

革新的環境技術シンポジウム2016

2016年12月7日

複数の社会経済シナリオの下での パリ協定長期目標の評価

(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



目次

1. 背景・目的
2. シナリオ分析のためのモデル
3. 社会経済シナリオ **SSP**の想定
 - 3.1. 人口、**GDP**の想定
 - 3.2. 粗鋼、セメント生産シナリオの想定
 - 3.3. 化石燃料価格シナリオの想定
 - 3.4. 技術進展シナリオ
 - 3.5. 投資における主観的割引率
4. パリ協定を踏まえた長期排出削減シナリオの想定
5. 各シナリオの下での世界の分析結果
6. まとめ

1. 背景·目的

SSP (Shared Socioeconomic Pathways) 概要

- ◆ 気候変動問題に対する国際研究コミュニティにおいて、**SSP (Shared Socio-economic Pathways ; 共有社会経済パス)**の作成、およびそれに基づく統合評価モデルによる定量的な分析が進んでいる。（当初は、**IPCC第5次評価報告書（2013～14年）**の分析に間に合わせようとして策定が進められたが、間に合わず、現在、第6次評価報告書を中心とした活用を目指している。）
- ◆ **SSP**の目的は、社会経済シナリオの不確実性を考慮しつつ、気候変動緩和、影響・適応について統合的な分析・評価を行い、科学的な知見集約を行うため、国際的分析において共通的な（不確実性を含みつつシナリオ内では整合性があると考えられる複数の）シナリオを用意しようとするものである。
- ◆ これまでに、**SSP**の基本的な性質と枠組みについては、**2013年の Climatic Change特集号（A Framework for the Development of New Socioeconomic Scenarios for Climate Change Research）**として公開されており、各**SSP**シナリオのストーリーライン等が公開されている。
- ◆ なお、ストーリーラインから、モデルの定量的なデータへの翻訳は、統一的に決められたものがあるわけではない。

パリ協定（COP21）における長期目標関連の決定

- ◆ 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。（第2条1項(a)）
- ◆ 協定第2条の長期目標を達成するため、世界の温室効果ガス排出をできる限り早期にピークにする。その後、急速に削減し、今世紀後半には、温室効果ガスについて人為的起源排出とシンクによる吸収をバランスさせる。（第4条1項）
- ◆ すべての国は、温室効果ガス低減のための長期発展戦略を策定するよう努力すべき（第4条19項）（COP21決定には2020年までにと時期も明示されている）
- ◆ 協定の目的と長期目標に向けた世界全体の前進を評価するために、協定の実施状況を5年毎に把握（「グローバル・ストックテイク」、2023年が第1回）

分析の目的とシナリオの想定

パリ協定において、2°C目標等が合意されたが、それに付随して様々な不確実性が存在する。本研究では、不確実性として、世界の社会経済動向の不確実性（5種類の**SSP**シナリオで表現）と、2°C目標と1.5°C目標について分析しつつ、2°C目標については気候感度の不確実性についても考慮して分析。それにより、様々な不確実性下で、2°C目標等への達成の道筋への示唆を得る。

社会経済シナリオ（異なる人口、経済成長、技術進展、消費の嗜好、技術の社会的受容等に関する5種類の**SSPs**を考慮（本発表ではそのうち、**SSP1, 2, 3, 5**のみを提示））

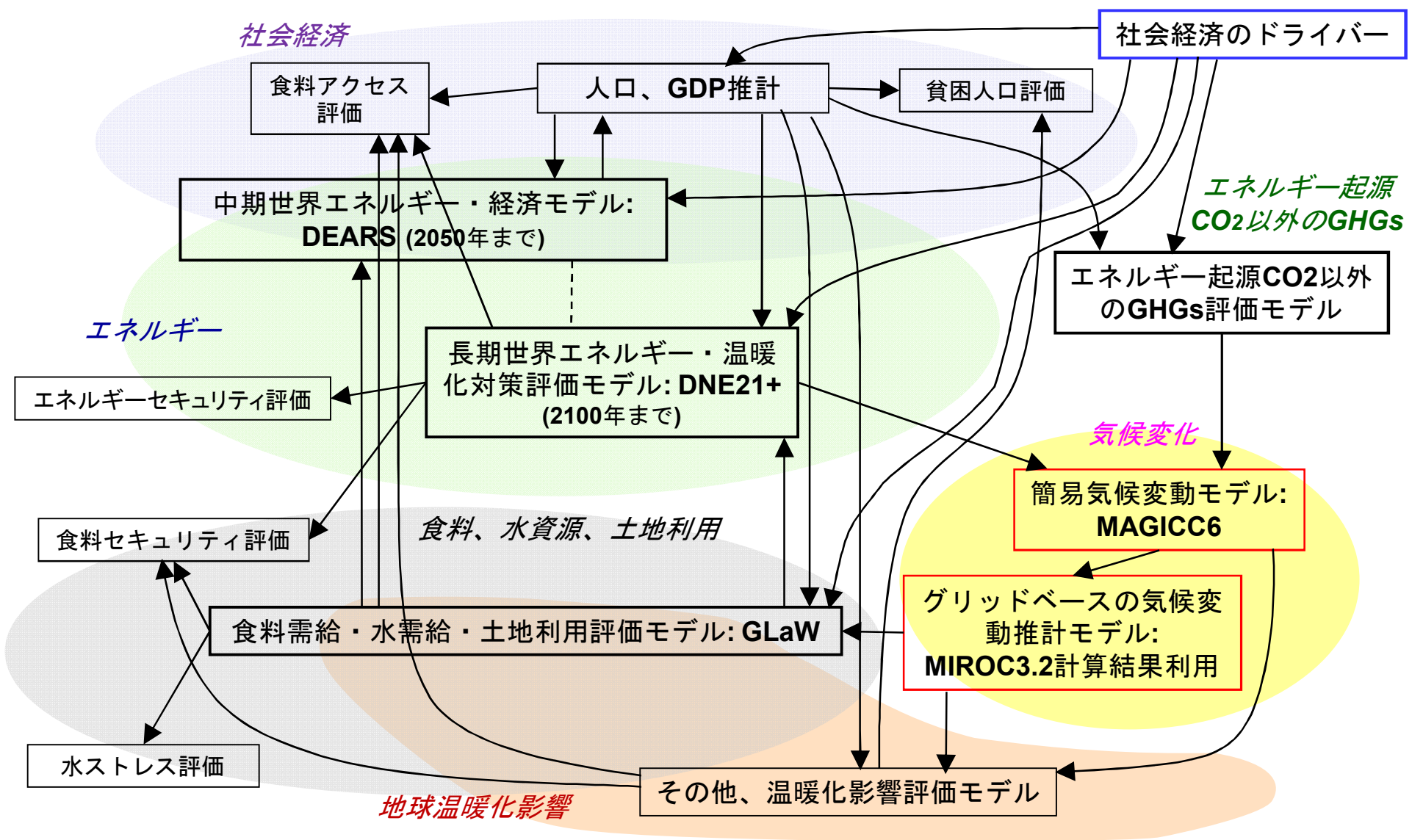
×

産業革命以前比2°C目標（気候感度等の不確実性を考慮）および1.5°C目標

本発表では、上記想定シナリオの下で、世界で費用最小（世界各国の限界削減費用均等化）となる長期（～2100年まで）の温暖化対策を推計

2. シナリオ分析のためのモデル

各種分野を統合的に評価するために RITE利用のモデル群



温暖化対策評価モデルDNE21+の概要

(Dynamic New Earth 21+)

- ◆ 各種エネルギー・CO₂削減技術のシステムの的なコスト評価が可能なモデル(ただしDEARSモデルのように経済全体を評価対象とはしていない)
- ◆ 線形計画モデル(エネルギーシステム総コスト最小化)
- ◆ モデル評価対象期間: 2000~2100年(代表時点: 2005, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 70, 2100年)
- ◆ 世界地域分割: 54 地域分割(米国、中国等は1国内を更に分割。計77地域分割)
- ◆ 地域間輸送: 石炭、石油、天然ガス、電力、エタノール、水素、CO₂(ただしCO₂は国外への移動は不可を標準ケースとしている)、CO₂クレジット
- ◆ エネルギー供給(発電部門等)、CO₂回収貯留技術を、ボトムアップ的に(個別技術を積み上げて)モデル化
- ◆ エネルギー需要部門のうち、鉄鋼、セメント、紙パ、化学、アルミ、運輸、民生の一部について、ボトムアップ的にモデル化
- ◆ 300程度の技術を具体的にモデル化
- ◆ それ以外はトップダウン的モデル化(長期価格弾性値を用いて省エネ効果を推定)

地域別、部門別に技術の詳細な評価が可能。また、それらが統合的に評価可能

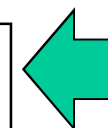
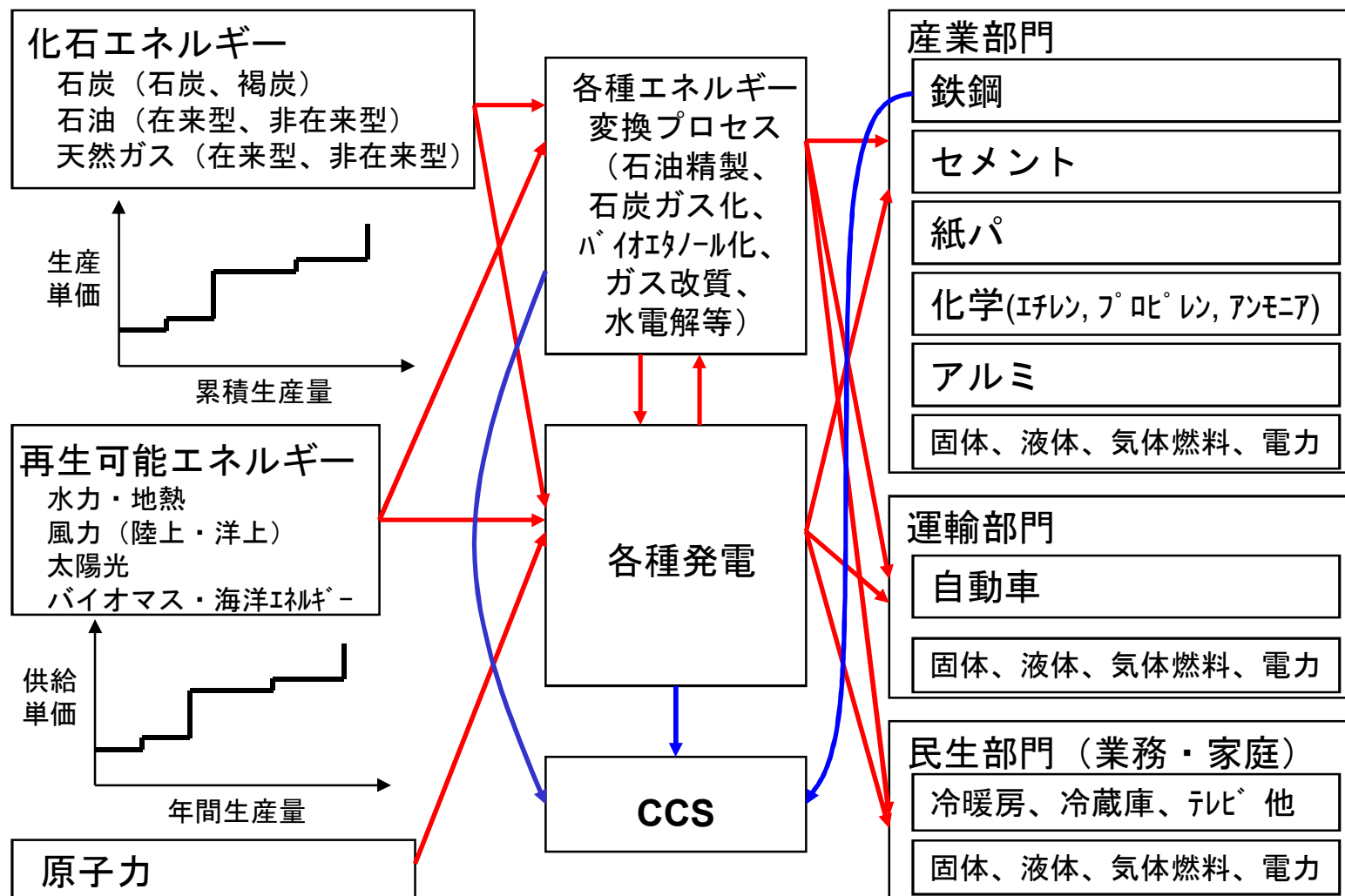
- ・中期目標検討委員会およびタスクフォースにおける分析・評価
- ・国内排出量取引制度の検討における分析・評価
- ・環境エネルギー技術革新計画における分析・評価

はじめ、気候変動政策の主要な政府検討において活用されてきた。またIPCCシナリオ分析にも貢献

DNE21+のエネルギーフロー概略



温暖化対策を想定しないベースラインにおける化石燃料価格は外生的に想定し、生産単価や利権料等のその他価格要因を調整する。排出削減を想定したケースでは、それに伴う化石燃料利用量の変化に従って、モデルで内生的に価格が決定される。



