

2018年1月30日

# 社会経済、気候変動の不確実性を 踏まえたエネルギー対策シナリオ

(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

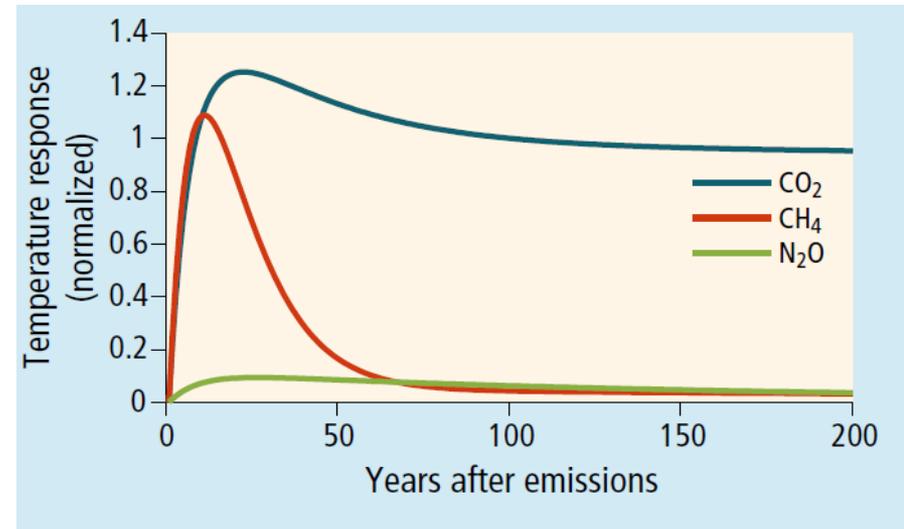
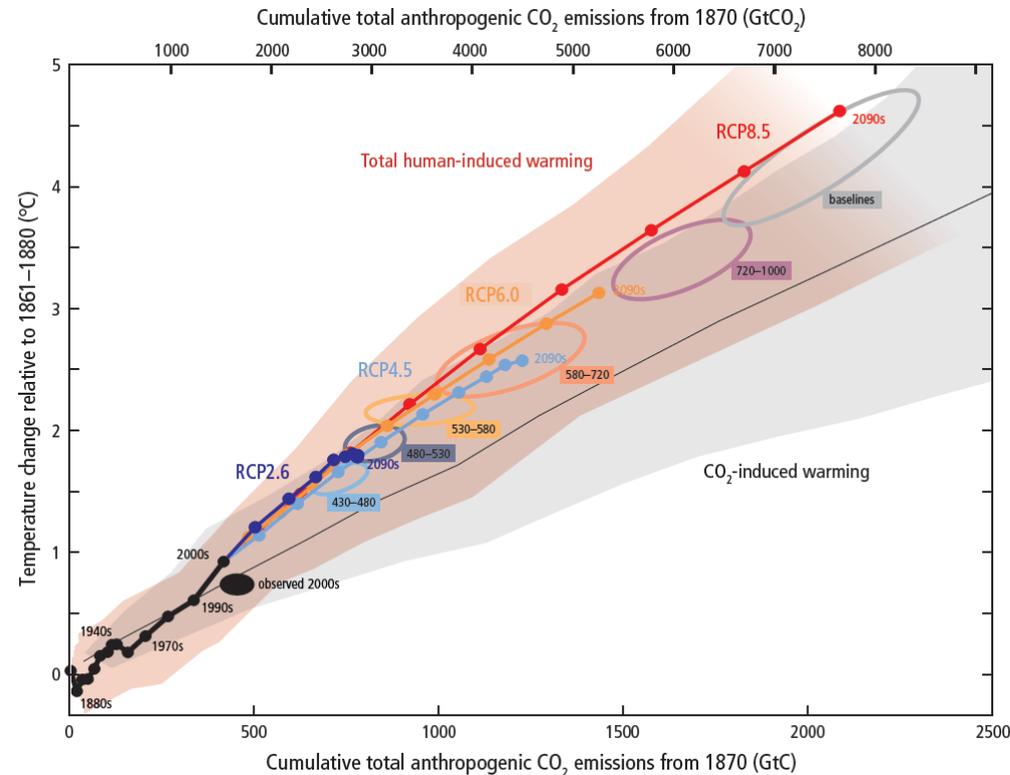


# 目次

1. 気候変動対応に関する事項
2. エネルギーと経済成長
3. 社会経済の不確実性を踏まえた分析・評価
4. エネルギー需要サイドの大幅な変革の可能性
5. まとめ

# 気候変動対応に関する事項

# 累積排出量と気温上昇の関係と排出に対する気温応答



2010年排出に対する気温上昇応答。CO<sub>2</sub>排出の100年後の寄与を1として規格化

出典) IPCC AR5 統合報告書

- 累積排出量と気温上昇には線形に近い関係が見られる
- CO<sub>2</sub>排出に対する気温応答は減衰に非常に長い時間を要する
- すなわち、いずれのレベルであろうとも、気温を安定化しようとするれば、いずれはCO<sub>2</sub>のゼロ排出が必要

# 気温上昇推計の不確実性

- ◆ 平衡気候感度（温室効果ガス濃度が倍増（550 ppm CO<sub>2</sub>eq）し、その濃度で安定化したとき、最終的（数百年後）に到達すると推計される気温上昇幅）に関する知見の変遷（IPCC）

2001年 第3次評価報告書まで 1.5～4.5°C（最良推定値：2.5°C）



2007年 第4次評価報告書 2.0～4.5°C（最良推定値：3.0°C）



2013年 第5次評価報告書 1.5～4.5°C（最良推定値：合意なし）

1°C以下：extremely unlikely、6°C以上：very unlikely

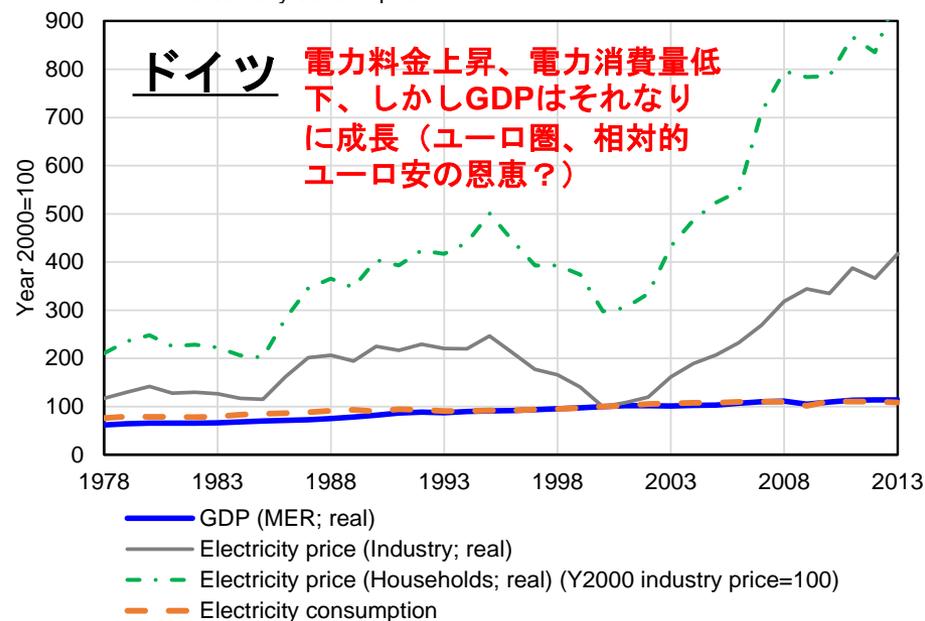
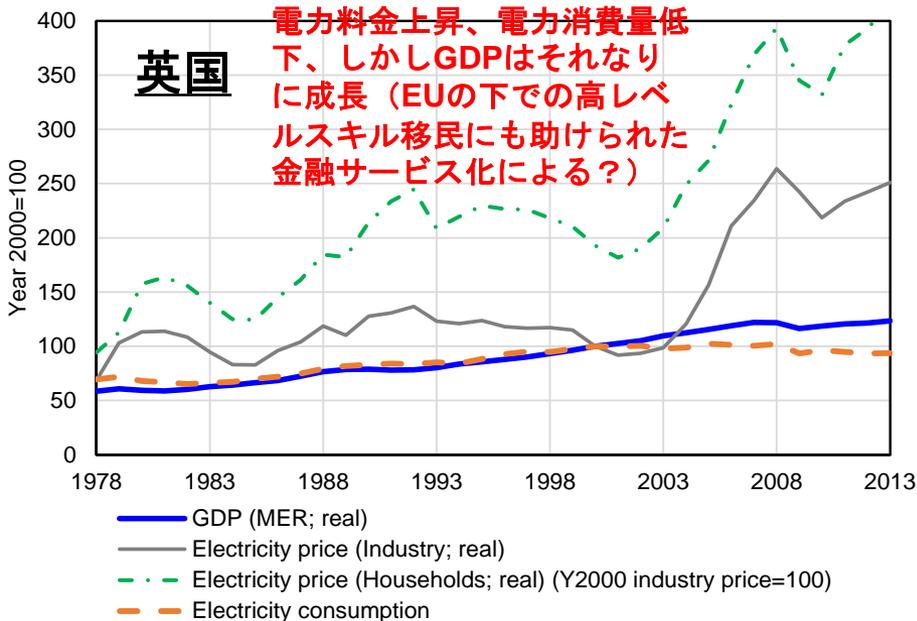
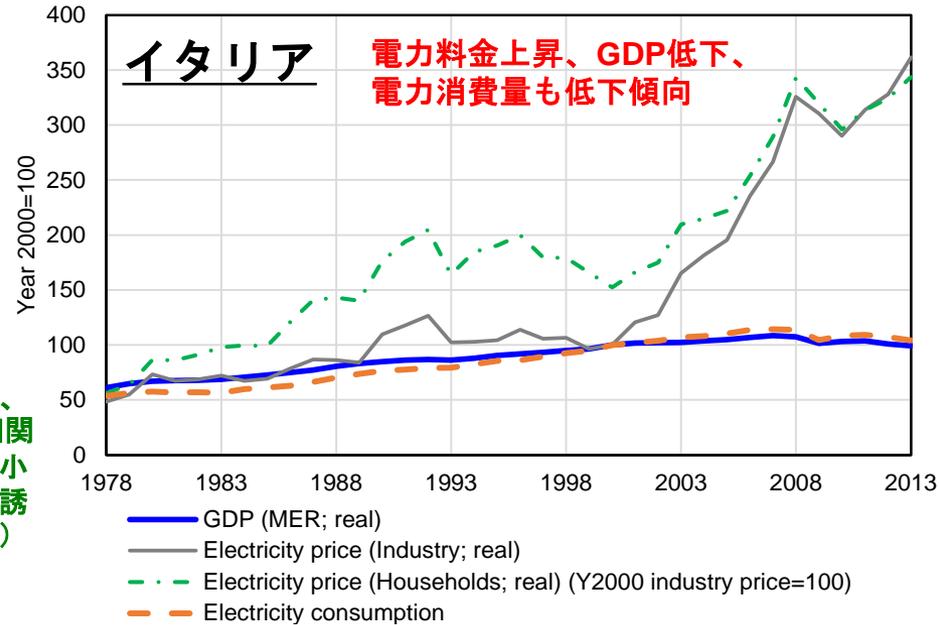
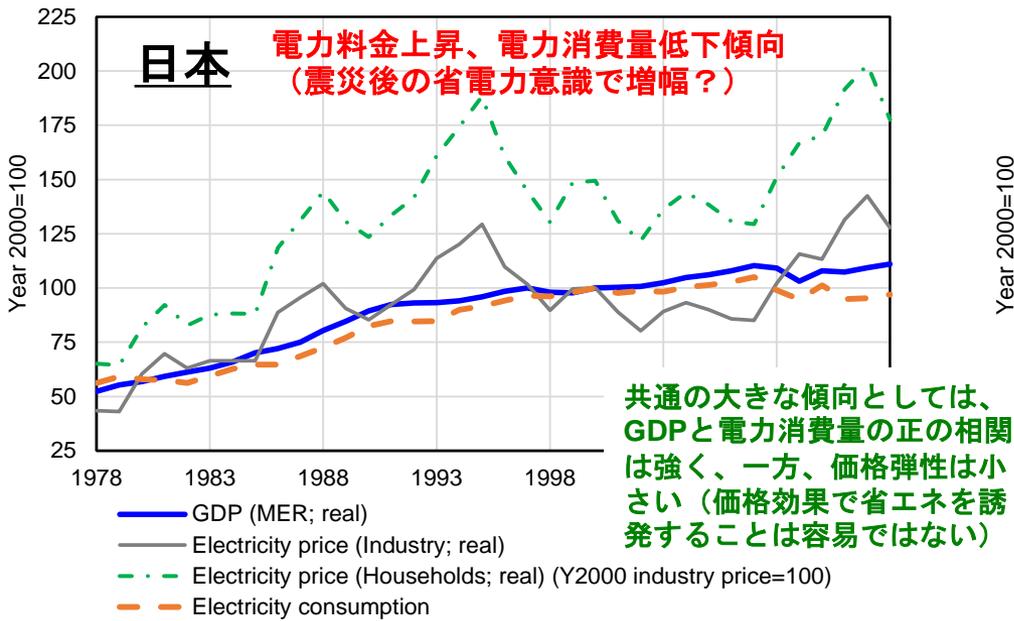
【第5次報告書（2013）では、第4次報告書（2007）よりも不確実性の幅が下方に広がる修正がなされた。】

