

# 将来の気候変動対策に向けた 統合評価モデルと将来シナリオ

増井 利彦

国立環境研究所

masui@nies.go.jp

[http://www-iam.nies.go.jp/aim/index\\_ja.htm](http://www-iam.nies.go.jp/aim/index_ja.htm)

数学協働プログラム開始記念シンポジウム

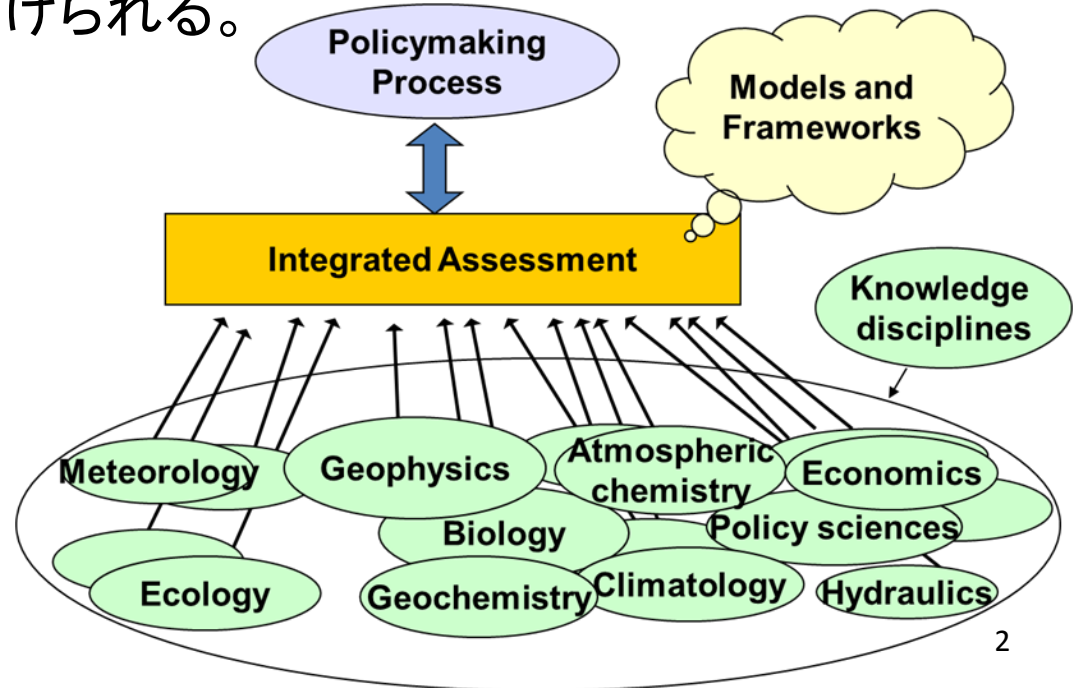
数学・数理科学と共に拓く豊かな未来

学術総合センター

2013年3月16日

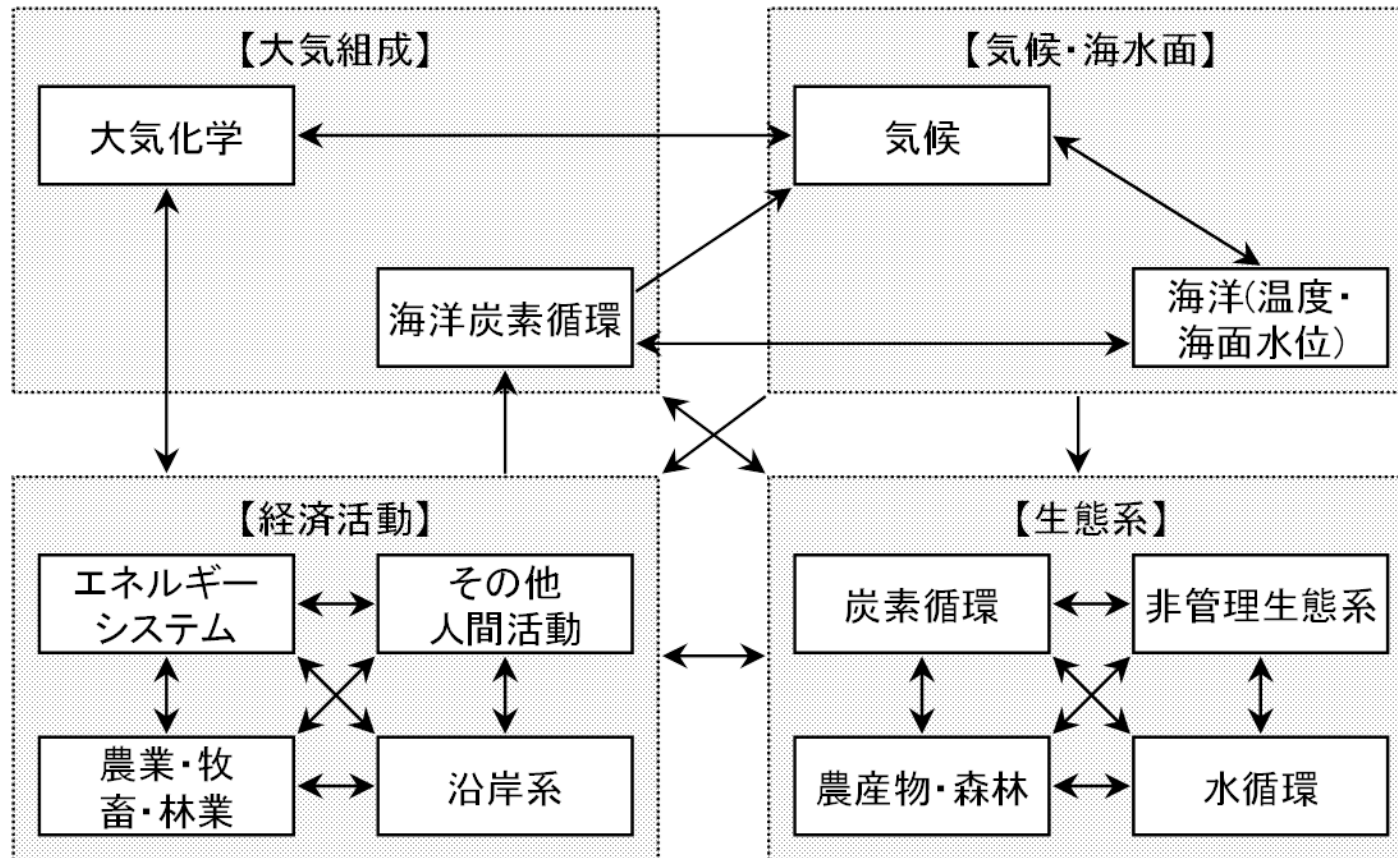
# 気候変動問題への統合評価モデルからのアプローチ

- 統合評価：現状で利用可能な科学、技術、経済、社会政治学的な知見を統合した枠組み
  - 統合評価モデル：統合評価の枠組みをもとに、定量的なシミュレーションが可能となるように構築されたモデル
- ◆ 温暖化対策は、政策と科学が両輪となって進められるものであり、統合評価モデルは政策と様々な学問領域をつなぐプラットフォームとして位置づけられる。