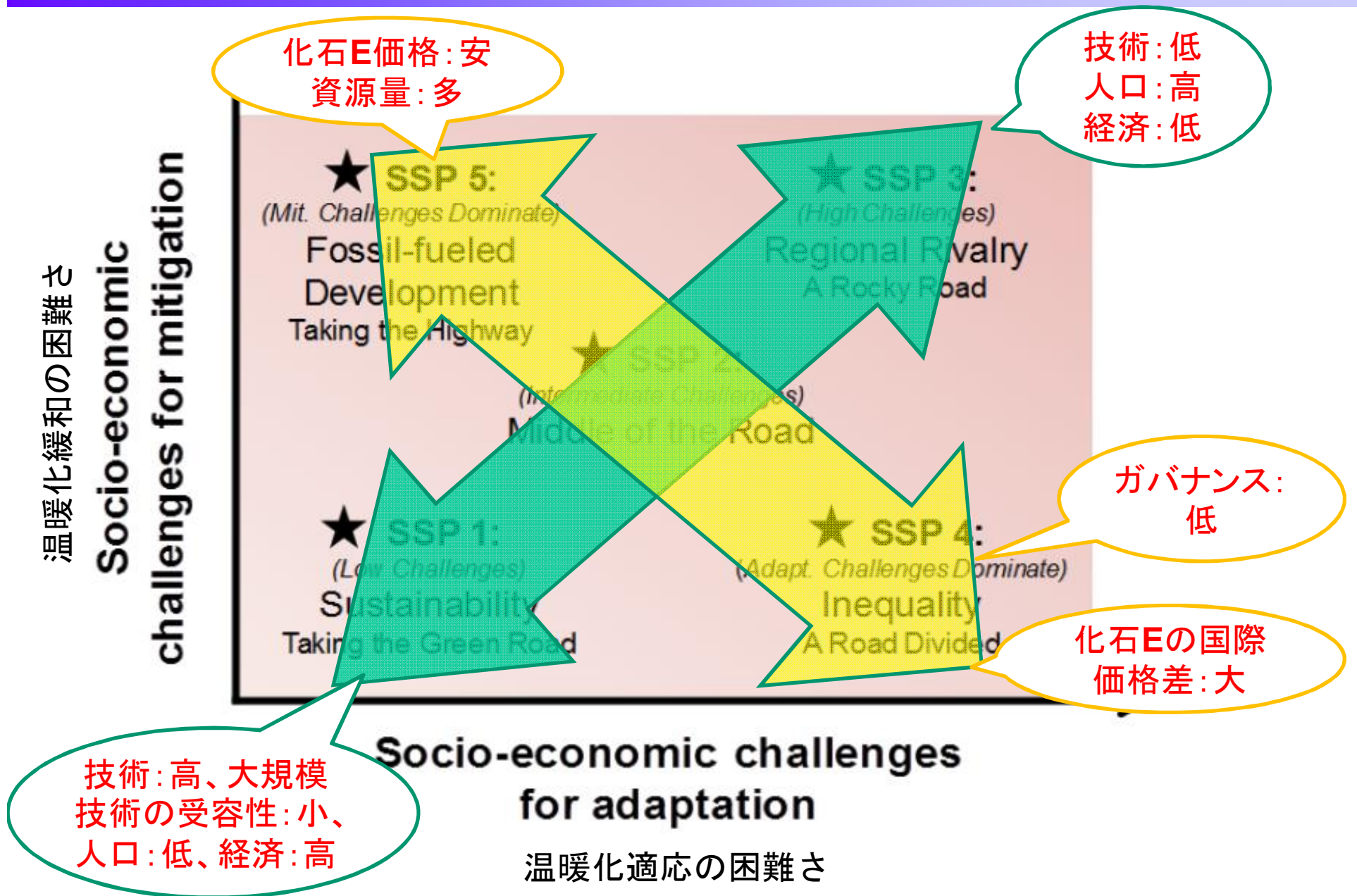
ボトムアップ的にモデル化している主要な部門については、**経済活動量やサービス需要**を外生的に想定してモデルに入力する(例：粗鋼やセメント生産量、乗用車の旅客サービス需要等)。



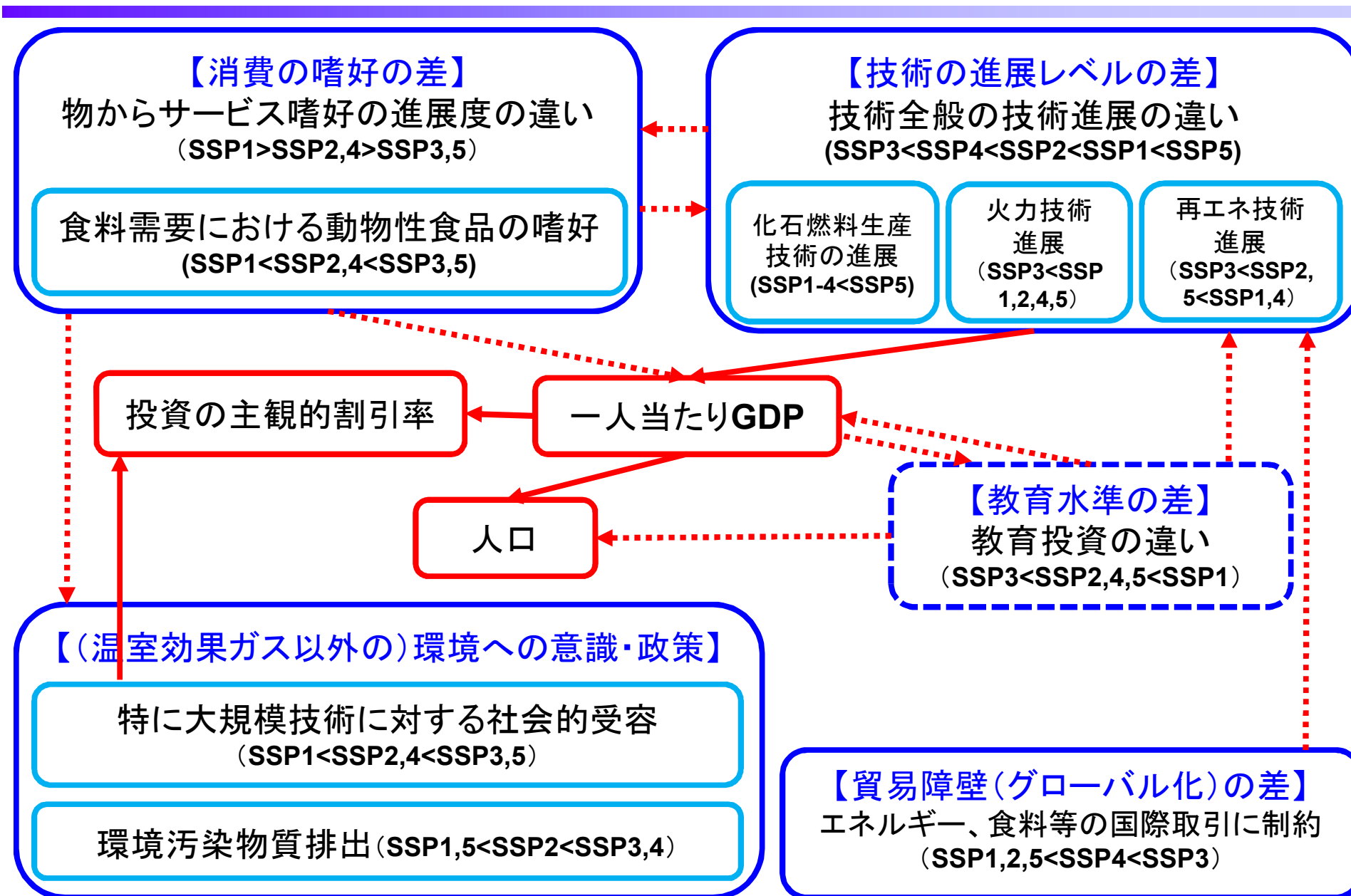
各種技術の設備費や効率等を外生的に想定して入力する。

3. 社会経済シナリオ **SSP** の想定

5種類のSSPシナリオの概要

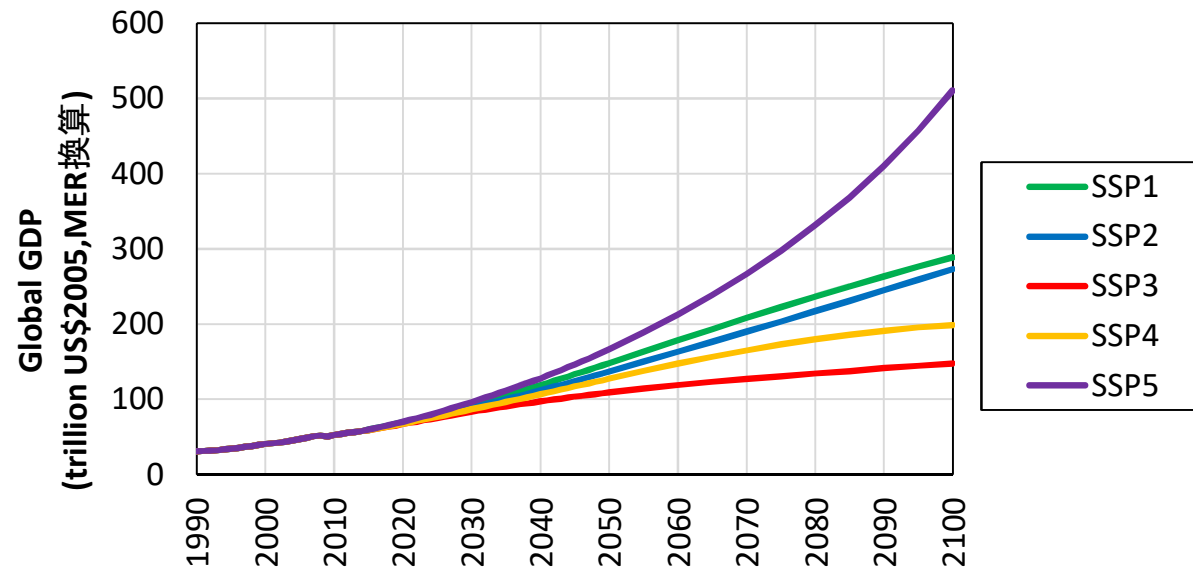
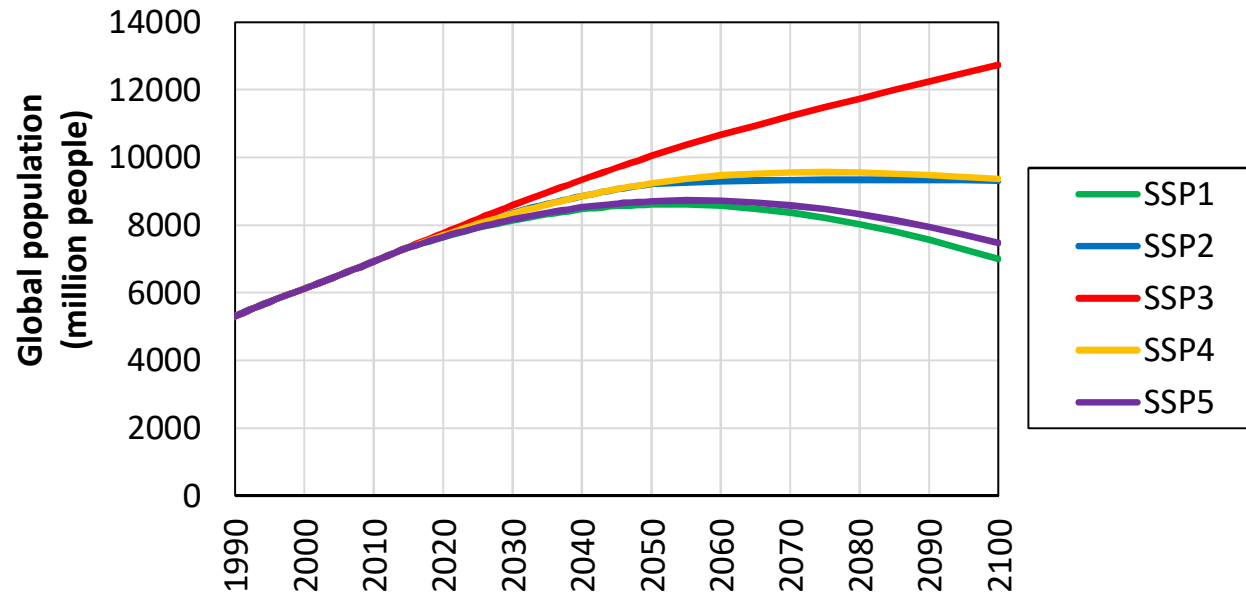


