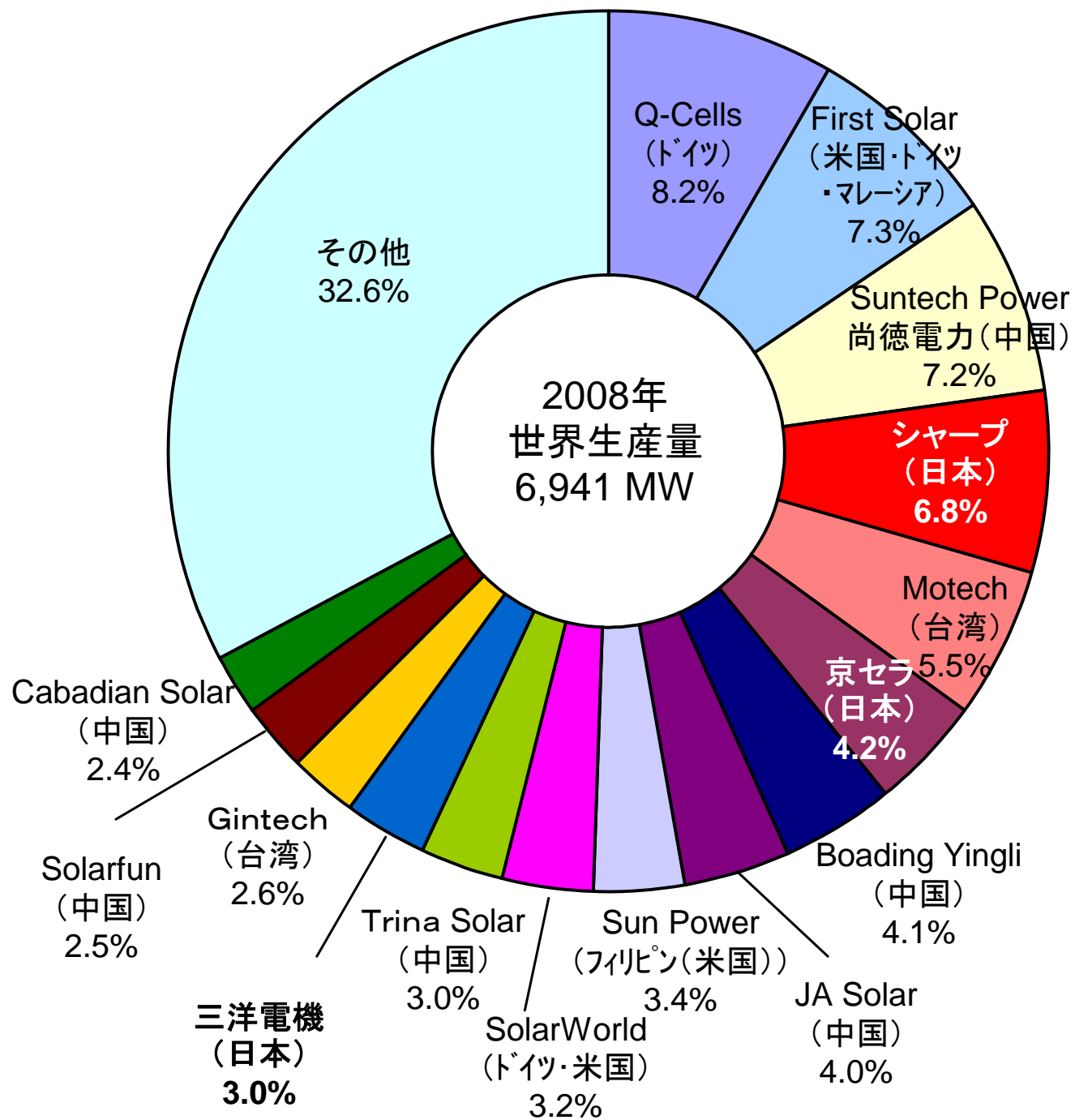
〈出所〉世界風力エネルギー協会報告書に基づき作成

# 風力発電市場



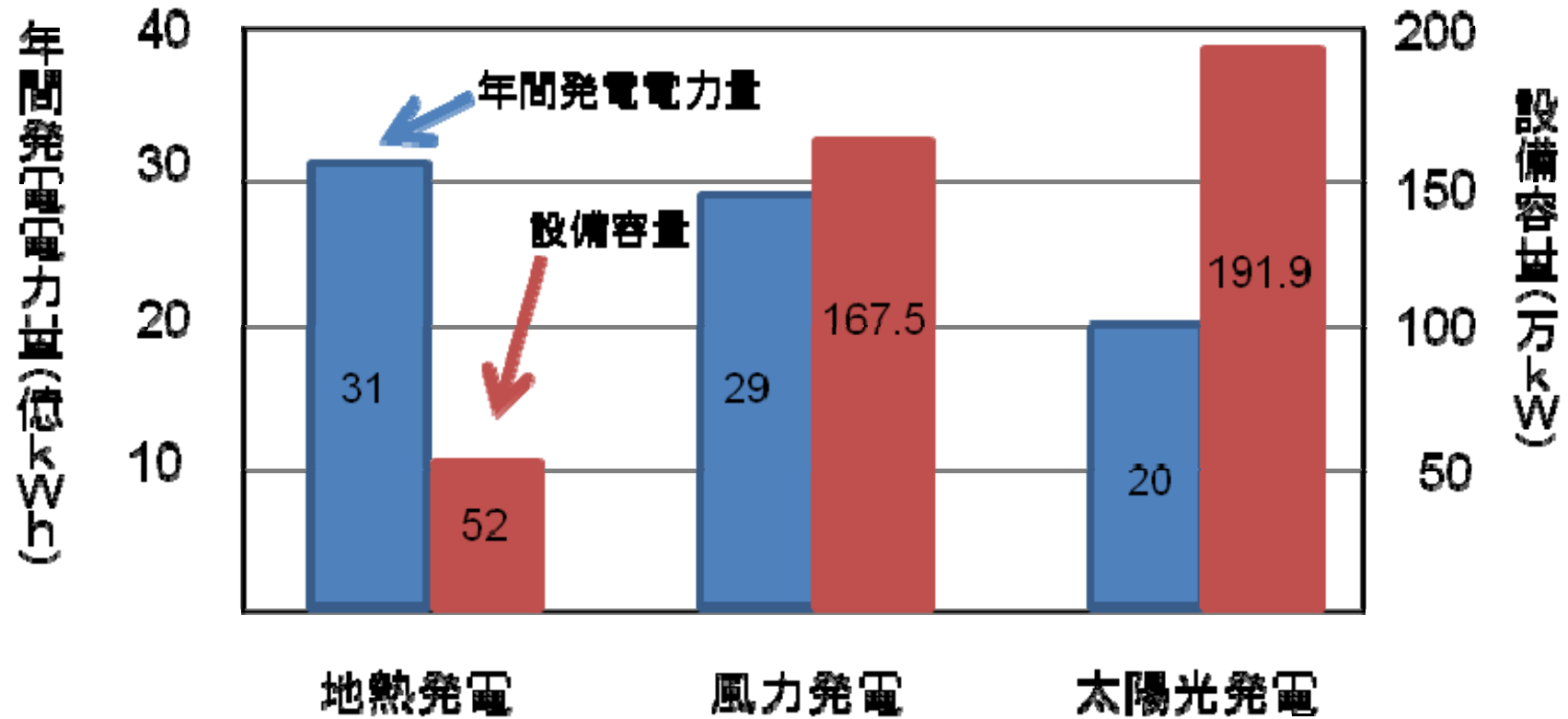
# 主要国の太陽光発電設備容量





## 太陽電池市場

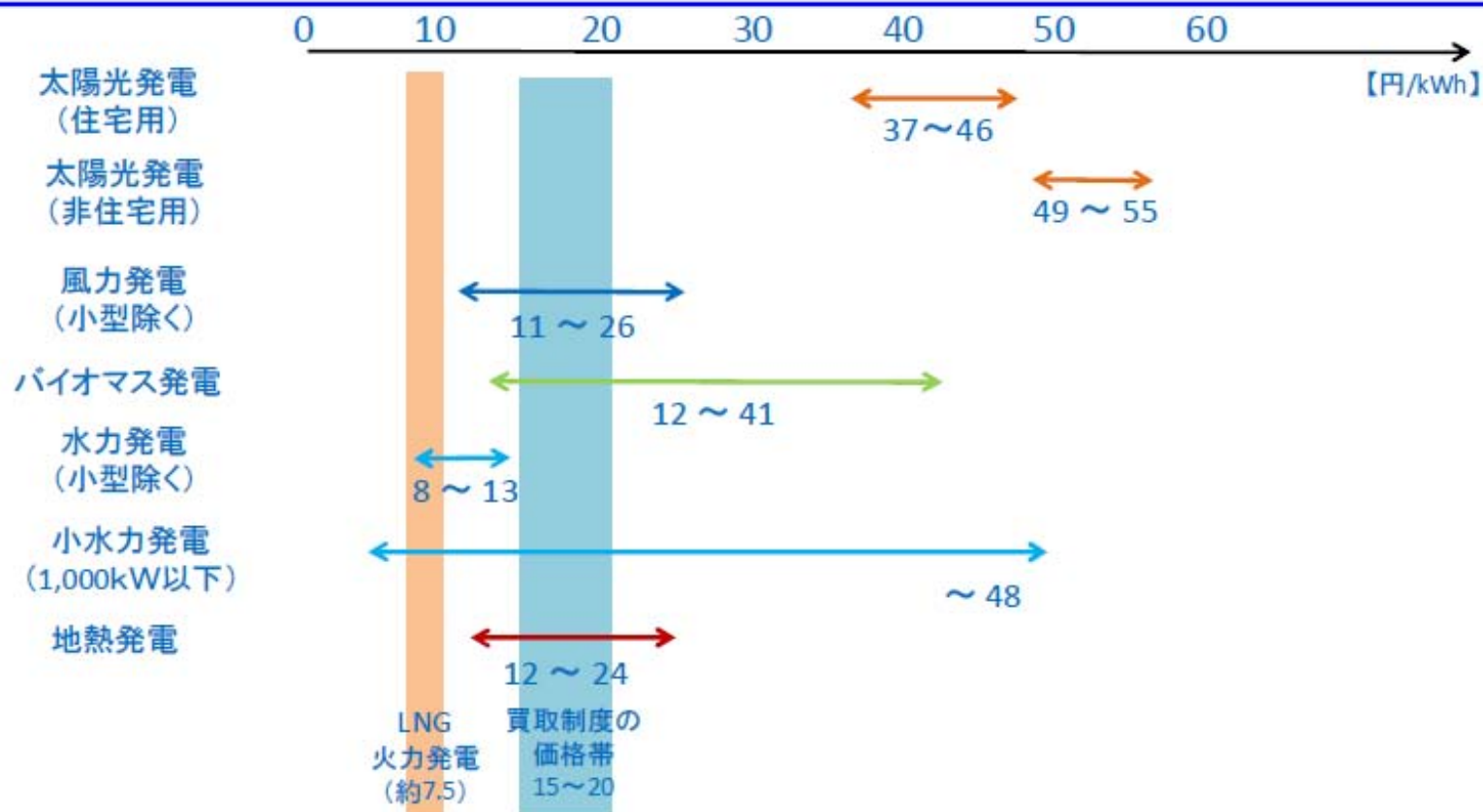
## 2007年度年間発電電力量、設備認可出力の比較



低炭素電力供給システム研究会資料(090701)

