

ALPS国際シンポジウム

2017年2月7日

---

# パリ協定約束草案の 排出削減努力の評価

---

(公財)地球環境産業技術研究機構(RITE)

システム研究グループ グループリーダー

秋元 圭吾



1. 背景・目的
2. 世界の温室効果ガス排出の現状理解
3. パリ協定約束草案（排出削減目標）の評価
4. 日本の約束草案の排出削減費用の詳細評価
5. 気候変動リスクマネージメントに向けて
6. まとめ



# 1. 背景·目的

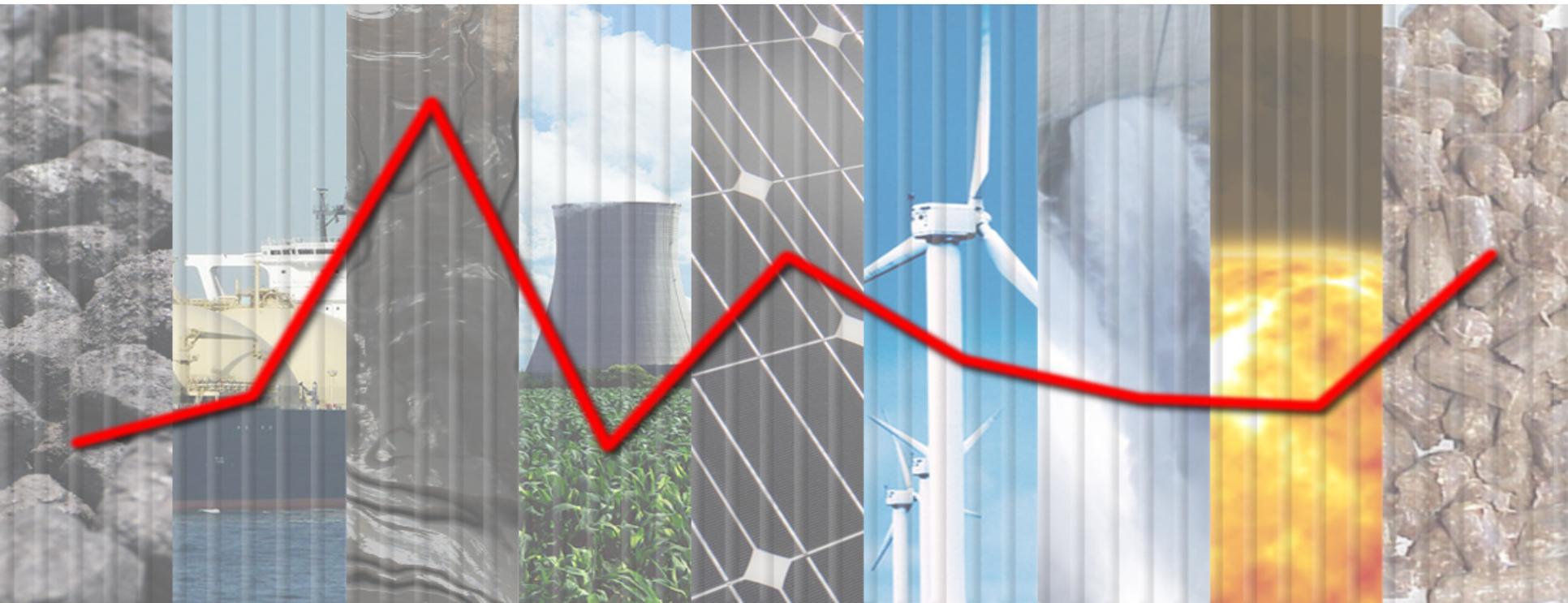


地球温暖化問題は大変複雑。現実社会で効果の上がる形で温暖化対策を進めることが重要。そのために、温室効果ガス排出削減策を技術的な側面、経済的な側面、政策的な側面など、総合的に把握し、定量的な分析・評価等を行い、真のグリーン成長を実現する国際枠組み、戦略立案に資することを目的にしている。

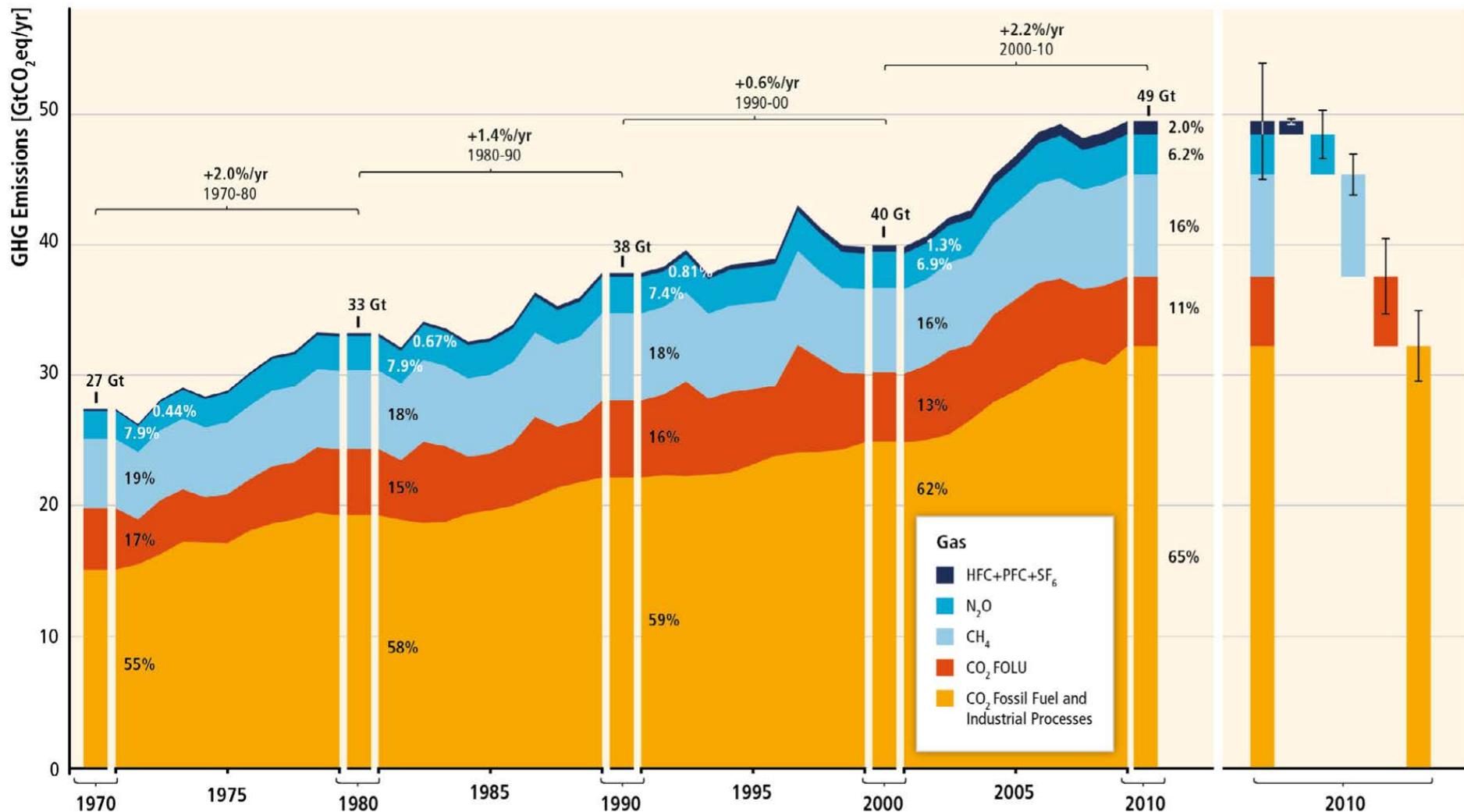
## 【主な研究実施項目】

- ◆ 気候変動リスクマネジメント戦略の検討
  - 気候変動影響被害、適応、および緩和費用の推計およびその不確実性の整理
  - 長期目標と排出経路の検討、分析(統合評価モデルによる分析等)
  - 気候変動の不確実性下でのリスクマネジメント戦略のあり方の検討 等
- ◆ 真のグリーン成長の実現パスを提示するための経済学的な理解の深化、分析
  - グリーン成長の可能性としての省エネ技術普及障壁除去、大気汚染対策との関係に関する論理的、実証的考察(可能性と限界)、モデル分析による評価
  - 国際エネルギー生産性ギャップ推計(日米比較)
  - 国際的な石炭火力発電融資規制の影響分析 等
- ◆ システム的な方策の検討・評価
  - 水素システム(供給、輸送、消費の全体システム)の分析、評価
  - 建物・まちづくり・運輸のシステムの検討・評価 等
- ◆ 国際的な枠組み、政策課題等に即したモデル分析・評価
  - 約束草案NDCの評価方法に関する検討と分析・評価
  - 国際モデル比較プロジェクトを介しての排出削減対応策への貢献 等

## 2. 世界の温室効果ガス排出の 現状理解



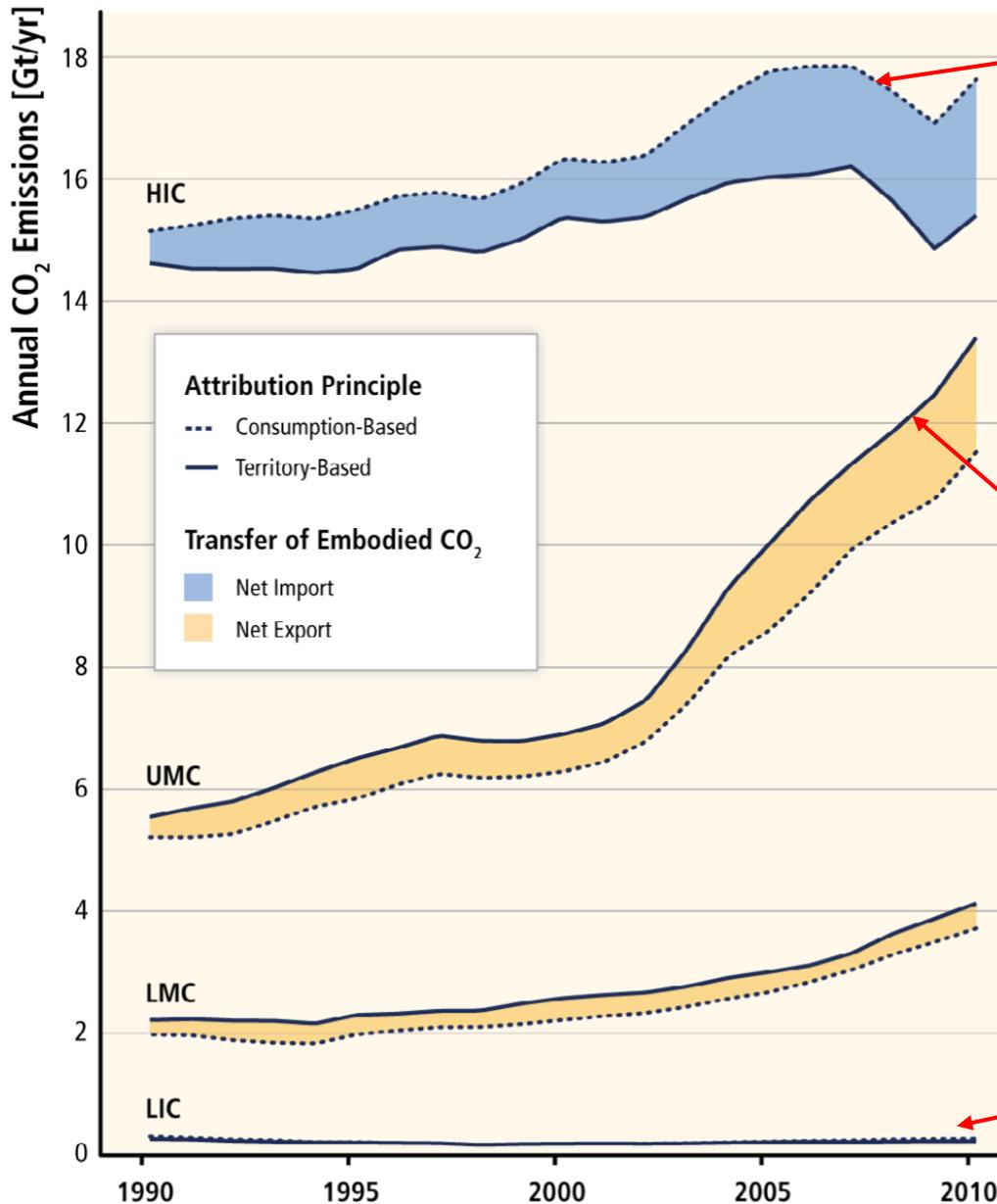
# 世界の温室効果ガス排出量の推移(ガス種別)



出典) IPCC WG3 第5次評価報告書、2014

近年、世界の排出量はむしろ増大。京都議定書(1997年採択、2005年発効)は効果を発揮できず

# 世界のCO2排出量の推移(地域別)



消費ベースで見たCO2は高所得国もさほど抑制できていない。

高所得国  
(\$12,616以上)

高中位所得国  
(\$4,086 to \$12,615)  
(中国、ブラジル、イラン、マレーシア、南アなど)

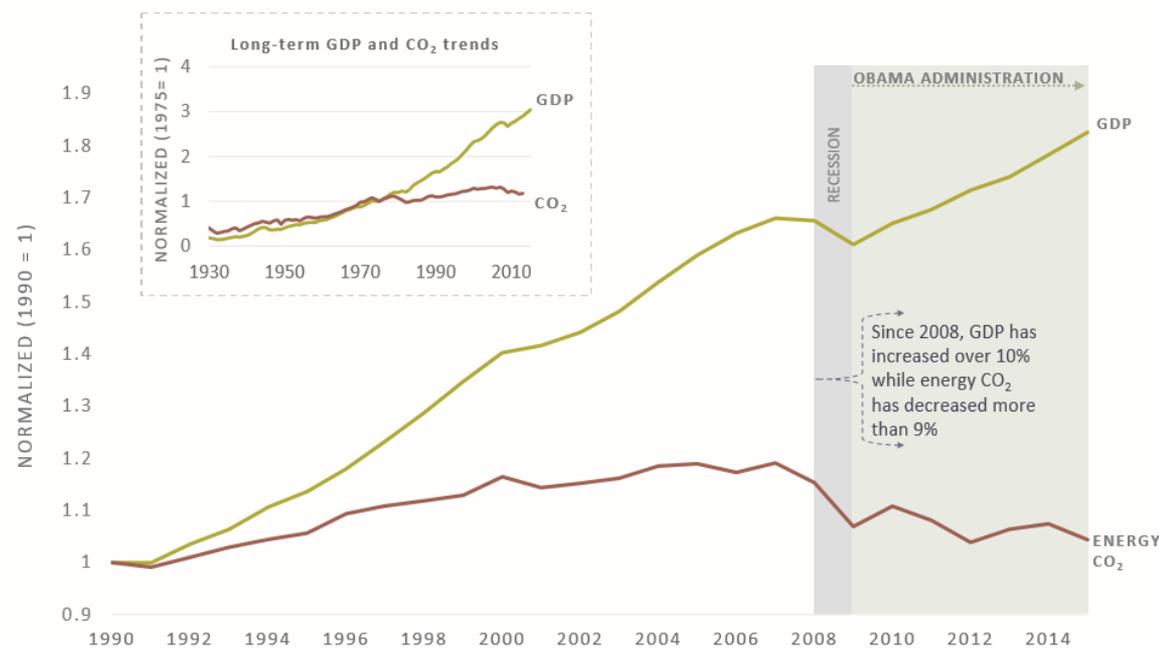
CO2排出の急増

低中位所得国  
(\$1,036 to \$4,085)  
(インド、インドネシア、フィリピン、エジプトなど)