人為起源による地球温暖化は明白だが、程度の不確実性は依然大きい（仮に第4次評価報告書の幅であったとしても）。その事実を理解した上で、経済と環境がバランスし、経済コストも含めたトータルリスクを小さくできるような、総合的な対応戦略をとることが重要。すなわち、長期にはCO<sub>2</sub>ゼロエミッションを目指す必要があり、一方、中期（2050年頃）は不確実性を踏まえた柔軟性のある対応戦略をとることが重要。

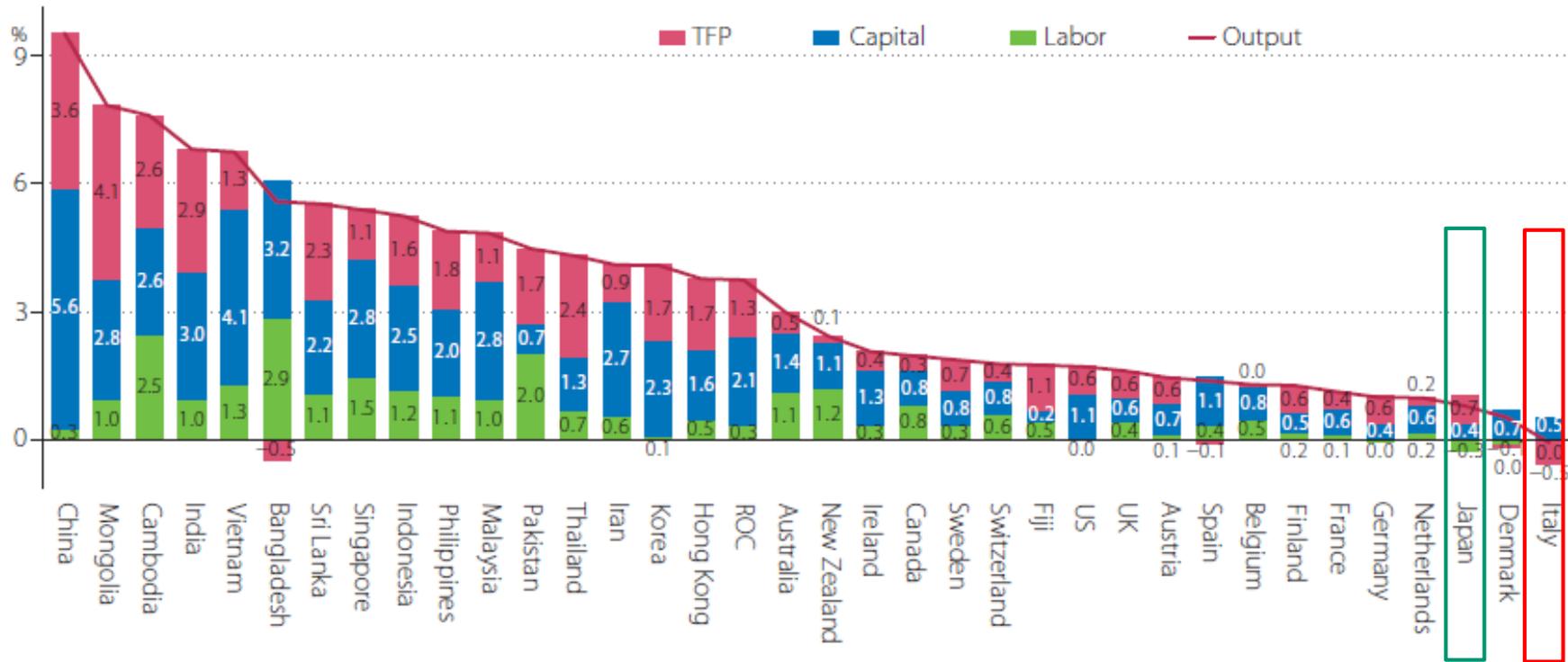
- ◆ すべての国が自主的に目標と達成方法を決め、5年ごとに提出する（第4条2項、第4条9項）。
- ◆ なお、目標見直しにあたっては、従前の目標に比べて前進させるよう求めている（第4条3項）。
- ◆ 効果的な実施を促すために、透明性を高めた形で、すべての国が共通かつ柔軟な方法でその実施状況を報告しレビューを受ける。（第13条）
- ◆ 全球平均気温上昇を産業革命前に比べて $2^{\circ}\text{C}$ より十分に低く（"well below"）抑える。また $1.5^{\circ}\text{C}$ に抑えるような努力を追求する。（第2条1項(a)）（COP21決定では、IPCCに対し、 $1.5^{\circ}\text{C}$ 目標の影響と排出経路に関する特別報告書の2018年までの策定を求めている）
- ◆ 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）

# エネルギーと経済成長

# GDP、電力料金、電力消費量の実績



# 世界各国の経済成長率（2000-2013年）



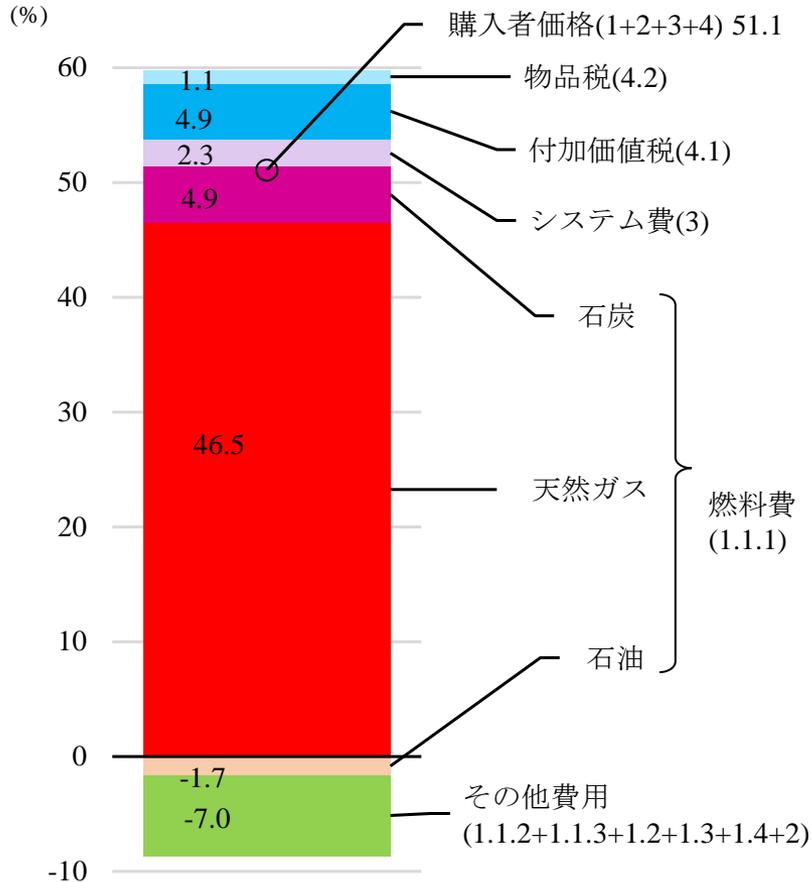
アジアとOECD諸国の経済成長の源泉（2000－2013年）

(Source) APO(2015) *APO Productivity Databook 2015*, Keio University Press: Tokyo, 2015, for Asian countries; OECD Stat (Dataset: Multi-Factor Productivity) for OECD countries (except Japan and Korea).

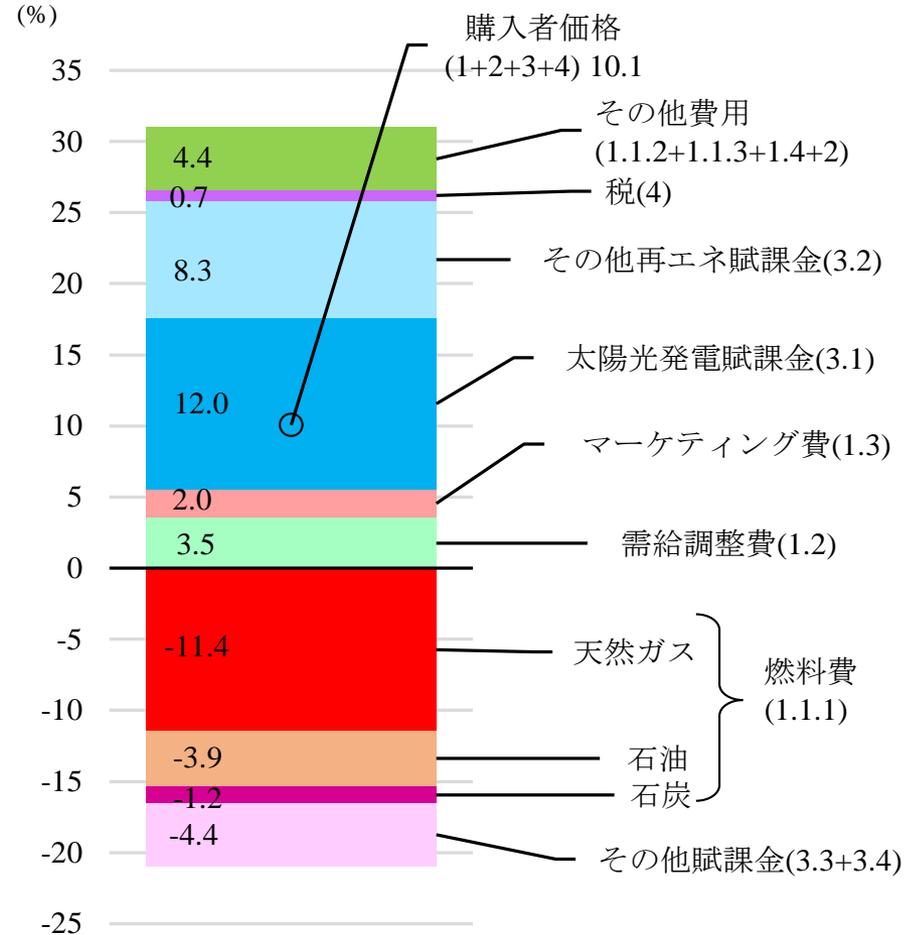
出典)慶応大野村浩二准教授作成

# イタリアの電力価格変化要因

価格高騰の前半期(1999-2008年)



