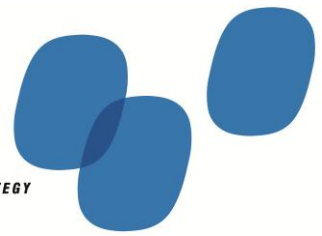




THE UNIVERSITY OF TOKYO

LCS
CENTER FOR LOW CARBON SOCIETY STRATEGY



再生可能エネルギーを中心とした 電源構成の可能性

Electricity generation system having a high share of
renewable energy

日本における再生可能エネルギーの利用拡大に向けて

International Symposium on Renewable Energy

2015年2月12日

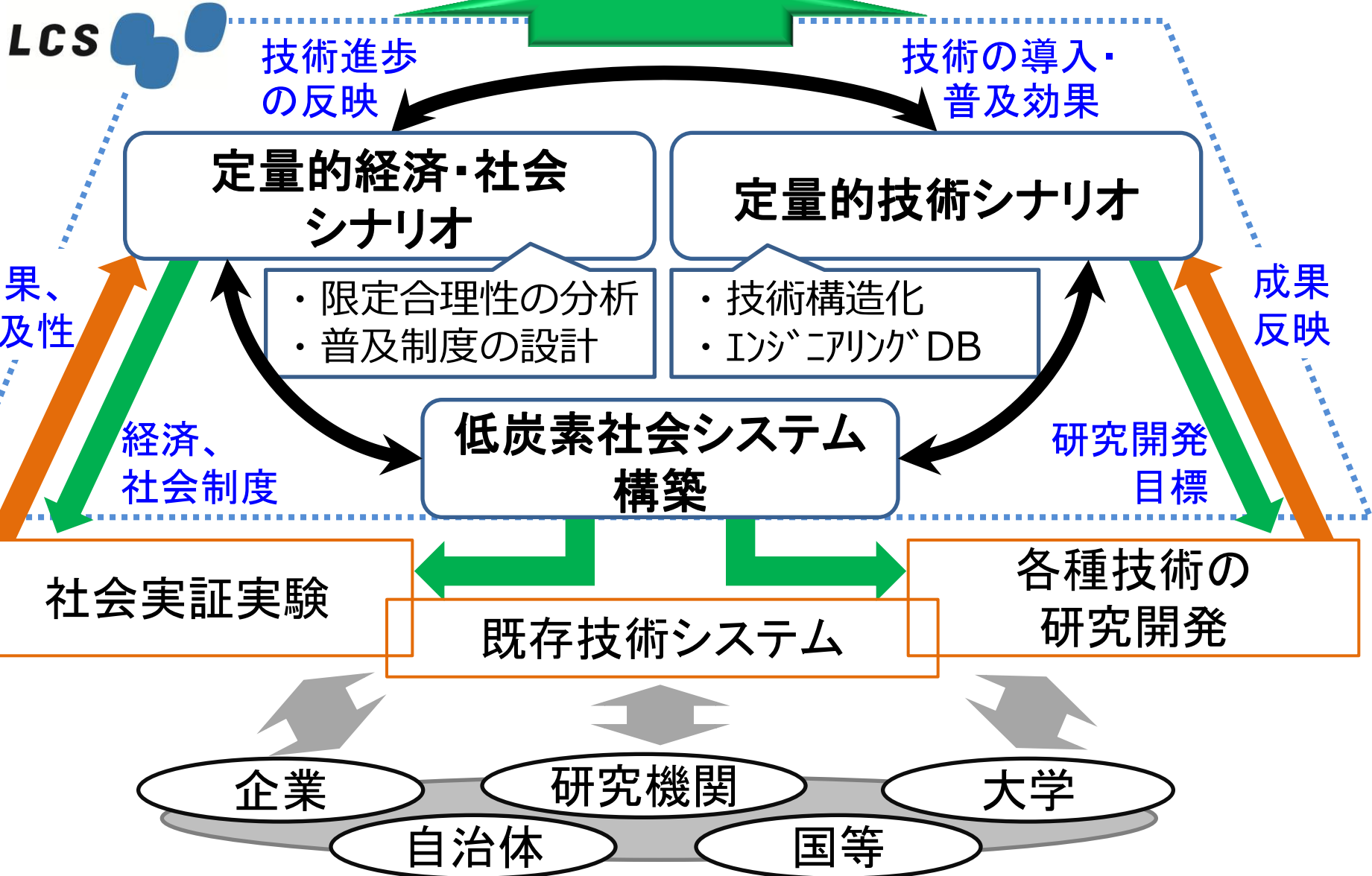
山田 興一

JST低炭素社会戦略センター

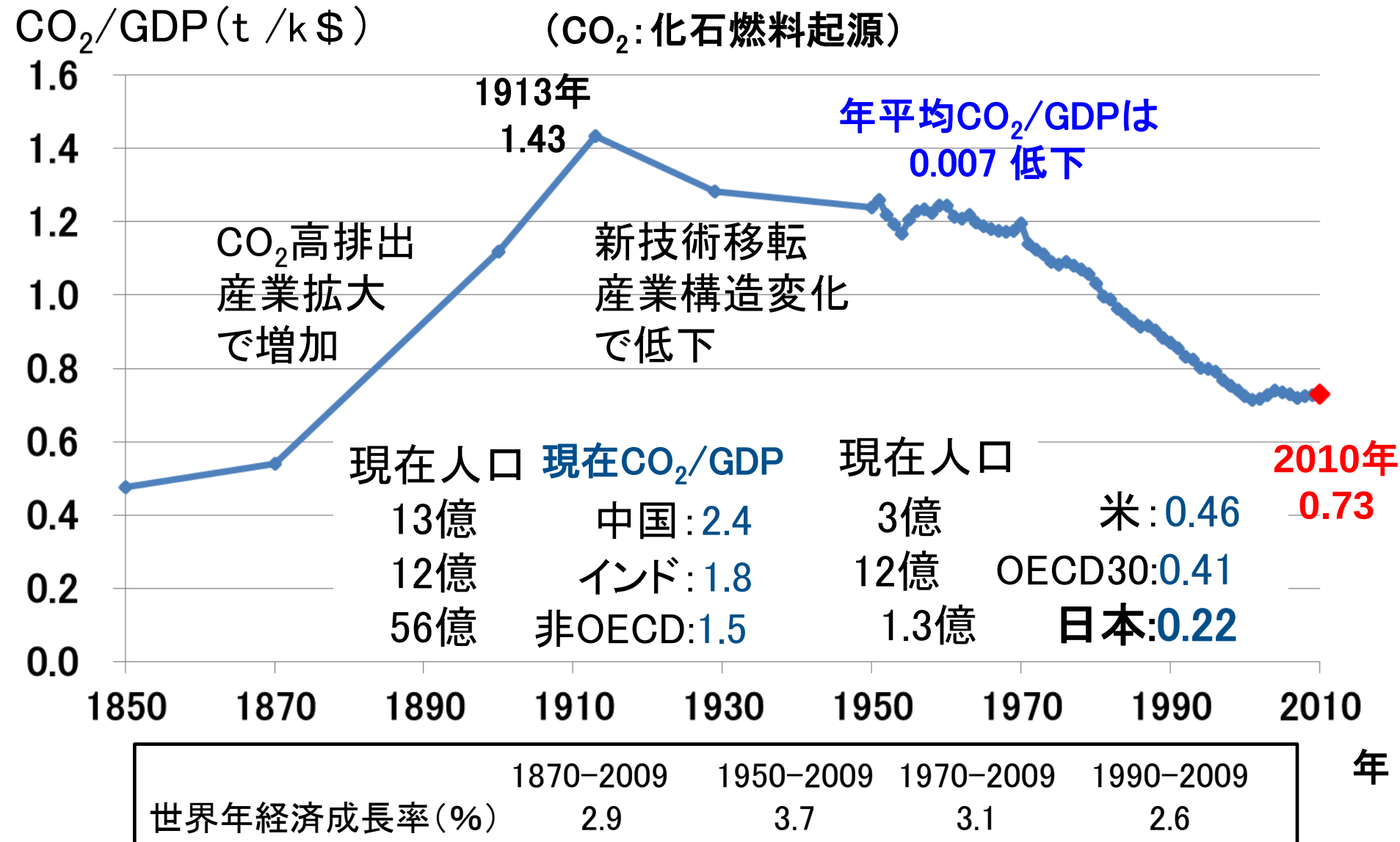
発表内容

1. 将来の地球温暖化
2. CO₂排出量削減
3. 科学技術の発展による太陽光発電(PV)システム、蓄電池のコスト削減
4. CO₂ 排出量と将来の電力コスト

明るく豊かな低炭素社会



世界のCO₂排出量/GDP比の変遷



【出典】1971-2010年: GDP、CO₂ともにEDMC(日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット)のデータバンクのデータで計算。1970年以前: GDPはアンガス・マディソン著『世界経済の成長史 1820~1992年』、CO₂はBoden, T.A., G. Marland, and R. J. Andres, 'Global, Regional, and National Fossil Fuel CO₂ Emissions,' Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. doi 10.3334/CDIAC/00004_V2010. 等からのデータで計算。なお、1971-2009年のGDPは2000年基準、1970年以前は1990年基準のため、1971年比率でつなげ2000年基準に合わせた。

温度上昇計算式

$$C_t / GWP_t = 0.73 \times 1.2 \times (1 - ADR (t - 2009)) \quad (t \text{はAD})$$

$$GWP_t = 40,300 (1 + \text{GWP年成長率}^{t-2009})$$

$$\Delta T = 0.46 (0.5 + 10^{-6} C_t) \quad (\Delta T: 1870 \text{以降の温度上昇})^{\times}$$

ADR : C_t / GWP の年間減少値 (t-CO₂/M\$)

GWP_t : 2009年以降の世界総生産 (B\$)

C_t : CO₂e 累積排出量 (2009年以降のMt-CO₂e)

$$CO_2e = 1.2 CO_2$$

世界経済成長率を仮定すると温度上昇 ΔT が計算できる.

