

持続可能なエネルギーシステムの姿

山地憲治

地球温暖化を克服するエネルギー戦略

@CEE第1回技術フォーラム

2009年6月12日

1. IAC Report: Toward a sustainable energy future
2. 低炭素社会への動き
3. 電力部門の大きな役割
4. 原子力に実力を発揮させる条件
5. 化石資源の高度利用とは？
6. 再生可能エネルギーは期待に応えられるのか？

October 2007

Lighting the way: Toward a sustainable energy future

Lighting the way Toward a sustainable energy future

IAC Secretariat

Het Trippenhuis
Kloveniersburgwal 29
Amsterdam
The Netherlands

P.O. Box 19221
1000 GC Amsterdam
The Netherlands

T +31 (0)20 551 0766
F +31 (0)20 640 4941

secretariat@iac.knaw.nl
www.interacademycouncil.net



InterAcademy Council

InterAcademy Council



Study Panel

Co-Chairs

Steven CHU (United States), Director, Lawrence Berkeley National Laboratory & Professor of Physics and Professor of Molecular and Cellular Biology, University of California, Berkeley, California, USA

José GOLDEMBERG (Brazil), Professor, University of São Paulo, São Paulo, Brazil

Members

Shem ARUNGU OLÉNDE (Kenya), Secretary-General, African Academy of Sciences & Chairman and Chief Executive Officer, Quercusult Ltd., Nairobi, Kenya

Mohamed EL-ASHRY (Egypt), Senior Fellow, UN Foundation, Washington D.C., USA

Ged DAVIS (United Kingdom), Co-President, Global Energy Assessment, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria

Thomas JOHANSSON (Sweden), Professor of Energy Systems Analysis and Director, International Institute for Industrial Environmental Economics (IIIEE), University of Lund, Sweden

David KEITH (Canada), Director, ISEEE Energy and Environmental Systems Group, and Professor and Canada Research Chair of Energy and the Environment, University of Calgary, Canada

Li Jinghai (China), Vice President, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

Nebosja NAKICENOVIĆ (Austria), Professor of Energy Economics, Vienna University of Technology, Vienna, Austria & Leader of Energy and Technology Programs, IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis), Laxenburg, Austria
Rajendra PACHAURI (India), Director-General, The Energy & Resources Institute, New Delhi, India & Chairman, Intergovernmental Panel on Climate Change

Majid SHAFIE-POUR (Iran), Professor and Board member, Faculty of Environment, University of Tehran, Iran

Brald SHPILRAIN (Russia), Head, Department of Energy and Energy Technology, Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Robert SOCOLOW (United States), Professor of Mechanical and Aerospace Engineering, Princeton University, Princeton, New Jersey, USA

Kenji YAMAJI (Japan), Professor of Electrical Engineering, University of Tokyo, Member of Science Council of Japan, Vice-Chair of IIASA Council, Chairman of the Green Power Certification Council of Japan, Tokyo, Japan

YAN Luqiang (China), Chairman, Scientific Committee of Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences & Honorary President, Ningbo University, Beijing, China

Staff

Jos van RENSWOUDE, Study Director

Dilip AHUJA, Consultant

Marika YATSUTANI, Writer/Editor

Stéphane A. JACOMETTI, Communications Coordinator

IACレポートの9項目の勧告

IAC: Inter-Academy Council

1. Meeting the basic energy needs of the poorest people on this planet is a moral and social imperative that can and must be pursued in concert with sustainability objectives.

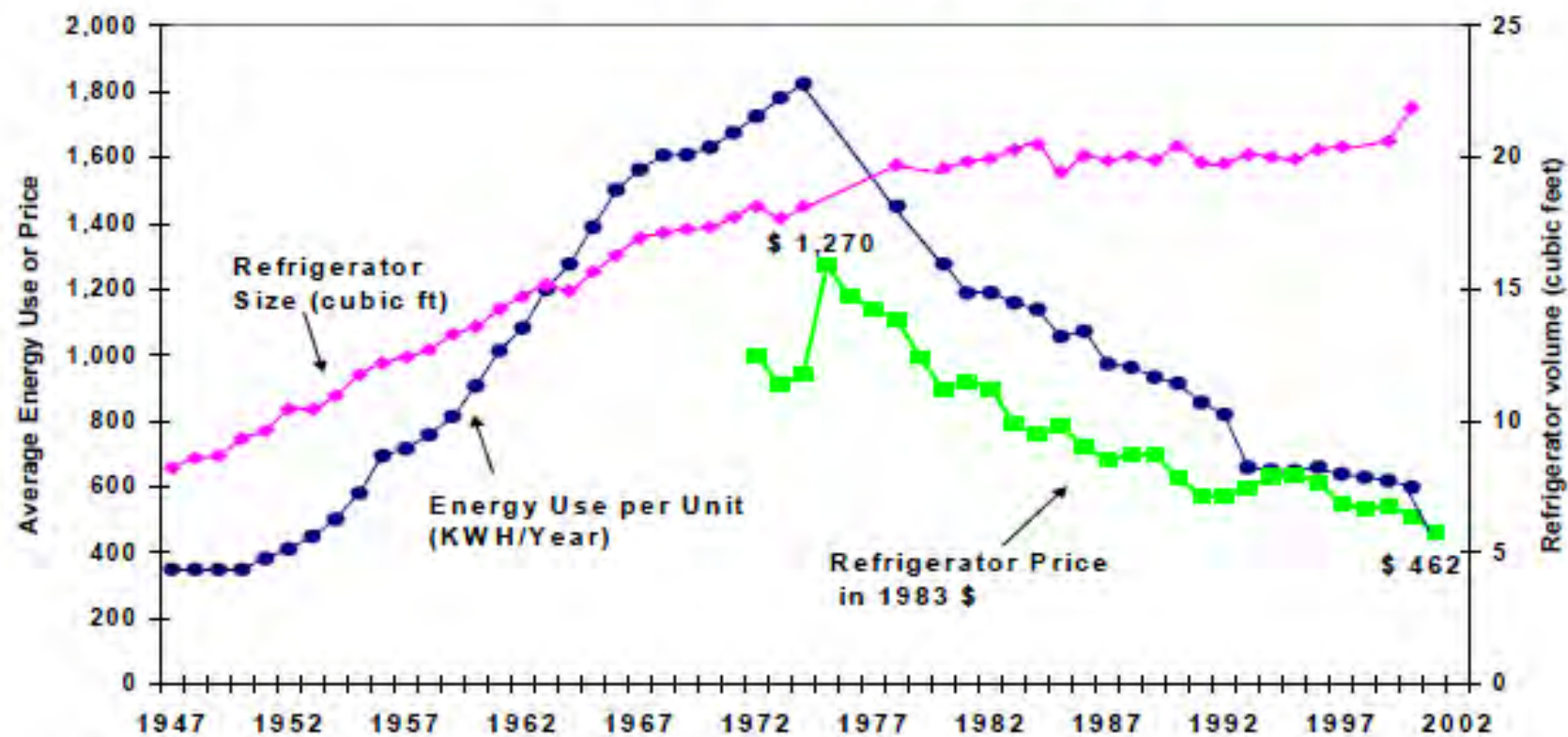
— 貧しい人々に電気とクリーンな燃料を提供する。

— エネルギーアクセスにおける国際的不平等とともに国内的な不平等を解決する。

2. Concerted efforts must be made to improve energy efficiency and reduce the carbon intensity of the world economy.

- エネルギー効率向上と脱炭素化を目指す。
- 世界全体への先進技術の普及。
- CO₂削減効果を反映した適切な価格シグナルの導入。
- ラベリングや規格・基準などで情報提供。

United States Refrigerator Use v. Time



Source: David Goldstein

Arthur Rosenfeld, 9

米国における冷蔵庫の性能向上と省エネ

3. Technologies for capturing and sequestering carbon from fossil fuels, particularly coal, can play a major role in the cost-effective management of global carbon dioxide emissions.

- CO₂回収・貯留(CCS)の推進。
- クリーンコール技術の開発普及。
- CO₂漏洩等に関する懸念への対応。
- 既設石炭火力へも適用。
- バイオマスとCCSを組み合わせればCO₂排出をマイナスにすることも可能。

4. To reduce the potential for future geopolitical conflict and economic vulnerability associated with competition for oil and natural gas supplies, governments should commit to:

—石油・天然ガスの需給安定化。

—特に輸送部門の脱石油を目指す：

バイオ燃料、プラグインハイブリッド車、水素燃料、
交通インフラ改善等。

—液体燃料製造のLCAの視点での評価。

5. Nuclear power currently supplies about 16 percent of world electricity generation; as a low-carbon resource it can play a significant role in the world's future energy portfolio but only if major concerns related to capital cost, safety, and weapons proliferation are addressed.

—安全性の確保：高齡原子炉対策、廃棄物の安全な管理・処分。

—核拡散対策：国際制度の構築と技術対策。

—透明性あるプロセスによる原子力再評価。

6. Renewable energy in its many forms offers immense opportunities for technological progress and innovation. The contribution of renewable resources (e.g., wind, biomass, solar, geothermal, and hydropower) in the world's energy mix should be substantially expanded.

- 再生可能エネルギーの導入政策の充実。
- 薄膜PV等の技術開発。
- 密度の低いエネルギー源の大規模導入に伴う環境対策も重要。

Table 3.4 Modern renewable energy: production and growth

Source/Technology		Production (Exajoules)			Growth rate (2001-2005) in % per year
		2001	2004	2005	
Modern biomass energy	Total	8.32	9.01	9.18	2.50
	Bioethanol	0.40	0.67	0.73	16.36
	Biodiesel	0.04	0.07	0.13	34.27
	Electricity	1.26	1.33	1.39	2.41
	Heat	6.62	6.94	6.94	1.17
Geothermal energy	Total	0.60	1.09	1.18	18.37
	Electricity	0.25	0.28	0.29	3.84
	Heat	0.35	0.80	0.88	26.31
Small hydropower	Total	0.79	1.92	2.08	27.47
Wind electricity	Total	0.73	1.50	1.86	26.56
Solar energy	Total	0.73	2.50	2.96	41.83
	Low temp heat	0.68	2.37	2.78	41.92
	Thermal electricity	0.01	0.01	0.01	0.46
	PV grid		0.06	0.10	55.00
	PV off-grid	0.03	0.06	0.07	20.25
Marine energy	Total	0.01	0.01	0.01	0.46
Total non-biomass modern renewables		2.86	7.02	8.09	
Total modern renewables		11.16	16.02	17.26	<u>11.51</u>
Total primary energy supply (TPES)		418.85	469.00	477.10	1.60
Modern renewables/TPES (in percent)		2.7	3.4	<u>3.6</u>	

**Modern Renewables:
Small but Rapid Growth**

Sources: UNDP, UNDESA, and WEC, 2000 and 2004; REN21, 2006; and IEA, 2006.