価格高騰後半期(2008-2014年)



出典)慶応大野村浩二准教授作成

-前半期(1999-2008年):ほとんどが天然ガスの価格高騰(見通しと大きく乖離)による影響(寄与度91%)  
 -後半期(2008-2014年):天然ガス価格が低下しても、FIP/FIT賦課金、再エネによる需給調整費の拡大により上昇

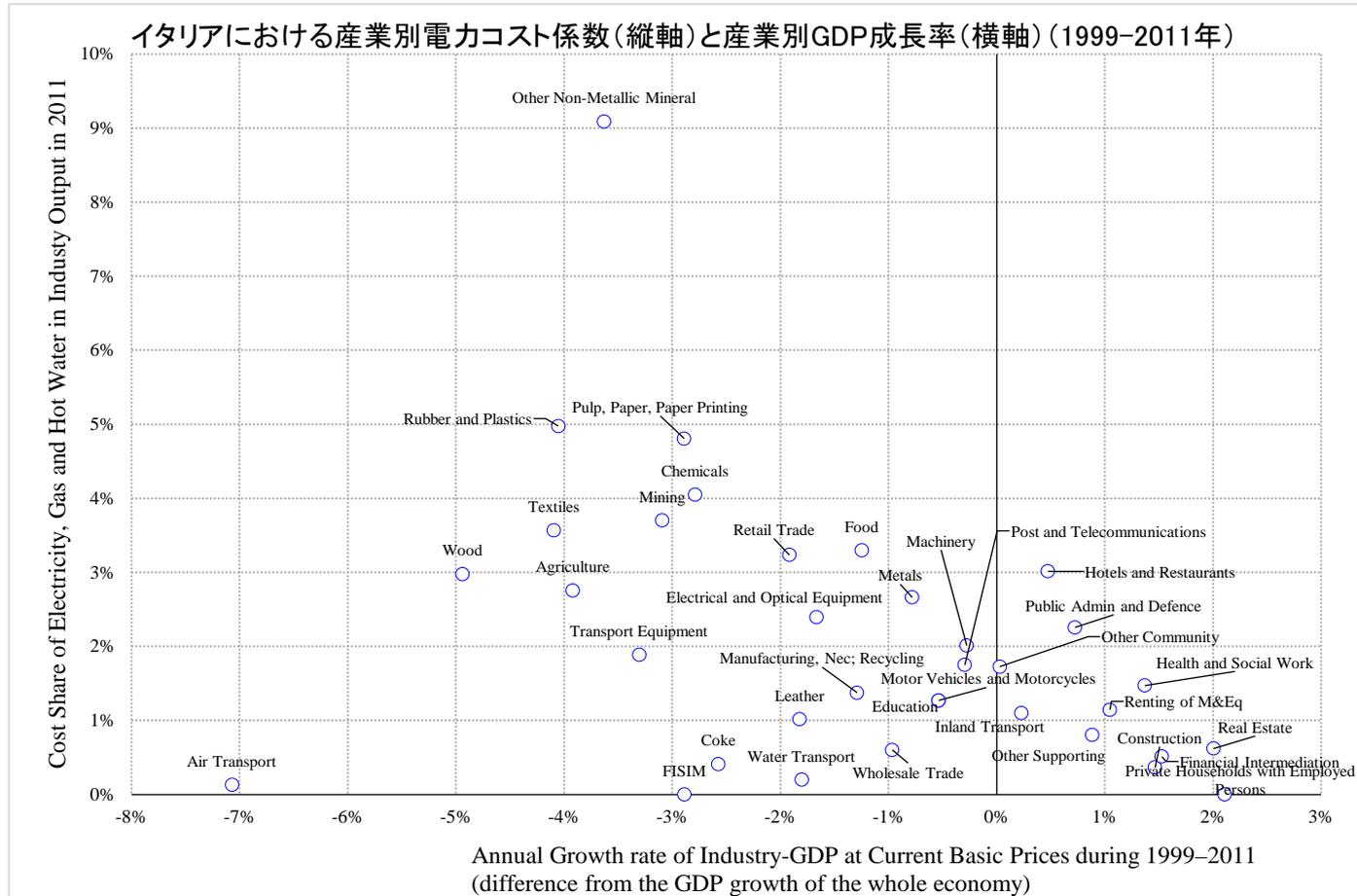


# イタリアの産業別の電力コストと成長格差

## — 電力価格高騰後 —

- 電力価格高騰後では、産業の(相対的)成長格差と電力コストシェアには有意な**負の相関**が検出。
- 電力は数%のコストシェアでも、電力価格倍増は確実に純生産を低下させる。

産業別電力コストシェア



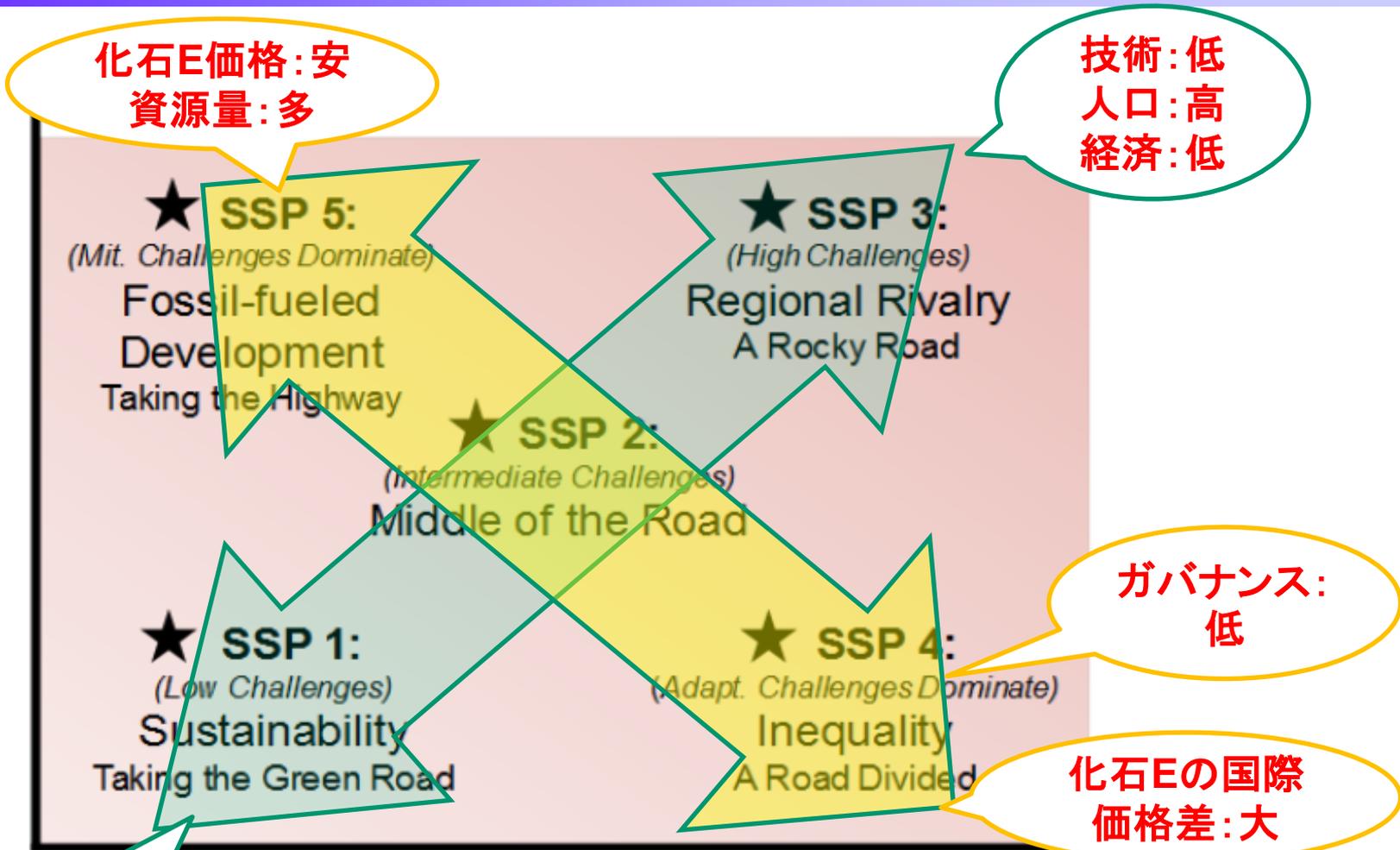
(出典) WIOD Data (<http://www.wiod.org/>). イタリアのNational Use Tablesに基づいて作成。野村(2015)「イタリアの電力価格高騰と産業構造変化」RCGW Discussion Paper, No.54, 日本政策投資銀行設備投資研究所地球温暖化研究センター, 2015年12月。

# 社会経済の不確実性を 踏まえた分析・評価

- ◆ 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 Socioeconomic Pathways)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。
- ◆ SSPストーリーラインに基づく統合評価モデルによる定量的な分析については、コアチーム（AIM、GCAM、IMAGE、MESSAGE-GLOBIOM、REMIND-MAgPIE、WITCH-GLOBIOM）によるシナリオ等がGlobal Environmental Changeの2017年1月号に特集として掲載
- ◆ 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。

# 5種類のSSPシナリオの概要

温暖化緩和の困難さ  
Socio-economic  
challenges for mitigation



技術:高、大規模  
技術の受容性:小、  
人口:低、経済:高

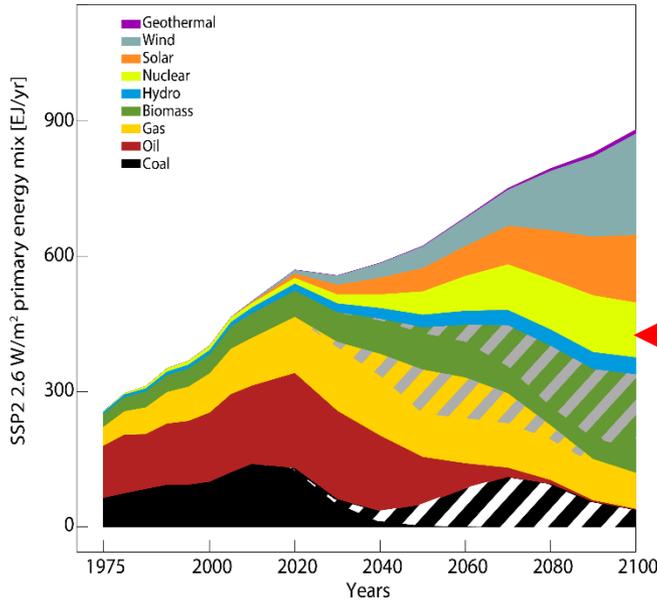
Socio-economic challenges  
for adaptation  
温暖化適応の困難さ