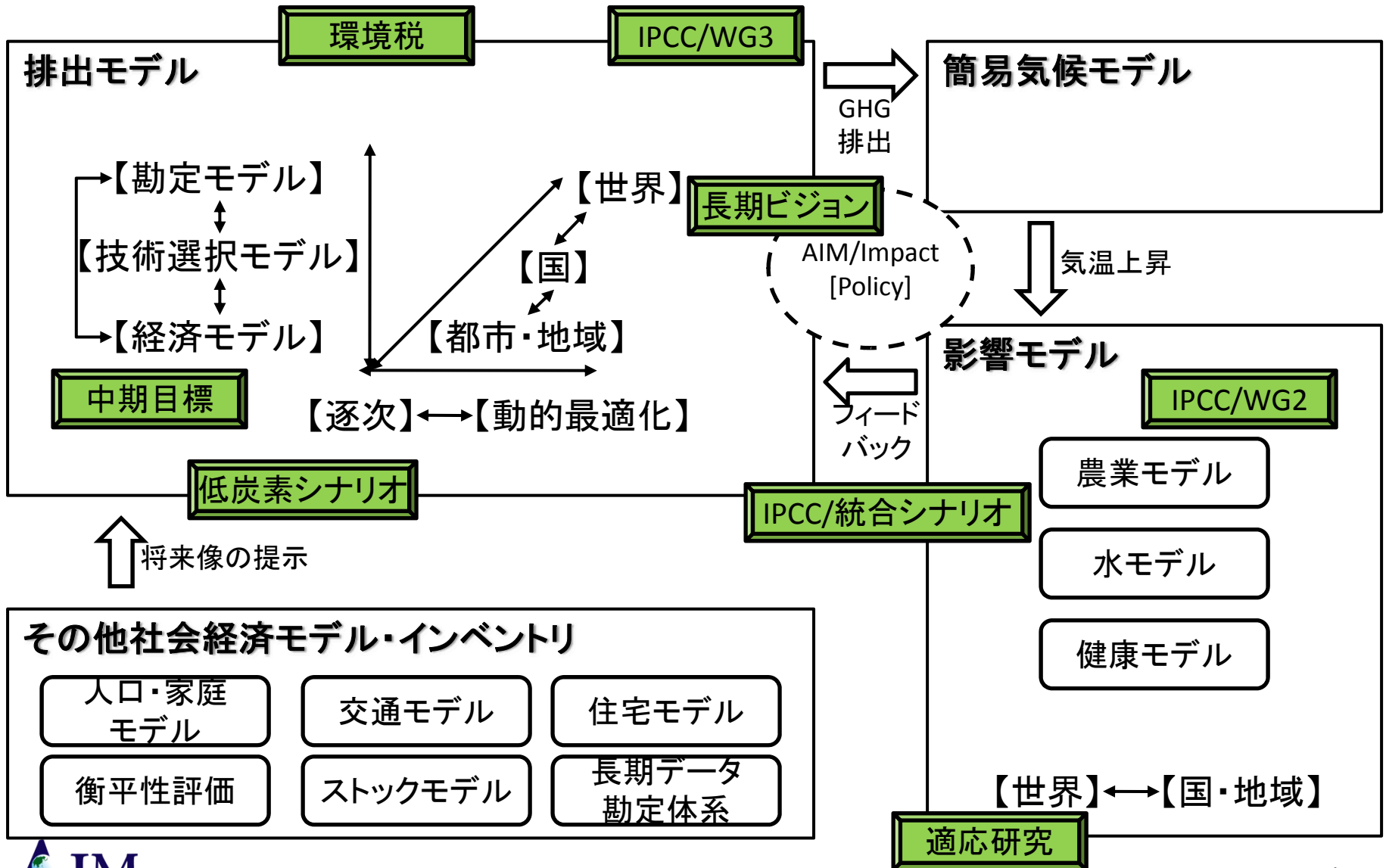


# 気候変動問題への統合評価モデルからのアプローチ

- 代表的な統合評価モデルの枠組み



# 国立環境研究所が中心となって開発している AIM (Asia-Pacific Integrated Model) の俯瞰図



# モデルはなぜ必要か？

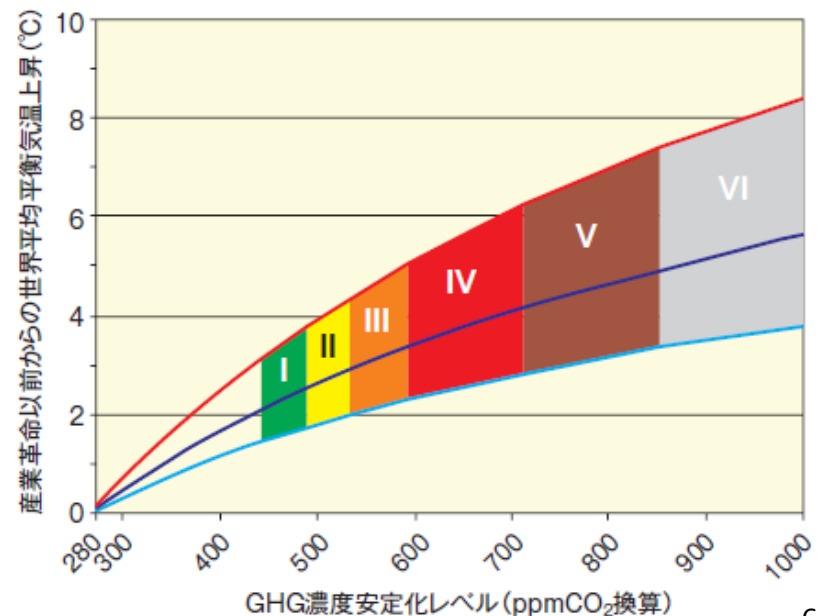
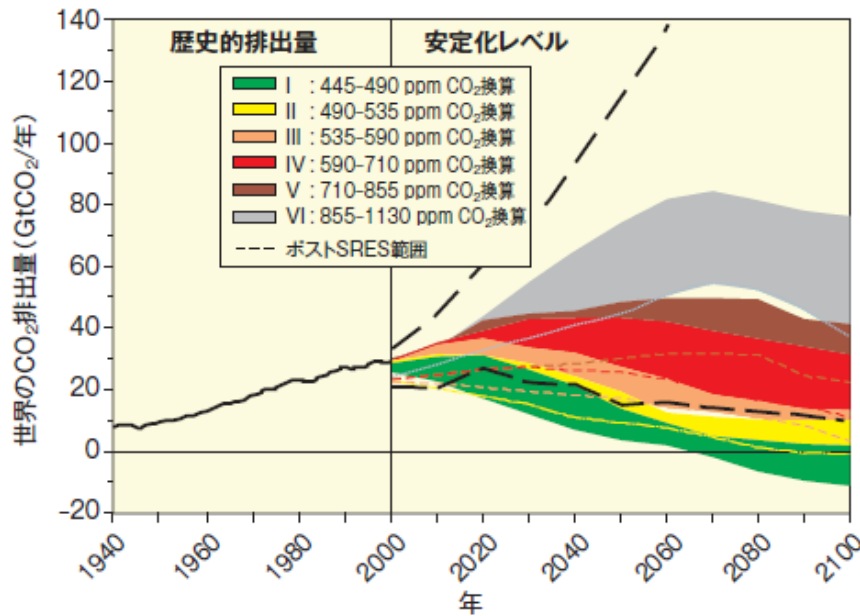
政策決定の議論にとって不可欠なもの  
知識の統合／適切な予測／オープンな論争

- (1) 問題指向的な知識の統合  
(現象指向的な知識の分散化の回避)
- (2) 開かれた未来への挑戦  
(閉じた未来からの開放)
- (3) 開かれた論争  
(独裁的・権威的な決定の回避)

# 将来の気候変動目標と対策

## IPCC第四次評価報告書(2007)から

カテゴリー	二酸化炭素安定化濃度 (2005年=379ppm) <sup>b</sup>	温室効果ガス安定化濃度(二酸化炭素換算)(エーロゾル含む) (2005年=375ppm) <sup>b</sup>	二酸化炭素排出がピークを迎える年 <sup>a,c</sup>	2050年における二酸化炭素排出量の変化 (2000年比のパーセント) <sup>a,c</sup>	気候感度の“最良の推定値”を用いた平衡時の世界平均気温の工業化以降からの上昇 <sup>d,e</sup>	熱膨張のみに由来する平衡時の世界平均海面水位の工業化以降からの上昇 <sup>f</sup>	評価されたシナリオの数
	ppm	ppm	西暦	%	°C	m	
I	350~400	445~490	2000~2015	-85 ~ -50	2.0~2.4	0.4~1.4	6
II	400~440	490~535	2000~2020	-60 ~ -30	2.4~2.8	0.5~1.7	18
III	440~485	535~590	2010~2030	-30 ~ +5	2.8~3.2	0.6~1.9	21
IV	485~570	590~710	2020~2060	+10 ~ +60	3.2~4.0	0.6~2.4	118
V	570~660	710~855	2050~2080	+25 ~ +85	4.0~4.9	0.8~2.9	9
VI	660~790	855~1130	2060~2090	+90 ~ +140	4.9~6.1	1.0~3.7	5



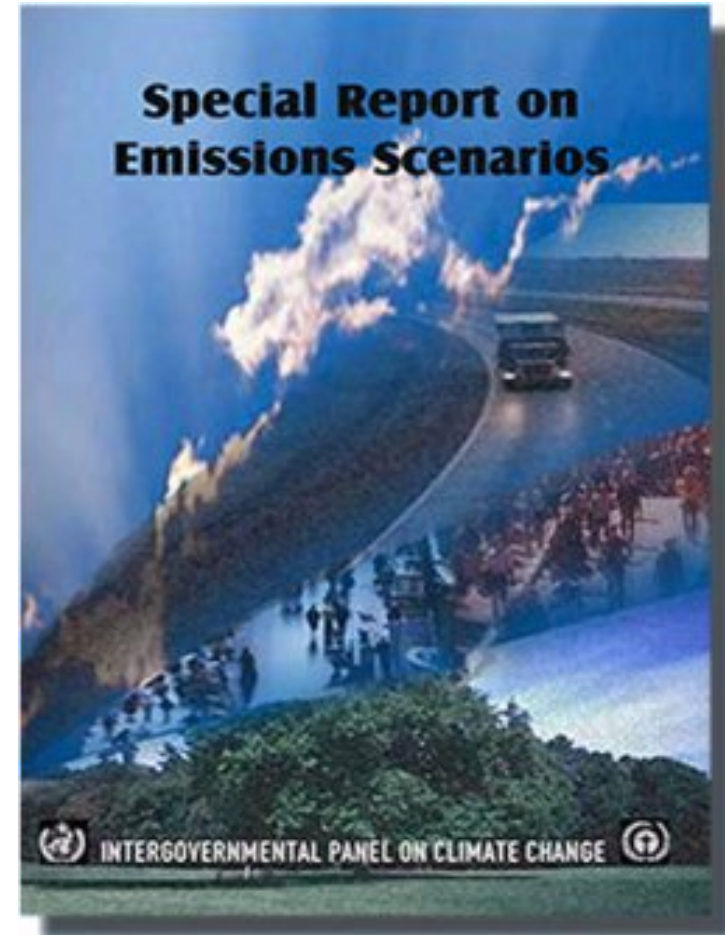
# 統合評価モデルを用いたシナリオアプローチ

- 様々な不確実性のため、将来を正確に予測することは不可能。
- 長期を対象とした環境分析では、モデルによる将来像の定量化と、叙事的なストーリーラインを組み合わせたシナリオ開発が主流。IPCCでは、評価報告書に向けて実施されてきた。
  - SRES (Special Report on Emissions Scenarios)  
<http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.php?idp=0>
  - RCPs (Representative Concentrations Pathways) と  
SSPs (Shared Socio-economic Pathways)