5 種類のSSPの誘発要因の想定



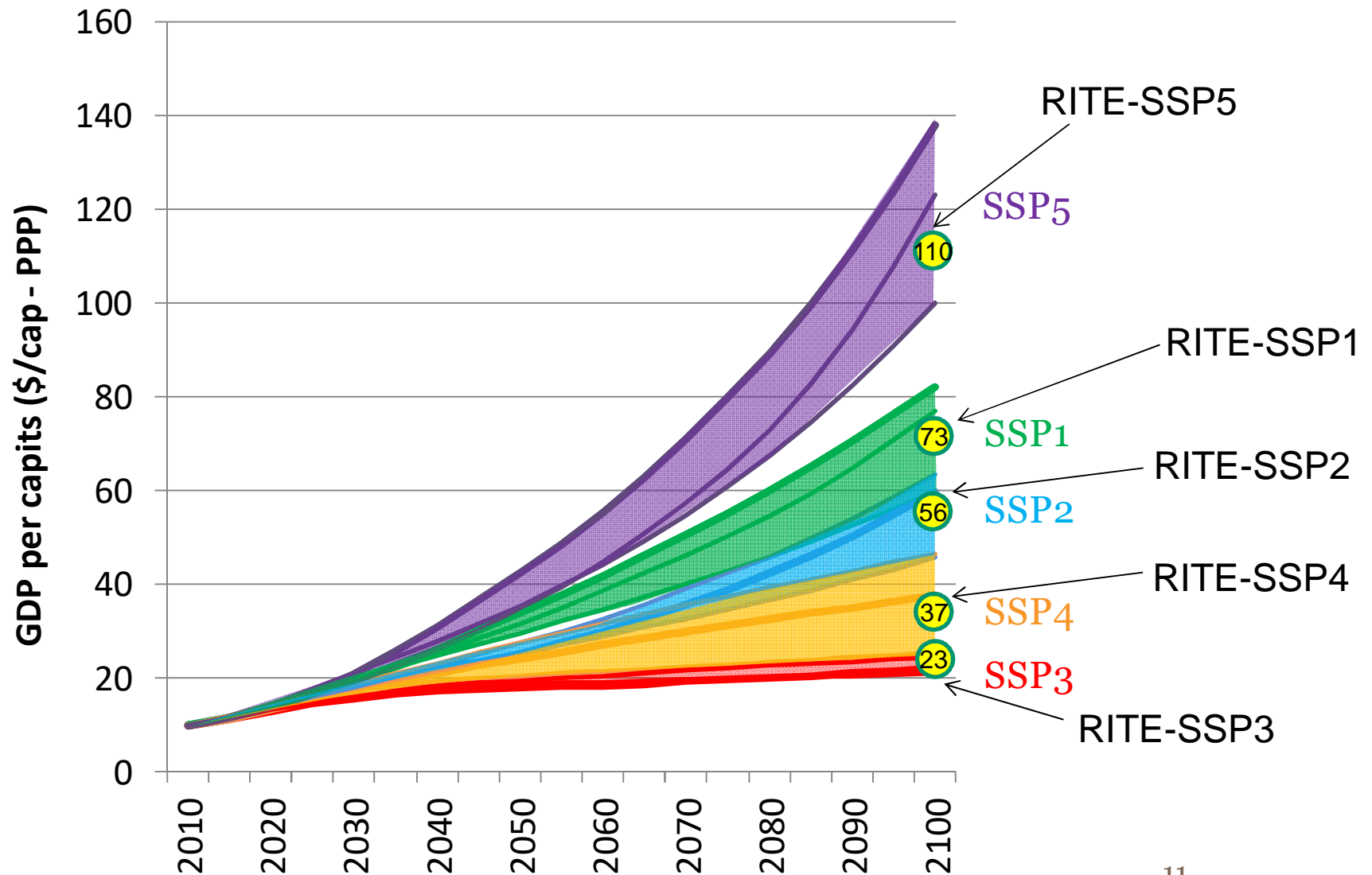
3.1. 人口、GDPの想定

世界の人口、GDPの想定



一人当たりGDPの想定（世界平均）

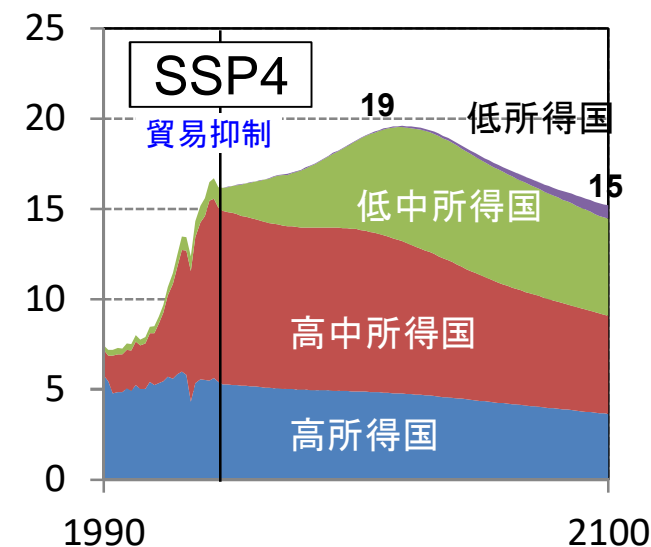
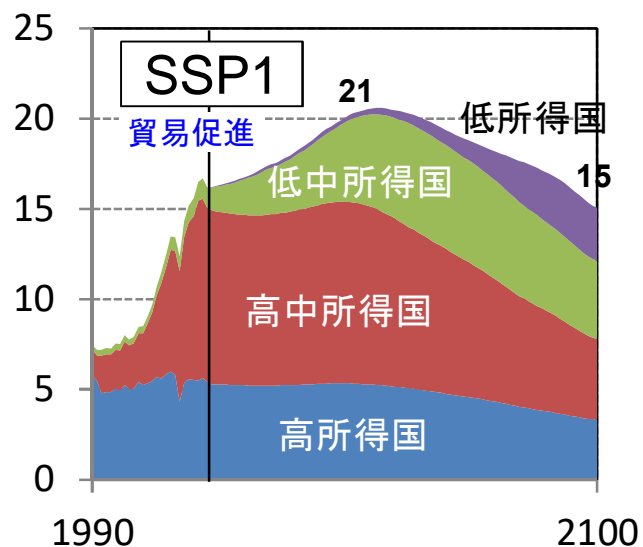
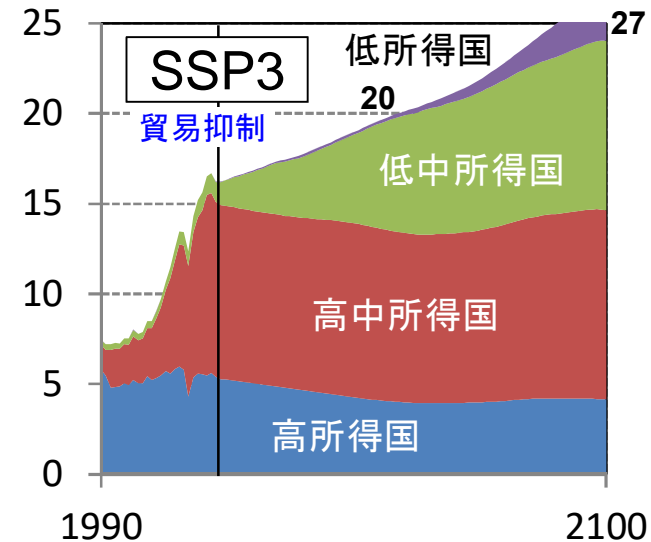
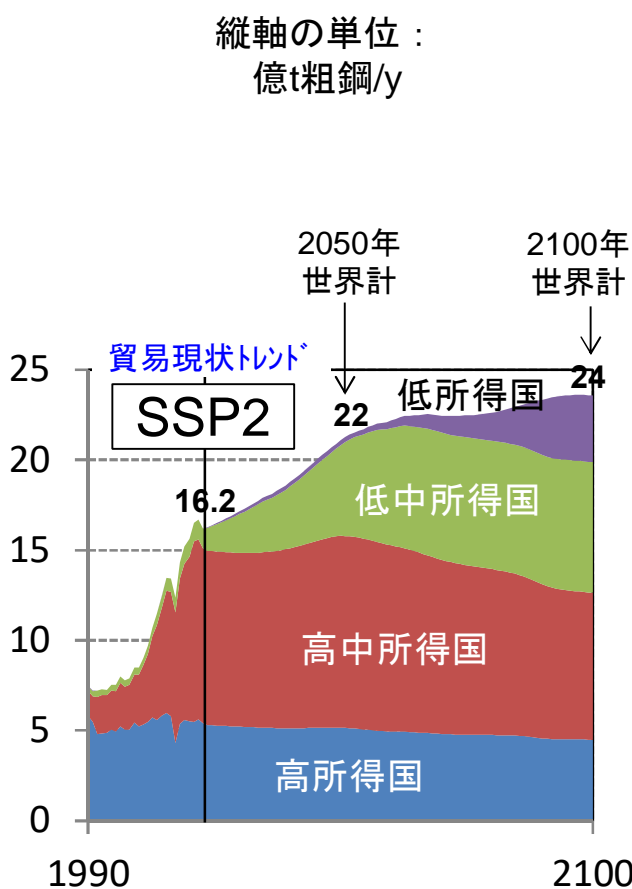
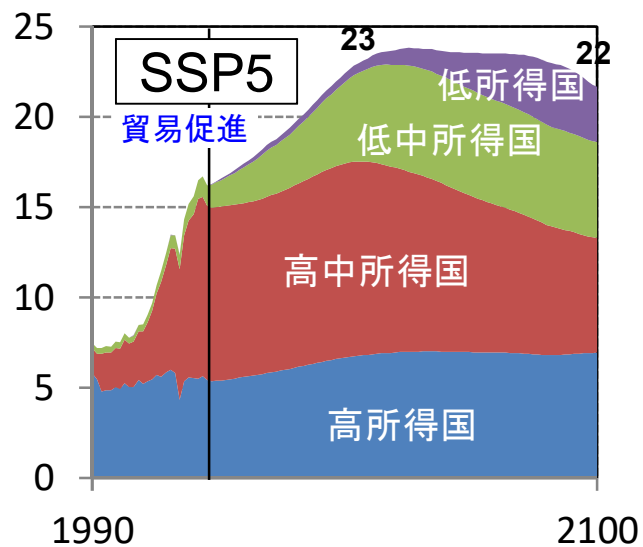
—国際的なコア分析チームの想定との比較—



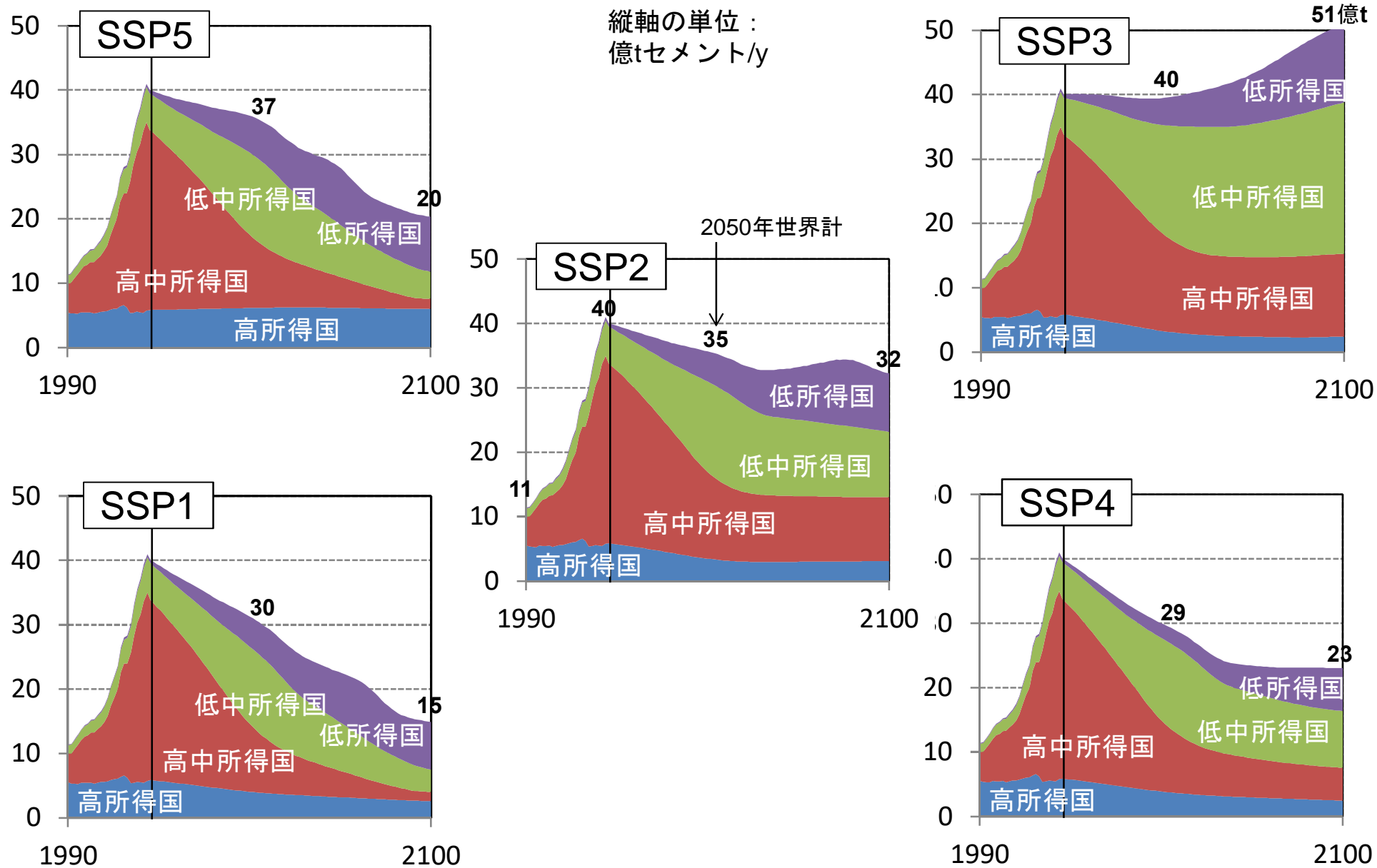
注：Riahi(2013, CCI/IA Workshop)をもとに作成。表示単位は、thousand US\$2005(PPP)/capita。

