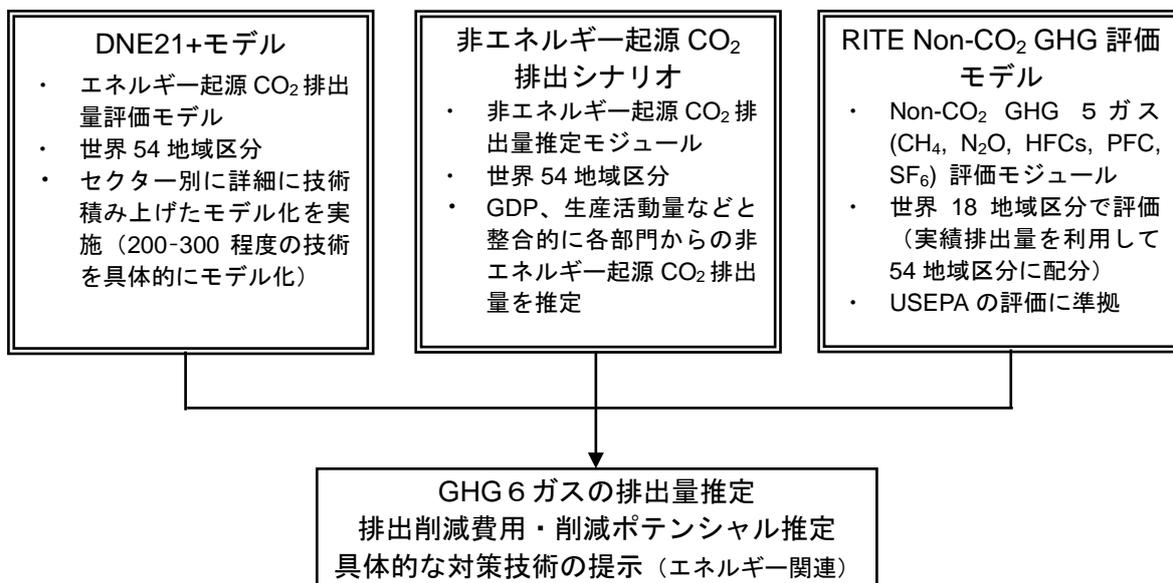


## R I T E 世界モデルの概要

### <概要>

- RITE が中期目標検討委員会における分析・評価に用いたモデルは、分析評価の中核となる①エネルギー起源 CO<sub>2</sub> 評価のためのモデル DNE 21 +、分析した複数の選択肢によらず一定のシナリオとして想定した②非エネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出シナリオ、5 種類の温室効果ガス排出、削減を評価する③Non-CO<sub>2</sub> GHG 評価のためのモデルの 3 種類である。
- 基準年の総 GHG 排出量は、UNFCCC に報告のある附属書 I 国については UNFCCC の実績値（平成 21 年 2 月時点のデータ（UNFCCC, 2009））を UNFCCC に報告のない非附属書 I 国については IEA の統計値（IEA, 2007a）を基準として用いた。一方、エネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出量については、すべての国で IEA の統計値を用いた。エネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出量も、UNFCCC の報告値と IEA の統計値で異なっている国が見受けられるが、附属書 I 国については、総 GHG 排出量について UNFCCC と整合させることを優先させることとし、Non-CO<sub>2</sub> GHG 排出量は、総 GHG 排出量（UNFCCC）からエネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出量（IEA）および非エネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出量（UNFCCC）を差し引いた値として定義した。



# I. エネルギー起源 CO<sub>2</sub> 評価モデル : DNE21+

## 1. 特徴

- DNE 21+モデルでは、各種セクターの生産活動量（粗鋼生産、セメント生産量など）や活動量（運輸部門の輸送量など）、その他部門の最終エネルギー需要量、及び各種技術の技術特性・設備コストなどを所与とした上で、世界全体のコストが最も安価になる統合的なエネルギー・システム（エネルギーフロー、エネルギー関連設備容量など）を導出できる。
- 排出制約（排出削減目標や排出量の上限值、原単位改善目標、炭素税など）が加わった場合、想定したすべての条件を満たしつつコストが最小となるエネルギー・システムを導出することができる。
- 主な特徴としては、1) 2050年までの長期的な分析が可能、2) 世界全体を対象としつつ詳細な地域分割により地域的な差異を分析可能、3) 200～300程度の具体的な温暖化対策をモデル化しており、具体的な排出削減対策までを詳細に評価可能、などが挙げられる。
- エネルギー起源のCO<sub>2</sub>のみを評価対象としている。
- 完全予見の下での費用効率性を基準に評価を行うモデルであり、エネルギー・セキュリティなど、将来の不確実性に関する要因を考慮していないので、結果の解釈には注意が必要。
- 発電設備などの大規模設備の建設にあたっては、長いリードタイムを必要とするものもあるが、モデルではリードタイムは考慮していないので、結果の解釈には注意が必要。