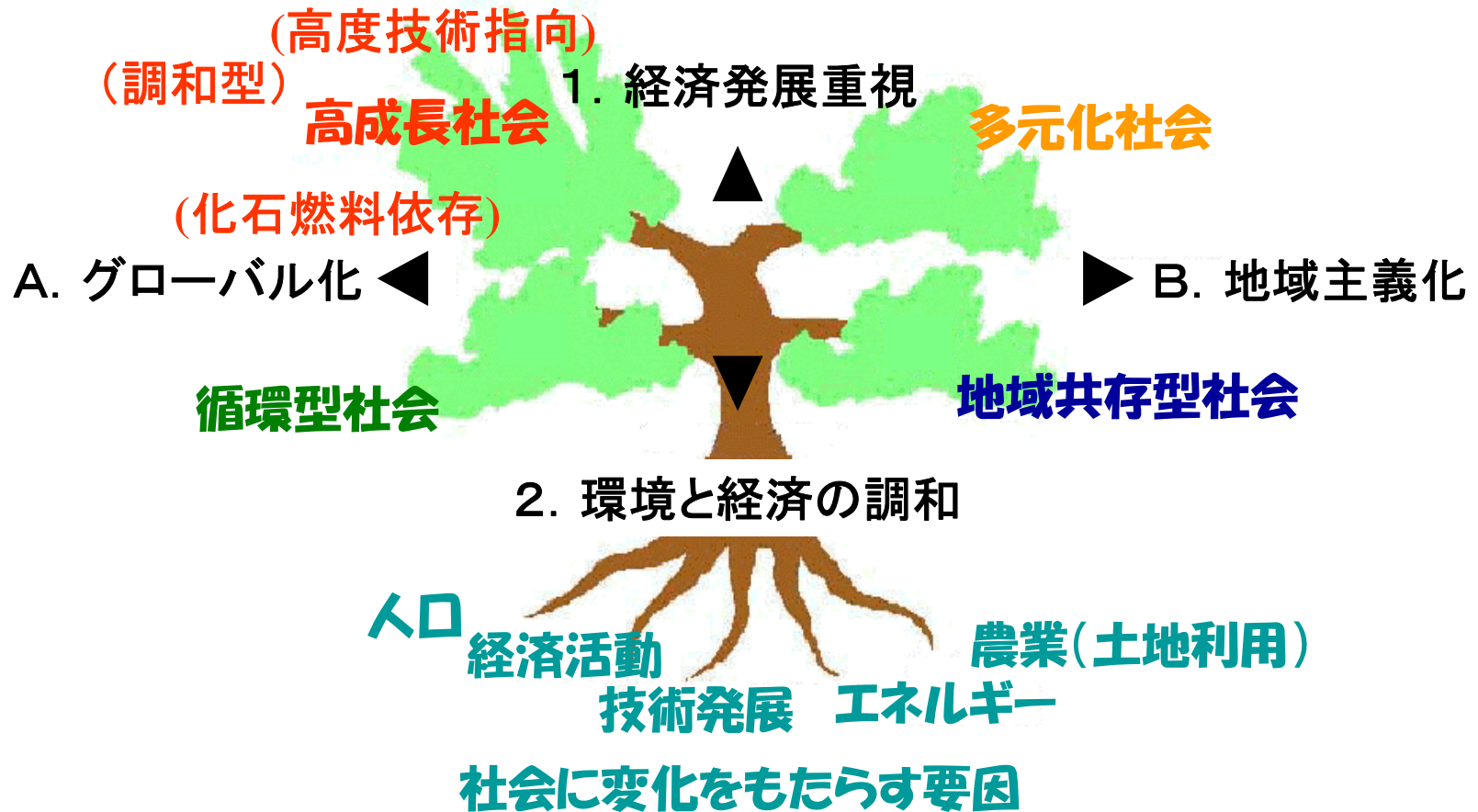
# SRES

- 定性的なストーリーライン
- 定量的なモデル分析による整合性チェック
- マルチモデルアプローチによる不確実性要因の低減
  - 日本の国立環境研究所のアジア太平洋統合モデル(AIM)
  - アメリカICF Consultingの大気安定化枠組モデル(ASF)
  - オランダRIVMの温室効果ガス影響評価統合モデル(IMAGE)
  - 日本の東京理科大学の多地域資源産業配分モデル(MARIA)
  - オーストリアIIASAのエネルギー供給戦略・環境影響モデル(MESSAGE)
  - アメリカのPNNLの簡略気候評価モデル(MiniCAM)
- オープンプロセスによる意見聴取
- 1996年にシナリオ作成作業に着手し、2000年にIPCCにより承認
- SRESはすべて温暖化対策を考えない「なりゆきシナリオ」。対策シナリオはpost-SRES(IPCC第3次報告書)として示される。





# 温暖化予測のベースとなる 社会経済発展シナリオ



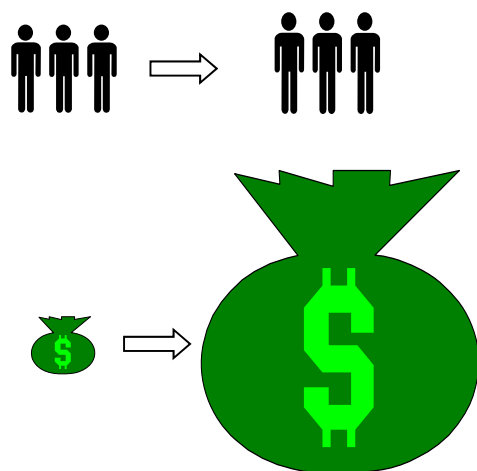
# 将来を示すストーリー



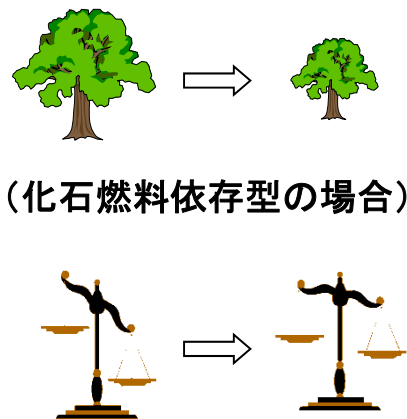
## A1 高成長社会

化石燃料依存型 / 調和型 / 高度技術指向型

グローバル化が進展し、世界規模で今後100年にわたり高成長が続く。

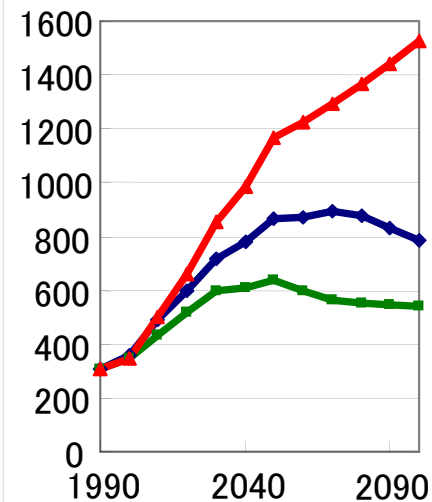


2000 ⇒ 2100



(化石燃料依存型の場合)

化石燃料消費量(EJ)



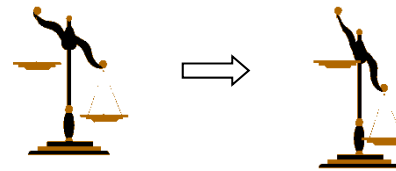
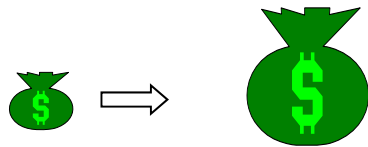
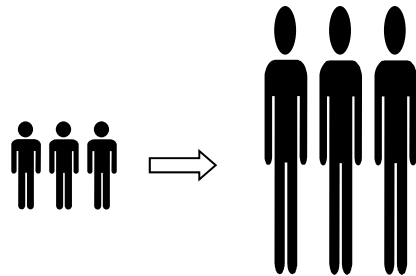
- ▲ 化石燃料依存型
- ◆ 調和型
- 高度技術指向型

# 将来を示すストーリー

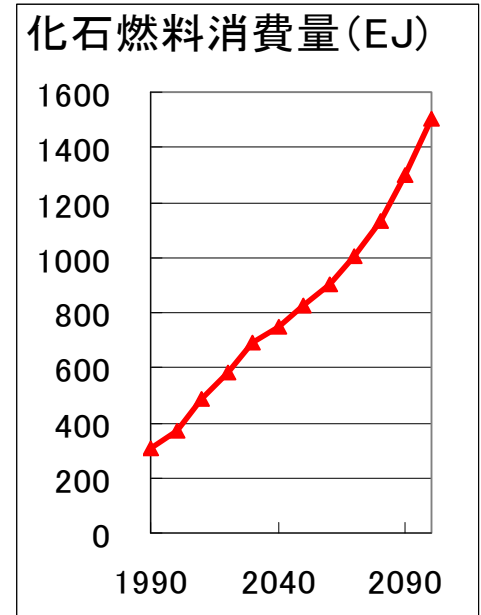


## A2 多元化社会

世界の経済や政治がブロック化し、国際的な貿易や人の移動、技術の移転が制限される。



2000 ⇒ 2100

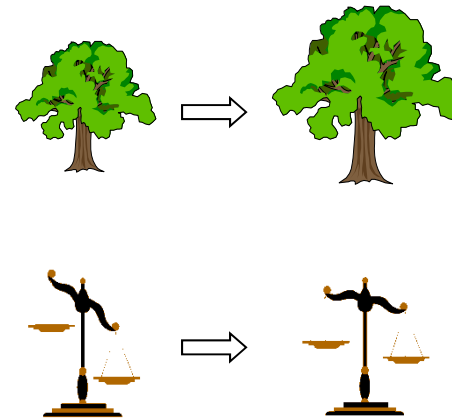
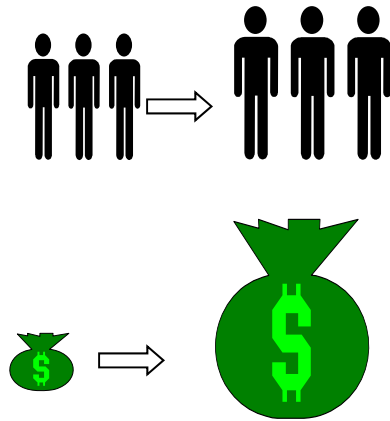


# 将来を示すストーリー



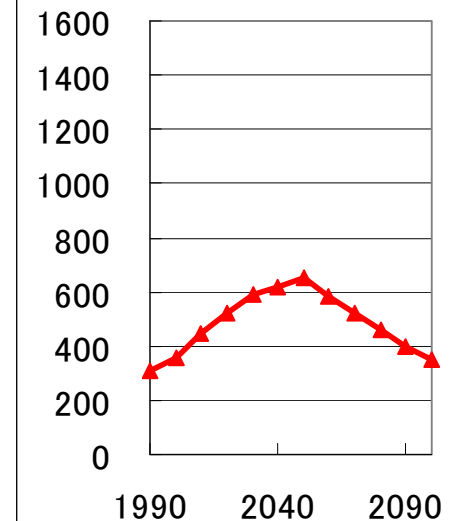
## B1 循環型社会

資源利用の効率化、社会制度の整備、環境保全に集中的な投資が起き、環境産業の市場が急速に拡大する。



2000 ⇒ 2100

化石燃料消費量(EJ)

