

# 俯瞰講義：エネルギーと地球環境

エネルギー・地球環境問題における技術の役割  
山地憲治(10月22日、29日、11月5日)

- エネルギーシステムの視点
- エネルギー資源と技術
- 地球温暖化対策の長期技術シナリオ

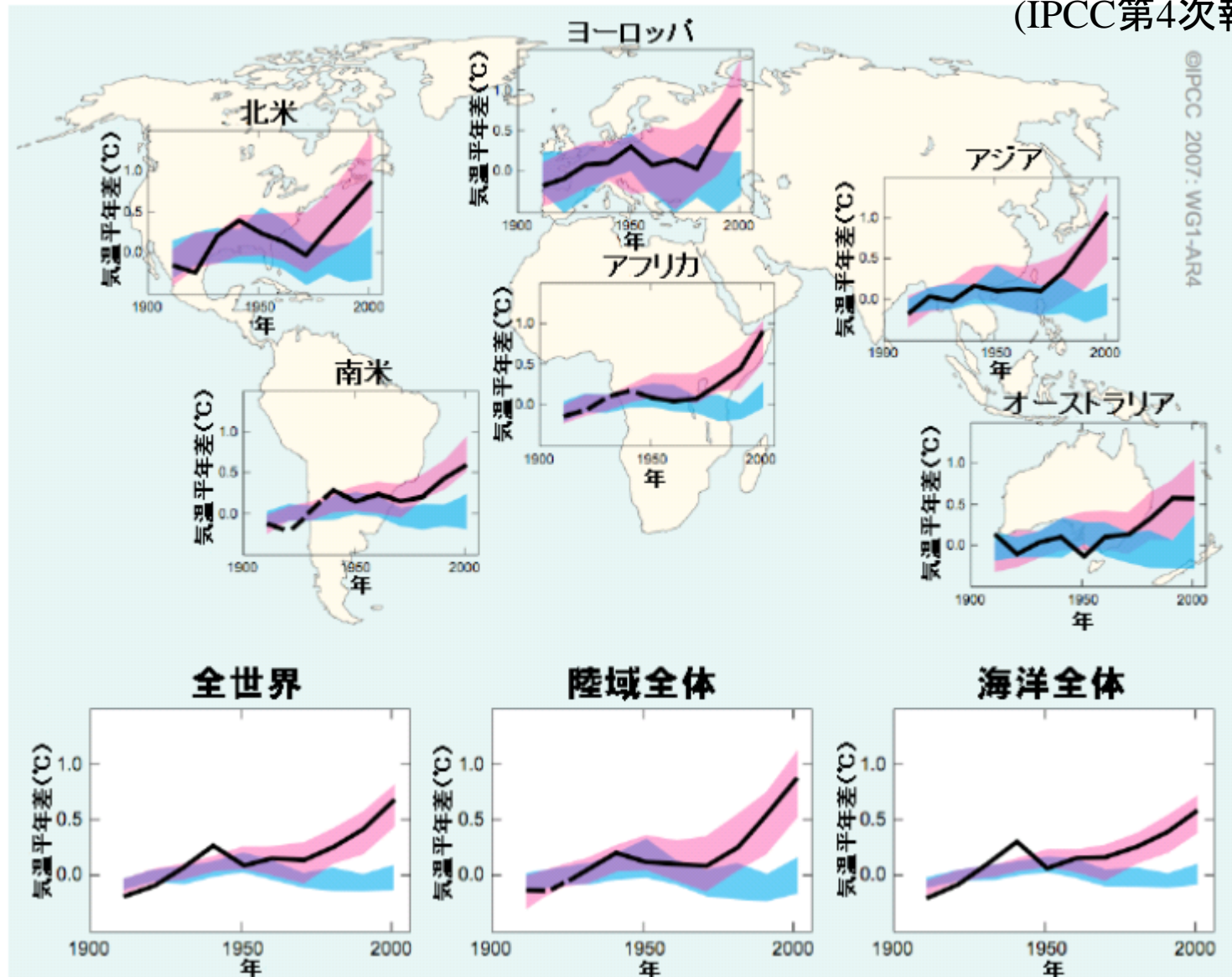
†:このマークが付してある著作物は、第三者が有する著作物ですので、同著作物の再使用、同著作物の二次的著作物の創作等については、著作権者より直接使用許諾を得る必要があります。

# 地球温暖化対策の長期技術シナリオ

- 地球温暖化の原理・現状・影響の概要
  - IPCC第4次報告の知見を中心に
- 地球温暖化対策の究極目標
  - 科学の不確実性の下での対策
  - 大気中GHG濃度の安定化レベル
  - IPCC第4次報告での対策に関する知見
- 地球温暖化対策の長期シナリオ研究
  - 地球温暖化対策の基本構造
  - 世界エネルギーモデルDNE21の構成
  - CO<sub>2</sub>濃度550ppm安定化の最適対策シナリオ
- 茅方程式による地球温暖化対策の評価
- 地球温暖化対策に関する基本認識

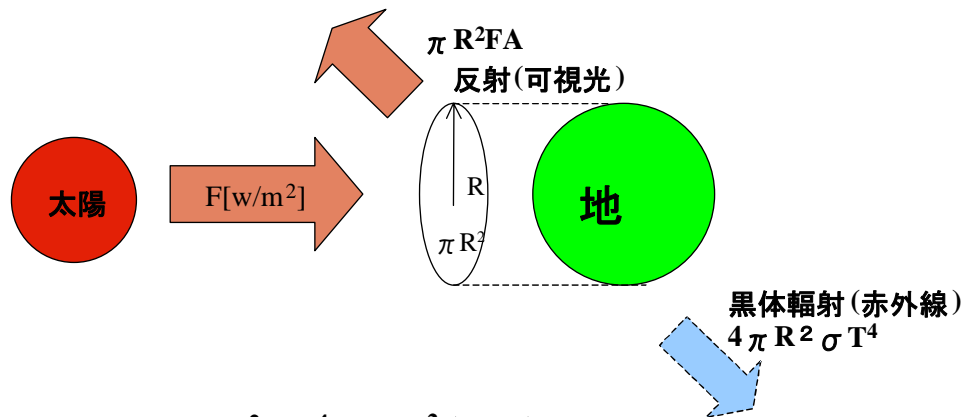
# 世界規模及び大陸規模の気温変化

(IPCC第4次報告)



©IPCC 2007: WG1-AR4

# 地球の温度の決め方



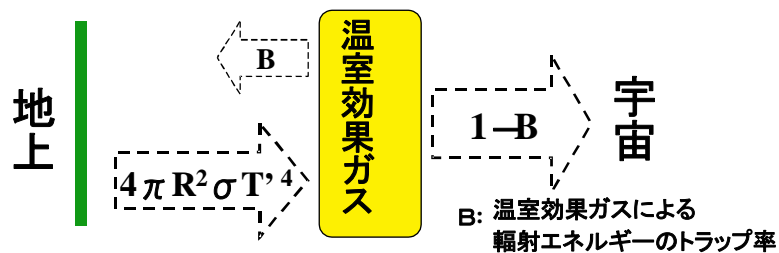
$$4\pi R^2\sigma T^4 = \pi R^2(1-A)F$$

$$T = \left[ \frac{(1-A)F}{4\sigma} \right]^{1/4}$$

A (アルベド) = 0.3, F(太陽定数) = 1368 W/m<sup>2</sup>

σ (ステファン・ボルツマン定数) = 5.67 × 10<sup>-8</sup> Wm<sup>-2</sup>K<sup>-4</sup>

$$T = 255\text{K} (-18^\circ\text{C})$$



$$T' = \left[ \frac{(1-A)F}{4(1-B)\sigma} \right]^{1/4}$$

$$B = 0.4$$

$$T' = 288\text{K} (15^\circ\text{C})$$

† 出所: 山地憲治、「エネルギー・環境・経済システム論」、岩波書店、2006年

図3-9(p87)

# 予測される気候変動の影響

世界の気温の変化(工業化前との比較)

0°C

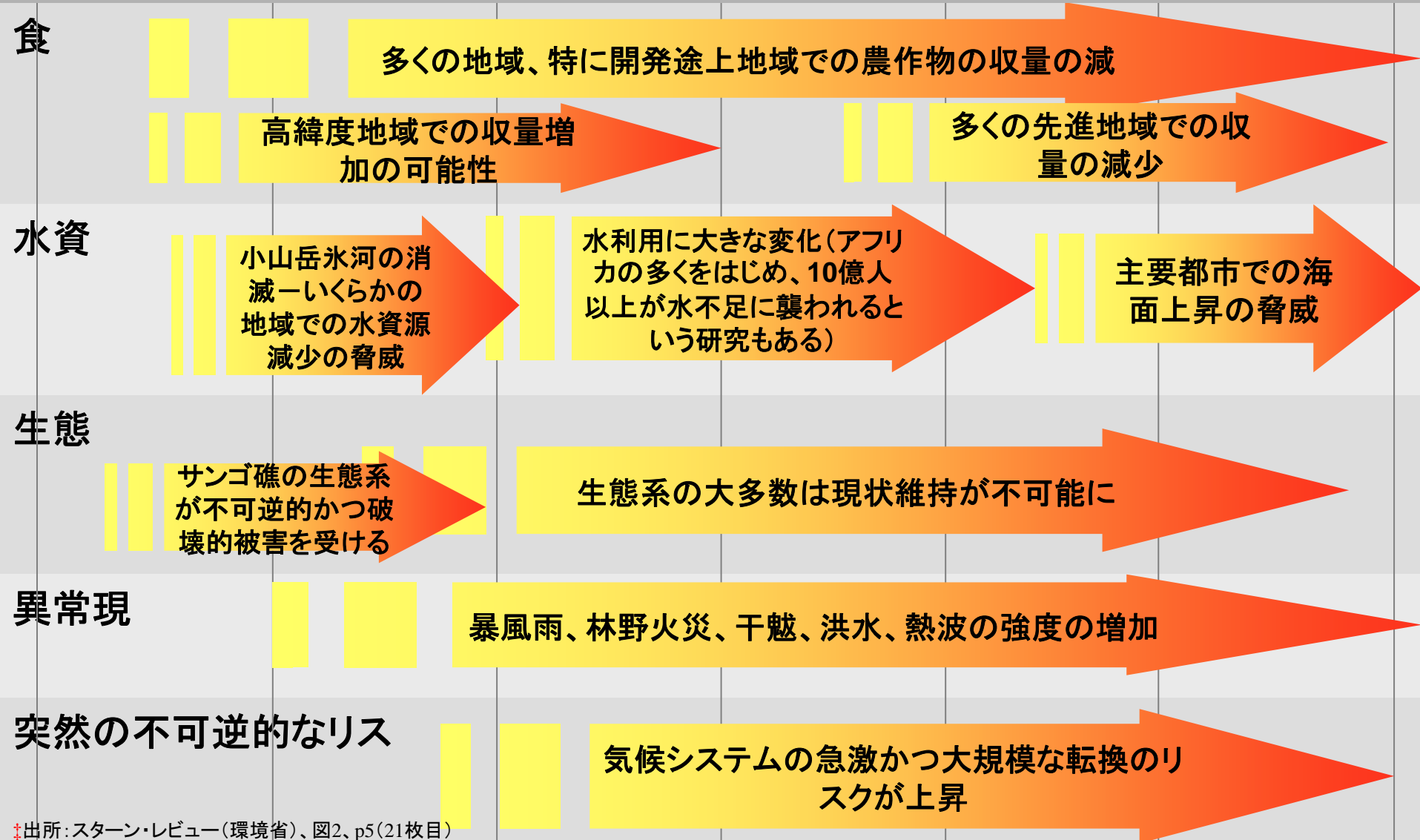
1°C

2°C

3°C

4°C

5°C

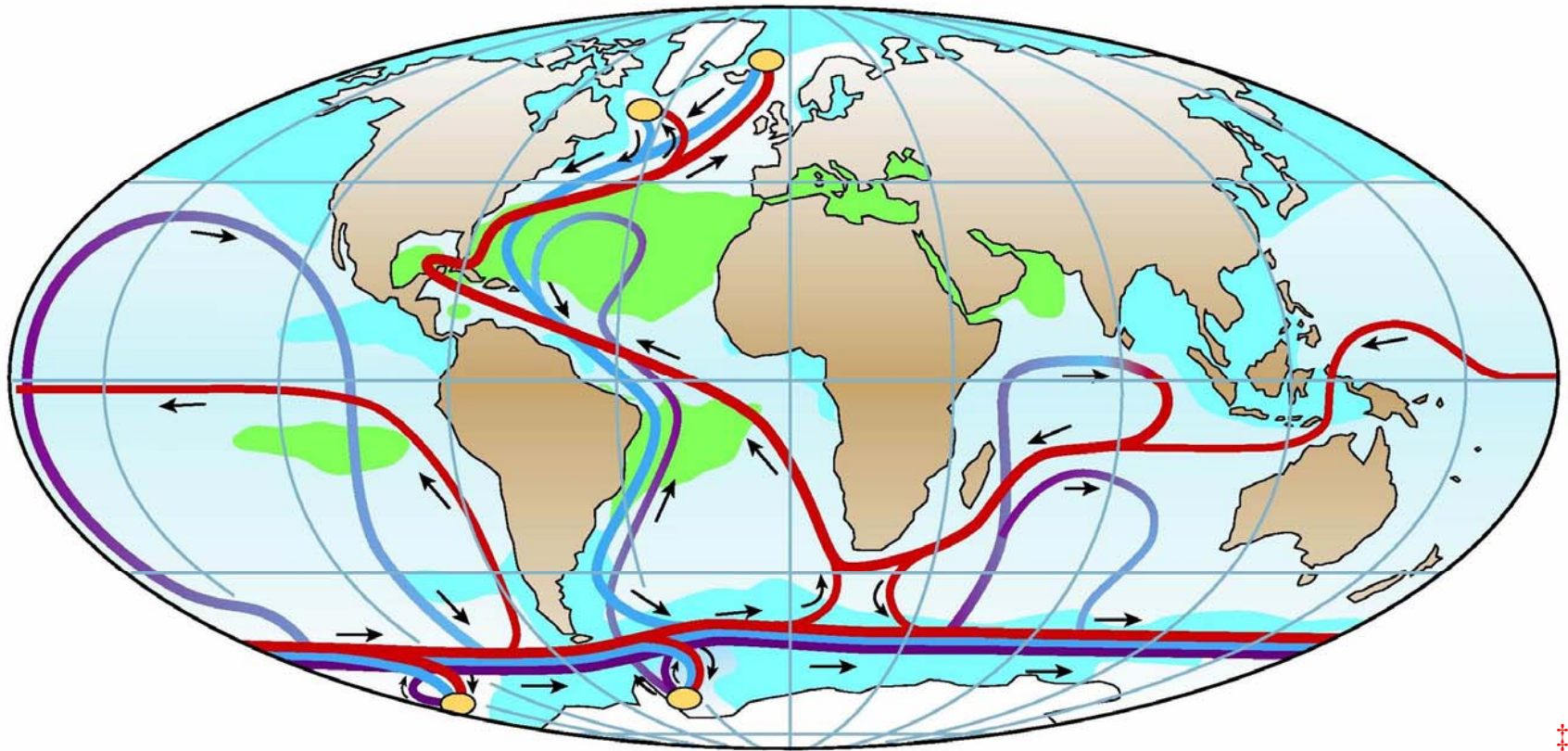


出所: スターン・レビュー(環境省)、図2、p5(21枚目)