## 2. モデル構造

- 評価対象期間における世界全体のエネルギー・システム総コストを最小化する（最適化型モデル（線形計画モデル）。エネルギー供給部門からエネルギー消費部門まで、エネルギー輸出入、時点間の設備推移までも含めてハードリンクしており、完全に統合的なシステムを算定する。）。
- 最適化代表時点は2005, 2010, 2015, 2020, 2025, 2030, 2040, 2050年の8時点（2005年は2003～2007年、2010年は2008～2012年、2015年は2013～2017年、・・・をそれぞれ代表している）
- 世界全体を54地域に地域分割（米国、カナダ、オーストラリア、中国、インド、ロシアはさらに1国内を分割、計77地域分割）。
- エネルギー供給技術（各種発電技術、石油精製、石炭ガス化技術など）、二酸化炭素分離・回収、貯留・隔離については、各技術のコストやエネルギー効率などを明示的にモデル化（ボトムアップ的）。
- エネルギー需要技術については、
  - ・ エネルギー多消費産業のうち、鉄鋼、セメント、紙パ、アルミ、化学の一部（石油化学のうちエチレン・プロピレン製造、アンモニア製造）、運輸（自動車）、民生の一部については、各技術のコストやエネルギー効率などを明示的にモデル化（ボトムアップ的）。これらの部門の活動量（産業部門は生産量、自動車は輸送需要、民生の一部は機器の利用時間）は外生的に想定し、

モデル計算においては固定とする。一方、技術選択は、モデルで内生的に決定され、エネルギー消費量などが導出される。

- それ以外の部門については、地域によって技術特性が様々であったり、将来の技術が多様であると予想されるなど、個別技術の積み上げを行うことが必ずしも的確な評価につながらないと考えて、個別技術としては想定せず、最終エネルギー需要を産業、運輸、民生部門別にマクロ的に4種に区分（固体燃料需要、液体燃料需要（ガソリン需要、軽質油需要、重質油需要）、気体燃料需要、電力需要）してモデル化（トップダウン的）し、全部門にわたる評価を実施。
  - 省エネルギー効果は、長期価格弾性値を用いて評価。
- 各設備については、設備のヴィンテージ（過去の何年にいくらの容量の設備が導入されたか）を考慮しているため、時点によって代替のための費用効率性が異なることが明示的に考慮され、それが費用効率的な技術選択に反映される。設備寿命を残して新たな設備の建設も、当然、高い費用と算出されるが、モデル上、考慮できる。
  - 分割地域間のエネルギー（石炭、石油、天然ガス、合成油、エタノール、電力、水素）およびCO<sub>2</sub>の輸送をモデル化。
  - 8種の一次エネルギーを考慮（石炭、石油（在来型、非在来型）、天然ガス（在来型、非在来型）、水力・地熱、原子力、風力、太陽光、バイオマス）。
  - 電力需要については、電力負荷変動に合わせた供給となるように、年負荷持続曲線を基に、電力負荷の大きさによって4時間帯に区分し、それぞれ需給バランスがとれるようにモデル化。これによって、ベース電源、ピーク対応電源など、それぞれの発電技術の特性にあった評価を可能としている。
  - 各種エネルギー変換過程（各種発電、石炭ガス化・液化、天然ガス改質、バイオマス液化など）、二酸化炭素分離・回収、貯留・隔離（CCS）などをモデル化。（ただし、CCSについては、中期目標検討委員会のモデルチーム間における整合をとり、2020年の各国削減ポテンシャルの検討からは除外し、2020年以降のみの期間について利用可能として評価を行った。）