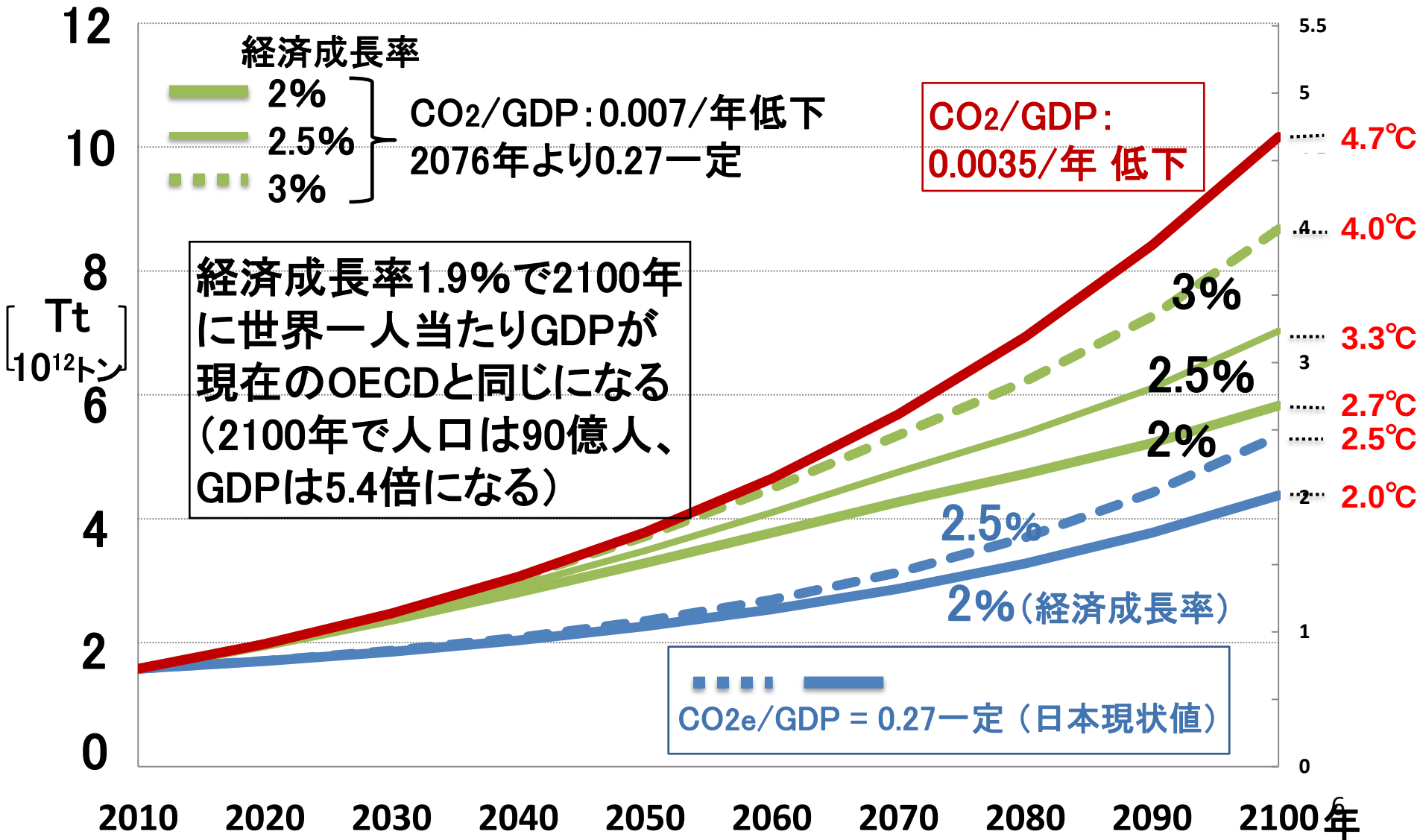
※ H.D.Matthews らNature 459 (June 09)による

累積CO2e排出量と温度上昇

(パラメータ: 経済成長率とCO₂/GDP)

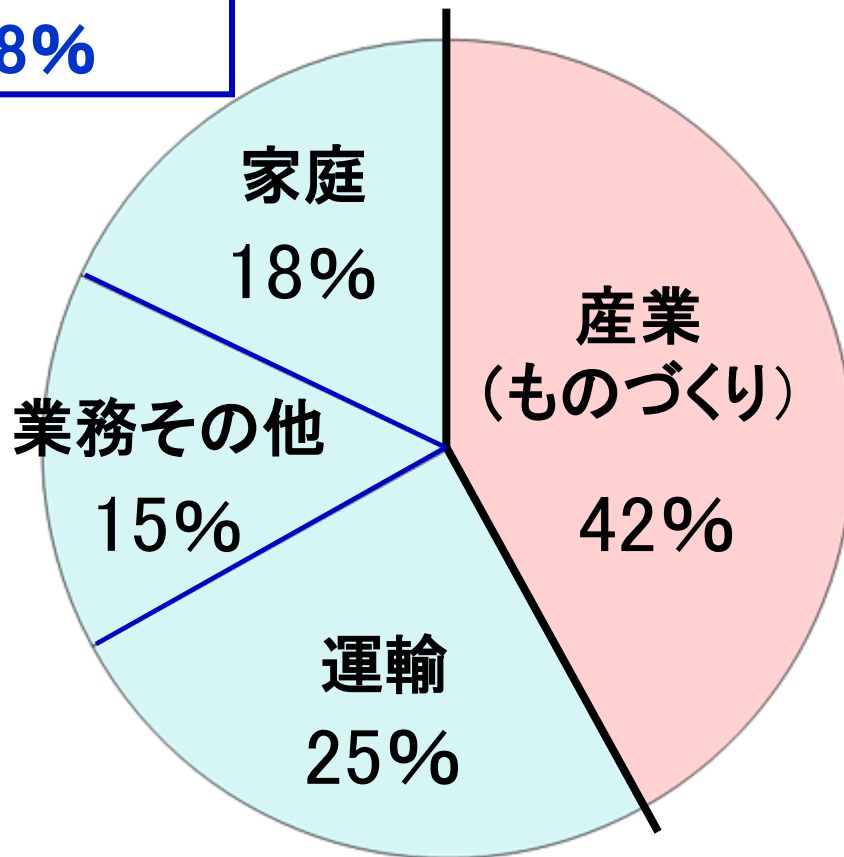
累積CO₂e排出量(Tt) (CO₂e: GHGのCO₂換算量)

温度上昇(°C)



日々の暮らしとものづくりからの CO₂ 排出量

日々の暮らし
58%



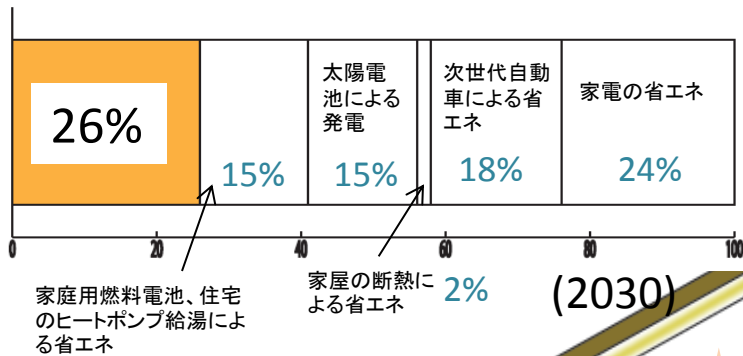
CO₂ 総排出量
1.1Gton (2009年)

Producing energy
has approached
a theoretical value.