[http://www.env.go.jp/press/file\\_view.php?serial=9176&hou\\_id=8046](http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=9176&hou_id=8046)

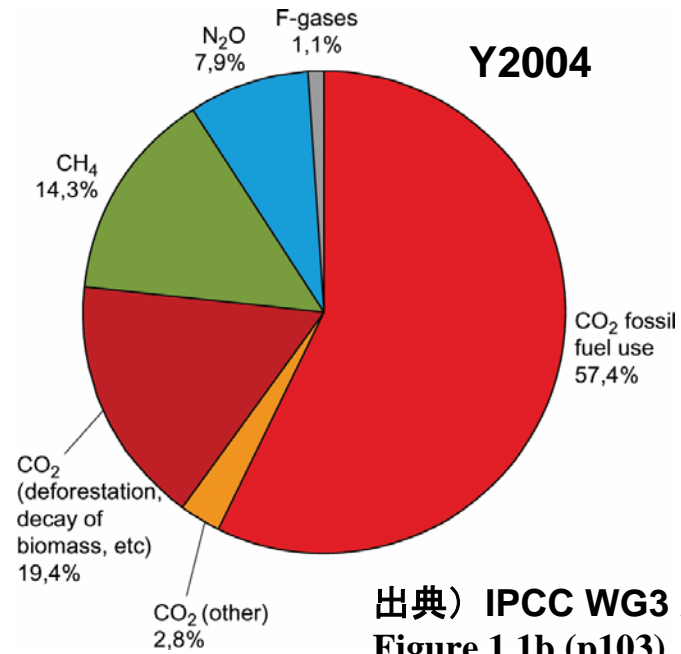
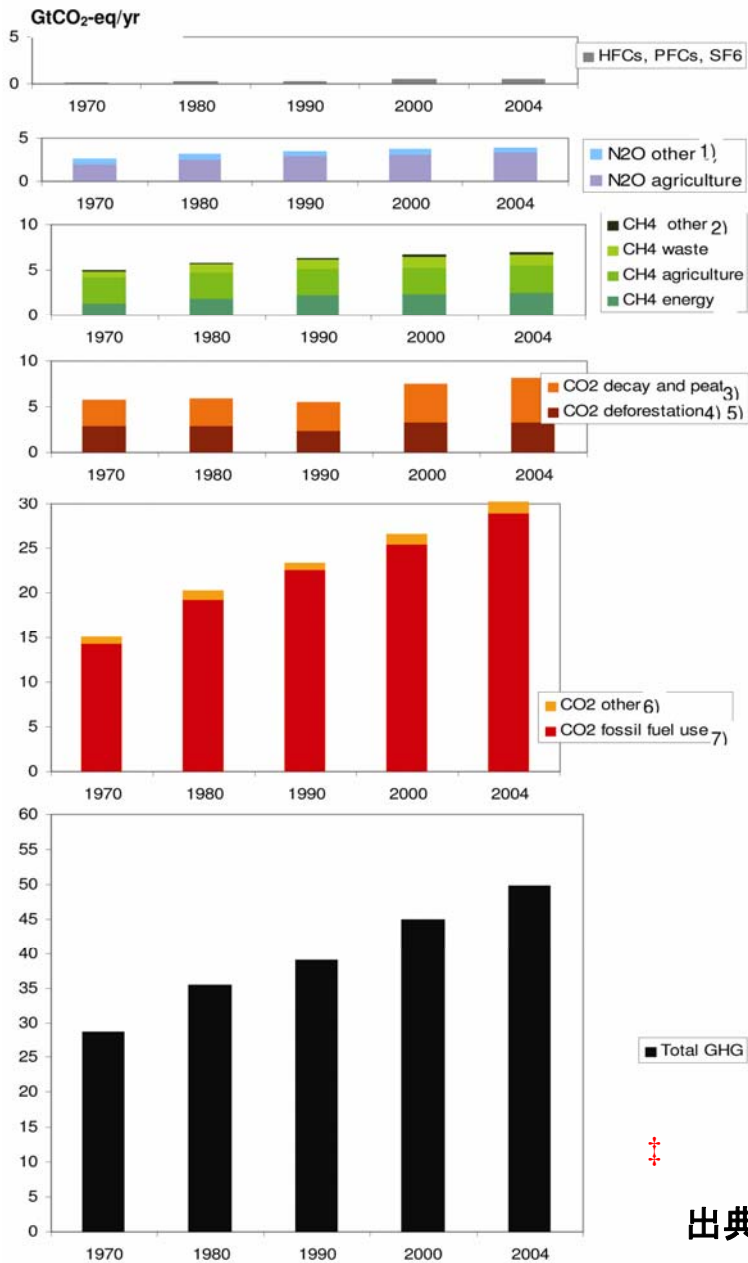
# 熱塩循環停止(不可逆的リスクの例)

- ◆ 熱塩循環（THC）の停止は、特に北大西洋における気候システムへの影  
や、全球的な海洋生態系への大きな擾乱等が危惧され、予防的な視点から  
は、これを避けることは地球温暖化対策の一つの基準となる。



出典) S. Rahmstorf "Ocean circulation and climate during the past 120,000 years.", *Nature*, 2002. Box 1

# 温室効果ガス排出量（1970-2004年）

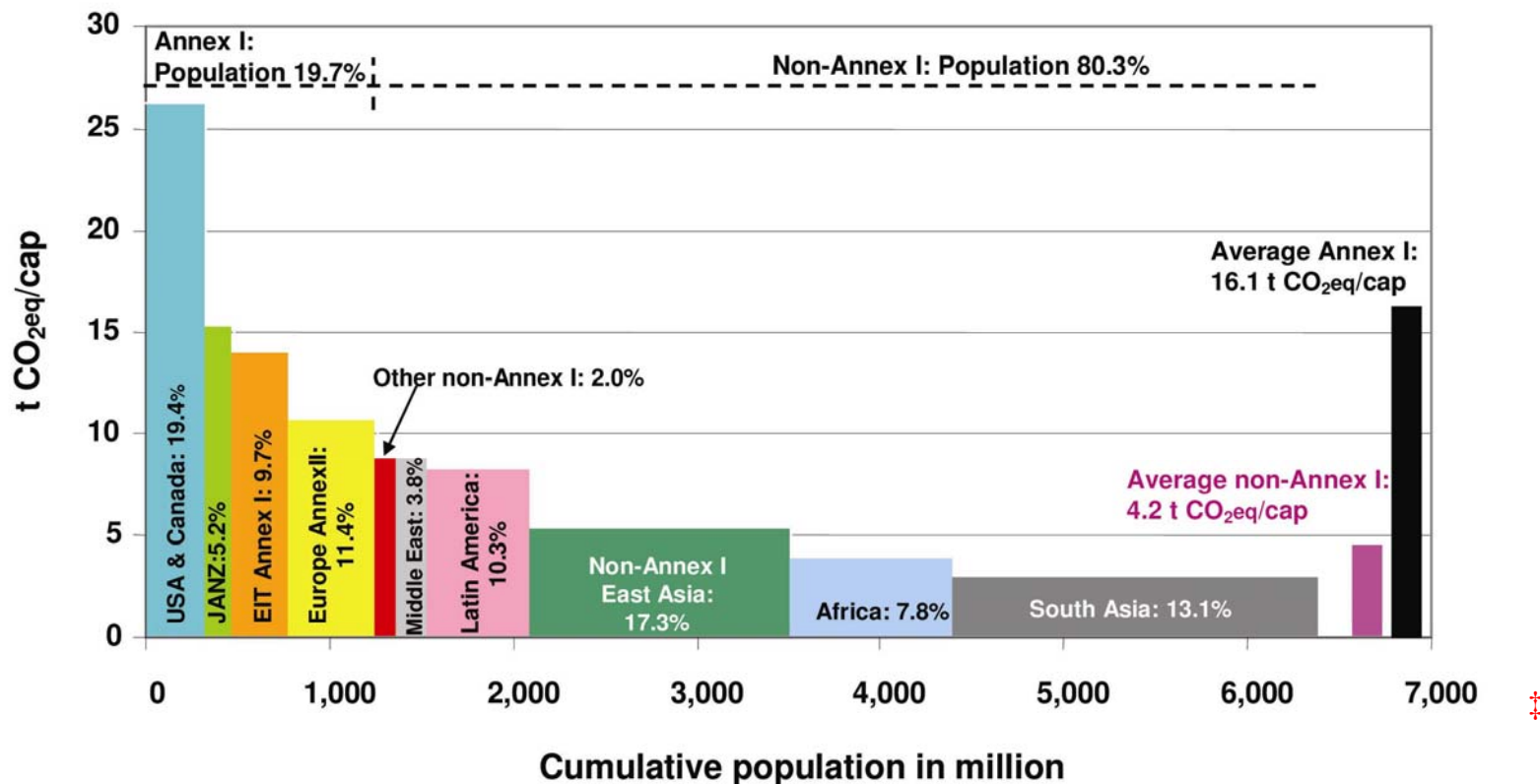


出典) IPCC WG3 AR4, Ch.1  
Figure 1.1b (p103)

- ◆ GHGは1970から2004年の間に約70%増加
- ◆ とりわけCO<sub>2</sub>の増加が大きい
- ◆ 化石燃料燃焼CO<sub>2</sub>は約57%を占める
- ◆ 2005年の大気中CO<sub>2</sub>濃度は379 ppm
- ◆ GHGによる等価CO<sub>2</sub>濃度は455 ppm-CO<sub>2</sub>eq.
- ◆ エアロゾル等を含む等価CO<sub>2</sub>濃度は375 ppm-CO<sub>2</sub>eq.

出典) IPCC WG3 AR4, SPM Figure SPM.1, p4

# 地域別の一人当たりGHG排出量（2004年）

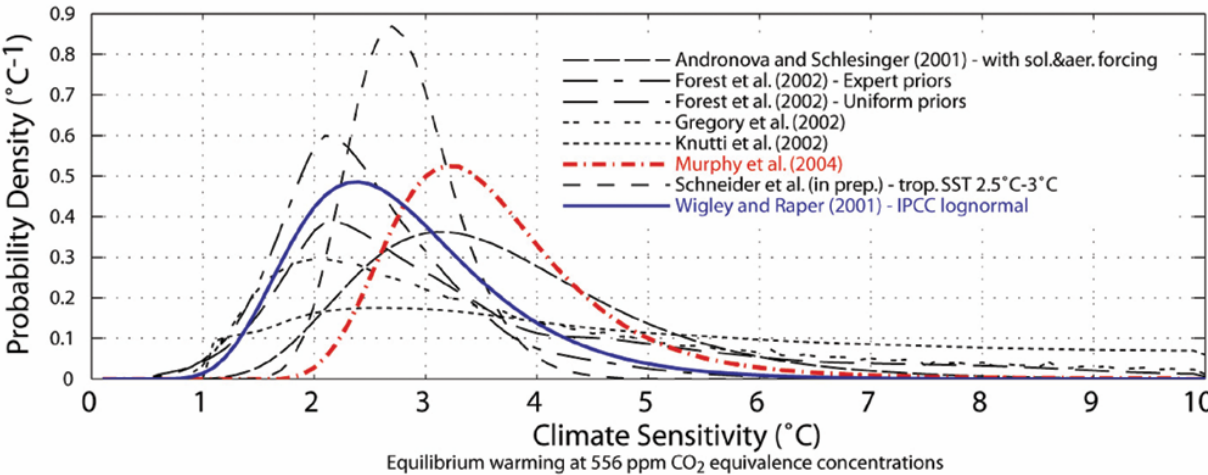


	Annex I	Non-Annex I
人口	19.7%	80.3%
GHG排出量	48%	52%
一人当たり排出量	16.1 tCO <sub>2</sub> eq./cap	4.2 tCO <sub>2</sub> eq./cap

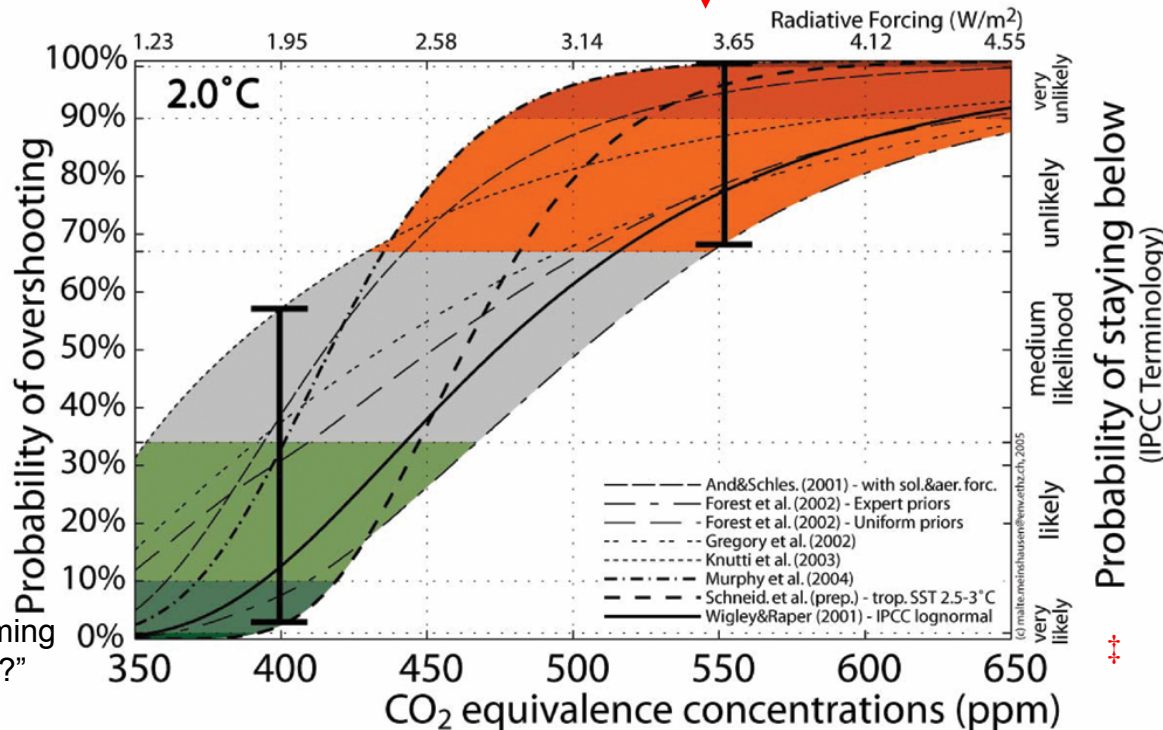
# 地球温暖化対策の究極の目標 (気候変動枠組み条約第2条)