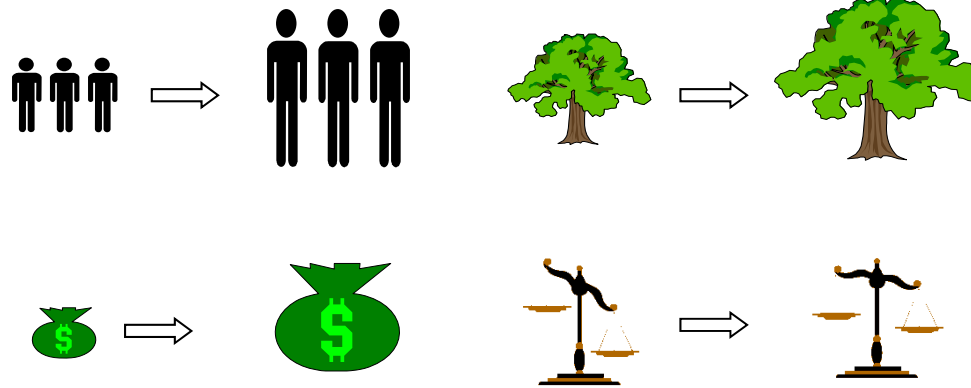


# 将来を示すストーリー

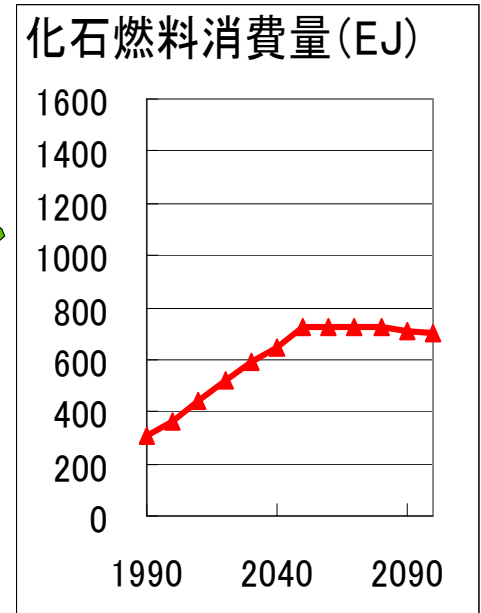


## B2地域共存型社会

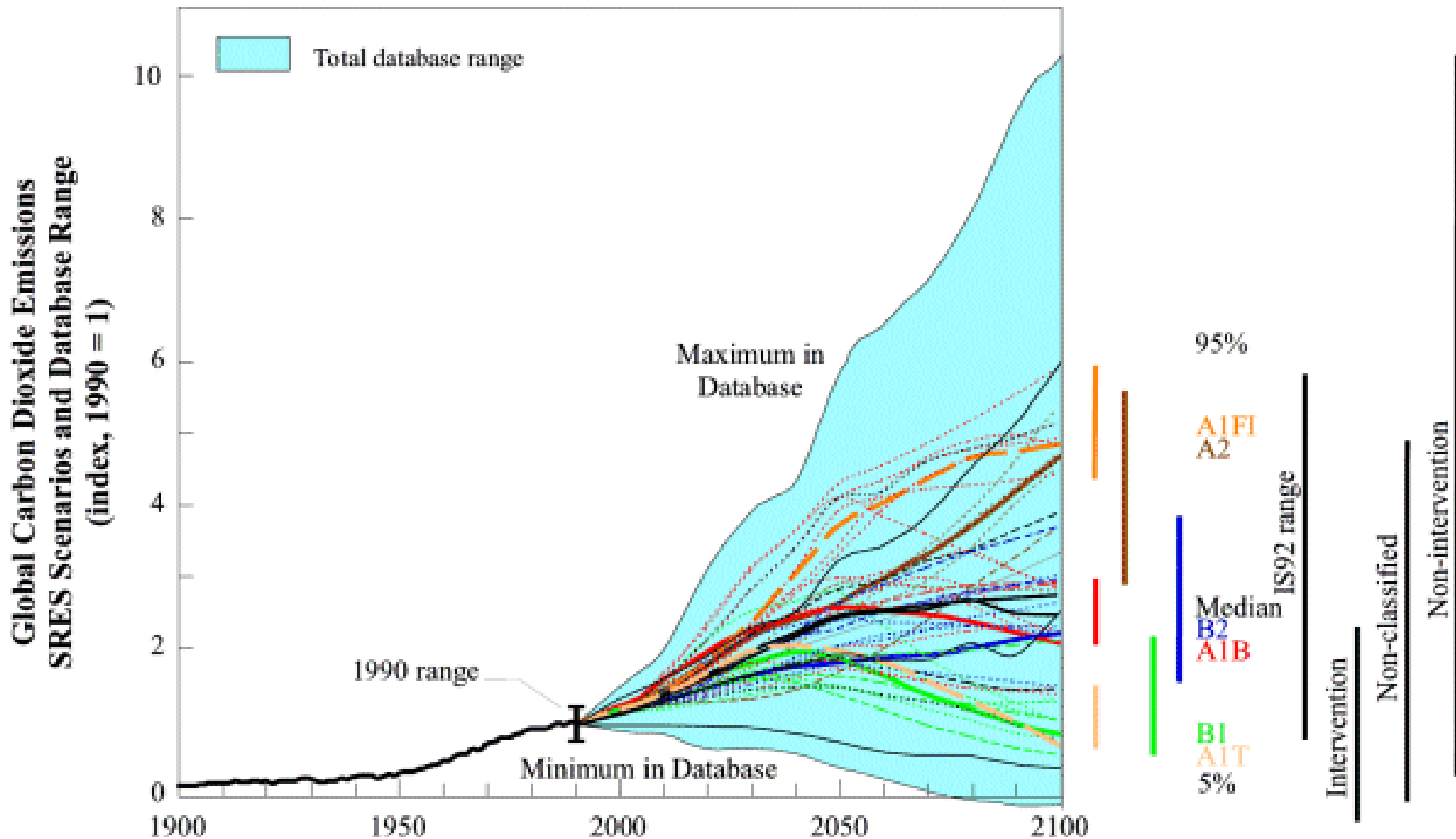
地域の問題と公平性を重視して、ボトムアップの方向で自然との共生に向けて発展を図る。