CO₂ emissions from
electric power ; 52%

日々の暮らしにおけるCO₂削減と省エネ製品によって低炭素社会が実現

省エネ対策で家庭のエネルギー使用量は1/4になる



※家庭の構成人数や年齢、住んでいる地域や使用する家電製品など、家庭の状況によって変わる。
※「家屋の断熱」については、他の省エネ対策と相補的な関係にある。ここでは他の対策に割り振られていないものを「断熱の効果」としている。

エネルギー効率の良いエアコン
電気代の節約

家庭用燃料電池、住宅の
ヒートポンプ給湯等による
エネルギー効率改善

低燃費車、ハイブリッド車等の利用

LED電球による省エネ
電気代の節約

年収500～550万円世帯の例(12万円/年)

太陽光発電による再生可能エネルギーの利用
電気代の節約

2010年製のエアコン
年間消費電力量850kWh

快適な生活、健康

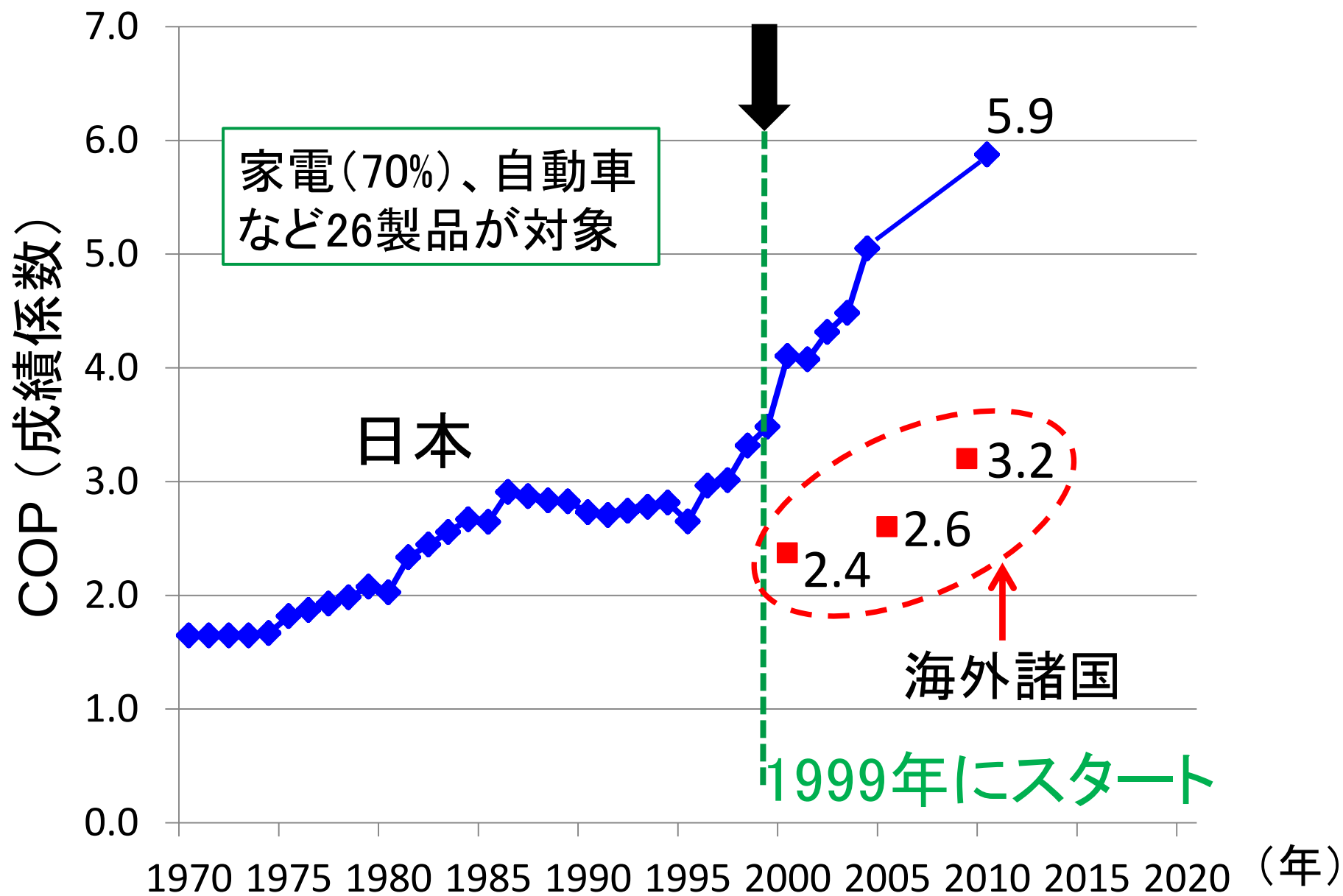
2010年製の冷蔵庫
年間消費電力量220kWh

断熱材の利用
空調費用の節約

エネルギー効率の良い冷蔵庫
電気代の節約

二重窓による断熱性の向上
空調費用の節約 8

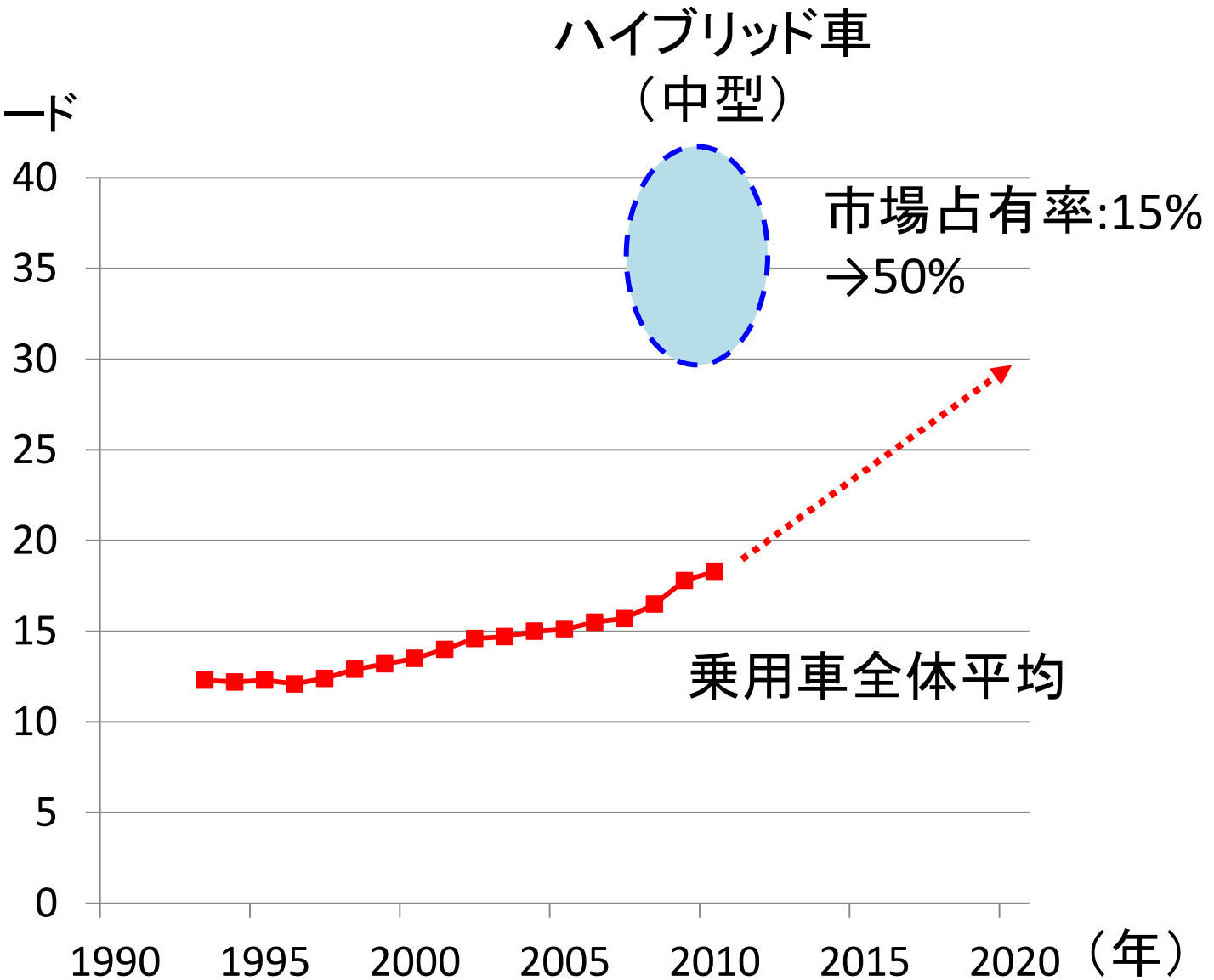
トップランナー方式によるエアコン効率向上



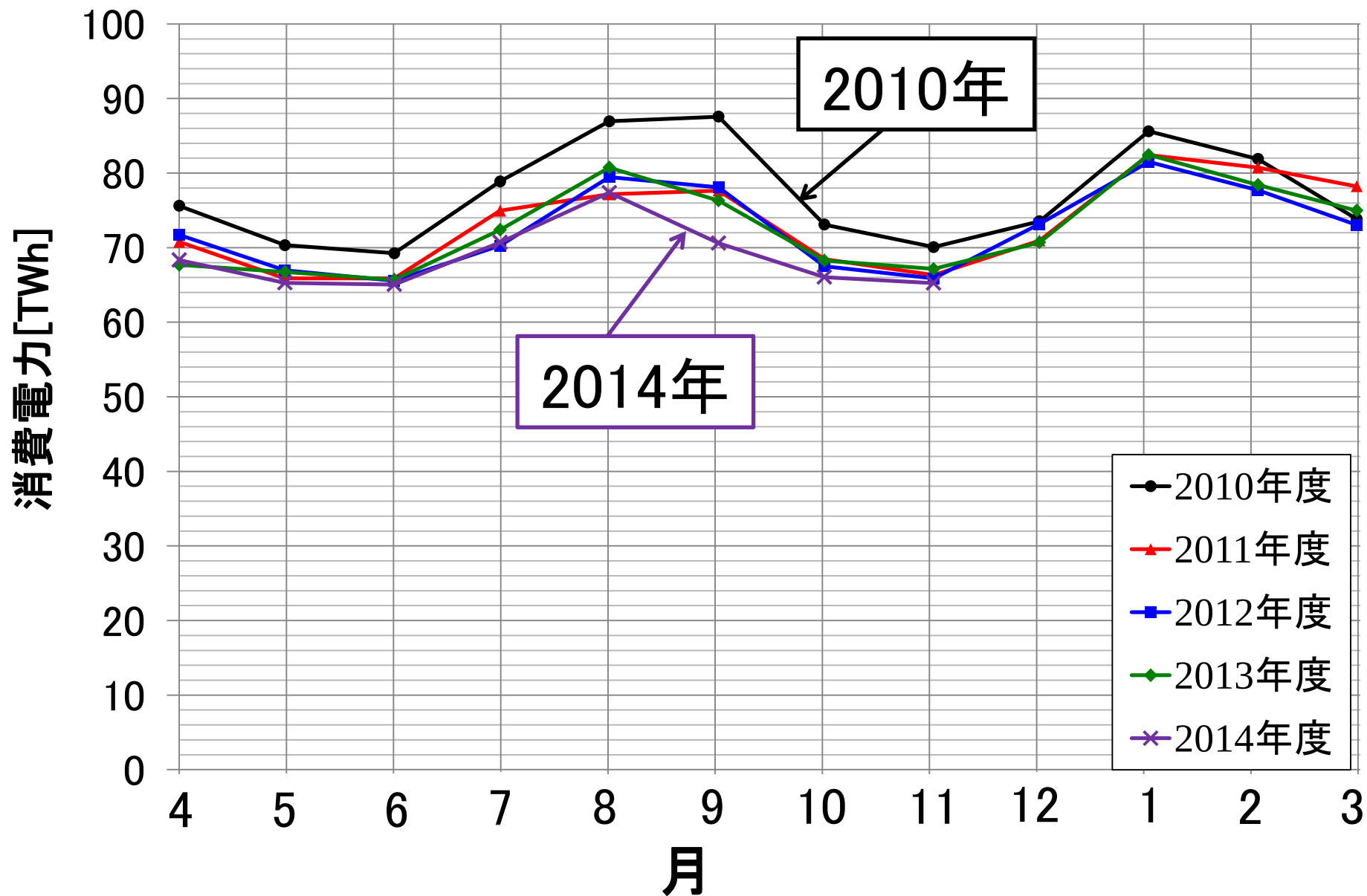