- 目標水準: 気候系に対して危険な人為的干渉を及ぼすこととならない水準において、大気中の温室効果ガスの濃度を安定化。
- 目標達成期限: 生態系が気候変動に自然に適応し食料の生産が脅かされず、かつ経済開発が持続可能な態様で進行することができるような期間内に目標達成。

# 2°C安定化目標の意味（気候科学の不確実性）



8種類の気候感度の確率密度分布を基に2°Cをオーバーシュートする確率を導出



2°Cをオーバーシュートする確率は、400 ppmvCO<sub>2</sub>eq.で安定化しても数%~60%程度、550 ppmvCO<sub>2</sub>eq.では70%~100%程度と評価

出典) B. Hare & M. Meinshausen, "How much warming are we committed to and how much can be avoided?"  
PIK Report No.93, 2004

<http://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/.files/pr93.pdf>, figure2, p12, figure8,p26

# 安定化レベル別の温暖化影響被害と対策費用

EU提案  
スターン・レビュー?  
政府提案  
(美しい星50)

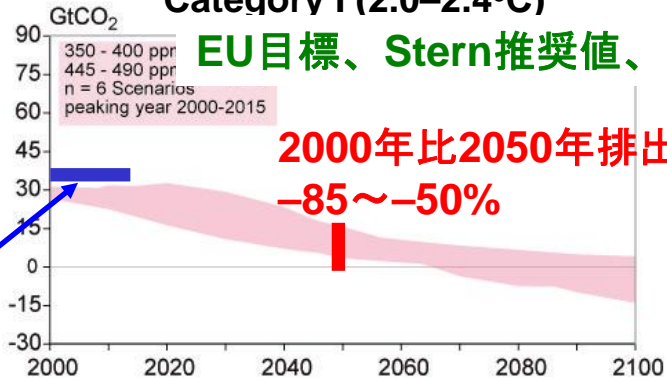
CO2濃度 (ppm)	等価CO2濃度(ppm CO2eq.)	産業革命以降の気温上昇幅(°C)	2050年のCO2削減率(00年比%)	2050年削減費用(対GDP比%)	温暖化影響損失(対GDP比%)
350-400	445-490	2.0-2.4	-85~-50	+5.5未満	地域により損失(+)/便益(-)混在
400-440	490-535	2.4-2.8	-60~-30		
440-485	535-590	2.8-3.2	-30~+5	1.3 (-0~4)	すべての地域で+
485-570	590-710	3.2-4.0	+10~+60	0.5 (-1~2)	
570-660	710-855	4.0-4.9	+25~+85	—	1~5
660-790	855-1130	4.9-6.1	+90~+140	—	—

出典) IPCC WG2 & WG3 AR4, SPMより整理 (<http://www.rite.or.jp/Japanese/lab0/sysken/about-global-warming/download-data/Long-termTarget.pdf>)

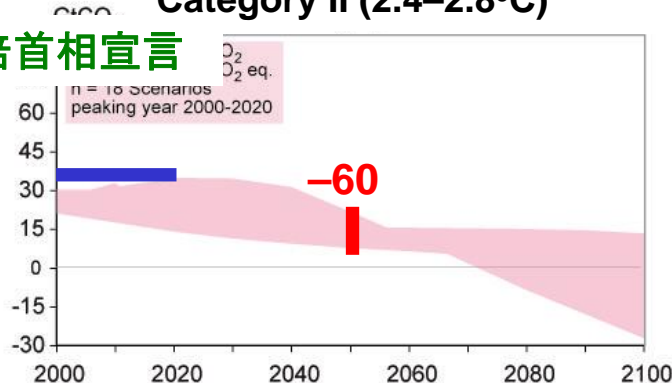
注) 費用便益的には、削減費用と影響損失の和が最小になる濃度が望ましい

# 各レベルに安定化するために必要な排出量推移

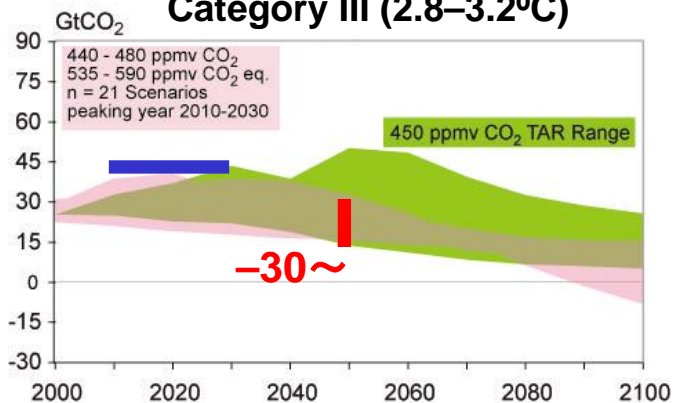
Category I (2.0–2.4°C)



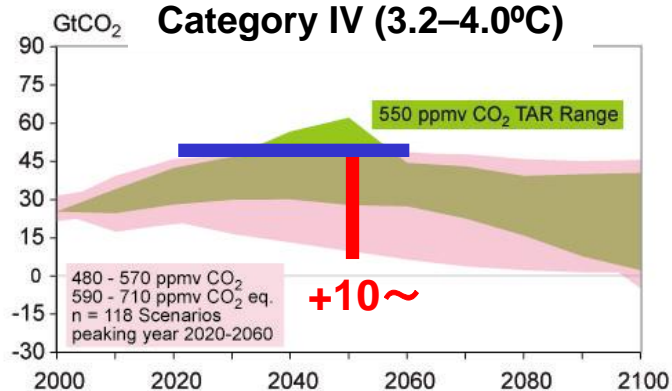
Category II (2.4–2.8°C)



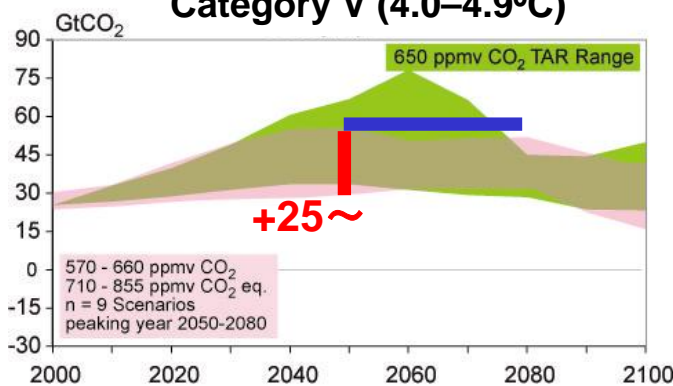
Category III (2.8–3.2°C)



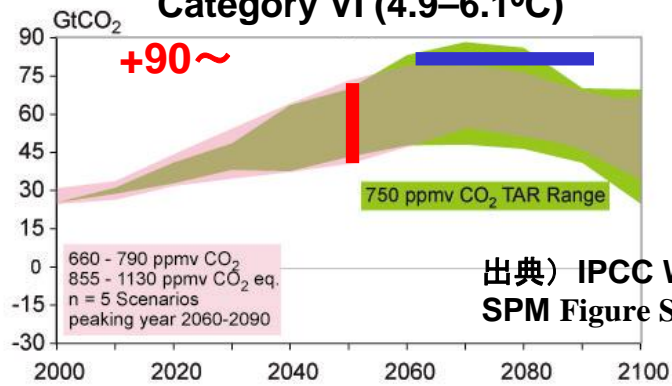
Category IV (3.2–4.0°C)



Category V (4.0–4.9°C)



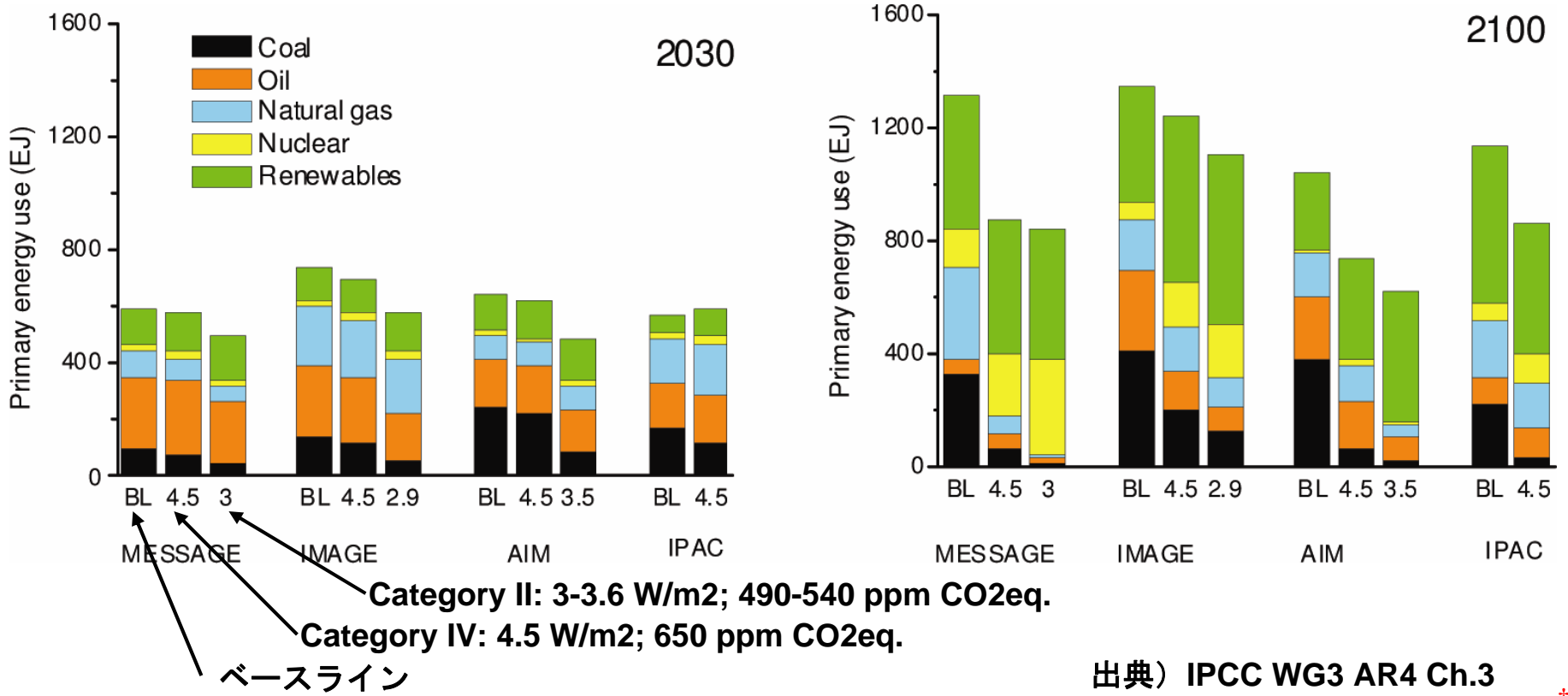
Category VI (4.9–6.1°C)



出典) IPCC WG3 AR4,  
SPM Figure SPM.7, p16

排出量がピークとなる年

# 安定化レベルによる必要となる削減技術

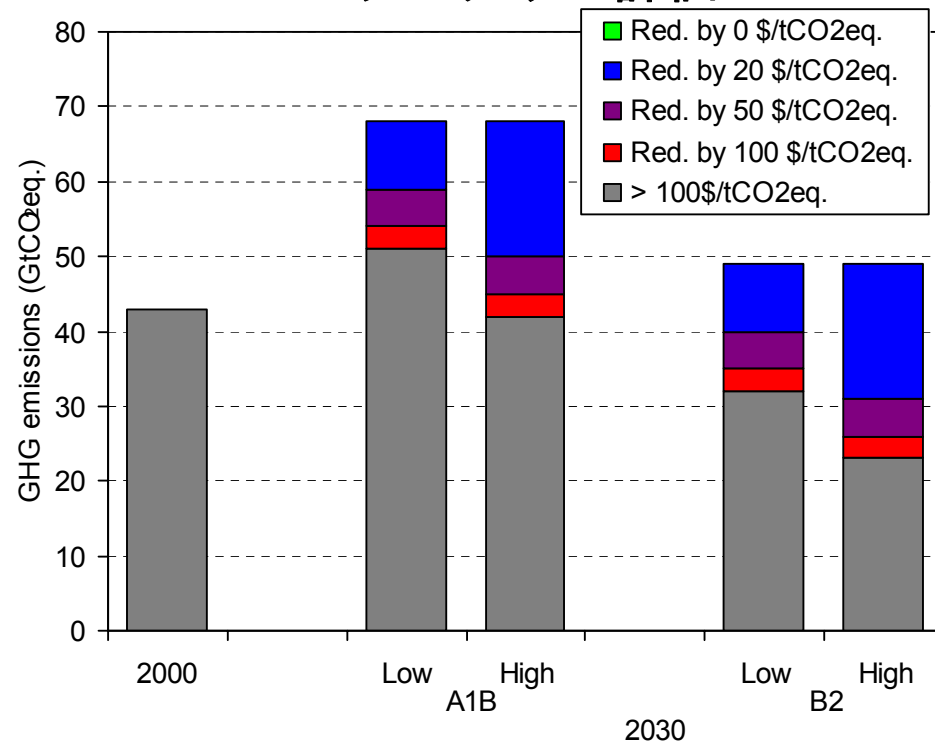
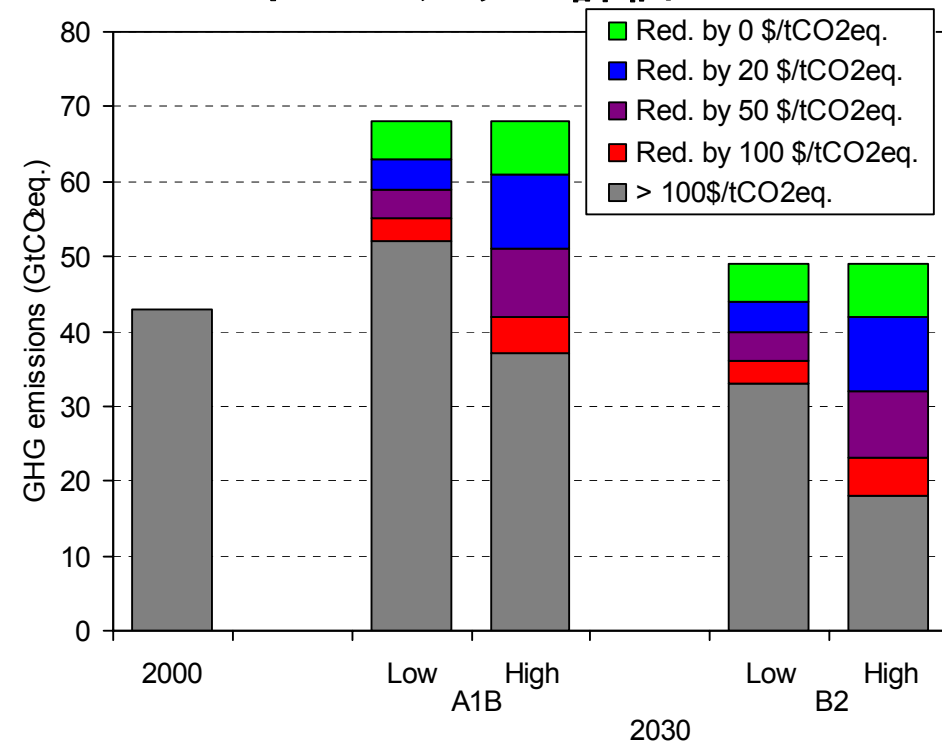