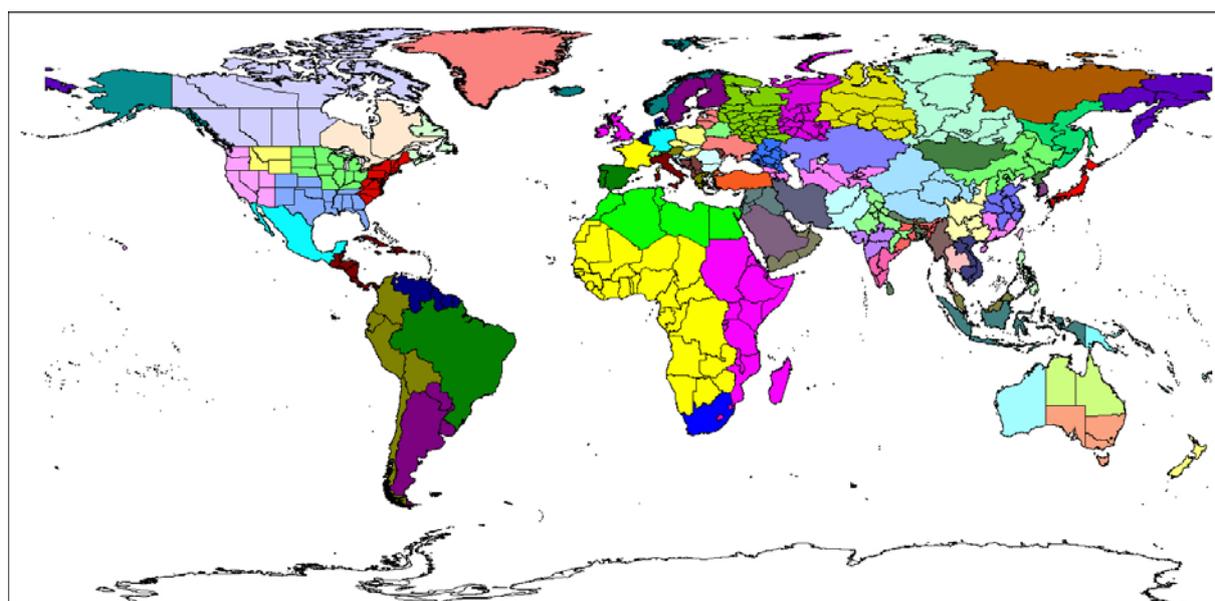


図 1-1 DNE21+における世界の地域分割

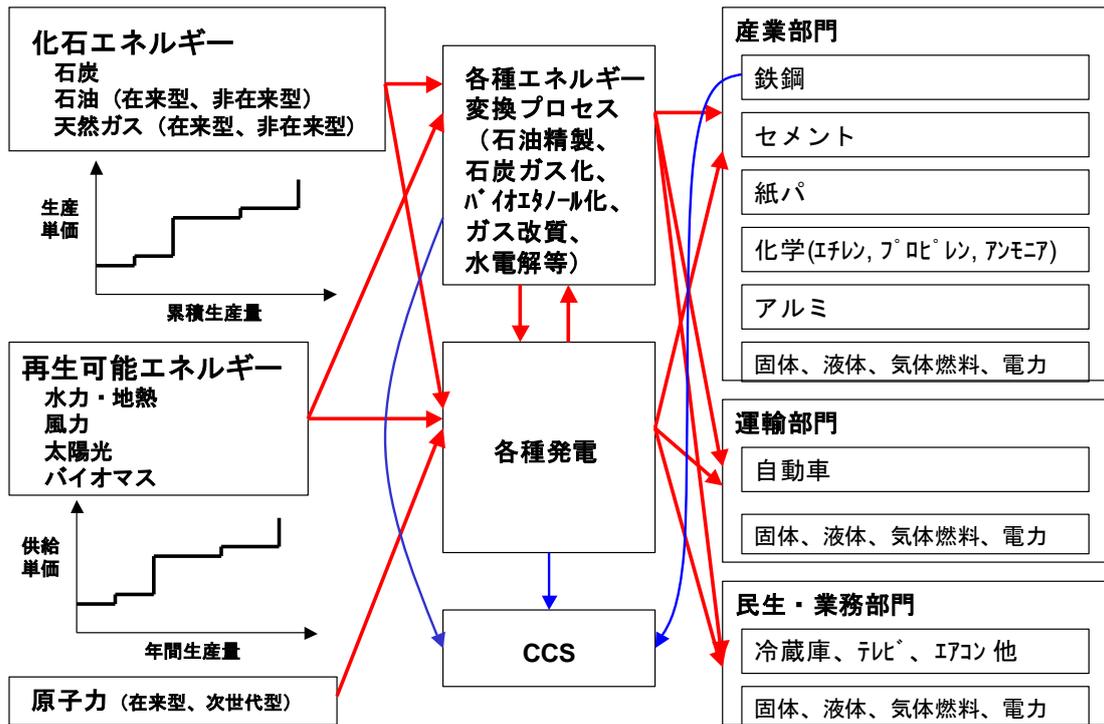


図 1-2 DNE21+におけるエネルギーフローの全体概要

表 1-1 DNE21+において考慮している具体的な対策技術

部門	技術
発電部門	石炭火力(低効率(亜臨界)、中効率(超臨界)、高効率(超超臨界~IGCC/IGFC)、燃焼前CCS付IGCC)、石油火力(低効率(ディーゼル発電等)、中効率(亜臨界)、高効率(超臨界)、CHP)、合成油火力(中効率、高効率)、天然ガス火力(低効率(蒸気タービン)、中効率(通常型NGCC)、高効率(高温型NGCC)、CHP、酸素燃焼発電)、バイオマス火力(低効率、高効率)、原子力発電(在来型、次世代(第IV世代等))、水力・地熱発電、風力発電、太陽光発電、風力・太陽光発電用蓄電システム、水素発電、送電(在来型、超伝導高効率)、CCS(燃焼後回収。石炭火力、石油火力、合成油火力、天然ガス火力、バイオマス火力に適用可)
産業部門	
鉄鋼	高炉転炉法(低効率(小規模)、中効率(大規模)、高効率(大規模。CDQ、TRT、副生ガス効率回収設備を標準装備)、次世代(高効率設備に加え、SCOPE21等の次世代コークス炉を採用、廃プラ・廃タイヤ利用も考慮)、水素還元製鉄)、COG回収(低効率・中効率高炉転炉法に後付可)、LDG回収、CDQ、TRT(中効率高炉転炉法に後付可)、直接還元法(天然ガスベース(中効率、高効率)、ガス化水素ベース)、スクラップベース電炉法(低効率(小規模)、中効率(三相交流アーク炉)、高効率(直流水冷炉壁アーク炉。原料予熱装置等も標準装備))、CCS(高炉転炉法に適用可)
セメント	小規模設備：竖窯、湿式ロータリーキルン、乾式ロータリーキルン、SP/NSP乾式ロータリーキルン(原料予熱装置としてサスペンション・プレヒータ(SP)を装備。一部仮燃炉(NSP)を装備)、新型流動床シャフト炉(SP/NSP及び高効率クリンカクーラを装備) 大規模設備(小規模設備より高効率)：湿式ロータリーキルン、乾式ロータリーキルン、SP/NSP乾式ロータリーキルン、SP/NSP乾式ロータリーキルン(BAT)(高効率クリンカクーラに加え、SPの5、6酸化もしくは高効率廃熱回収装置等を装備)
紙パ	化学パルプ製造工程(低効率、中効率、高効率、次世代)、古紙再生工程(低効率、中効率、高効率)、抄紙工程(低効率、中効率、高効率、次世代)、黒液回収・利用(低効率、高効率)、製紙スラッジボイラ、蒸気タービン発電システム
アルミ	ゼーターベルグ式アルミ製錬、プリベーク式アルミ製錬
化学	エチレン・プロピレン：ナフサ分解(低効率、中効率、高効率、次世代)、その他生産(エタンクラッカー等。低効率、中効率、高効率) アンモニア：石炭ベース(低効率、中効率、高効率)、石油ベース(低効率、中効率、高効率)、天然ガスベース(低効率、中効率、高効率)
運輸	小型乗用車、大型乗用車、バス、小型トラック、大型トラックに区分。 内燃機関利用(従来型内燃機関自動車(低効率、高効率)、ハイブリッド自動車、プラグインハイブリッド自動車。内燃機関はガソリンエンジン及びディーゼルエンジンの二種を考慮)、電気自動車、燃料電池自動車、代替燃料(バイオエタノール、バイオディーゼル、CNG)。バイオエタノールはガソリン、バイオディーゼルはディーゼルへの混合利用を考慮)
民生	冷蔵庫(低効率、中効率、高効率)、照明(小型白熱灯、小型蛍光灯、小型次世代(LED等)、中型中効率蛍光灯、中型高効率蛍光灯、中型次世代(LED、有機EL等)、大型中効率HID(高輝度放電灯)、大型高効率HID、大型次世代(LED等))、テレビ(小型低効率、小型高効率、大型低効率、大型高効率、大型次世代(液晶、プラズマ、リアプロ、有機EL等で高効率なもの))、エアコン(低効率、中効率、高効率)、ガス調理器(低効率、中効率、高効率)