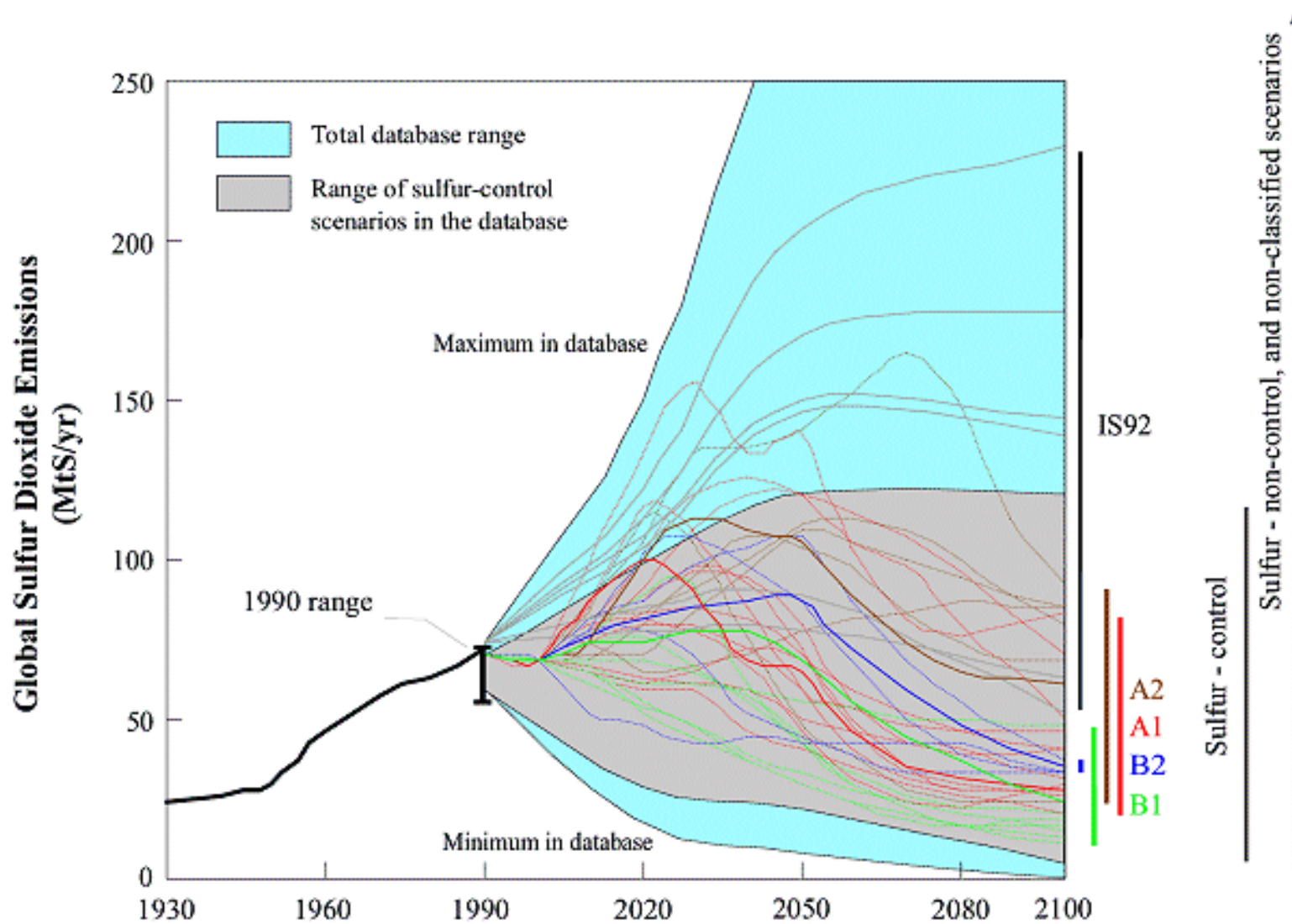
2000 → 2100



# 発展の道筋が違えば結果が変わる CO2排出経路

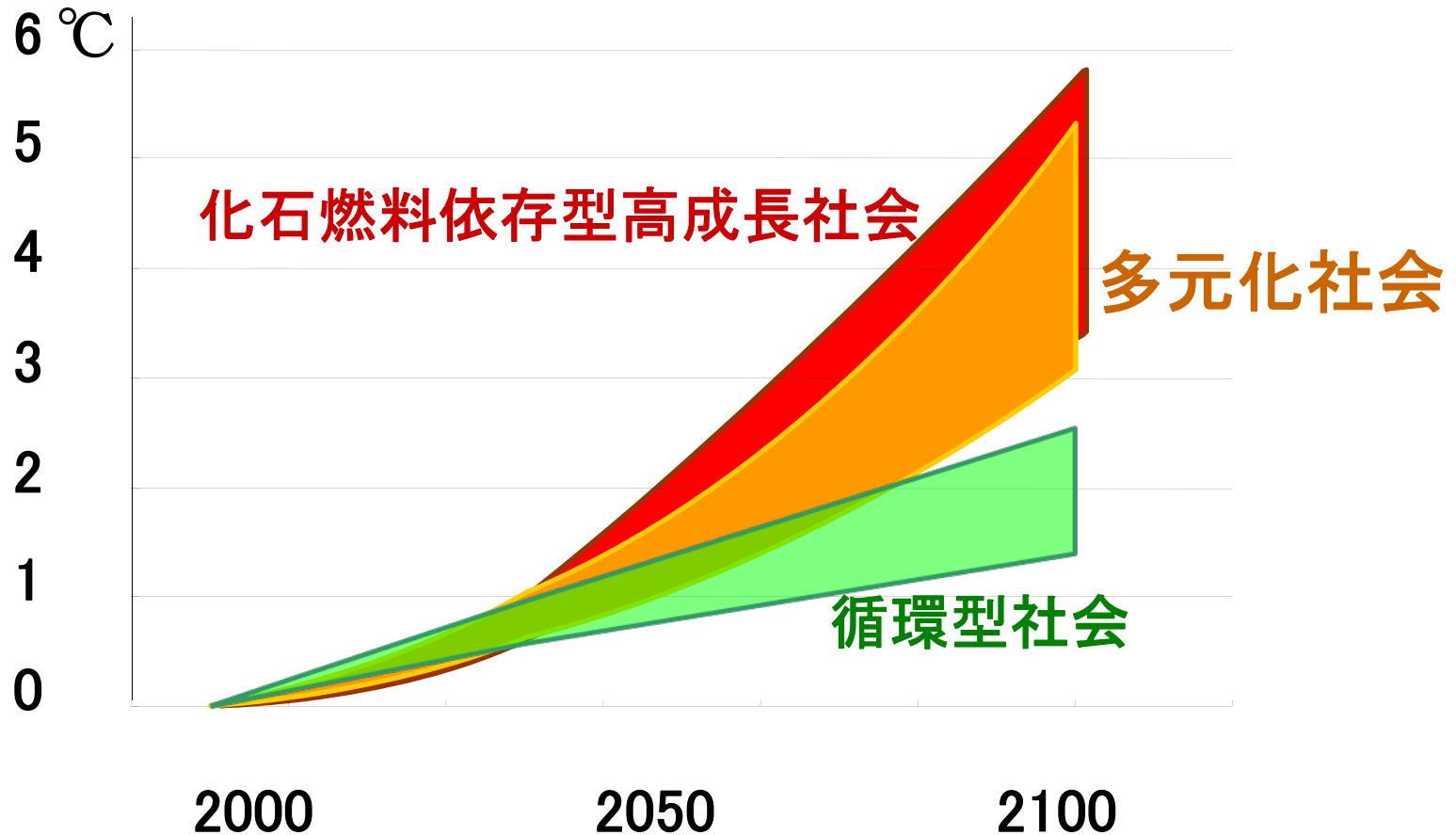


# 発展の道筋が違えば結果が変わる SO<sub>2</sub>排出経路





# 発展の道筋が違えば温暖化の程度が変わる

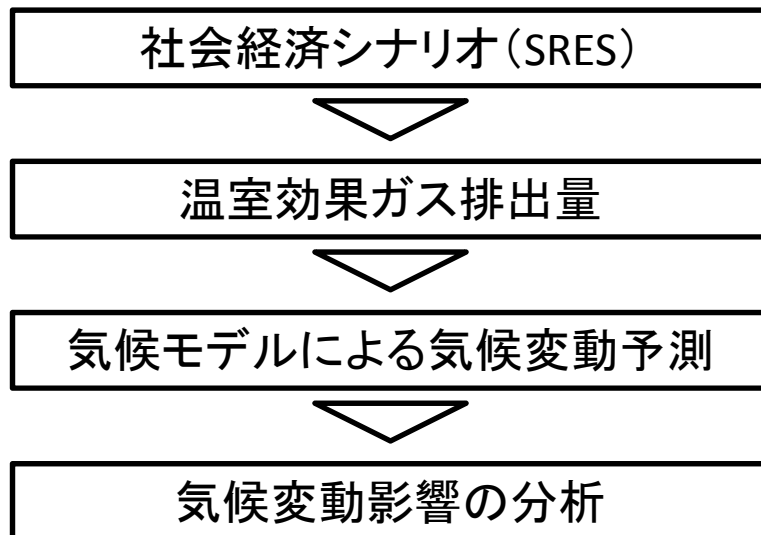


IPCC SRES シナリオ (1990年からの気温上昇: °C)

# SSPs (Shared Socio-economic Pathways)

従来型

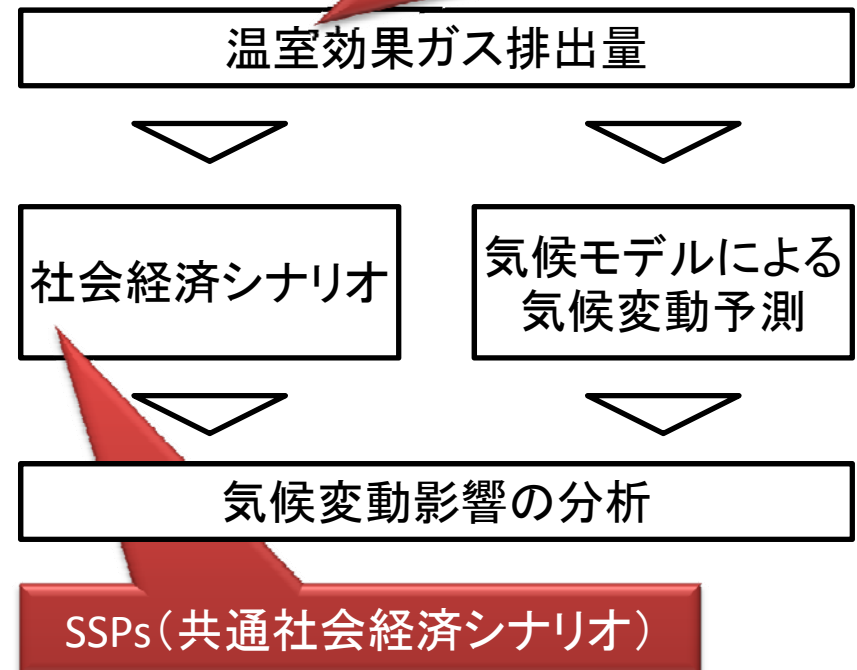
シナリオ開発には長い時間がかかり、さらに気候変動影響に至るまでには長時間を要する。



新シナリオプロセス

IPCC第5次評価報告書に向けた新しいシナリオ開発の枠組み

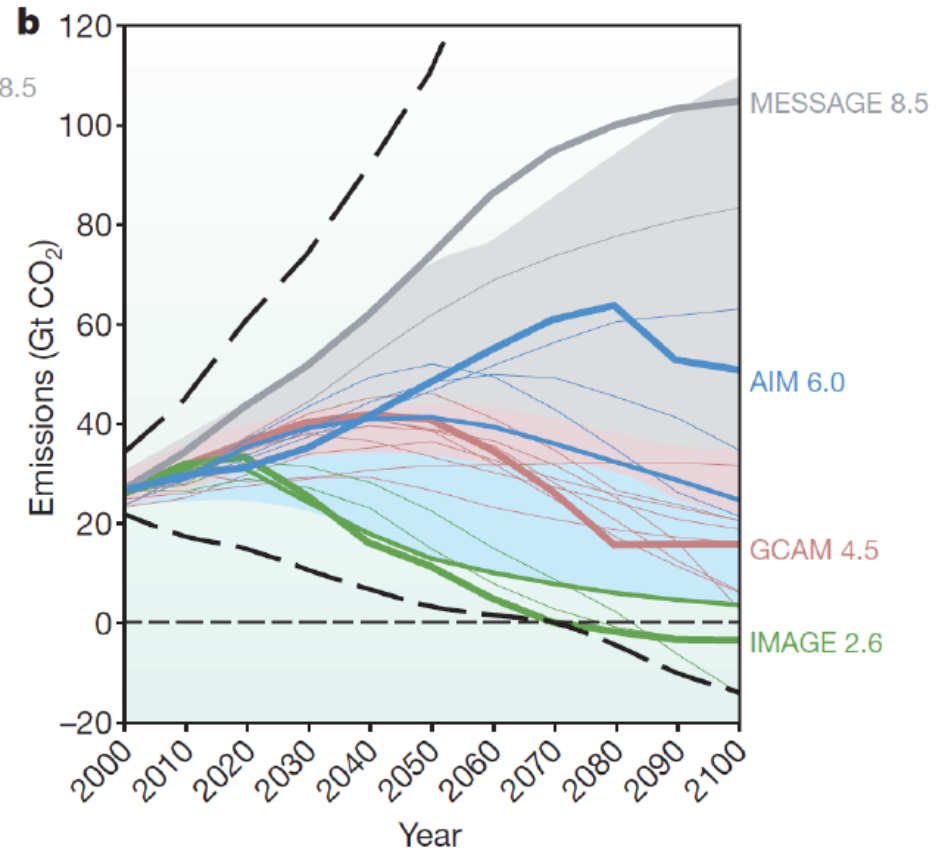
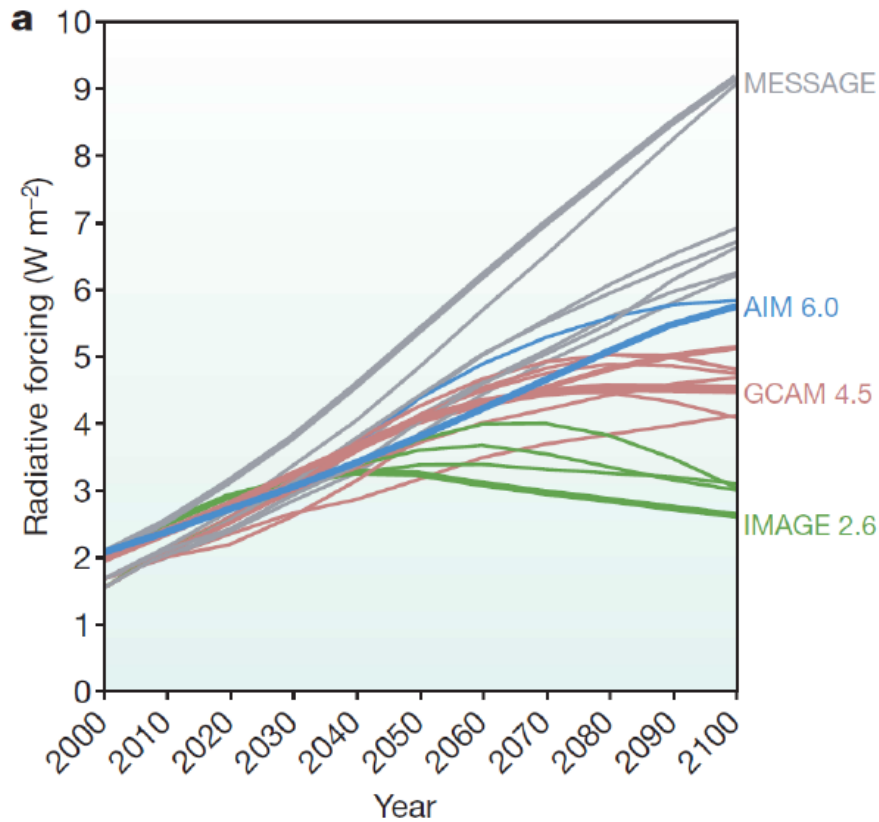
RCPs (代表的濃度シナリオ)