乗り物のエネルギー向上（日本）

※10-15 モード

燃費平均値(km/L)



日本における月消費電力合計値



最近の電力使用状況

年度	ピーク電力 (GW)			発電電力量 (TWh)
	夏季最大	冬季最大	平日最小	
2010	176 (日にち:8/23)	156 (1/31)	115 (5/13)	979
2011	155 (8/10)	154 (2/2)	107 (5/31)	927
2012	154 (7/27)	144 (1/18)	107 (5/11)	913
2013	158 (8/9)	148 (2/14)	106 (5/17)	912
2014	151 (7/25)		104 (5/23)	
<u>2013</u> 2010	89.4%	95.1%	92.4%	93.2%

(GW = 10億W TWh = 1兆Wh)

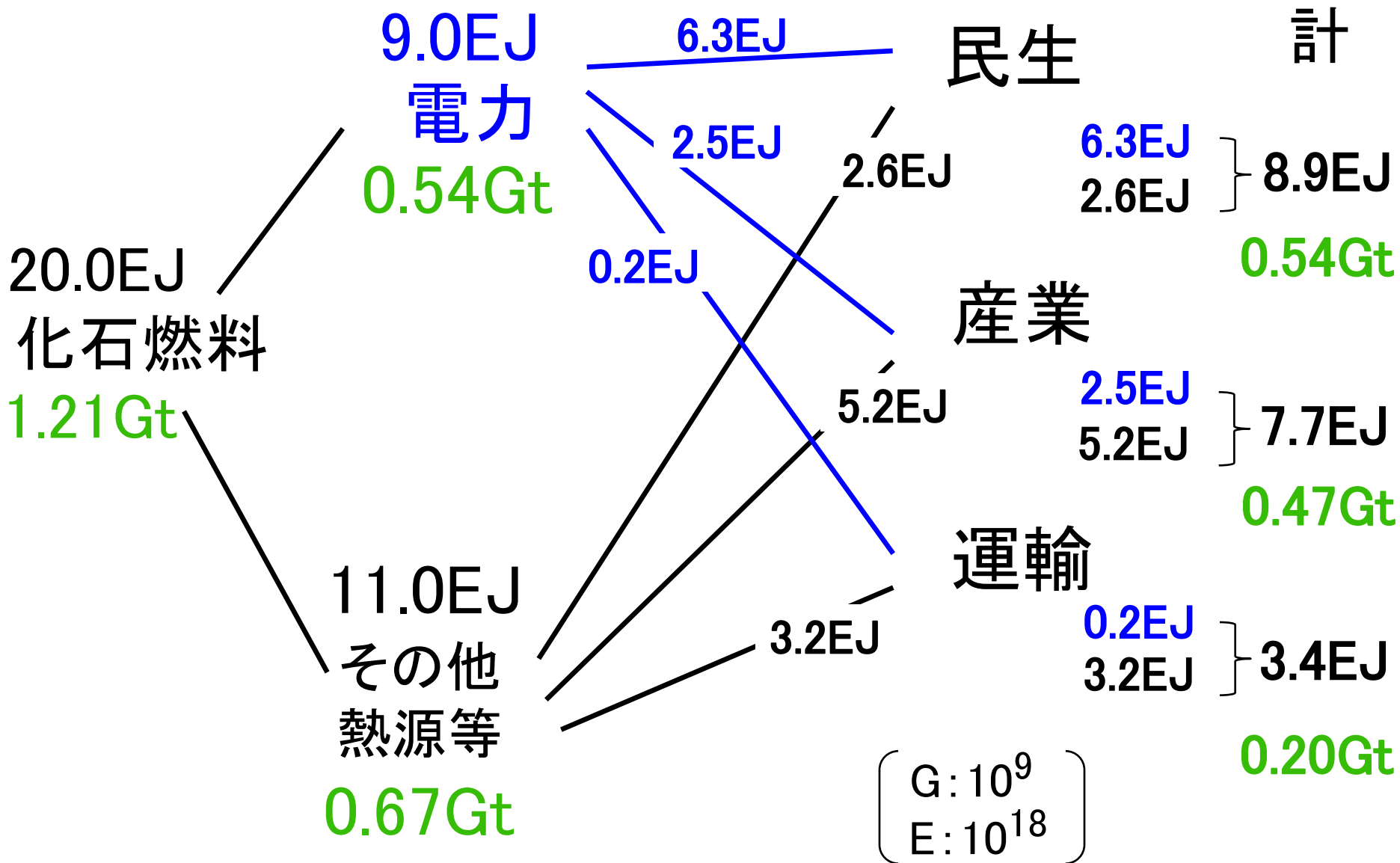
2030年の省エネ、再生可能電力導入計算基準

- 1: 2012年の化石燃料使用エネルギー、そのCO₂排出量を基準とする(20.0EJ, 1.21Gt-CO₂)。
- 2: 2030年の電力消費量を2012年に比べて25%減の800TWhとする。その内、火力発電は400TWhとして、原子力は100TWh, 再生可能電力は300TWhとする。
- 3: 分野別の省エネルギー割合は以下のように仮定した。