- エネルギー・システム総コストは以下の費用の総和となる。
  - a) 各種積み上げ技術の費用
    - [設備費] / [投資回収年数] + [運転・メンテナンス費] + [年間燃料費]
    - 注) [運転・メンテナンス費] は設備費に対するある係数として、  
 [年経費率]  $\equiv$  1 / [投資回収年数] + [対設備費の運転・メンテナンス費の比率]
    - とし [年経費率] を各技術において想定している。
  - b) トップダウン部分の費用（消費効用の損失）
    - 技術積み上げの対象外となっているその他諸々のエネルギー消費については、最終エネルギー価格と省エネルギー量の関係を長期価格弾性値で表現。積分値が消費効用の損失と定義でき、それをトップダウン部分の削減費用としている。
- 設備費が高くて、省エネ効果が高く、年間燃料費が、([設備費] / [投資回収年数] + [運転・メンテナンス費]) の増分を上回って節約可能であれば、限界削減費用 0\$/tCO<sub>2</sub> のケースでモデル上、技術選択がなされることになる。すなわち、純費用とならない対策は、排出削減を想定したケース以前にモデルの最適化計算によって選択される。

### 3. モデルの主要な前提条件

モデルは多くの前提条件の下で構築されているが、下記に主要な前提条件について記載する。

#### 3.1. 人口・GDP の想定

- 人口は、国連 2006 年推計を利用 (UN, World Population Prospects: The 2006 Revision)

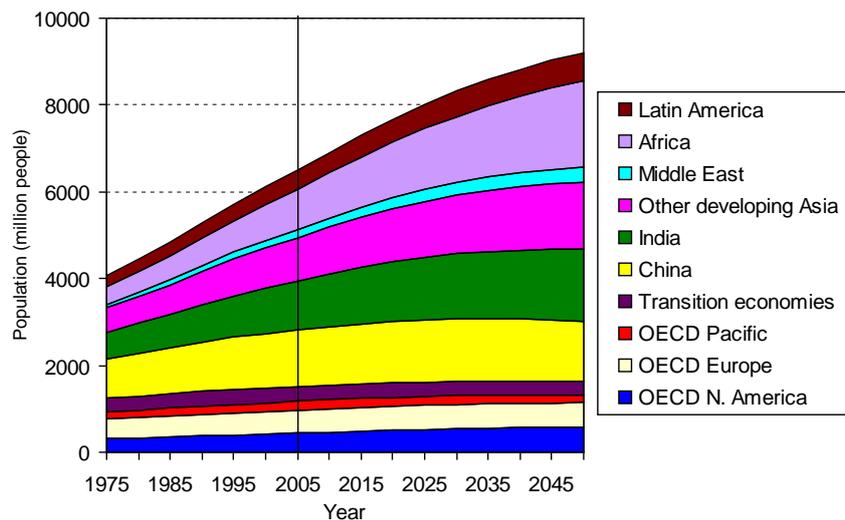


図 1-3 人口の想定

- GDP は、日本経済研究センターが、2008 年 12 月末に中期目標検討委員会向けに用意した主要国および世界の GDP 成長率シナリオを基に 5 4 地域別に推計

- 2030年以降、2050年までについては、IPCC SRES B2シナリオ (IPCC, 2000) の4地域別 (OECD90、旧ソ連・東欧、アジア、その他) の一人当たりGDP成長率を基に推計
- 2005-2020年間のGDP成長率は、日本：1.3%、米国：1.9%、EU27：1.9%、ロシア：5.0%、中国：8.2%、インド：7.2%、世界：3.0%