## (参考)再生可能エネルギーのコストについて

○平成21年度補助金における実績値等により再生可能エネルギーのコストについて試算すると以下のとおり。太陽光発電が相対的に見て他の再生可能エネルギーよりもコスト高となっている。



※1 ディスカウントレート3%として試算

※2 住宅用太陽光発電導入支援対策費補助金(平成20年度補正、平成21年度)、新エネルギー等事業者支援対策事業(平成21年度、申請ベース)、地域新エネルギー等導入促進事業における社会システム枠(平成21年度、申請ベース)における実績値をもとに一定条件の元に試算

※3 発電原価は一般的な償却年数をもとに試算

※4 バイオマス発電については、木質バイオマスのケース。実際はバイオマスの種類によって価格は大きく異なる

※5 地熱は「地熱開発促進調査(戦略的全国調査)」(平成13年度、NEDO実施)の結果を基に「地熱発電に関する研究会」(平成21年6月)において試算

※6 水力発電については、水力発電に関する研究会(平成20年7月)データより抜粋

※7 LNG火力の発電原価については、総合資源エネルギー調査会電気事業分科会コスト等検討小委員会(平成16年1月)より抜粋

# 再生可能エネルギーの全量買取制度に関するオプションについて

【表:オプションにおけるケースの設定について】 (2010年3月末に提示)