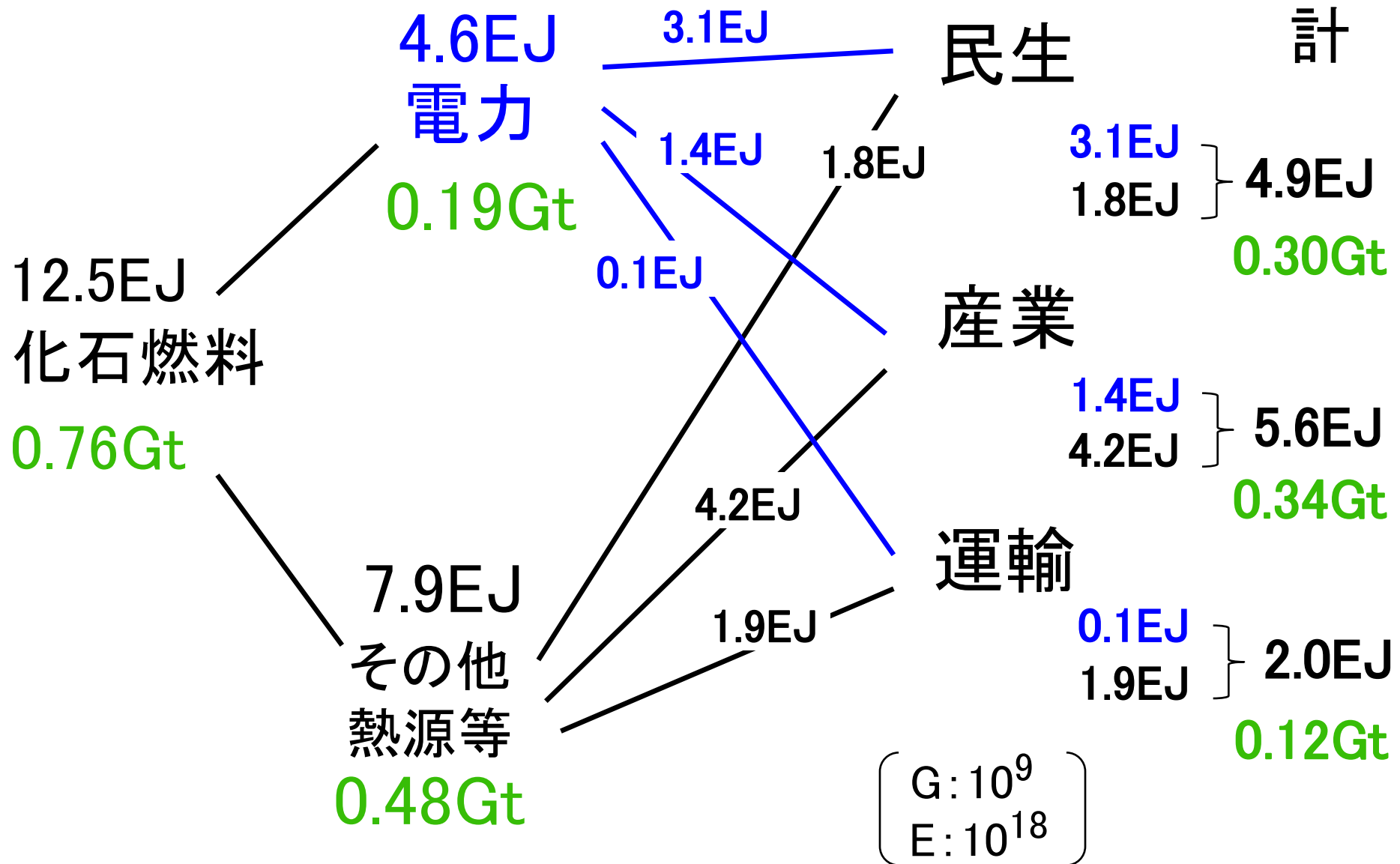
分野別 2030年省エネ率等(2012年比)

分野	省エネ率(%)		電力用化石燃料 減少率(%)
	電力	熱 その他	
民生	30	30	42
産業	20	20	42
運輸	20	40	0

分野別1次エネルギー消費・CO₂排出割合 (2012年: 20.0EJ, 1.21Gt-CO₂)



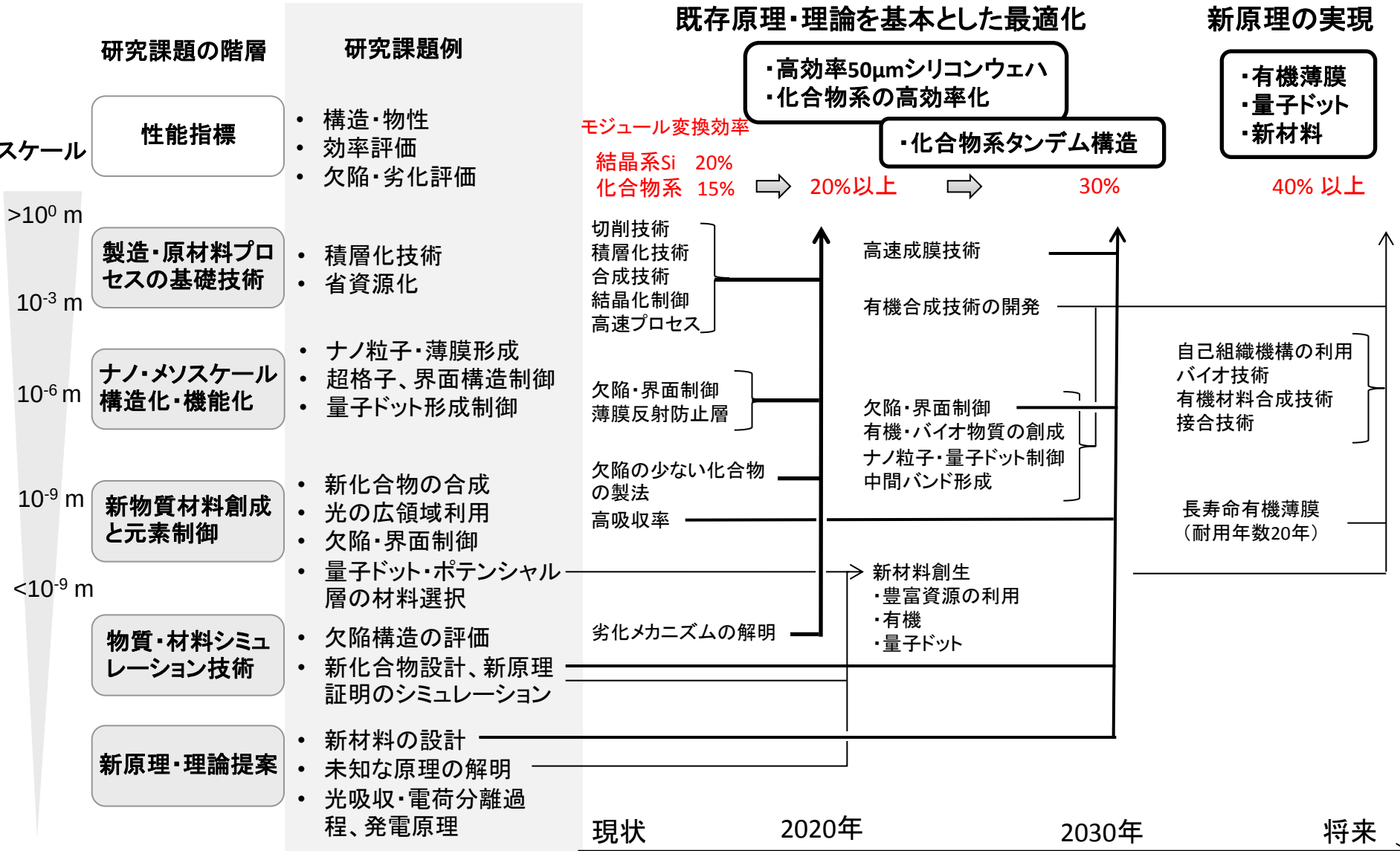
分野別1次エネルギー消費・CO₂排出割合 (2030年～: 10.7EJ, 0.65Gt-CO₂)



太陽電池の科学・技術ロードマップ

国内の太陽光発電システム原価の展望 (円/w)

	現状	2020年	2030年	新PV
モジュール	80	50	40	20
周辺システム (BOS)	80	50	20	20
システム全体	160	100	60	40



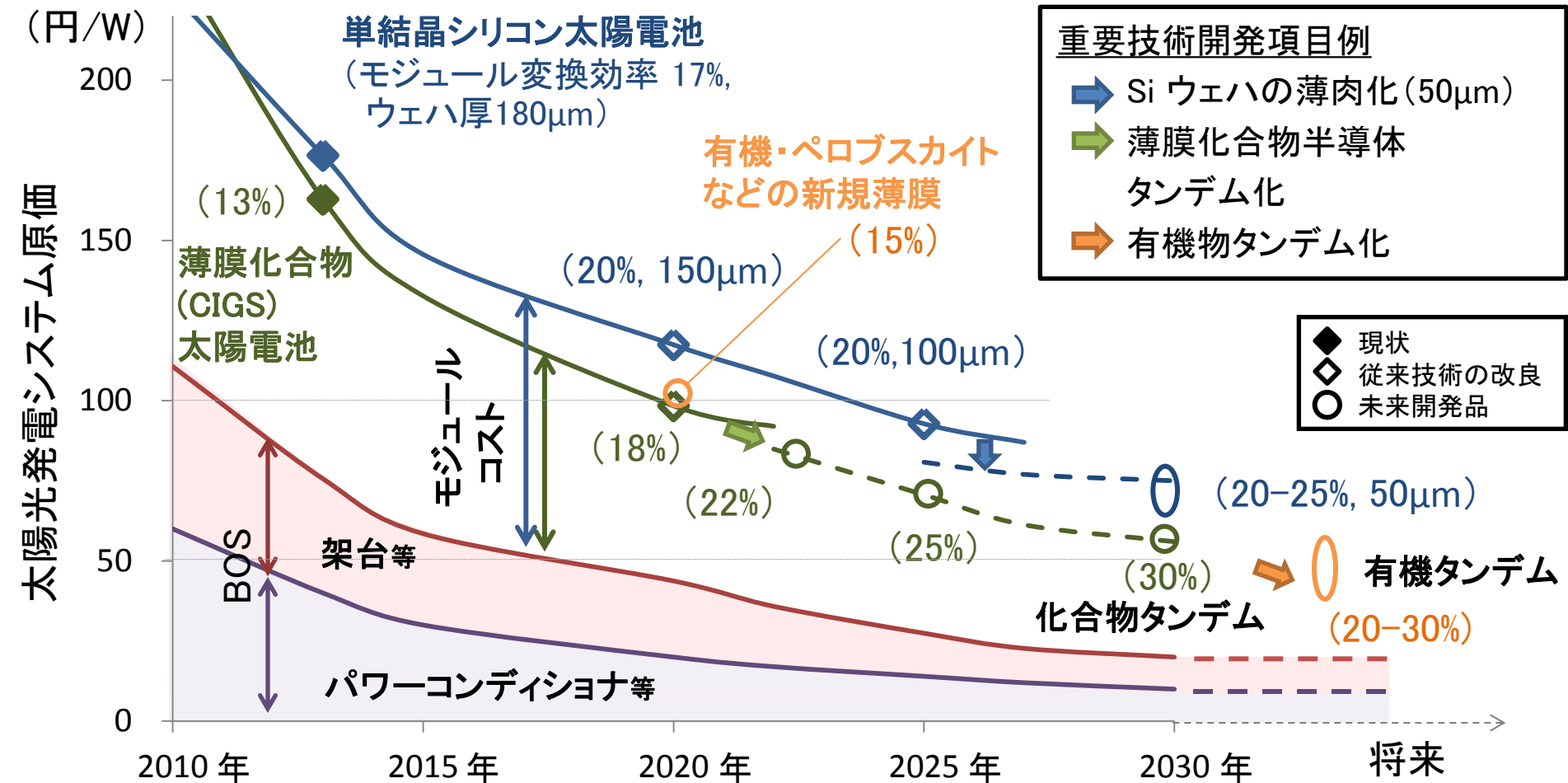
太陽光発電システム原価の内訳 コスト内訳(円/W)