7. Biomass-based fuels hold great promise for simultaneously addressing climate change and energy-security concerns, especially related to the world's current dependence on petroleum fuels for the transport sector.

- ー輸送用燃料分野でのバイオ燃料の活用。
- ー持続可能な農業など土地管理が重要。
- ーバイオリファイナリーでエネルギー以外の高価値物質も製造。
- ー遺伝子工学(品種改良等)、生物化学変換(酵素利用等)を含め多様なバイオマス利用技術の開発。

8. Progress in developing cost-effective energy storage technologies, new energy carriers, and improved transmission infrastructure is needed to reduce costs and expand the contribution from a variety of energy supply options.

－革新的なエネルギー貯蔵・輸送システムの開発：水素利用、物理的・化学的エネルギー貯蔵→間歇的な再生可能エネルギーの利用。

－電力グリッドの革新：長距離輸送、スマートグリッド。

***9. The science and technology community
- together with the general public - has a
critical role to play in advancing
sustainable energy solutions and must
be effectively engaged.***

- エネルギーR&D予算の増強。
- 国際共同エネルギー研究開発の推進。
- 需給を統合したシステム効果の追及。
- エネルギー政策・制度の評価。
- エネルギー教育・啓発・広報の充実。

最近のわが国エネルギー政策の展開

平成18年5月 新・国家エネルギー戦略

- ・2030年に向けた戦略目標を設定

平成20年5月 長期エネルギー需給見通し

- ・2010年、20年、30年の絵姿を提示

平成20年7月 低炭素社会づくり行動計画(閣議決定)

- ・2050年までを視野

革新的技術開発

- ・Cool Earth- エネルギー革新技术計画を策定し、重点的に取り組むべき革新技术として、「21」技術を選定

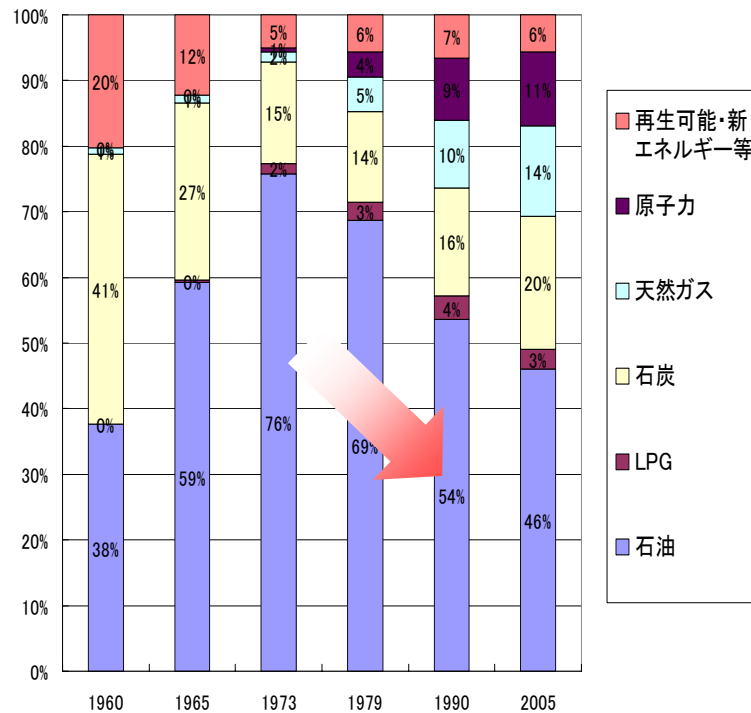
既存先進技術の普及

- ・2020年を目途に「ゼロエミッション電源」の割合を50%以上に引上げ
- ・太陽光発電の導入量を2020年に10倍、2030年に40倍に

我が国のエネルギー供給の推移

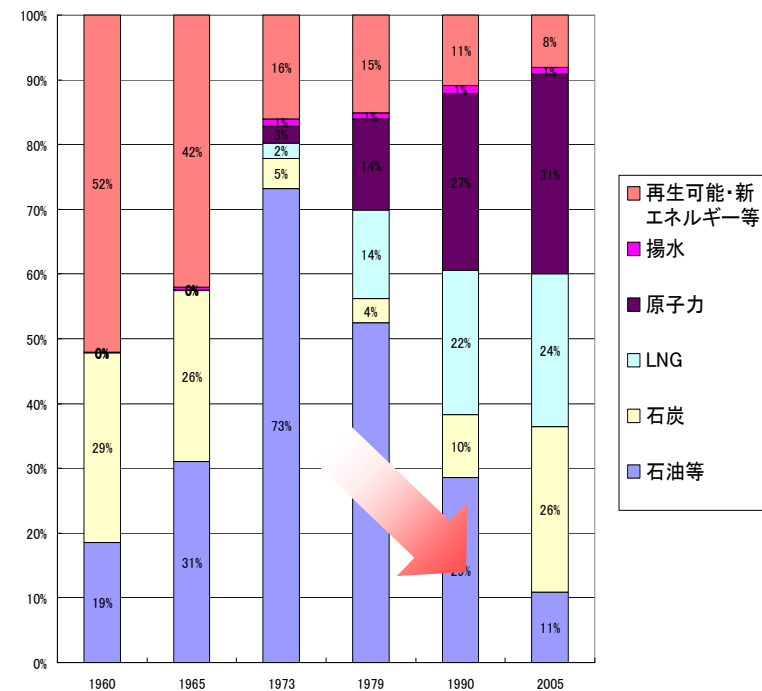
○一次エネルギーに占める石油の割合は、第一次石油ショック時の8割から5割以下まで低減。発電量に占めるシェアでは1割にまで低減。

【一次エネルギー供給シェアの推移】



(出典)資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」より作成

【発電電力量シェアの推移】



(出典)資源エネルギー庁「電源開発の概要」より作成
注)卸電力取引所における取引等の電源種別が不明なものは除外した。

エネルギー需給構造改革の方向性

(総合資源エネルギー調査会・総合部会・政策小委報告書より)

i) 技術開発等の推進:

革新的エネルギー技術(革新的太陽光発電、先進的原子力発電など)の開発、オイルサンド・メタンハイドレート等の非在来型資源や未利用エネルギーの開発などを進めること。

ii) 非化石エネルギーの導入拡大:

化石エネルギーへの依存度を低減していくために、非化石エネルギー(原子力、水力、地熱、新エネルギー等)の導入を拡大すること。

iii) 化石資源の高度・有効利用:

有限な化石資源(原油、天然ガス、石炭等)の生産性を徹底的に高めるために、その高度・有効利用を推進すること。

Six Categories of IPCC Mitigation Scenarios

- The lower two categories correspond EU proposal and Cool Earth 50; require high costs and difficult international negotiations.
- Many scenario studies are done for the middle two categories; substantial emission reductions needed for developed countries.
- The last two categories may cause irreversible climate impacts; precautionary principle would exclude these categories.

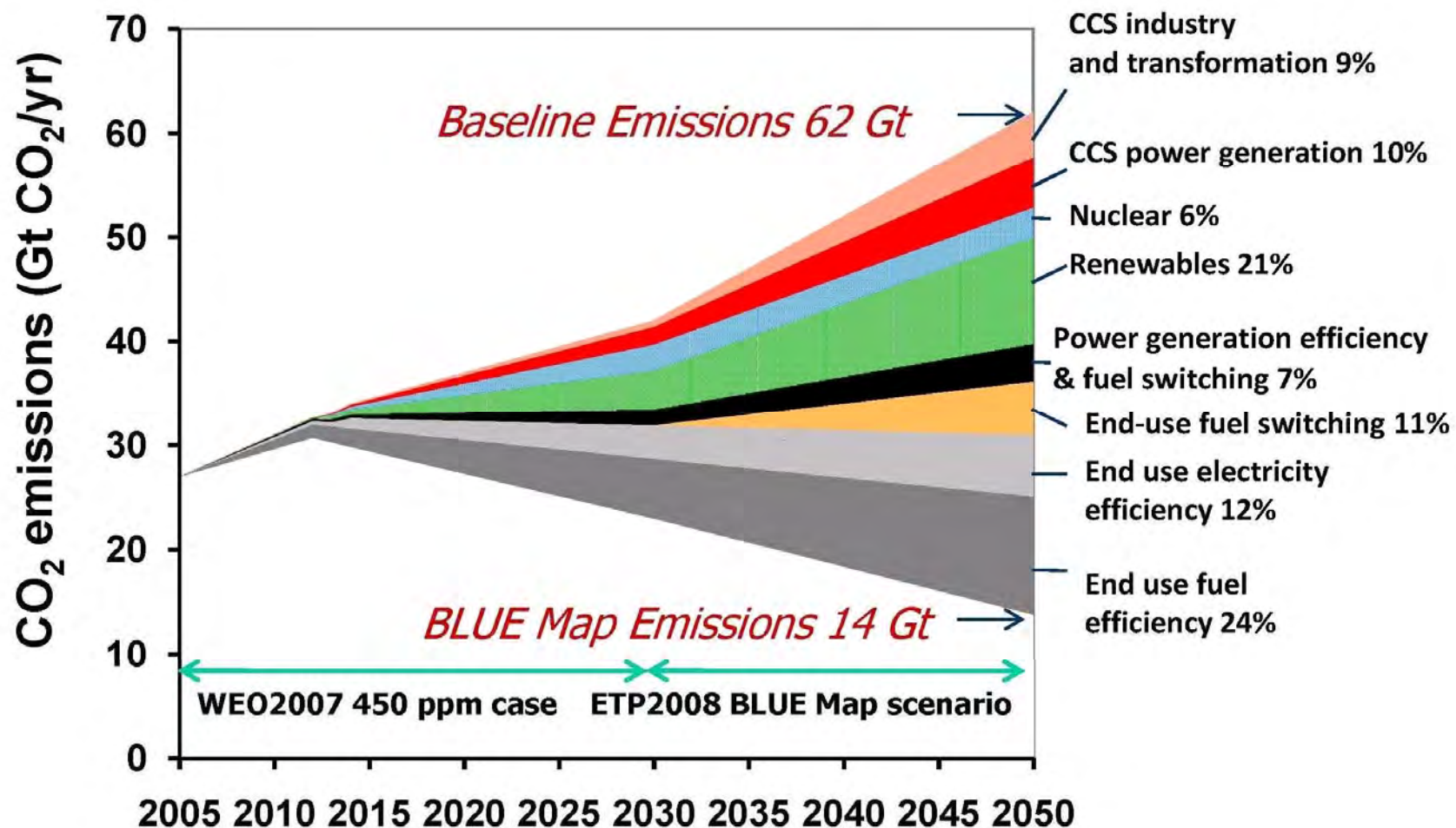
Stabilization level (ppm CO ₂ -eq)	Global Mean temp. increase at equilibrium (°C) (above pre-industrial, B.E.)	Year CO ₂ needs to peak	% reduction in 2050 compared to 2000
445 – 490	2.0 – 2.4	2000 - 2015	-85 to -50
490 – 535	2.4 – 2.8	2000 - 2020	-60 to -30
535 – 590	2.8 – 3.2	2010 - 2030	-30 to +5
590 – 710	3.2 – 4.0	2020 - 2060	+10 to +60
710 – 855	4.0 – 4.9	2050 - 2080	+25 to +85
855 – 1130	4.9 – 6.1	2060 - 2090	+90 to +140