ケース	A.買取対象	B.住宅用太陽光発電の取扱い	C.新設・既設	D.買取価格	E.買取期間	導入量(万kW)	想定年間発電量(億kWh)	CO <sub>2</sub> 削減量(万t)	CO <sub>2</sub> 削減コスト(円/t)	年間買取費用(億円)
1	A1 あらゆる再生可能エネルギー	B1 全量買取	C1 新設+既設	D1 一律価格 20円 15円 20円 15円	E3 20年	3,773以上	513以上	3,075以上	52,297以下	16,083以上
3	A2 実用化されている再生可能エネルギー		C2 新設のみ		E3/E2	20年	3,155~3,773	397~513	2,382~3,075	25,743~28,854
4		E3/E2			20年	3,155~3,474	397~481	2,382~2,887	19,407~21,798	4,622~6,292
5		D2 コストベース			E2 15年	3,102	397	2,382	20,596	4,906

7月23日にケース4を骨格とすることを決定

買取費用負担は電力消費(kWh)に応じて負担;全国均一



# 太陽光発電等の再生可能エネルギー大量導入時の課題

○太陽光発電等の再生可能エネルギーが大量に導入された場合の系統安定化対策として、柱上変圧器の増設などの電圧上昇対策に加え、蓄電池の設置や出力抑制等の余剰電力対策が必要となる。

## 1. 余剰電力の発生

【課題】太陽光発電が増加すると、休日など需要の少ない時期に、ベース供給力(原子力+水力+火力最低出力)と太陽光の合計発電量が需要を上回り、余剰電力が発生(右図)。

【対策】蓄電池の設置、GWや年末年始など低負荷期における出力抑制 等

## 2. 出力の急激な変動

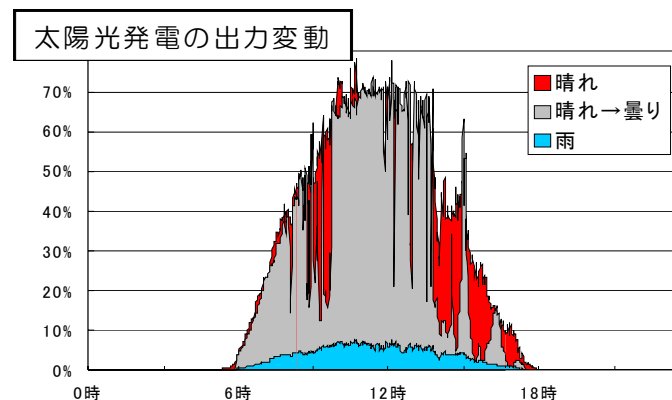
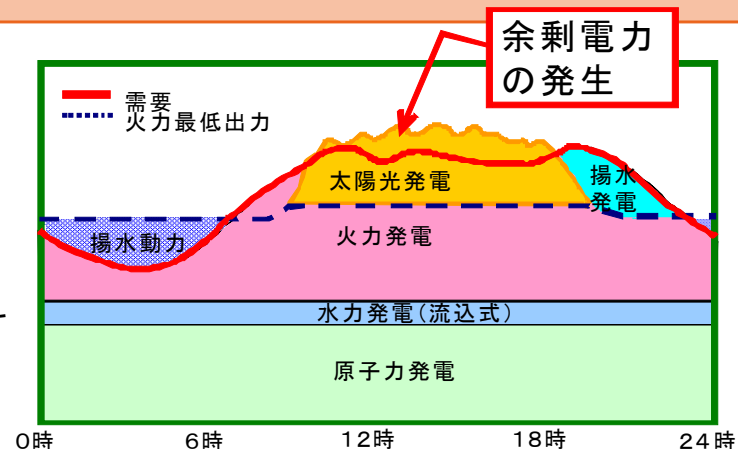
【課題】太陽光発電の出力は、天候などの影響で大きく変動(右下図)。短期的な需給バランスが崩れると周波数が適正値を超えて、電気の安定供給(質の確保)に問題が生ずるおそれ。