# SSP2における世界の一次エネルギー供給量見通し

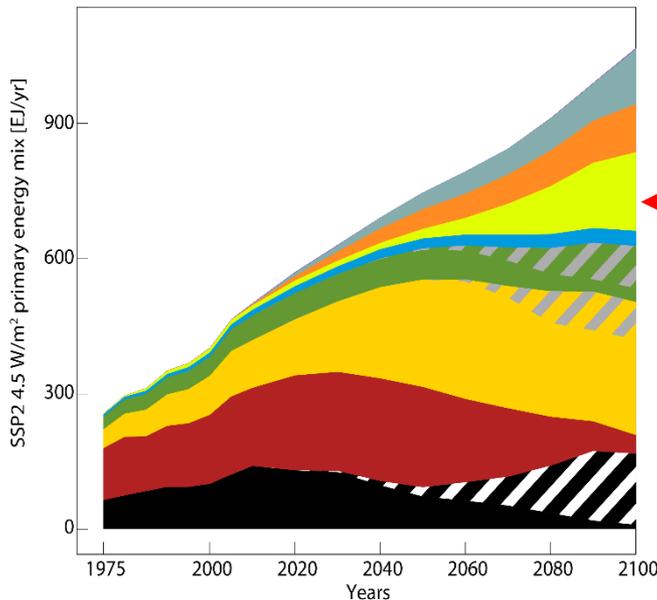
(オーストリアIIASA MESSAGEの分析)

## RCP2.6 (2°C目標、>66%確率相当)

注) RCP: Representative Concentration Pathway。数字は放射強制力の大きさW/m<sup>2</sup>を示す。



## RCP4.5 (2100年、2.5°C程度、>50%確率相当)



- 排出削減ケースでは、世界での原子力の相  
当の拡大が推計されている。  
- 排出削減の緩やかなRCP4.5の方が再エネ  
に対する原子力の割合が相対的に大きい。  
(再エネよりもコスト優位性があるため)

注) 斜線はCCS

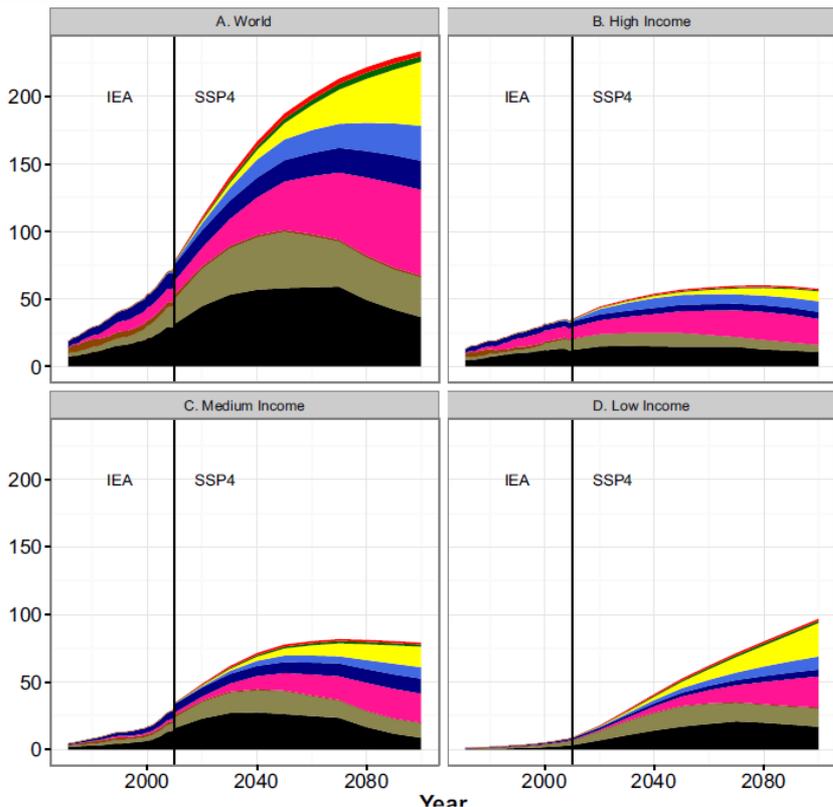
出典) O. Fricko et al., Global Environmental Change 42 (2017)

# SSP4における世界の発電電力量見通し

(米PNNL GCAMの分析)

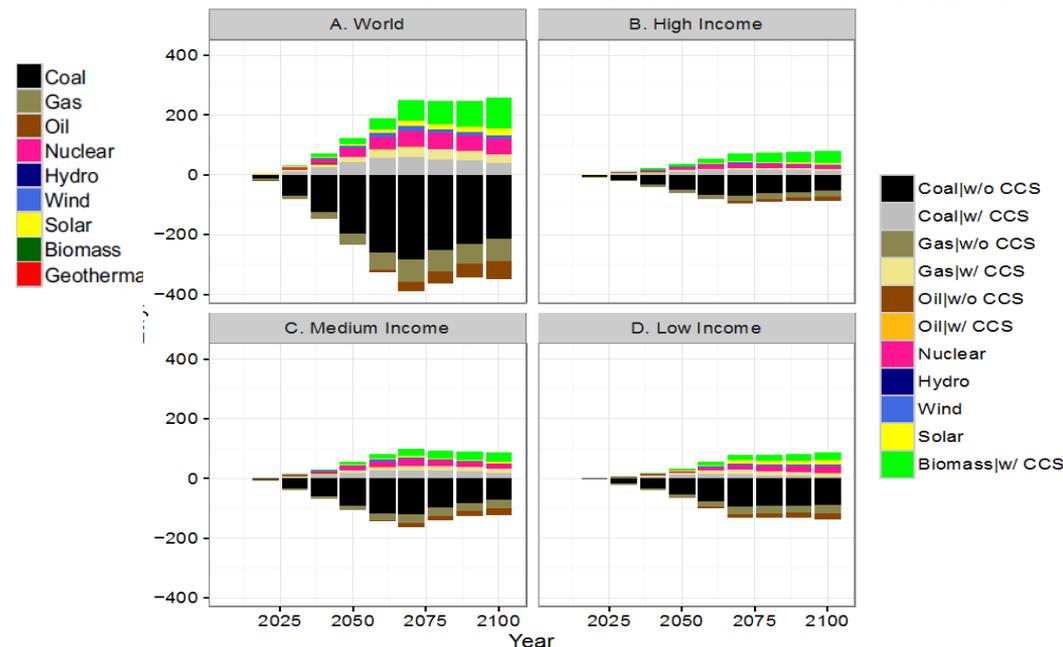
## ベースラインの発電電力量

## 一次エネルギー供給量のベースライン比の変化 RCP4.5 (2100年、2.5°C程度、>50%確率相当)



単位 : EJ/yr

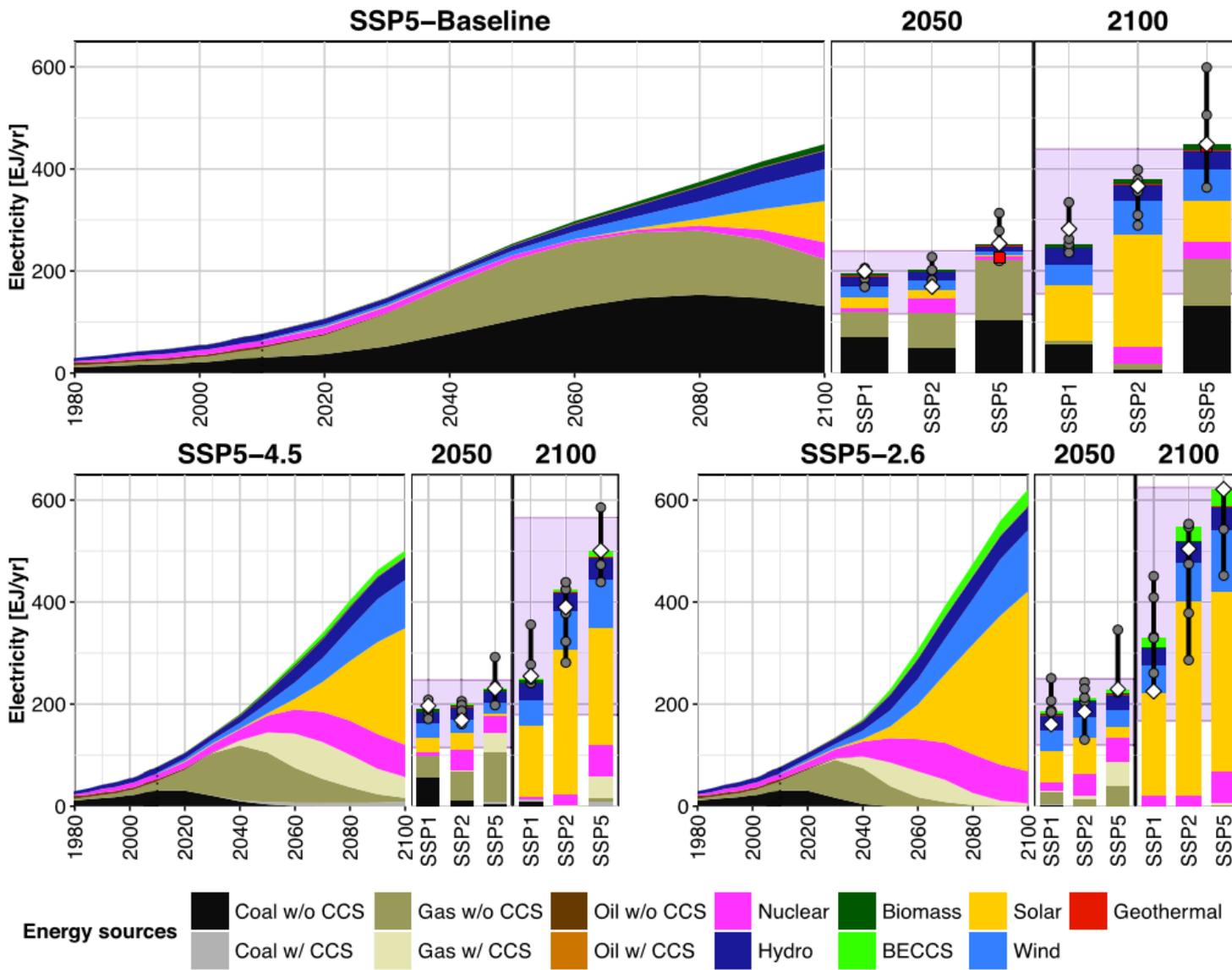
出典) K. Calvin et al., Global Environmental Change 42 (2017)



- 米PNNLの分析では、ベースラインにおいても電力需要の増大に対応する形で原子力は相当大きく増大が見込まれている。
- 排出削減ケースでは原子力が更に増大。CCSも相当量利用