CO2排出とは無縁で貧困に苦しんでいる国もある。

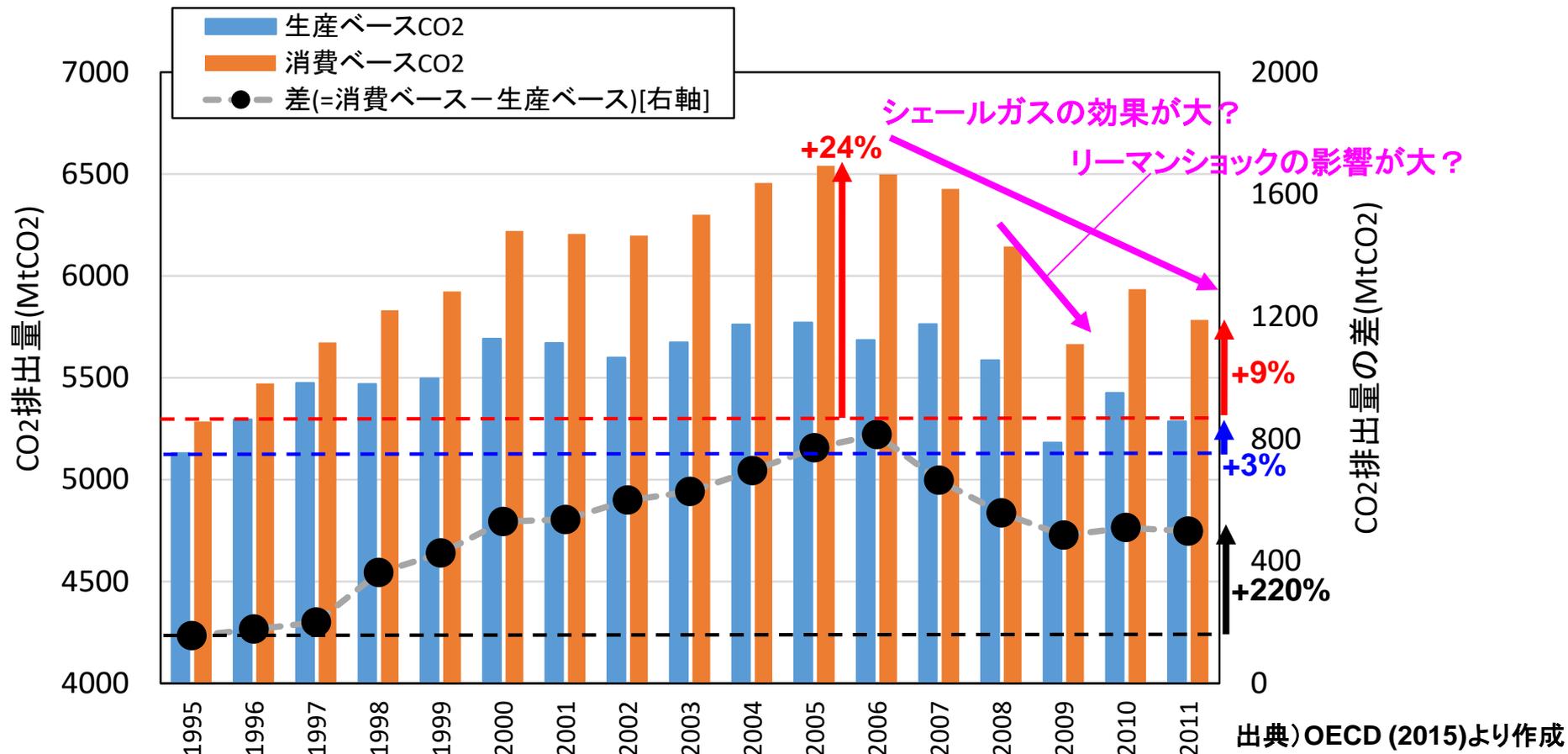
低所得国  
(\$1,035以下)

- ◆ 米国は2008年以降、経済成長とGHG排出削減を実現。経済は10%成長したが、エネルギー起源CO2排出は9.5%減少
- ◆ すなわち、経済成長とCO2排出のデカップリングを達成。気候変動に立ち向かうためには、低成長・生活水準の低下を余儀なくされるとの論争に終止符を打つもの
- ◆ GHGを最も多く排出する発電分野では、2008年には天然ガス発電のシェアは21%だったが、現在では石炭からガスへのシフトによって33%にまで上昇。
- ◆ 再生可能エネルギーのコストは、2008年から2015年の間に、風力は41%、屋根付き太陽光は54%、大規模太陽光は64%もコストが低下した。
- ◆ クリーンエネルギーへの税額控除といった政策も大きな役割を担ってきたが、技術進歩や市場原理は今後も再エネを増大させ続けるとみられる。
- ◆ 短期政策から距離を置き、気候変動に立ち向かい、クリーンエネルギーへの移行政策を立案するにあたって、最新の科学や経済学が有益なガイダンスを与えるだろう。



Source: United States Mid-Century Strategy for Deep Decarbonization, Nov. 2016

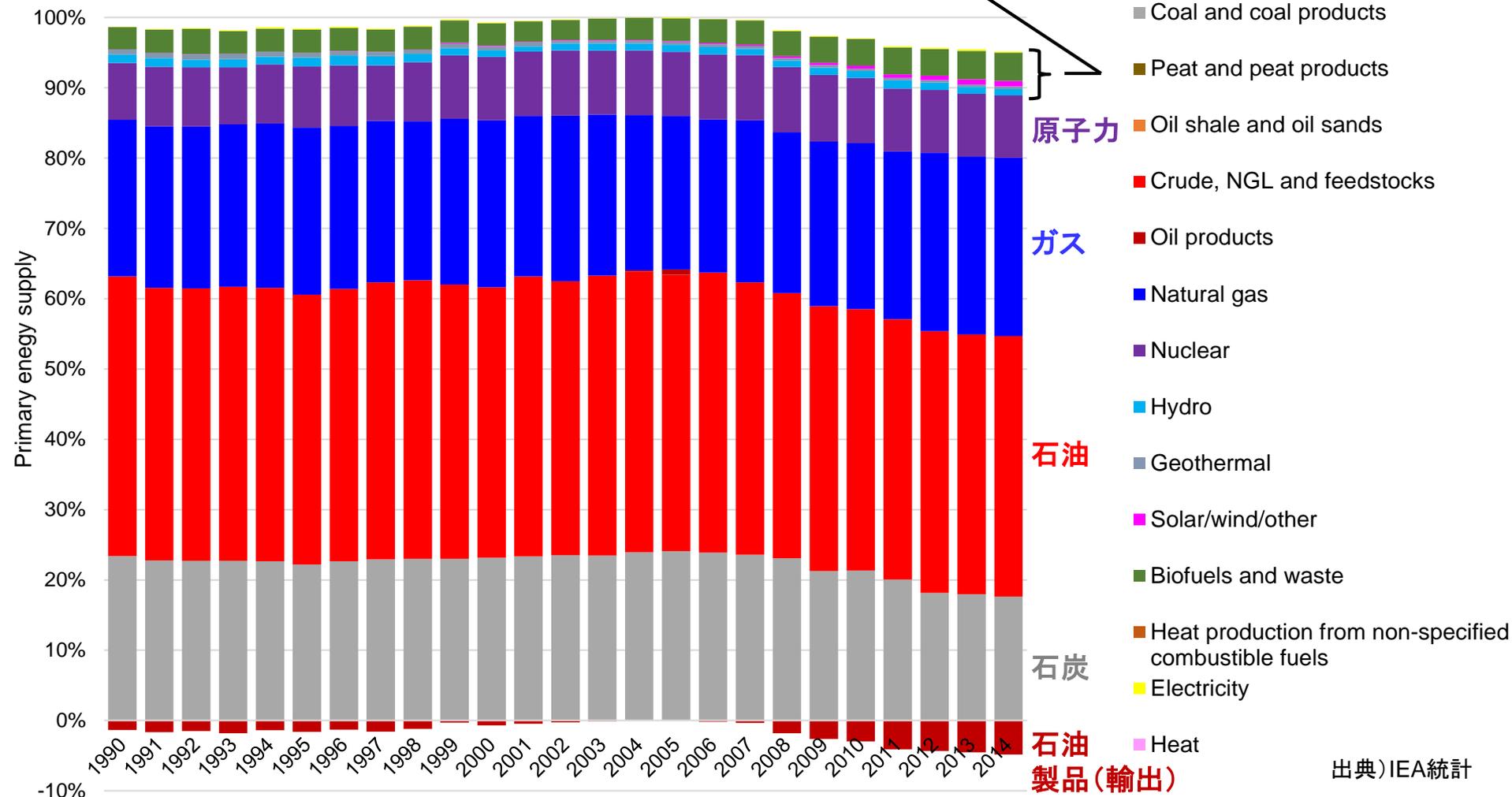
# 米国の消費ベースCO<sub>2</sub>排出量の推移



- 米国は消費ベースCO<sub>2</sub>と生産ベースCO<sub>2</sub>の差分は2006年にかけて大幅に増大。2005年の消費ベースCO<sub>2</sub>は、1995年比で+24%。
- しかし、シェールガスが拡大しはじめた2006年からは減少に転じてきている。安価なエネルギー利用が可能となったことで製造業の米国内への回帰によるものと見られる。それでも、2011年の消費ベースCO<sub>2</sub>は1995年比で+9%(生産ベースCO<sub>2</sub>では+3%)。

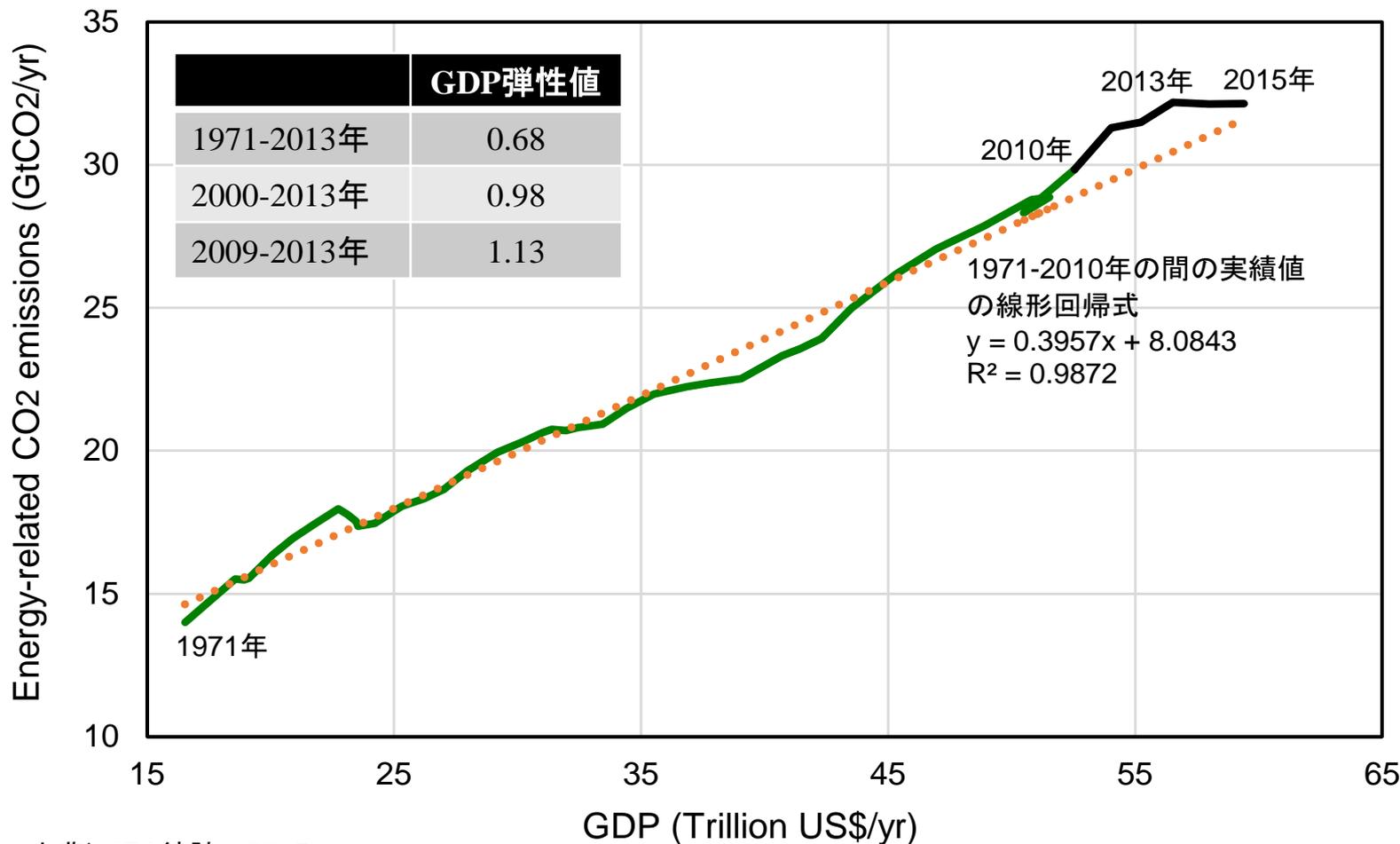
# 米国の一次エネルギー供給量推移

再エネの増加はわずか(2000年:4.8%⇒2014年:6.7%)



2005年以降、シェールガス生産増大に伴って、石炭比率が減少、ガス比率が上昇(CO2排出の減少に貢献)。また、ガスの増加に伴い、余剰の石油製品を輸出(世界ではCO2は減っていない)。なお、シェールガスは温暖化政策によって実現したわけではない。

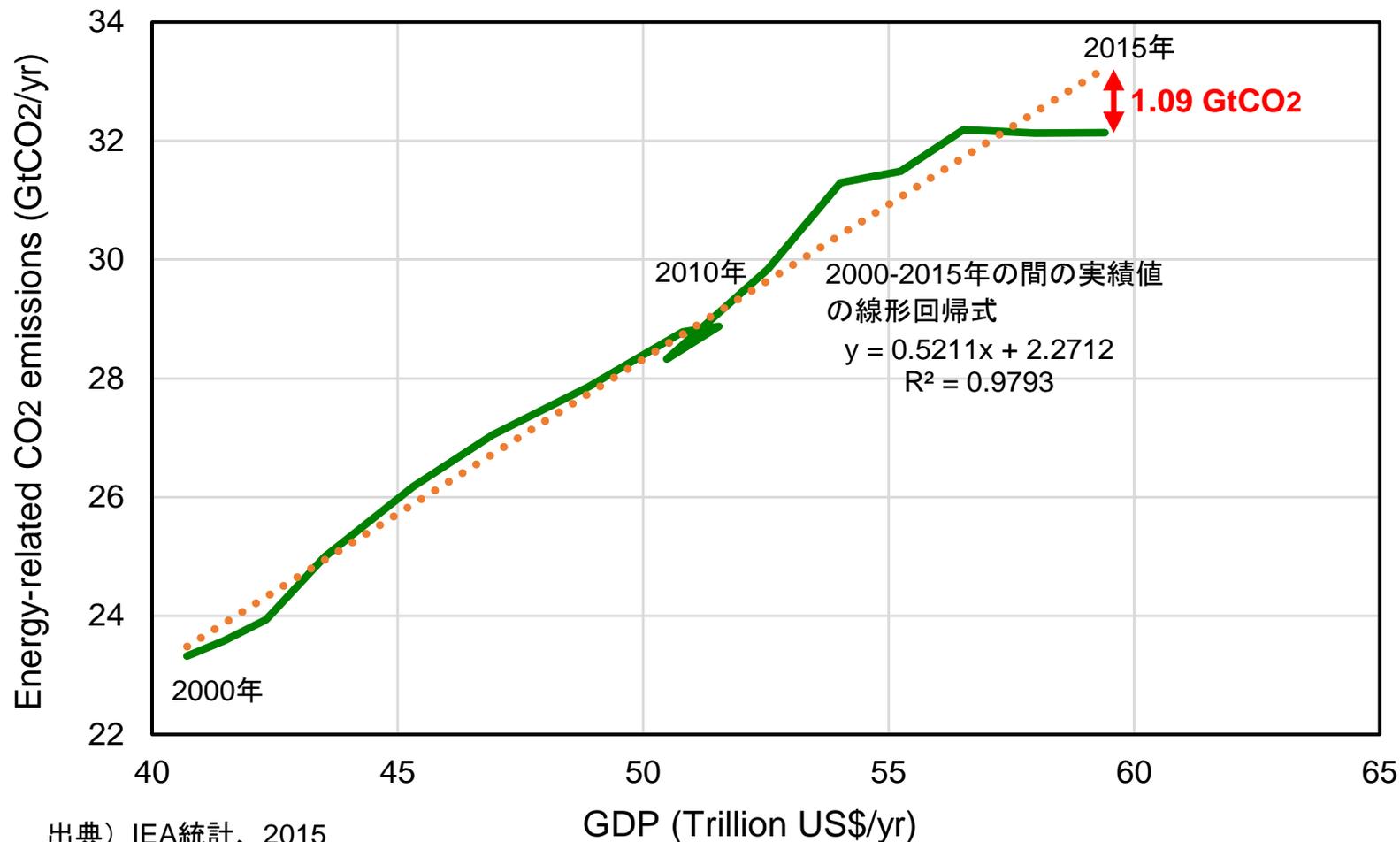
# 世界の経済成長とCO2排出量の関係(1971~2015年)



出典) IEA統計、2015

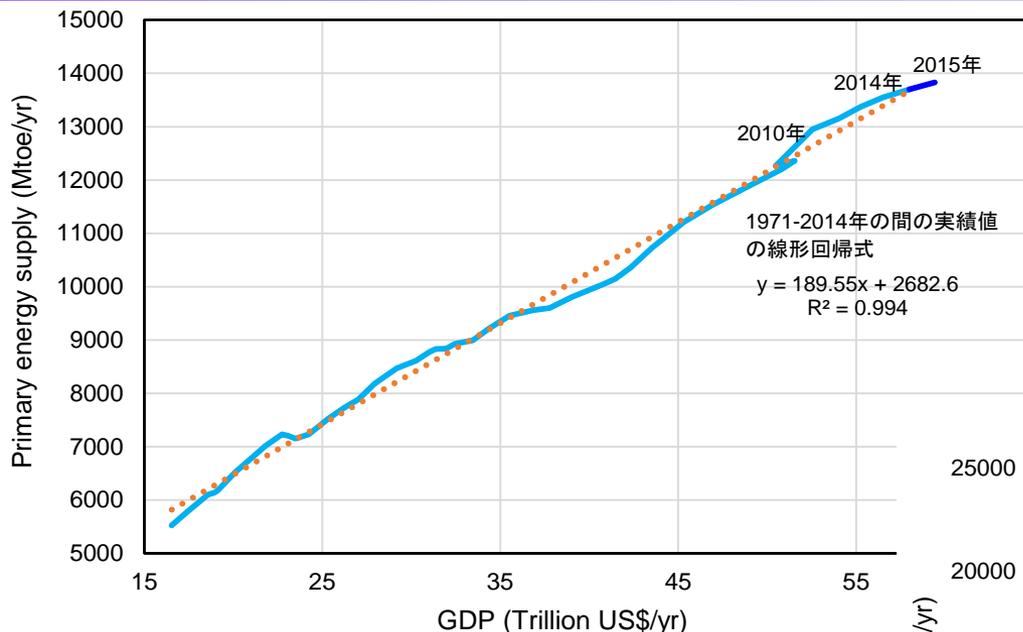
世界GDPとCO2排出量の関係は基本的に強い正の相関が見られる。2013-15年にかけて排出量はほぼ横ばいだが、長期の傾向で見ると、むしろ2009-13年の間の排出の伸びが大きかったものが調整されてきているに過ぎないと見ることもできる。