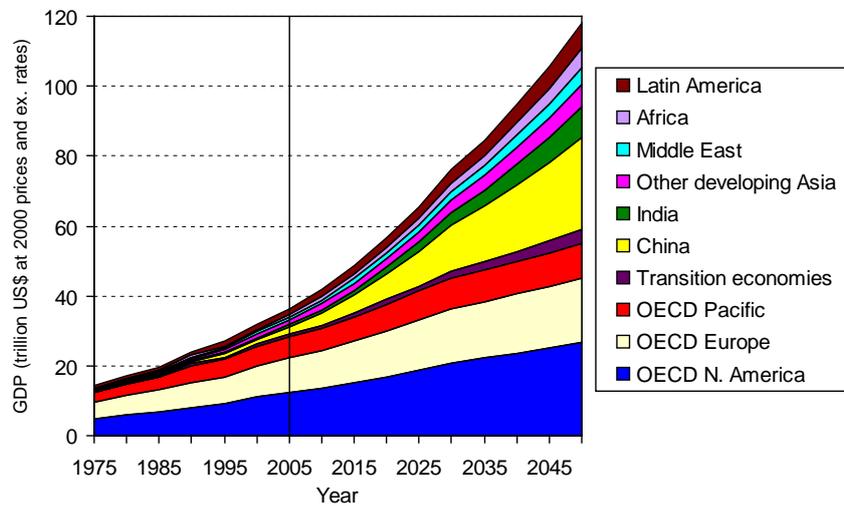


図 1-4 GDP の想定

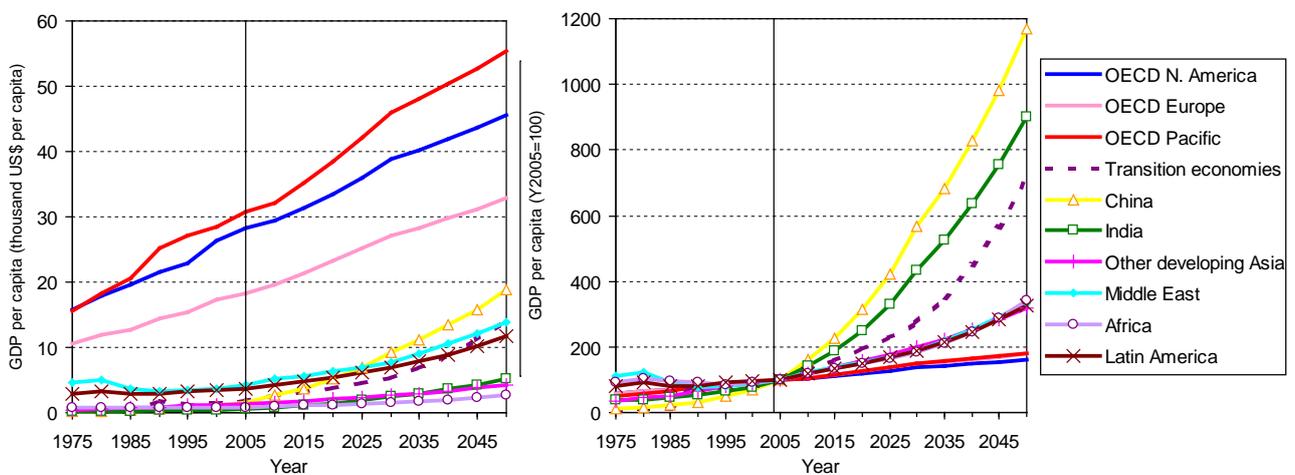


図 1-5 一人当たり GDP の想定

- 人口、GDP は、モデルの直接的な前提条件として利用しているわけではなく、技術積み上げの各セクターにおける生産活動量の推計や、個別技術の技術積み上げを行わずトップダウン的にモデル化を行っている残るセクターのエネルギー需要推計 (IEA, 2007b) などに利用している。

### 3.2. 生産活動量の想定

#### (1) 鉄鋼部門

- シナリオ作成にあたり、一人当たり GDP 推移と一人当たり見掛粗鋼消費量の連関、地域別の産業構造の動向、政府発表の計画などを参考にした。

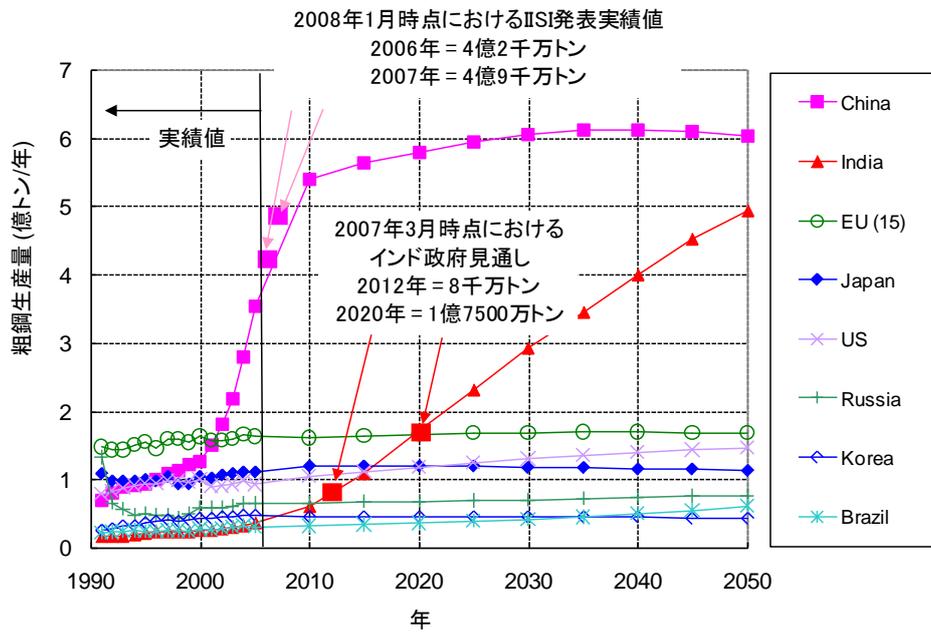


図 1-6 主要地域における粗鋼生産量シナリオ

(2) セメント部門

- セメント生産量は、一人当たり GDP が小さい時点・地域で、GDP 総額に依存し、一人当たり GDP が大きくなると人口規模に依存するとし、過去のトレンドから推計。
- なお、クリンカ・セメント比は、分析対象期間にわたり一定とした。