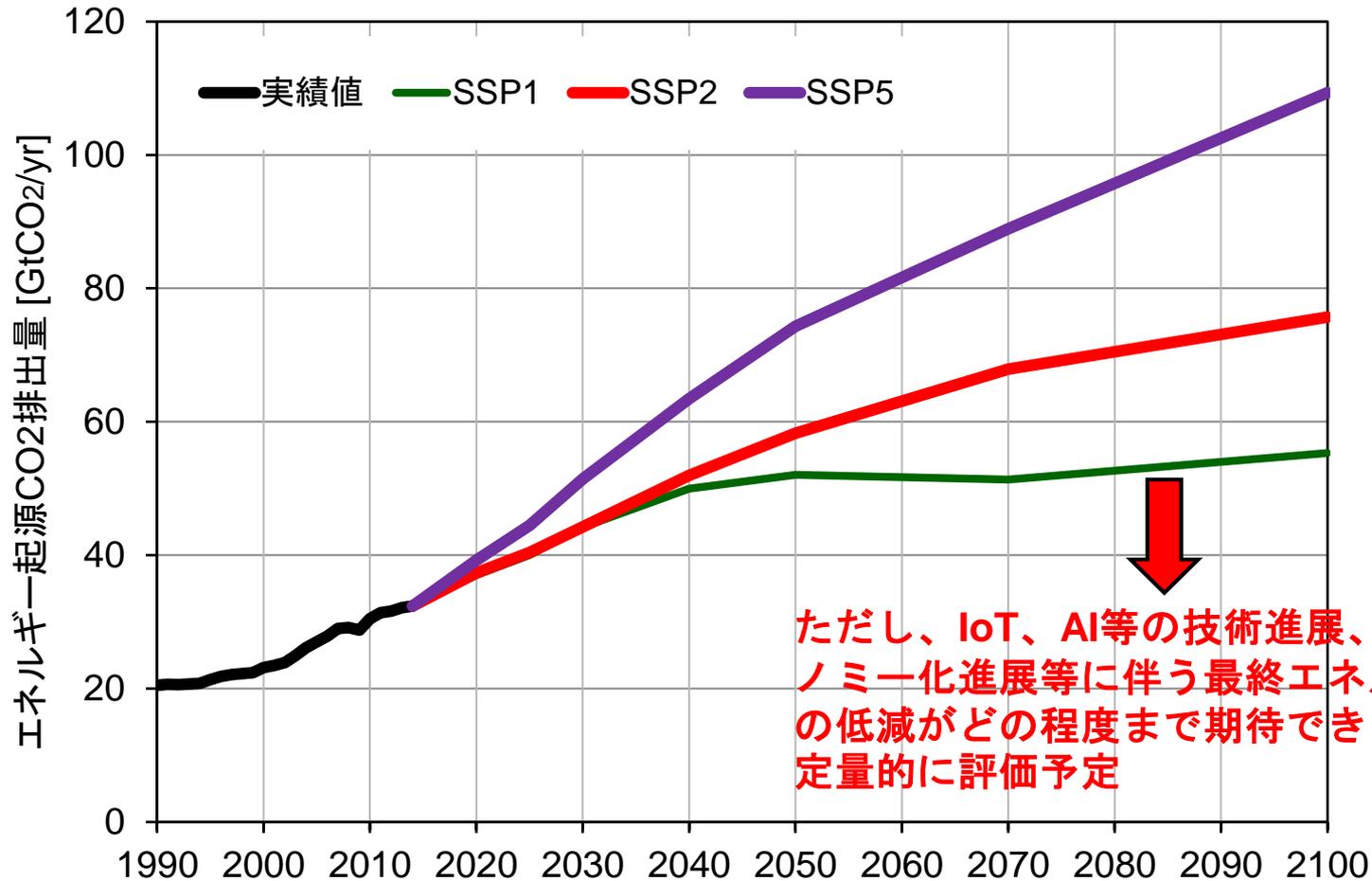
# SSP5における世界の発電電力量見通し

## (独PIK REMINDの分析)

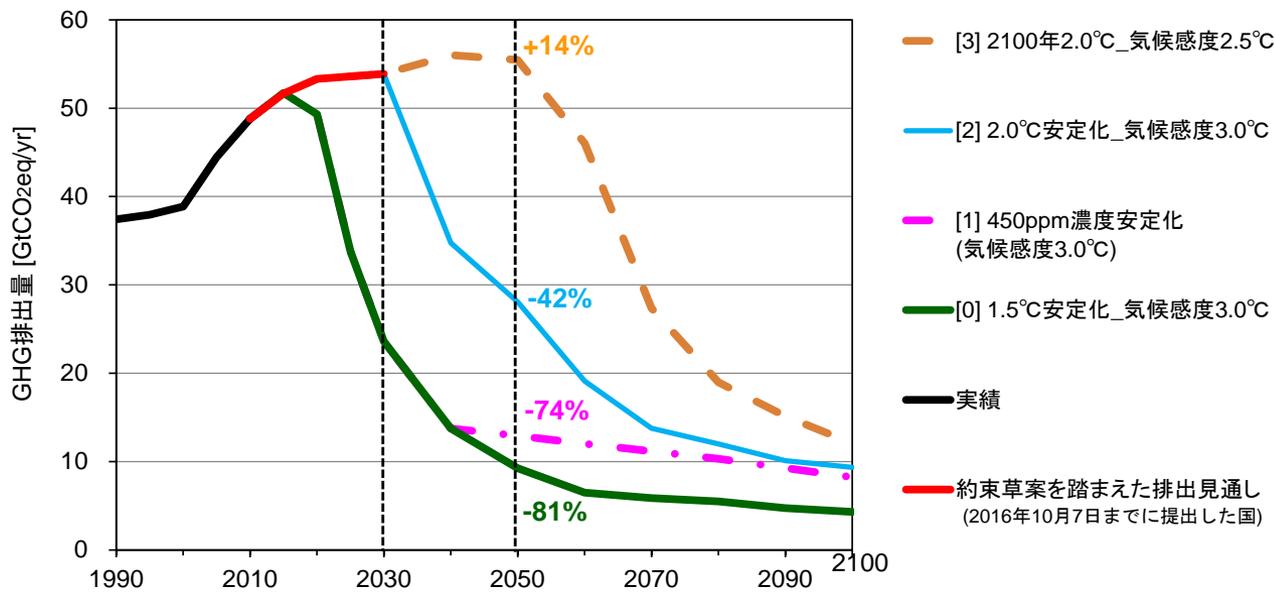
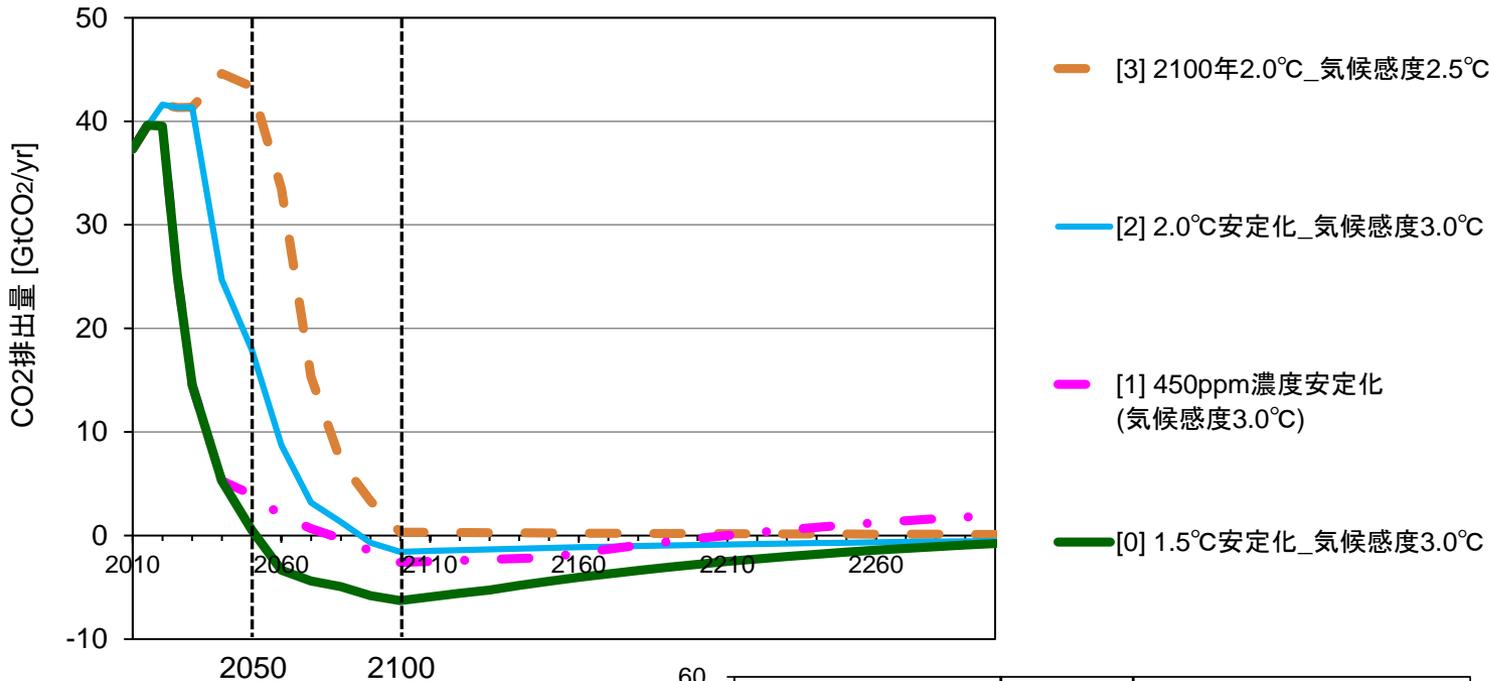


SSP5は経済成長が大きく、エネルギー需要が大きいシナリオ

- 排出削減が厳しいケースの方が電力消費量大きい。(電化進展+電力の脱炭素化)  
- 排出削減ケースでは原子力が大きく拡大  
- しかし、PIKの分析では、原子力以上に太陽光や風力の増大を推計