# 世界の経済成長とCO2排出量の関係(2000~2015年)



前ページで示したように、長期の排出トレンドからすると、2014-15年の排出量は、そのトレンドに戻ってきたに過ぎないと考えられるが、2000-15年の排出実績に限って線形回帰を行った結果の2015年を基準排出量ととると、2015年での実績排出量との差は、1.09 GtCO<sub>2</sub>となる。この約1.1GtCO<sub>2</sub>の削減の要因について考察を行った。

# 世界の経済成長と一次エネルギー、電力消費量の関係



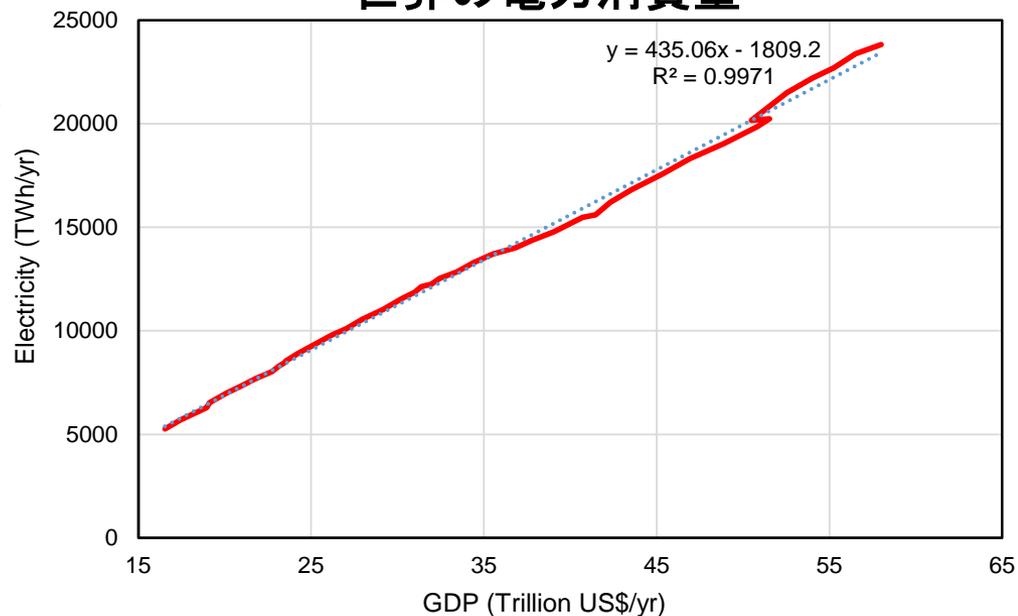
## 世界の一次エネルギー供給量

注)2014~15年についてはBP統計の伸び率を用いて補完したもの

1971~2014年

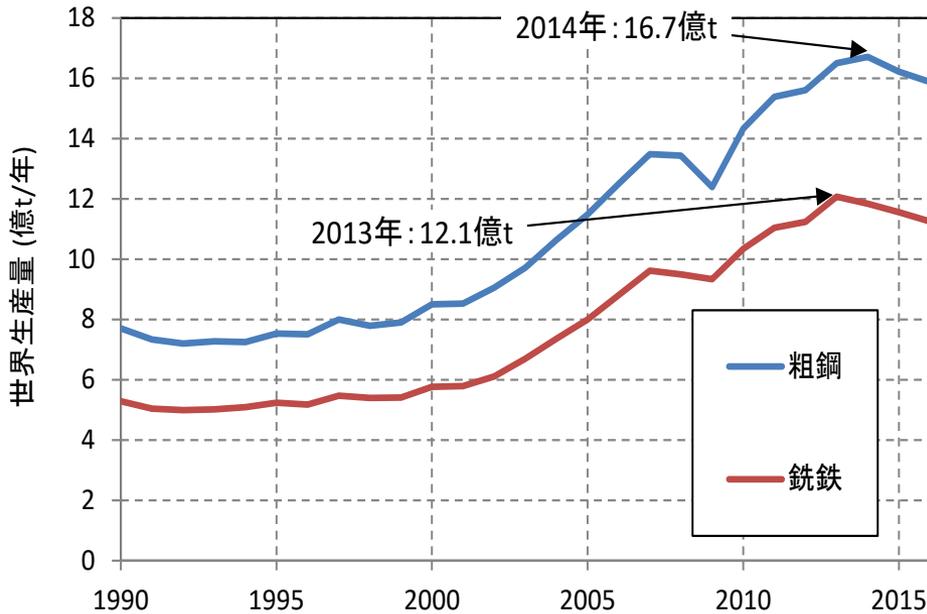
出典) IEA統計、2016

## 世界の電力消費量

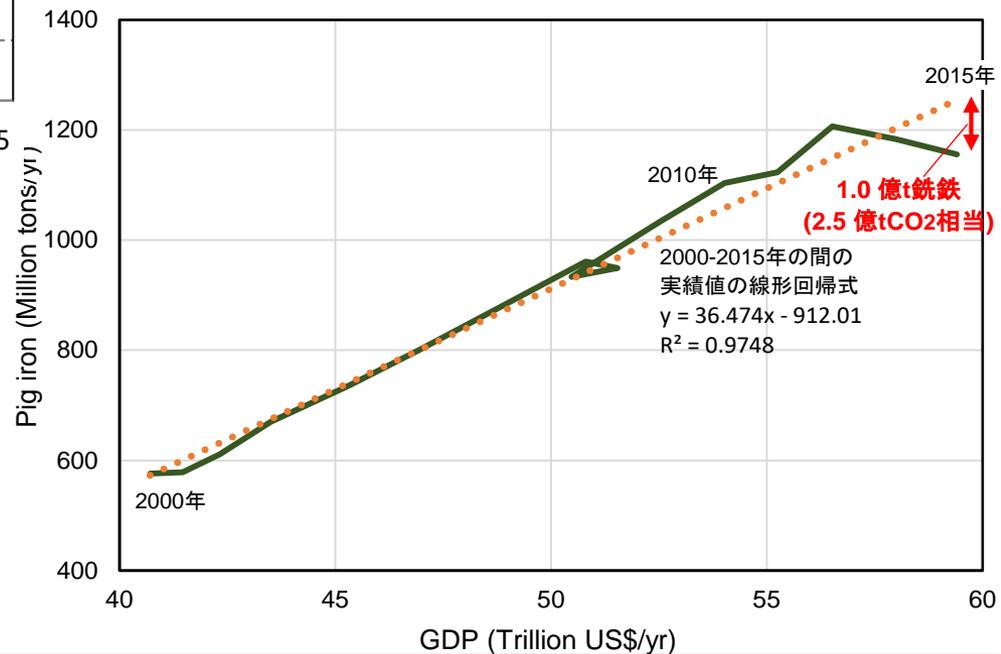


世界GDPと一次エネルギー供給量、また電力消費量の関係を見ると、CO2排出量との関係以上に、線形に近い強い正の関係が見られる。一次エネルギー供給量や発電電力量で見ると、2015年まで見ても、GDPとのデカップリングは見受けられない。

# 世界の経済成長と銑鉄生産量の関係



注) 2016年値は1-5月期生産量 (worldsteel速報値) に基づきRITE概算



2000-15年のGDPと銑鉄生産量のトレンドに基づく、2015年時点で銑鉄生産量(世界計)は約1.0億t減少し、これは約2.5 億tCO<sub>2</sub>の減少に相当する。

# 世界の経済成長とCO<sub>2</sub>排出量の関係(概算)

要因	2015年排出削減効果	内容
世界の銑鉄生産量の減少	約2.5億トン	銑鉄約1.0億トン減少
世界のセメント生産量の減少	約0.5億トン	セメント約1.7億トン減少
米国のシェールガス利用拡大による減少	約2.2億トン	米国における石炭火力からガス発電への転換の促進による
再エネ発電(太陽光・風力・地熱など)拡大による減少	約1.6億トン	再エネ発電比率の2000-15年の平均的な拡大に対し、2015年は1.2%ポイント分大きい
日本のCO <sub>2</sub> 排出量低下	約0.4億トン	原子力稼働率の低下などで2013年にかけて約1.1億トン引き上げていたが、低効率の石油火力等の停止等により、2015年には+約0.7億トンに
<b>要因積み上げ削減効果計</b>	<b>約7.2億トン</b>	
<b>マクロ推計からの排出削減効果</b>	<b>約10.9億トン</b>	

- 銑鉄、セメント生産量の減少は、中国の特殊事情と考えられる。一方、将来的に、まだインフラ形成が不十分なインド等の途上国で、生産量の増大が予想され、継続的なCO<sub>2</sub>排出減につながるとは考えにくい。
- 再エネについては、オバマ前大統領論文の指摘のように、化石燃料よりも安価で政策措置がなくても経済合理性を有する再エネが大きいのか、政策措置による再エネ導入が大きいのかによって、デカップリングの見方は異なってくる(前者であればデカップリング要因)。しかし、少なくともこれまでは、後者であったと見るのが妥当。

# 3. パリ協定約束草案(排出削減目標)の評価

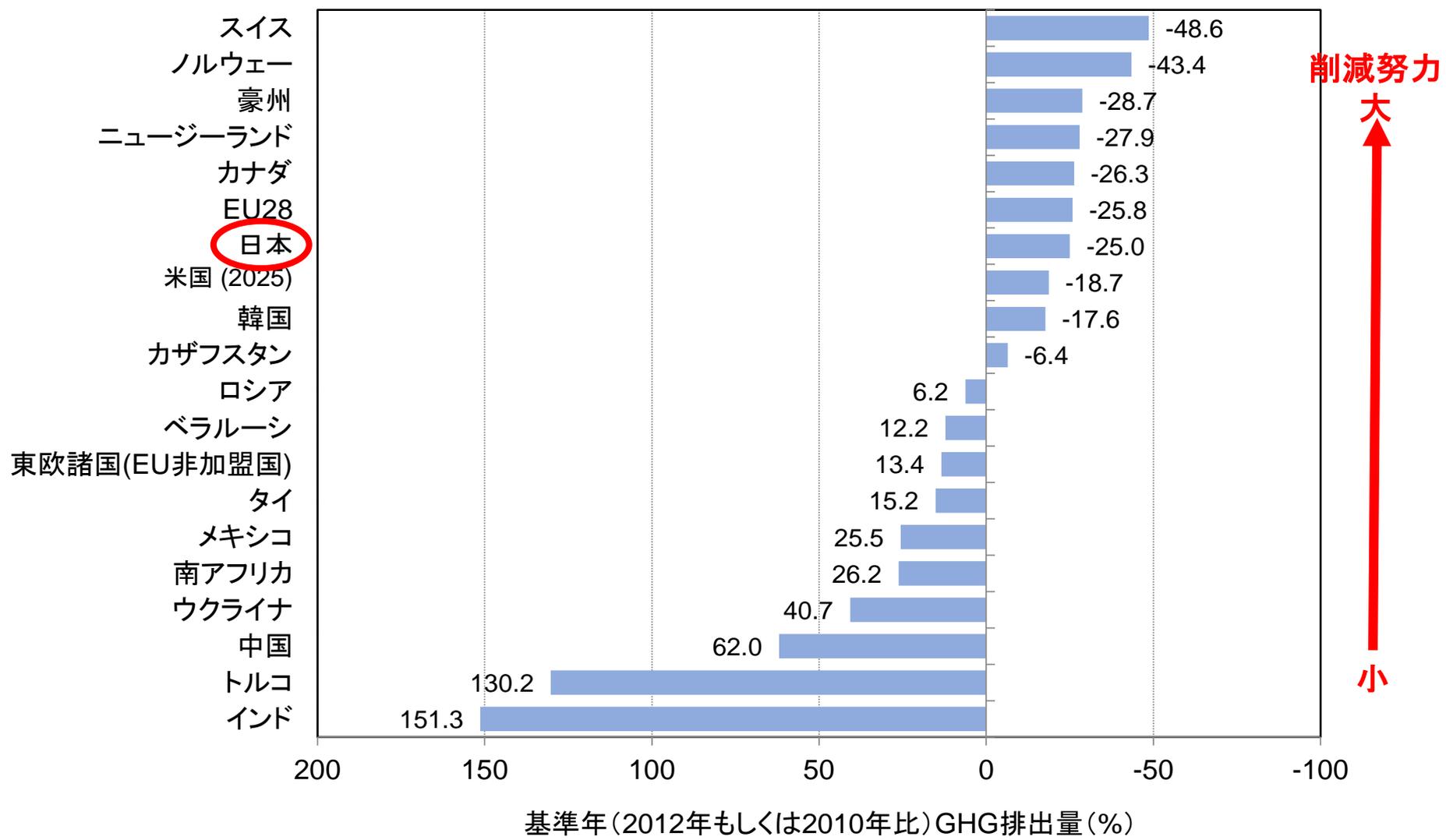


# パリ協定の意義と課題

- ◆ パリ協定は、ほぼすべての国が自国の排出削減に取り組む国際枠組みができ、しかもそれが継続される形となった点で、グリーン成長を目指す第一歩となったと評価できる。
- ◆ しかし、課題として、各国が自主的に提出する排出削減目標が、実質的に排出削減努力を有する目標となっているのか、適切なレビューを進めることが重要
- ◆ 各国の排出削減目標達成の限界削減費用の差異が大きすぎれば、産業の移転、炭素のリーケージを生じ、すべての国が参加する枠組みといっても、世界レベルでの排出削減にはつながらない懸念あり。

