

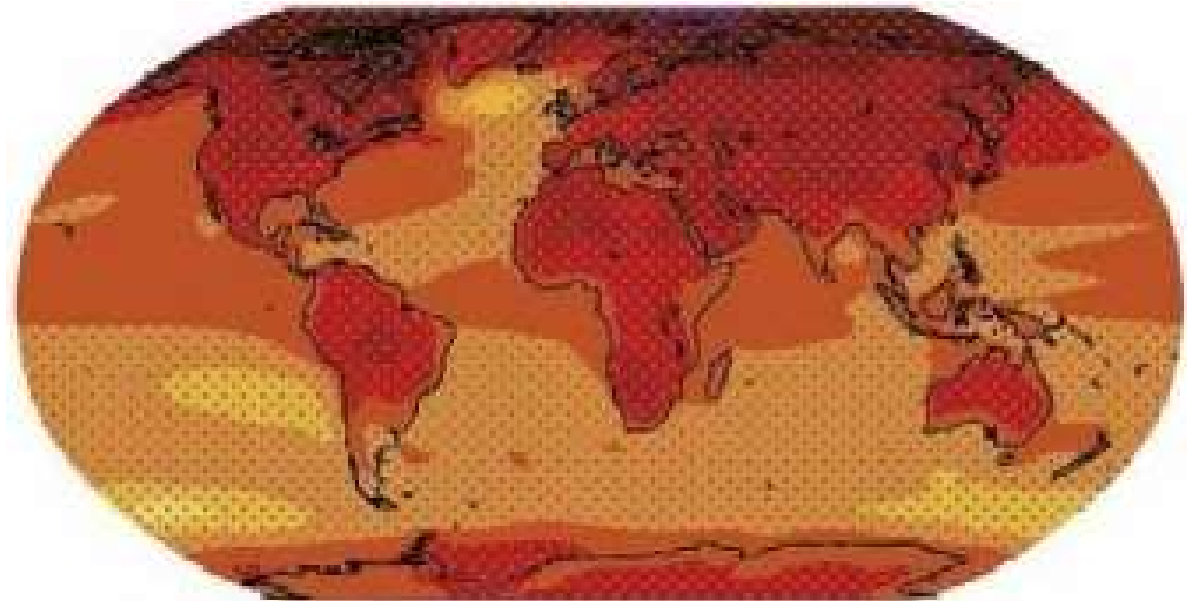
産業・環境技術政策論 第2回

地球温暖化

Global Warming

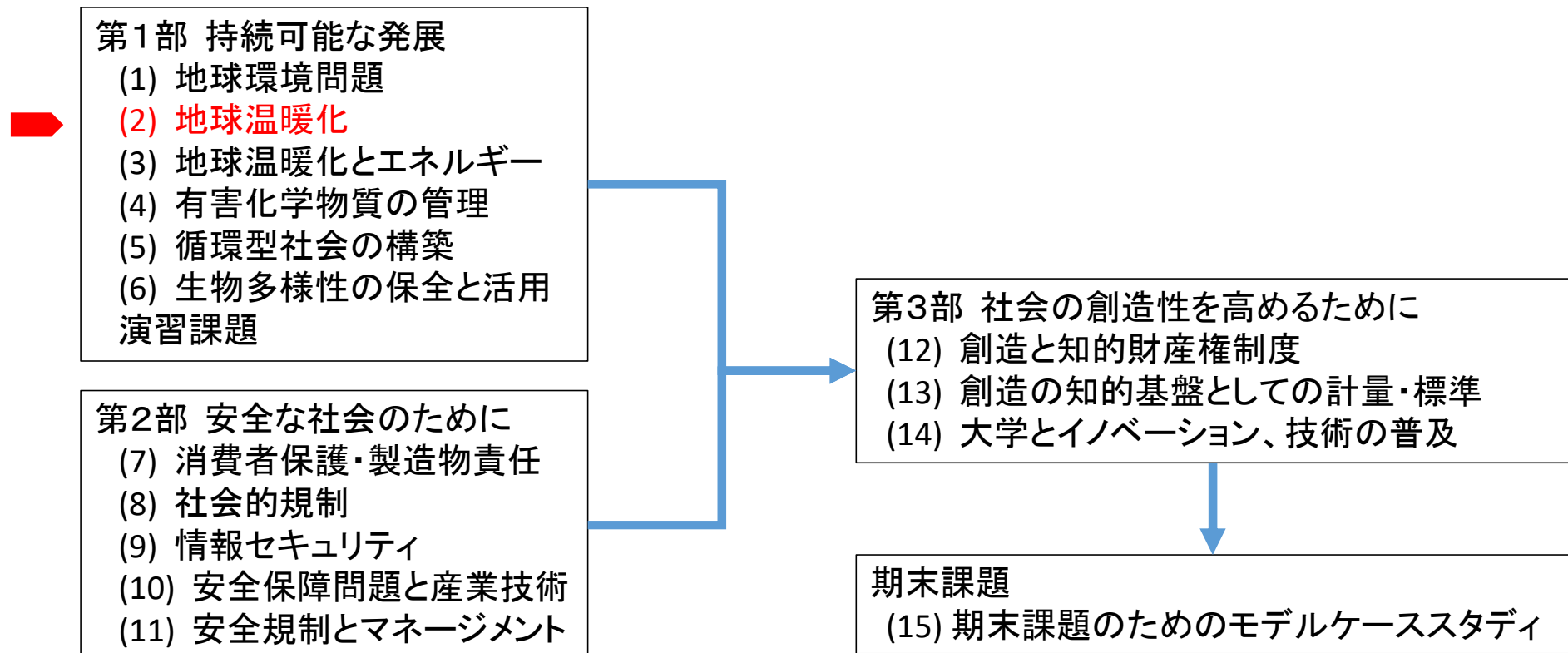
長岡技術科学大学
大学院工学研究科
システム安全工学専攻
教授 山形 浩史

yamagata@vos.nagaokaut.ac.jp



出典:IPCC第5次評価報告書

産業・環境技術政策論 講義の流れ



地球温暖化 講義内容

【地球温暖化のメカニズム】

- 惑星大気の化学組成
- 地球進化と大気の形成
- 地球のエネルギー収支
- 温室効果ガス
- 放射強制力

【IPCC第5次評価報告書】

- 温暖化と温室効果ガスの相関
- 地球温暖化の影響
- 評価シナリオ
- CO₂排出削減の技術・制度
- 適応策

【気候変動に関する国際交渉】

- 問題検討の歩み
- 気候変動枠組条約
- 京都議定書
- 排出権取引

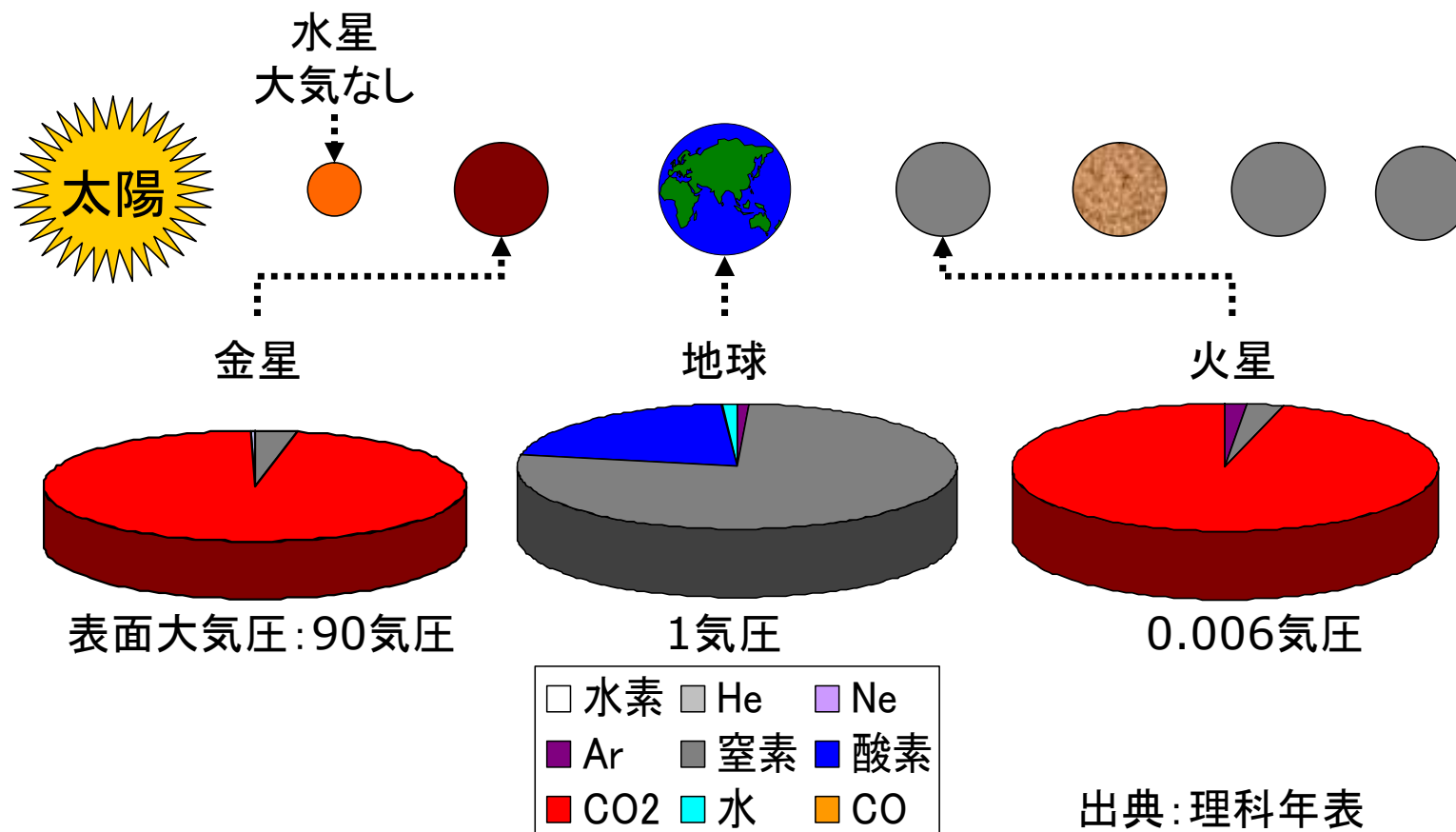
【Discussion】

- 排出権取引の功罪
- 京都議定書の評価

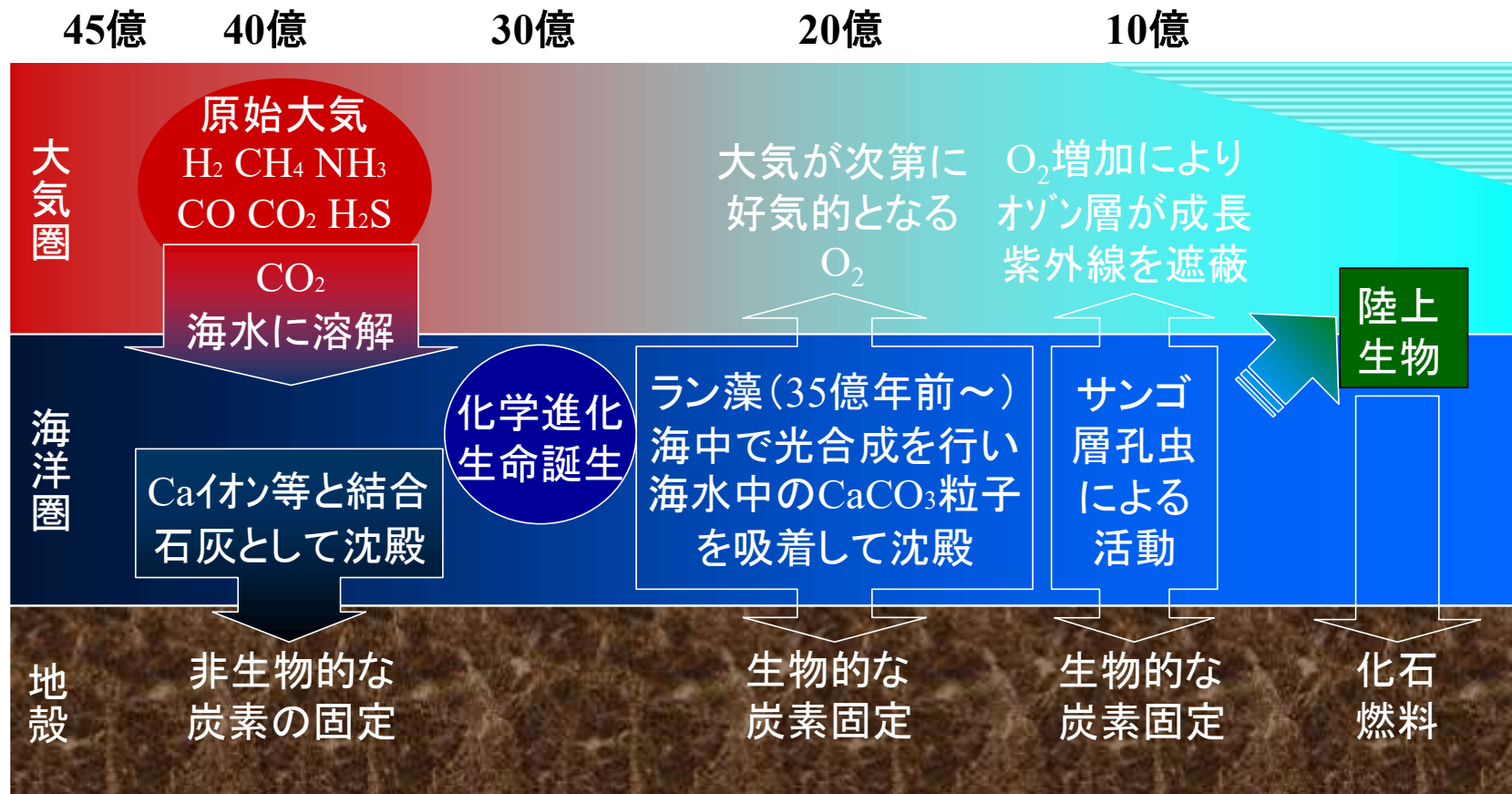
【全ての国の参加に向けて】

- コペンハーゲン合意
- パリ協定

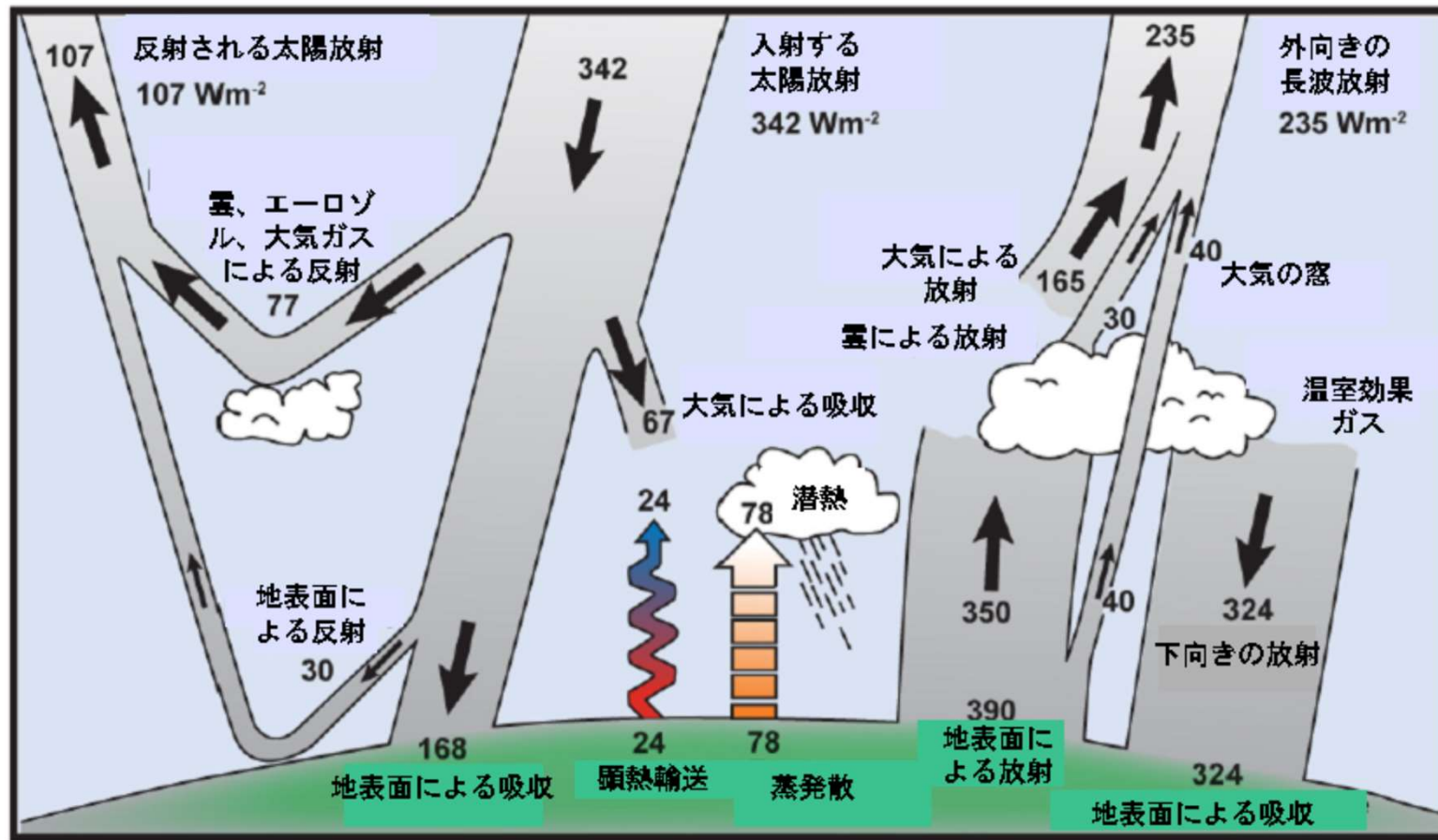