3.2. 粗鋼、セメント生産シナリオ の想定

世界の粗鋼生産シナリオ



世界のセメント生産シナリオ



3.3. 化石燃料価格シナリオの想定

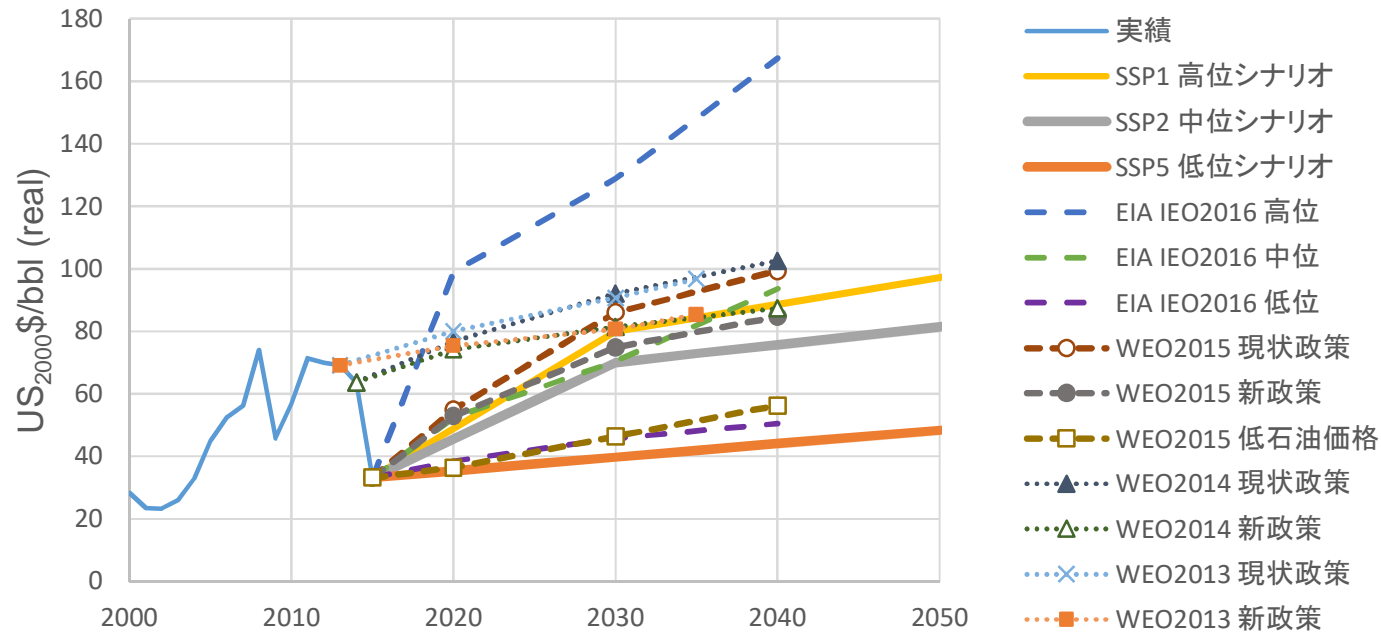
化石燃料価格シナリオ

コアチームによる化石燃料に関するSSPガイドライン

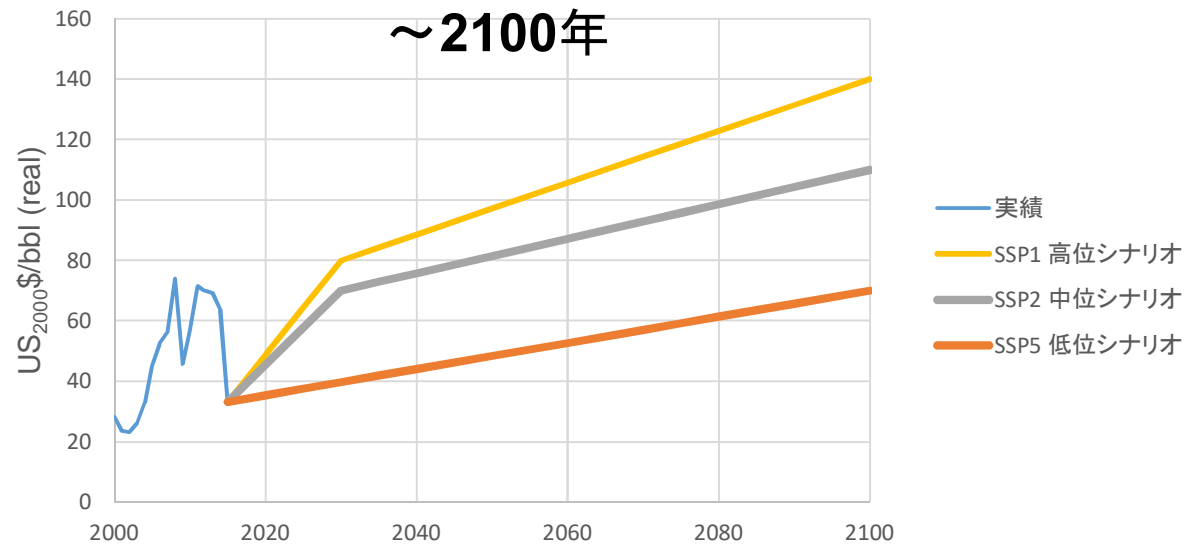
	SSP 1			SSP 2			SSP 3			SSP 4			SSP 5								
							<i>Country Income Groupings</i>														
SSP Element	Low	Med	High	Low	Med	High	Low	Med	High	Low	Med	High	Low	Med	High						
Coal																					
Macro-economy	cost driver			neutral			cost reducing			cost reducing			neutral			cost driver			cost reducing		
Technology	medium			medium			high						medium			very high					
National & environmental policy	very restrictive			supportive			very supportive			supportive			supportive			restrictive			very restrictive		
Conv. Hydrocarbons																					
Macro-economy	neutral			neutral			neutral			cost driver			cost reducing								
Technology	medium			medium			medium			fast			very high								
National & environmental policy	restrictive			supportive			mixed (not supported in MEA/FSU)			supportive			supportive			restrictive			very restrictive		
Non-conv. Hydrocarbons																					
Macro-economy	neutral			neutral			neutral			cost driver			cost reducing								
Technology	slow			medium			medium			medium			very high								
National & environmental policy	very restrictive			supportive			very supportive			supportive			supportive			restrictive			very restrictive		
General																					
Trade barriers	Free			Barriers			High Barriers			Barriers			Free								

- **SSP5**は化石燃料掘削技術等の技術進展が大きく、化石燃料供給コストはより安価と想定
- **SSP1**は化石燃料大規模開発・利用の社会的な制約が厳しく、それがコスト上昇要因になると想定
- **SSP1, 5**では、グローバル化進展により、天然ガスの国際価格差が収斂方向に
- **SSP2-4**は中位価格。**SSP2**のベースラインの化石燃料利用量で価格をキャリブレーション。ただし、それぞれのシナリオ、削減ケースにおける供給量に応じてコストは変化。

化石燃料価格シナリオ（石油）



～2050年
他文献との比較



3.4. 技術進展シナリオ

技術の進展に関するシナリオ（例）

2010年を100とした場合の将来コストの想定（当該時点に新設した場合のコスト）

括弧内の数値は、前の時点からのコスト低減率(2010～2020年、2020～2030年、2030～2050年、2050～2100年)

太陽光発電（非住宅用）

	2020	2030	2050	2100
SSP1、SSP4 (技術進歩高位)	60 (5.1%/yr)	45 (2.9%/yr)	34 (1.4%/yr)	34 (0.0%/yr)
SSP2、SSP5 (技術進歩中位)	75 (2.9%/yr)	60 (2.2%/yr)	50 (0.9%/yr)	34 (0.8%/yr)
SSP3 (技術進歩低位)	85 (1.6%/yr)	80 (0.6%/yr)	75 (0.3%/yr)	60 (0.4%/yr)

風力発電（陸上）

	2020	2030	2050	2100
SSP1、SSP4 (技術進歩高位)	85 (1.6%/yr)	70 (1.9%/yr)	60 (0.8%/yr)	50 (0.4%/yr)
SSP2、SSP5 (技術進歩中位)	90 (1.1%/yr)	85 (0.6%/yr)	75 (0.6%/yr)	65 (0.3%/yr)
SSP3 (技術進歩低位)	100 (0.0%/yr)	100 (0.0%/yr)	95 (0.3%/yr)	90 (0.1%/yr)

3.5. 投資における主観的割引率

投資における主観的割引率の想定 (1/2)

技術選択における主観的割引率の想定

	SSP1		SSP2~5	
	上限	下限	上限	下限
発電	5%	20%	8%	20%
その他エネルギー転換	10%	25%	15%	25%
エネルギー集約産業	10%	25%	15%	25%
運輸(自動車)	25%	45%	30%	45%
環境配慮型購買層	10%			
民生(業務・家庭)	25%	55%	30%	55%

注) 一人当たりGDPに応じ、地域別・時点別に上下限の範囲内で想定。高所得国は上限値に近く、低所得国は下限値に近い想定としている。

- “ **SSP1**は、持続可能な発展というストーリーラインの文脈を反映して、長期的な投資判断が行われるような想定を行った(投資における主観的割引率の上限値を低く想定)。そのために必要な政策としては、例えば四半期決算の廃止などが想定できる。
- “ 原子力発電、**CCS**に関する想定は次頁参照

投資における主観的割引率の想定 (2/2)

原子力発電、CCSにおける主観的割引率の想定

	SSP1	SSP2、 SSP5	SSP3	SSP4
原子力発電	+8%ポイント		-3%ポイント	-8%ポイント (下限値について)
CCS(発電、その他エネルギー転換(水素製造)、エネルギー集約産業(鉄鋼))	+8%ポイント			-8%ポイント (下限値について)

- “ **SSP1**は、原子力発電、**CCS**の社会受容性は低いとされていることから、当該技術の投資における主観的割引率の上下限値を部門別の想定から**+8%ポイント**と想定
- “ **SSP3**は、原子力発電の社会受容性は高いとされていることから、当該技術の投資における主観的割引率の上下限値を発電部門の想定から**-3%ポイント**と想定
- “ **SSP4**は、低所得国において原子力発電、**CCS**の社会受容性は高いとされていることから、当該技術の投資における主観的割引率の下限値(低所得国における想定)を部門別の想定から**-8%ポイント**と想定
- “ **SSP2**、**SSP5**は発電部門としての主観的割引率の想定を原子力発電、**CCS**にも適用

4. パリ協定を踏まえた 長期排出削減シナリオの想定

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

想定した世界排出削減シナリオの位置づけ

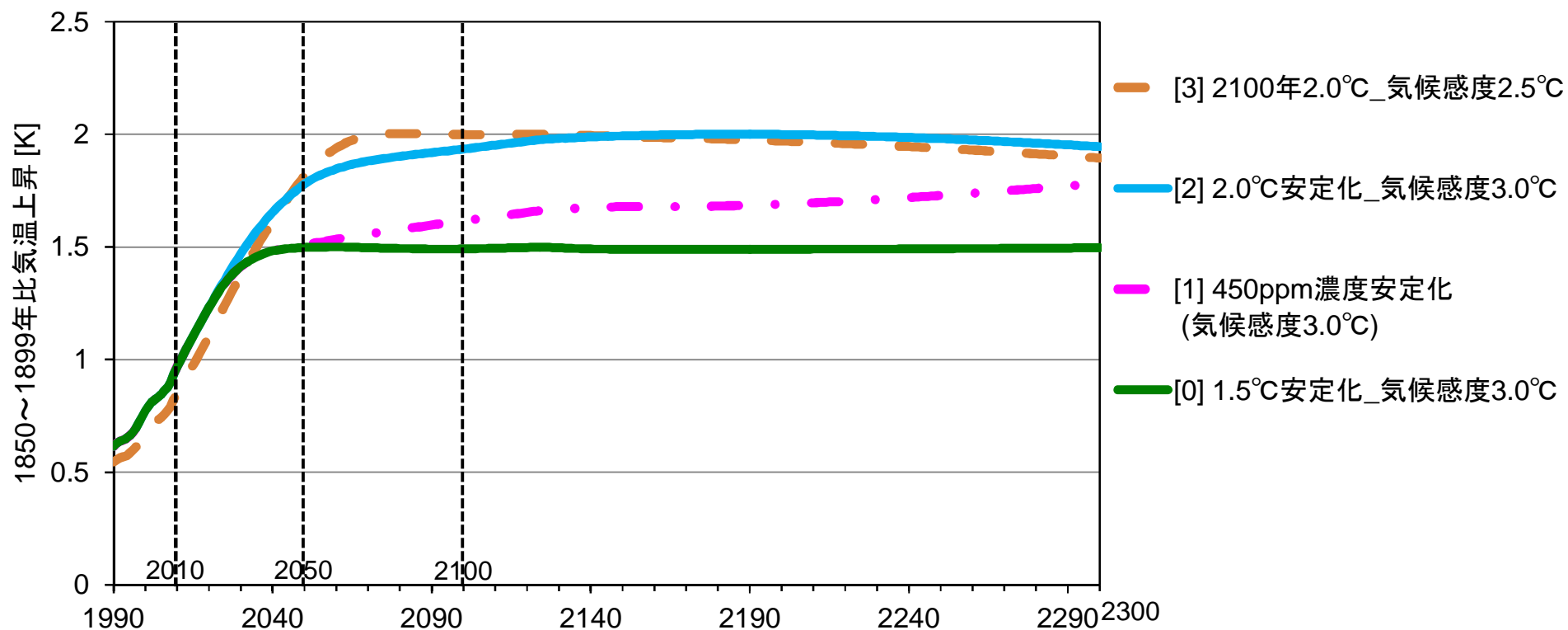
IPCC第4次(=WG3 第5次)
 の気候感度(2.0-4.5°C、
 最頻値3.0°C)

IPCC WG1第5次+第3次
 の気候感度(1.5-4.5°C、
 最頻値2.5°C)

2100年の等価CO2 濃度カテゴリー (ppm CO2eq)	サブカテゴリー	2050年世 界排出 (2010年 比)	2100年気温 (°C、1850- 1900年比)	21世紀中に当該気温 (1850-1900年比)を 超えない確率		21世紀中に当該気 温(1850-1900年比) を超えない確率*	
				1.5°C	2.0°C	1.5°C	2.0°C
[0] <430	極めて限定的な数の分析報告しか存在しない (AR5シナリオデータベースへの登録はなし)			50%以上*		66%以上	
[1] 450 (430-480)		-72~-41%	1.5~1.7°C (1.0~2.8)		66%以上	50%以上	
[2] 500 (480-530)	[2a] 530 ppm CO2eqを超えない	-57~-42%	1.7~1.9°C (1.2~2.9)		50%以上		66%以上
	[2b] 2100年までの間 に530 ppm CO2eq を一旦超える	-55~-25%	1.8~2.0°C (1.2~3.3)				
[3] 550 (530-580)	[3a] 580 ppm CO2eqを超えない	-47~-19%	2.0~2.2°C (1.4~3.6)				50%以上
	[3b] 2100年までの間 に580 ppm CO2eq を一旦超える	-16~+7%	2.1~2.3°C (1.4~3.6)				