- ◆ いずれのモデルの結果も2100年には一次エネルギー供給の半分以上は再生可能エネルギー（少々楽観的？）
- ◆ MESSAGEは、バイオマスCCSの大規模利用も

# 2030年の経済ポテンシャル

## ボトムアップ評価

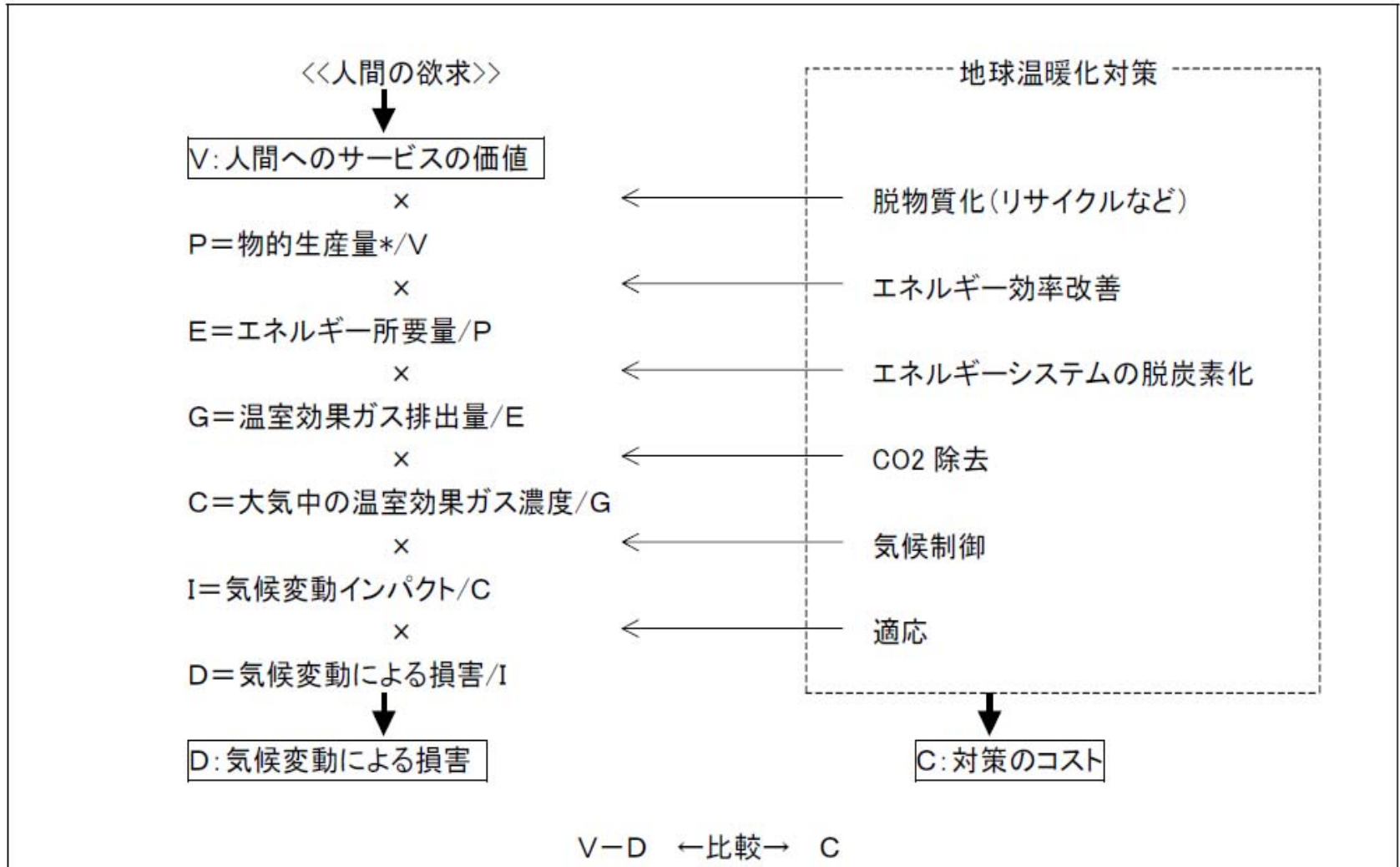
## トップダウン評価



出典) IPCC WG3 AR4, SPMを基にRITEにて作成 †

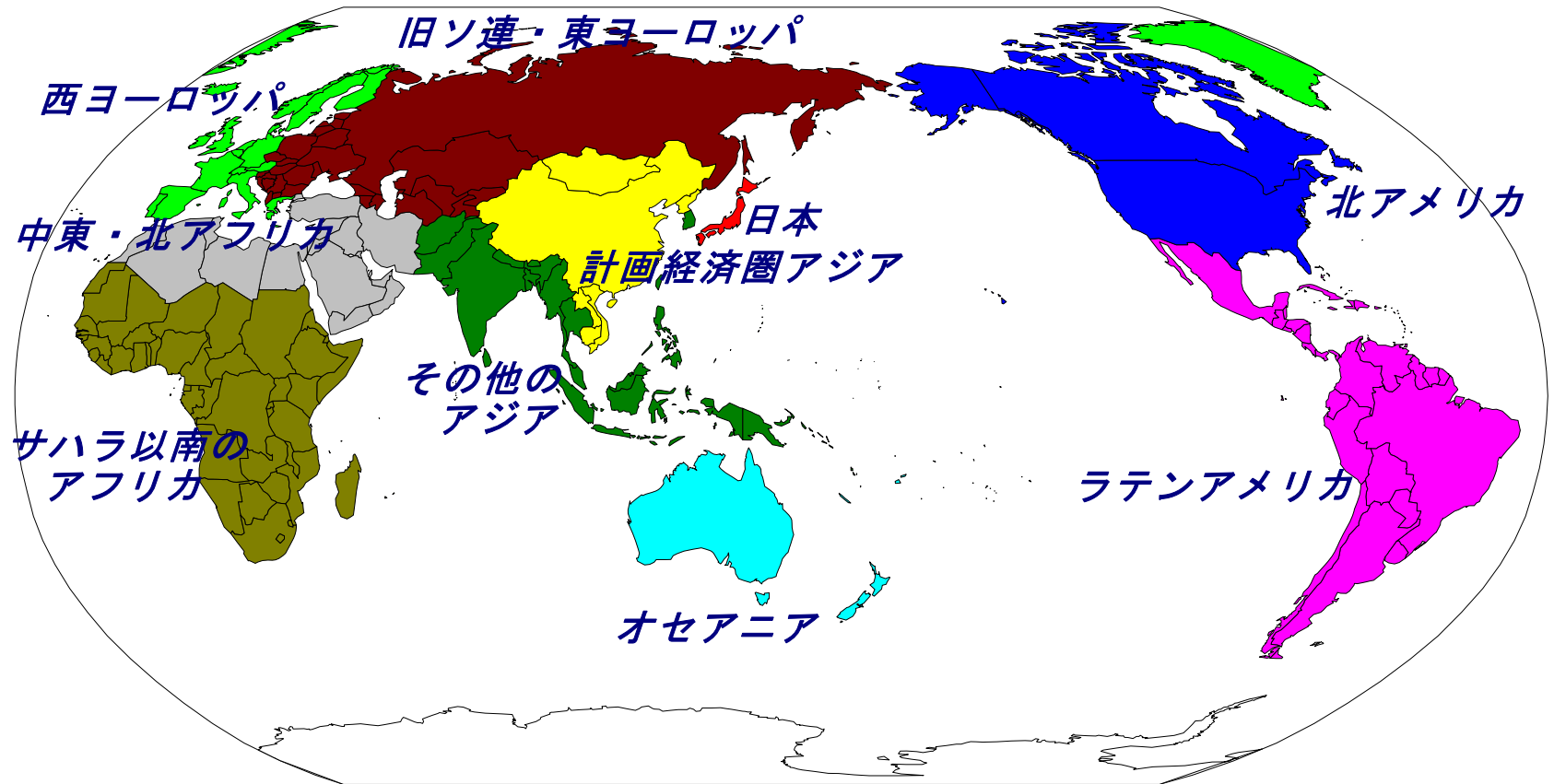
- ◆ 世界の排出量の伸びを相殺または現在のレベル以下に削減することも可能な削減ポテンシャルが存在
- ◆ 世界で最も安価なところから理想的に削減できた場合の値
- ◆ 通常、SRESのシナリオ自体にはネガティブ費用は折り込み済み

# 地球温暖化対策の基本構造



※:最終需要用途のエネルギー利用を含む

# DNE21モデルの世界地域分割



DNE21モデルについては下記の参考文献参照： †

山地憲治、藤井康正：グローバルエネルギー戦略、電力新報社 1995年

Fujii, Y., K. Yamaji: Assessment of technological options in the global energy system for limiting the atmospheric CO<sub>2</sub> concentration, Environmental Economics and Policy Studies, vol.1, pp.113-139 (1998)

新エネルギー・産業技術総合開発機構/(財)地球環境産業技術研究機構：「地球再生計画」の実施計画作成に関する調査事業報告書 (1994-2002)

<http://www.rite.or.jp/English/lab/syslab/research/new-earth/download-page/downloadable-data/dne21-manual.pdf>, 図2-2、p6