惑星大気の化学組成



地球進化と大気の形成



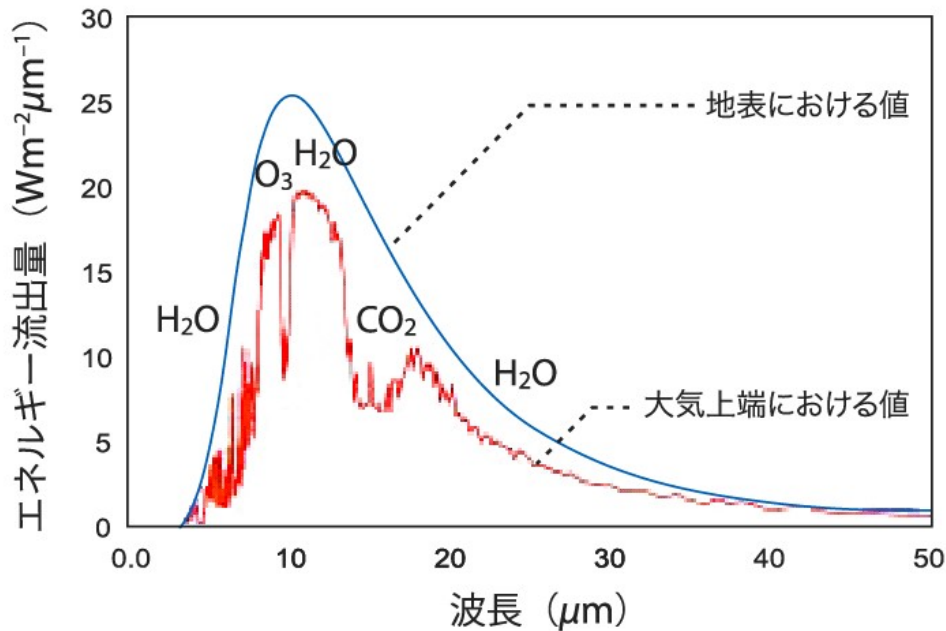
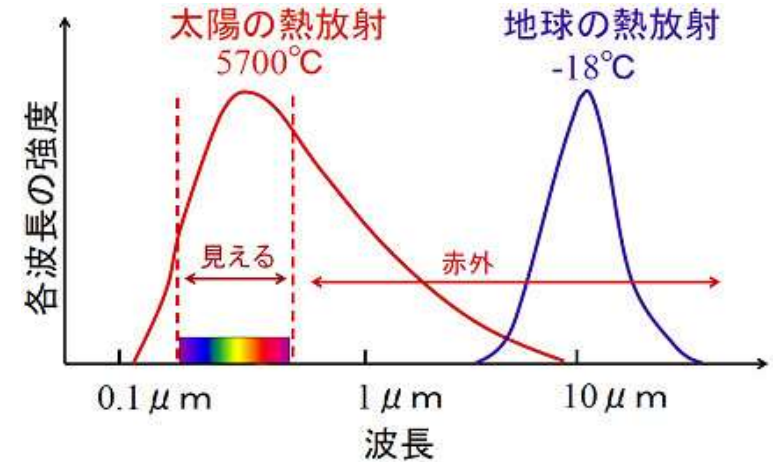
地球のエネルギー収支



出典: "Earth's Annual Global Mean Energy Budget" J. T. Kiehl and Kevin E. Trenberth⁶

地表からの輻射を遮る大気

- 太陽からの可視光は、ほぼ地表へ
- 地表からの赤外線は、水蒸気、二酸化炭素、オゾンが吸収。



各温室効果物質の寄与

水蒸気	48% (75 Wm^{-2})
二酸化炭素	21% (33 Wm^{-2})
雲	19% (30 Wm^{-2})
オゾン	6% (10 Wm^{-2})
その他	5% (8 Wm^{-2})

出典: 文部科学省科学技術・学術審議会・資源調査分科会報告書(平成19年)

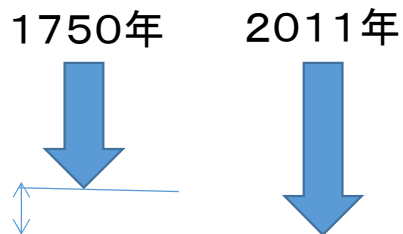
主な温室効果ガス係数(GWP)

温室効果ガス			温室効果ガス係数
二酸化炭素		CO2	1
メタン		CH4	21
一酸化二窒素		N2O	310
ハイドロフルオロカーボン		HFC	
	トリフルオロメタン	HFC-23	11,700
	ジフルオロメタン	HFC-32	650
パーフルオロカーボン		PFC	