出典) IPCC AR5; *はRITEによる概算

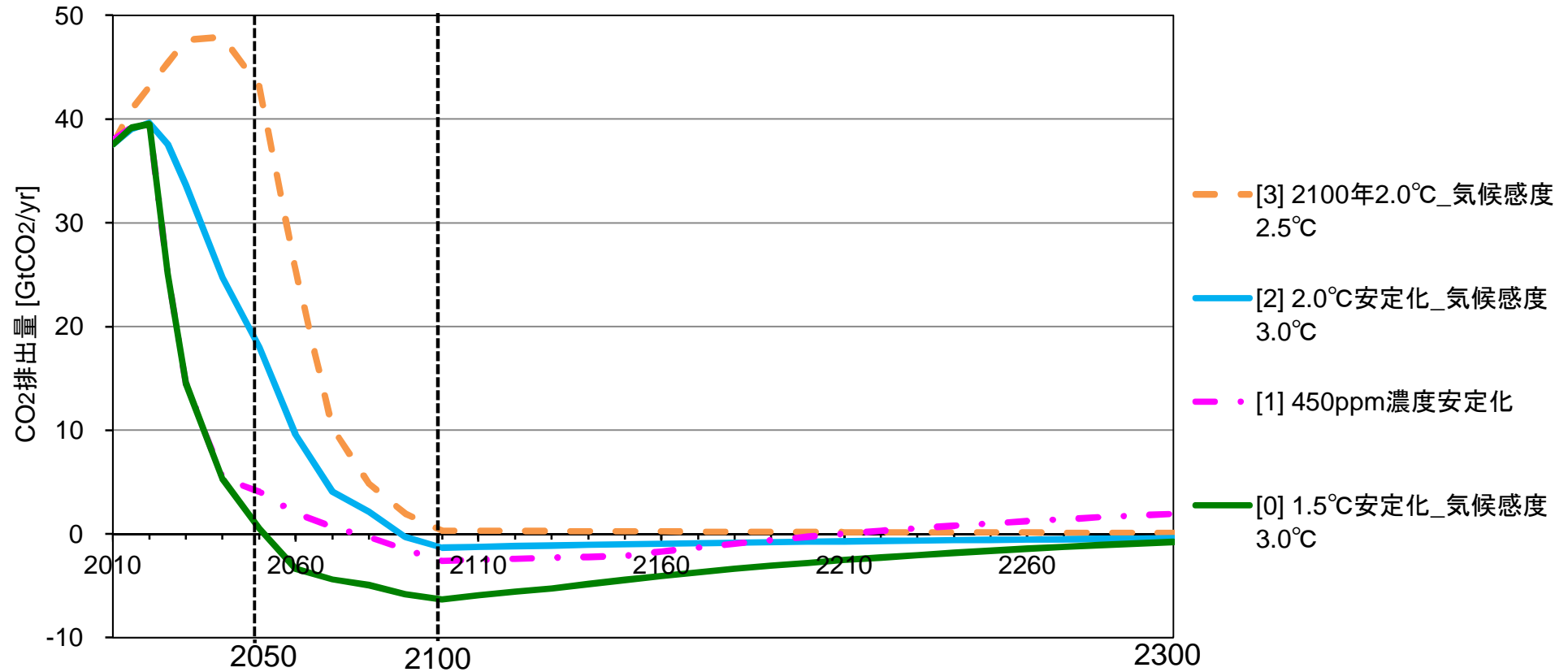
想定した全球平均気温上昇経路



MAGICCを用いてRITEにて試算

- 2°C目標および1.5°C目標に対応すると見られる4種類のシナリオを想定し、分析を実施
- 濃度安定化シナリオ(450 ppm CO2eq.安定化)は、濃度安定化後も気温は緩やかに上昇

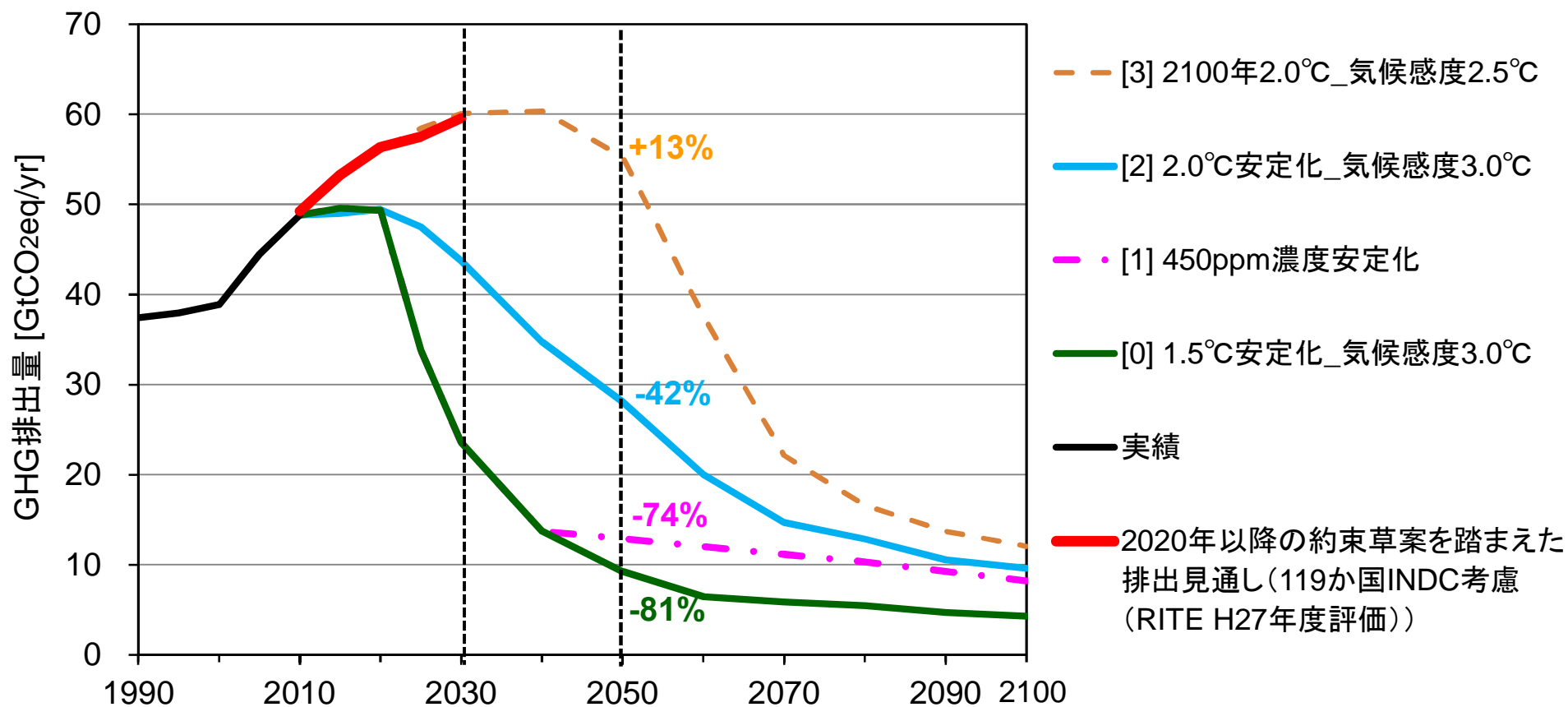
各シナリオのCO₂排出量推移(～2300年)



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CO₂排出量ゼロ排出は必要
- 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CO₂排出が必要

各シナリオの温室効果ガス排出経路(～2100年)

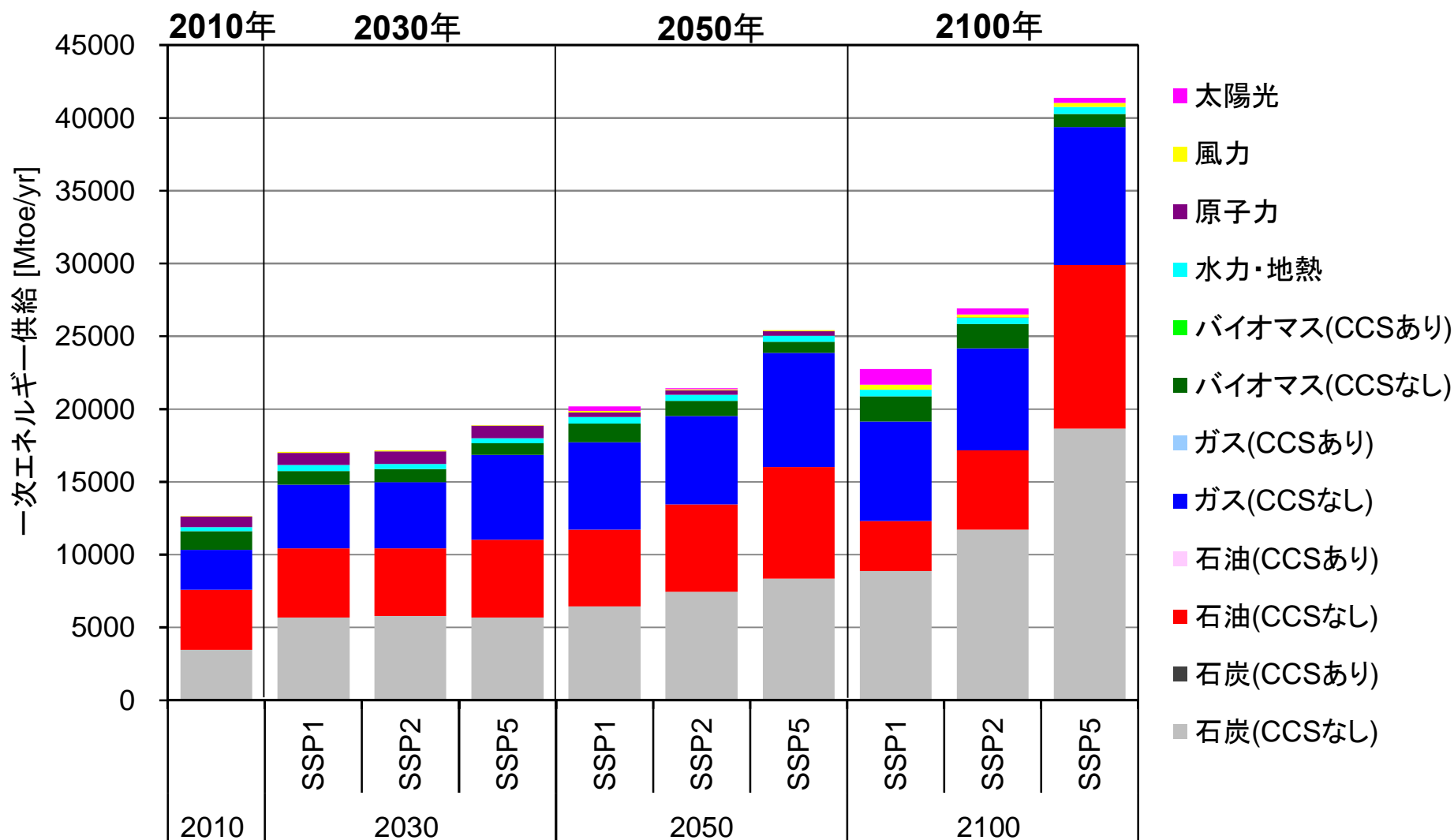


- 2050年頃の世界排出量は、2°C目標といっても大きな幅がある。
- 約束草案から期待される2030年の世界排出量(米国が2005年比26～28%減目標達成も想定。現実にはトランプ政権誕生も手伝って、その達成は相当困難な可能性大)と、[3]シナリオ:2100年2.0°C以下(気候感度2.5°C)は概ね整合性あり。他の[0], [1], [2]シナリオとは大きなギャップあり。

5. 各シナリオの下での 世界の分析結果 (暫定結果)