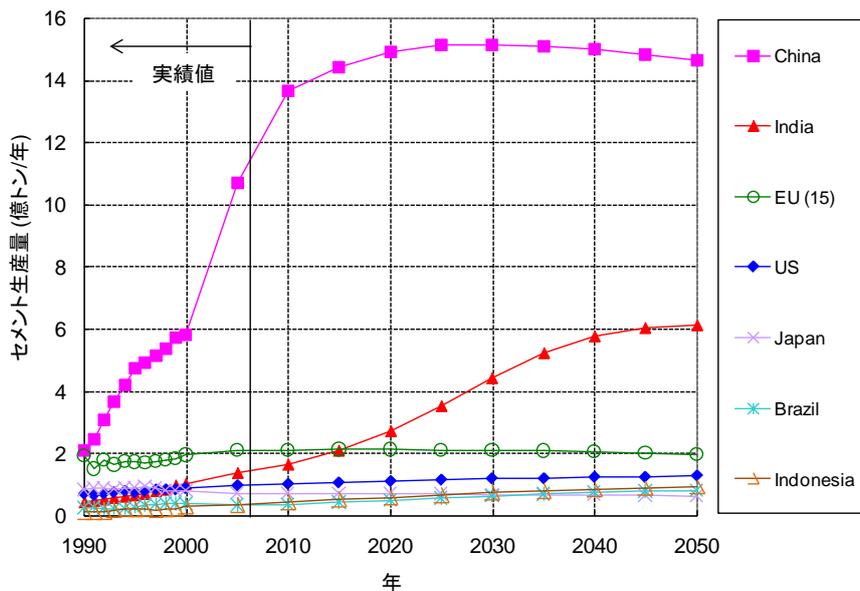


図 1-7 主要地域におけるセメント生産量シナリオ

(3) 運輸部門

- 乗用車の輸送活動量（人キロ）及びバスの輸送活動量（人キロ）は、一人当たり全旅客輸送活動量を一人当たり GDP や過去のトレンドにより設定し、さらに機関別シェアの変遷を設定し想定した（図 1-8）。
- 他、貨物トラックの輸送活動量（トンキロ）は、全貨物輸送活動量を GDP 規模を基に設定し、さらに機関別の輸送分担率を設定し想定した（図 1-9）。
- 日本については、国土交通省の最新の見通しに基づいて輸送活動量を想定した。

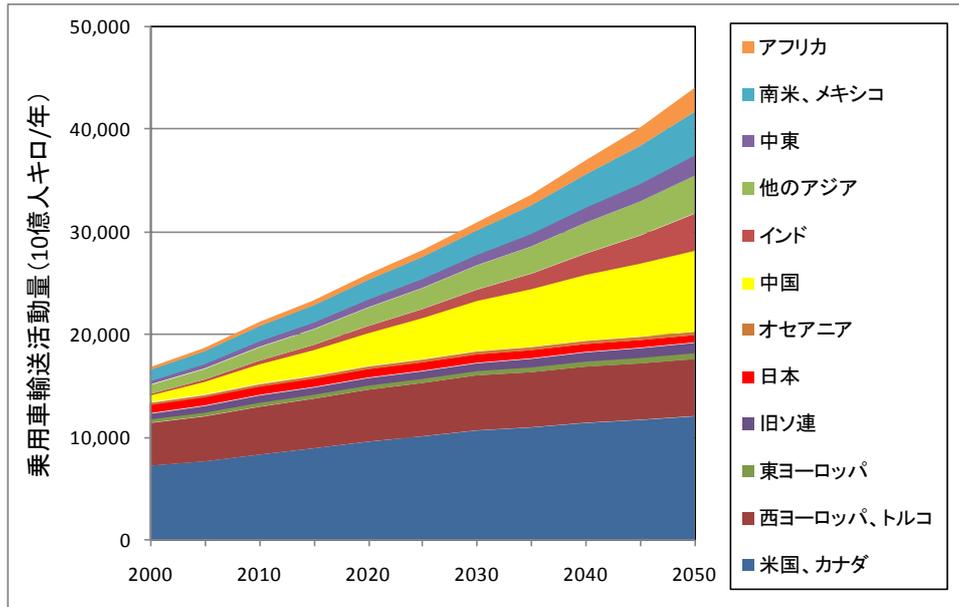


図 1-8 地域別の乗用車輸送活動量 (10 億人キロ/年)

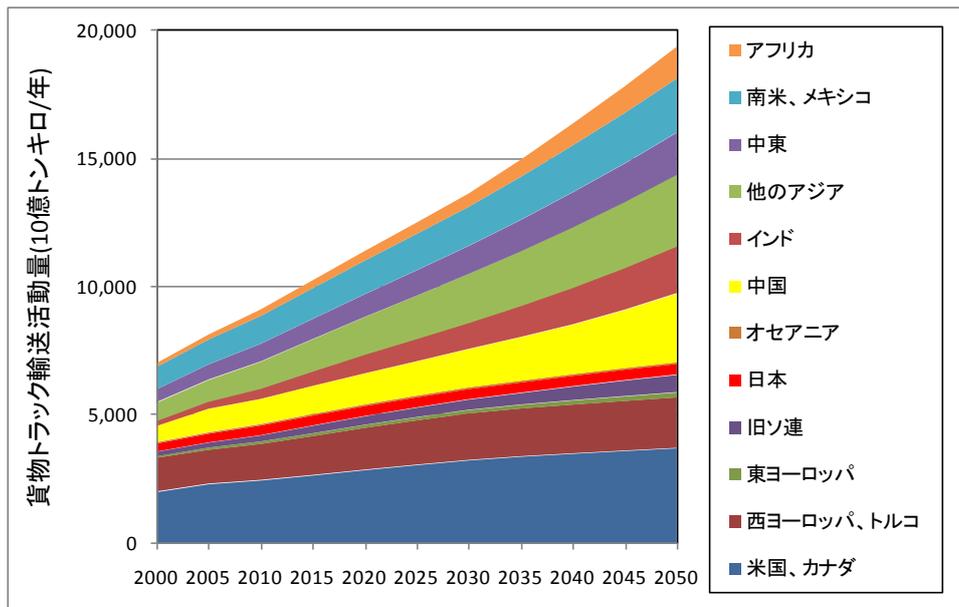


図 1-9 地域別の貨物トラック輸送活動量 (10 億トンキロ/年)