技術レベル		現状		2020		2030	
太陽電池		単Si 180μm 厚	CIGS	CIGS	新規薄膜	単Si 50μm厚	新CIGS タンデム
モジュール変換効率		17%	13%	18%	15%	20%	30%
年間生産量 (GW/年)		1	1	5	1	5	5
製造コスト	変動費(原材料費)	76	59	40	34	39	29
	変動費(用役費)	5	2	1	2	2	1
	固定費(設備費・人件費)	22	18	9	12	6	7
モジュール小計(円/W)		103	79	50	48	47	37
S O B	架台 (工事費含む)	33	44	27	32	12	10
	パワーコンディショナ	40	40	20	20	10	10
BOS小計 (円/W)		73	84	47	52	22	20
システム全体 (円/W)		176	163	97	100	69	57
重量当たり (円/g)		1.5	0.7	0.6	0.6	1.0	0.7
CO ₂ ペイバックタイム(年※)		2.5	1.2	0.9	—	1.4	0.5

(G:10⁹)

※年間発電量を1kWh/W、電力源排出量479g-CO₂/kWhとする

太陽光発電システム原価の展望



		2013 年	2020 年	2030 年	将来(新PV)
年間生産量		1 GW/y	5 GW/y	5 GW/y	1 GW/y 以上
耐用年数		20 年	20 年	30 年	20 年以上
システム 原価	モジュールコスト	79 円/W	50 円/W	37 円/W	24 円/W
	周辺システム(BOS)	84 円/W	47 円/W	20 円/W	20 円/W
	システム全体	163 円/W	97 円/W	57 円/W	44 円/W
発電コスト		18 円/kWh	11 円/kWh	5 円/kWh	4 円/kWh

円筒型蓄電池の製造コスト展望

	現状	2020年	2030年
正/負極活物質	LiCoO ₂ /黒鉛	Co-Li ₂ O/Si ※	Co-Li ₂ O/Si※
生産規模[GWh/y]	1*	10	10
収率[%]	66*	90	90
正/負極容量密度 [mAh/g]	150/400	350/900	580/1400
蓄電容量 [Wh _{ST} /電池]	8.6	9.5	15.4
エネルギー密度 [Wh _{ST} /kg]	200	260	430
製造コスト[円/Wh _{ST}]	18	8	5

*10GWh/y, 収率90%: 13円/Wh_{ST}

※現状: 12円/Wh_{ST}(170Wh_{ST}/kg)

電源別 受電端発電単価

単位：円/kWh

	太陽光	風力	その他 RE	水力	原子力	LNG
2030年 (LCSによる試算)	6.0	8.2	13.0	4.9	14.0 (7.3)	10.6 ~13.2 (9.4)

(2010年における平均発電単価：11円/kWh) * () : 2010年における単価

電源別 CO₂排出原単価

単位：g-CO₂/kWh

	水力	LNG	石炭	原子力
2010年	11	490	940	20

* 日本の発電からのCO₂ (2005) : 516 Mton

再生可能エネルギーによる発電コストとポテンシャル

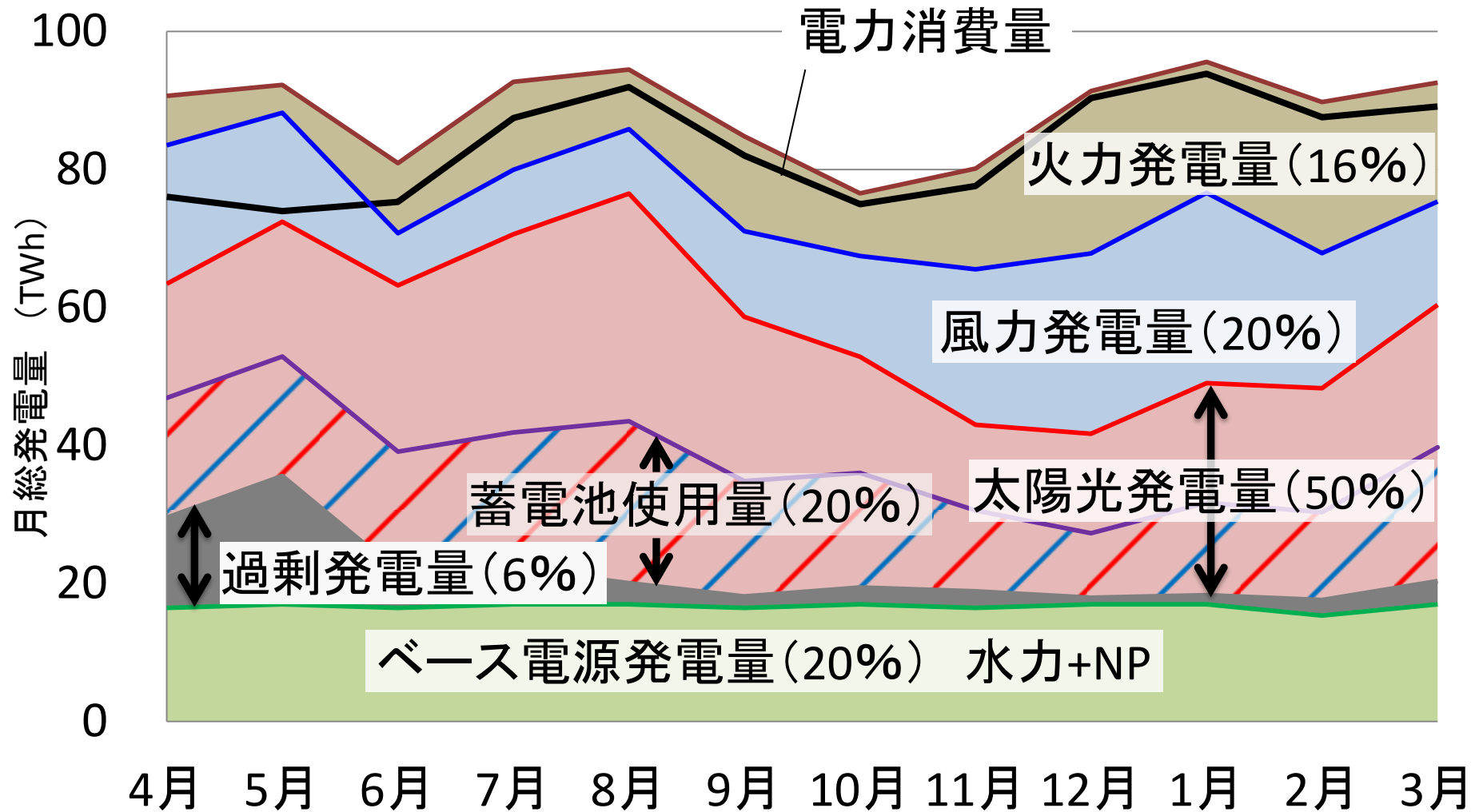
	コスト(円/kWh)		発電ポテンシャル (TWh/y)
	現在	2030年	
太陽光	24	6	>400
風力(陸上)	16	8	>500
地熱	25	<25	60
小水力	30	15	70
バイオガス※	16(13)	13(10)	15 ※
バイオマス(樹木)	31(8)	12(4)	40

() 数値は燃料費

年間電力消費: 1000TWh

バイオガス※: 下水処理・食品残渣からのメタン($5 \times 10^9 \text{m}^3/\text{y}$)
(0.1, 0.05 t-乾体/人・y)