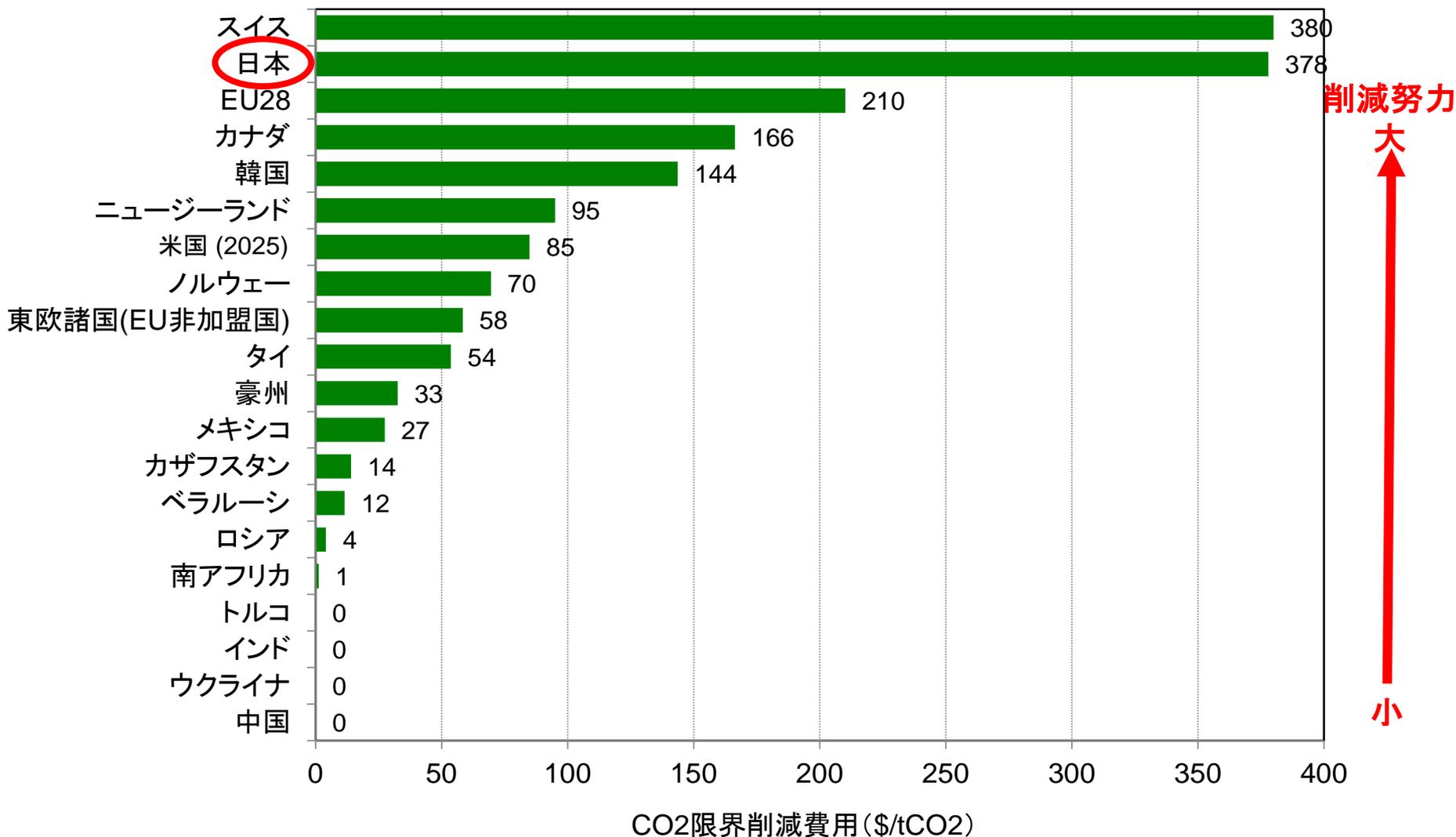


# 基準年(2012年もしくは2010年)比排出削減率の国際比較



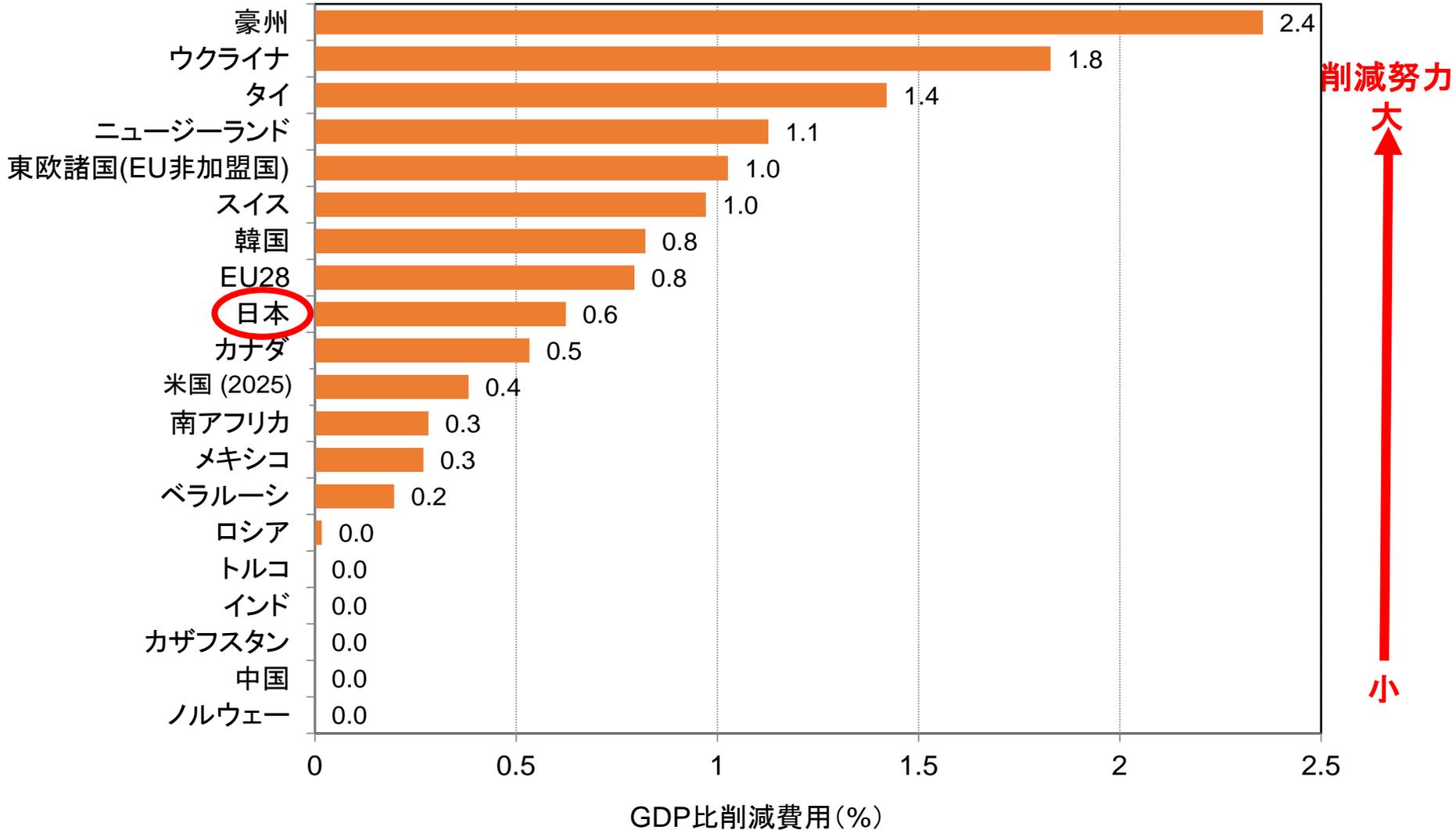
\* 上下限で幅がある国は平均値を表示

# 2030年における約束草案のCO<sub>2</sub>限界削減費用の国際比較



\* 上下限で幅がある国は平均値を表示

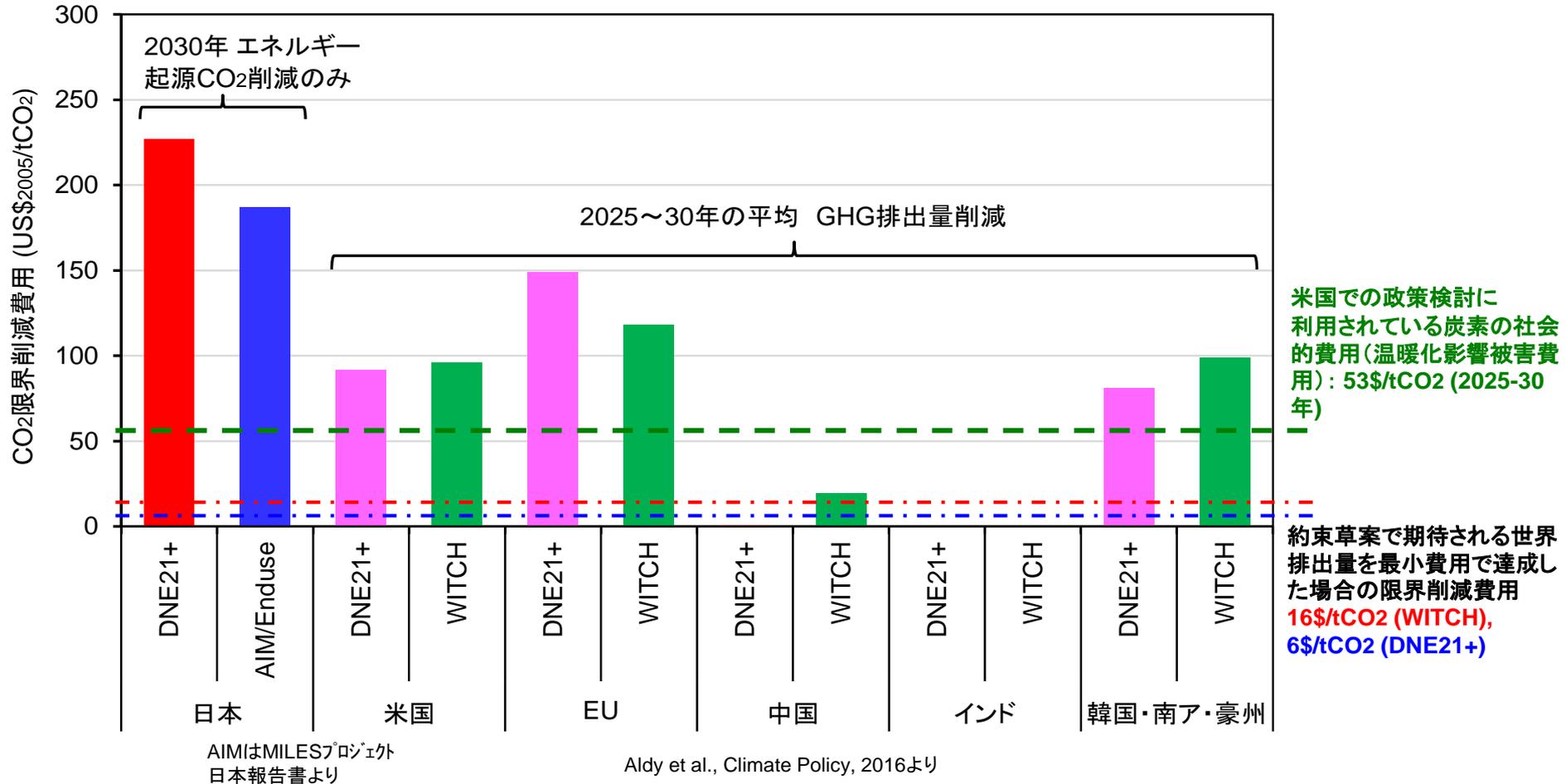
# 2030年における約束草案のGDPあたり排出削減費用の国際比較



\* 上下限で幅がある国は平均値を表示

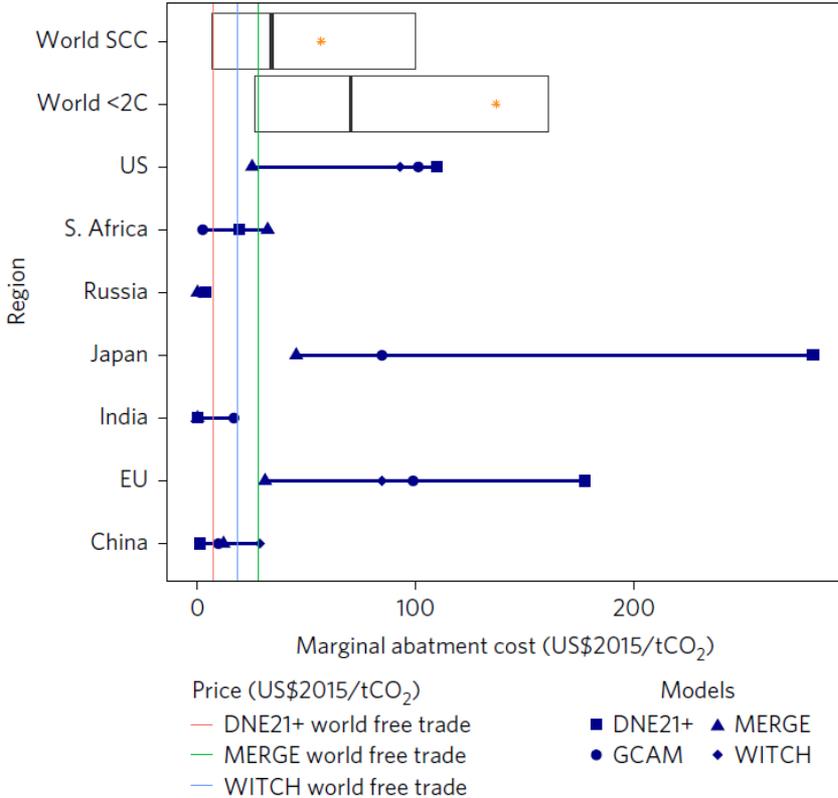
# CO2限界削減費用推計

## — 国環研AIM、FEEM WITCHとRITE DNE21+の比較 —



- 排出削減費用の推計は難しく、国によってはモデルによって推計の幅があるものの、多くの国について比較可能な水準にある場合も多い。
- 多くのOECD諸国の約束草案のCO<sub>2</sub>限界削減費用は、約束草案で期待される世界排出量を最小費用で達成した場合の限界削減費用と比較してかなり高い水準にある。

# NDCsのCO2限界削減費用推計



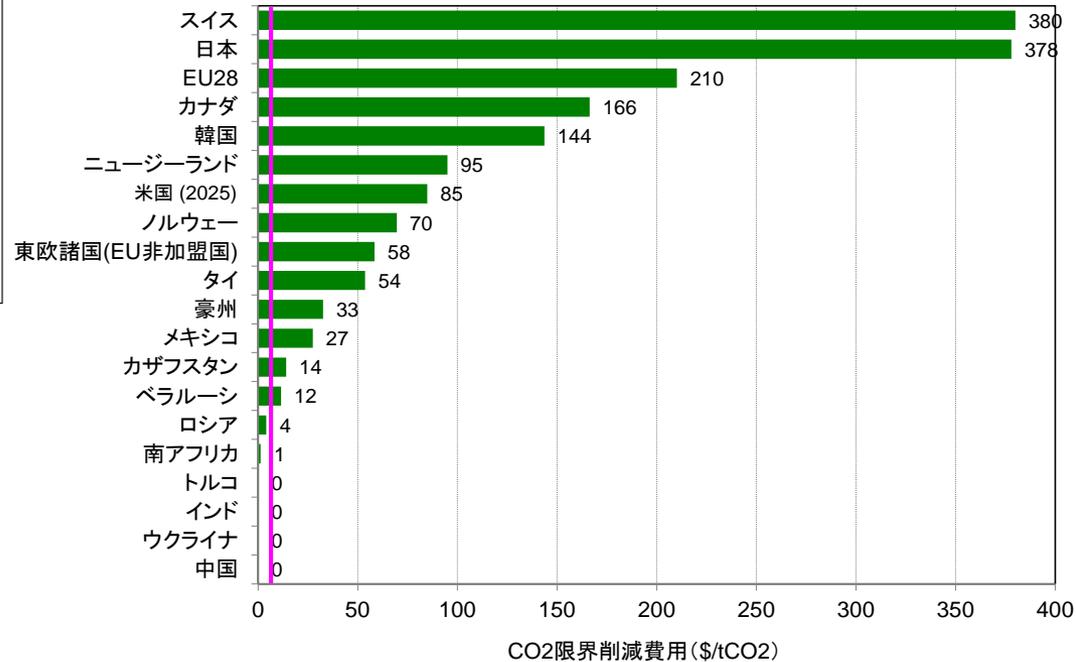
Source: J. Aldy et al., Nature Climate Change, 2016

## 2025-30年平均値

## 2030年(米国のみ2025年)

【世界GDP比削減費用】NDCs:0.38%、最小費用:0.06%

最小費用(限界削減費用均等化):6\$/tCO<sub>2</sub>



Source: K. Akimoto et al., Evol. Inst. Econ. Rev., 2016

- 約束草案NDCsの排出削減費用は各国間で大きな差異あり。
- もしNDCsで期待できる世界全体での排出削減を費用最小化(限界削減費用均等化)で実現できるとすれば、RITEモデルでは限界削減費用6\$/tCO<sub>2</sub>で済む。また、2030年時点の総削減費用は費用最小化に比べ6.5倍程度高い。
- 通常の長期モデル分析では、世界での費用最小化時の費用を推計しており、現実の費用はもっと大きい(実際には国内対策も費用最小化では達成できず、各国の費用も現実にはもっと大きい可能性あり)。

# 4. 日本の約束草案の排出削減 費用の詳細評価



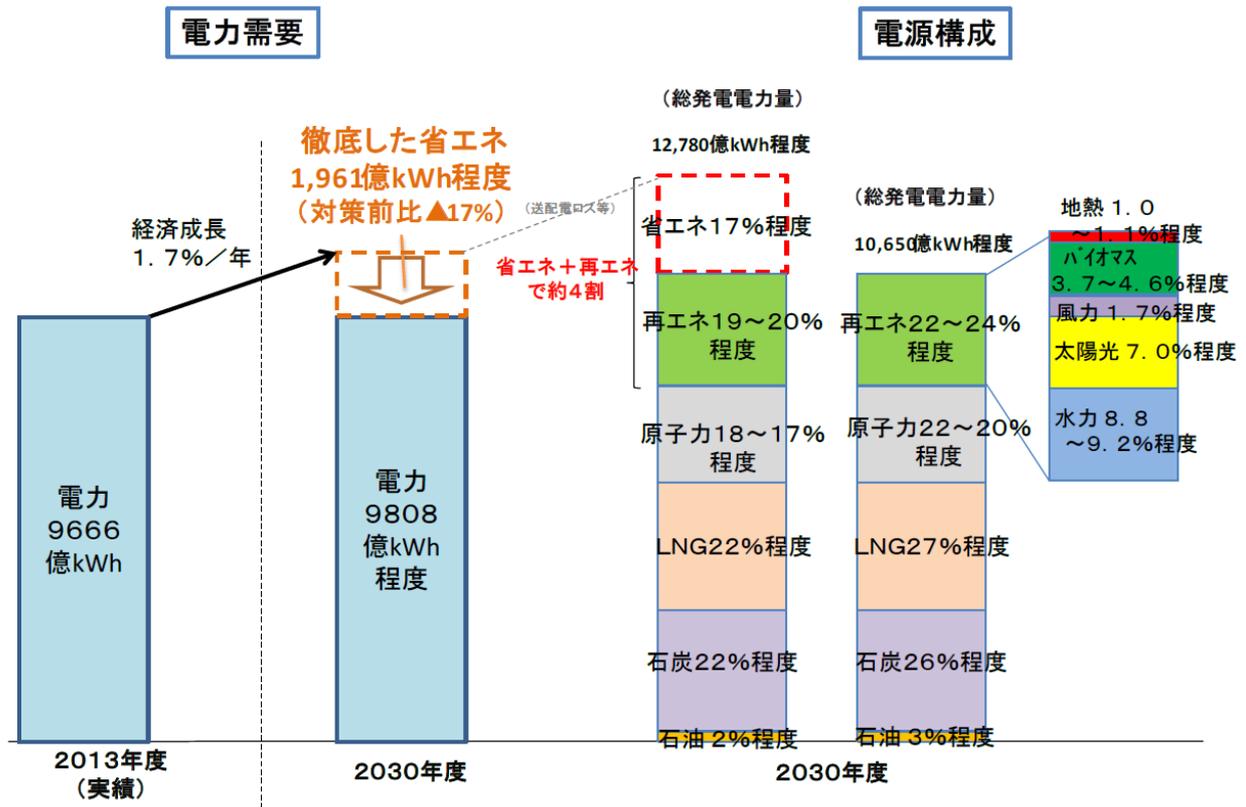
# 各国の社会的、政治的環境を 考慮した際のコスト評価

コストに関する指標は、包括的な評価が可能であり、排出削減努力を計測する上で重要な指標であるが、モデル推計の不確実性以外にも以下のような検討課題が考えられる。

- ◆ 考慮すべき社会的な制約は何か？ ⇒ 各国における原子力発電、CCS等の社会的な受容性、エネルギー安全保障への配慮など
- ◆ 考慮すべき政治的な制約は何か？政治的な制約は考慮すべきでないか？ ⇒ 例えば、米国においては、議会制度上、新しい法案を導入することは難しいことが多い。採用できる政策が限られているとすれば、それによって対策のコストは変わってくる。
- ◆ 非効率な政策によって対策費用が上がっているだけであれば、それをコスト評価によって削減努力と評価して良いのか。⇒ 例えば、高い太陽光発電導入を集中している国があったとし、そのコストは大きいとしてもそれはより経済効率的な政策を採らない非がその国にあるだけとも考えられる。