# CO<sub>2</sub>排出削減のための技術

## 省エネルギーの推進

- 最終需要での節約(自動車燃費など)
- 変換効率の改善

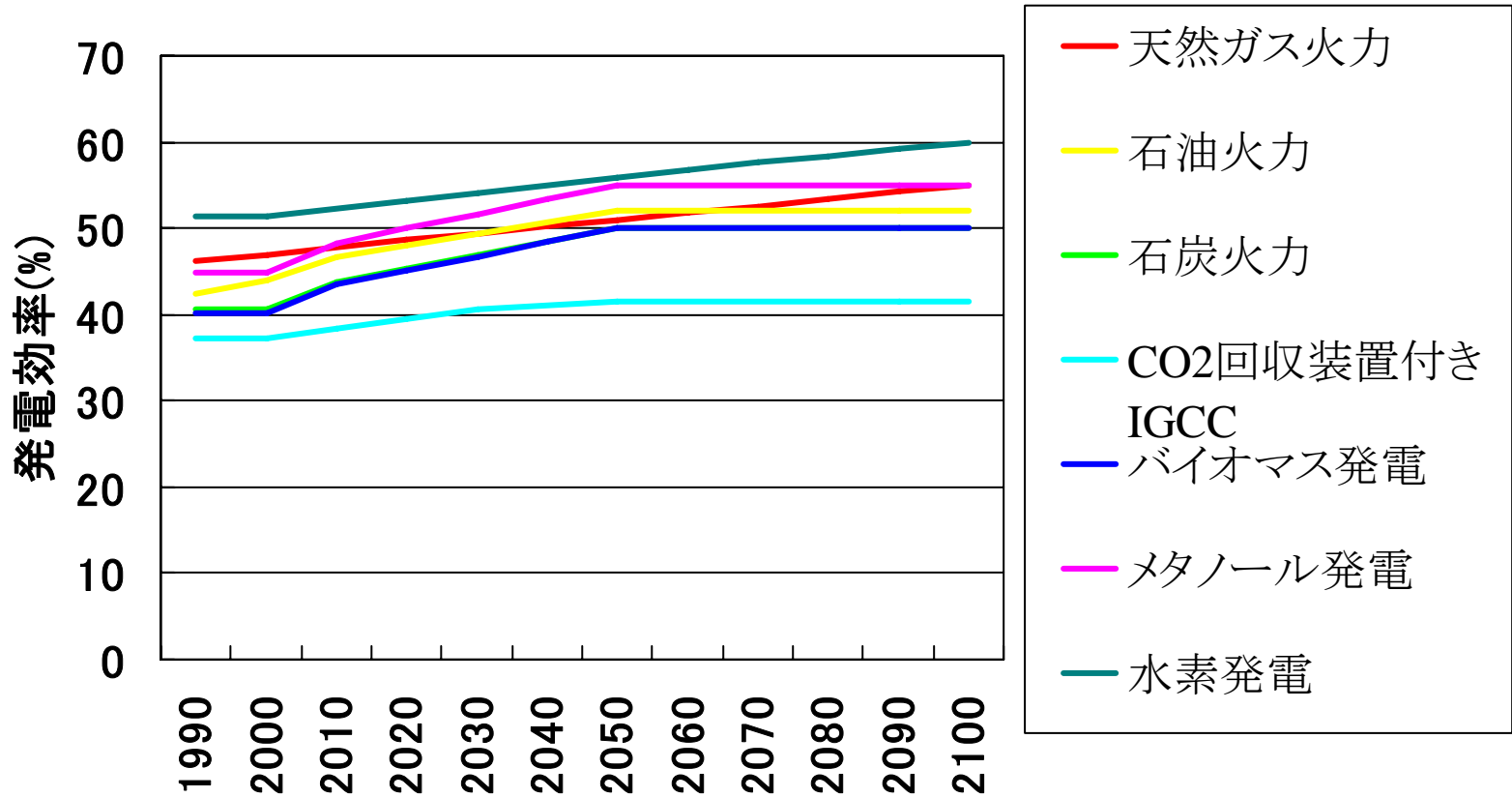
## 燃料転換

- 燃料転換(石炭から天然ガスへの転換など)
- 再生可能エネルギー、原子力

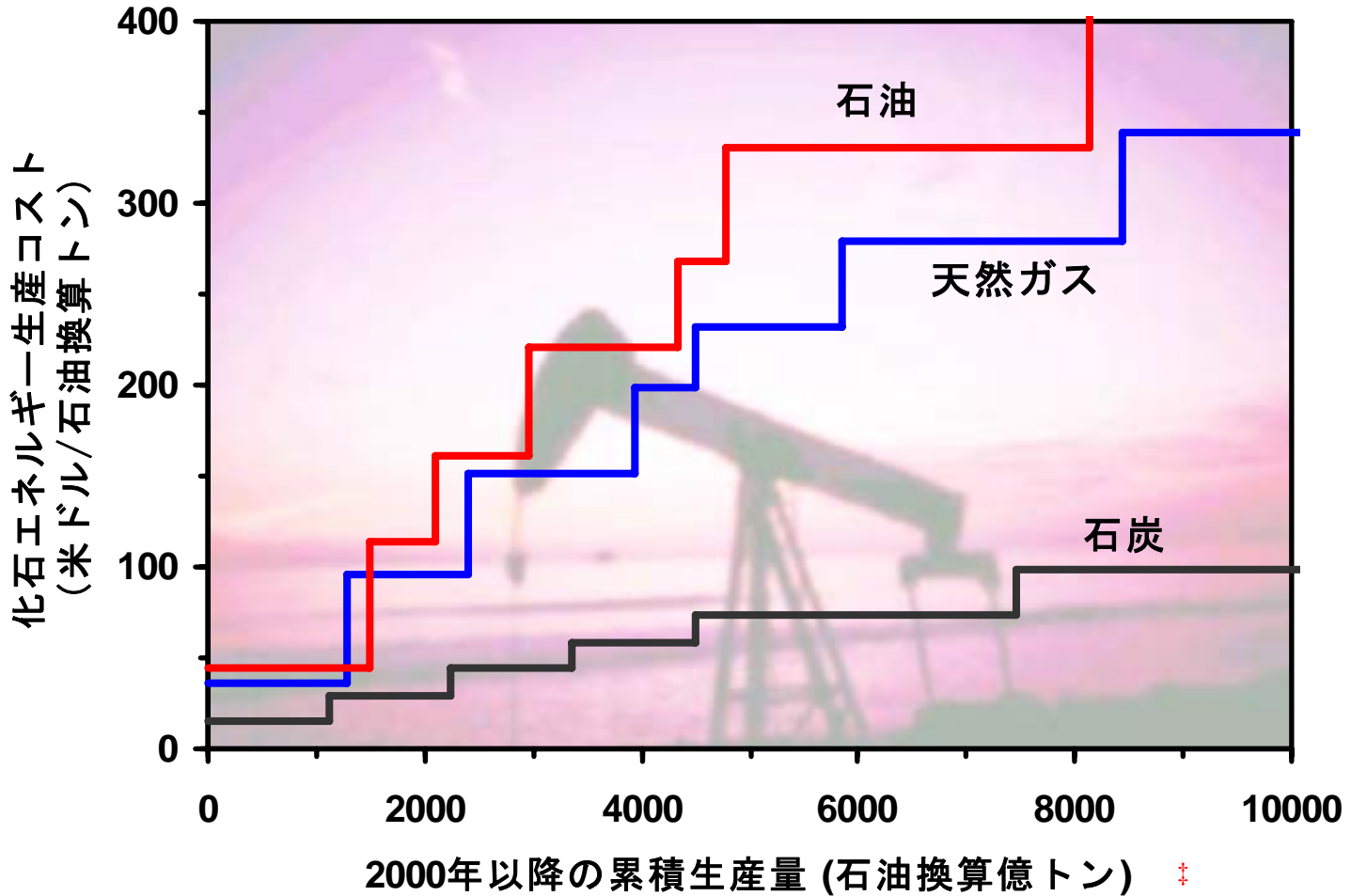
## CO<sub>2</sub>分離・回収・処分

- 発電所排ガスからのCO<sub>2</sub>回収
- CO<sub>2</sub>の地中処理、海洋処理

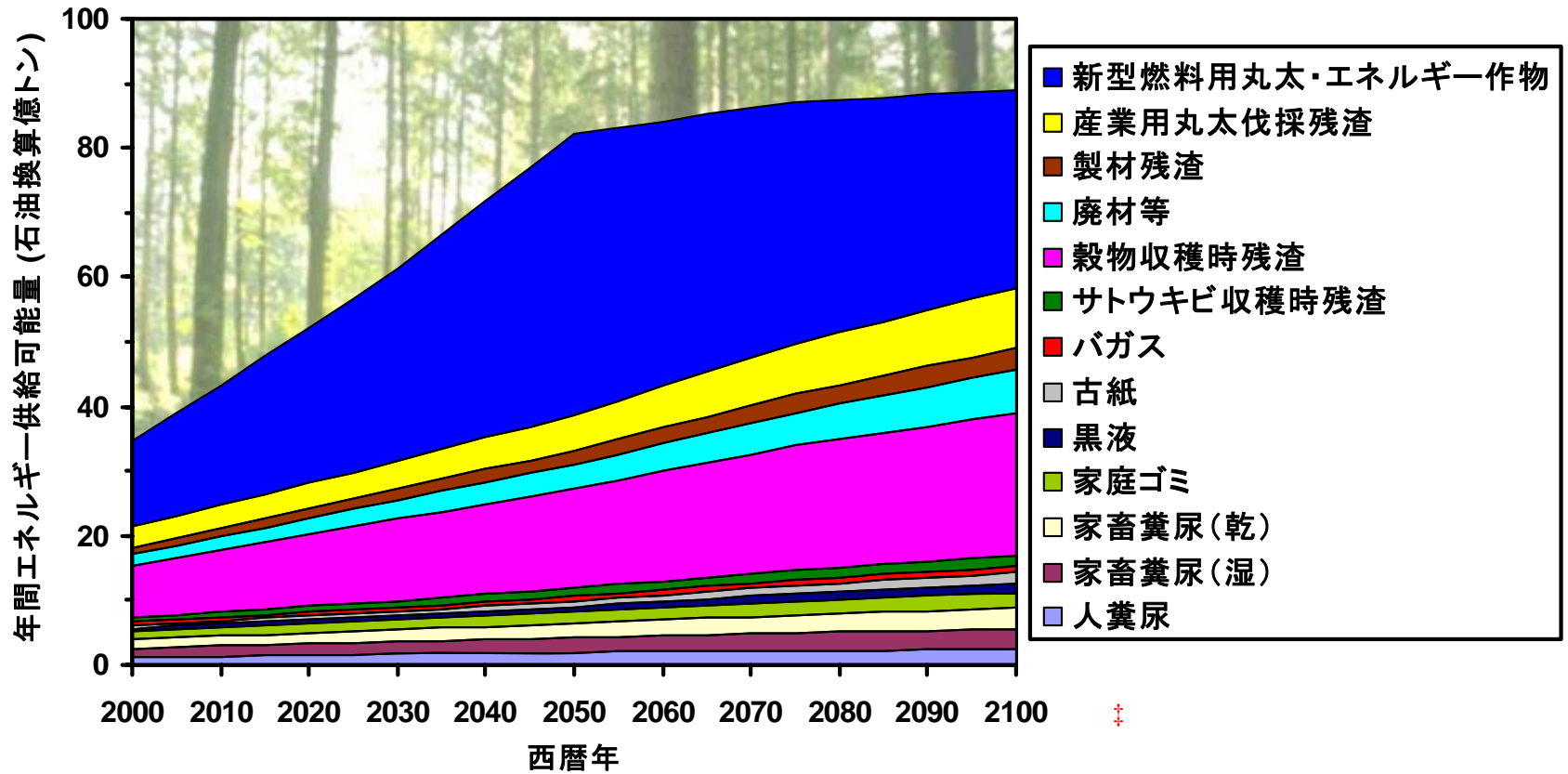
# 省エネルギーの推進 変換効率の改善



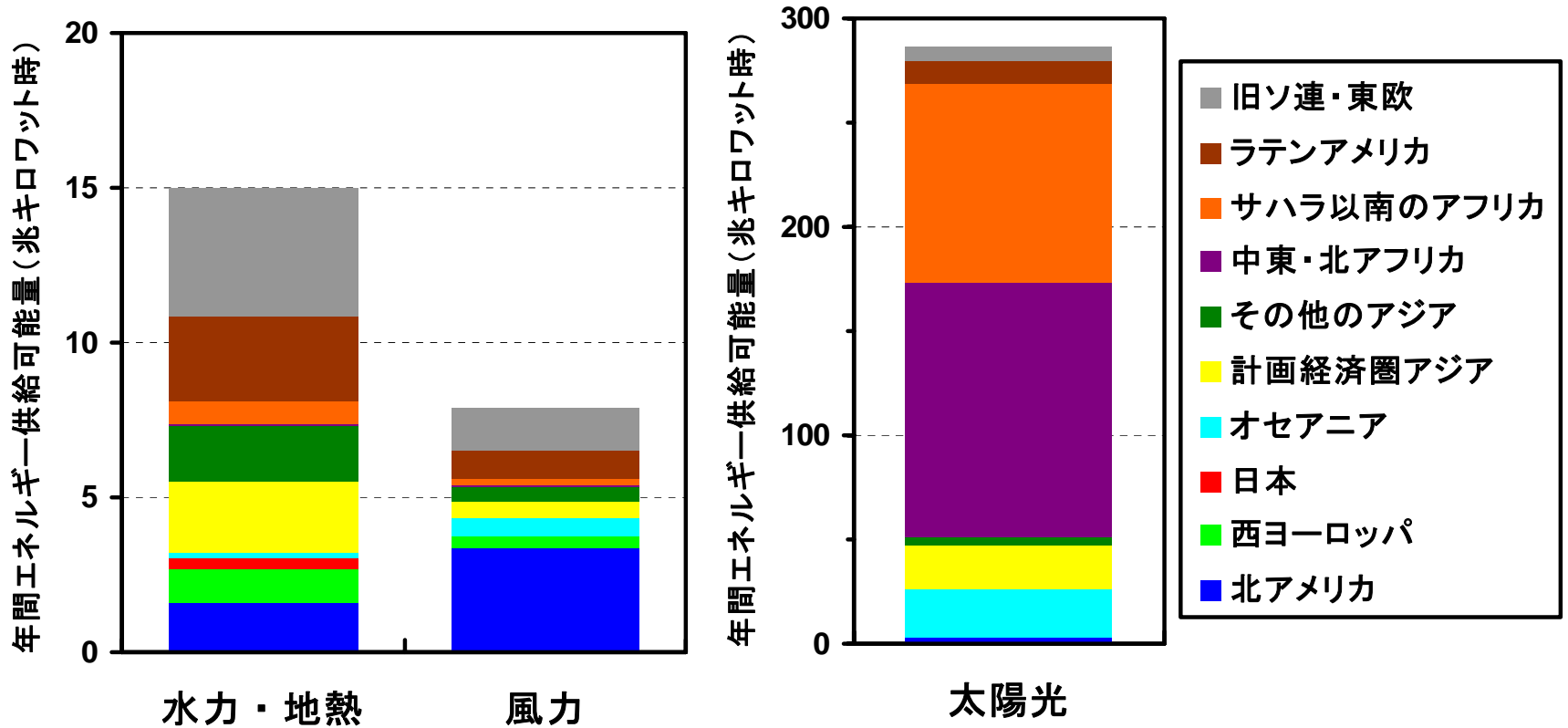