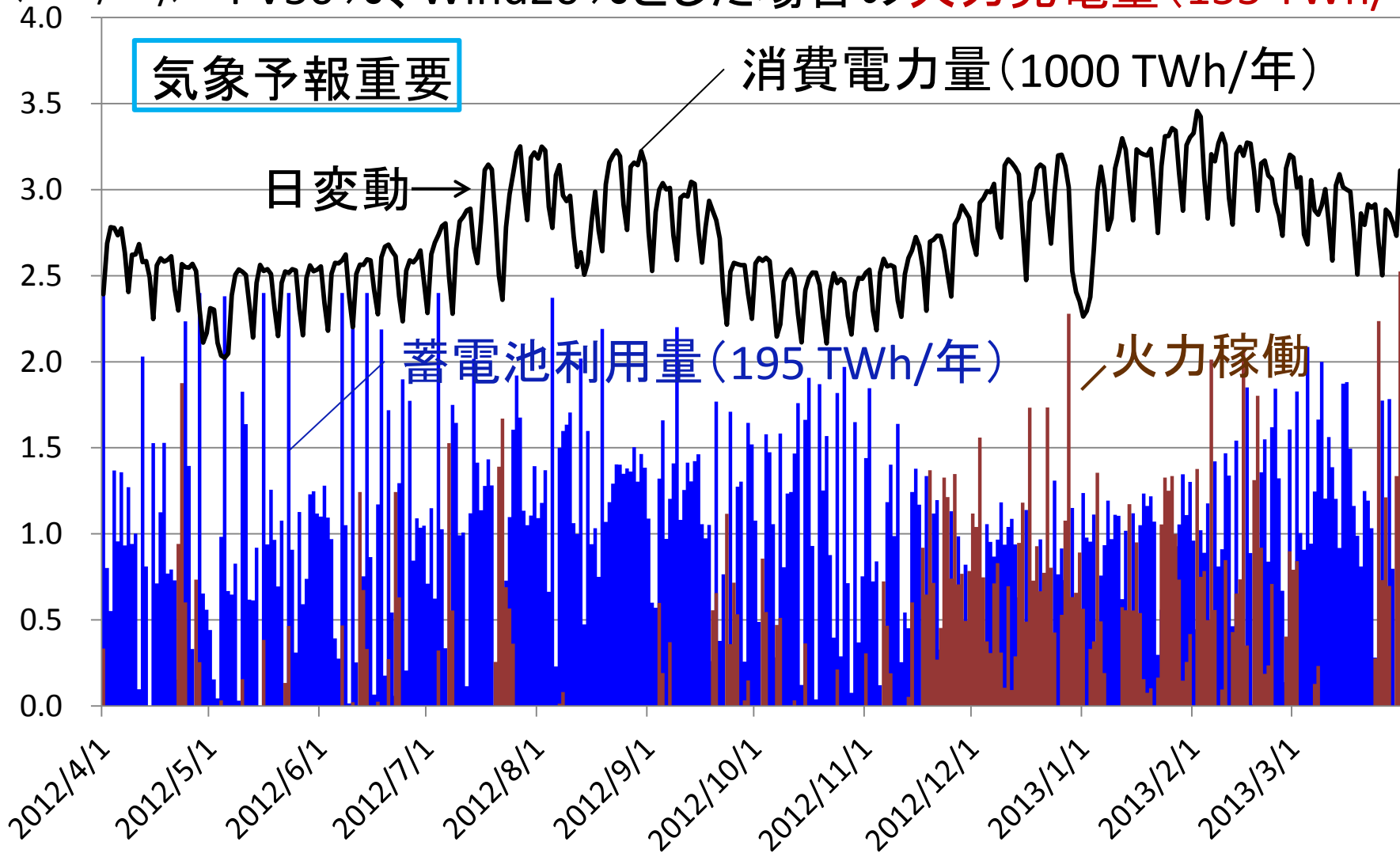
ケース「将来②」太陽光50%・風力20% 導入における全国の発電量



ケース「将来②」ではRE導入ポテンシャルの最大まで導入を仮定。太陽光発電量(50%)、風力発電量(20%)の時間変動を考慮。(カッコ内は年間総発電量比)

1日の消費電力量と火力発電量、蓄電池利用量の推移

(TWh/Day) PV50%、Wind20%とした場合の火力発電量(155 TWh/年)



各シナリオの結果

(簡易モデル
GF制約なし)※

シナリオ		2010	2012	2030 基準	2030 省エネ		2050
電力需要 (TWh)		1,157	1,093	1,053	872	868 ¹⁾	870
電力供給量 (TWh)	PV	2	7	100	100		360
	Wind	4	6	100	100		240
	水力	90	84	100	100		100
	その他 RE	1	1	30	30		100
	原子力	288	16	100	100		0
	火力	772	979	623	442	438	70
	(余剰) ²⁾	(0)	(0)	(0)	(29)	(30)	(30)
蓄電池容量(GWh-ST)		0	0	21	13	13	1200
CO ₂ (Mt-CO2/y)		571	716	493	372	319	121
Cost (¥/kWh)		10.6	12.7	11.0	12.0	12.4	12.2