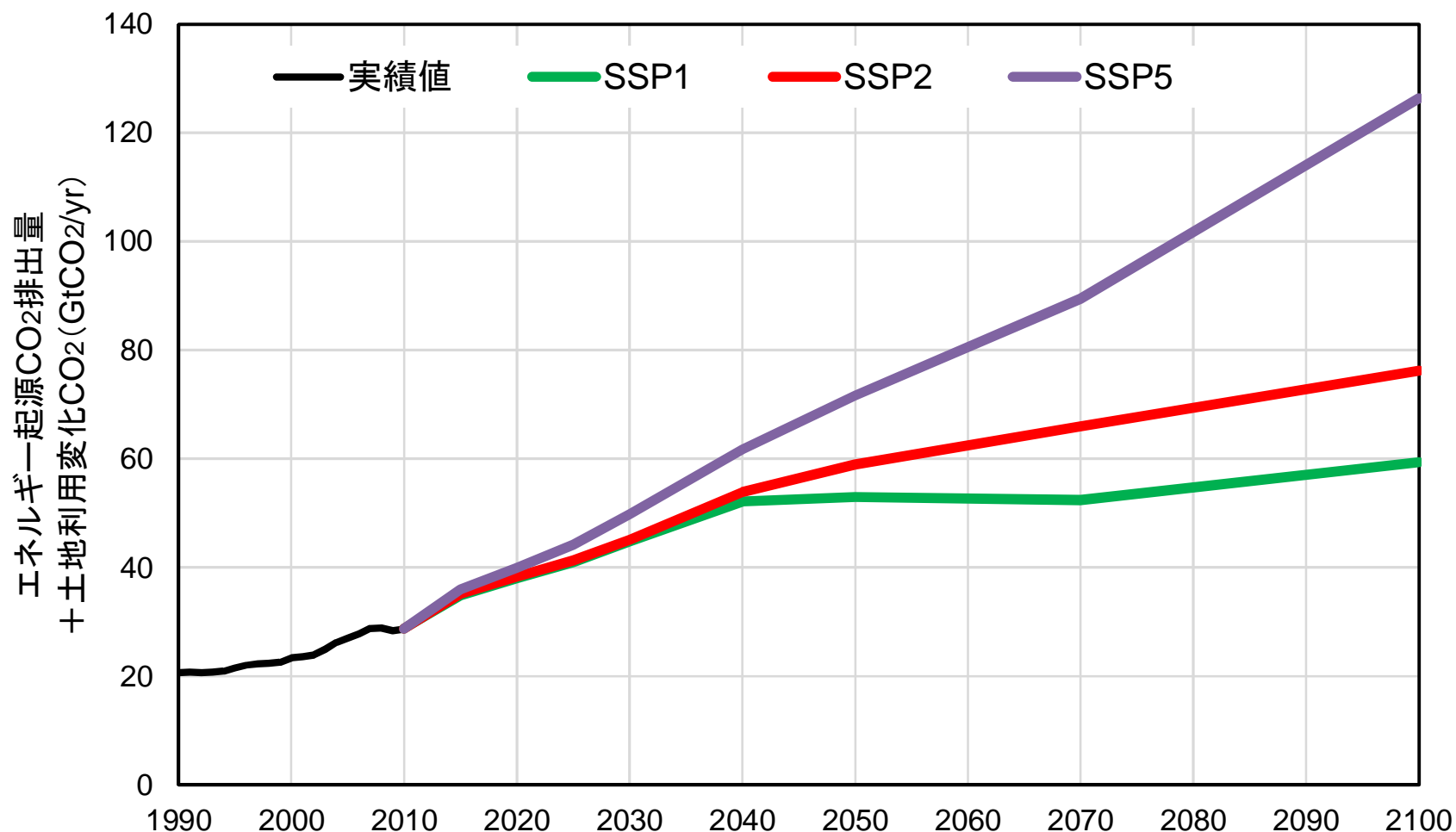
社会経済シナリオは、SSP1、2、5のみ試算

ベースラインにおける世界一次エネルギー供給量



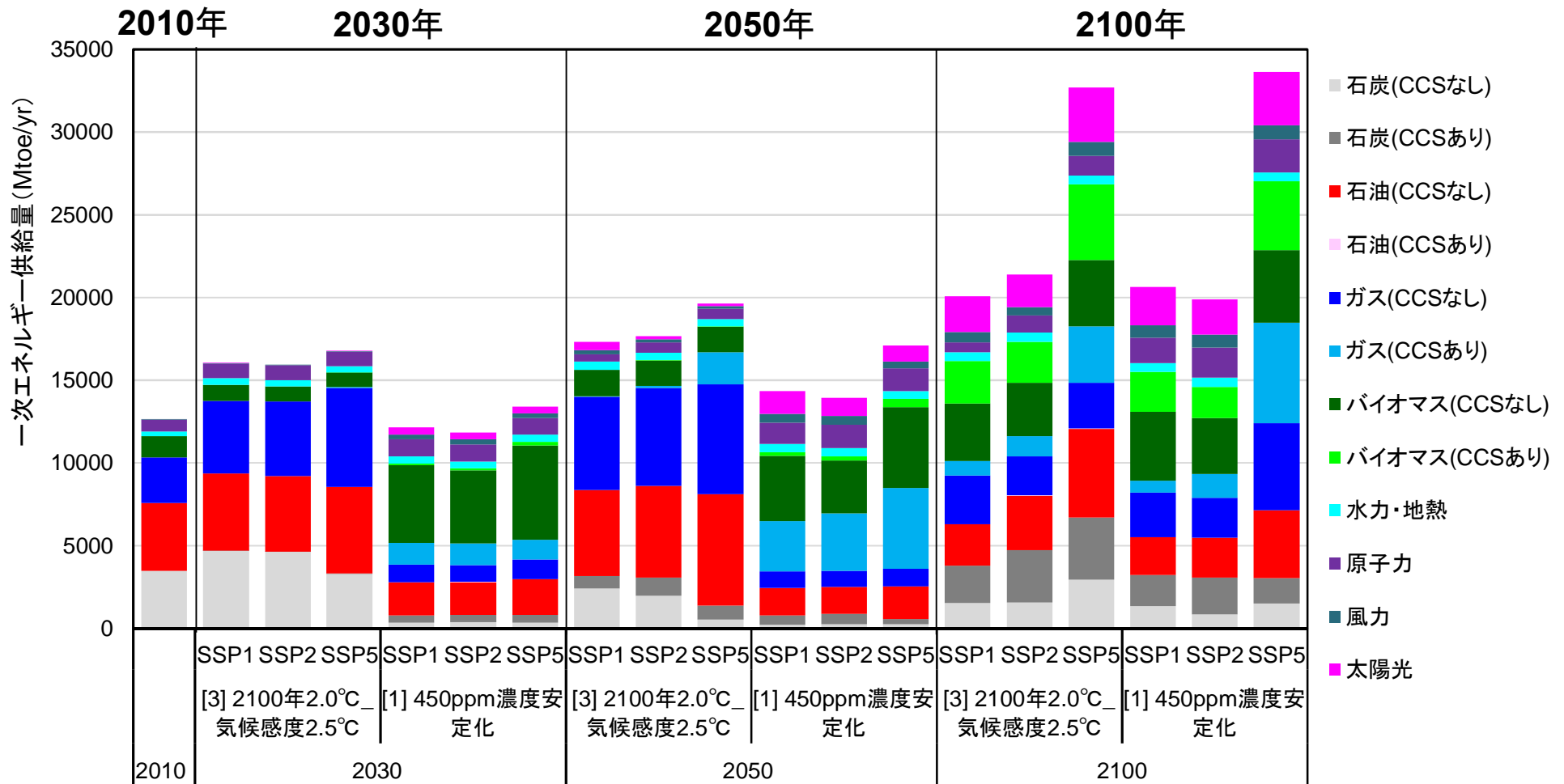
ベースライン(特段のCO2排出削減を行わないケース)においては、SSP1が比較的太陽光発電等の再生可能エネルギーの増大が見られるものの、SSP1を含めて、すべてのシナリオで2100年に至る間、化石燃料が支配的なエネルギー供給源となると推計される。

ベースラインにおける世界のCO2排出量推移



- 社会経済シナリオ(SSP)によって、ベースライン(特段のCO2排出削減を行わないケース)におけるCO2排出量は、2100年に向けて潜在的に増大傾向に。
- ただし、SSP1については、2040年以降はほぼ横ばい傾向と推計。

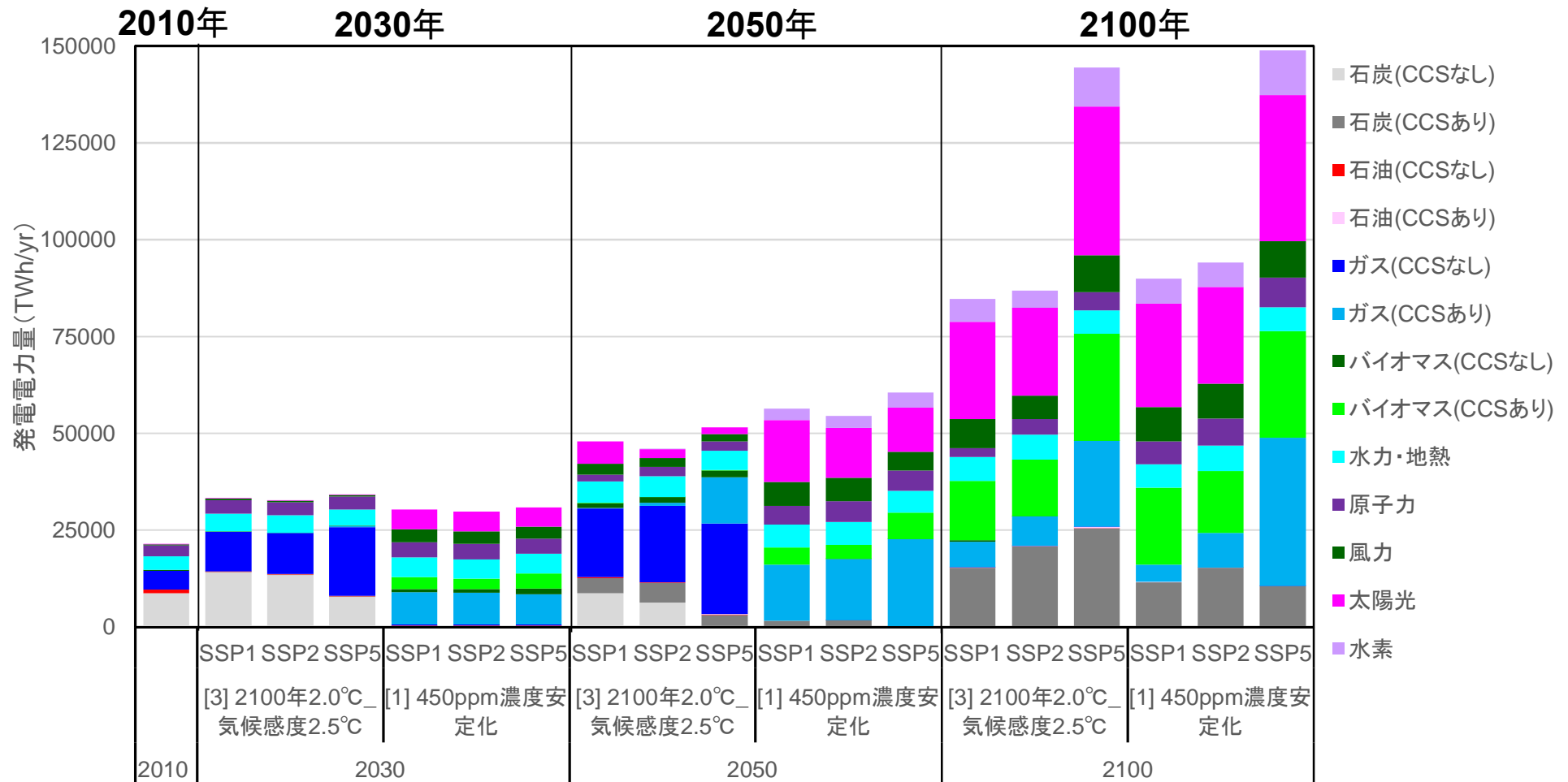
2°C、1.5°C目標における世界一次エネルギー供給量



[0] 1.5°C安定化_気候感度3.0°Cは、SSP1, 2, 5のいずれの社会経済シナリオの下でも、モデルの解が得られなかった（2050年以降の排出削減制約が厳しいため）。[2] 2.0°C安定化_気候感度3.0°Cは掲載していない。

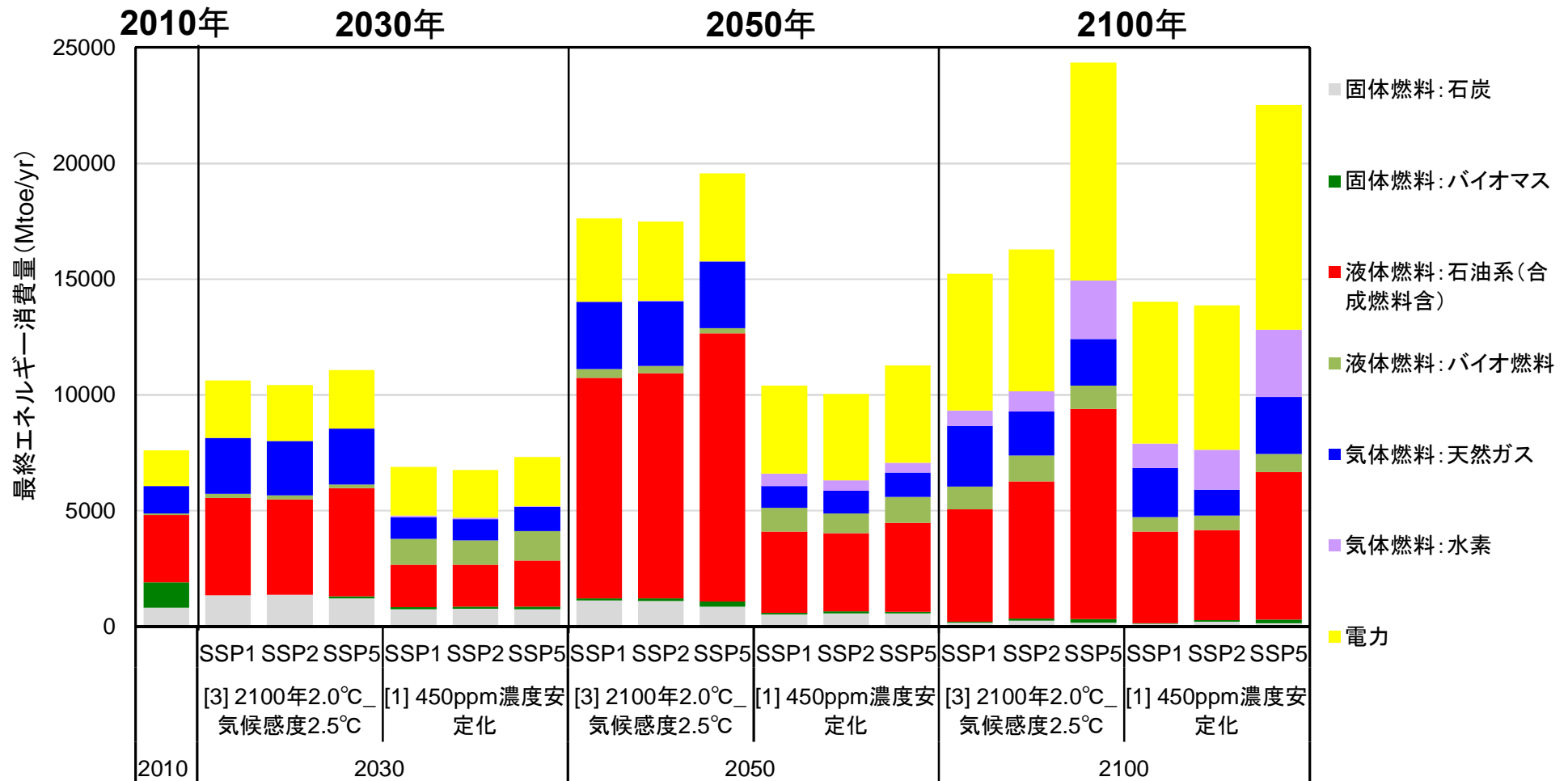
2050年頃までは、排出削減目標による差異が大きい。2100年時点では、排出削減目標よりも、社会経済シナリオ(SSP)による差異が大きい。2100年では相当量のバイオマスCCS(BECCS)が必要