# 化石燃料資源



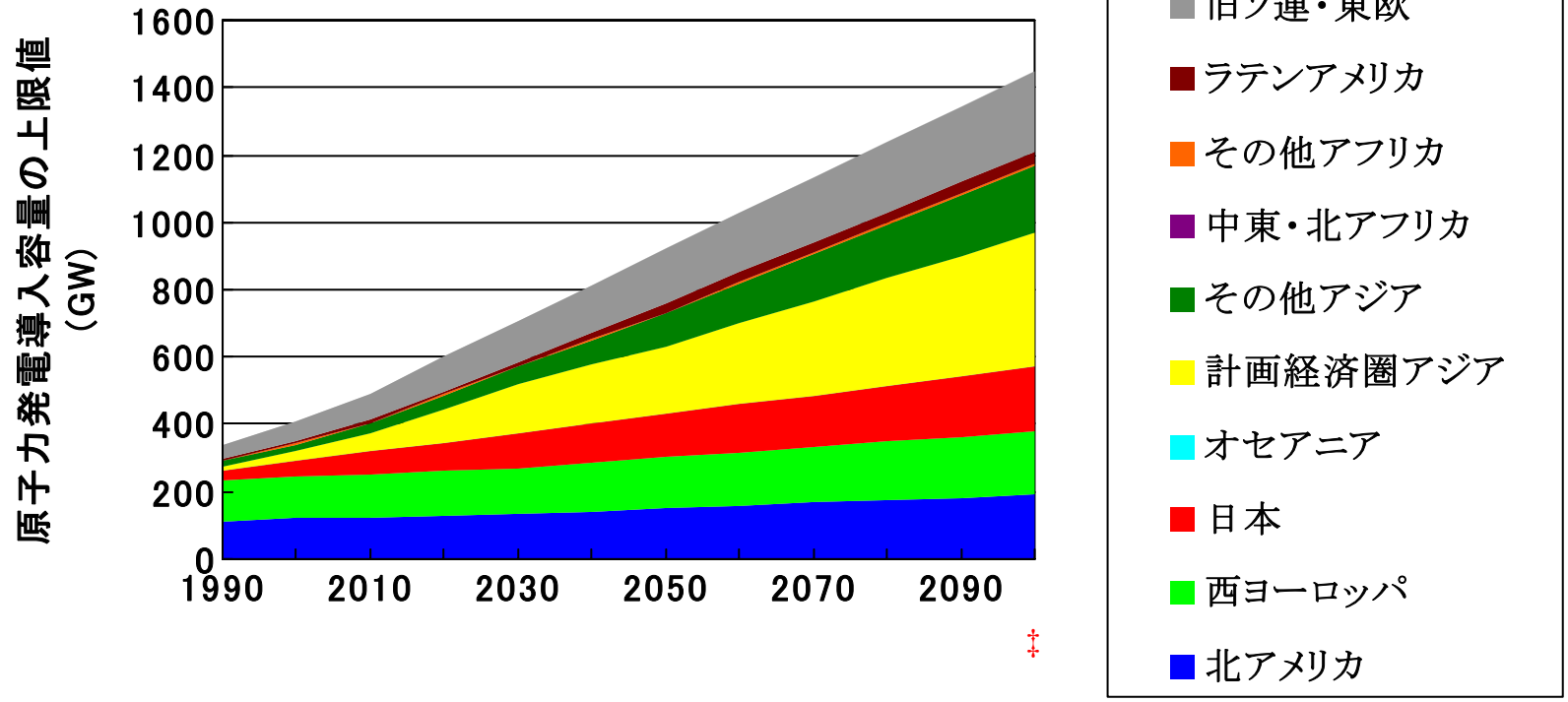
# バイオマスエネルギー資源



# 再生可能エネルギー資源



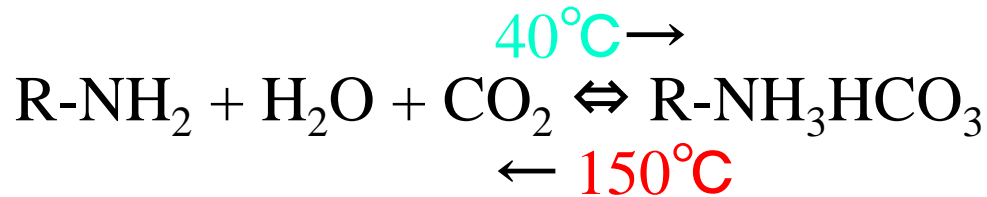
# 原子力発電



# CO<sub>2</sub>の分離・回収 排ガスからのCO<sub>2</sub>回収

- **化学吸収法**

アルカノールアミンの一種

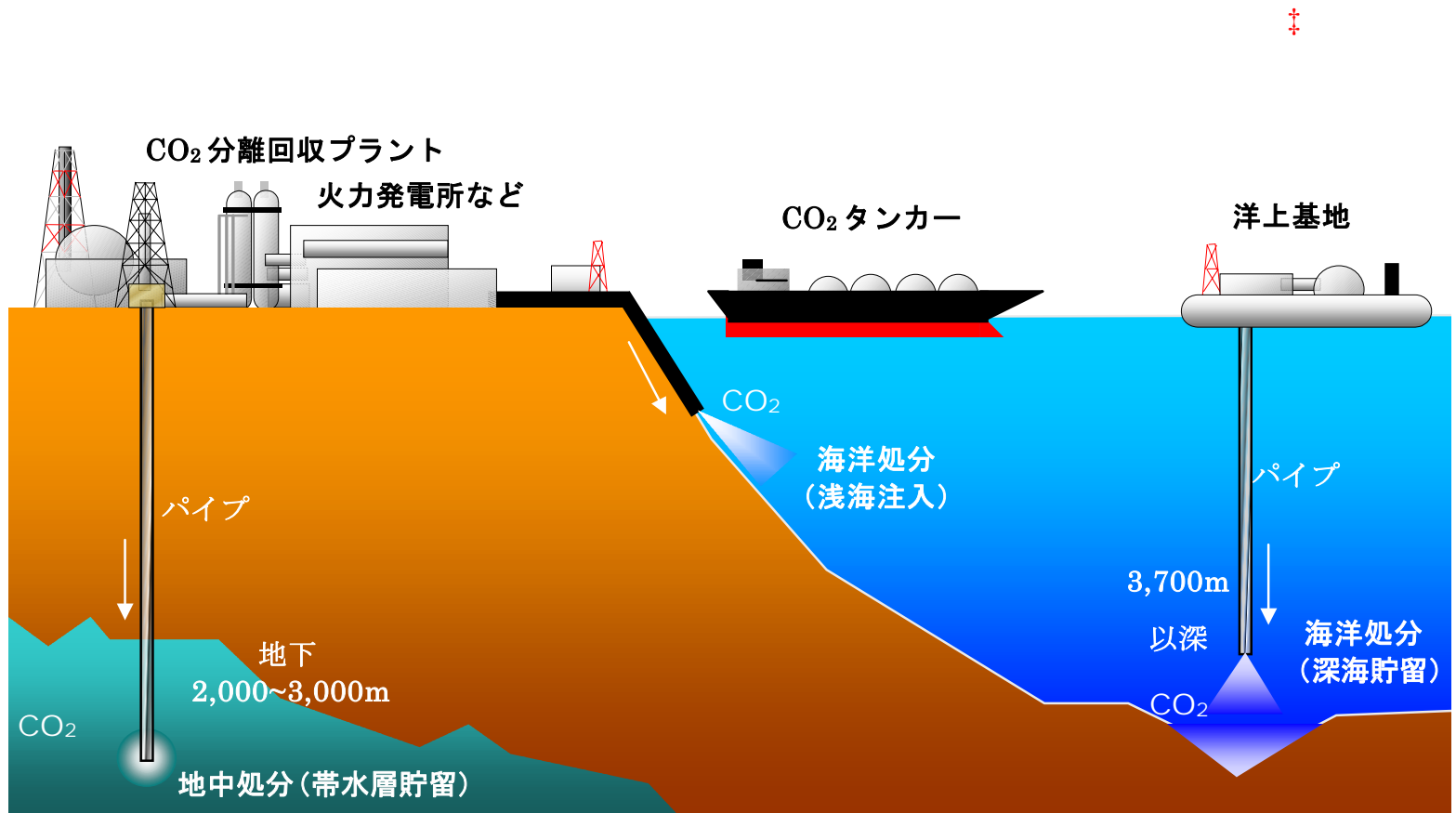


- **物理吸収法**

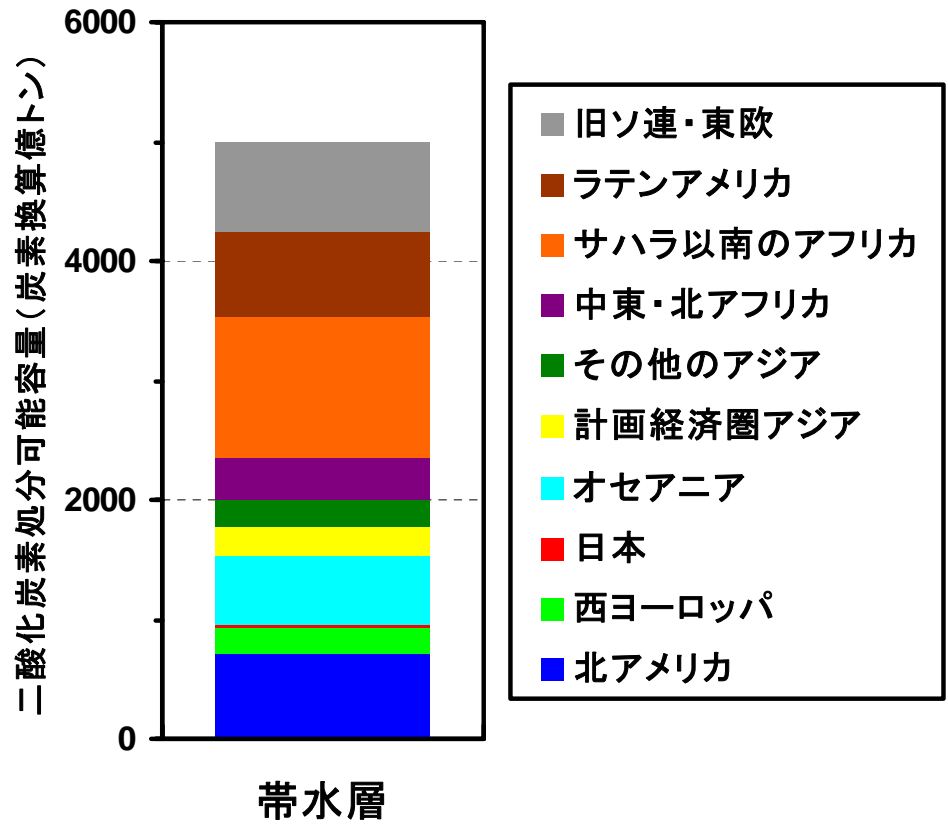
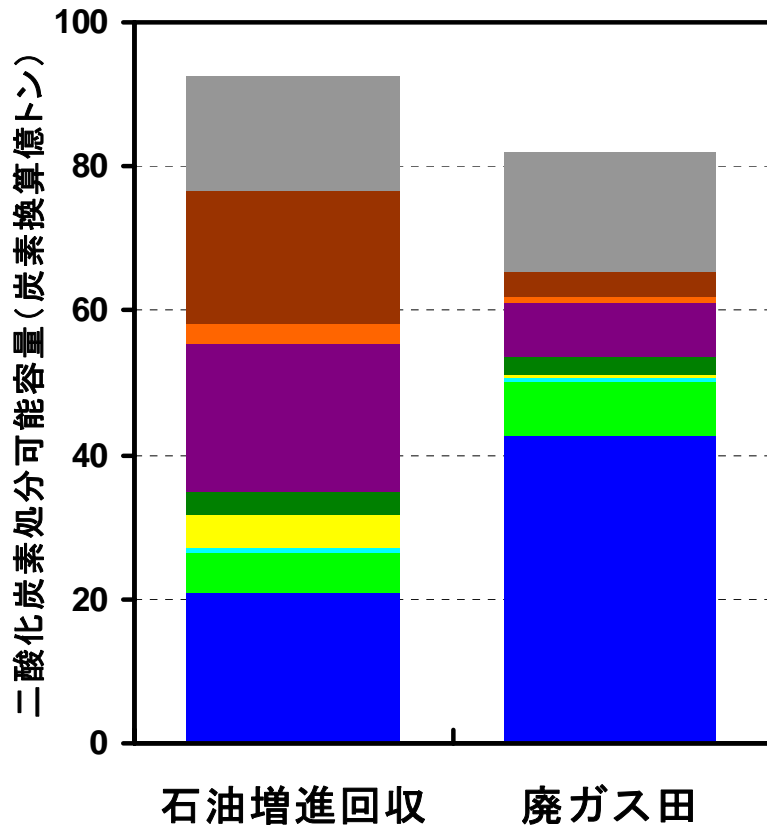
SELEXOLプロセス