### 3.3. 設備導入状況

#### (1) 鉄鋼部門

- モデルでは粗鋼生産に関して、転炉鋼（BF-BOF）、スクラップベース電炉鋼（scrap-EAF）、DRI ベース電炉鋼（DRI-EAF）の3種に区分し、それぞれ、過去の何年にどのレベルのエネルギー効率を有する設備がどの程度の容量導入されたかを推定した結果をモデルの前提条件としている。図 1-8 は、粗鋼生産の主力である BF-BOF の 2000 年時点の地域別のエネルギー効率（エネルギー原単位）である。

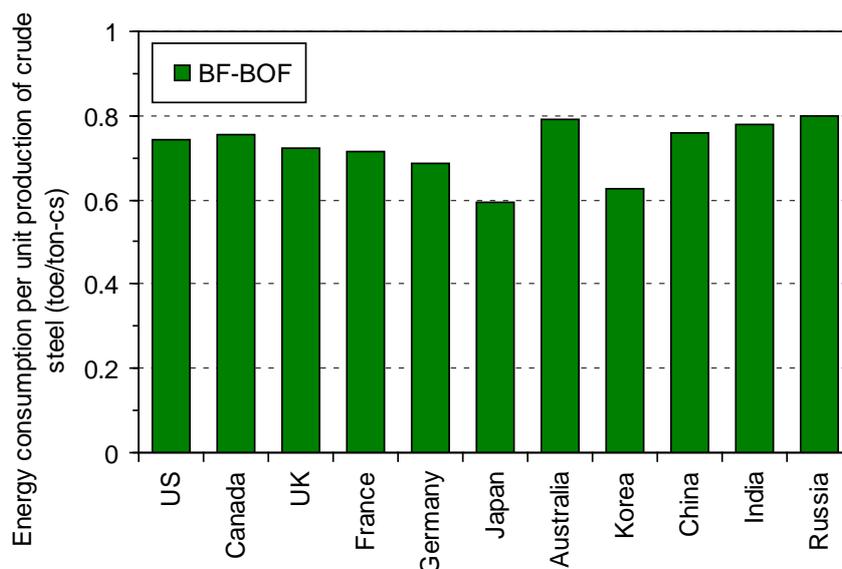


図 1-10 地域別の転炉鋼（BF-BOF）のエネルギー効率推計値

注) 値が小さいほどエネルギー効率が高いことを示す。電力については  $1\text{MWh}=0.086/0.33\text{toe}$  にて換算

#### (2) セメント部門

- セメントについても、過去の何年にどのレベルのエネルギー効率を有する設備がどの程度の容量導入されたかを推定した結果をモデルの前提条件としている。図 1-9 は、セメント生産トンおよびクリンカ生産トンで見た 2000 年時点の地域別のエネルギー効率（エネルギー原単位）である。
- セメント生産において、クリンカに混ぜ物を多く加えれば、セメント生産トンあたりで見たエネルギー効率は良くなるが、各国で求められるセメント品質に差異があるため、前節で記載したように、クリンカ・セメント比は、分析対象期間にわたり一定とした。

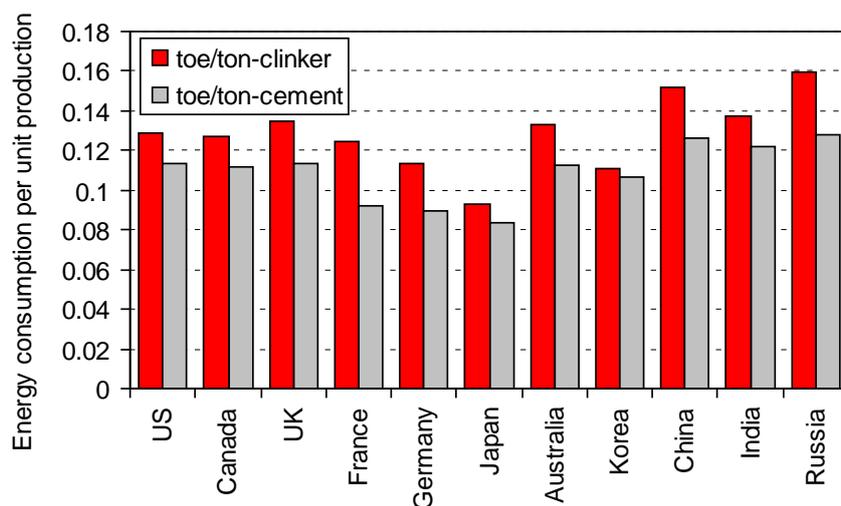


図 1-11 地域別のエネルギー効率推計値

注) 値が小さいほどエネルギー効率が高いことを示す。電力については 1MWh=0.086/0.33toe にて換算

### (3) 発電部門

- 発電設備についても、過去の何年にどのレベルのエネルギー効率を有する設備がどの程度の容量導入されたかを推定した結果をモデルの前提条件としている。図 1-10 は、化石燃料発電における 2005 年時点の地域別の発電効率である。