【対策】出力調整機能の増強 等

## 3. 電圧上昇

【課題】太陽光パネルの設置数が増加した場合、配電網の電圧を適正値(101±6V)にするため太陽光発電の出力を抑制せざるを得なくなるおそれ。

【対策】配電網の強化(柱上変圧器の増設) 等

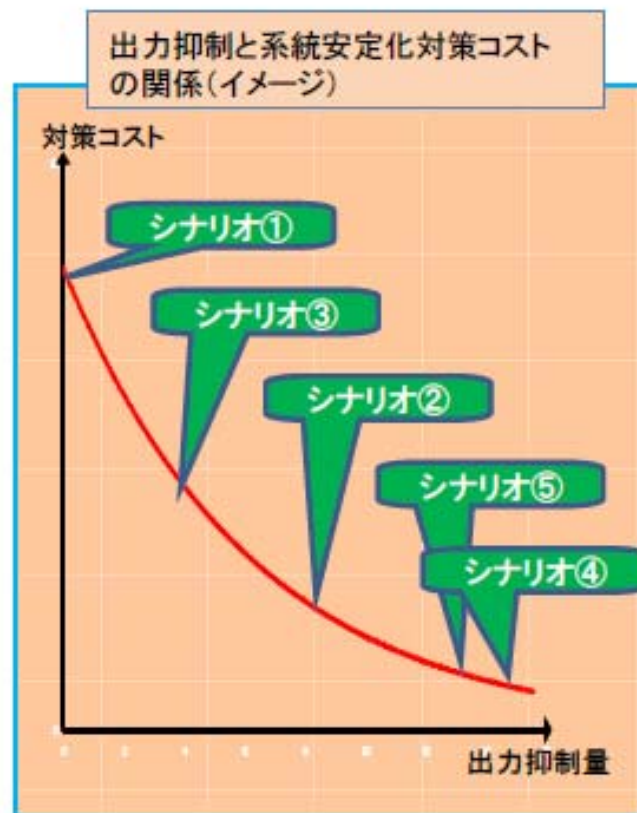


## 2020年までの対策シナリオごとのコスト試算結果

(太陽光発電2,800万kW導入ケース)

(将来価値で試算、単位:兆円)

シナリオ	合計	うち、蓄電池設置コスト	余剰電力対策に任 る蓄電池設置が必要となる太陽光発電 電容量
①出力抑制なし (系統側蓄電池)	16.2	15.1	1,000万kW以降 (2015年見込)
①出力抑制なし (需要家側蓄電池)	45.9 ~ 57.2	45.4~ 56.7	1,000万kW以降 (2015年見込)
②年間14日出力抑制	3.67	2.80	1,300万kW以降 (2016年見込)
③年間14日半量抑制	8.54	7.56	1,000万kW以降 (2015年見込)
④年間30日出力抑制	1.36	0.55	2,700万kW以降 (2020年見込)
⑤年間30日出力抑制 + EV等活用	1.45	0.55	2,900万kW以降



<コスト試算の前提条件>

- 蓄電池設置対策以外の対策としては、出力抑制機能を付加したパワーコンディショナーの導入、需給制御システムの改修、需要創出対応(EV等活用)のためのスマートインターフェース導入等が想定される。
- 蓄電池設置コストには、余剰電力対策の他、周波数調整対応のための蓄電池設置も含まれる。

出所:再生可能エネルギー全量買取PT

## 再生可能エネルギーは期待に応えられるのか？

- 風力発電と太陽光発電は21世紀に入って急速に市場が拡大している(各々年間数兆円の投資)
- 不安定電源のシェアが高まれば系統安定コストが急増することに注意: → **smart grid**, PHEV/EV連系、...
- 技術革新・普及促進による発電コスト低減を誘導する政策が大切: → R&D投資、市場確保、...
- バイオマス利用では持続可能性に注意
- 水力・地熱も忘れてはいけない
  