なぜ低炭素社会なのか？

- 分かりやすい政治的スローガン：
 - －2050年温室効果ガス半減
 - －2020年ゼロエミッション電源50%、...
- 実現可能性に配慮した具体的政策展開：
 - －長期エネルギー需給見通し
 - －代エネ法改正（エネルギー供給構造高度化法案）
 - －温暖化対策中期目標...
- 学術界の役割：
 - －原理原則の監視（筋を通す）、利害のバランス（中立性）
 - －革新技術の創出（ペット？、動物園？、ガラパゴス島？、...）

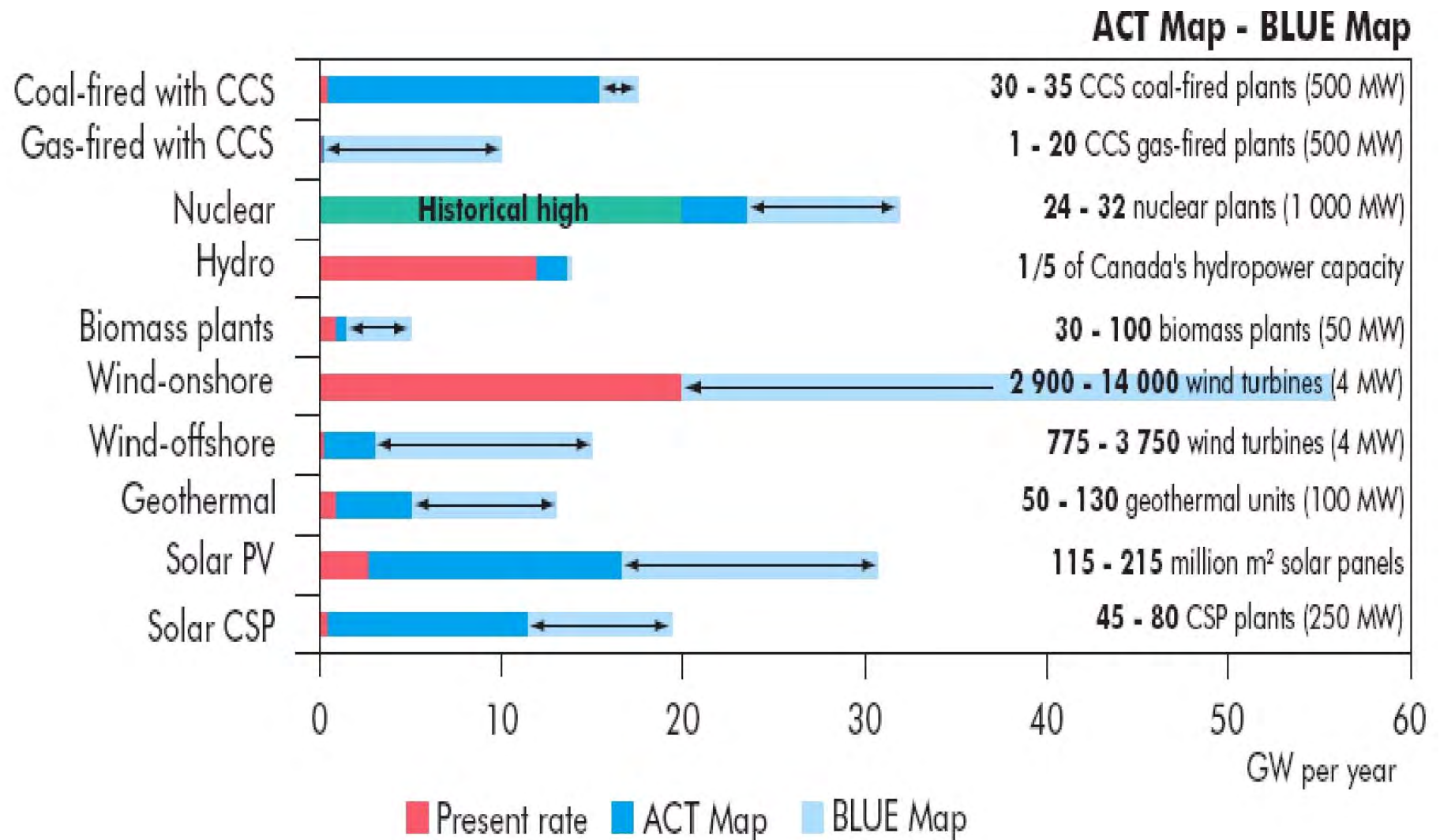
2050年温室効果ガス排出半減？

エネルギー起源CO₂排出半減の技術シナリオ

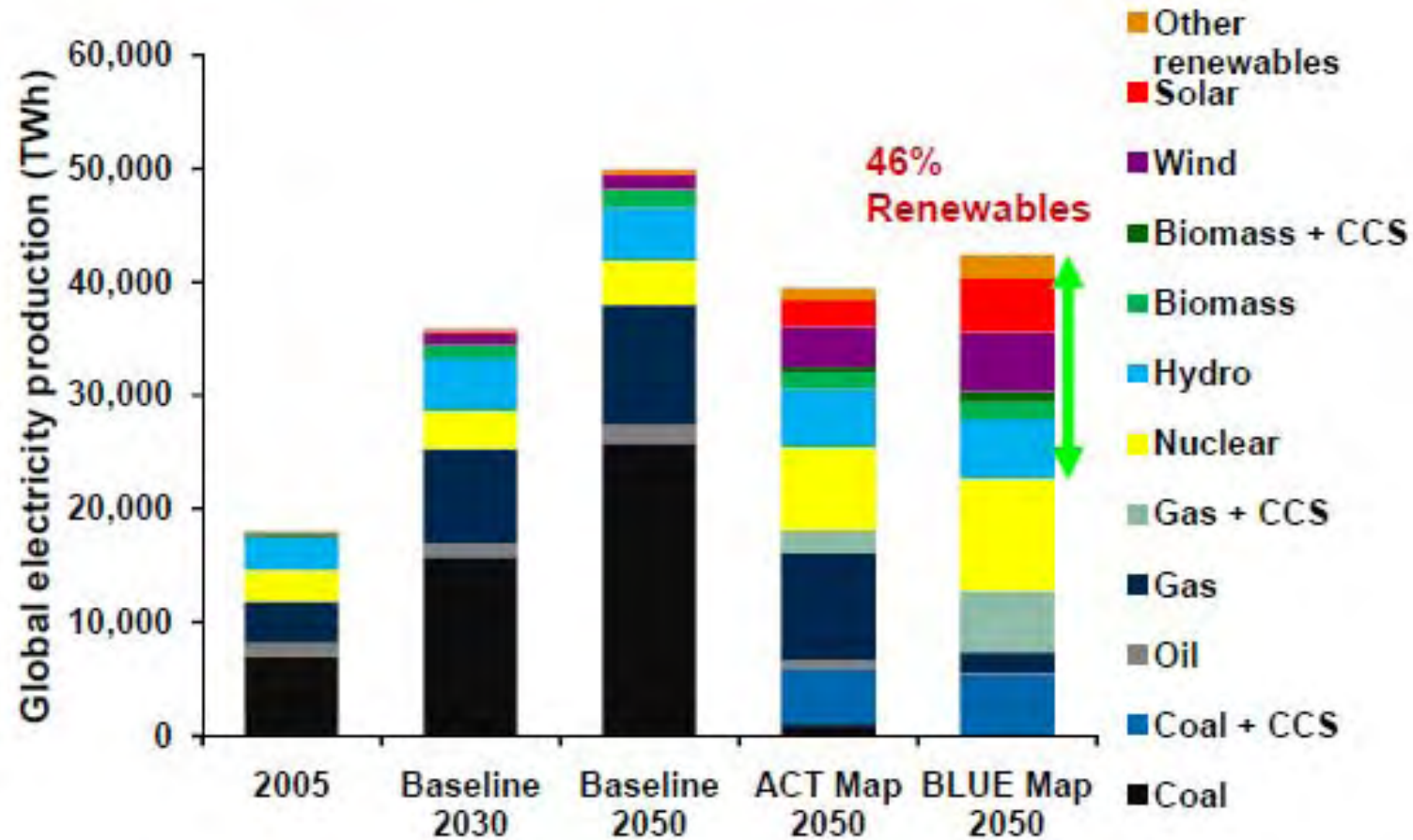


Energy Technology Perspectives 2008 (IEA)