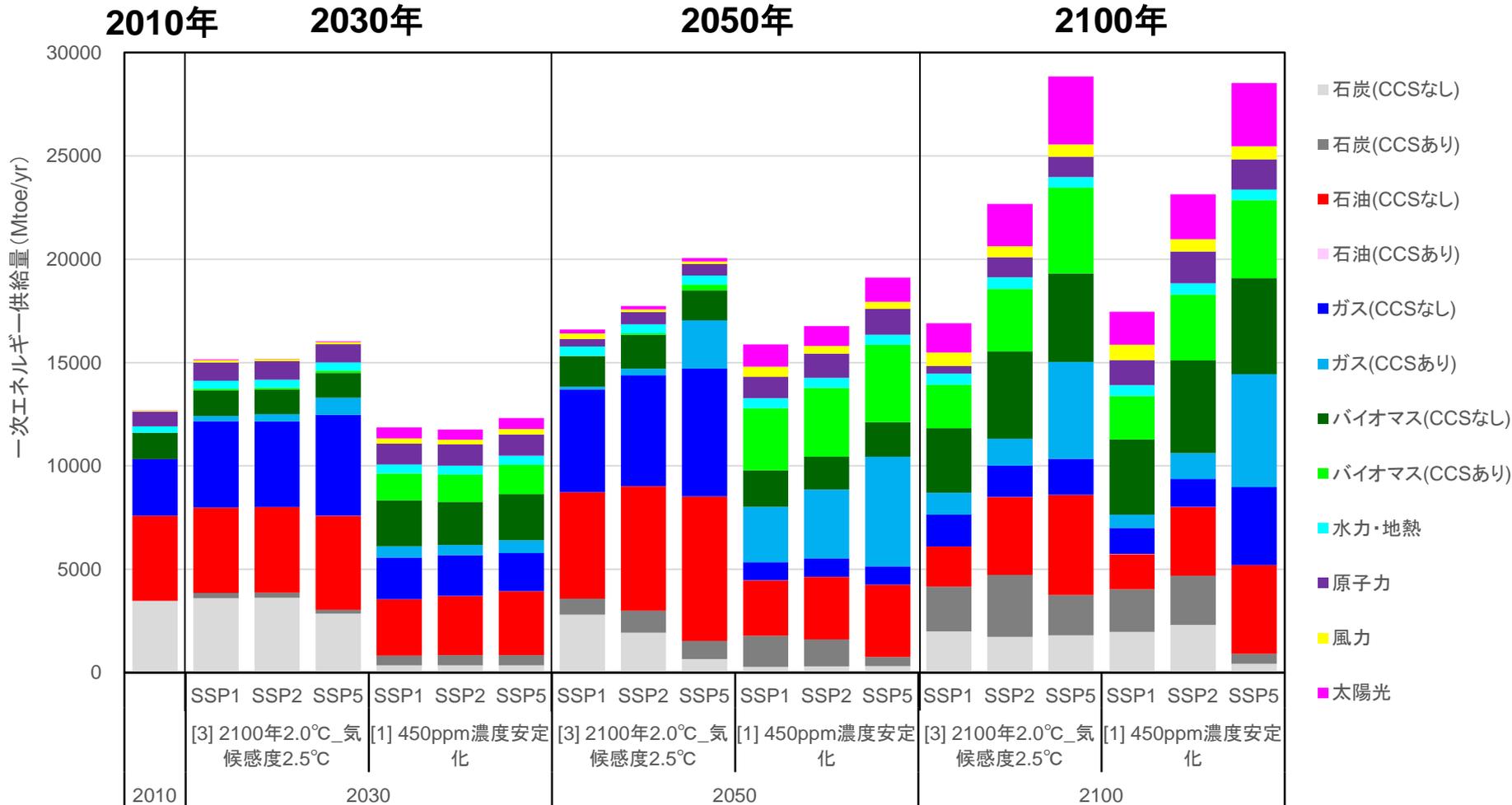


# H28年度RITE分析: パリ協定2°C/1.5°Cの世界排出量推移



出典)MAGICC、DNE21+を用いて RITEにて試算

# 2°C、1.5°C目標における世界一次エネルギー供給量

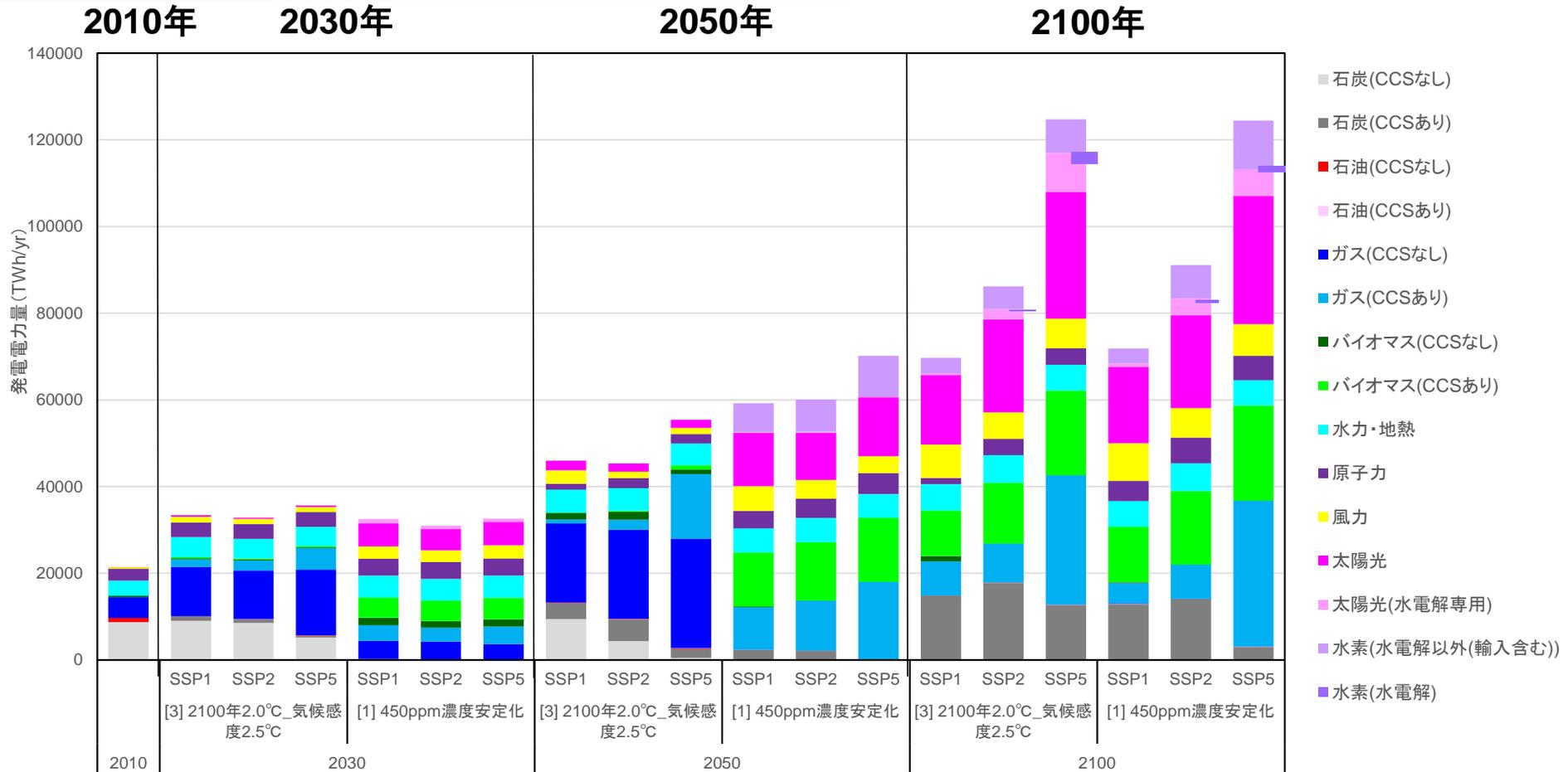


[0] 1.5°C安定化\_気候感度3.0°Cは、SSP1, 2, 5のいずれの社会経済シナリオの下でも、モデルの解が得られなかった (2050年以降の排出削減制約が厳しいため)。[2] 2.0°C安定化\_気候感度3.0°Cは掲載していない。

なお、本分析では原子力の拡大に上限制約を設けており、一部のシナリオでは上限に張り付いていることに注意。

CO2制約が緩やかであり、また特に需要の伸びが小さい社会経済見通し(SSP)の下では、原子力は経済競争力が乏しい可能性あり。一方、CO2制約が厳しい場合は、原子力の優位性が見られる。

# 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(BECCSの現実性については議論の余地大)。

# エネルギー需要サイドの 大幅な変革の可能性

超スマート社会とは、  
 「必要なもの・サービスを、必要な人に、  
 必要な時に、必要なだけ提供し、社会  
 の様々なニーズにきめ細かに対応でき、  
 あらゆる人が質の高いサービスを受け  
 られ、年齢、性別、地域、言語といった  
 様々な違いを乗り越え、生き活きと快  
 適に暮らすことのできる社会」であり、  
 人々に豊かさをもたらすことが期待される



出典) 政府資料



AI + IoT + big data + ....

例えば自家用車の稼働率は4%といった水準であり、自動運転によりカーシェアリング、ライドシェアリングが進めば、エネルギー消費の大幅な低下、CO2排出量の大幅な低下も期待できる。ただし、リバウンド効果もあるため、期待し過ぎることも避けるべき

- エネルギーは近代社会の基盤であり必要不可欠なもの。しかし、コモディティ商品であり(コストが重要)、それそのもので価値を高めていくことは難しい(発電のエネルギー効率向上、コスト低減の技術開発は重要ではあるが)。よって、他のサービスとの融合を志向し、新たな高付加価値なサービスの提供を目指すことは重要
- この進展が仮に成功すれば、大きなエネルギー需要の低下も期待できるかもしれない。そのときは原子力の必要性も低下するかもしれない。しかし、それは現時点では約束された将来ではなく、現時点では多くのオプションを有しておくべき

## 4. まとめ

# まとめ

- ◆ パリ協定では、2°C目標や21世紀後半に実質ゼロ排出目標等而言及。また、パリ協定とは別に科学的な知見として、気温を安定化させようとするれば、いずれのレベルの気温目標であろうとも、正味CO<sub>2</sub>排出量をほぼゼロにする必要あり。
- ◆ ただし、2°C目標としても、その排出許容量には大きな不確実性がある。ゼロエミッションに向けた長期の方向性は明白に必要であるが、そこに至る経路については、不確実性を前提としつつ、各種オプションを保持した柔軟で賢いリスクマネジメントが必要。
- ◆ 国別に見ると、経済とエネルギー（およびCO<sub>2</sub>排出）のデカップリングを実現してきている国も見られるが、それは様々な環境において産業構造の変化によるものであり、高いエネルギー価格はとりわけ製造業の成長の悪化をもたらす。
- ◆ 将来に向けた社会経済の見通しによっても、地球温暖化対策・エネルギー対策のあり方は大きく異なる。しかし、国際的な分析の多くやRITEの分析でも、様々な将来の社会経済像を想定したとしても、大部分の社会経済シナリオの下での温暖化対応シナリオにおいて、原子力の役割の増大が示されている。ただしその程度には幅がある。
- ◆ IoT、AI等の技術イノベーションが、エネルギーの大きな変革をもたらす可能性がある。エネルギーは手段でしかないので、新たなモノ、サービスを生み出す中で、付随した形で、省エネルギー化、低炭素化を図っていくことが重要。それが成功した際には、エネルギー需要の大幅な低下があり得るかもしれない。その際には仮に大幅なCO<sub>2</sub>排出削減を前提としても、原子力の役割を相対的に低下させることができるかもしれない。しかし、それは現時点では約束された将来像ではないため、原子力も重要なオプションの一つとして保持しておくというのが必要な戦略ではないか。

**参考資料: SSP**

O'Neill et al.(2017)

## ◆ SSP1: Sustainability

- ① 世界及び国家の発展と持続可能性目標の達成を重要視。
- ② 環境悪化や格差による社会的・文化的・経済的コストが明確に認識される。
- ③ 地域・国家・国際機関・民間・市民の間の協力によりグローバル・コモンズの管理が、ゆっくりと改善する。
- ④ 教育や健康への投資が加速し、人口水準は比較的低位。
- ⑤ 長期的にみると経済成長は多少緩やかとなるものの、現在の高所得国を発端に、経済成長から人間の福祉を重視する方向へ移行していく。
- ⑥ 開発目標達成へのコミットメントに後押しされ、国家間及び国内における格差はどちらも減少する。
- ⑦ 環境技術への投資や税構造の変化により資源効率性が向上し、エネルギーや資源の利用を減少させ、長期的には環境条件を改善させていく。投資や金融インセンティブ、認識の変化が増加し再生可能エネルギーがより注目される。
- ⑧ 消費は、脱物質・省資源・省エネを指向する。
- ⑨ 環境フレンドリーな技術開発、再エネに有利な見通し、国際協力を強化する組織、低位のエネルギー消費により、緩和策チャレンジは低い。
- ⑩ 世界・地域・国レベルでの柔軟性の高い組織・制度とともに、人間の福祉の向上によって、適応チャレンジは低い。

O'Neill et al.(2017)

## ◆ SSP2:Middle of the Road

- ① 世界は社会・経済・技術トレンドがこれまでの様式から大きく変化しない方向に向かう。
- ② 経済成長は不均一に進む。多くの経済圏では政治的に安定している。
- ③ 市場は国際的に結合しているが、十分な機能を果たしていない。
- ④ 生活の改善や教育・安全な水・医療へのアクセスなど、持続可能な開発目標の達成に向かって進展するものの、速度は遅い。
- ⑤ 技術開発は急速に進むが、根本的なブレークスルーは見られない。
- ⑥ 環境システムは悪化するが改善もみられ、資源やエネルギーの消費原単位は低下する。化石燃料依存はゆっくりと低下するが非在来型化石資源使用が進む。
- ⑦ 人口成長は穏やかで、今世紀後半に世界人口は横ばいになる。
- ⑧ 教育への投資は、低所得国の低出生率への移行を促進し人口成長を減速させるほど十分に高くはない。
- ⑨ 急速には改善しない格差、社会階層の継続、限られた社会的一体性と相まって、社会的・環境的変化への脆弱性低減への課題を保持し、持続可能な開発における進展が限定的である。
- ⑩ これらの穏やかな開発トレンドにより、世界は緩和や適応に対する中程度のチャレンジに立ち向かうが、国内外にわたり大きな不均一性を抱える。

## ◆ SSP3: Regional rivalry

O'Neill et al.(2017)