- 過大評価も過小評価もせず、導入拡大に向けたインフラ整備と市場創出が重要

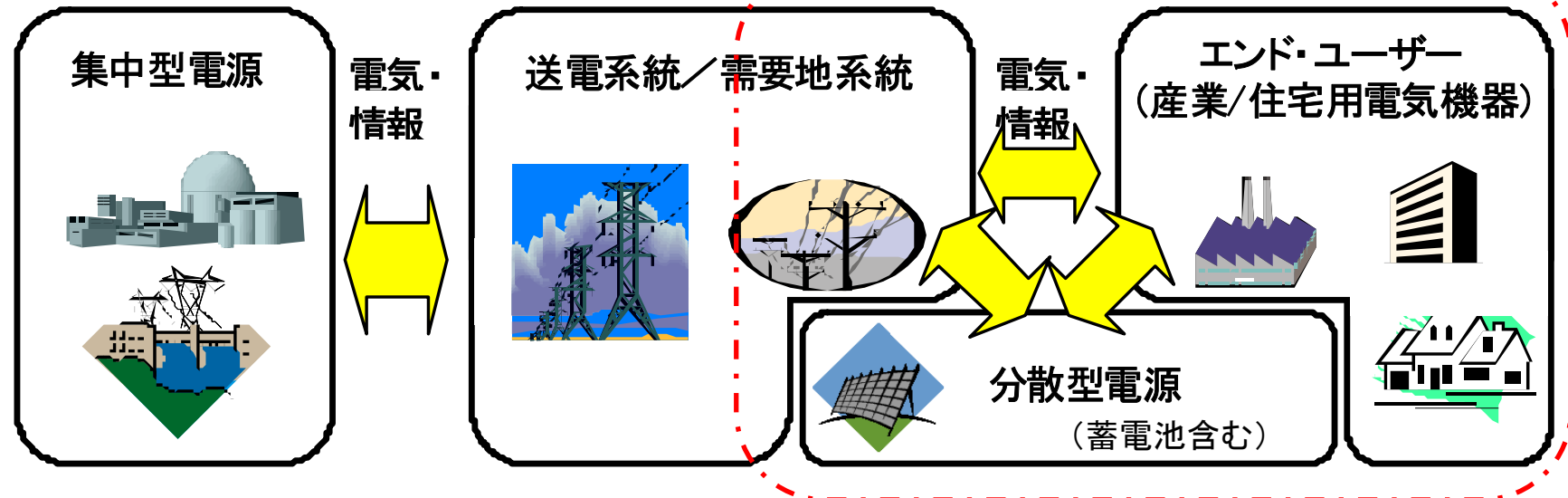
# スマートグリッドとは

○欧米を中心にスマートグリッドの概念が提唱。

＜スマートグリッドの概要（定義は明確になっていない）＞

- 従来からの集中型電源と送電系統との一体運用に加え、情報通信ネットワークにより分散型電源やエンドユーザーの情報を統合・活用して、高効率、高品質、高信頼度の電力供給システムの実現を目指すもの

● <スマートグリッドのイメージ>



(低炭素電力供給システムに関する研究会資料)

### 送電網自動化

・送電ネットワークの状態の監視と自動的な制御システムを導入実施済

### 再生可能エネルギー

・今後大量導入される太陽光発電、ネットワーク側蓄電池と既存の火力発電・水力発電等との協調制御が今後の課題

### 配電自動化

・停電範囲を最小化する制御システムをほぼ導入実施済

ビルの省エネ化 (BEMS: Building and Energy Management Systemなど)