Power Plant Construction for 2010-2050



Power Generation Mix



電力部門の大きな役割

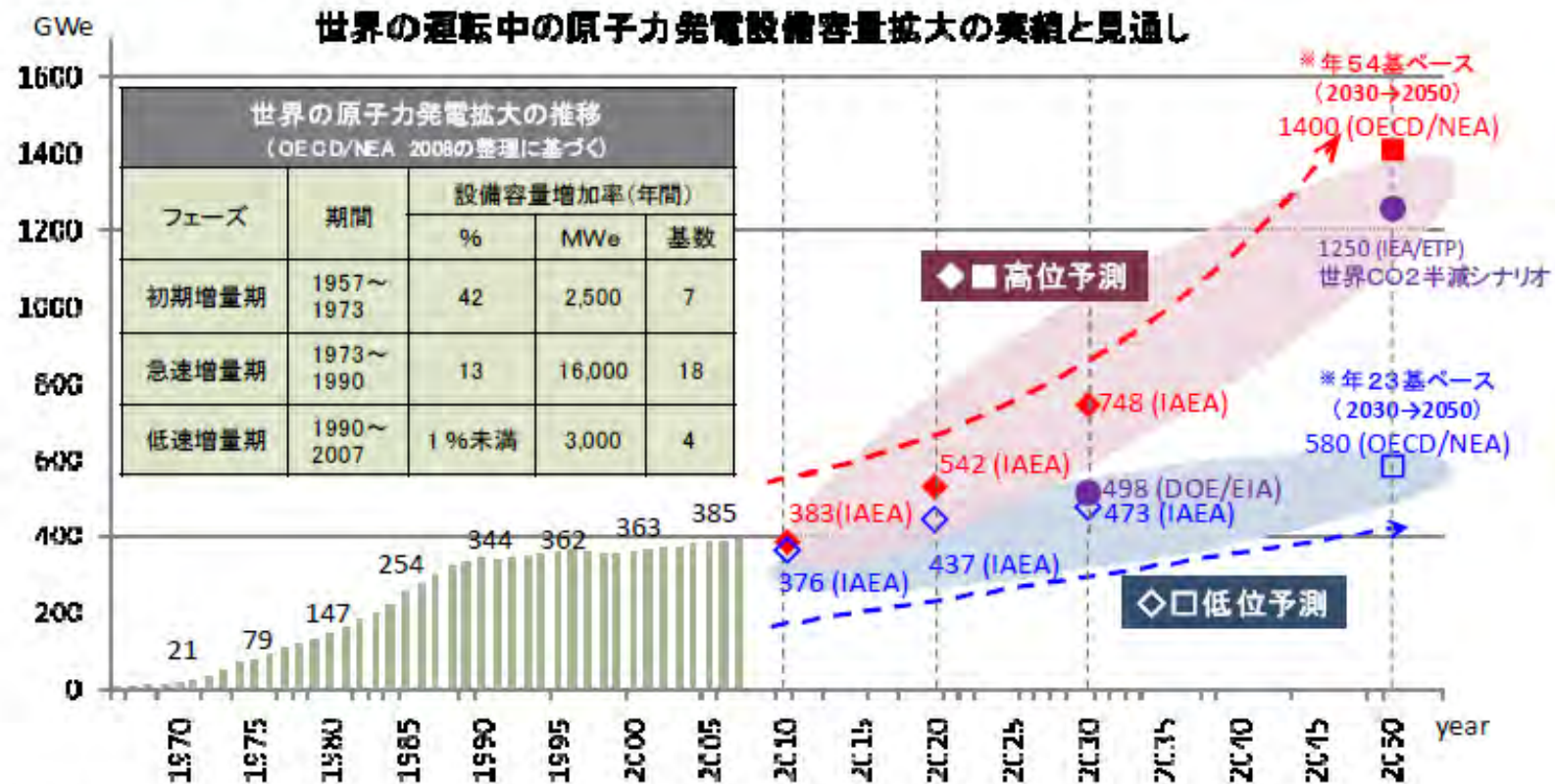
- 一次エネルギーの40%以上が電力に変換
- 多様なエネルギー資源から生産可能
- 利用時にクリーンで制御性がよく高効率
- ヒートポンプによる高効率低温熱供給(空調、給湯)
- 電気駆動自動車(PHEV, EV)の可能性

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？

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

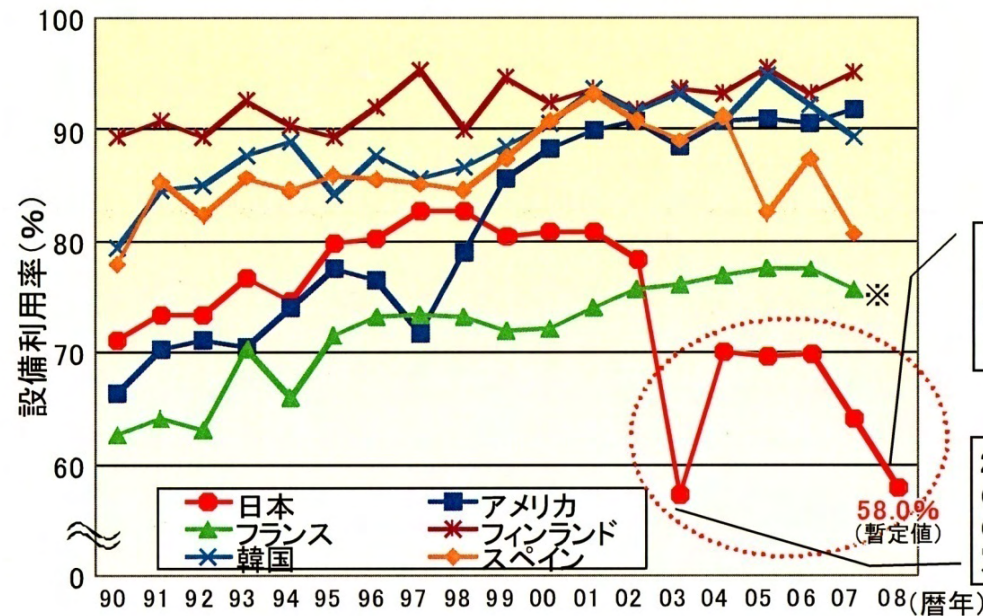
12

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。

※: 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%)

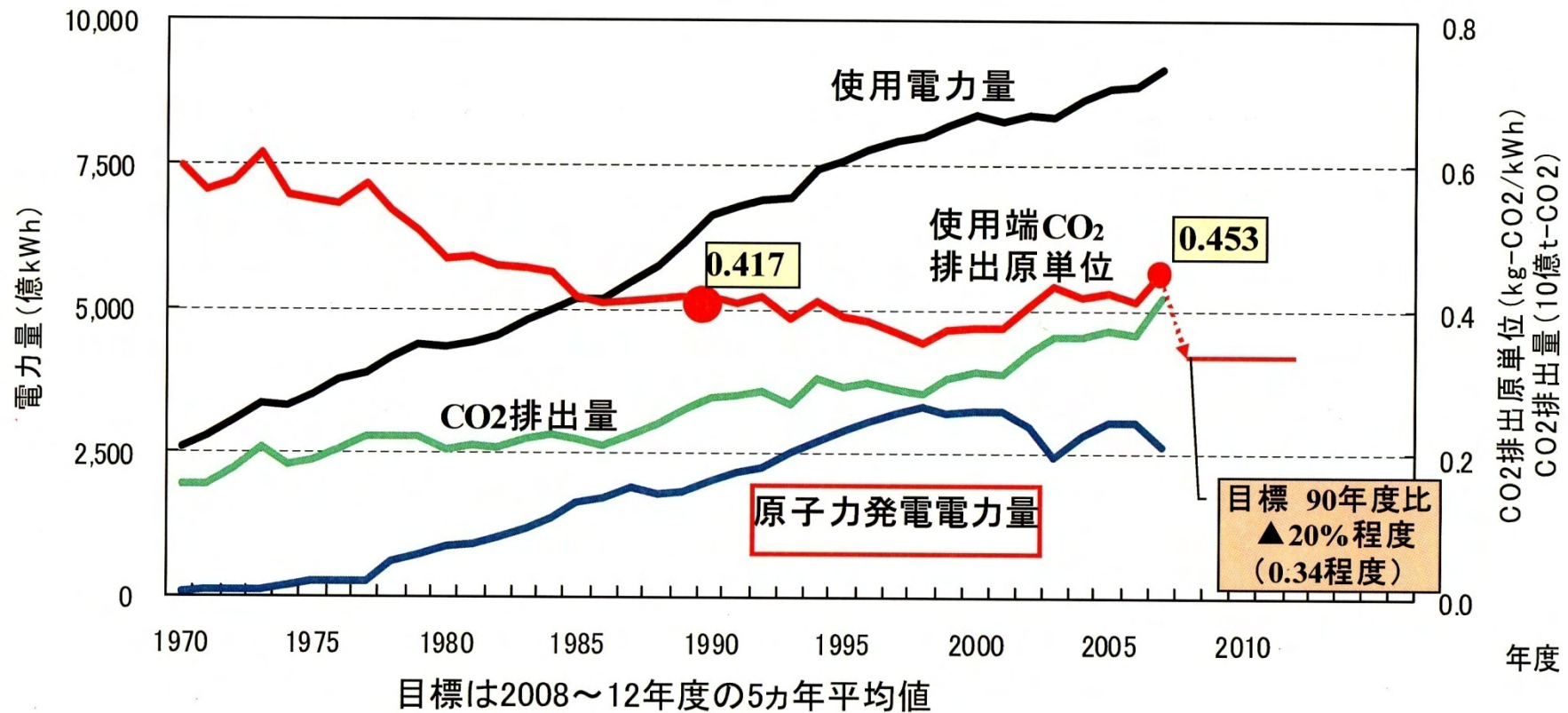
設備利用率が98年水準(84.2%)と仮定 : 13億800万トン(90年比+3.7%)

90年比5%分改善(6,300万トン)

約700gCO₂/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

電気事業からのCO₂排出量の推移

- 使用電力量は増加したが、原子力発電を中心としたベストミックスにより**使用端CO₂排出原単位は抑制**してきた。
- 2020年度までに原子力を中心とする**非化石エネルギー比率50%**により低炭素社会の実現を目指す。