2°C、1.5°C目標における世界発電電力量



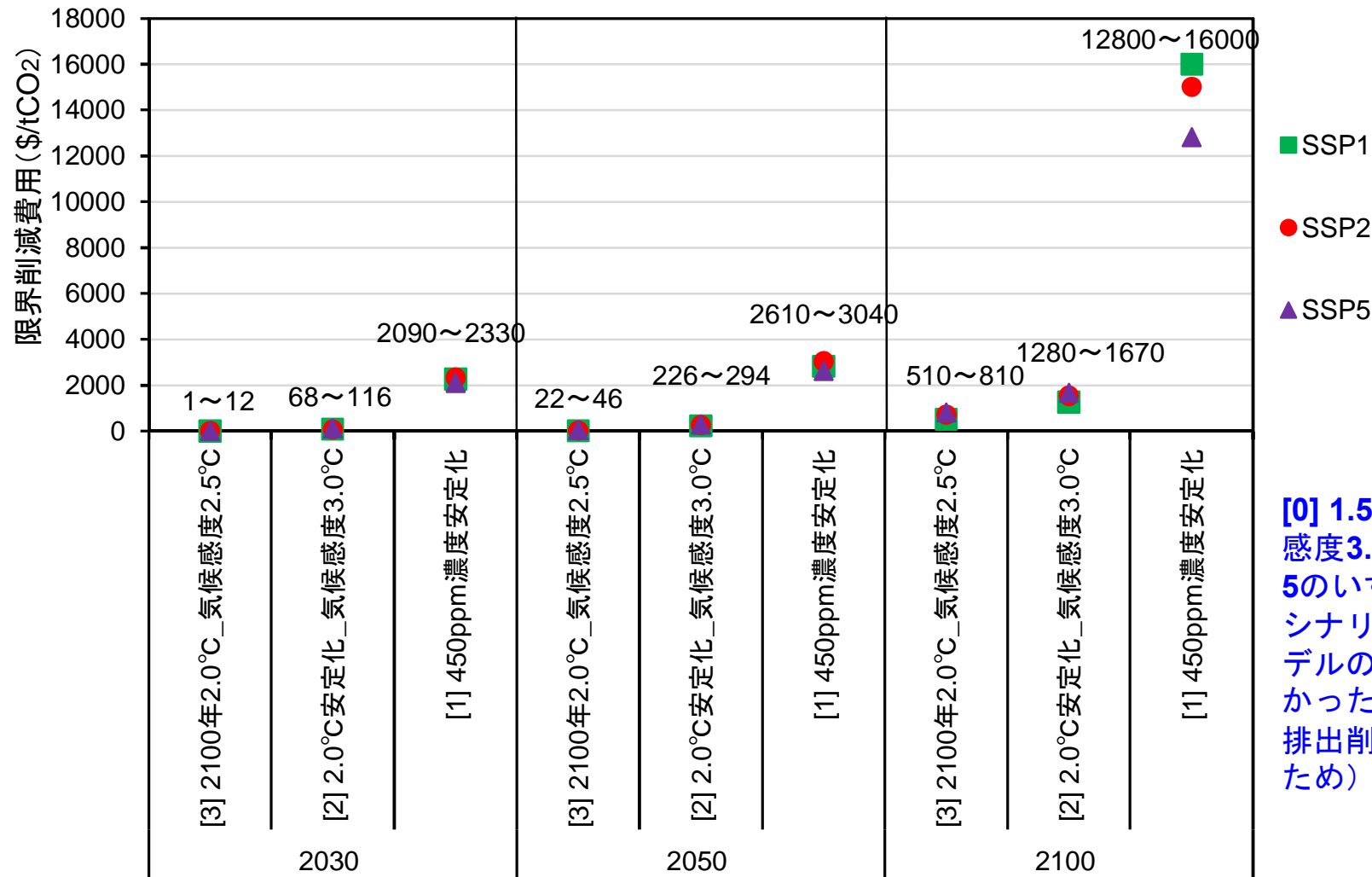
- 2050年頃までは、2°C目標シナリオであっても、[3] 2100年2.0°C_気候感度2.5°Cシナリオの場合、世界の化石燃料発電電力量は増大(天然ガスの増大)が見られる。
- 一方、[1] 450 ppmシナリオでは、2050年頃までには、ほぼすべてが、CCS、再エネ、原子力による発電が必要となる。また、水素発電も見られる。
- 2100年では、いずれの2°Cシナリオでも相当量のBECCSが必要となっている。

2°C、1.5°C目標における世界最終エネルギー消費量



- 2050年頃までは、2°C目標シナリオであっても、[3] 2100年2.0°C_気候感度2.5°Cシナリオの場合、世界の化石燃料による最終エネルギー消費量は増大が見られる。
- 一方、[1] 450 ppmシナリオでは、2050年頃までには、気体燃料の一部は水素に、また2100年までには、[3] 2100年2.0°C_気候感度2.5°Cシナリオであっても水素が相当量利用される結果
- 厳しい排出削減となる[1] 450 ppmシナリオでは、電源の脱炭素化とともに、電力シェアが増大

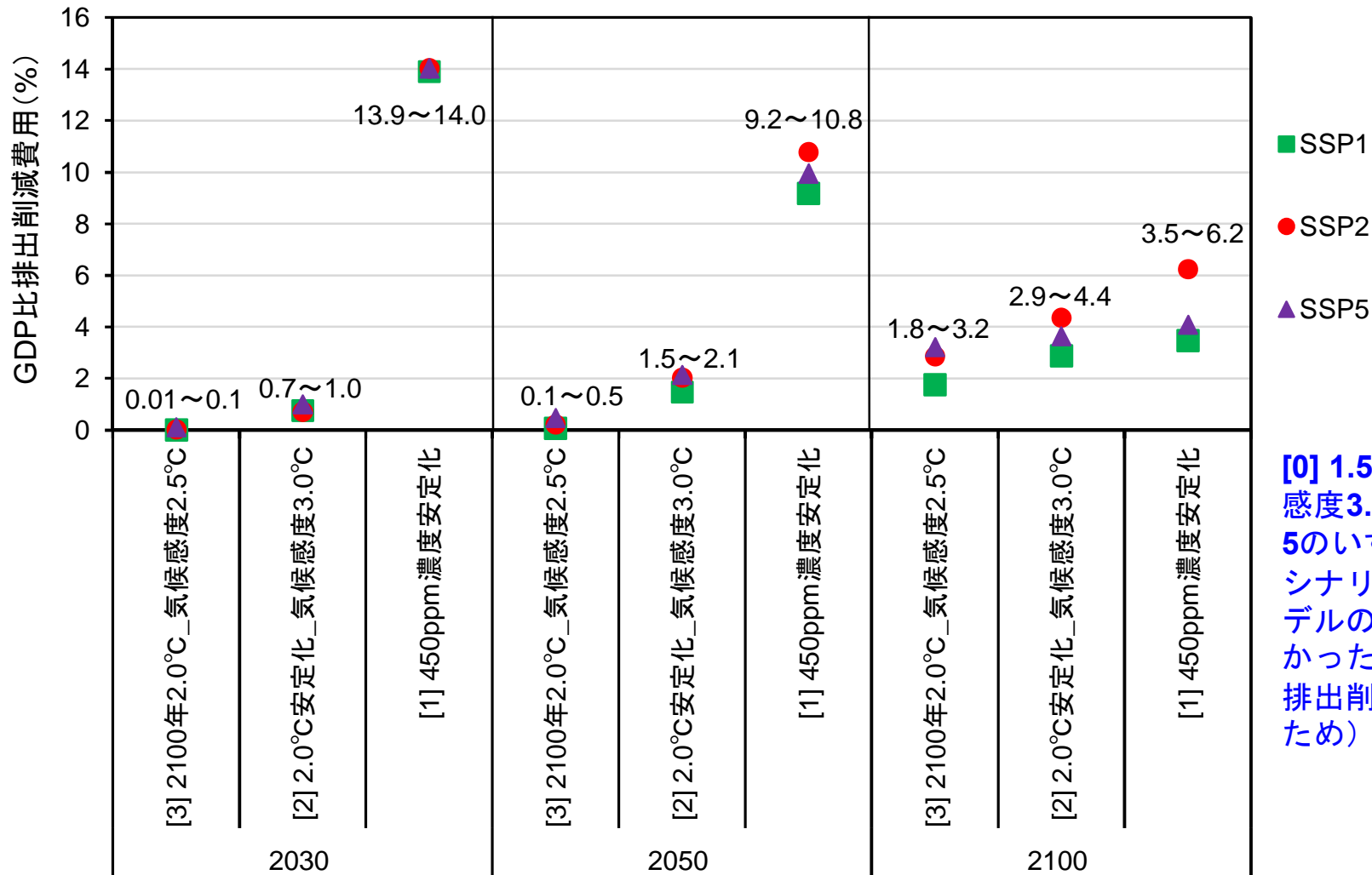
2°C、1.5°C目標における排出削減費用(限界削減費用)



[0] 1.5°C安定化_気候感度3.0°Cは、SSP1, 2, 5のいずれの社会経済シナリオの下でも、モデルの解が得られなかった(2050年以降の排出削減制約が厳しいため)

- 社会経済シナリオ(SSP)による差異はあるものの、いずれの排出削減シナリオでも2050年以降は、現在想像のつかない(モデルで評価できない)革新的技術なくしては、2°C目標の達成は困難と見られる。
- 排出削減が緩やかなうちは、SSP1,2よりもSSP5の削減費用が高いが、更に厳しい削減になるとむしろSSP5の方が削減費用が小さく推計される(CCSや原子力等の大規模温暖化対策技術の利用が容易なシナリオのため)。

2°C、1.5°C目標における排出削減費用 (GDP比削減費用)



[0] 1.5°C安定化_気候感度3.0°Cは、SSP1, 2, 5のいずれの社会経済シナリオの下でも、モデルの解が得られなかった(2050年以降の排出削減制約が厳しいため)

- GDP比排出削減費用で見ると、[1] 450 ppmシナリオにおける2030、2050年の費用負担がとりわけ大きい。
- GDP成長率の想定が大きいSSP1, 5は、SSP2に比べて、GDP比排出削減費用は若干低くなる傾向あり。