	パーフルオロメタン	PFC-14	6,500
	パーフルオロエタン	PFC-116	9,200
六ふっ化硫黄		SF6	23,900

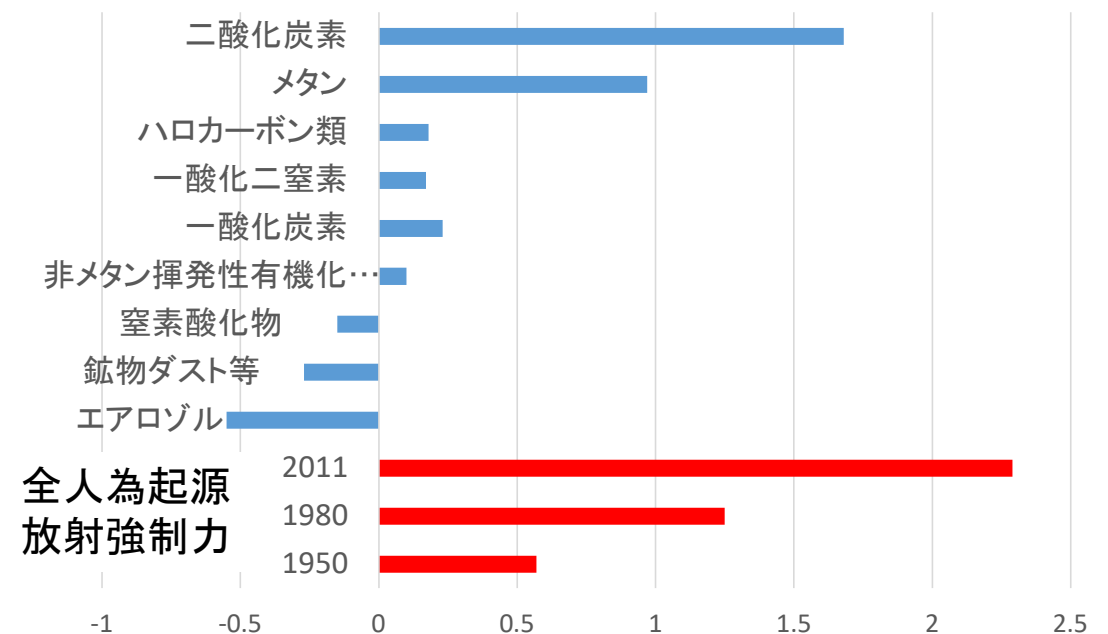
放射強制力(Radiative Forcing)

放射強制力とは

ある要因によって引き起こされるエネルギーフラックスの変化。
対流圏境界、又は大気の上端で計算される。
単位は、 Wm^{-2}



1750年を基準とした放射強制力(Wm^{-2})

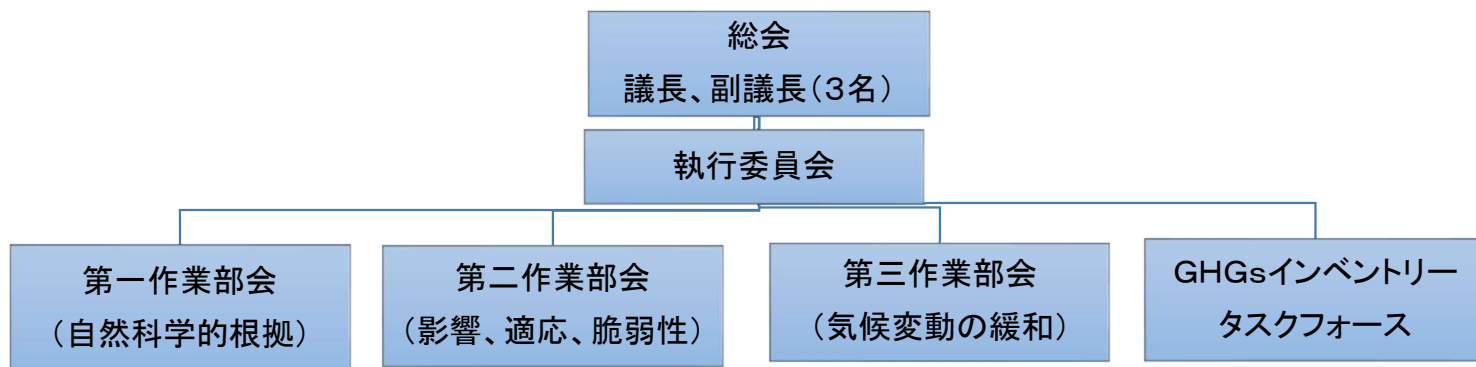


気候変動に関する政府間パネル IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)

人為起源による気候変化、影響、適応及び緩和方策に関し、科学的、技術的、社会経済学的な見地から包括的な評価を行うことを目的として、1988年に世界気象機関(WMO)と国連環境計画(UNEP)により設立された組織。

政府関係者よりは科学者の参加が多い。

新しい調査や研究を行うのではなく、すでに発表されている論文を調査・評価を行う。



第1次評価報告書(FAR): 1990年
第2次評価報告書(SAR): 1995年
第3次評価報告書(TAR): 2001年
第4次評価報告書(AR4): 2007年
第5次評価報告書(AR5): 2013年
第6次評価報告書(AR6): 近々