- ① ナショナリズムの復活、競争力と安全保障の懸念、地域紛争により、各国はますます自国内・地域内の問題を重要視する。この傾向は、ごく少数の脆弱な国際機関により強化され、環境やその他国際問題への対応協調は一様ではない。
- ② 政策は時間と共に国家・地域安全保障問題、特にエネルギー資源や農業市場などの貿易障壁へと移行する。各国は、自身の地域でのエネルギー・食料安全保障目標達成を重要視し、いくつかの地域では権威主義体制に移行する。
- ③ 教育や技術開発への投資は減少する。
- ④ 経済発展は遅く、消費は物質集約的で、格差は長期的に特に途上国で持続もしくは悪化する。
- ⑤ 極度の貧困と中程度の富が並立し、多くの国は貧しい人々の生活水準の維持や安全な水・公衆衛生・医療へのアクセス提供に苦慮する。
- ⑥ 環境問題対応に対する国際的な優先順位は低く、地域によっては大きな環境悪化がもたらされる。低位の発展や環境への低意識のため、持続可能性に向けた進展が遅れる。
- ⑦ 人口増加は先進国では低く、途上国では高い。
- ⑧ 国際協力が困難であり、技術進展も低位である状況で、資源多消費型や化石燃料依存が進み、緩和チャレンジは高い。
- ⑨ 人間開発の進展が限定的であり、所得の伸びが低位であり、地域間にまたがる実効的機関が欠如し、全ての地域で適応チャレンジは高い。

## ◆ SSP4: Inequality

O'Neill et al.(2017)

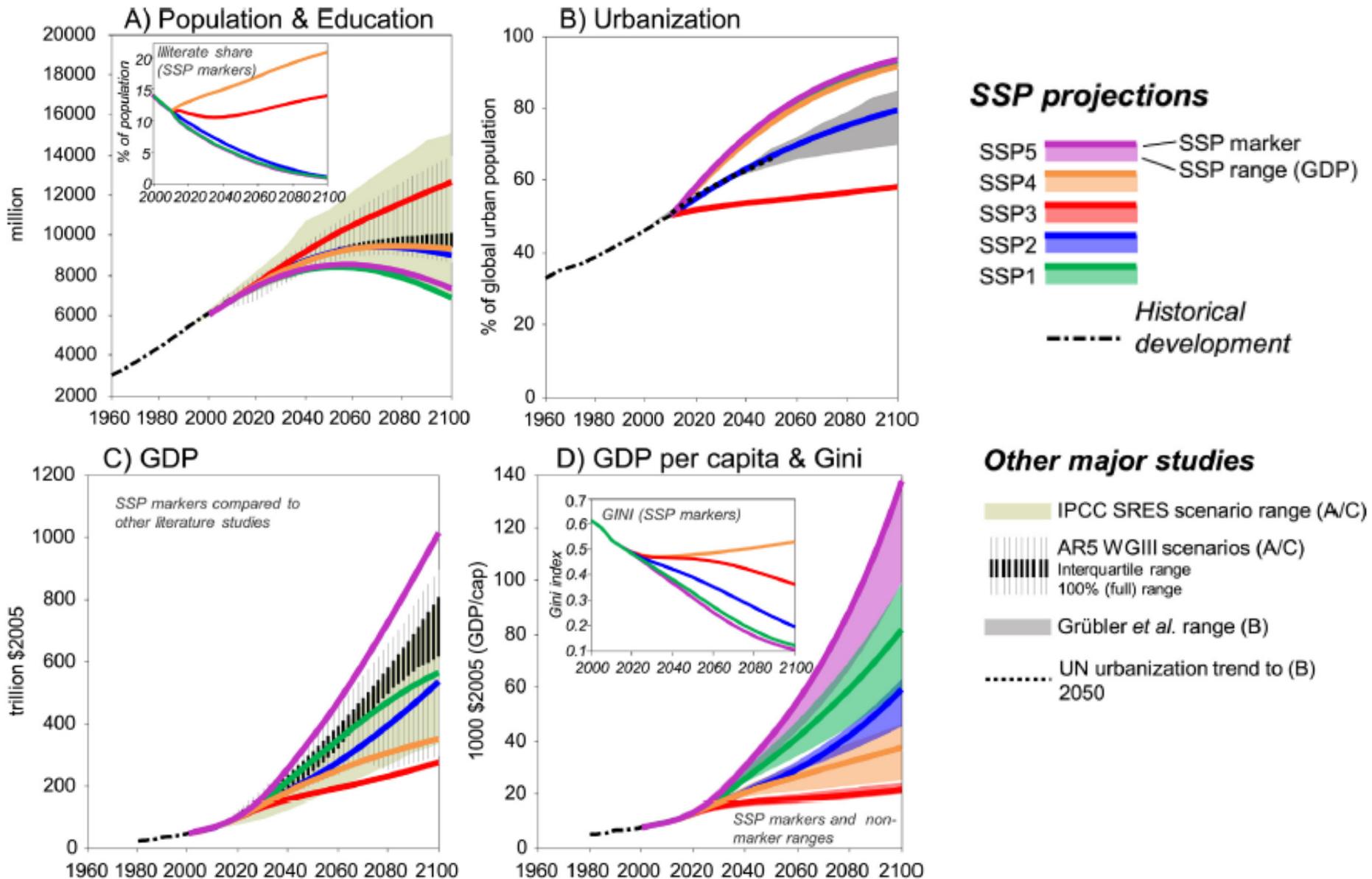
- ① 人的資本に対する非常に不均一な投資、経済的機会と政治力の格差拡大により、国家内外において格差と階層化が進む。
- ② 十分な教育を受け世界経済の知識・資本集約的部門に貢献する国際的に結合した社会と、労働集約的で低技術経済の低収入・低教育社会の間の差は時間と共に広がる。権力は、民主主義社会においても比較的少数の政治的・ビジネスエリートに集中する一方、脆弱なグループは国家・国際機関にほとんど影響を与えない。
- ③ 経済成長は、先進国や中所得国では中程度である一方、低所得国では遅く、貧困層の水・公衆衛生・医療へのアクセス提供に苦慮する。社会的一体性は低下し、紛争や騒動はますます常態化する。
- ④ 技術開発は、先進国や一部の高所得地域では高い。
- ⑤ 化石燃料市場の不確実性により、多くの地域で新規資源に対して投資不足となる。エネルギー企業はエネルギー源の多様化によって価格変動を回避し、炭素集約的燃料（石炭・非在来型石油）と低炭素エネルギーの両方に投資する。
- ⑥ 環境政策は中・高所得層に関連する地域問題が中心となる。
- ⑦ 低炭素供給オプションの開発と、高度に統合化された国際的政治・ビジネス層により、緩和チャレンジは低い。
- ⑧ 多くの人口層においては開発レベルが低く、経済・環境的課題に対応する機関へのアクセスが限定的であるため、適応チャレンジは高い。

## ◆ SSP5: Fossil-fueled development

O'Neill et al.(2017)

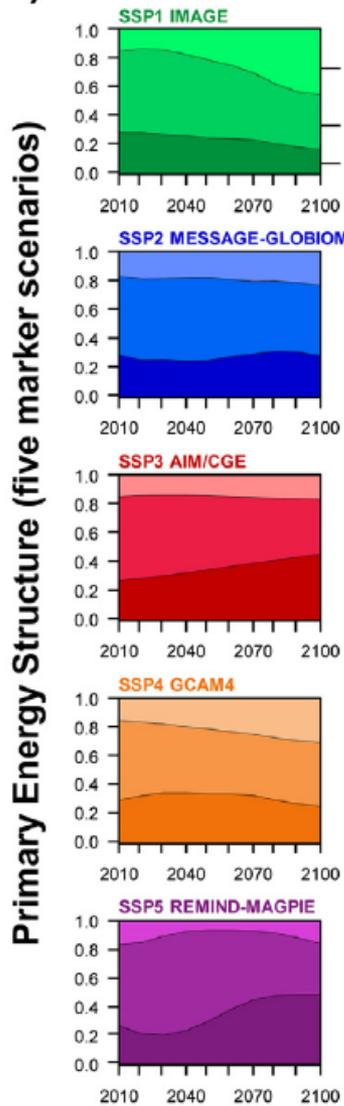
- ① 先進国や途上国の経済的成功により、持続可能な発展への経路として、急速な技術進歩や人的資本開発を進めるために、競争市場、イノベーション、参加型社会を重要視する。
- ② グローバル市場はより統合されるが、競争力の維持や貧困層参加に対する制度的障害の除去の目的での介入を伴う。
- ③ 健康や教育、人的・社会的資本強化のための制度・組織に対する強力な投資がなされる。
- ④ 経済・社会的発展に加え、豊富な化石燃料源の開発、資源・エネルギー集約的なライフスタイルを求める。
- ⑤ これら要因すべてが世界経済の急速成長をもたらす。必要であればジオエンジニアリングも含め、社会システム・生態系を効率的に管理することを重要視する。
- ⑥ 地域的な環境影響が技術によって効率的に対応される一方、経済発展の進歩とのトレードオフのため地球規模の環境影響に対する回避努力は小さい。
- ⑦ 世界人口はピークに達し、その後減少する。出生率は途上国で急速に減少するが、高所得国の出生レベルは楽観的な経済見通しにより比較的高い(人口置換水準かそれ以上)。労働市場が次第に開放され、人口の国際的流動性は高まり、所得格差が減少する。
- ⑧ 化石燃料への強い依存とグローバルな環境への懸念が欠如しているため、緩和チャレンジは高い。一部地域を除き、人間開発目標の実現、ロバストな経済成長、高度に設計されたインフラにより気候変動への適応チャレンジは比較的低い。