CO<sub>2</sub>をポリエチレングリコールに溶解させる

# CO<sub>2</sub>の処理 地中処理、海洋処理

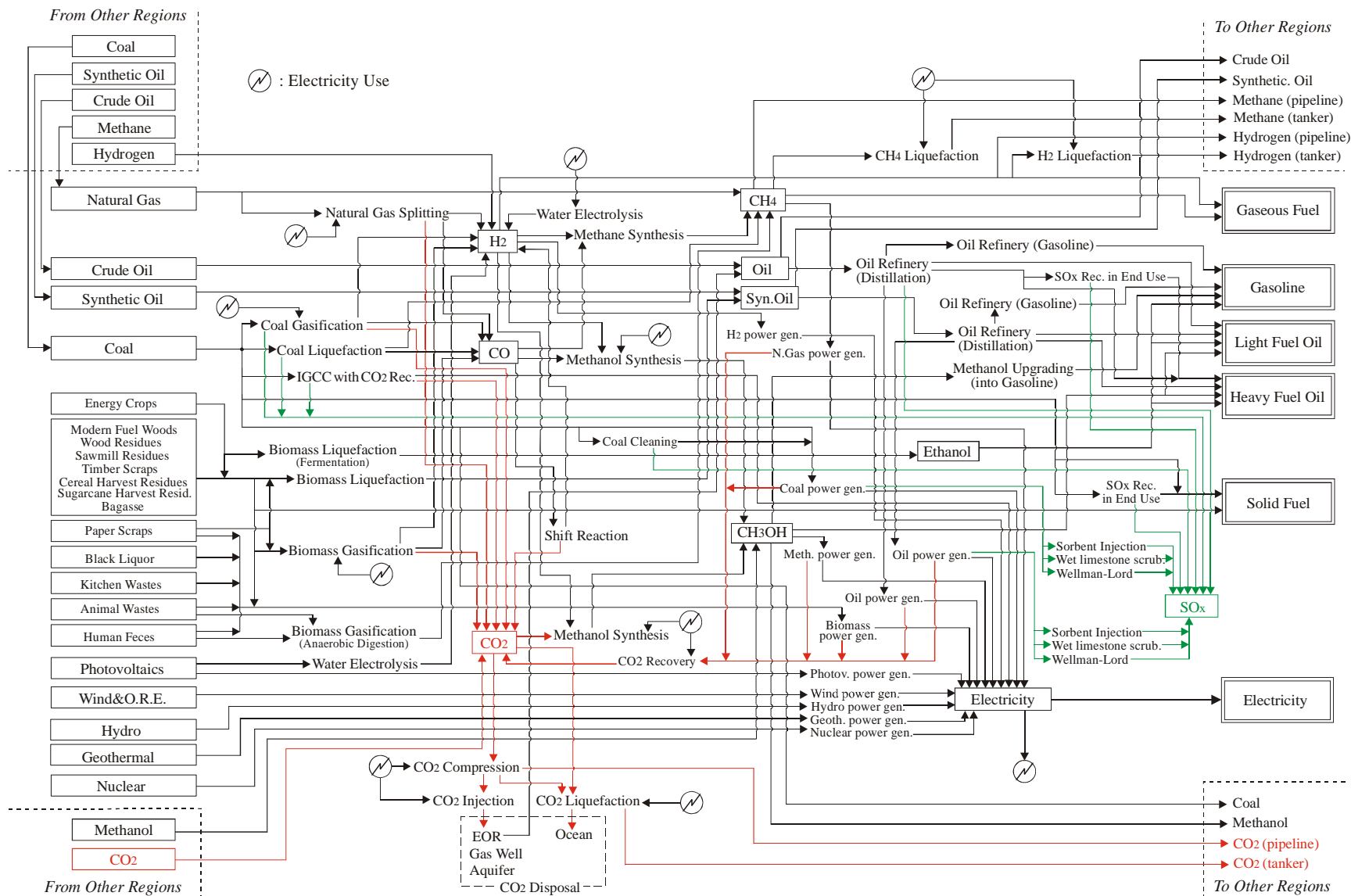


# CO<sub>2</sub>の処理 地中処理、海洋処理

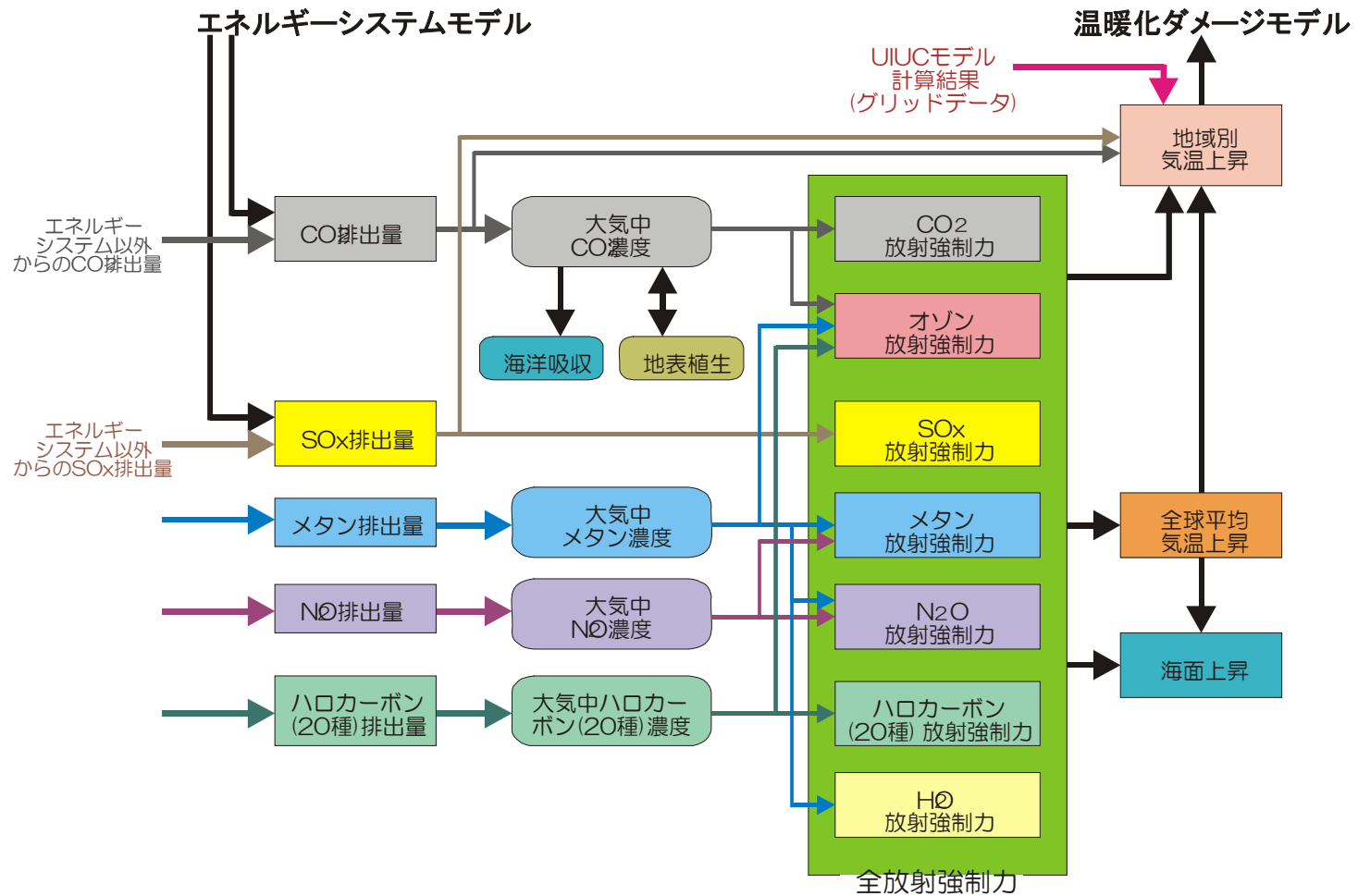


- 旧ソ連・東欧
- ラテンアメリカ
- サハラ以南のアフリカ
- 中東・北アフリカ
- その他のアジア
- 計画経済圏アジア
- オセアニア
- 日本
- 西ヨーロッパ
- 北アメリカ

# エネルギーシステム構成

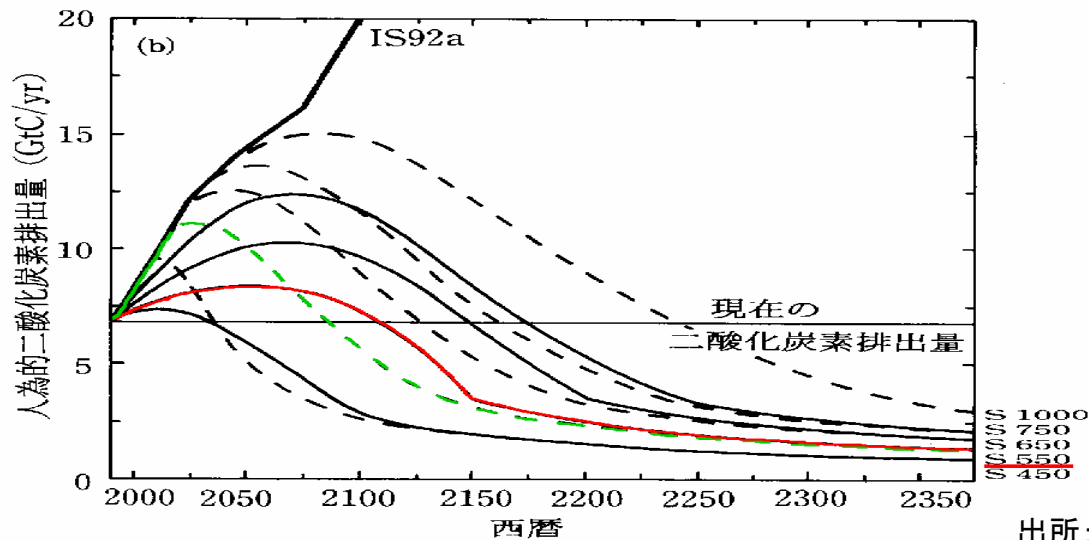
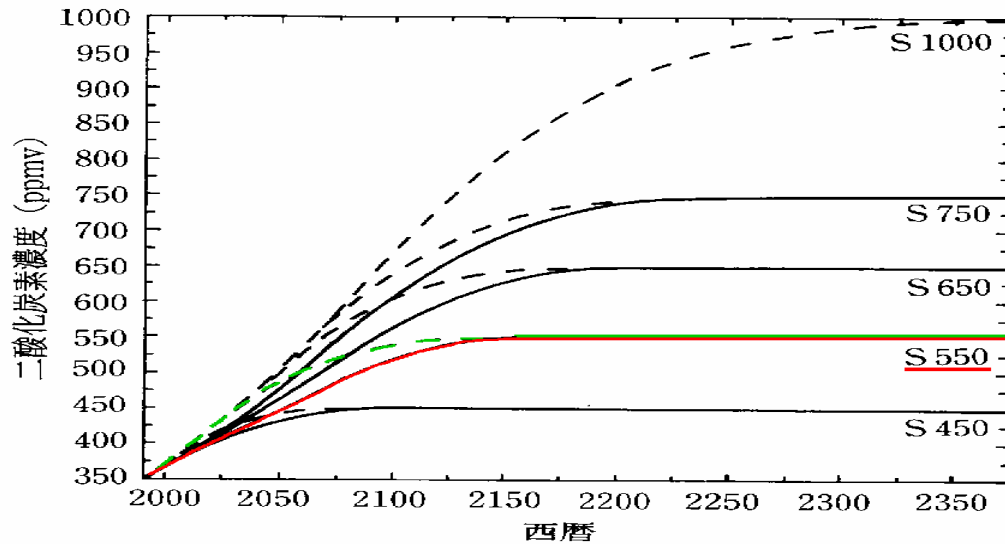


# 気候変動モジュールの概要



以下に示す結果では、大気中CO<sub>2</sub>濃度までを計算

# 大気中CO2濃度安定化の経路



出所: IPCC第2次報告

<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/chokei2004/chokei01/siryu2.pdf>, p3

濃度目標を決めてもそれを達成する排出経路は無数にある。

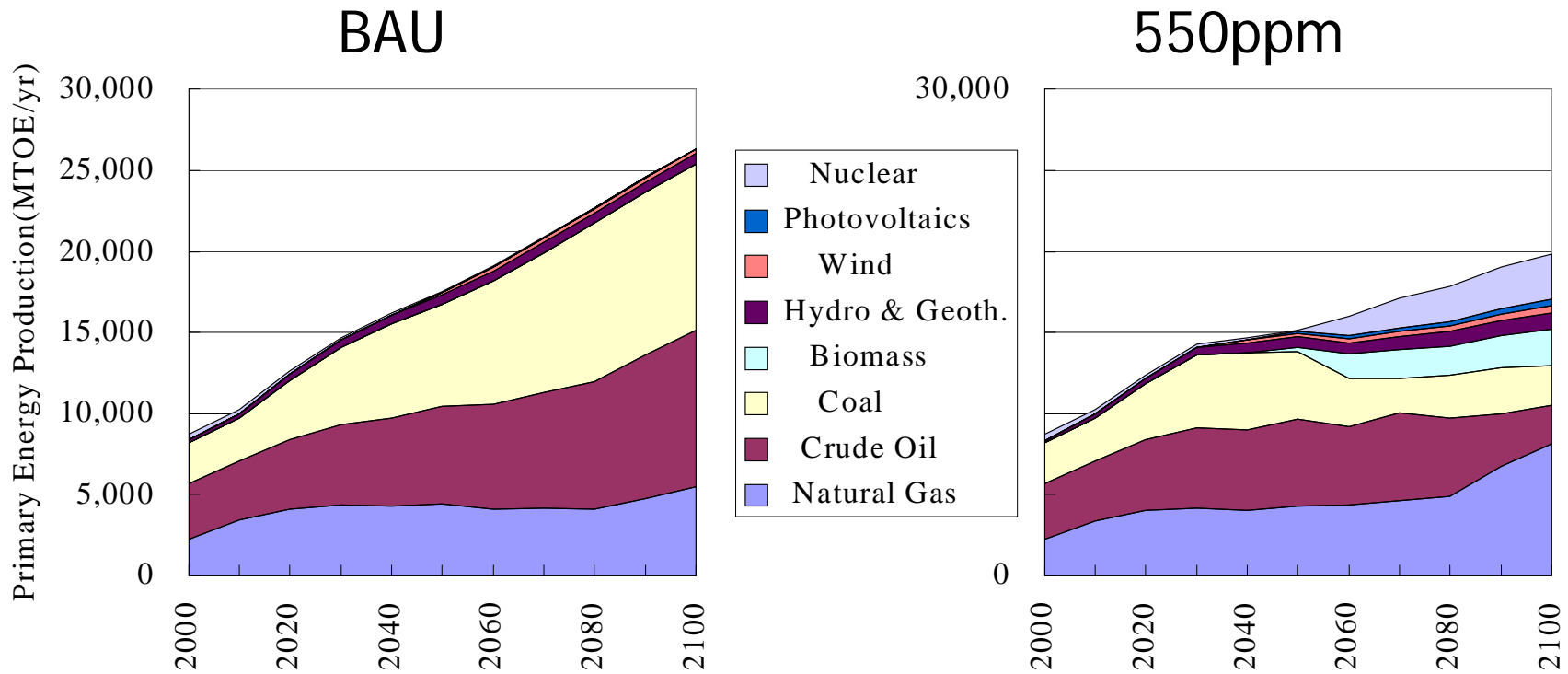
DNE21モデルは濃度目標を達成する排出経路、地域ごとの削減量、削減を実現する技術の選択を総費用最小化によって求めることができる。

# Simulation cases

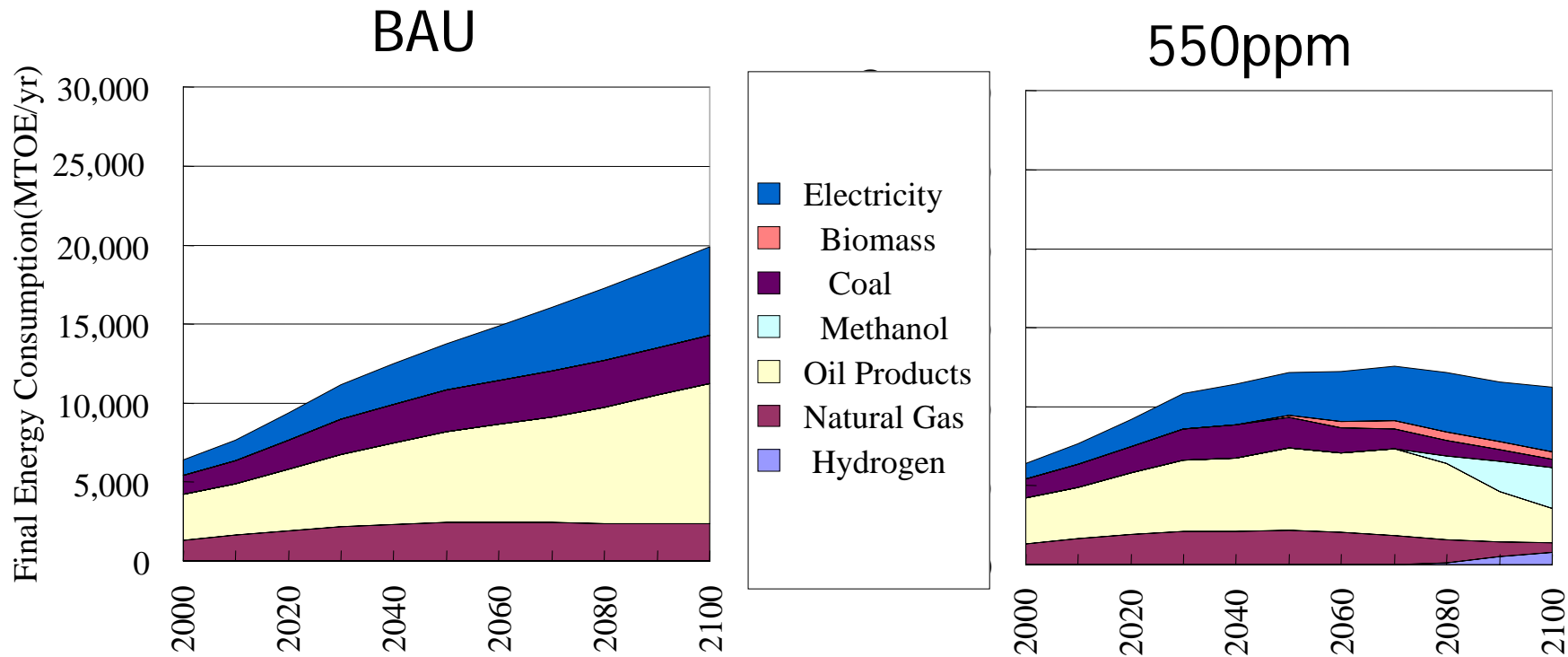
以下のモデル解析の出所：K. Yamaji, Long-Range Strategy for the New Earth 21 Plan,  
Japan Review of International Affairs,1999, Vol.12, No.4, pp.267-282 (1999)

	Case	CO2 constraints
1	BAU	free
2	550ppm	Global atmospheric CO2 concentration at 550ppm in 2100
3	COP3 forever	COP3 forever in Annex1 after 2010
4	300%	after 2020: Annex1:80% CO2 emissions at 1990 non-Annex1: 300% CO2 emissions at 1990