地球温暖化と温室効果ガスの相関

地上気温の上昇と二酸化炭素濃度との間には相関がある。

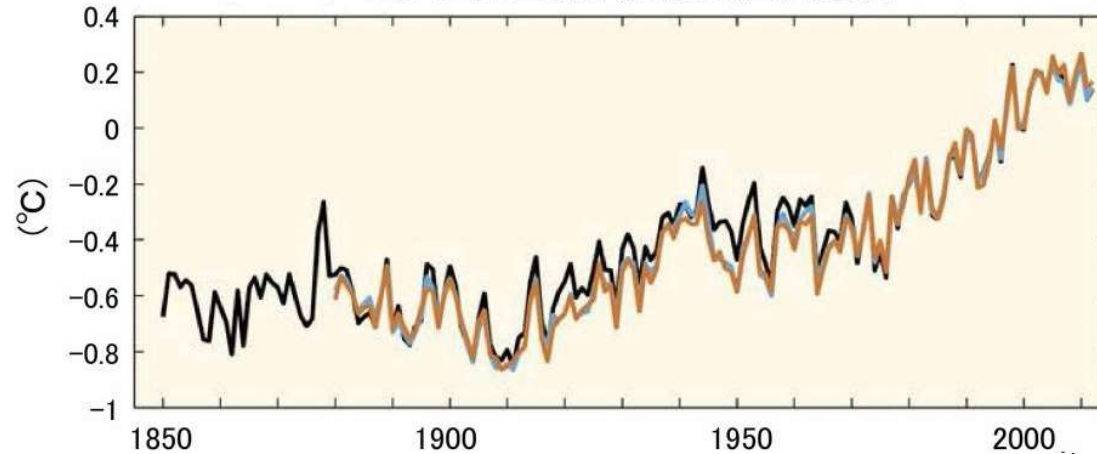


二酸化炭素が温暖化の原因

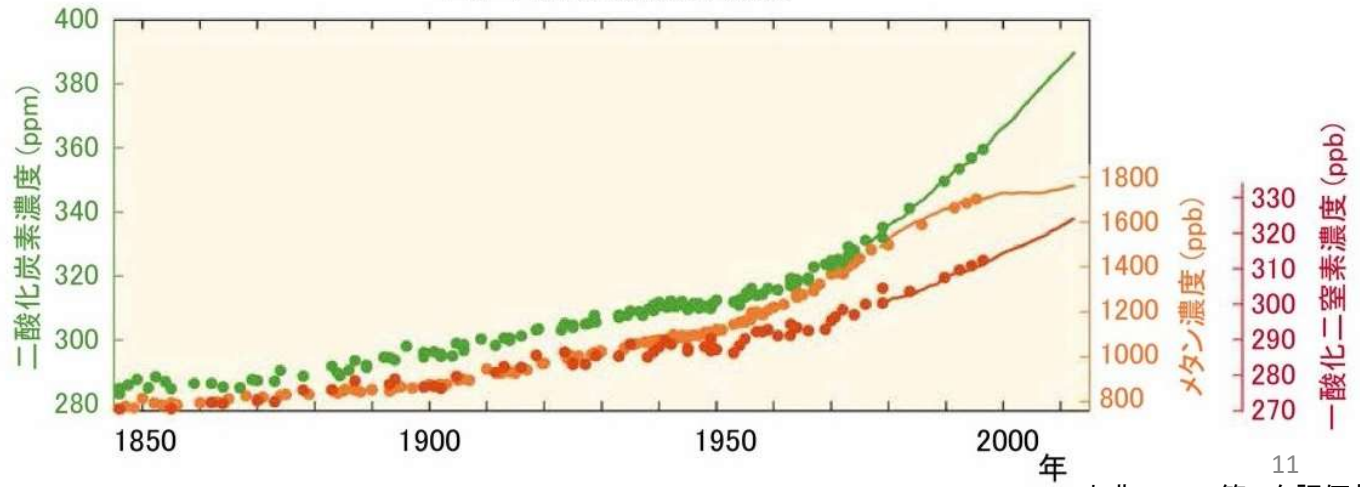
懐疑派の主張

相関関係はあるが
因果関係があると言えるのか

世界平均地上気温（陸域+海上）の偏差



世界平均温室効果ガス濃度



観測値と気候モデル計算値の一致

地球温暖化の人為起源説の科学的立証

1951～2010年にわたって観測された地上気温変化への寄与

観測された気温上昇

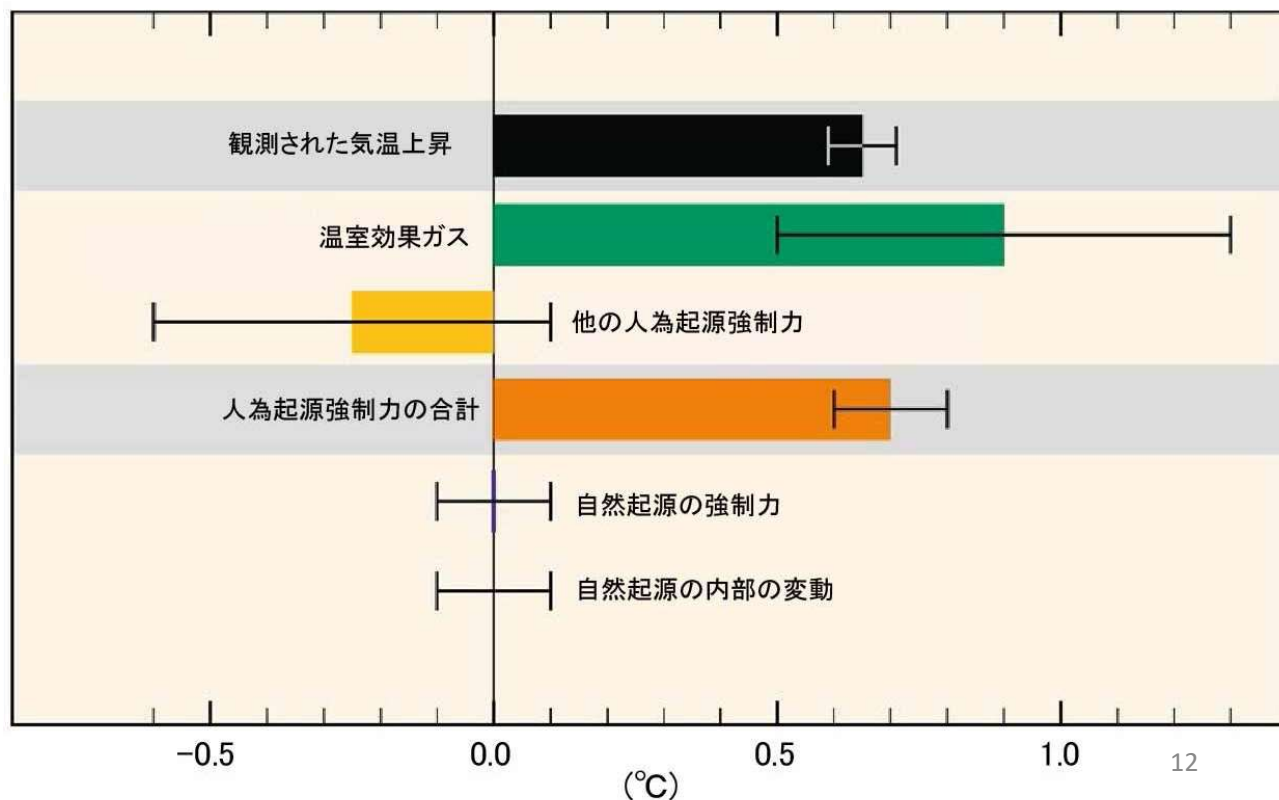
≡ 人為起源強制力の合計

= よく混合された温室効果ガス

+

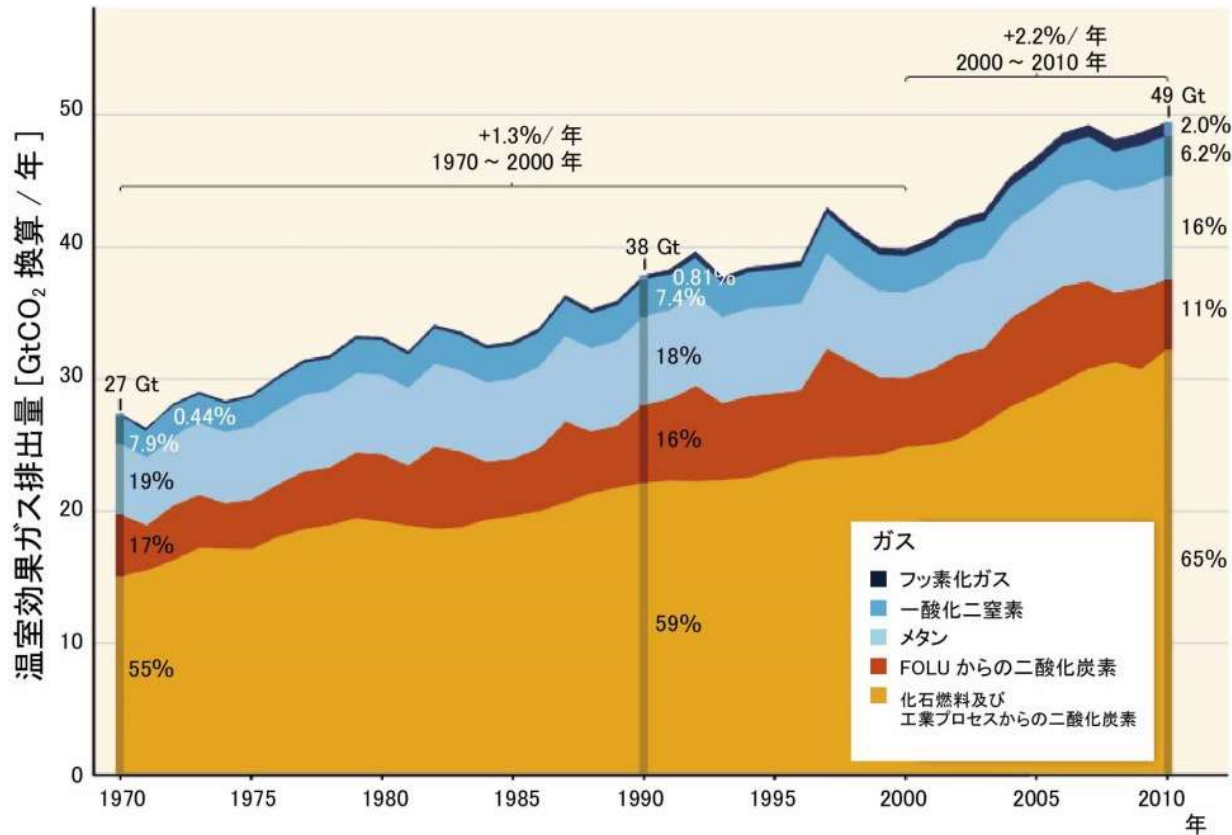
他の人為起源強制力(エアロゾルの冷却効果や土地利用変化の効果を含む)