# 国際コアチームによるSSPの試算例(1/3)

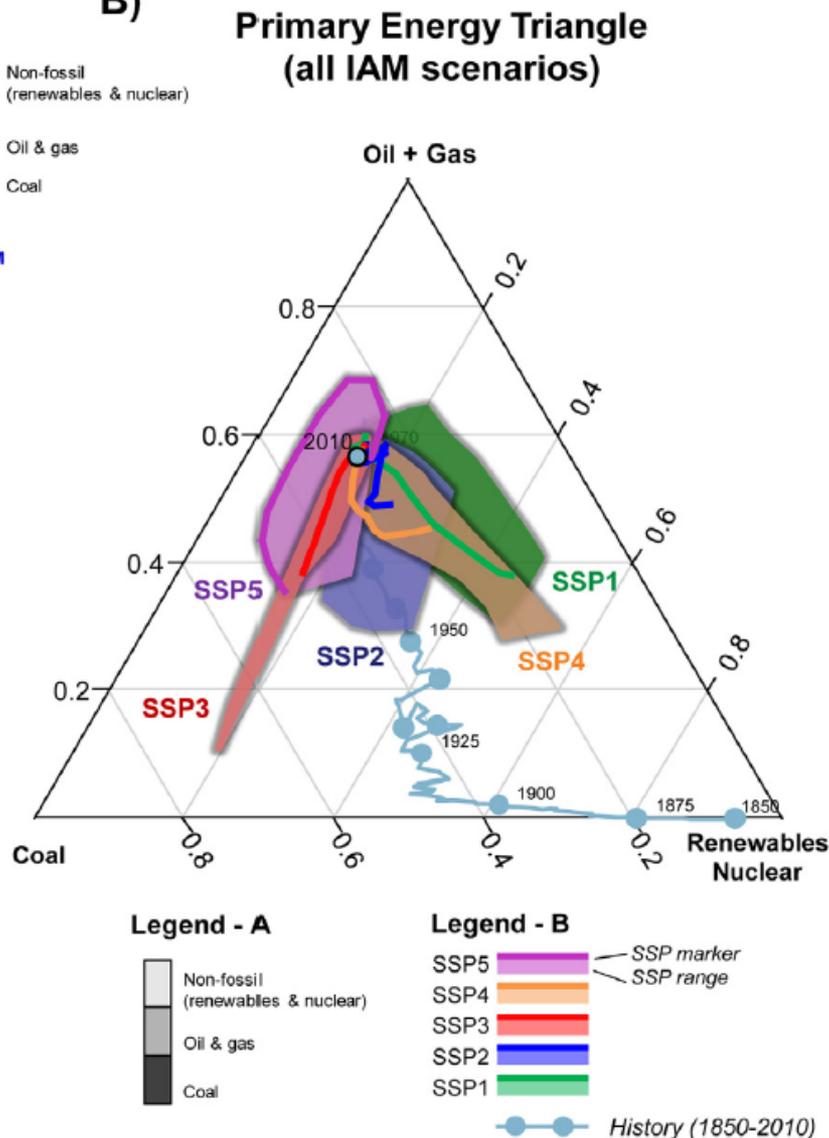


# 国際コアチームによるSSPの試算例(2/3)

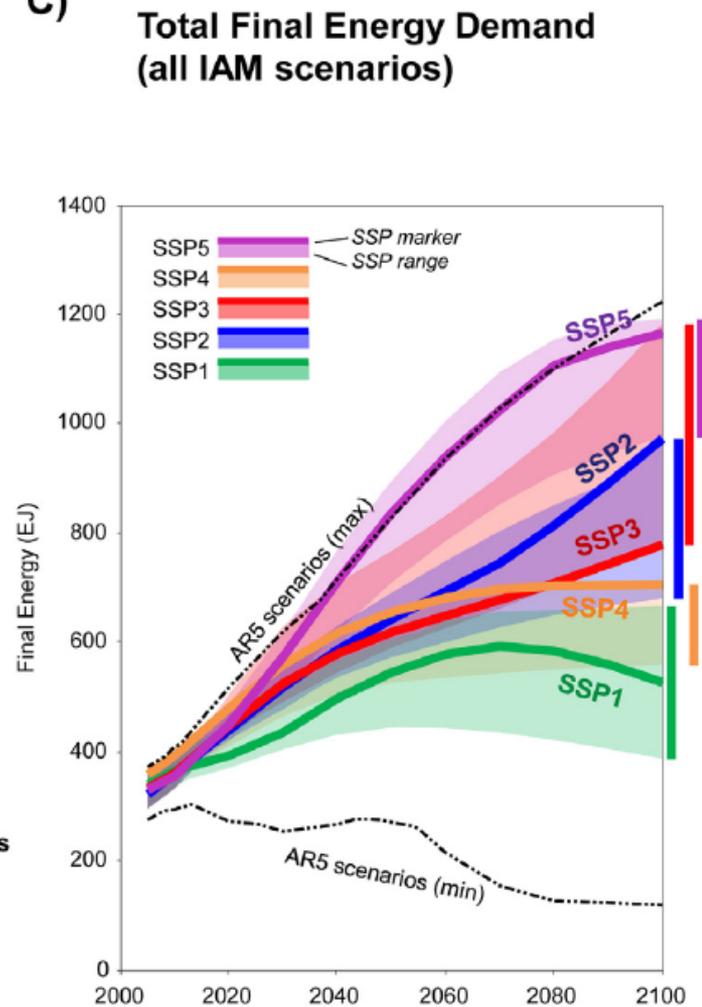
A)



B)

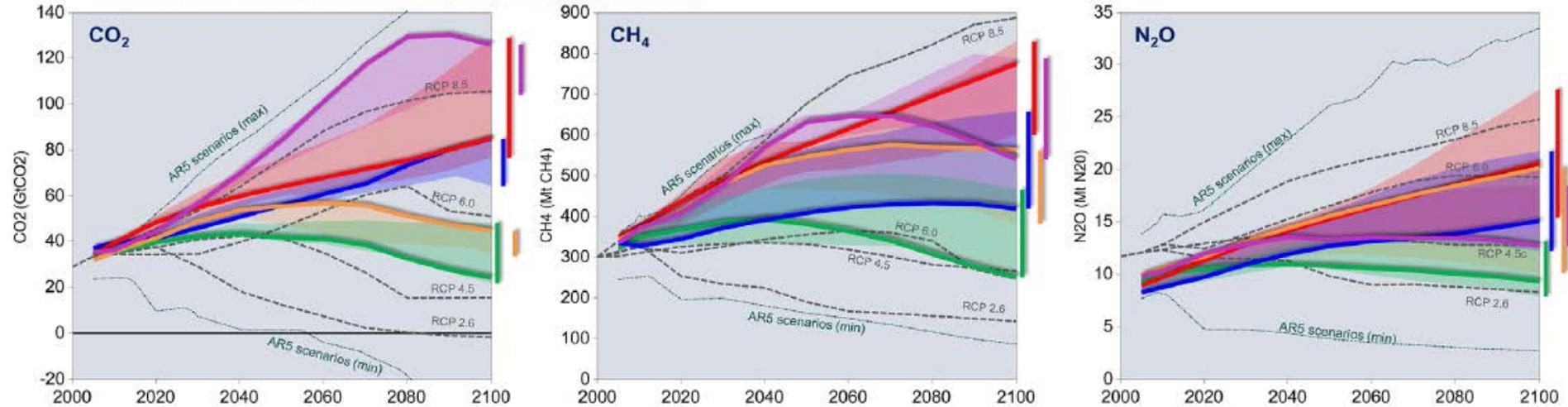


C)

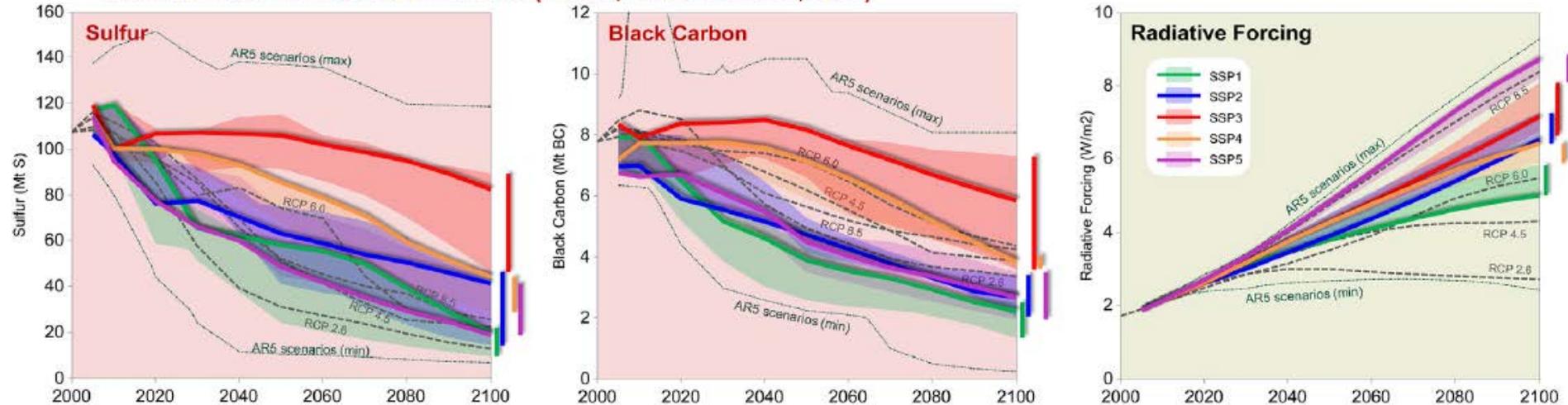


# 国際コアチームによるSSPの試算例(3/3)

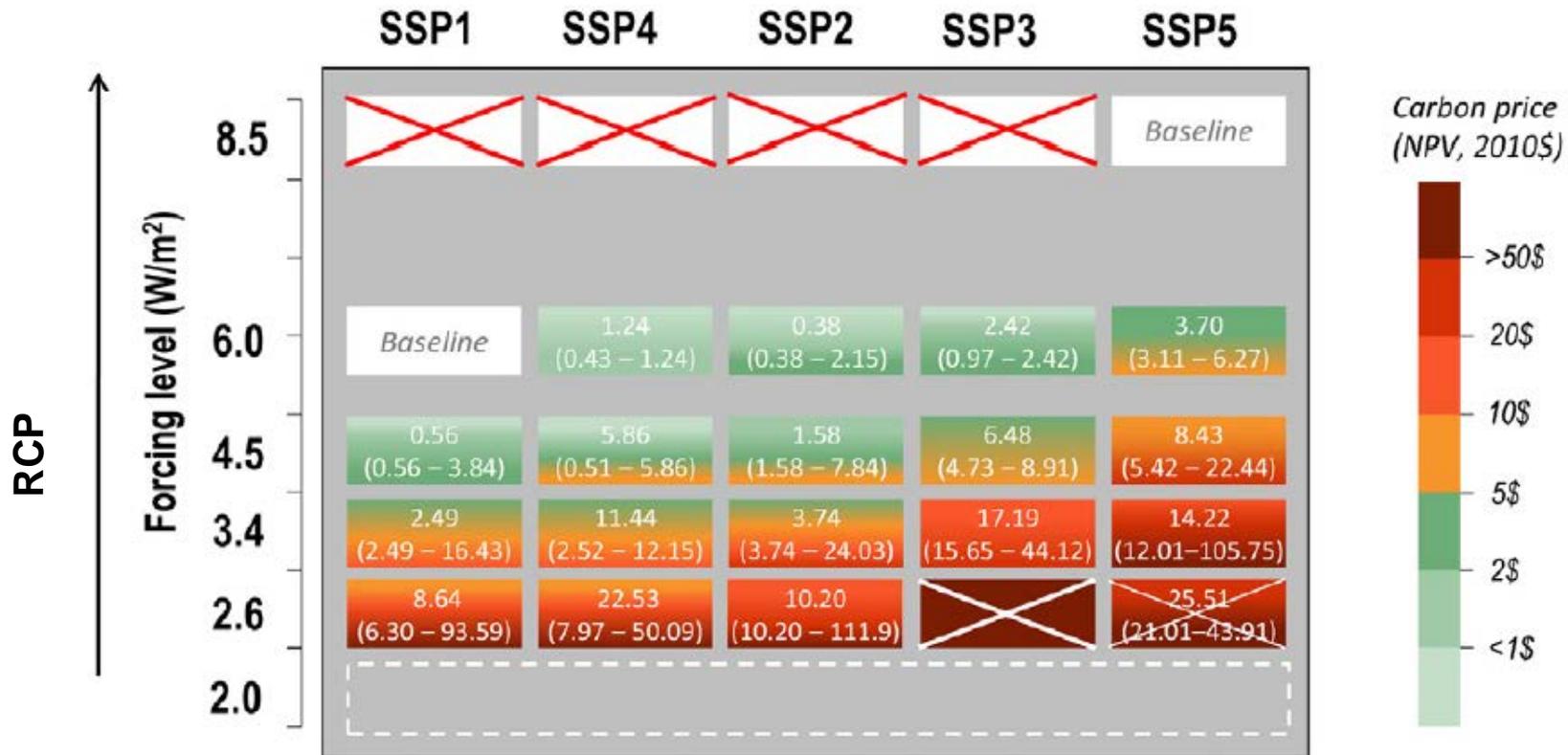
## Greenhouse Gas Emissions (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, etc..)



## Aerosol & Air Pollutant Emissions (Sulfur, Black Carbon, etc..)



# SSPとRCPの関係性



注1) 2.6 W/m<sup>2</sup>は>66%で2100年に+2°C未満程度、3.4 W/m<sup>2</sup>は>50%で2100年に+2°C未満程度、4.5 W/m<sup>2</sup>は>50%で2100年に+2.5°C未満程度

注2) Carbon priceは割引率5%/yrで2010年価値換算されたもの。例えば、2010年換算された20\$/tCO<sub>2</sub>は、2100年価格としては1800\$/tCO<sub>2</sub>相当である。

(注は、RITEによるもの)