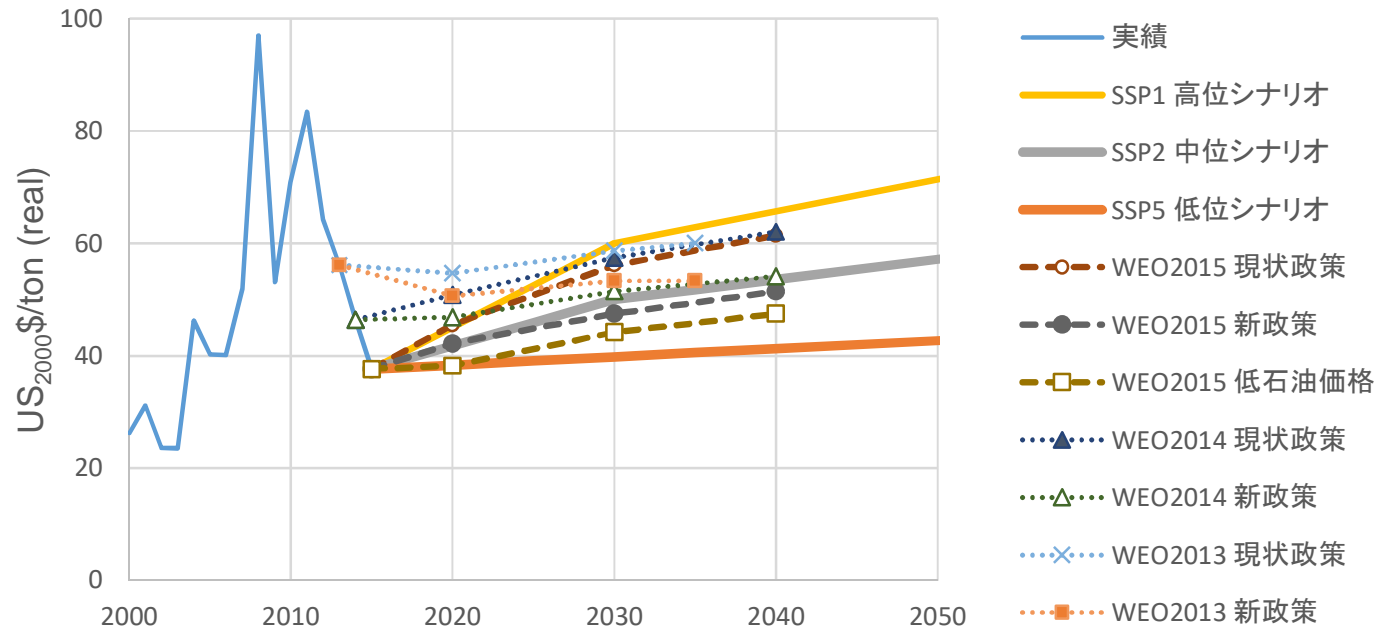
6. まとめ

まとめ

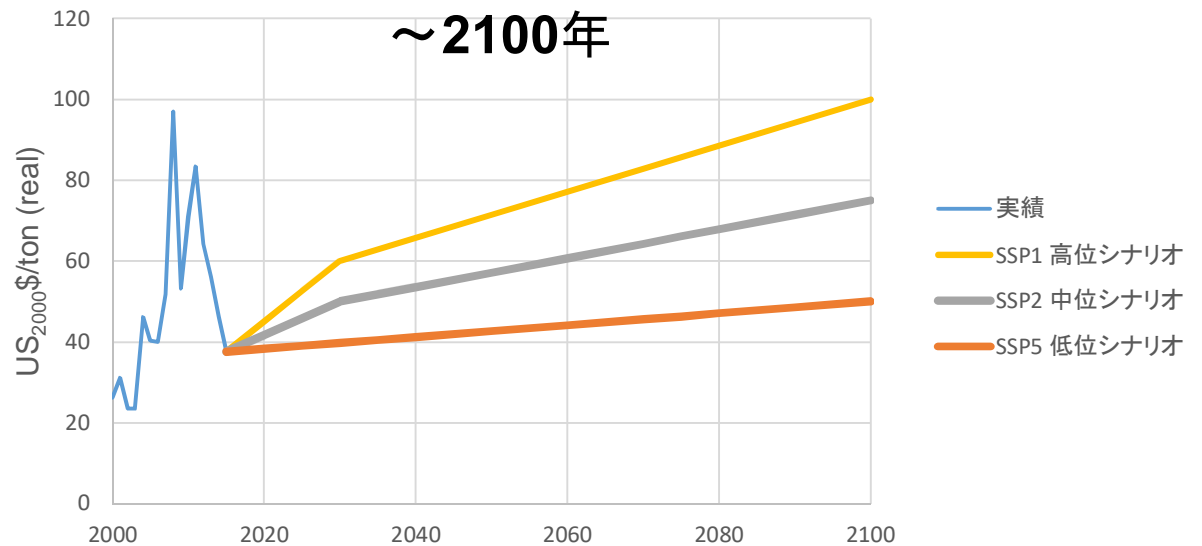
- ◆ パリ協定では、 2°C 目標や 1.5°C 目標に言及がなされた。
- ◆ 気温目標に関する政治的合意文書としてのパリ協定の不確実性、自然科学における気温推計の不確実性あり。また、将来の社会経済の見通しによる不確実性（SSP準拠。今回はSSP1, 2, 5について考慮）もあり。これを考慮して、 2°C 、 1.5°C 目標について分析を実施
- ◆ 1.5°C 目標については、気候感度 $2.0\sim 4.5^{\circ}\text{C}$ 、最頻値 3.0°C の場合に、50%以上の確率（気候感度 $1.5\sim 4.5^{\circ}\text{C}$ 、最頻値 2.5°C の場合は66%程度以上の確率に）で目標達成が期待されるような排出経路は、2050年以降の排出許容量が大変小さくなるため、考慮したSSPの3シナリオともに、RITEのDNE21+モデルでは実行可能解が得られなかった。
- ◆ 2°C 目標についても、技術進展を大きく見込むSSP1やSSP5シナリオにおいて、比較的気候感度が小さいとした排出削減シナリオの下でも、特に2050年以降の排出削減費用は相当高い費用となると推計された。 2°C 目標達成には、モデルで考慮できないような、新しいタイプの革新的技術の開発と普及が必須と見られる。
- ◆ また、そのような技術革新のためには、良好な経済環境が必要と考えられ、経済と環境が調和した形での対応戦略を進めていくことが重要である。
- ◆ なお、SSPシナリオについては、各社会経済を方向付ける温暖化対策以外の政策の実行可能性、困難さなど、多くの検討課題があると考えられる。

付録

化石燃料価格シナリオ（石炭）

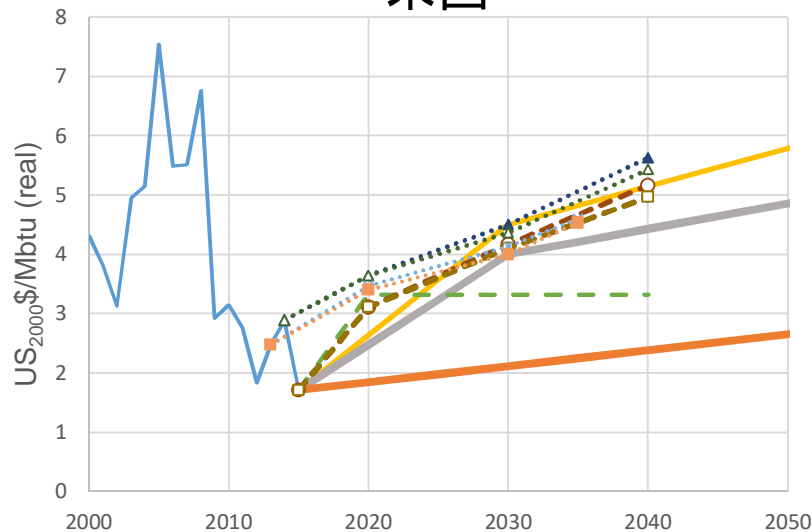


～2050年
他文献との比較

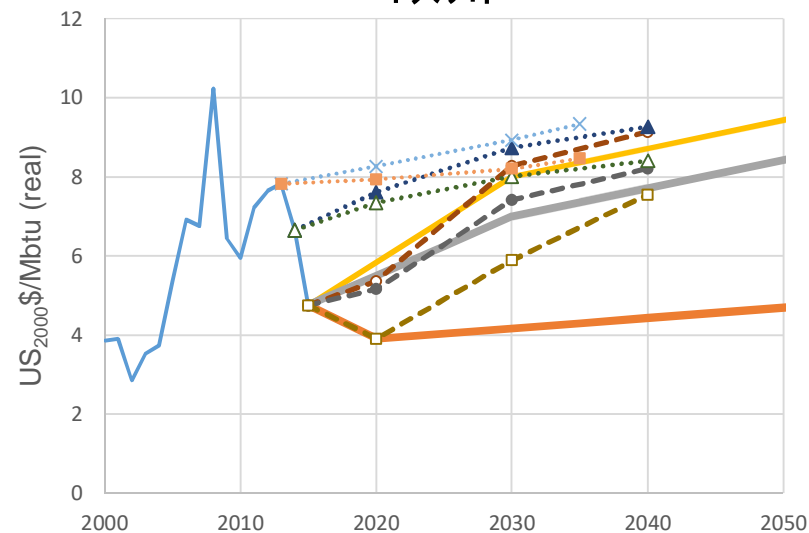


化石燃料価格シナリオ（ガス）

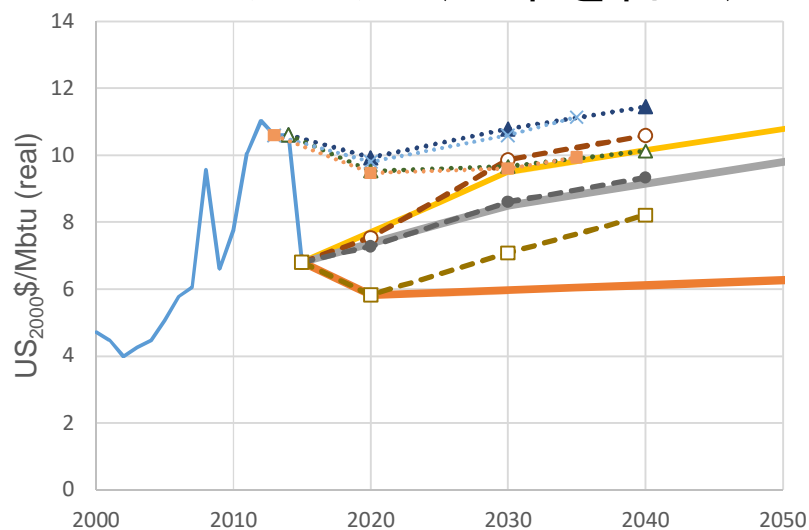
米国



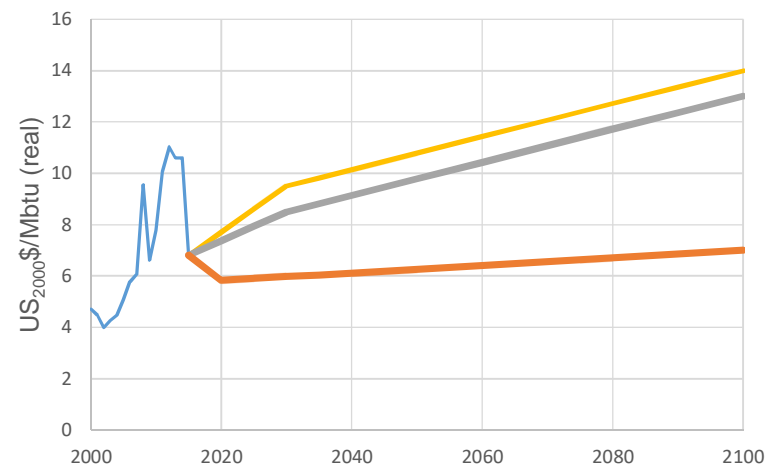
欧州



アジア（日本を含む）

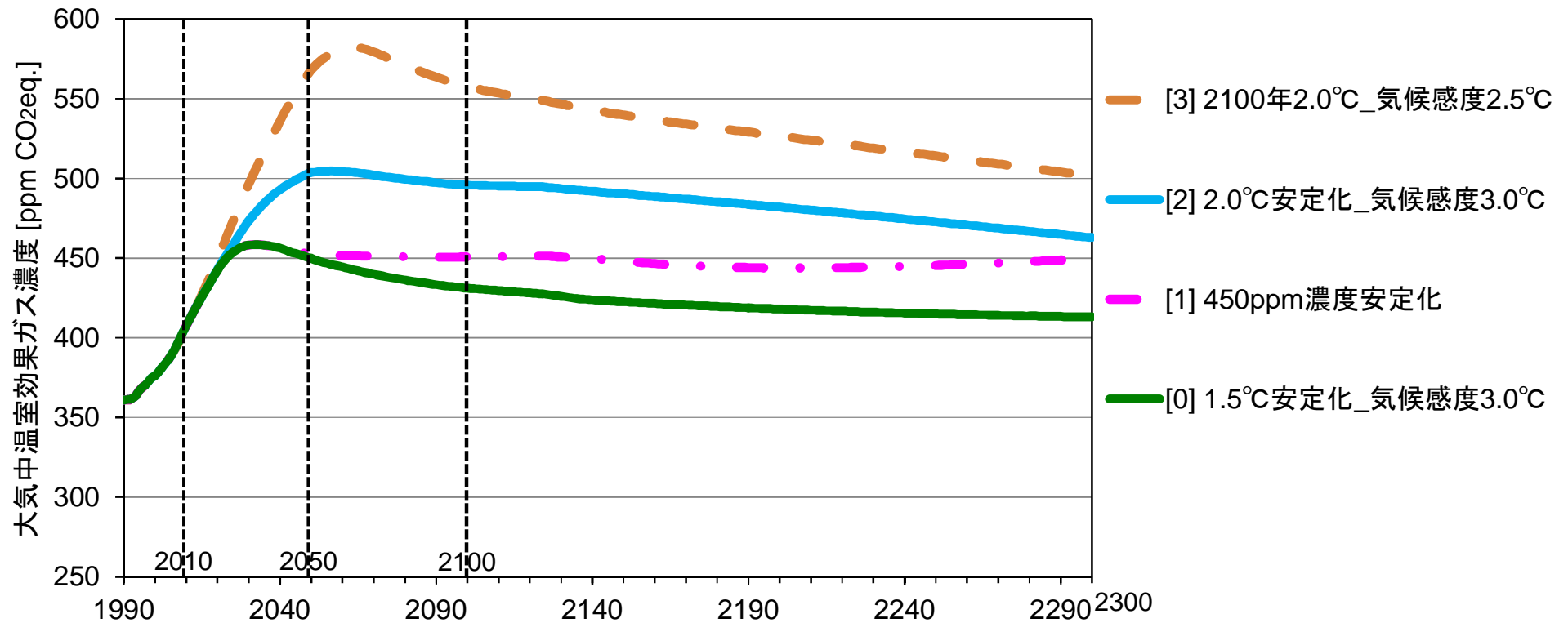


アジア（日本を含む）；～2100年



- 実績
- SSP1 高位シナリオ
- SSP2 中位シナリオ
- SSP5 低位シナリオ
- WEO2015 現状政策
- WEO2015 新政策
- WEO2015 低石油価格
- WEO2014 現状政策
- △- WEO2014 新政策
- ×- WEO2013 現状政策
- WEO2013 新政策

各シナリオの大気中温室効果ガス濃度推移



出典)MAGICC、DNE21+を用いてRITEにて試算