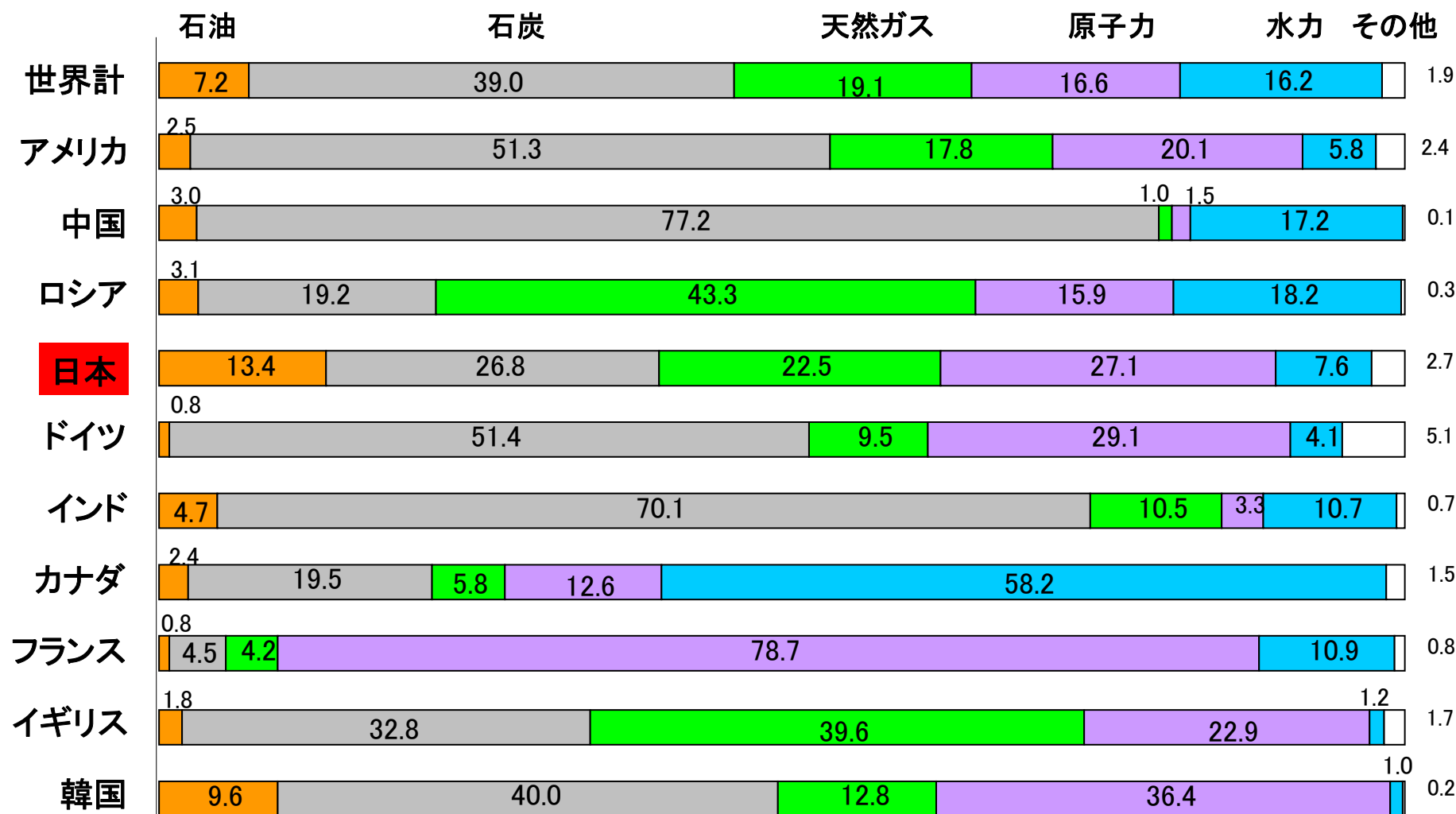


原子力に実力を発揮させる条件

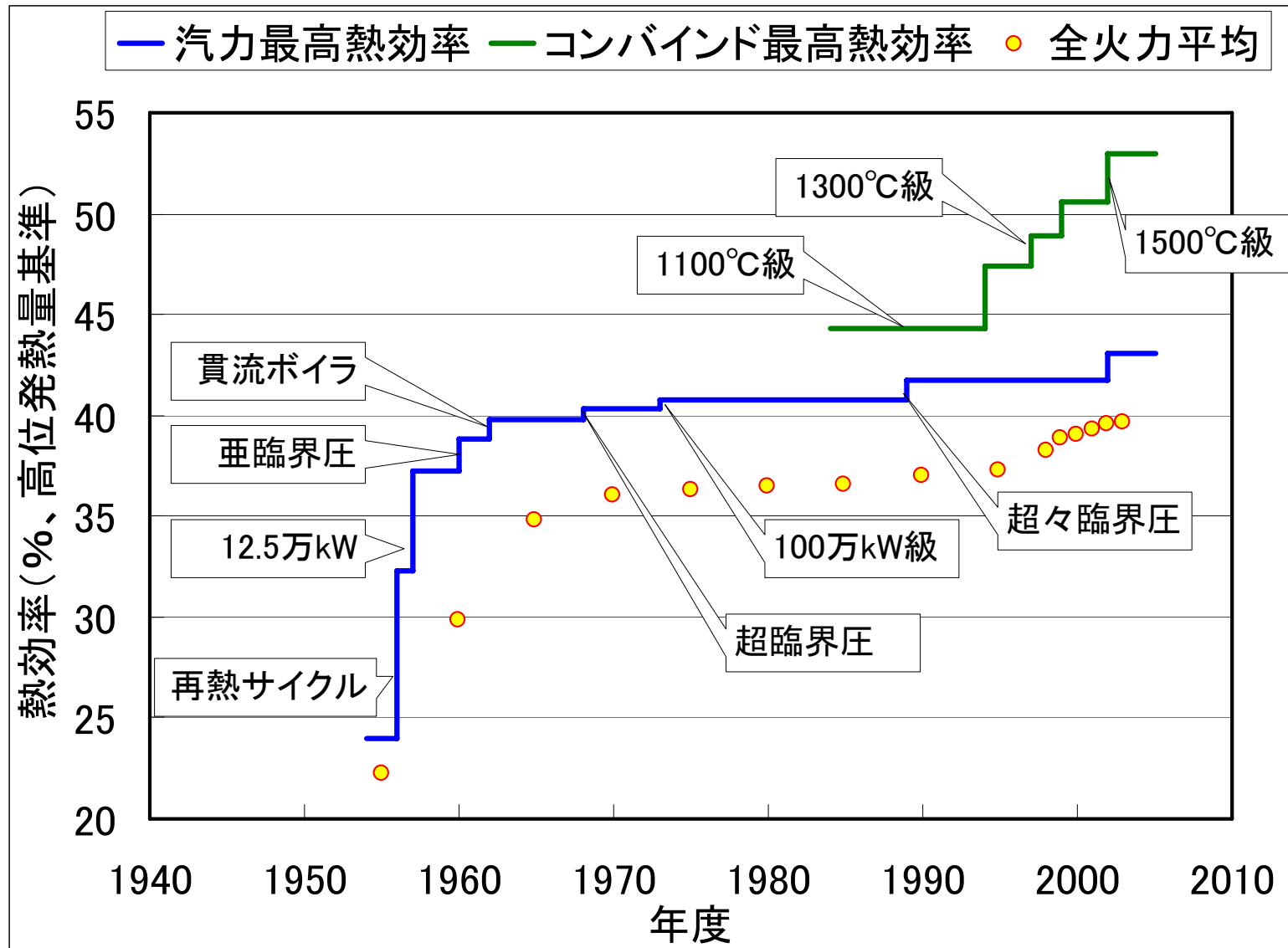
- 既存軽水炉の寿命延長・着実なリプレイス
 - 設備利用率の向上・既設炉の出力拡大
 - 核不拡散体制の維持・強化
 - 世界的な安全運転実績による信頼確保
 - 長期的な核燃料サイクル確立
-
- 原子カルネッサンスに浮かれず足元を固めよ

主要国の電源別発電電力量の構成(2002年)

石炭火力の役割は大きい

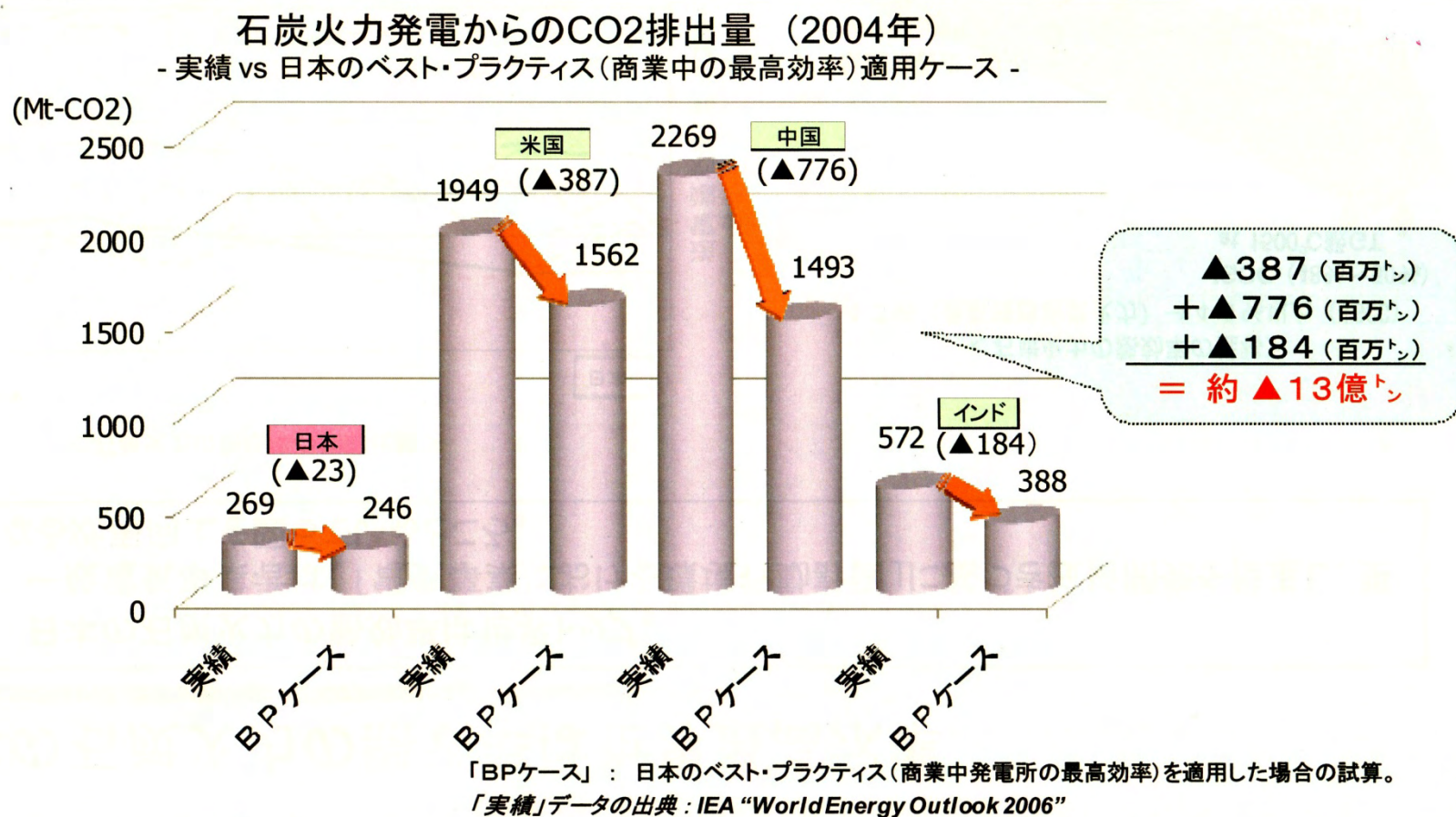


火力発電熱効率の変遷(国内)