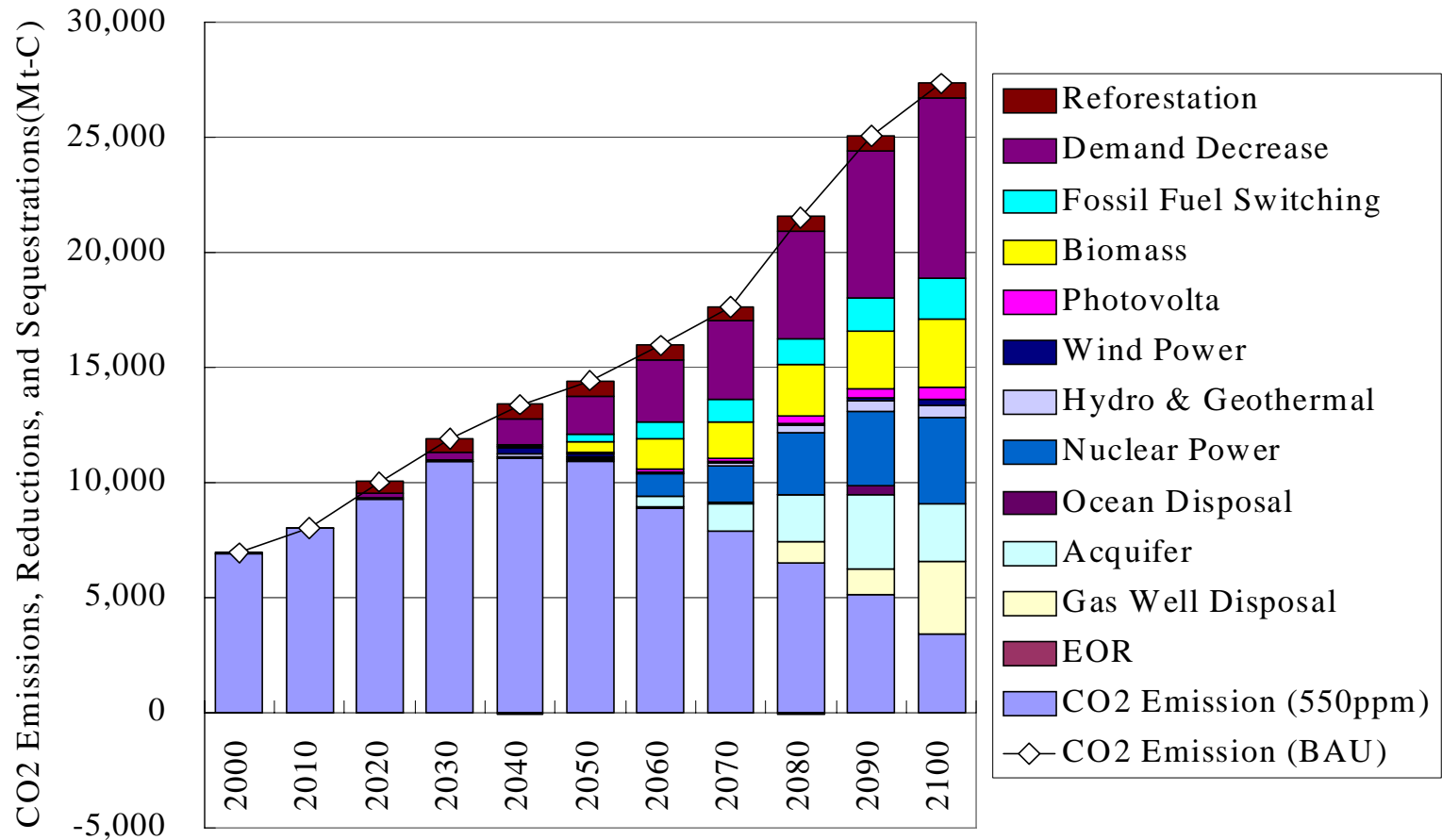
# Primary energy production



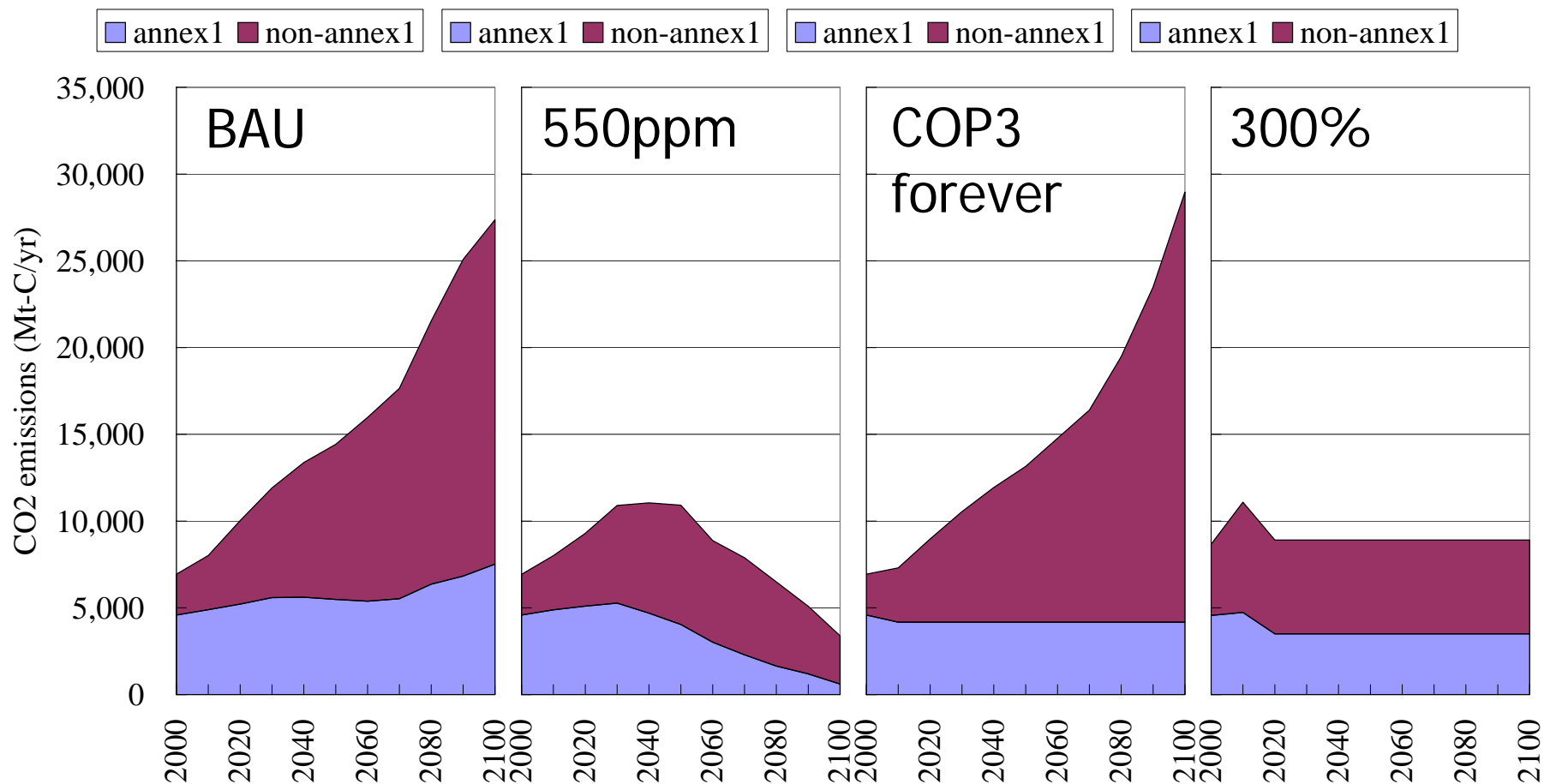
# Final energy consumption



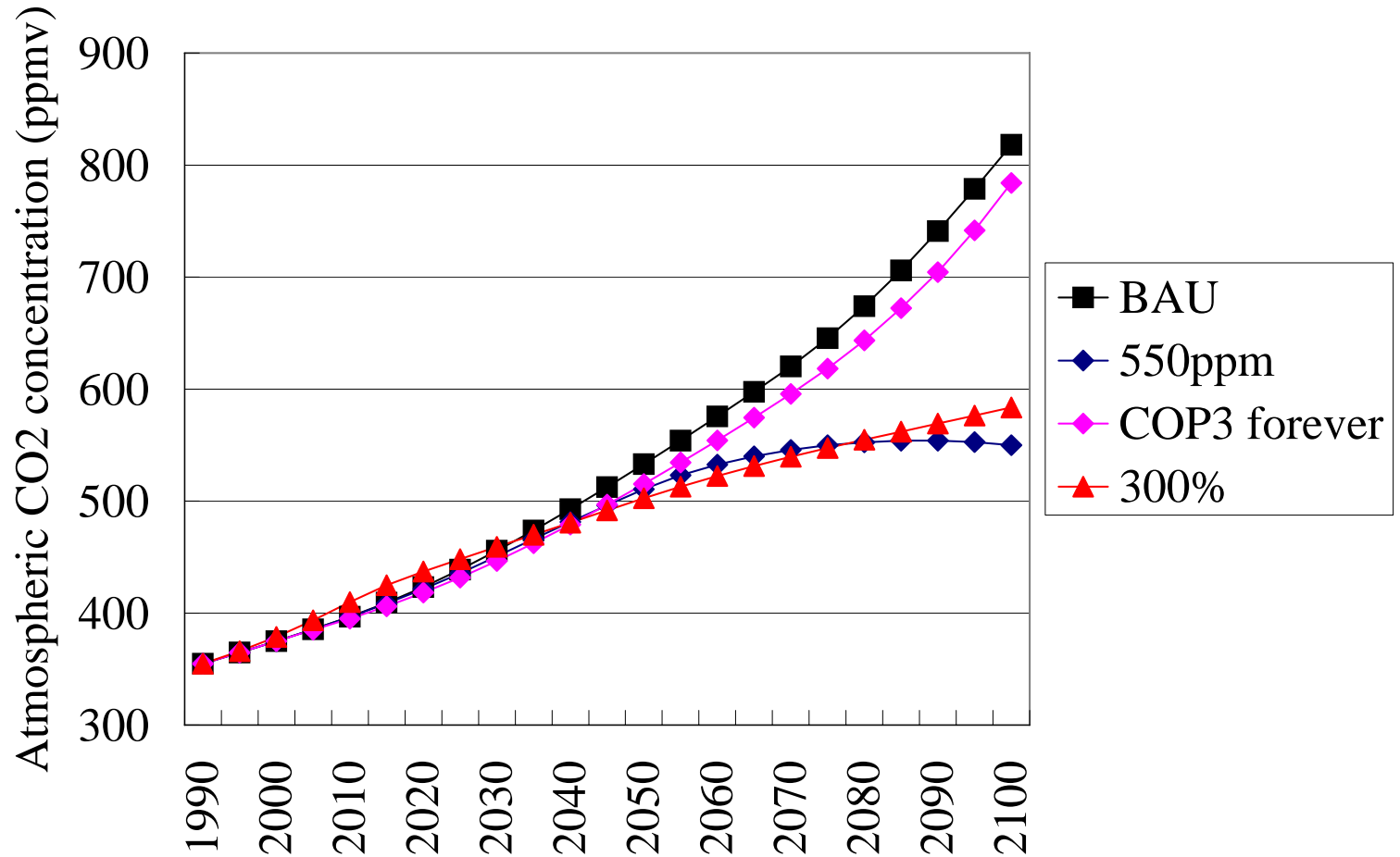
# Contributions of each technological option



# CO2 emissions



# Atmospheric CO2 concentration



# DNE21モデルの解析から得られる主要な結論

- ・世界全体で技術を組み合わせることでCO<sub>2</sub>濃度550ppm安定化は可能。
- ・CCSと組み合わせることで地球温暖化対策において化石燃料は重要な役割を果たす。
- ・削減のタイミングに関する柔軟性が重要。
- ・京都議定書は重要な第1歩。
- ・削減対策における途上国の参加は不可欠。

# 茅方程式(Kaya Identity)

$$CO_2 = (CO_2 / \text{Energy}) \times (\text{Energy} / \text{GDP}) \times \text{GDP}$$

ここで、 $X = (CO_2 / \text{Energy})$ とすると、 $X$ はエネルギーの炭素強度、つまり、エネルギー源の選択によるCO2削減効果を表す。また、 $Y = (\text{Energy} / \text{GDP})$ とすると、 $Y$ はGDPのエネルギー源単位、つまり、省エネルギーのマクロな指標を表す。ここで、上式の時間微分を行うと次の式が導かれる。

$$\frac{1}{CO_2} \frac{dCO_2}{dt} = \frac{1}{X} \frac{dX}{dt} + \frac{1}{Y} \frac{dY}{dt} + \frac{1}{GDP} \frac{dGDP}{dt}$$

つまり、CO2排出量の増加率は、 $X$ (エネルギーの炭素強度)と $Y$ (GDPのエネルギー源単位)およびGDPの増加率の和で表現される。

表 5 低炭素社会実現に必要な 2000 年から 2050 年にかけての改善速度

		Y	X		
		エネルギー集約度の改善率 (%/年)	炭素集約度の改善率 [内 CCS 分] (%/年)	想定 GDP 成長率 [一人当たり GDP 成長率] (%/年)	2050 年の削減目標[2000 年基準の削減率] (%)
過去の変化率の幅	世界	1.0~1.5	0.3~0.4		
2050 日本低炭素社会シナリオ試算 (1990 年基準)	シナリオ A	2.4	1.3 [0.5]	1.4 [2.0]	70 [68]
	シナリオ B	1.7	1.4 [0]	0.5 [1.0]	70 [73]
欧州諸国	イギリス	2.6~2.9	1.2~1.8 [0.3~0.9]	2.2~3.0 [2.1~2.8]	60 [60]
	ドイツ	1.8~2.8	1.3~2.3 [0~1.4]	1.4 [1.7]	80 [75]
	フランス	1.3~2.3	1.7~2.6 [0~2.0]	1.7 [1.7]	75 [70]

イギリスは現状（1997 年）から、ドイツ、フランスは 1990 年を削減目標の基準年としている。

$$(1-0.025)^{50}=0.975^{50}=0.282$$

# 地球温暖化対策に関する基本認識

- ・温暖化は現実に進行しており、その原因が人間活動に伴う温室効果ガス排出であることはIPCCによって確認されている。→今からは現象の解明だけでなく、世界規模で温暖化対策を本格化する必要がある。温室効果ガス排出の環境コスト(逆に言えば削減の価値)を社会に発信する仕組みが必要。
- ・しかし、温暖化の科学(特に影響予測)にはまだ不確実な領域が大きい。→予防保全の原則に基づいて対策に早期に着手する必要があるが、対策の選択において不確実性の考慮が大切。温暖化対策だけでなくほかにもメリットがある省エネや植林、リサイクルなどを優先して実施すべき。また、ある程度の温暖化は避けられないので途上国の国土整備などの適応対策も重要。
- ・対策の選択においては、実効性と地域間および世代間の衡平性が大切。→世界が協調して対策を行う京都メカニズム(排出量取引、共同実施、CDM)のような仕組みの工夫。最先端の技術の世界的な普及。長期的な排出経路に関する国際合意。
- ・主要な排出国が対策に参加することが不可欠。→米国は当然、中・印をはじめとする途上国の参加も不可欠。
- ・国別の排出目標設定という京都議定書の方策は実効ある国際制度としては参加国を広げることが難しい。→国別でなく主要排出部門別のアプローチ(省エネなど)が重要。
- ・世論に受け入れられやすい省エネや再生可能エネルギーの推進に加えて、原子力、CCS(CO<sub>2</sub>回収・貯留)についても社会が受け入れられるよう条件整備をする必要がある。
- ・技術は大きな削減可能性を持つがそれを現実のものにするためには社会的側面(経済性、国際的な普及、社会的受容)を重視する必要がある。