# 日本の約束草案とエネルギーミックス(電源構成)

	2013年比 (2005年比)
エネルギー起源CO2	-21.9% (-20.9%)
その他温室効果ガス	-1.5% (-1.8%)
吸収源対策	-2.6% (-2.6%)
温室効果ガス計	<b>-26.0%</b> (-25.4%)



# 分析ケース

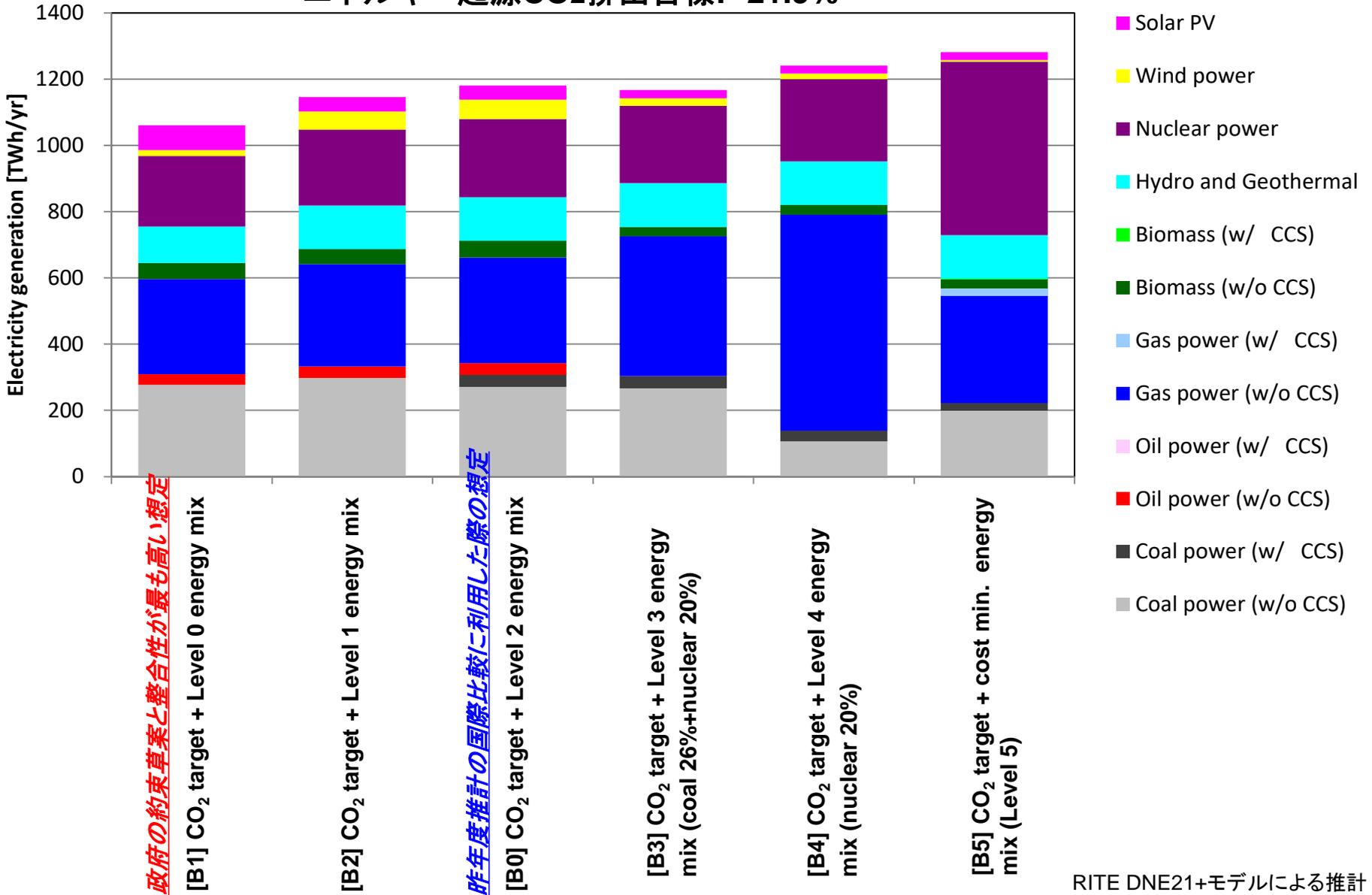
	GHG 排出目標	エネルギー起源CO <sub>2</sub> 排出目標	発電電力量における各電源のシェア			CCSの 利用可能性	省電力
			化石燃料	原子力	再生可能エネルギー		
[A0] GHG target + Level 2 energy mix	-26% <b>[A]</b>	Cost min.	Coal: 26% LNG: 27% Oil: 3%	20%	24% (cost min. within renewable sources)	Cost min.	Cost min.
[B0] CO <sub>2</sub> target + Level 2 energy mix	-	-21.9% <b>[B]</b>	Coal: 26% LNG: 27% Oil: 3%	20%	24% (cost min. within renewable sources)	Cost min.	Cost min.
[B1] CO <sub>2</sub> target + Level 0 energy mix <i>政府の約束草案と整合性が最も高い想定</i>	-	-21.9%	Coal: 26% LNG: 27% Oil: 3%	20%	24% (PV: 7%, wind: 1.7% etc.)	w.o. CCS	Total elec. supply: 1065 TWh/yr
[B2] CO <sub>2</sub> target + Level 1 energy mix	-	-21.9%	Coal: 26% LNG: 27% Oil: 3%	20%	24% (cost min. within renewable sources)	w.o. CCS	Cost min.
[B3] CO <sub>2</sub> target + Level 3 energy mix (coal 26% + nuclear 20%)	-	-21.9%	Coal: 26% LNG: cost min. Oil: cost min.	20%	Cost min.	Cost min.	Cost min.
[B4] CO <sub>2</sub> target + Level 4 energy mix (nuclear 20%)	-	-21.9%	Cost min.	20%	Cost min.	Cost min.	Cost min.
[B5] CO <sub>2</sub> target + cost min. energy mix (Level 5)	-	-21.9%	Cost min.	Cost min.	Cost min.	Cost min.	Cost min.

昨年度推計の国際比較に利用した際の想定

注) エネルギーミックスに関するレベルの数字が大きいほど、エネルギーミックスの自由度が高い

# 日本の2030年における約束草案の各ケースの発電電力量

エネルギー起源CO2排出目標: -21.9%



# 日本の2030年における約束草案の各ケースの排出削減費用

RITE DNE21+モデル  
による推計

	CO <sub>2</sub> 限界削減費用 (\$2000/tCO <sub>2</sub> )	排出削減費用 (billion \$2000/yr)	基準GDP比の 排出削減費用 (%)	
<b>[A0] GHG target (-26%) + Level 2 energy mix</b> <i>昨年度推計の国際比較に利用した際の想定</i>	378	99	1.41	モデル推計では、非CO <sub>2</sub> GHG削減の4.1%分がエネルギー起源CO <sub>2</sub> の-21.9%目標の費用よりも高いため、-21.9%よりも深掘することによるコスト増
<b>[B0] CO<sub>2</sub> target (-21.9%) + Level 2 energy mix</b>	227	28	0.40	
<b>[B1] CO<sub>2</sub> target (-21.9%) + Level 0 energy mix</b> <i>政府の約束草案と整合性が最も高い想定</i>	242	38	0.55	エネルギー起源CO <sub>2</sub> 排出目標: -21.9% 省電力目標、CCSの制約
<b>[B2] CO<sub>2</sub> target (-21.9%) + Level 1 energy mix</b>	272	32	0.46	再生可能エネルギー目標 エネルギー安全保障上の考慮
<b>[B3] CO<sub>2</sub> target (-21.9%) + Level 3 energy mix (coal 26% + nuclear 20%)</b>	277	24	0.34	
<b>[B4] CO<sub>2</sub> target (-21.9%) + Level 4 energy mix (nuclear 20%)</b>	165	20	0.28	原子力の社会的な制約等
<b>[B5] CO<sub>2</sub> target (-21.9%) + cost min. energy mix (Level 5)</b>	50	10	0.15	

注) 個別技術利用に関する制約によって、CO<sub>2</sub>限界削減費用としては、むしろ下がるケースも見られるが、排出削減総費用は上昇

どの制約を想定したケースが排出削減努力を計測する一指標としての排出削減費用として最も適切か？

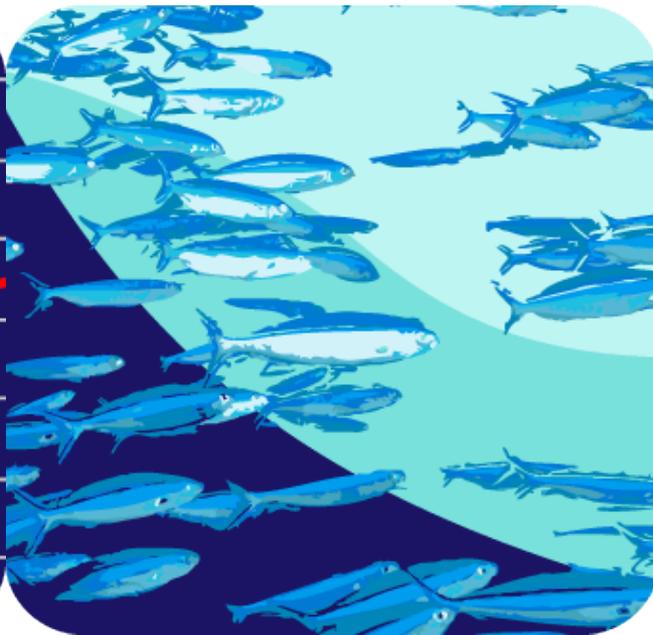
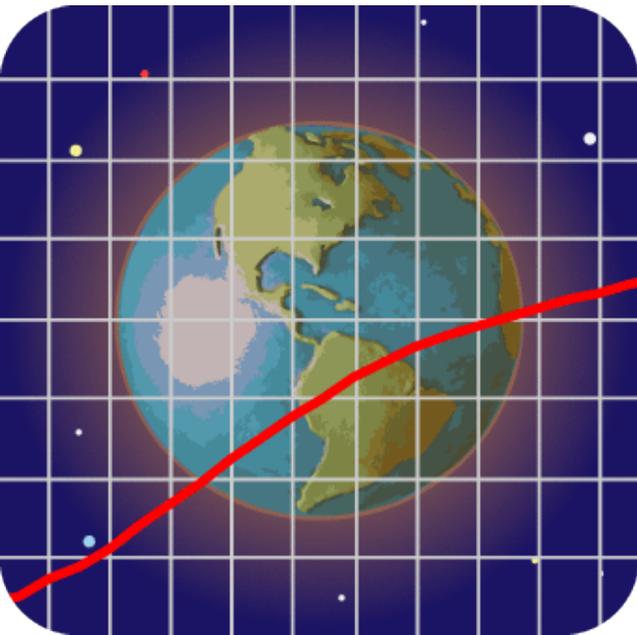
# その他感度解析

## — 経済成長の見通しの違い、原子力比率未達成の場合 —

- ◆ 一方、エネルギーミックス達成の不確実性もあり、そのときの排出削減費用への影響は以下のとおり
  - a) 約束草案・エネルギーミックスでは経済成長率1.7%/yr ⇒ 0.9%/yrの場合
  - b) 約束草案・エネルギーミックスでは原子力比率20-22% ⇒ 15%の場合

	CO <sub>2</sub> 限界削減費用 (\$2000/tCO <sub>2</sub> )	排出削減費用 (billion \$2000/yr)	基準GDP比の排出削減費用 (%)
[B0] CO <sub>2</sub> target (-21.9%) + Level 2 energy mix (GDP成長率: 1.7%/yr、原子力比率20%)	227	28	0.40
[B0-a] 低GDP成長率(0.9%/yr)	151	18	0.31
[B0-b] 原子力比率15%	228	36	0.51
[B0-c] 低GDP成長率(0.9%/yr) + 原子力比率15%	142	24	0.40

# 5. 気候変動リスクマネージメント に向けて



# パリ協定の気温目標と その政治的文書としての曖昧さと科学的な不確実性

- ◆ **パリ協定での長期目標に関する言及：「全球平均気温上昇を産業革命前に比べ2°C未満に十分に（"well below"）抑える。また1.5°Cに抑えるような努力を追求する。」**
- **パリ協定では、2°C未満や1.5°C未満をいつの時点で達成することが求められているのか。**
- **パリ協定では、2°C未満や1.5°C未満をどの程度の確率で達成することが求められるのか。もしくは、期待値として2°Cや1.5°Cをどの程度下回るようにすることが求められるのか。**
- **そもそも気候感度が不確実であるとともに、その確率密度分布関数自体が不確実**

# 気候感度の評価の変遷とIPCC WG3 第5次評価報告書の長期シナリオ推計で用いられた気候感度

	平衡気候感度 (likely(>66%)レンジ) (括弧は最良推計値もしくはmedian等)
IPCC WG1 第4次(AR4) 以前	1.5~4.5°C (2.5°C)
IPCC WG1 第4次(AR4) (2007)	2.0~4.5°C (3.0°C)
IPCC WG1 第5次(AR5) (2013)	1.5~4.5°C (合意できず)
IPCC WG3 第5次(AR5) シナリオ 気温推計 (MAGICCモデル) (2014)	2.0~4.5°C (3.0°C)

“likely”レンジが同じ

便宜上、第4次の評価をそのまま利用

## 【WG1 第5次(政策決定者向け要約)における具体的な記述】

Likely in the range 1.5 °C to 4.5 °C (high confidence)

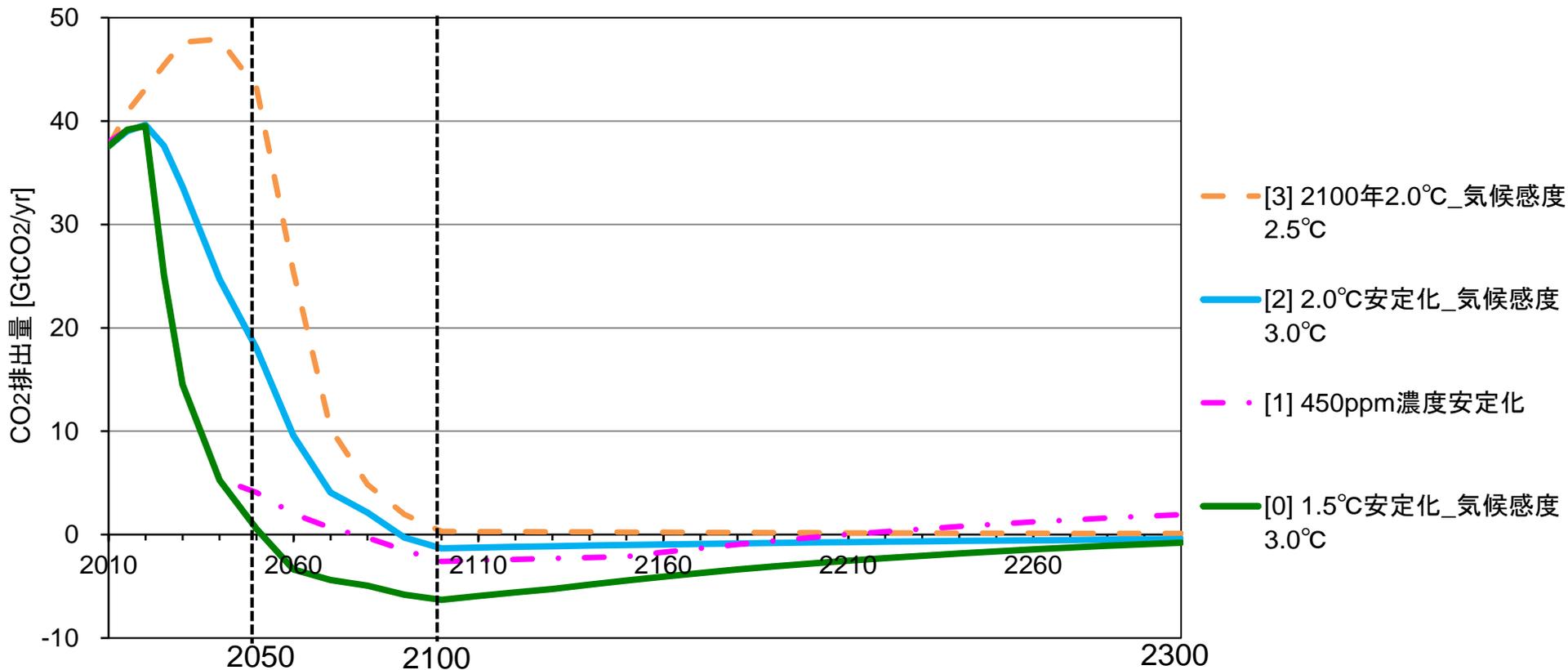
Extremely unlikely less than 1 °C (high confidence)

Very unlikely greater than 6 °C (medium confidence)

No best estimate for equilibrium climate sensitivity can now be given because of a lack of agreement on values across assessed lines of evidence and studies.