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。

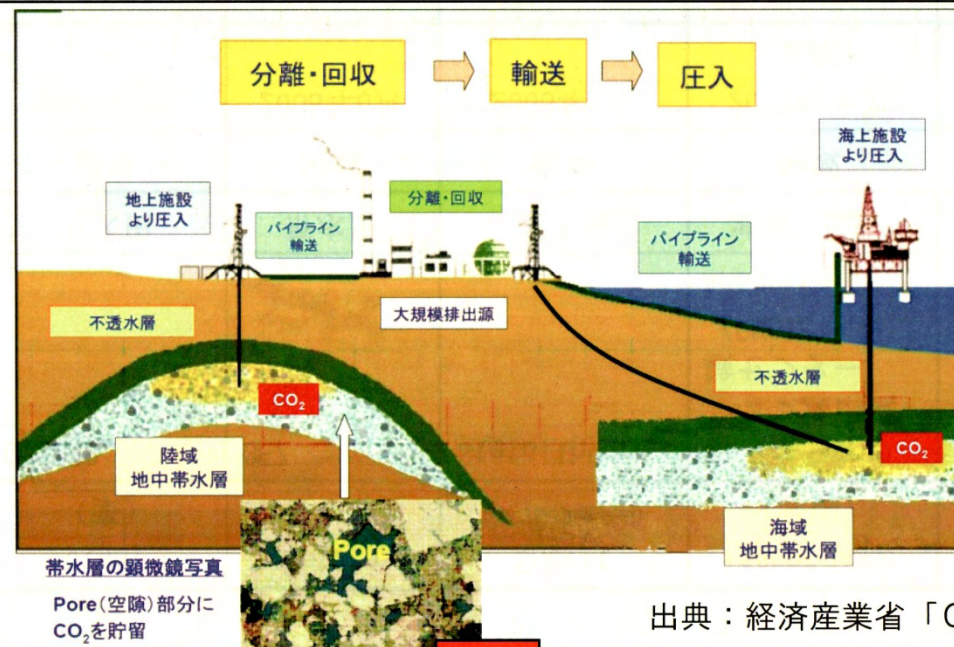


<2. 火力発電の高効率化等>

CCSについて

- CCSとは、火力発電所等の大規模排出源から排ガス中の CO_2 を分離・回収し、長期間安定的に地下へ貯留、又は海洋へ隔離することで大気中への CO_2 放出を抑制する技術。
- 実用化に当たっては、低コストで効率よく分離回収する技術開発が鍵。貯留技術は、石油・天然ガス開発等で構築された技術を応用。

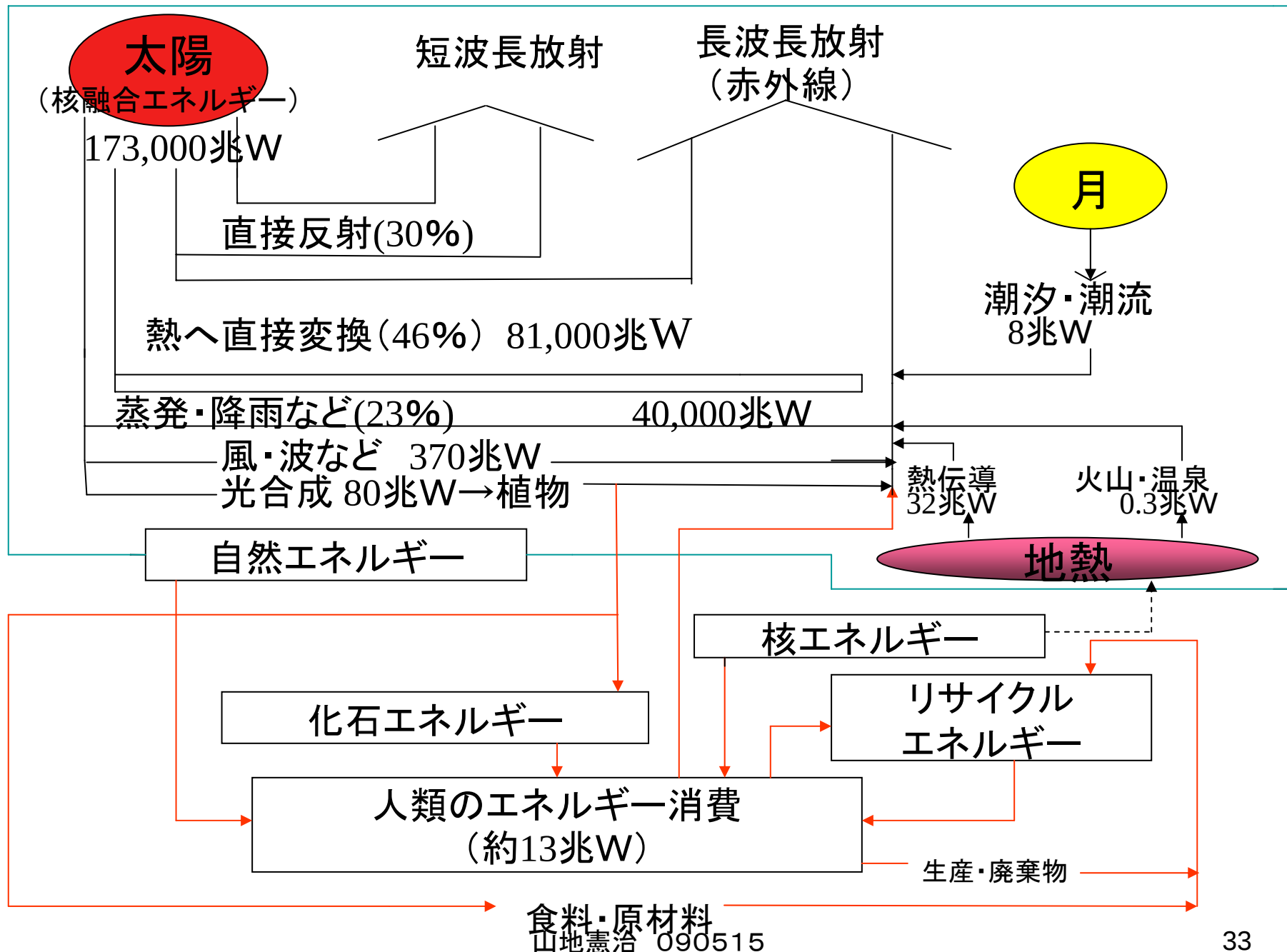
〔CCSの概要〕



「低炭素社会づくり行動計画」によると、2020年までの実用化を目指すこととされている。

化石資源の高度利用とは？

- 火力発電（特に石炭）の役割は大きい
 - 発電効率向上によるCO₂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



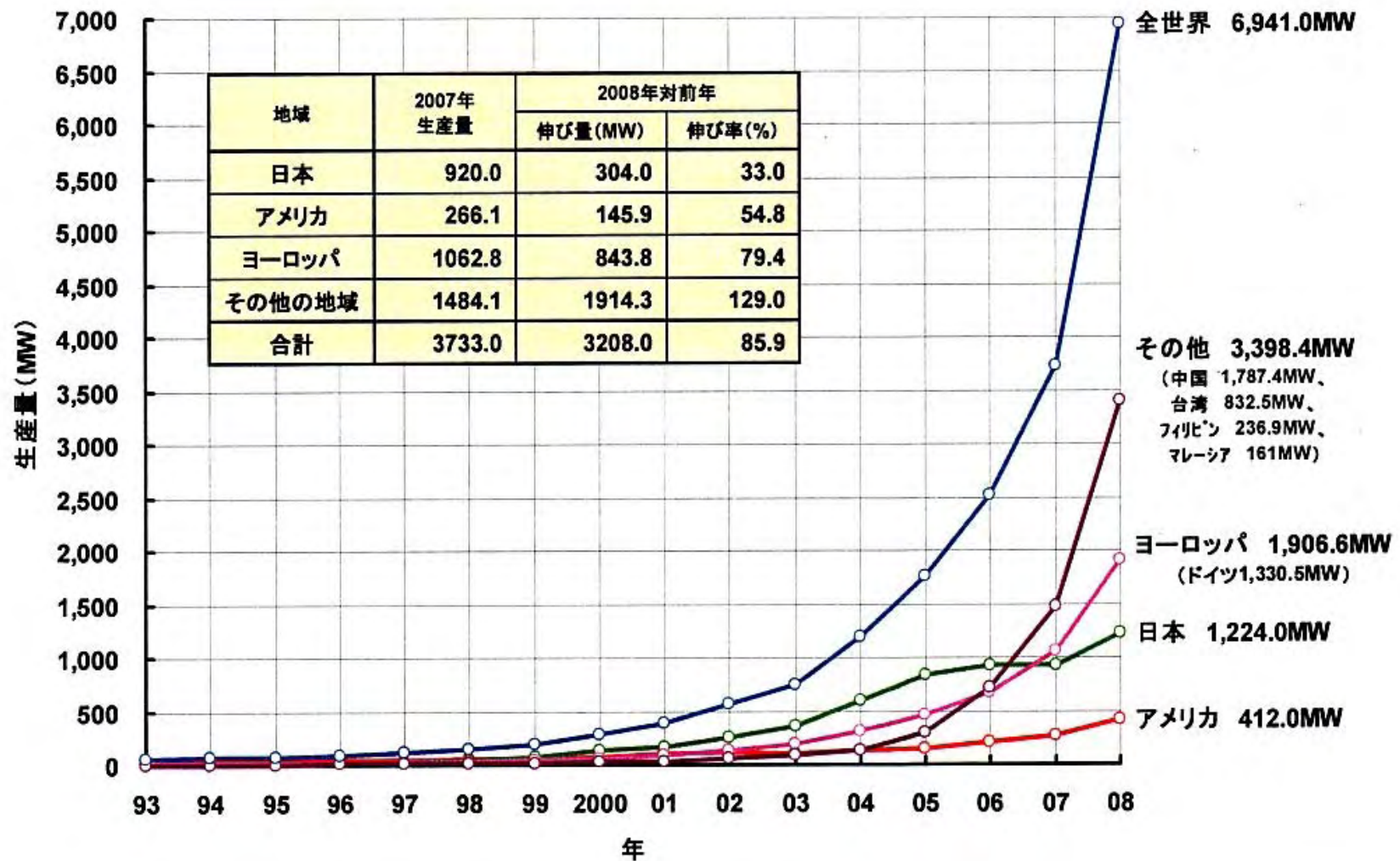


図1 世界における地域別太陽電池生産量

出典：PV News 2008 年及び 2009 年 4 月号を基に、(株)資源総合システムが作成

諸外国の風力発電導入量 (Wind Power in the World)