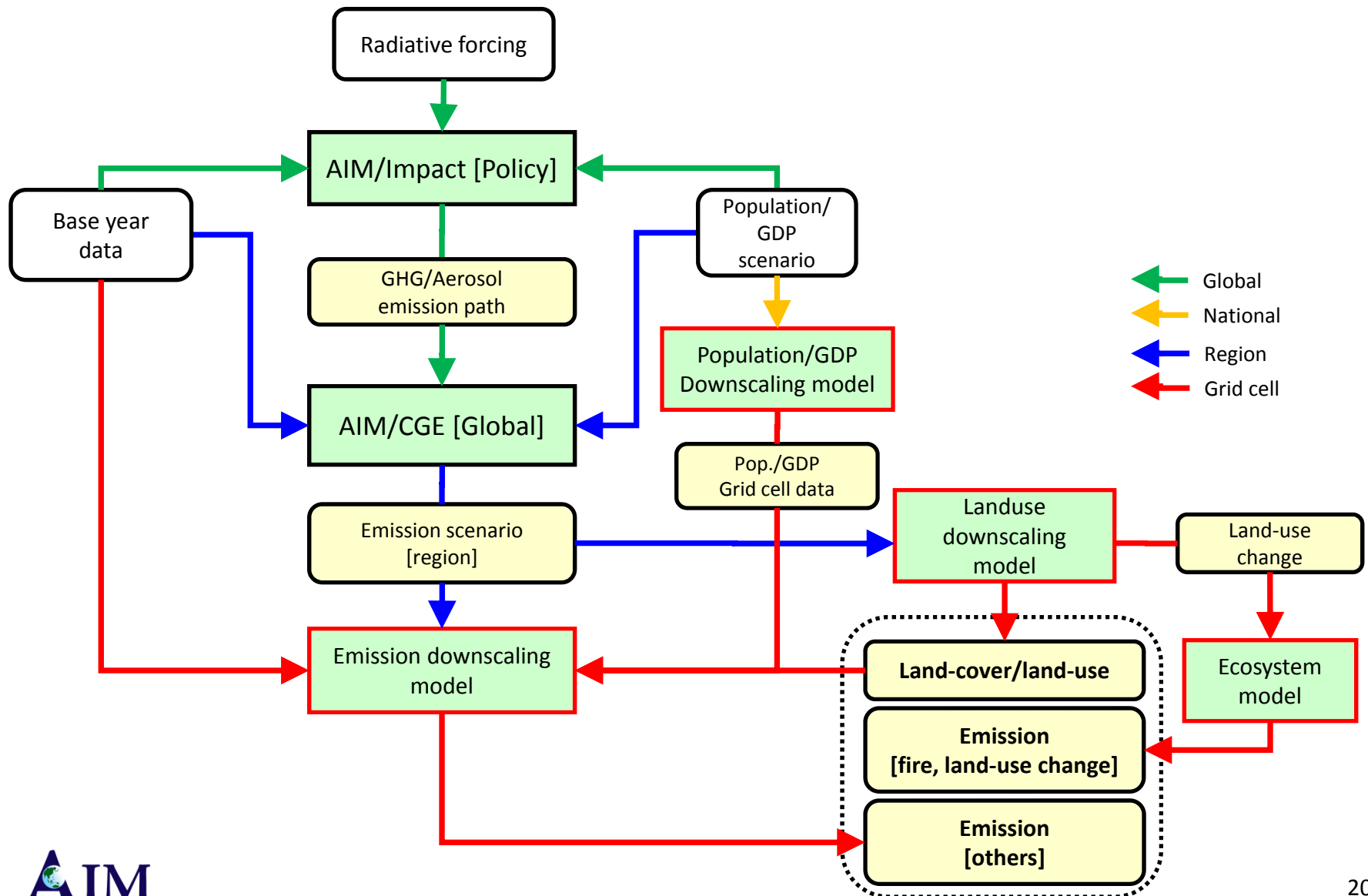
# RCPs : Representative Concentration Pathways

- 気候モデルへの入力を目的として作成された温室効果ガス排出シナリオ
- 大気中の放射強制力を、 $2.6\text{W/m}^2$  (産業革命前と比較して全球平均気温を $2^\circ\text{C}$ 以下に抑える目標に相当)、 $4.5\text{W/m}^2$ 、 $6.0\text{W/m}^2$ 、 $8.5\text{W/m}^2$ に安定化させる排出経路を定量化。
  - オランダRIVMの温室効果ガス影響評価統合モデル (IMAGE)
  - アメリカのPNNLの簡略気候評価モデル (MiniCAM)
  - 日本の国立環境研究所のアジア太平洋統合モデル (AIM)
  - オーストリアIIASAのエネルギー供給戦略・環境影響モデル (MESSAGE)
- 2011年にClimatic Change誌に特集号として掲載
  - <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10584-011-0157-y>
  - <http://www.nies.go.jp/whatsnew/2011/20110926/20110926.html>
- 詳細なデータは、以下から公開されている。
  - <http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb/>

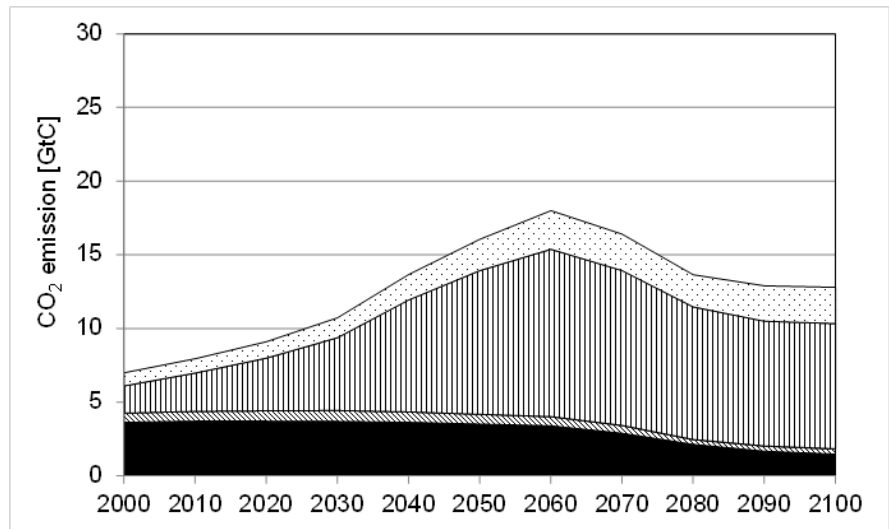
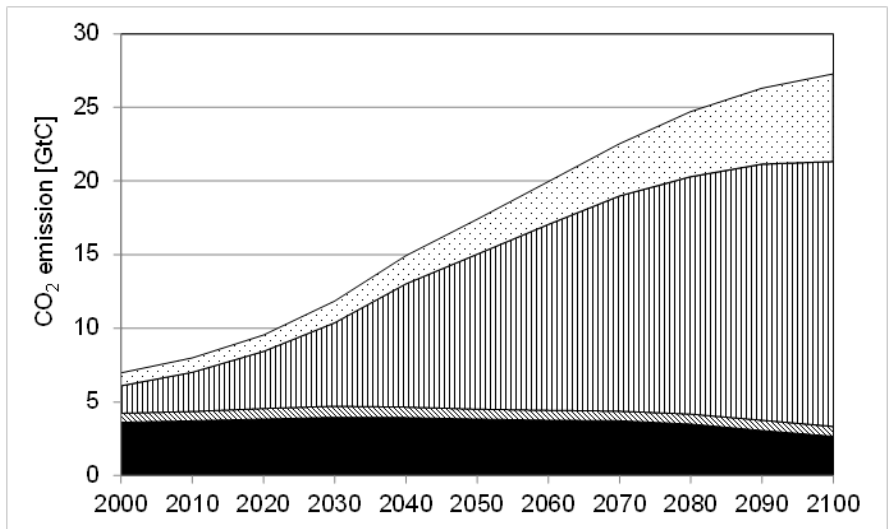
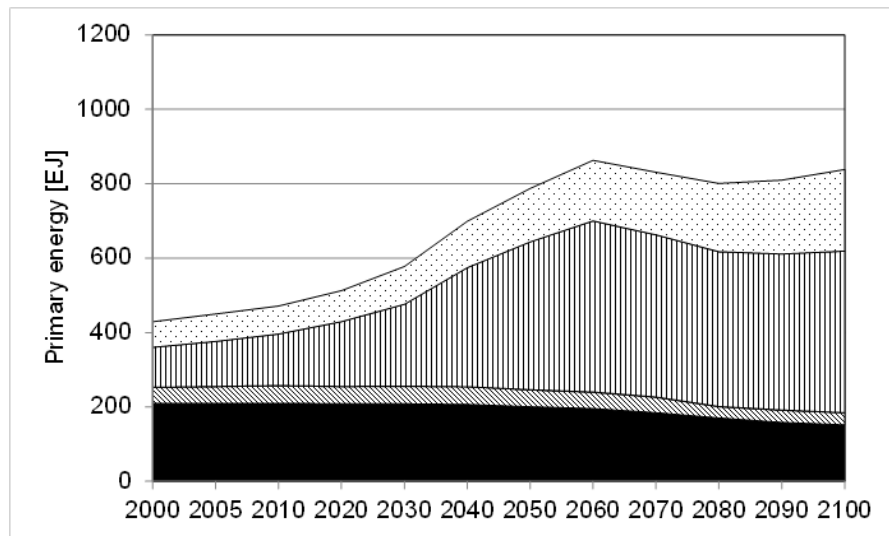
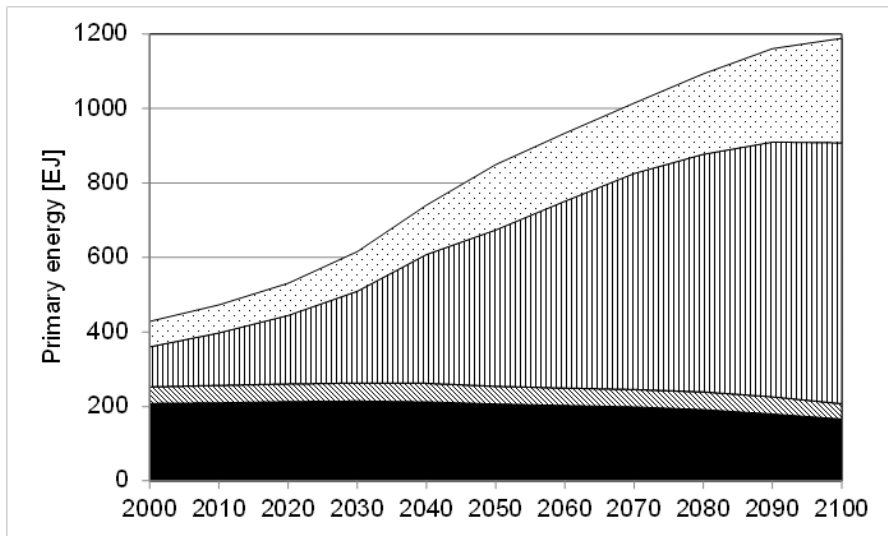
# 放射強制力とGHG排出量(各モデル)