- ◆ 平衡気候感度(濃度が倍増し安定化したときの気温上昇の程度の指標)の不確実性は未だ大きい。
- ◆ AR5 WG1では観測データ派の気候感度評価を含めて各種分析を総合的に判断した結果、AR4よりも低位に修正(1.5~4.5°C)。
- ◆ しかし、AR5 WG3の長期排出経路の気温推計においてはAR4の気候感度(2.0~4.5°C、最良推計値3.0°C)を利用

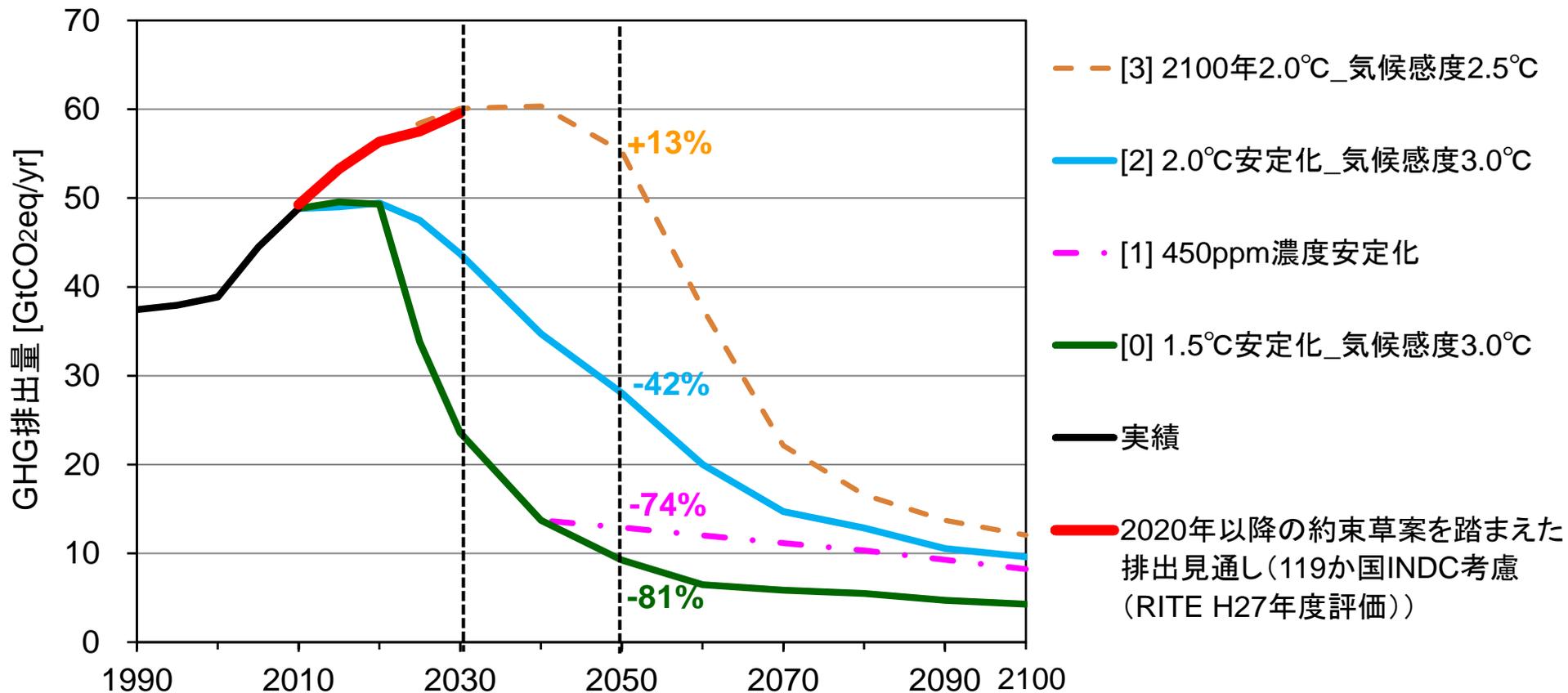
# 各シナリオのCO<sub>2</sub>排出量推移(～2300年)



出典)MAGICC、DNE21+を用いてRITEにて試算

- いずれの排出経路をとっても、長期的(2100年以降)にはCO<sub>2</sub>ゼロ排出は必要
- 1.5°Cシナリオでは2050年以降、世界全体で相当量のネガティブCO<sub>2</sub>排出が必要

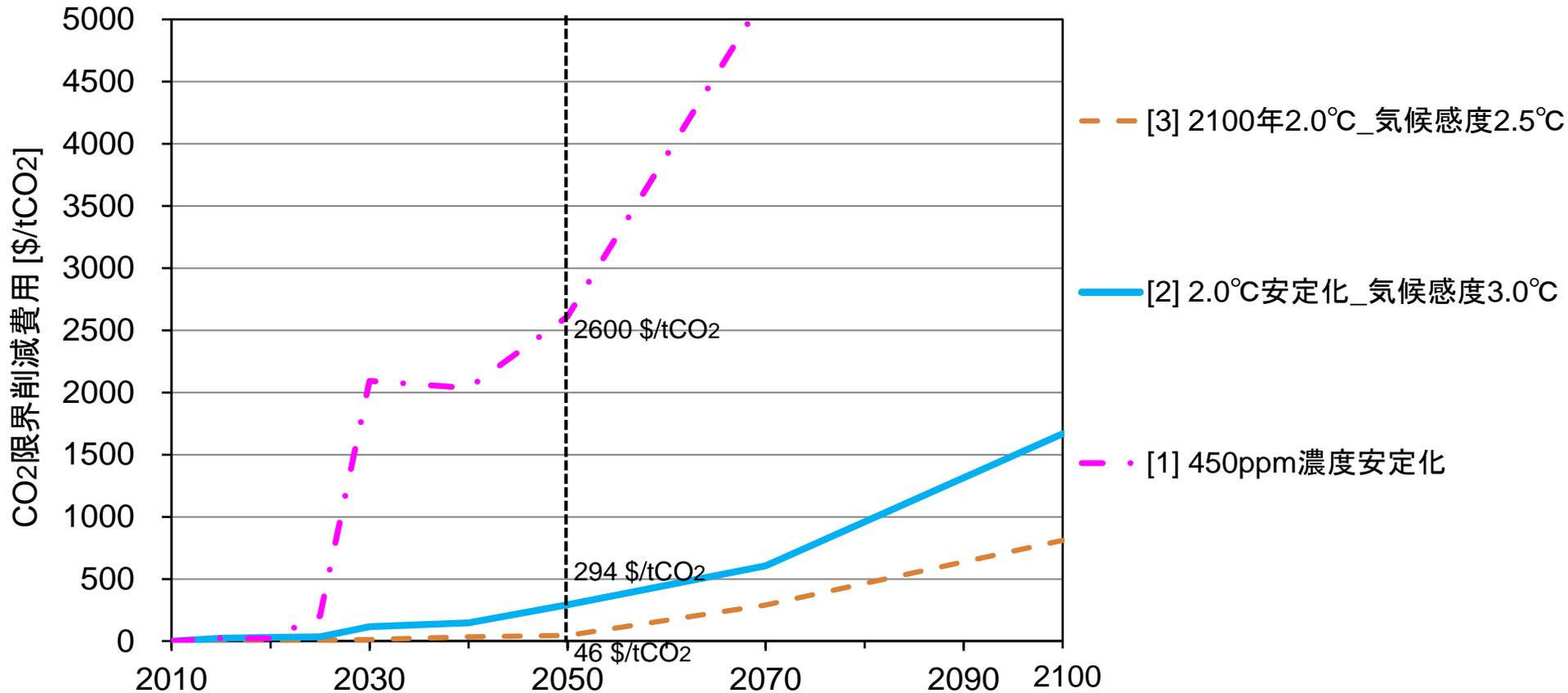
# 各シナリオの温室効果ガス排出経路(～2100年)



出典)MAGICC、DNE21+、RITE non-CO<sub>2</sub> GHGモデルを用いてRITEにて試算

- 2050年頃の世界排出量は、2°C目標といっても大きな幅がある。
- 約束草案から期待される2030年の世界排出量(米国が2005年比26～28%減目標達成も想定。現実にはトランプ政権誕生も手伝って、その達成は相当困難な可能性大)と、[3]シナリオ:2100年2.0°C以下(気候感度2.5°C)は概ね整合性あり。[0]、[1]シナリオとは相当大きなギャップあり。[2]シナリオとのギャップも大きい。

# 各排出経路実現のための限界削減費用



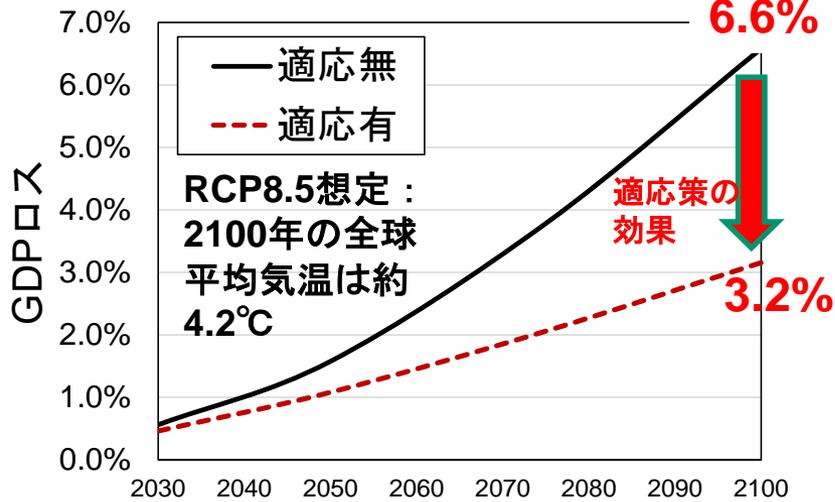
出典) DNE21+を用いてRITEにて試算

**[0] 1.5°C安定化 気候感度3.0°Cシナリオは実行可能解が得られなかった。**

- [1] 450 ppm濃度安定化は、2030年時点で既に大きな排出削減費用が必要と推計され、現実的に不可能と言わざるを得ない。
- [2], [3]シナリオについても、世界で費用効率的な対策をとったとしても、2100年頃には1000 \$/tCO2程度もしくはそれ以上の費用が必要と推計される。イノベーションが不可欠。

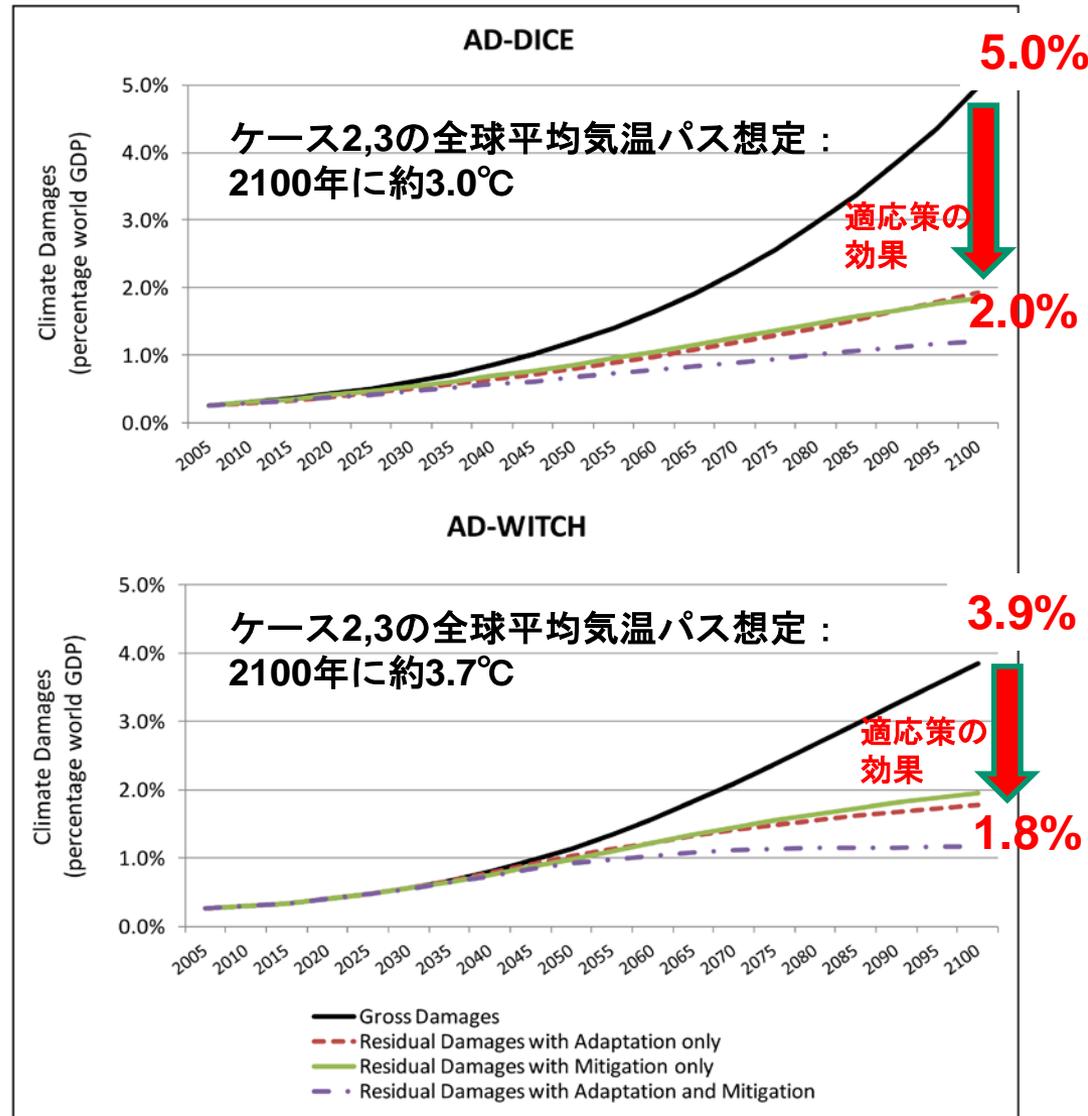
# 温暖化適応策の効果（世界GDPへの影響） —各種モデルの推計—

## RITE・適応策評価モデル



注1) RITE・適応策評価モデルは、適応策として海岸部門のみ考慮しているため、適応有によってGDPロスの低減効果を「十分反映できていない可能性がある」は「十分反映できていない。適応策の効果はさらに大きい可能性が大。  
注2) いずれのモデルも温暖化影響被害や適応費用の推計等の精度は粗いことを認識しておく必要あり。

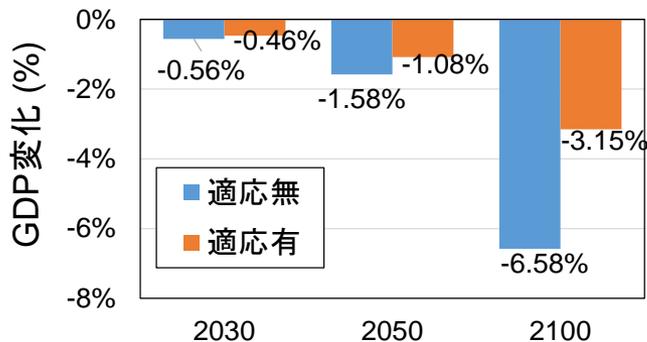
いずれの分析においても、温暖化適応策によってGDPへの温暖化影響が大きく軽減される可能性を示している。  
(適応策の導入により、2100年で2.1～3.4%ポイントのGDPロスの軽減)



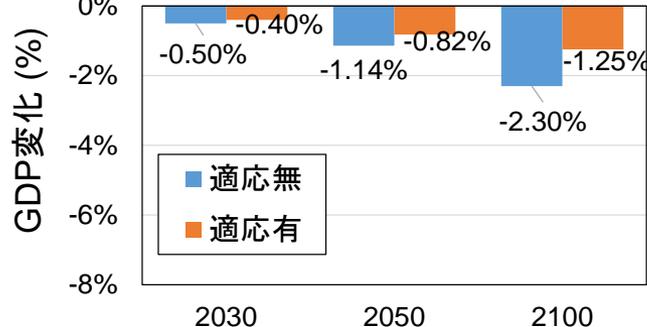
## 影響・適応策による世界GDPの変化

(気候変動無しケース比)