CO₂, Cost は LCS 試算値。技術進展効果を考慮している。

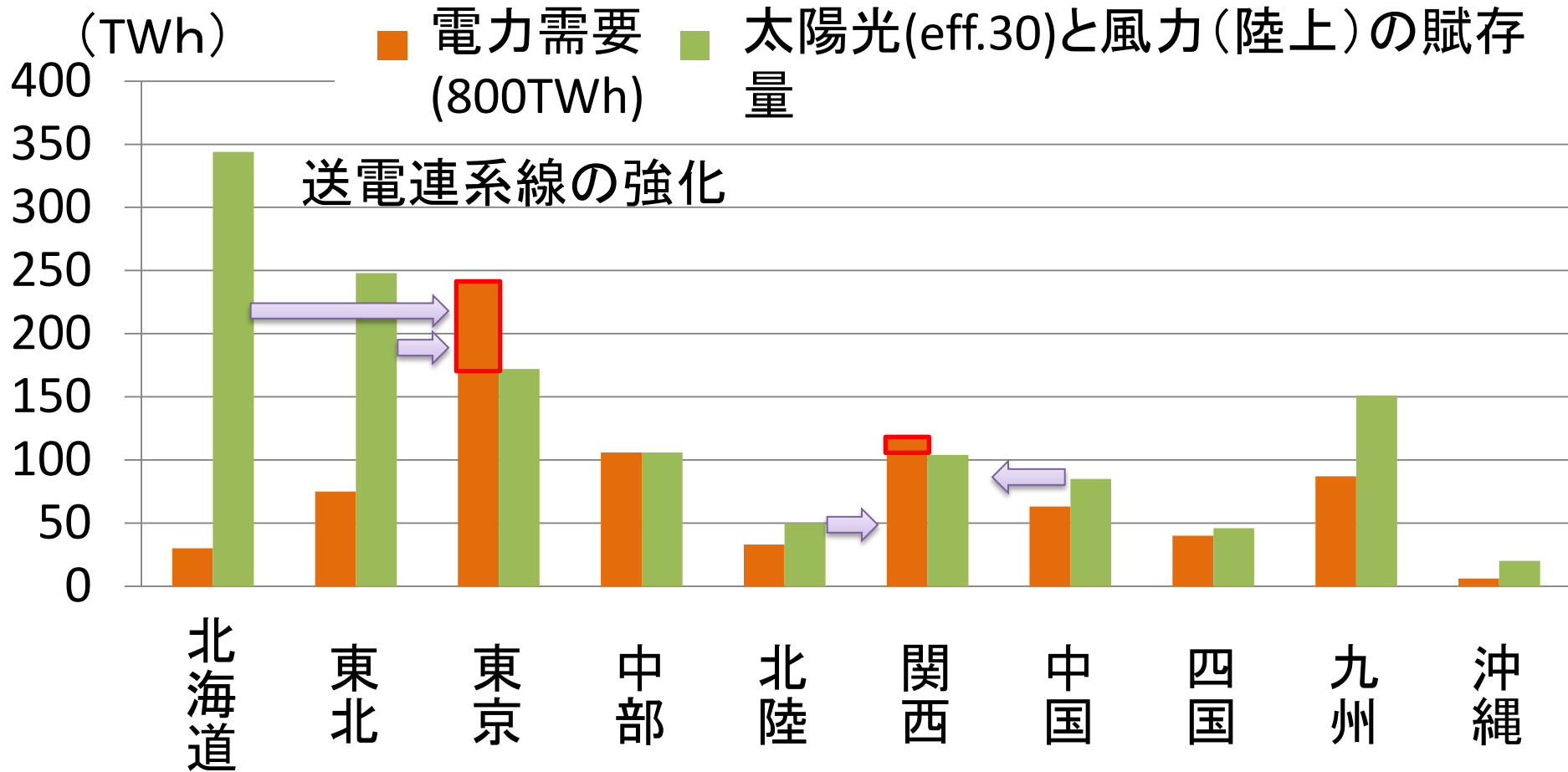
原子力を7.5円/kWh⇒14円/kWh(2030年)とする

1) CO₂ 削減シナリオ, 石炭 : LNG ≒ 1:3

2) 余剰電力は既設送電線未強化シナリオにおいて発生する量

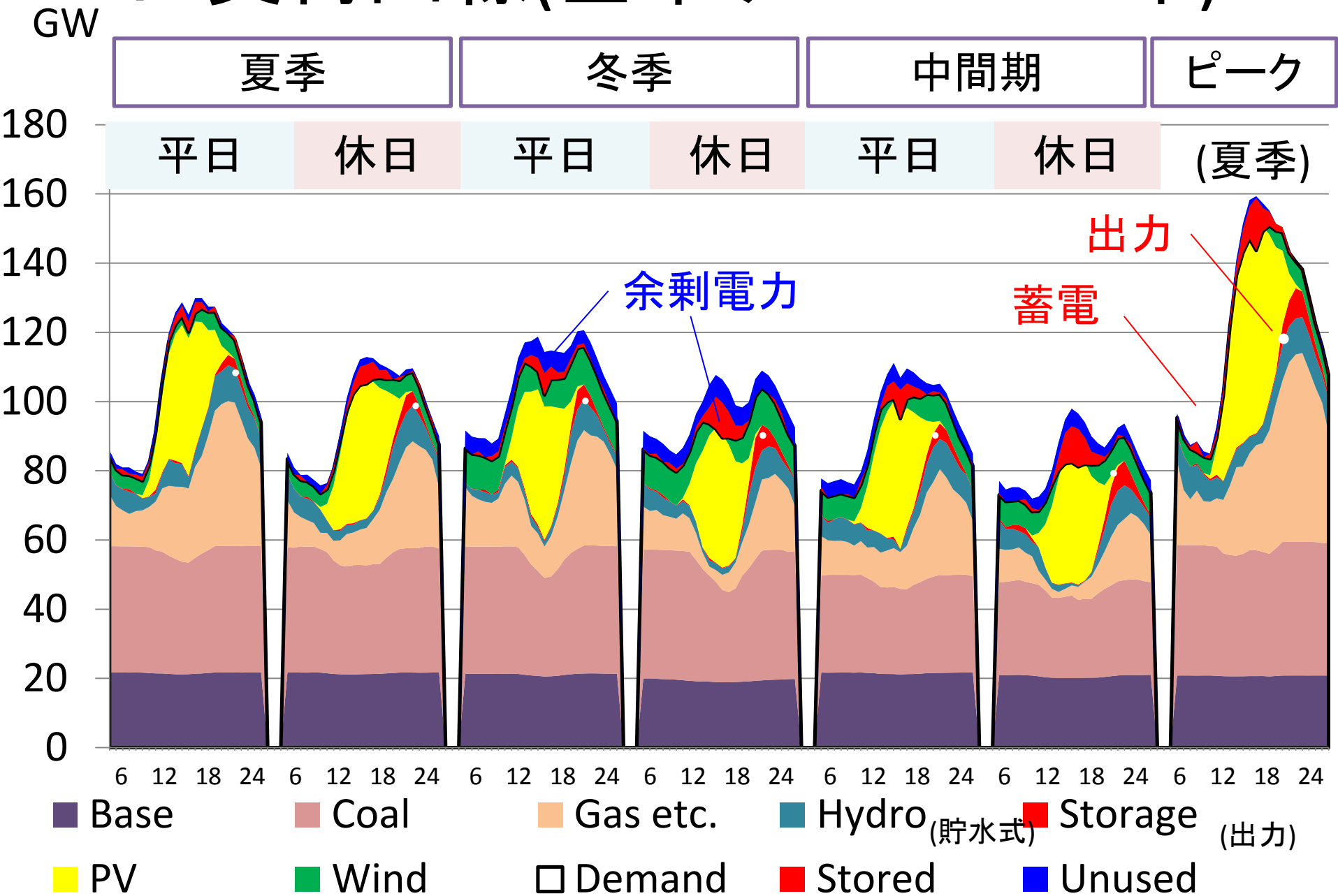
※2050年シナリオは簡易モデルにより計算。ガバナフリー制約を含まない

各地域の電力需要と再生可能エネルギー賦存量

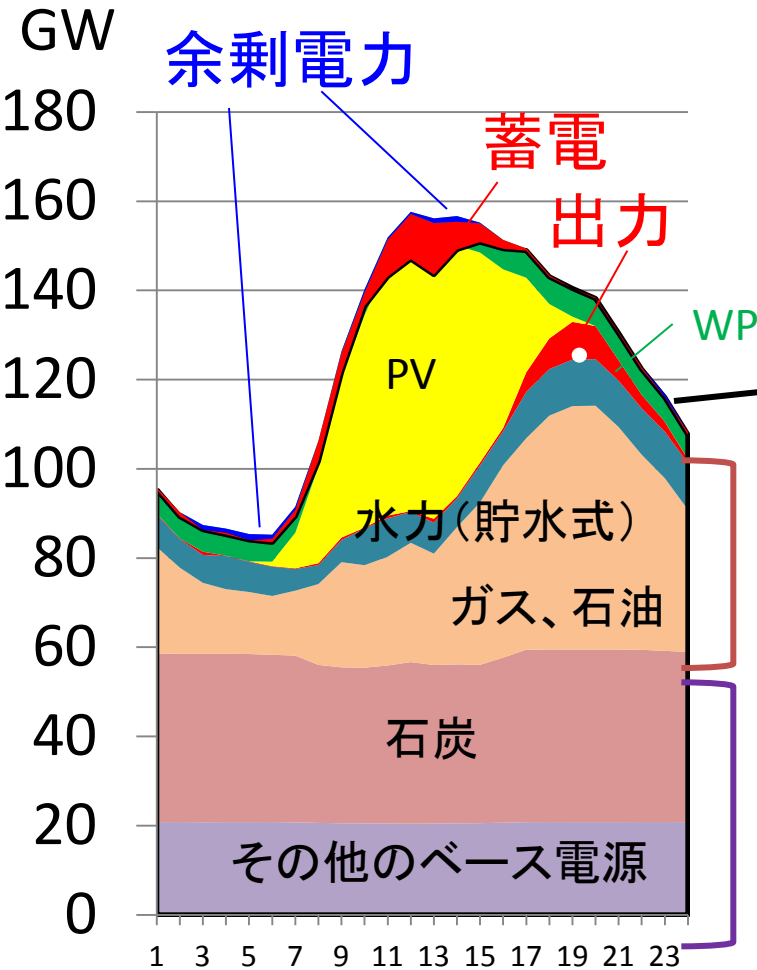


追加送電費用 0.3 円/kWh
(北海道・東北 ⇄ 東京 1600km 10GW,
単価 1.5億円/km/GW)

日負荷曲線(基準ケース2030年)



多地域電源計画モデル



ピーク代表日の時間出力
(省エネ・CO₂削減シナリオの例)

蓄電システム ■ 蓄電 □ 出力
蓄電池・揚水式水力発電

変動が大きい発電所

■ 太陽光・■ 風力

需要曲線

調整力となる

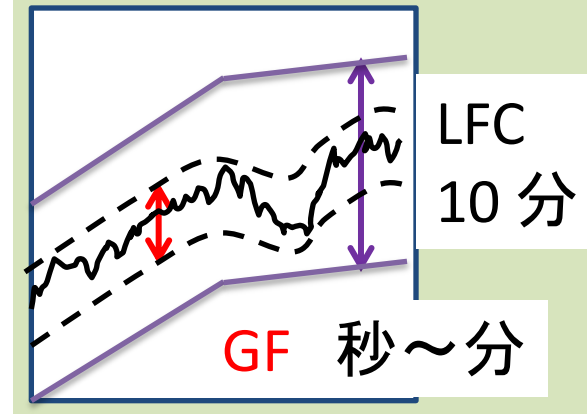
発電所

ガス・石油・水力
(貯水式)

ベース電源

石炭・原子力・
水力(流込式)・
バイオマス・地熱

変動性制約



※需要カーブに対する火力・蓄電システムの
必要量が計算される。それ以外の年間
総発電量はシナリオにより決められている

LFC: 負荷変動制御
GF: ガバナフリー制御

低CO₂排出水素製造

1: フレアガスからの水素

- 世界全焼却ガス量 = $140\text{Bm}^3/\text{y}$ ($1.4 \times 10^{11}\text{m}^3/\text{y}$)

(Russia: 35B, Nigeria: 15B, Iran: 10B, Iraq: 10B, ...) この25%を使用して、年産 50Bm^3 水素 (0.5EJ) をするケースの製造コスト試算すると、

- 原料(原価0のNG) $35\text{Bm}^3/\text{y}$ を7箇所から輸送管7本で製造工場までNGを2000km輸送する建設費は5.2兆円、操業員700人で水素製造コストは7円/ m^3 , **0.7円/MJとなり、原油と同程度のコスト。**

しかし、量的には日本エネルギー消費量の2.5%と少ない。

2: PVによる高圧水電解水素コスト(DOE2014報告値)

($210\text{Mm}^3\text{-H}_2/\text{y}$, $2.1\text{PJ}/\text{y}$, 27MW発電可能量)

- 電解効率: 66%, 設備コスト等 = 7円/ m^3 (設備費4.4兆円)、電力費 = 42円/ m^3 . 合計 49円/ m^3 , **4.9円/MJとなり、原油の5倍のコスト。**

結論: CO₂排出量が低く、経済性のある水素は量的に非常に少なく、量の制限のない再生可能エネルギー利用電解水素は大幅コストダウンが必要である。