○2007年末現在、世界合計で93,849MWの風車が導入されており、日本は世界第13位となっている。



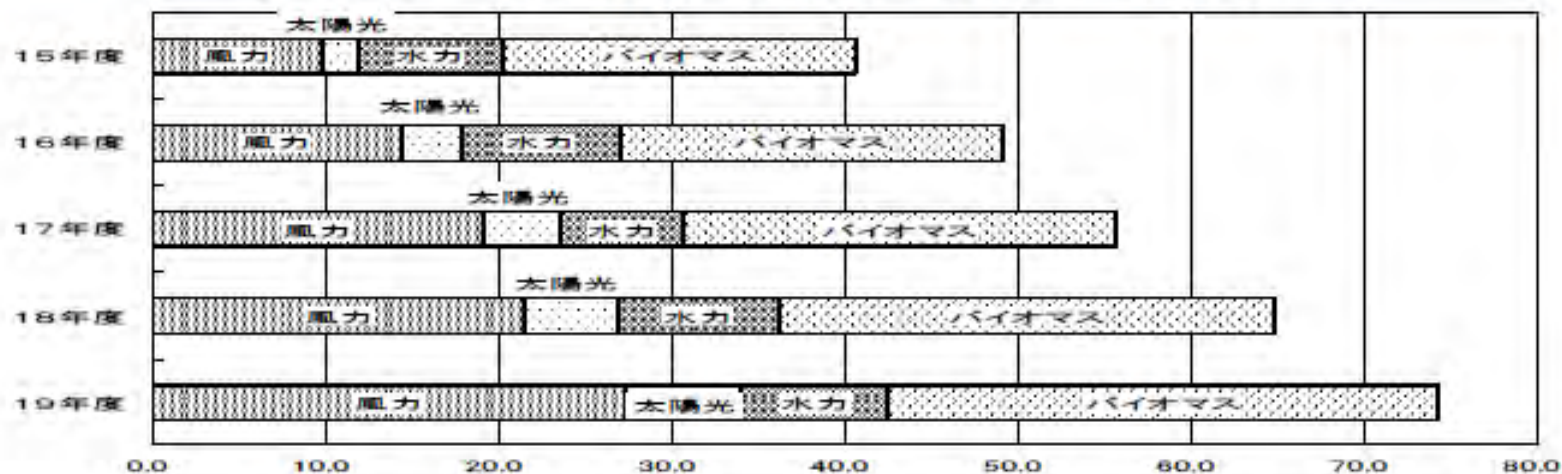
注: 2008年には米国(新設840万kW)が2520万kWとなりドイツを逆転。

山地憲治 090515

注1 出典: World Wind Energy Association(2007年末時点)
注2 MW=1,000kW

RPS法に基づく新エネ等電気の供給量の内訳

新エネルギー等発電設備からの供給総量の経年変化(億kWh)



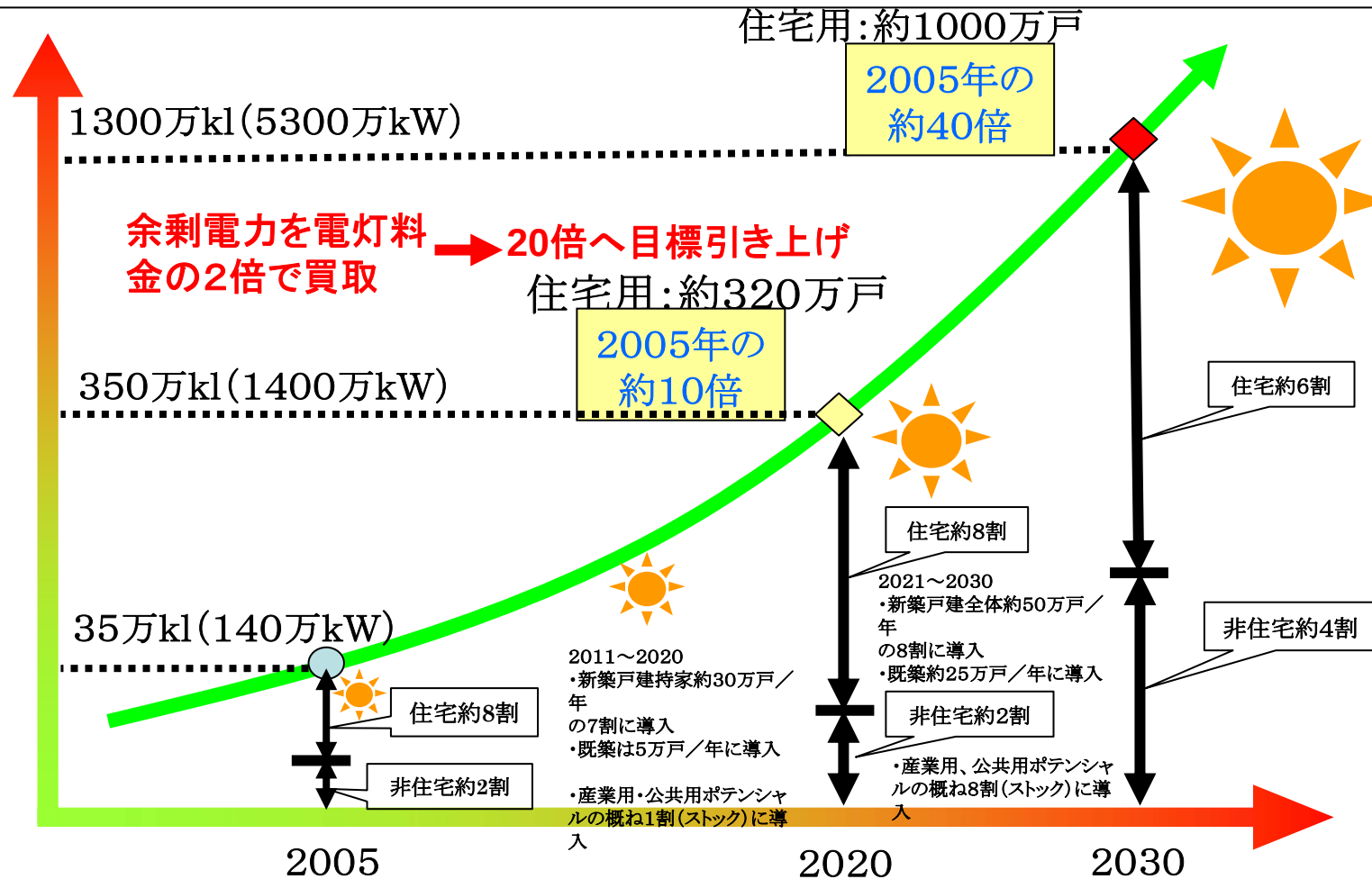
年 度	風 力	太 陽 光	水 力	バ イ オ マ ス	そ の 他	合 計
H 1 5 年 度	9.9 (24%)	2.0 (5%)	8.4 (21%)	20.4 (50%)	0.0	40.6
H 1 6 年 度	14.4	3.5	9.1	22.1	0.0	49.1
H 1 7 年 度	19.1	4.6	7.0	25.0	0.1	55.8
H 1 8 年 度	21.4	5.4	9.4	28.6	0.1	65.1
H 1 9 年 度	27.4 (37%)	6.6 (9%)	8.5 (11%)	31.7 (43%)	0.1	74.3

出典: RPS法に基づく届出によって算出
注: 水力は1000kw以下の設備のみがRPS法の対象電源

2009年2月24日:経済産業大臣がわが国でも現在の2倍程度で太陽光発電の余剰電力買取制度の導入を発表。

太陽光発電の導入シナリオ(最大導入ケース)

- 太陽光発電の導入量は、長期エネルギー需給見通しにおける最大導入ケースとし、2020年度で350万kl(1,400万kW)、2030年度で1,300万kl(5,300万kW)とした。