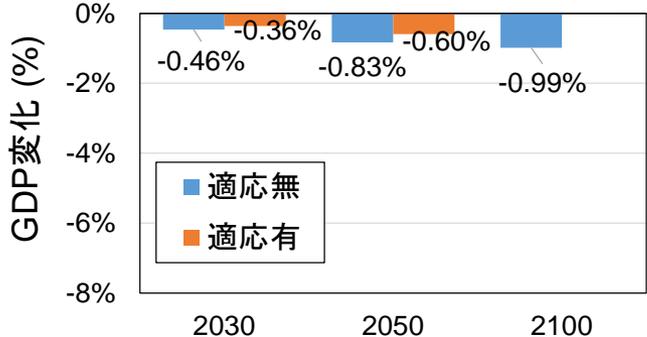
### RCP8.5



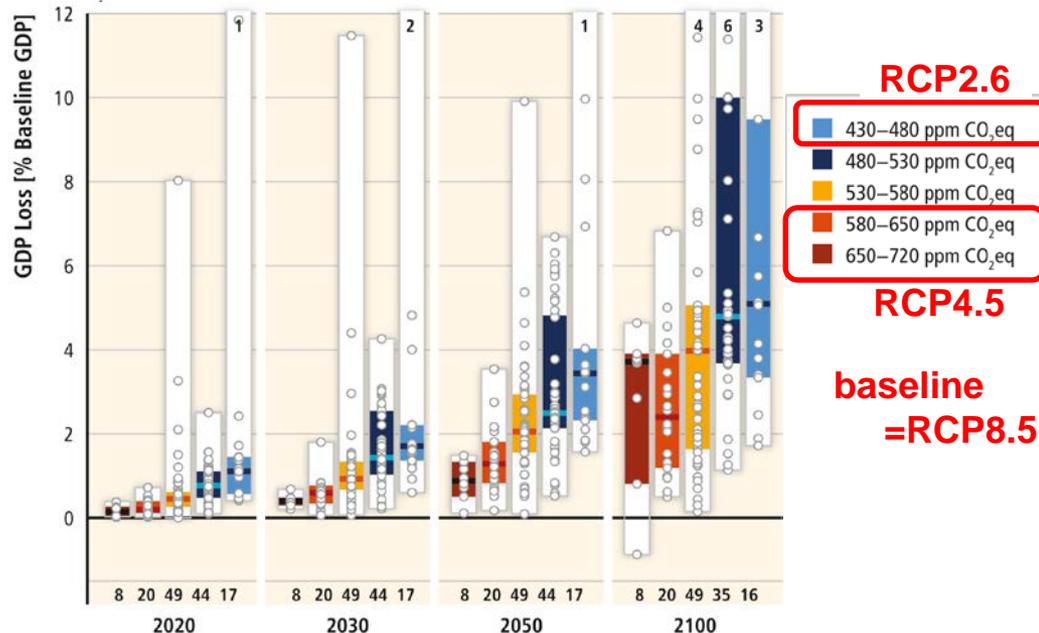
### RCP4.5



### RCP2.6 (3.0PD)



## 緩和策によるGDPロス(IPCC-AR5-WG3)



注) 緩和費用推計は基本的に世界全体での費用最小化を前提に推計されたもの

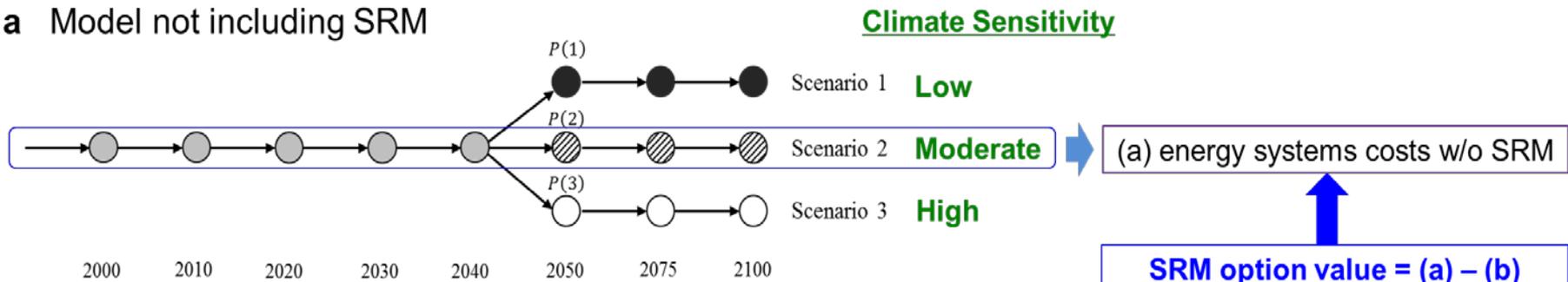
		% of GDP	影響・適応費用	緩和費用	計
RCP8.5	適応無		6.6%	0%	6.6%
	適応有		3.2%		3.2%
RCP4.5	適応無		2.3%	2.5%	4.8%
	適応有		1.3%		3.8%
RCP2.6 (3.0PD)	適応無		1.0%	5.2%	6.2%
	適応有		0%		5.2%

温暖化影響被害・適応費用推計の精度の課題があり断定的なことは言えないが、このように適応により被害をかなり抑制できるなら、2℃目標 (RCP2.6) のような厳しい排出削減ケースが影響被害を含めた総費用を最小化するかは議論の余地がある。

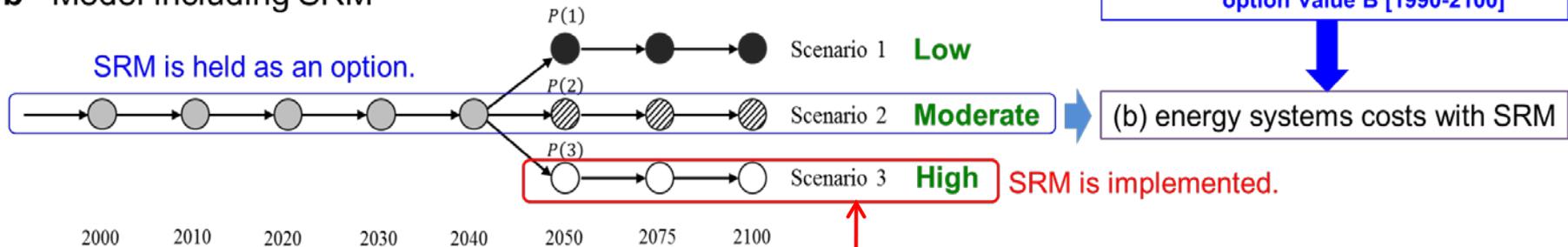
# 気候感度が高かった場合に備えた気候変動リスク対応戦略 —SRMオプション価値の評価のためのフレームワーク—

- ◆ 気候工学的手法として、太陽放射管理(SRM)の提案もなされている。気候感度の不確実性がある中で、気温上昇目標達成手段として、SRMのオプション価値の評価を実施
- ◆ 単純化したディビジョンツリーのモデル化により、DNE21モデル(DNE21+の簡略版)によって試算  
出典) Y. Arino, K. Akimoto et al., PNAS, 113(21), 2016

a Model not including SRM



b Model including SRM



## 【想定条件】

- (1) 2050年以前は気候感度が不確実(確率の想定は次頁)
- (2) 2050年に気候感度の不確実性がなくなる(3シナリオに代表させる。具体的な気候感度は次頁)
- (3) SRMは以下の条件で実施。(a) 冷却効果は最大限で-0.5°Cまでに限定、(b) 2050年以降のみで実施、(c) 気候感度が3つの想定シナリオの中で最も高かった場合に限り実施

# 気候感度の不確実性とその後の判明を想定したシナリオ想定

- ◆ 2100年までの期間について、期待費用最小化する具体的な対策、排出経路を推計

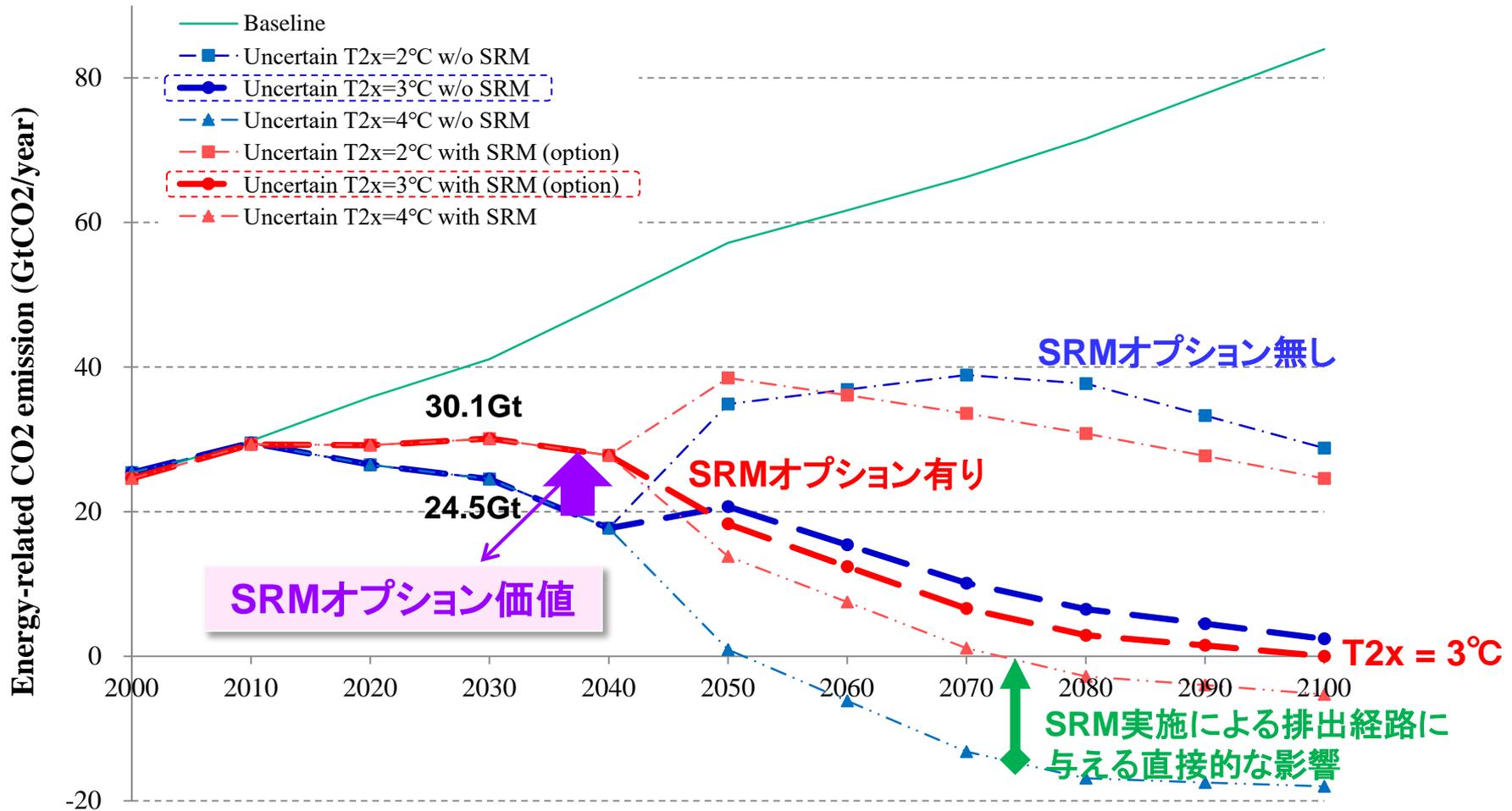
Rogelji et al. (2012) による気候感度の確率密度分布 (2.0~4.5°Cがlikely、mean: 3.0°C) から気候感度の実現確率を想定



[想定シナリオ]

	気候感度 (T2x)	気候感度実現確率	SRM実施オプション
Scenario 1	2.0°C	10%	SRM実施せず
Scenario 2	3.0°C	71%	SRM実施せず
Scenario 3	4.0°C	19%	SRM実施(最大-0.5°Cの範囲)

# SRMオプションの有無の違いによる 2.5 °C目標時のCO<sub>2</sub>排出経路

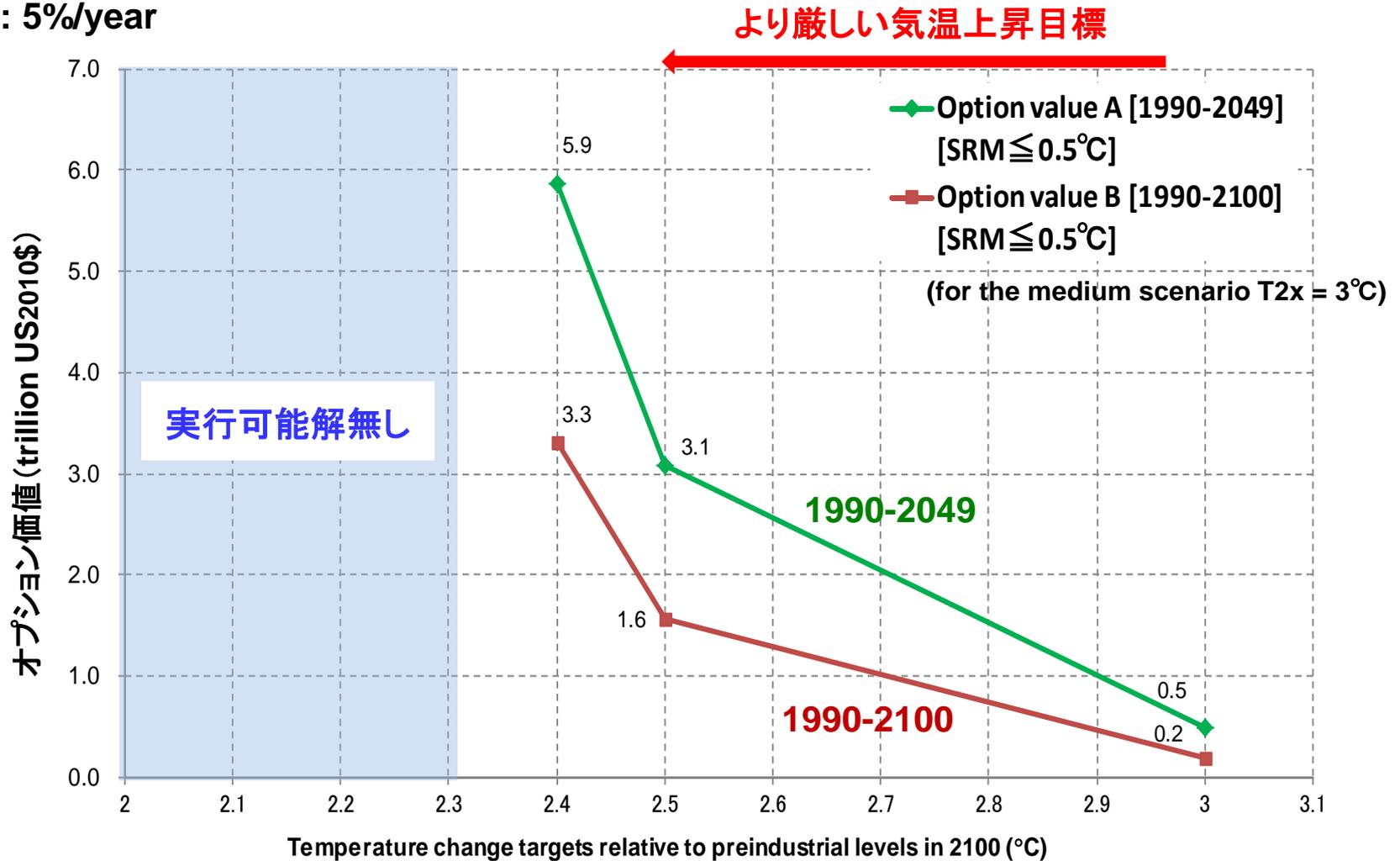


Y. Arino, K. Akimoto et al., PNAS, 113(21), 2016

実際にはSRMを実施しない場合であっても、SRMオプションを有しているだけで、気候感度が高い(ここでは4°Cを想定)ことを前提に排出削減を行う必要性が低下する。気候感度の不確実性が残っている期間(2000-2040年)におけるCO<sub>2</sub>排出を比較的中庸にすることが合理的となり、リスク管理をより良くできるようになる可能性もあり。

# 気温上昇目標とSRMオプション価値の関係

割引率: 5%/year



Y. Arino, K. Akimoto et al., PNAS, 113(21), 2016

気温上昇目標が高いほど、SRMのオプション価値はより大きく上昇する。(1990-2049年の期間で、2.5°C目標の場合は3.1 trillion \$、2.4°C目標の場合は5.9 trillion \$と推計)

# PM2.5とCO<sub>2</sub>排出削減のコベネフィット

## 茅恒等式

エンドオブパイプ対策(CCS)

コベネフィットとなる対策

$$\text{Net CO}_2 = (\text{Net CO}_2 / \text{Gross CO}_2) \times (\text{Gross CO}_2 / \text{PE}) \times (\text{PE} / \text{GDP}) \times (\text{GDP})$$

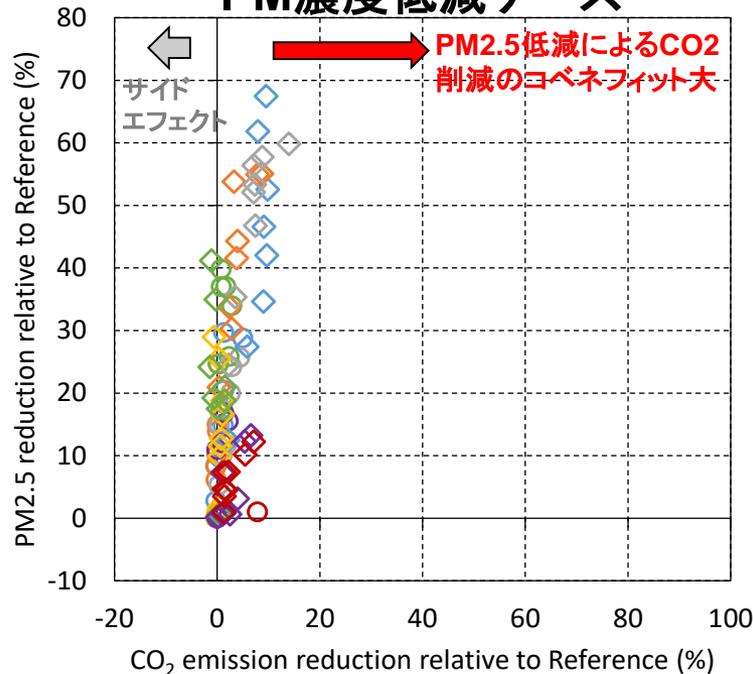
$$\text{PM}_{2.5} = (\text{PM}_{2.5} / \text{Gross PM}_{2.5}) \times (\text{Gross PM}_{2.5} / \text{PE}) \times (\text{PE} / \text{GDP}) \times (\text{GDP})$$