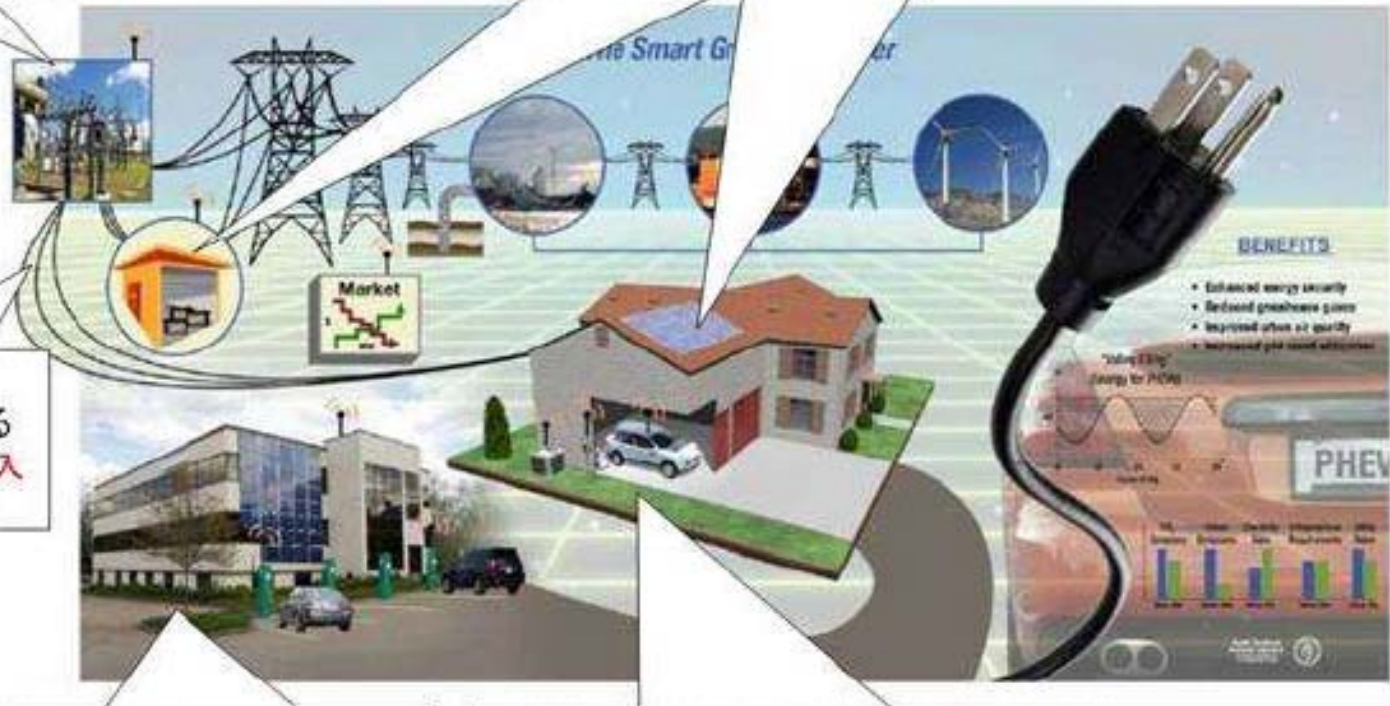
・ESCO事業として各種事業者が取組み継続中

需要家との双方向通信 (スマートメーター等)