気候モデルシミュレーション



増え続ける温室効果ガス

人為起源温室効果ガスのガス種別年間総排出量1970-2010年



GHG発生の原因

フッ素化ガス: 冷媒

一酸化二窒素: 燃焼、窒素肥料、硝酸製造

メタン: 農業、廃棄物埋立

FOLUからの二酸化炭素: 森林減少
(Food and Land Use)

化石燃料: 火力発電、自動車

工業プロセスからの二酸化炭素: セメント製造

気候変動の影響(これまで)

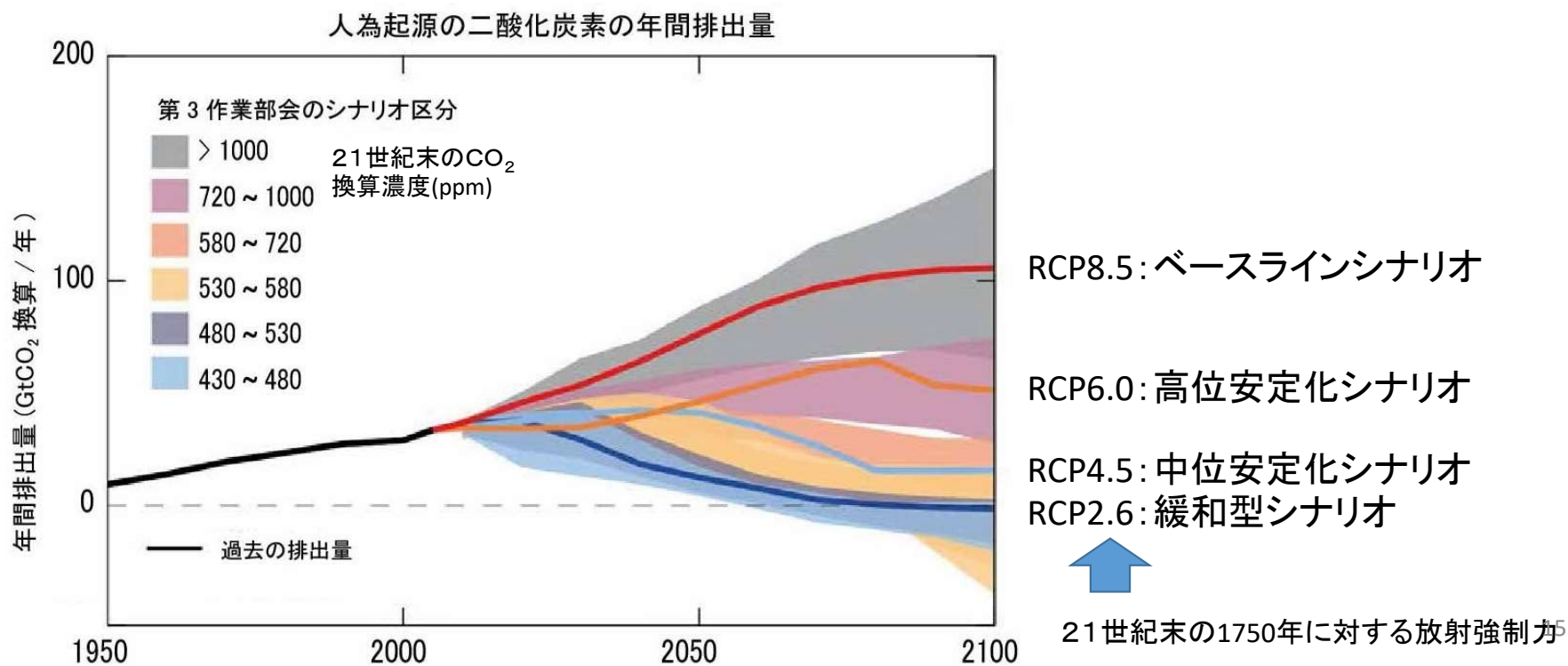
- 降水量又は雪氷の融解の変化が水文システムを変化させ、量と質の面で水資源に影響を与えている(確信度が中程度)。
- 陸域、淡水及び海洋の多くの生物種は、進行中の気候変動に対応して、その生息域、季節的活動、移動パターン、生息数及び生物種の相互作用を変移させている(確信度が高い)。
- 作物収量に対する気候変動の負の影響は、正の影響に比べてより一般的にみられる(確信度が高い)。
- 海洋生物に対する海洋酸性化の影響の一部は、人為的影響に起因するとされている(確信度が中程度)
- 暑熱に関連する人間の死亡率が増加し、寒さに関連する死亡率が減少している(確信度が中程度)
- 極端な降水と流量の増加傾向が最近検出されており、地域規模での洪水リスクが増大していることを示唆している(確信度が中程度)

気候予測や影響評価するためのシナリオ

代表的濃度経路: Representative Concentration Pathways (RCP)

将来の温室効果ガス安定化レベルと、そこに至るまでの経路のうち、代表的なものを選んだシナリオであり、“RCP”に続く数値が大きいほど、2100年における放射強制力大きい。

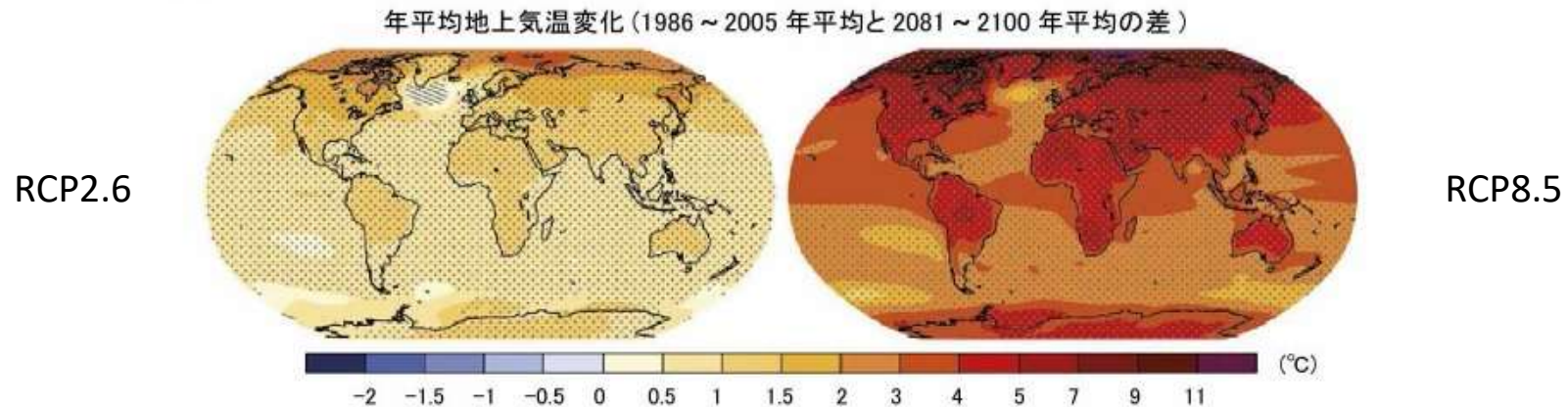
AR4ではSRESシナリオ(社会的・経済的な将来像に基づくシナリオ)が用いられていた。



代表的濃度経路(RCP)の特徴と気候予測

	年間CO ₂ 排出量	CO ₂ 換算濃度 (ppm)	2100年までの放射強制力	1986-2005年平均地上気温と2100年との温度差(°C)
RCP8.5	追加的緩和措置を取らず、増え続ける(BAU)	1313	増え続ける	2.6 - 4.8
RCP6.0	21世紀後半にピークを迎え減少	800	増え続ける	1.4-3.1
RCP4.5	21世紀前半にピークを迎え減少	630	安定化	1.1-2.6
RCP2.6	今後減少を続け、2100年にゼロ以下	475	ピークを迎えた後減少	0.3-1.7

注: 1986-2005年平均地上気温は、1850-1900年(工業化前)平均と比べ0.6°C高い



Discussion:

CO₂排出量削減・回収のための技術・制度

気候変動への適応策

		項目	事例
脆弱性と暴露の低減	適応	人間開発	教育、栄養、保健施設
		貧困緩和	地域資源の利用、セーフティーネット
		生活保障	生計の多様化
		災害リスクマネジメント	ハザードマップ、汚水管理
		生態系管理	湿地の維持、沿岸新規植林
		土地利用計画	都市計画、保護区
		構造的／物理的	防波堤、避難施設、新たな作物品種、かんがい 生態回復、遺伝子バンク、フードバンク、ワクチン接種
		制度的	保険、大災害債権、土地区画整理、技術移転、国家の適応計画
		社会的	教育、男女平等、モニタリング、各世帯での備え
		変化の領域	制度的経営的变化、意思決定と行動、信念、価値観
	変革		

気候変動に関する国際交渉

気候変動
枠組条約
採択
(1992)

条約
発効
(1994)

先進国に対して、法的拘束
力のある数値目標の設定
(途上国は削減義務なし)

COP3
京都議定書
採択
(1997)

京都議定書
発効
(2005)

京都議定書
第1約束期間
(2008-2012)

京都議定書
第2約束期間
(2013-2020)
※日本は参加せず

京都議定書第2約束期間
に参加しない先進国・途
上国の2020年の削減目
標・行動のルールを設定

COP16
カンクン
合意
(2010)

2020年までの削減目標・行動を
条約事務局に登録・実施
※我が国は現時点の目標として、
2005年度比3.8%減を登録
(2013年11月)

2015年のCOP21にお
いて2020年以降の全て
の国が参加する新たな枠
組みに合意

COP17
ダーバン・
プラットフォーム
フォーム
(2011)

COP21
パリ協定
(2015)
発効
(2016)

COP24
パリ協定
詳細決定
(2018)

パリ協定
本格運
用
(2020)

気候変動枠組条約

(UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change)

目的: 危険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させることを究極的な目的

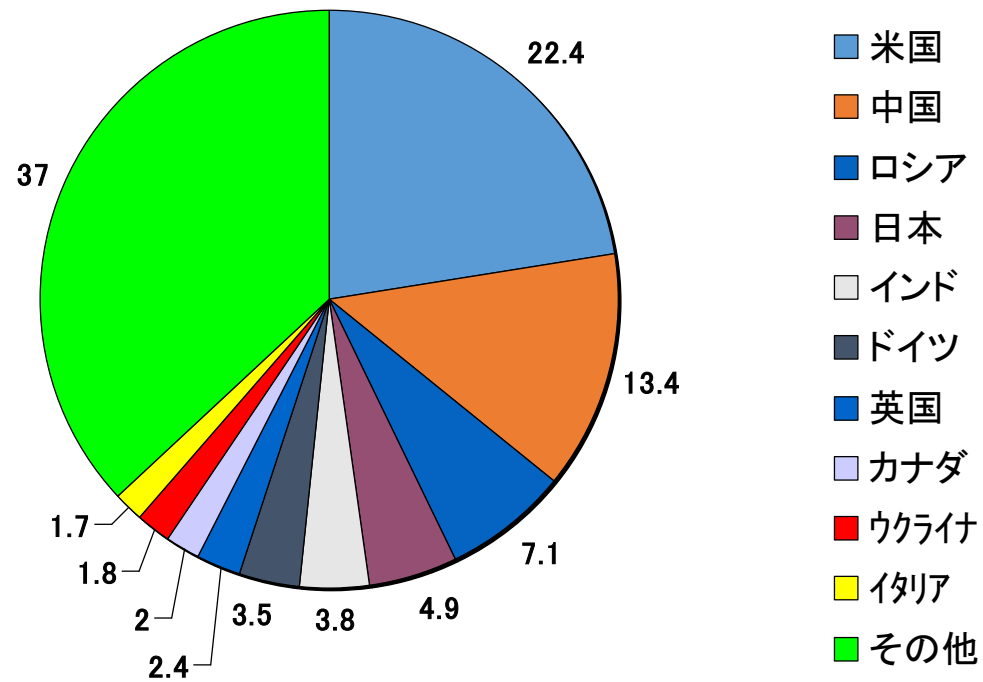
原則: 共通だが差異のある責任
 開発途上国の特別な状況への配慮
 予防原則
 持続可能な開発を推進する権利・責務
 協力的かつ開放的な国際経済体制の確立

約束: 全ての加盟国: 温室効果ガスの排出・吸収の目録作り
 温暖化対策の国別計画の策定と実施
 先進国+経済移行国: 温室効果ガス排出量を1990年のレベルに戻す
 (付属書 I) 上記を目指した政策・措置の情報提供
 先進国: 途上国への資金・技術の支援
 (付属書 II)

義務内容	I		途上国
	II 先進国	露東欧	
GHGsの排出・吸収源目録作成	●	●	●
温暖化防止の行動計画決定	●	●	●
温室効果ガスの排出削減 (単独実施・共同実施)	●	●	●
発展途上国への資金・技術提供	●		●

特徴・問題点: 緩やかな枠組み、途上国に排出削減の義務がない、世界を3種類に区分

国別CO₂排出量(1995年)





国連気候変動枠組条約 京都議定書(1997締結、2005発効)の概要

必要な政策(第2条)

省エネルギーの推進
吸収源の保全と強化
持続的農業の推進
研究開発
再生可能エネルギー
炭酸ガス固定化技術
環境に健全な技術
輸送部門削減
メタンガスの削減
廃棄物処理
エネルギー生産・輸送

温室効果ガスの削減(第3条)

- 目標年次： 2008年～2012年
- 基準年次： 1990年
HFC、PFC、SF₆は1995年も選択可
- 削減レベル： 全体として5%
(日▲6%、米▲7%、EU▲8%)
- 対象ガス： 6種類のガス
(CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆)
- 吸収源の扱い：一部考慮
 - 先進国間の排出権取引を導入
 - 先進国間の共同実施を導入
 - クリーン・デベロップメント・メカニズムCDM

日本の第4回国別報告書(2006年) 温室効果ガス排出量及び吸収量の推移

↓ 条約発効、公布

[百万t CO ₂ 換算]	GWP	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
二酸化炭素 (CO ₂) 排出	1	1,122.3	1,131.4	1,148.9	1,138.7	1,198.2	1,213.1	1,234.8	1,242.0	1,195.2	1,228.4	1,239.0	1,213.6	1,247.8	1,259.4
吸収	1	-83.9	-83.9	-85.6	-90.1	-93.5	-96.7	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
メタン (CH ₄)	21	24.8	24.7	24.6	24.5	24.1	23.5	22.9	22.1	21.5	21.1	20.7	20.2	19.5	19.3
一酸化二窒素 (N ₂ O)	310	40.2	39.7	39.9	39.6	40.5	40.6	41.5	41.9	40.6	35.1	37.5	34.6	34.7	34.6
ハイドロフロオロ カーボン類 (HFCs)	HFC-134a: 1,300など	NE	NE	NE	NE	NE	20.2	19.9	19.8	19.3	19.8	18.5	15.8	12.9	12.3
パーフルオロカー ボン類 (PFCs)	PFC-14: 6,500など	NE	NE	NE	NE	NE	12.6	15.3	16.9	16.6	14.9	13.7	11.5	9.8	9.0
六ふっ化硫黄 (SF ₆)	23,900	NE	NE	NE	NE	NE	16.9	17.5	14.8	13.4	9.1	6.8	5.7	5.3	4.5
総排出量 (CO ₂ 吸収除く)		1,187.3	1,195.8	1,213.4	1,202.9	1,262.8	1,326.9	1,351.8	1,357.5	1,306.6	1,328.4	1,336.2	1,301.4	1,330.0	1,339.1
純排出/吸収量 (CO ₂ 吸収含む)		1,103.4	1,111.9	1,127.8	1,112.8	1,169.3	1,230.2	1,351.8	1,357.5	1,306.6	1,328.4	1,336.2	1,301.4	1,330.0	1,339.1

日本の第4回国別報告書(2006年) 政策・措置(抜粋)

1. 地球温暖化対策の目指す方向

- 京都議定書の6%削減約束を確実に達成する。
- 地球規模での温室効果ガスの更なる長期的・継続的な排出削減を目指す。

2. 基本的考え方

- 環境と経済の両立
- 技術革新の促進
- すべての主体の参加・連携の促進(国民運動、情報共有)
- 多様な政策手段の活用
- 評価・見直しプロセスの重視
- 国際的連携の確保

4. 目標達成のための対策と施策

(1) 温室効果ガスの排出削減・吸収等に関する対策・施策

① エネルギー起源二酸化炭素

技術革新の成果を活用して、「エネルギー関連機器の対策」、「事業所など施設・主体単位の対策」を引き続き推進するとともに、日本のエネルギー需給構造そのものを省CO₂型に変えていくため、「都市や地域の構造や公共交通インフラを含めた社会経済システムを省CO₂型に変革する対策」に取り組む。

日本の第4回国別報告書(2006年)

温室効果ガス排出量の部門別実績と将来見通し

(単位：百万 t-CO₂)