エンドオブパイプ対策(脱硫,脱硝等)

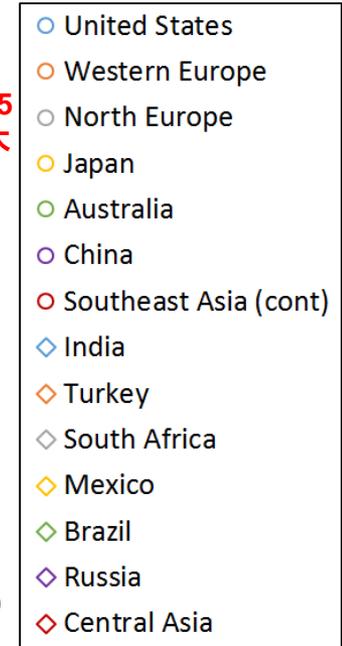
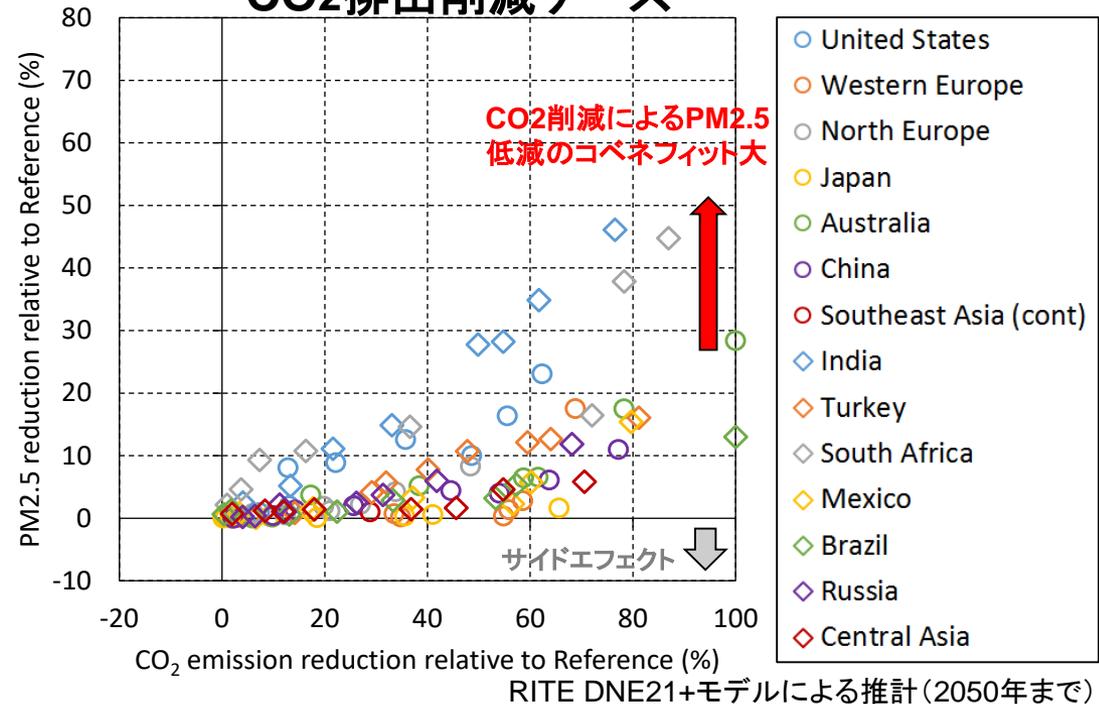
燃料転換

省エネ

### PM濃度低減ケース



### CO<sub>2</sub>排出削減ケース

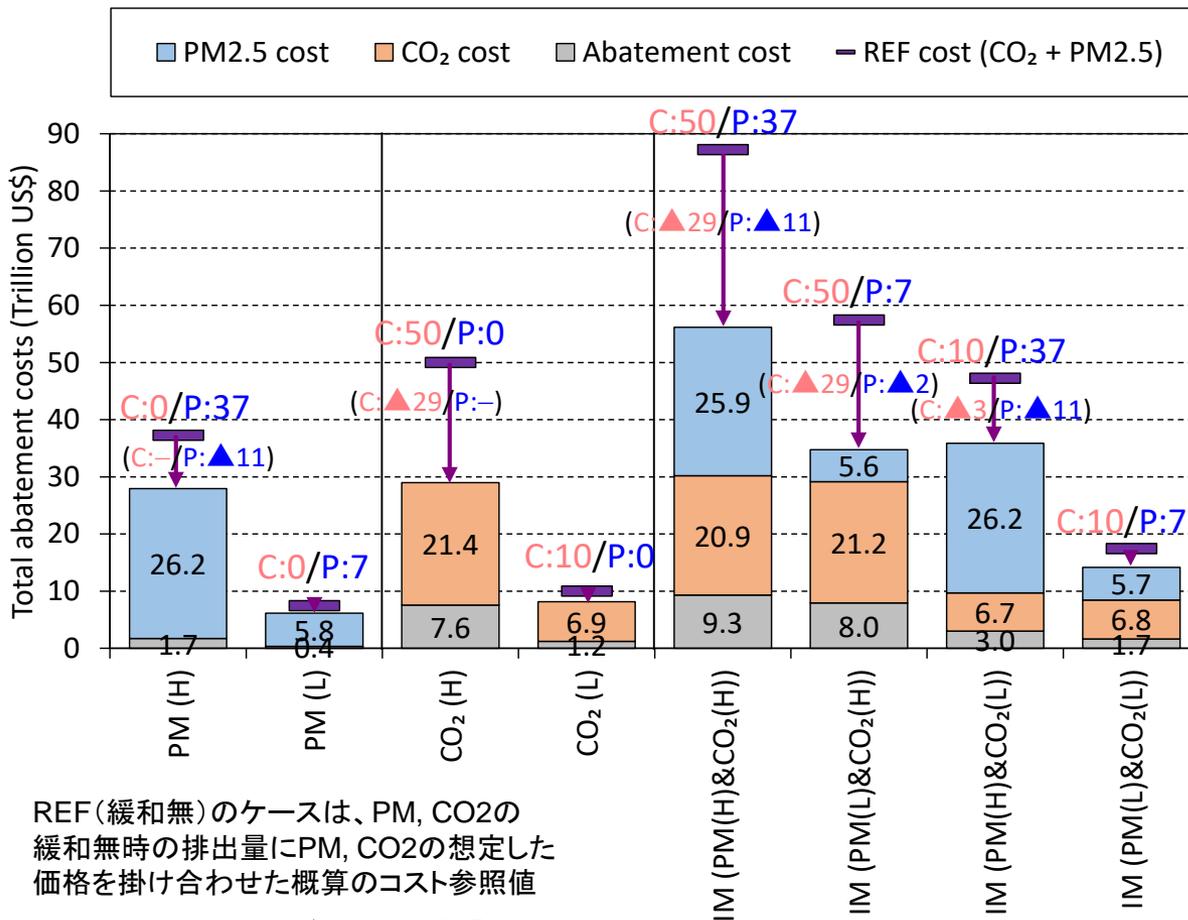


RITE DNE21+モデルによる推計(2050年まで)

- CO<sub>2</sub>排出削減によるPM2.5濃度低減のコベネフィットの方が、その逆よりも大きい。
- ただし、各国一様ではなく、特にインド、南アフリカ、米国等においてコベネフィットが強く見られる。
- これはPM2.5では省エネ、燃料転換よりもエンドオブパイプ対策(脱硫、脱硝等)の方が相対的に安価な傾向がある一方で、CO<sub>2</sub>ではエンドオブパイプ対策(CCS)との比較で、省エネ、燃料転換に相対的に安価な対策の余地が多く存在するため。PM2.5を優先的に対策すべき場合、脱硫・脱硝能力が高く高効率な石炭火力を途上国等に展開することも有用な対策の一つ。

# 世界のコストから見たPM2.5とCO2削減のコベネフィット

## 2010~50年の割引済み総コスト(割引率:5%/年)



REF(緩和無)のケースは、PM, CO<sub>2</sub>の緩和無時の排出量にPM, CO<sub>2</sub>の想定した価格を掛け合わせた概算のコスト参照値

RITE DNE21+モデルによる推計

## CO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>価格想定(2030年時点)

	Low (L)	High (H)
PM <sub>2.5</sub> (M\$/(\$μg/m <sup>3</sup> ))	500	2500
CO <sub>2</sub> (\$/tCO <sub>2</sub> )	10	50

2010-50年の間: +10%/年で価格上昇を想定  
CO<sub>2</sub>のLow: RCP4.5程度、High: RCP2.6程度 相当

## 総コスト [Trillion US\$] (括弧内は総エネルギーシステム対策コスト)

$\frac{PM(H) + CO_2(H)}{56.9 (9.3)}$	>>	$\frac{IM(H\&H)}{56.1 (9.3)}$
$\frac{PM(L) + CO_2(H)}{35.1 (7.9)}$	>	$\frac{IM(L\&H)}{34.7 (7.9)}$
$\frac{PM(H) + CO_2(L)}{36.1 (3.0)}$	>	$\frac{IM(H\&L)}{35.9 (3.0)}$
$\frac{PM(L) + CO_2(L)}{14.3 (1.6)}$	≈	$\frac{IM(L\&L)}{14.2 (1.7)}$

- CO<sub>2</sub>排出およびPM<sub>2.5</sub>濃度の両方の排出削減レベルが大きいとき(CO<sub>2</sub>とPM<sub>2.5</sub>双方の影響被害がかなり大きい場合)、比較的大きなコベネフィットが見られる。⇒ 省エネ、燃料転換まで大きく対策をとるのが効果的
- 一方、例えば、PM<sub>2.5</sub>の影響被害が大きく、他方、CO<sub>2</sub>の影響被害(温暖化による影響被害)がほどほどの水準の場合、コベネフィットは大きくない。⇒ PM<sub>2.5</sub>の健康影響被害が大きい場合、リソースが限られている状況では、まず、相対的に安価なPM<sub>2.5</sub>のエンドオブパイプ技術を中心に対策をとるのが効果的で現実的な戦略

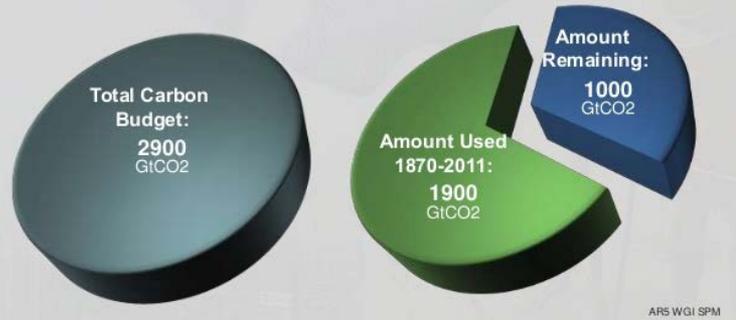
# 6. まとめ



# 気候変動リスクマネージメント戦略のあり方

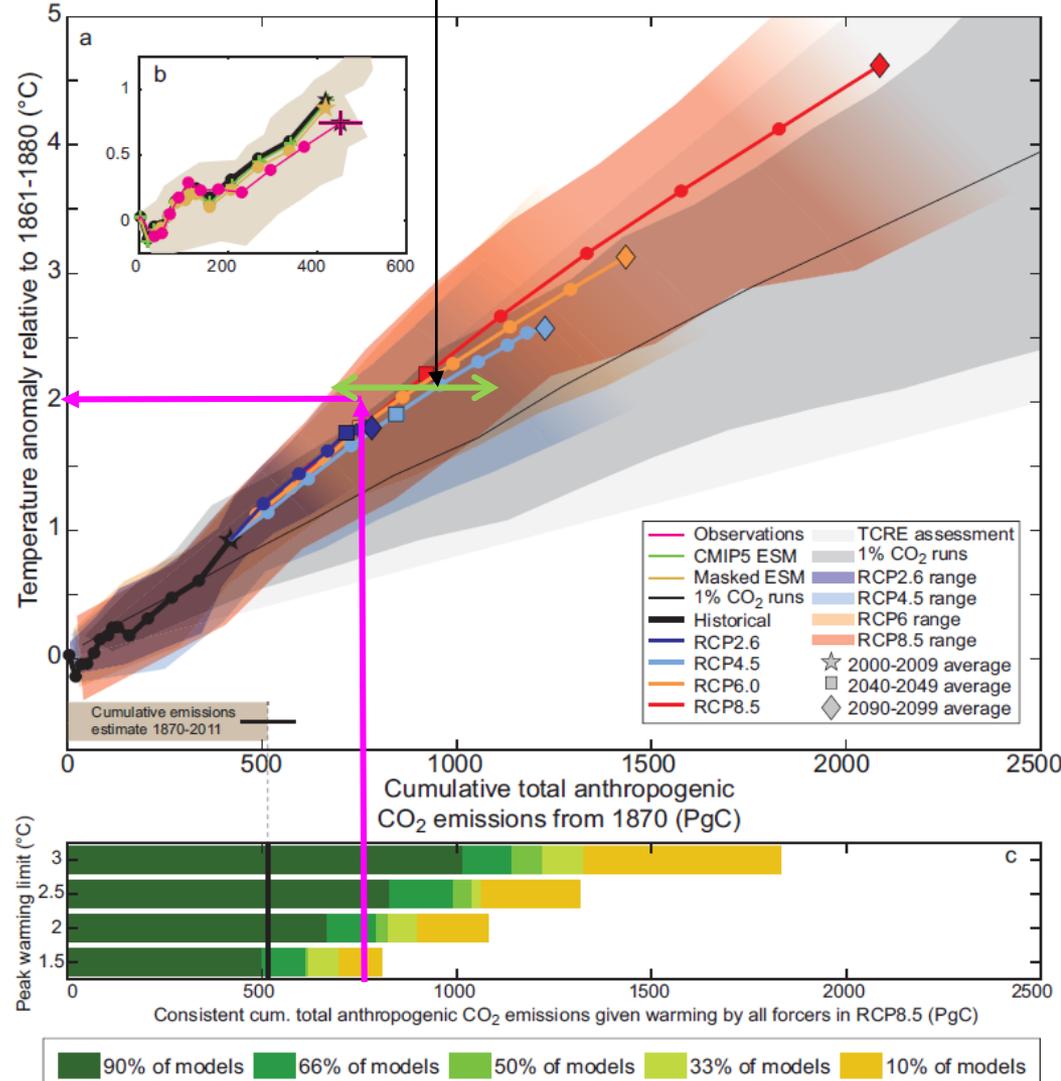
## The window for action is rapidly closing

65% of our carbon budget compatible with a 2° C goal already used



IPCCビューローの説明では2°Cのためには残り1000GtCO<sub>2</sub>とした説明がよくなされるが、実際には不確実性は大きい。

(なお、この図はGCMによる推計結果である一方、AR5では観測結果をベースとした推計も加わって、より低い気候感度の範囲まで提示されている。それに従えば、炭素バジェットは増加)



- 自然科学の不確実性: 決め打ちではなく、不確実性を認識したリスク管理が重要
- 超長期的にはCO<sub>2</sub>ゼロエミッションが必要⇒イノベーション不可欠。
- 適応策による温暖化影響被害低減の可能性
- 緩和費用の上昇要因(政治的要因(国際的にMAC均等化ならない。トランプ政権など)、技術普及の社会的制約、非効率な政策等)
- 緩和費用の低下要因(現時点では考慮不可能なイノベーション)
- 気候感度が高かった場合: そのまま緩和策で対応するとコストが大きく上昇の可能性⇒SRMをオプションとして用意する対応も
- PM2.5削減など、様々な持続可能な発展目標とのコベネフィットの可能性があり追求すべき。ただしトレードオフとなるケースも多い。資源は限られており、総合的なリスク管理が必要。

- ◆ パリ協定は、すべての国が実質的に排出削減に努力する国際枠組みとなったことは歓迎される。
- ◆ しかし、排出削減目標の実効性、深堀のために、約束草案の適切なレビューは、大変重要
- ◆ 現在の約束草案の限界削減費用は、世界各国間で大きな差異があり、世界全体での効率的な排出削減費用と比較して6倍を超えるような費用が推計される。これによって実効ある世界の排出削減も阻害する可能性あり。
- ◆ また、一国内の対策を評価しても、温暖化対策以外の考慮されるべき政策や、社会的な制約などがあり、それらによって、費用最小化の対策に比べて費用が大きく上昇する可能性あり。
- ◆ パリ協定では2°C目標が合意されたが（1.5°C目標も追求）、それを実現する21世紀半ば頃までの排出経路には大きな幅がある。
- ◆ 不確実性をよく理解しながら、持続可能な発展のために、社会全体のリスクをより良く管理して、気候変動リスクについてもうまく管理することが重要。