・小口需要家に対する遠隔検針を一部電力会社が試験導入中

・DSM (需要側管理) は今後の課題

・スマート家電、プラグインハイブリッド車等との連系は研究開発段階





台所リモコン

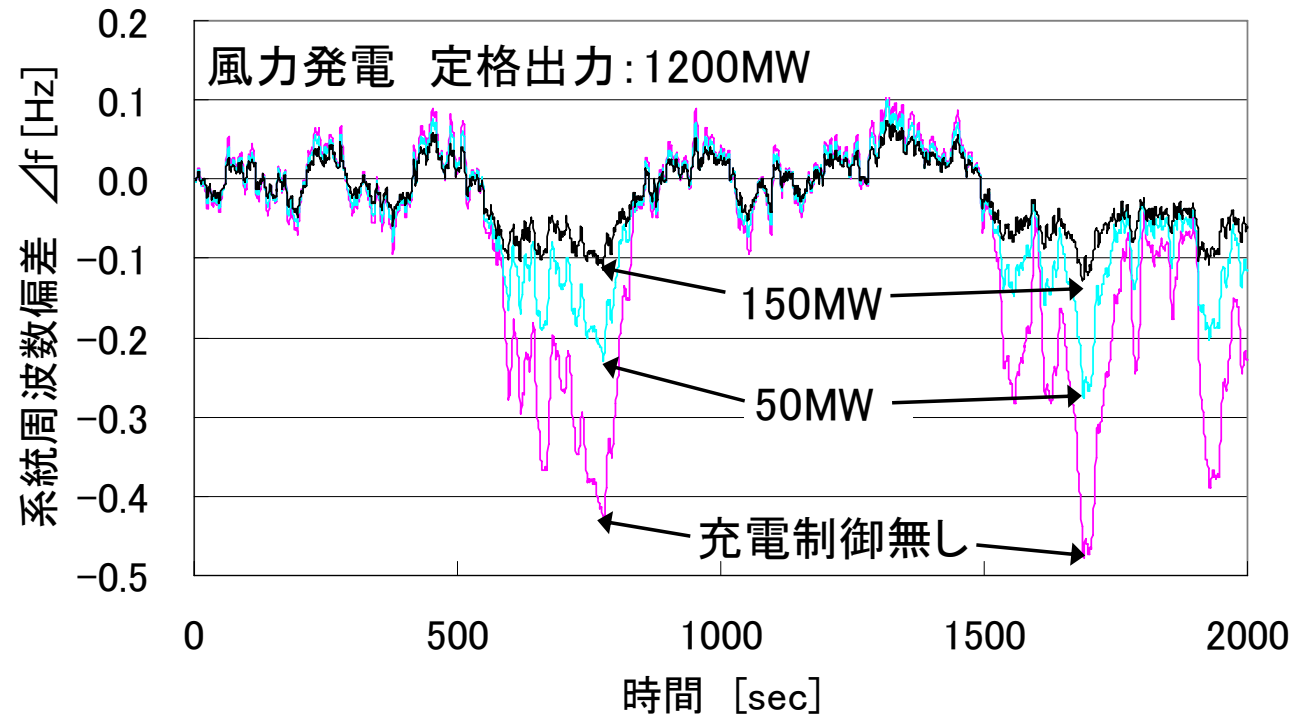


浴室リモコン



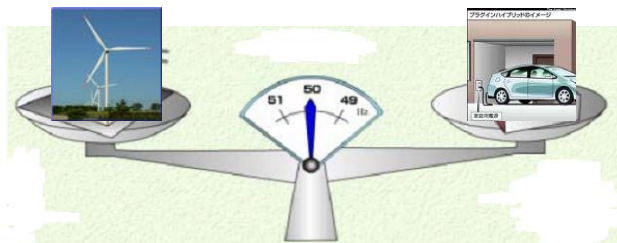
家庭に入ってくる様々な電気機器

# PHEVの充電制御による風力発電導入時の周波数変動の抑制効果



— 充電制御無し — 50[MW] (100,000cars) — 150[MW] (300,000cars)

(乗用車台数)



出所: 高木雅昭, 山本博巳, 山地憲治: 系統連系されたプラグハイブリット車の充電制御による風力発電連系可能量の評価, 電気学会論文誌B 電力・エネルギー部門誌 vol.128 No.12, pp1513-1521 (2008)

【出典】「電力系統の基本的要件と我が国の電力系統の特徴について」(H14/3/5 第5回電気事業分科会資料)をもとに作成

**低炭素社会**

スマートグリッド、スマートメータ  
スマートエネルギーネットワーク

**総合エネルギー産業の展開**

電力システムと自動車の結合

**成長戦略**

標準化  
システムとしての競争

IT家電

スマートハウス  
スマートシティ

**社会システムの情報化**

**情報セキュリティ**

サイバーテロ  
個人情報保護

まずは、**地域システムとしての実証**



# エネルギーシステム統合の意義と課題

## 意義:

- ・システム境界拡大による最適化(コスト、効率、CO<sub>2</sub>削減...)
- ・需要家の選択肢の多様化(品質への要求水準の差異化...)
- ・地域資源の活用(バイオマスなど輸送が困難な分散資源活用...)
- ・システム変化の柔軟性(ヴァーチャルネットワーク、料金制度...)
- ・ICTの技術進歩の取込: ICTの進歩・普及速度はエネルギー技術より速い

## 課題:

- ・ネットワークの保守性の下でも拡張性を持つ機能の選択
- ・サイバーテロや個人情報保護に対する対策
- ・公共インフラ形成に関する社会的合意

部分最適を如何に全体最適につなげるか?

サブシディアリティ: 需要家(HEMS, BEMS)、地域( $\mu$ グリッド)、

→ スマートグリッド・スマートエネルギーネットワーク

→ スマート社会

# 温暖化対策の選択基準

- 効果の大きさ : global potential
- 経済合理性 : marginal abatement cost (MAC); 成長戦略への寄与(雇用、国際競争力); bounded rationality
- 不確実性下の対応 : min. regret; co-benefits (other environmental effects, energy security, ...)
- 持続可能性 : life cycle GHG reduction; food; water; biodiversity; energy poverty; ...



エネルギー

エネルギー検定

ウェブ検定(無料)

<http://www.ene-kentei.jp/>