	基準年 百万 t-CO ₂	2002 年度実績		2010 年度 現状対策ケース		2010 年度 対策強化ケース	
		百万 t-CO ₂	基準年 総排出 量比	百万 t-CO ₂	基準年 総排出 量比	百万 t-CO ₂	基準年 総排出 量比
エネルギー起源 CO ₂	1,048	1,174	10.2%	1,115	5.4%	1,056	0.6%
産業部門	476	468	-0.7%	450	-2.1%	435	-3.3%
民生部門	273	363	7.3%	333	4.9%	302	2.3%
(業務その他部門)	144	197	4.3%	178	2.8%	165	1.7%
(家庭部門)	129	166	3.0%	155	2.1%	137	0.6%
運輸部門	217	261	3.6%	259	3.4%	250	2.7%
エネルギー転換部門	82	82	0.0%	73	-0.8%	69	-1.1%
非エネルギー起源 CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O	139	128	-0.9%	130	-0.8%	124	-1.2%
非エネルギー起源 CO ₂	74	73	-0.1%	74	0.0%	70	-0.3%
CH ₄	25	20	-0.4%	20	-0.3%	20	-0.4%
N ₂ O	40	35	-0.4%	35	-0.4%	34	-0.5%
代替フロン等3ガス	50	28	-1.7%	67	1.4%	51	0.1%
HFC	20	13	-0.6%	46	2.1%	34	1.1%
PFC	13	10	-0.2%	9	-0.3%	9	-0.3%
SF ₆	17	5	-0.9%	12	-0.4%	8	-0.7%
温室効果ガス総排出量	1,237	1,331	7.6%	1,311	6.0%	1,231	-0.5%

温室効果ガス吸収源 -3.9%

京都メカニズムの活用 -1.6%

計 -6.0%

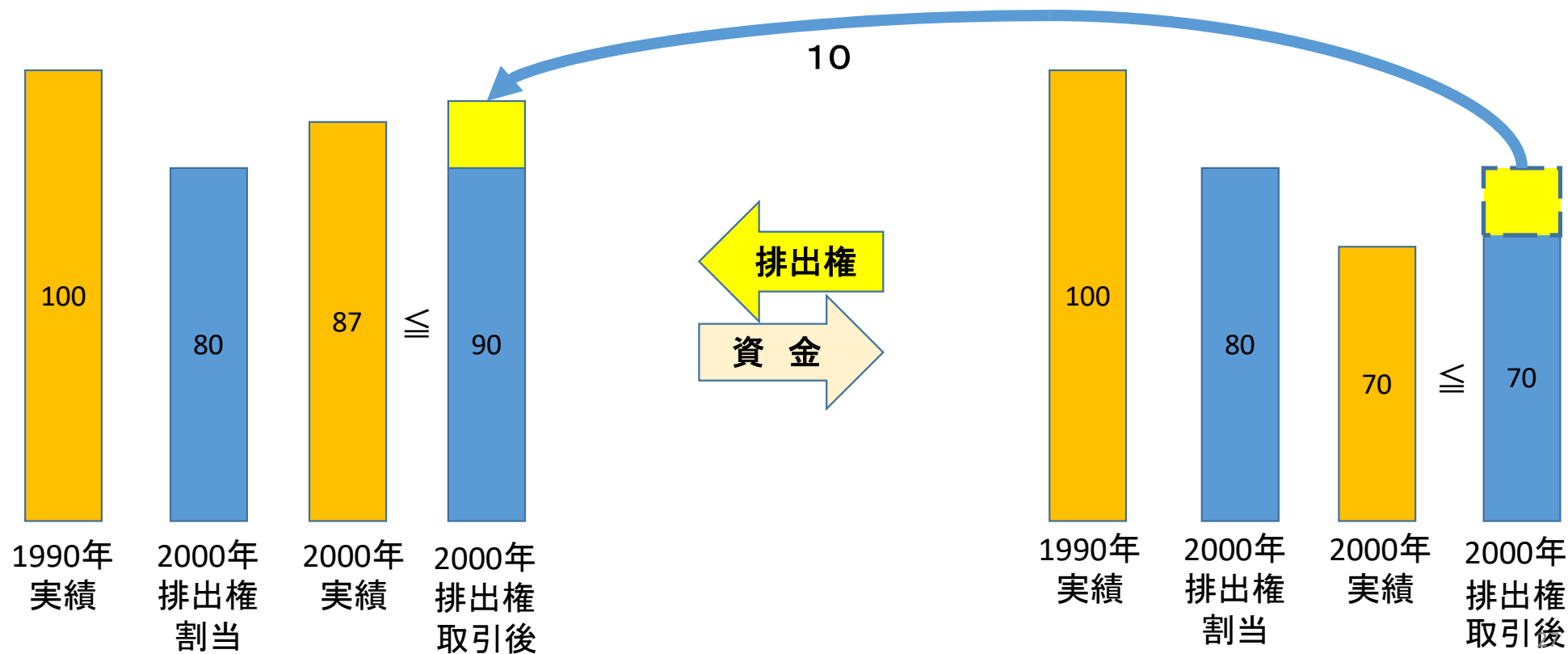
国連気候変動枠組条約京都議定書 様々な排出権取引メカニズム

- 排出権取引 (IET: International Emissions Trading) :
削減義務を負う先進国の間で認められる排出量の取引【京都議定書17条】
- 共同実施 (JI: Joint Implementation) :
削減義務を負う先進国間で行なわれるプロジェクトベースの削減量取引【京都議定書6条】
- クリーン開発メカニズム (CDM: Clean Development Mechanism) :
削減義務を負う先進国と削減義務を負わない途上国の間での共同活動に伴う削減量の取引【京都議定書12条】

排出権取引

A国(企業): エネルギー効率が良い
1億円で13t削減
20t削減するには2億円必要

B国(企業): エネルギー効率が悪い
0.3億円で20t削減
0.5億円で30t削減

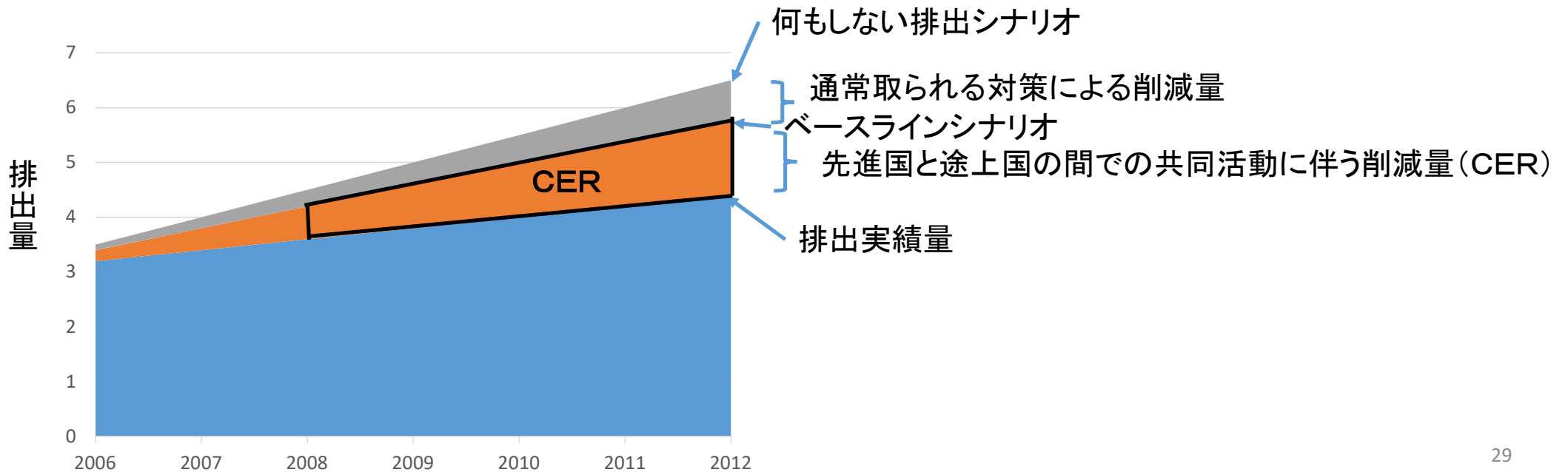


Discussion: 排出権取引の功罪

クリーン開発メカニズム

CDM: Clean Development Mechanism

- 削減義務を負う先進国と削減義務を負わない途上国の間での共同活動に伴う削減量の取引
- 認証された事業活動がない場合に生じる削減に対し、追加的な排出削減であること