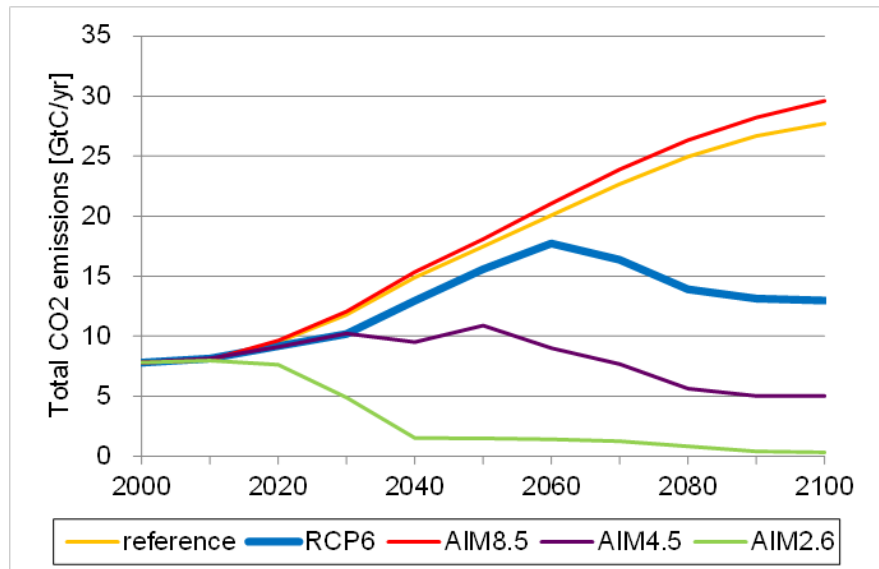
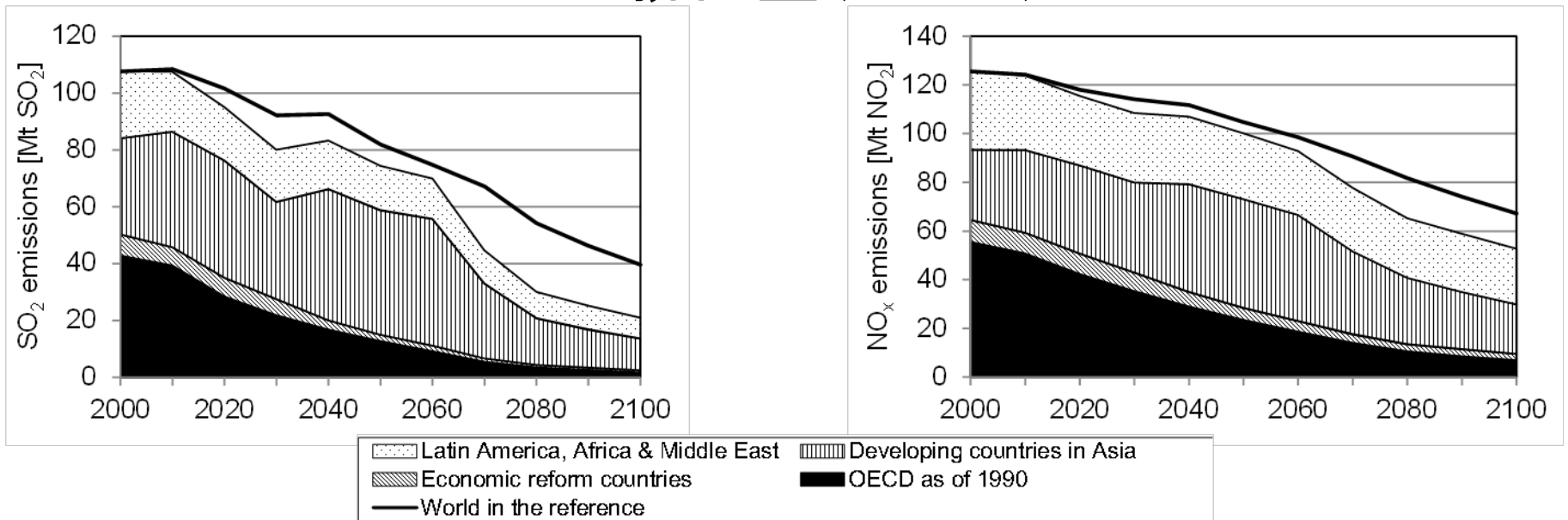
# AIMで用いたRCPにおける計算のフロー