長期エネルギー需給見通しにおける最大導入ケースの場合の系統安定化コスト

【試算の前提】

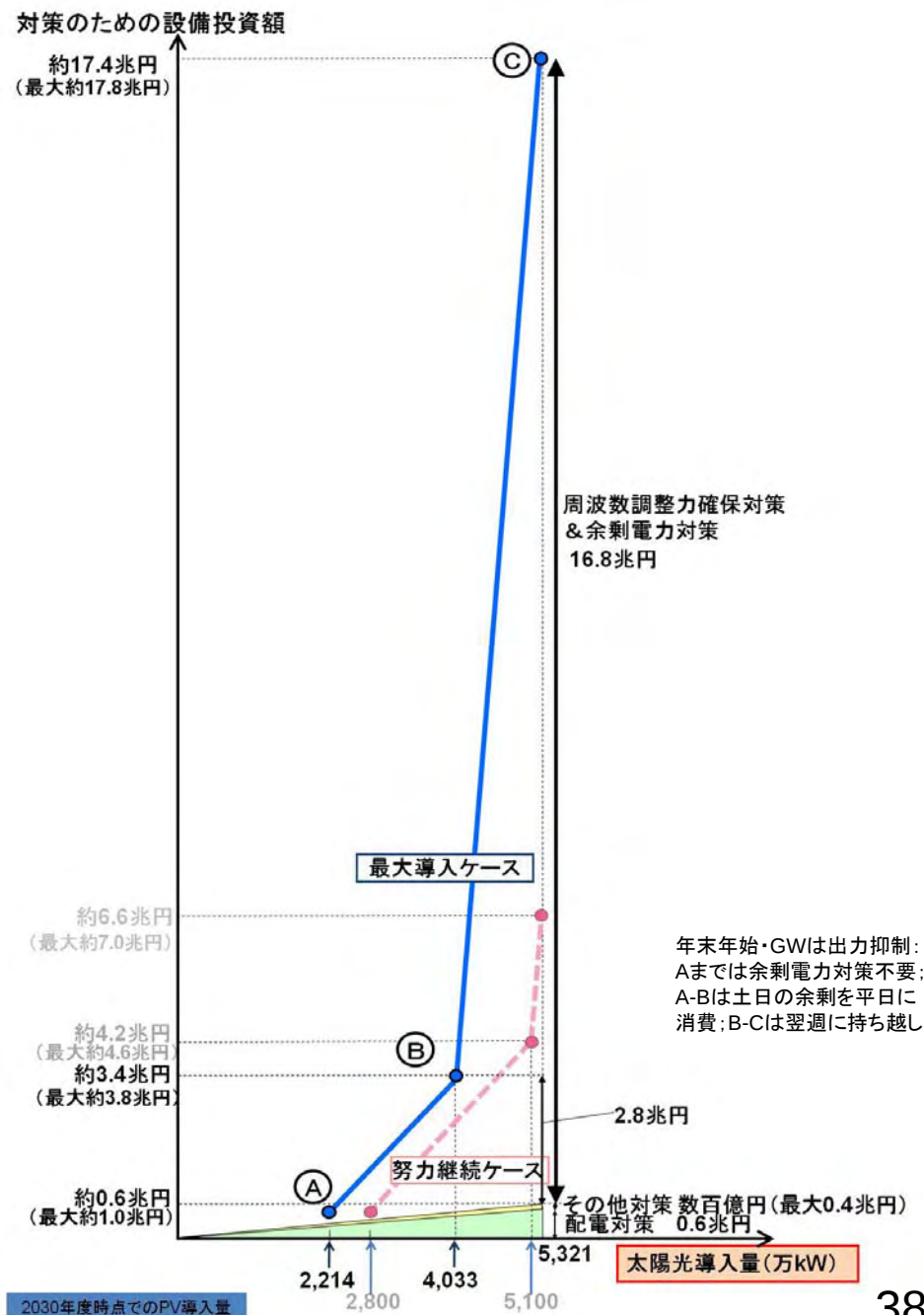
- 電力需要は長期エネルギー需給見通しによる最大導入ケースとした。
- 供給力は、第2回小委員会において、努力継続ケースを前提とした分析と予備率を不変とした。(すなわち需要が減るのと同じ割合で供給力を減らす。)
- これに伴い、電源構成比(kW,kWh)を努力継続ケースと同様にした。
- 以上を前提に同様の試算を実施。

【結果】

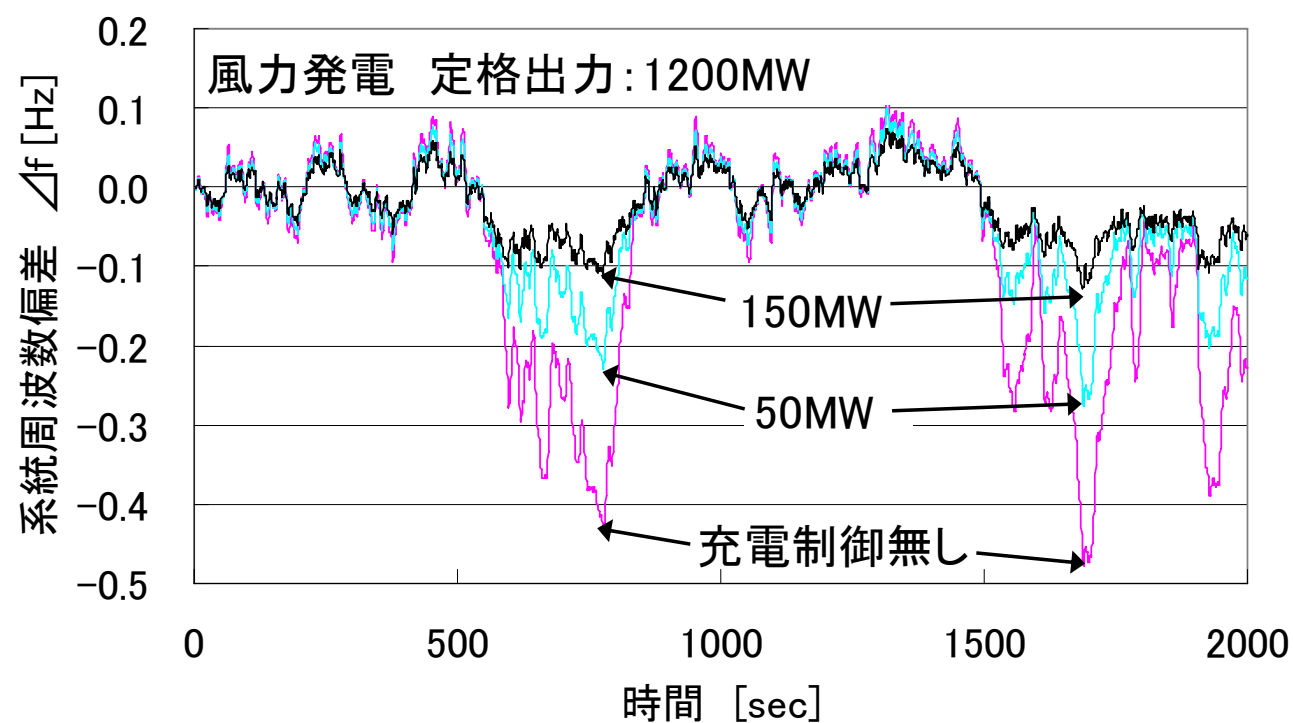
- 2030年度5,321万kWhの太陽光パネルが導入された場合には、余剰電力対策として、6.4億kWhの蓄電池が必要との結果になった。
- この蓄電容量を蓄電池(2.5万円/kWhと仮定)で確保する場合、2030年度時点で16.8兆円の費用が必要。
- これは、余剰電力が土日のみならず、平日にも発生するため晴天が続くと非常に大量の蓄電容量が必要となるためである。

(低炭素電力供給システム研究会)

山地憲治

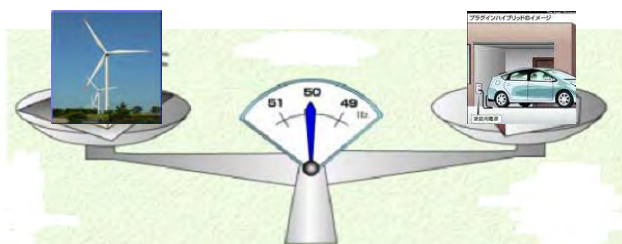


PHEVの充電制御による風力発電導入時の周波数変動の抑制効果



— 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

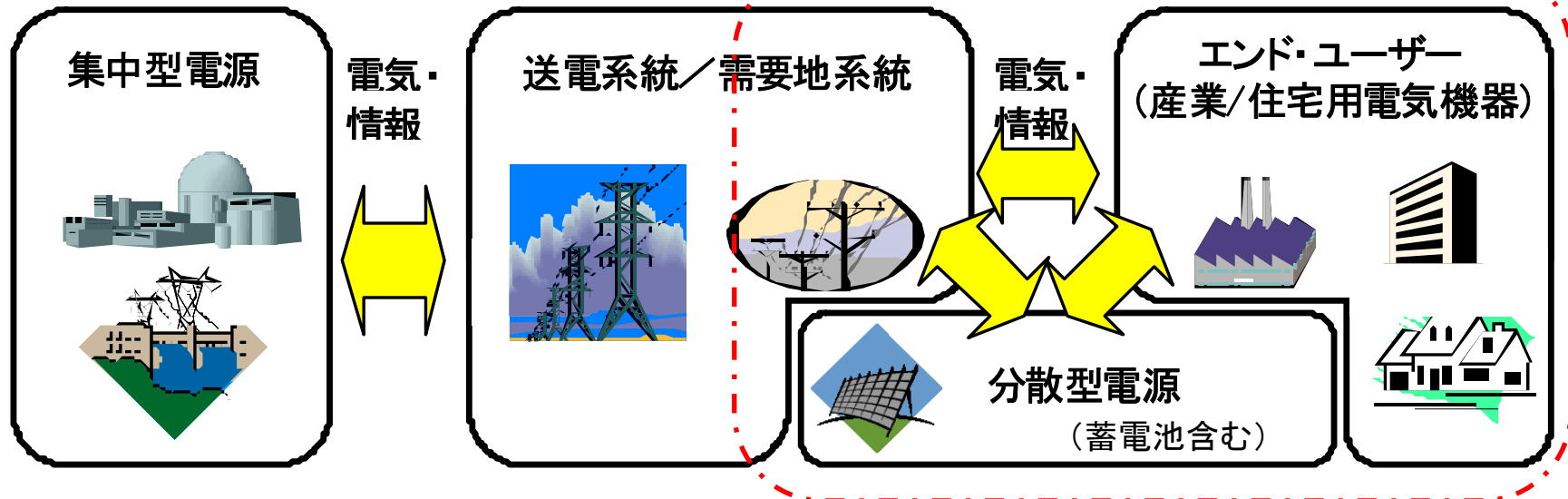
スマートグリッドとは

○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研究会資料）

再生可能エネルギーは期待に応えられるのか？

- Modern Renewablesは規模は小さいが急速拡大
 - 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、RPS拡充による市場確保、・・・
 - 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

エネルギーシステムの持続性を求めて ー理想と現実の狭間でー

- 低炭素社会の魅力と魔力：
分かり易い政治的メッセージだが、
温暖化対策における「科学と政治」の関係構築に課題
- 実現可能性のある政策展開：
 - ー原子力は不可欠：
ただし、軽水炉発電の足元を固めることが大切
 - ー電力システムにおける火力の役割の再確認：
技術の可能性(効率向上、CCS)
自然変動電源の受け皿
わが国の技術の国際展開
 - ー再生可能エネルギーの適正な評価：
分散的な不安定電源を受け入れるインフラの整備
技術革新のダイナミクスの誘導
- 技術と社会のイノベーション：
大きなシステムの中でグランドデザインを描く