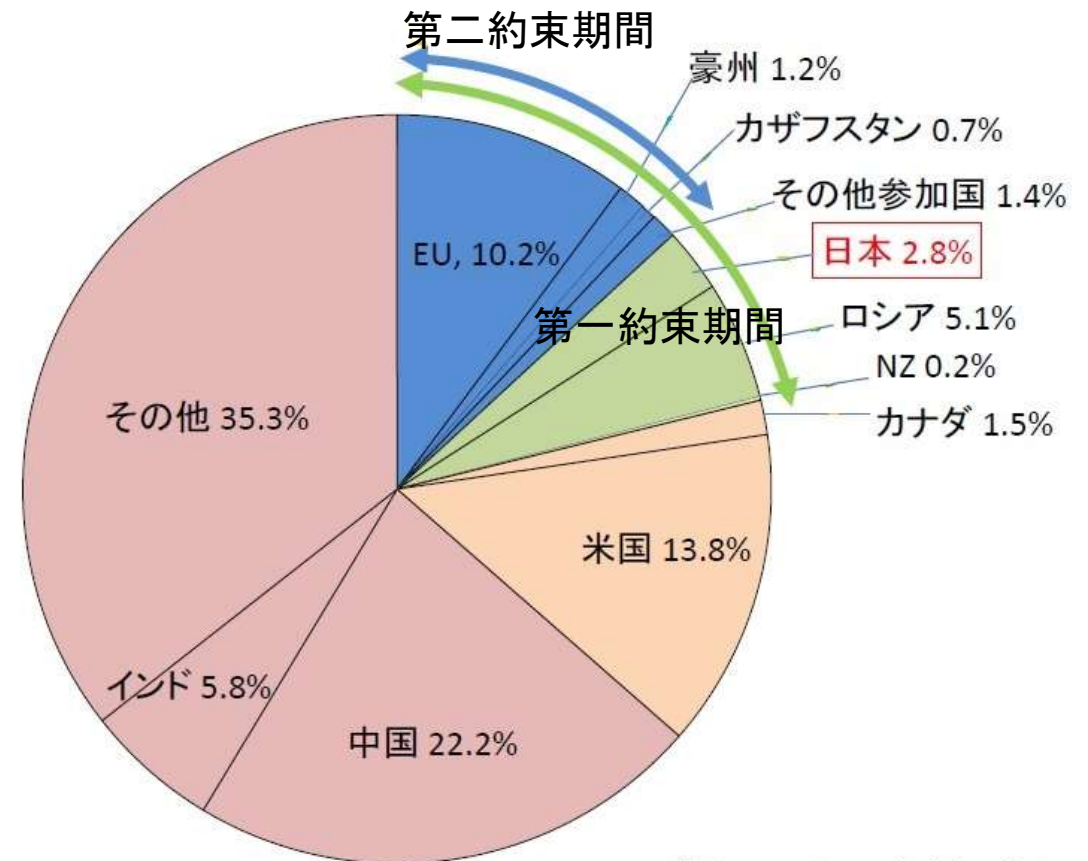


CDMプロジェクト

実施国	プロジェクト名	プロジェクトの概要	排出削減量 (万トンのCO ₂ /年)
中国	山東東岳HFC23破壊プロジェクト	液中燃焼法による焼却炉を設置することにより、CFC22の製造工程において副産物として生じるHFC23を分解する。	1011
韓国	大韓民国温山における亜酸化窒素放出削減プロジェクト	アジピン酸製造時に放出される亜酸化窒素の熱分解工場を設置し、亜酸化窒素の回収、燃焼により大気中に放出される温室効果ガスの削減を図る。	915
ブラジル	埋め立て処分場ガスマネジメントプロジェクト	埋め立て処分場においてメタンの回収及び分解の効率を改善する装置を導入する。	66
中国	中国新疆ウルムチ・トリ30MW風力発電プロジェクト	30MW(1.5MWタービン×20基)の風力発電所を建設する。	9.4
ベトナム	ビール工場省エネモデル事業	ビール工場において、廃蒸気再利用システム、冷却電力の合理化システム、殺菌機の水・蒸気利用合理化システム、バイオガスボイラシステム等の省エネルギー技術を導入し、温室効果ガスの排出を削減する。	0.9

Discussion: 京都議定書の評価

- 先進国に数値義務を課した。
- 米国は不参加。中国は削減義務がない。
(二国で世界の排出量の35%)
- 世界全体の排出量のカバー率
第一約束期間(2008-2012) 22.0%
第二約束期間(2013-2020) 13.4%
- 公平性, 実効性に欠ける



※排出シェアは2010年時点のもの

で、どうする？

全ての国の参加に向けて

◆コペンハーゲン合意(COP15、2009年)

- 産業化以前からの気温上昇を2°C以内に抑える
- 先進国は2020年の削減目標、途上国は削減行動を条約事務局に2010年1月末までに提出

密室協議に少数の途上国が反発、「合意に留意する」に留まる

◆カンクン合意(COP16、2010年)

- コペンハーゲン合意の内容を正式に決定
- 先進国・途上国両方の削減目標・行動が同じ枠組みの中に位置づけられる
- 世界全体の気温上昇を産業化(産業革命)以前に比べ2°C以内に抑えるとの観点から温室効果ガスの大幅な削減の必要性を認識
- 2050年までの世界規模の大幅削減及び早期のピークアウトに合意

◆ 経験もとづく課題

- 全ての国に適用される国際枠組みに合意するに当たって、京都議定書のように特定の排出国に削減目標を割り当てる方法には大きな困難が伴う
- カンクン合意のように締約国が自主的に排出削減目標を設定するだけでは、長期目標を達成するために全体として十分ではない

「コペンハーゲン合意」に基づき提出された削減目標・行動の例(先進国)

	2020年の排出削減量	基準年
日本	25%削減、ただし、全ての主要国による公平かつ実効性のある国際枠組みの構築及び意欲的な目標の合意を前提	1990
米国	17%程度削減、ただし、成立が想定される米国エネルギー気候法に従うもので、最終的な目標は成立した法律に照らして事務局に対して通報される(注1)	2005
カナダ	17%削減、米国の最終的な削減目標と連携	2005
ロシア	15-25% (前提条件: 人為的排出の削減に関する義務の履行へのロシアの森林のポテンシャルの適切な算入、すべての大排出国による温室効果ガス的人為的排出の削減に関する法的に意義のある義務の受け入れ)	1990
豪州	5%から15%又は25%削減(注2)	2000
EU	20% / 30%削減(注3)	1990

(注1: 米国) 審議中の法案における削減経路は、2050年までに83%削減すべく、2025年には30%減、2030年には42%減。

(注2: 豪州) 大気中の温室効果ガス濃度を450ppm又はそれ以下に安定化させる合意がなされる場合は、2020年までに2000年比で25%削減。また、条件なしに2020年までに2000年比5%減、主要途上国が排出抑制を約束し、先進国が比較可能な約束を行う場合には、2020年までに2000年比15%減。

(注3: EU) 他の先進国・途上国がその責任及び能力に応じて比較可能な削減に取り組むのであれば、2020年までに1990年比30%減。

「コペンハーゲン合意」に基づき提出された削減目標・行動の例(途上国)

国名	削減目標・行動
中国	2020年のGDP当たりCO2排出量を2005年比で40～45%削減、2020年までに非化石エネルギーの割合を15%、2020年までに2005年比で森林面積を4千万ha増加等。これらは自発的な行動。
インド	2020年までにGDP当たりの排出量を2005年比20～25%削減(農業部門を除く)。削減行動は自発的なもので、法的拘束力を持たない。
ブラジル	2020年までにBAU比で36.1-38.9%。具体的な行動として、熱帯雨林の劣化防止、セラード(サバンナ地域の植生の一種)の劣化防止、穀倉地の回復、エネルギー効率の改善、バイオ燃料の増加、水力発電の増加、エネルギー代替、鉄鋼産業の改善等
南アフリカ	2020年までにBAU比で34%、2025年までにBAU比で42%の排出削減。これらの行動には先進国の支援が必要であり、メキシコ会合において条約及び議定書の下での野心的、公平、効果的かつ拘束力のある合意が必要。先進国の支援があれば、排出量は2020年から2025年の間にピークアウトし、10年程度安定し、その後減少。
韓国	温室効果ガスの排出量を追加的な対策を講じなかった場合(BAU)の排出と比べて2020年までに30%削減。

パリ協定(COP21、2015年)

- ◆ 2016年10月発効要件を満たし、11月に発効。現在、143ヶ国が批准。
日本は、2016年11月8日国会承認、14日公布、12月8日効力発生。
- ◆ 世界共通の長期削減目標として、産業革命前からの気温上昇を2°C未満に抑制するとともに、1.5°Cまでへの抑制に向けた努力を追求【第2条1】
- ◆ 主要排出国・途上国(米国, 中国, インド等)を含む全ての国が,
 - ①削減目標(貢献)を策定し、国内措置を遂行、5年ごとに同目標を提出し【第4条2及び9】
↳ NDC: Nationally Determined Contribution
 - ②自国の取組状況を定期的に報告し、レビューを受け【第13条7及び11】
 - ③世界全体としての実施状況の検討を5年ごとに行う【第14条】
- ◆ 二国間オフセット・クレジット制度(JCM)【第6条】
- ◆ 資金、技術開発・移転、能力開発等【第9,10,11条】

COP21までに主要国が提出したINDC

(Intended Nationally Determined Contribution。パリ協定のNDCとなる)

	目標の内容
スイス	2030年までに△50%(1990年比)
EU	2030年までに少なくとも△40%(1990年比)
ノルウェー	2030年までに少なくとも△40%(1990年比)
米国	2025年に△26%～△28%(2005年比)。28%削減に向けて最大限取り組む
ロシア	2030年までに△25～△30%(1990年比)が長期目標となり得る
カナダ	2030年までに△30%(2005年比)
中国	2030年までにGDP当たりCO2排出量△60～△65%(2005年比) 2030年前後にCO2排出量のピーク
韓国	2030年までに△37%(BAU比)
ニュージーランド	2030年までに△30%(2005年比)
日本	2030年度までに2013年度比△26.0%(2005年度比△25.4%)
オーストラリア	2030年までに△26～28%(2005年比)
ブラジル	2025年に△37%(2005年比) 2030年に△43%(2005年比)
インドネシア	2030年までに△29%(BAU比)
インド	2030年までにGDP当たり排出量△33～△35%(2005年比)

まとめ

IPCC:

地球温暖化は科学的事実

気候変動枠組み条約:
(1992)

究極的目的(GHG濃度の安定化)
先進国、経済移行国、開発途上国に分断

京都議定書:
(1997)

一部の国の排出量の制限
米国の裏切り

コペンハーゲン、カンクン合意:
(2009, 2010)

全ての国の参加
各国が計画を提出

パリ協定(2015):

世界共通の長期削減目標(気温上昇を2°C未満)

NDC第2回提出(2020)

多くの国(排出量で7割)が未提出

Discussion: 各国の計画を足し合わせると3°C上昇(IPCC)
なぜ、排出量が減らないのか?