# AIMによる一次エネルギー消費(上)とCO2排出量(下) なりゆきケース(左)とRCP6(右)

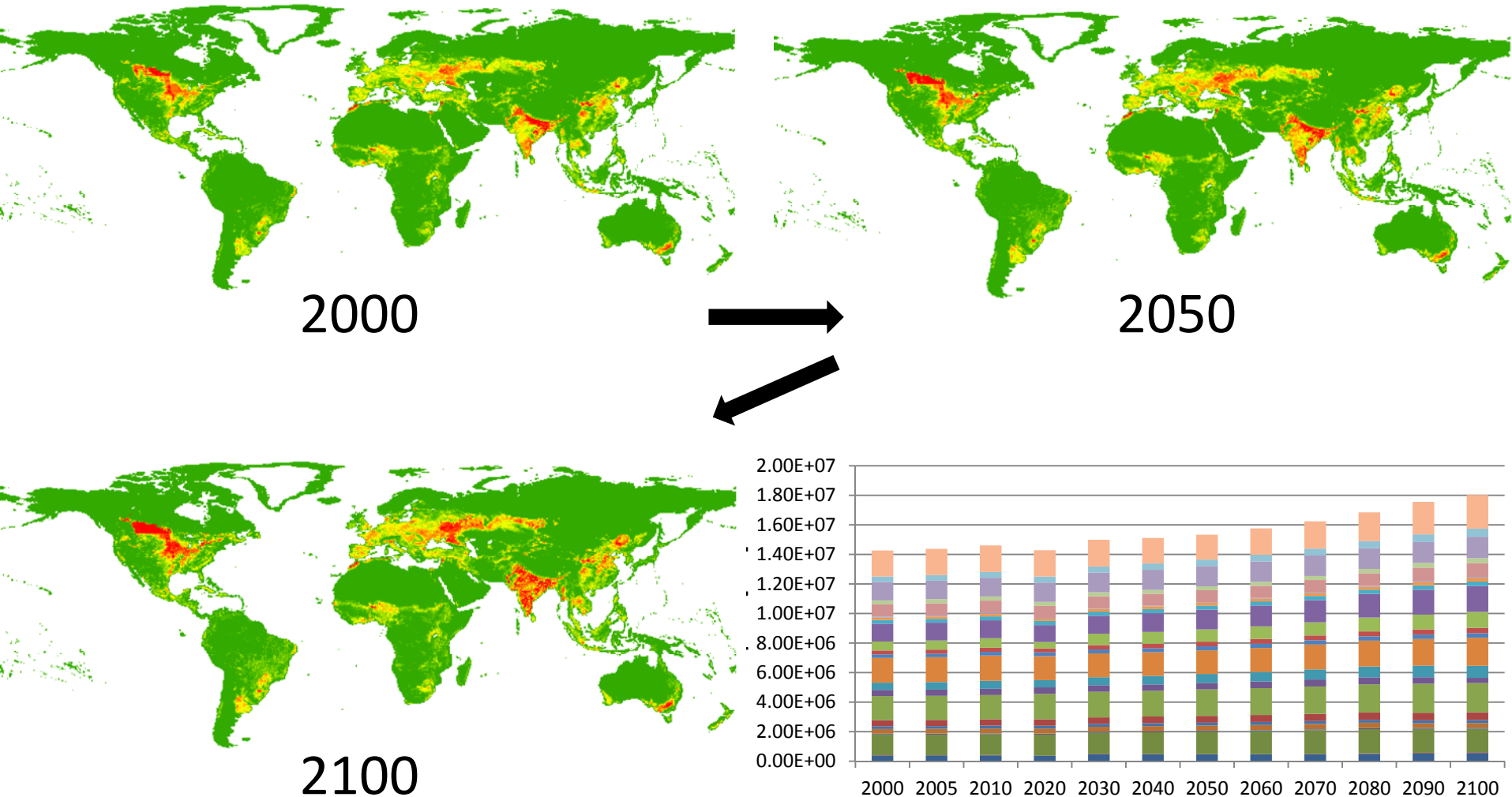


# AIMによる大気汚染物質排出量(RCP6)と CO2排出量(全RCP)





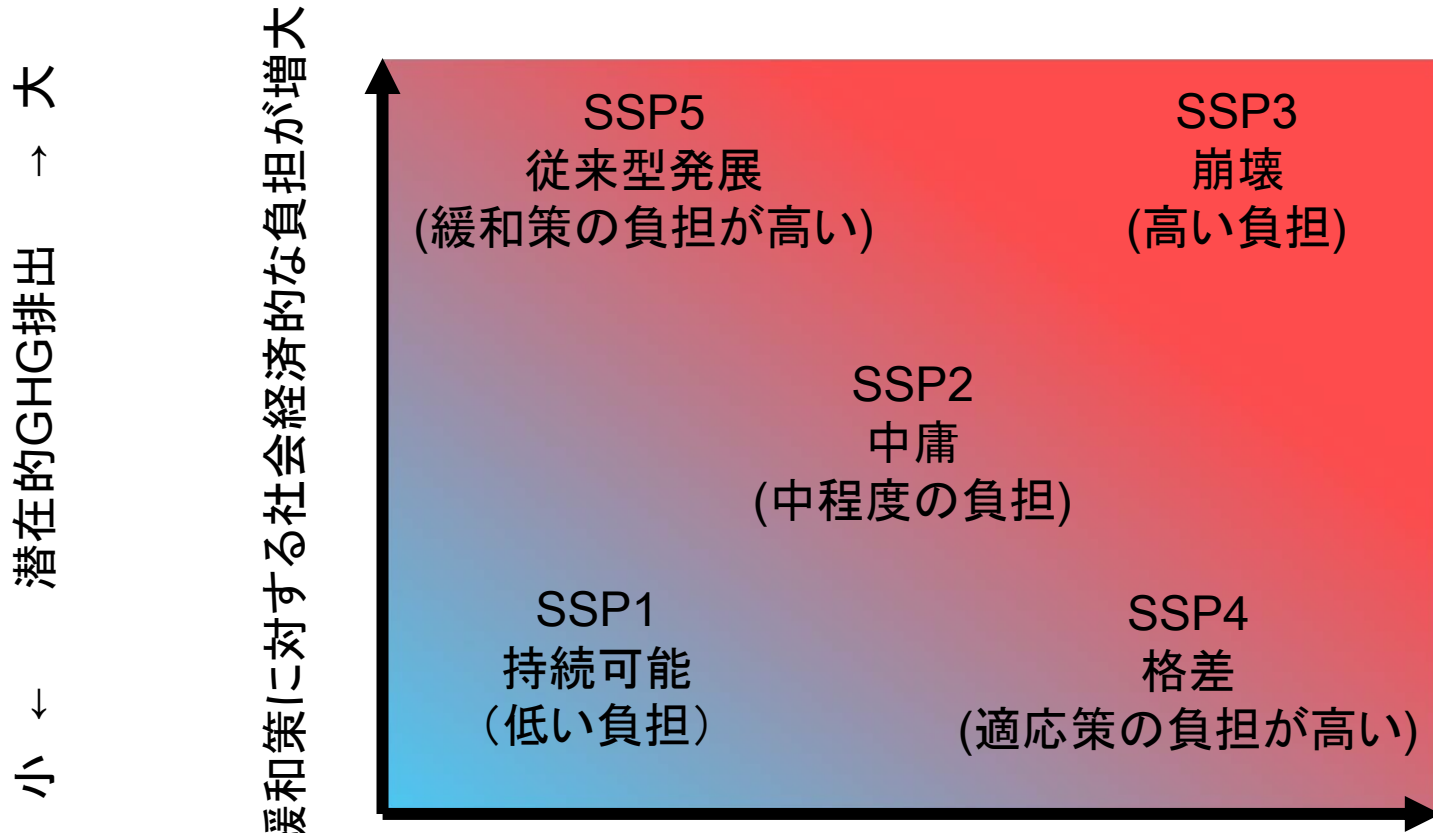
# 土地利用モデルを用いた耕作地の分布 (RCP6)



## RCPsから次のステップへ

- CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)において、気候モデルが参加し、詳細な気候変動を解析。
  - <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>
- SSPs (Shared Socio-economic Pathways)で、5つの社会像を想定し、それぞれの社会における活動を定量化するとともに、RCPsの排出経路を再現し、経済影響、必要な政策 (Shared Policy Assumptions) 等を分析。
- ISI-MIP (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project)において、気候変動影響を解析。
  - <http://www.pik-potsdam.de/research/climate-impacts-and-vulnerabilities/research/rd2-cross-cutting-activities/isi-mip>
- Ag-MIP (Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project)において、農業影響を解析。
  - <http://www.agmip.org/>

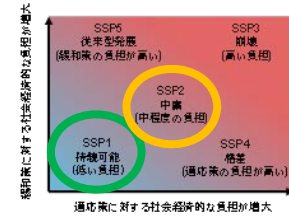
# SSPsで描写される社会像



GHG排出量を削減するための方策

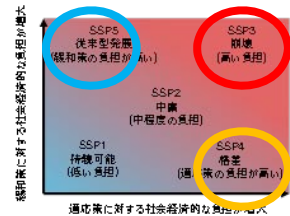
温暖化の影響を抑えるための方策

# SSPsで描写される社会像



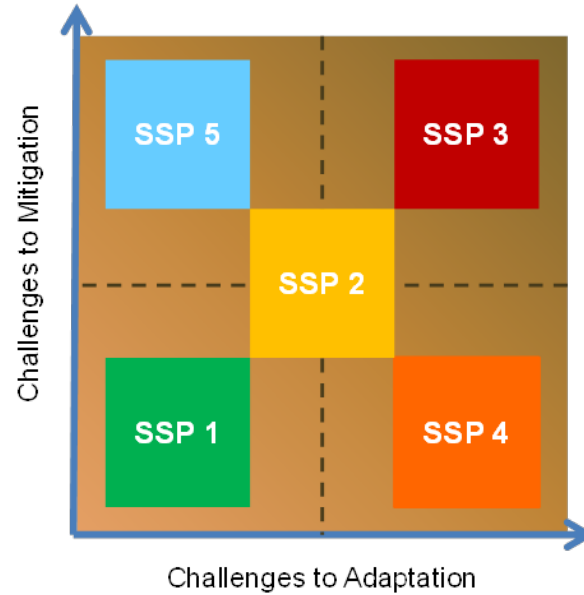
SSP1 持続可能	<p>持続可能な社会へ向けて進む。一方で、資源消費強度が下がり化石燃料への依存度が下がる。これらを達成するための要素は、低所得国における急速な発展、国間、国の中での所得格差の解消、急速な技術進歩、環境汚染に対する高い認識である。低所得国の発展は、貧困ラインより下にいる人数を減少させる。これらの発展とともに適切に設計された都市化が低所得、中所得国で進展する。一方、高所得国は中程度の経済発展を成し遂げ、研究開発や技術移転を強くサポートする投資がなされる。世界全体としてはオープンでグローバル化が進む。技術進歩は速く進むが、低汚染物質排出の技術、単収の増加等環境負荷を低減していくような技術進歩に重点が置かれる。消費は低物質依存、エネルギー強度が下がり、食料は動物性蛋白質の割合が低い。教育投資も進み、結果として人口成長は低い。同時にガバナンス、制度は問題解決に対して適切に設計される。ミレニアム開発目標は次の10年、20年で達成され、教育水準の高い人口が増え、安全な水へアクセスでき、衛生状態、医療アクセスなど気候変化に対する脆弱性を低減させる。</p>
SSP2 中庸	<p>ここ数十年の過去のトレンドが継続する。開発目標はある程度達成へ向けて進展し、資源への依存度やエネルギー強度の低下は過去のスピードで進み、徐々に化石燃料依存度も下がる。低所得国の発展はすべての国で進むわけではなく、取り残される国も存在する。都市化も同様に進む国もあるが、進まない国あり、居住地の状態も改善される国と悪化する国が存在する。大部分の国では政治的に安定し、貿易は世界全体で結合している。グローバル化は遅いが進む。貿易障壁はエネルギー、農業、資本市場で残ることになる。情報のアクセスは世界全体で適切に管理されるが、一部の最貧国や資源国や島嶼国はその例外となり保護主義が残る。所得の増加は世界全体としては中程度の速度で進み、途上国と先進国の所得は徐々に縮まっていく。国内における所得格差は徐々に下がっていくが、南米、サブサハラ、インドなどの国では依然として大きな格差が残る。教育投資は大きくはなく、そのため低所得国では人口増加が徐々に進む。ミレニアム開発目標の達成は遅れ、安全な水へのアクセス、衛生状態、医療などは改善しない地域が残り、気候変化に対する脆弱性が残ることになる。</p>

# SSPsで描写される社会像



<p><b>SSP3 崩壊</b></p>	<p>世界は分断される。極度の貧困が残り、多くの国で大きく増加する人口の生活水準を維持するために奮闘することになる。地域はブロック化が進み、協力は進まない。世界全体として開発目標に失敗し、資源・化石燃料に対する依存は下がらない。各国は自国のエネルギーや食糧安全保障のために躍起になる。エネルギー、食料を含めて国際貿易は後退する。国際協調は低く、技術進歩や教育に対する投資は限られたものとなる。そのために人口増加は非常に高い。低所得国における都市部は適切に計画されていない居住地が増える。エネルギー技術が進まず、エネルギー資源はローカルに限定され、さらに人口増加によって排出量は増加する。ガバナンスや制度は脆弱で、協力や調和に乏しい。人的資本に対する投資も小さく、格差は広がる。適応能力は低く、多くの国では気候変化に対して極めて脆弱となる。政治は貿易障壁を含む安全保障に重点が置かれる。</p>
<p><b>SSP4 格差</b></p>	<p>非常に高い格差が、国間でも国内でも存在する。豊かなエリートが排出量を増大させ、多くの貧困層は低排出となる。貧困層は先進国、途上国問わず、気候変化に対して脆弱となる。エネルギー部門では資源枯渇、気候政策などに対するヘッジ戦略を取り、R&amp;Dに対する投資が進み、比較的低コストで非化石燃料資源を使えるようになる。従って、緩和策の困難度は低くなる。ガバナンスやグローバルゼーションは高所得のエリートによって、それらの人々のために適切に運営されるが、多くの貧困層にとっては効果的でない。低人的資本の貧困層の割合が相対的に高く、適応策への困難度が高い。</p>
<p><b>SSP5 従来型 発展</b></p>	<p>社会的・経済的問題に対する解決策として、在来型の経済発展が進む。急速な在来型の経済発展は化石燃料に依存したエネルギーシステムを指向することになる。その結果排出量が増加し、緩和策への困難度が高くなる。人間開発目標は達成され、経済発展は著しく進み、極端現象による災害を軽減するためのインフラ投資が進み、生態系は非常によく管理されており、適応策への困難度は低くなる。</p>

# 社会経済シナリオから 排出削減に向けた政策、経済影響の分析へ



		SSP 1	SSP 2	SSP 3	SSP 4	SSP 5
なりゆき		X	X	X	X	X
RCPPの再現	8.5 Wm <sup>-2</sup>			X		
	6.0 Wm <sup>-2</sup>		X	X	X	X
	4.5 Wm <sup>-2</sup>	X	X	X	X	X
	2.6 Wm <sup>-2</sup>	X	X		X	

Shared Policy Assumptions



# 統合評価モデルやシナリオに課せられた課題

- モデルについて
  - 統合評価モデルは、巨大化しブラックボックス化しているが、まだまだ未解明な減少が多く、更に巨大化する可能性がある。
  - 長期的な目標と短期的な現状をどう整合させるか？
  - 地球温暖化の分析では世界規模のモデルは不可欠であるが、地域のリアリティをどう確保するか？
  - 過去の延長線上にない社会像をどうシミュレーションするか？
- シミュレーションについて
  - これまでは、与えられた政策を評価することが中心であったが、目標達成のためには、社会のどこをどう変えればいいのかの提案も必要。
- シナリオ・シミュレーション結果をどう示すか？
  - 結果を正確にかつわかりやすく伝えるか？
    - 正確さを追求すると、説明が冗長、難しくなる。
    - わかりやすさを追求すると、科学的な点で正確さに欠けることがある。
  - 結果だけではなく、前提とセットにした結果の提示が必要。



# 数理科学に期待すること

- 巨大化するモデルをいかに効率よく解くか？
  - ハードウェアに頼らないために、よりよいアルゴリズムの開発を期待している。
- 共同研究の期待
  - プログラミングを中心とした共同研究を期待している。