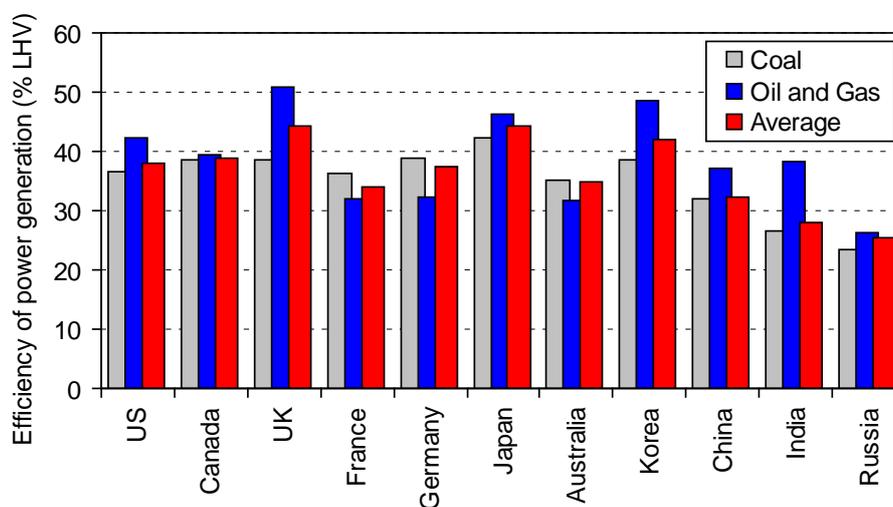


図 1-12 2005 年における各国の発電効率の比較 (CHP を含む)

注) 値が大きいほどエネルギー効率が高いことを示す。

### 3.4. 投資回収年数の想定

- 利子率、所得や資金的余裕、主観的なリスク選好、株主の期待利益率など、諸々の要因によって、社会で観測されるような投資回収年数となってあらわれる。企業行動を考えてみると、投下資本利益率 (ROI) は、通常 10-20%とされており、投下資金回収年数では 5-10 年である。このような状況を考えて、表 1-1 のような投資回収年数を想定した。

- なお、国際的な類似的な研究においても、国際応用システム分析研究所（IIASA）の GAINS モデルによる分析（IIASA, 2008）では標準ケースとしては割引率を一律 20%（投資回収年数にすると 5 年程度）としており、また、オランダ環境機関の TIMER モデルでは 1～3 年程度の投資回収年数を想定し分析を行っている（de Vries et al., 2001）。

表 1-2 投資回収年数の想定

	投資回収年数	
	上限	下限
発電部門	10	6.7
その他エネ転部門	7	4.7
産業部門（エネルギー多消費産業）	10	6.7
運輸部門	5	3.3
（環境配慮型購買層）	10	
民生部門	3	2.0

一人当たり GDP に応じて上記範囲内で地域別に想定した。日本は上限値になる。

### 3.5. 風力・太陽光発電に関する想定

- 風力、太陽光は年率 1.0%、3.4% にてコスト低減するものと想定。2000 年における風力の発電単価 56～118 \$/MWh、太陽光 209～720 \$/MWh が（風速や日射条件などによって差異がある）、2050 年にはそれぞれ 34～71 \$/MWh、37～128 \$/MWh の発電単価で利用できるようになるものと想定した。
- 第 2 項で記載したが、風力発電については必ずしも電力需要の瞬時ピークと発電ピークとを一致させることはできないので、瞬時ピークで期待できる出力は最大出力の 30% とした。また、太陽光発電については発電可能な時間帯が限られるので、瞬時ピーク及びピーク時のみに電力供給が可能とした。
- 風力発電と太陽光発電は、電力システムの安定性の面から、それぞれ総系統電力量の 15% を最大利用可能量と想定した。しかし、蓄電池の付加により、供給上限を更に 15% 拡大できるものと想定した（計 30% まで）。また、蓄電池を付加した風力発電については、瞬時ピークで期待できる出力を最大出力の 60% とした。太陽光発電についても蓄電池を付加した場合は瞬時ピーク及びピークに加えて中間時間帯にも電力供給が可能とした。なお、系統を介さず、水素製造のため水電解に利用する分には供給上限を課していない（当然ながら資源供給制約は別途存在する）。

### 3.6. 原子力発電シナリオ

- 原子力発電については 2030 年までの期間については外生的なシナリオとして想定を行った（表 1-2）。

- 2030年以降については、モデルで想定した制約条件（総発電電力量の50%を上限とし、年間の拡大は従来型：年率0.33%増、次世代型：年率1%増以内）の範囲内でコスト効率的な選択がなされるものと想定した。

表 1-3 原子力発電シナリオ (TWh/yr)

	2005年実績	2020年
日本	305	437
米国	811	873
EU27	987	965
ロシア	149	346
中国	53	282
インド	17	124
世界合計	2767	3677

#### 4. モデル試算例

##### (1) 世界のCO<sub>2</sub>排出量の見通し

- CO<sub>2</sub>原単位が将来においても現状と同レベルとすれば（温暖化対策が将来にわたって進展しないと仮定すれば）、2020年における世界全体のCO<sub>2</sub>排出量は現状比でほぼ倍増する。
- 負の削減費用での排出削減にも大きなポテンシャルがあり、そのポテンシャルの実現が望まれるが、一方でそれを実現するためには多くの障壁の除去が必要であり、簡単に実現できるわけではない。
- 将来において、非附属書I国での大きな排出増加が見込まれる。

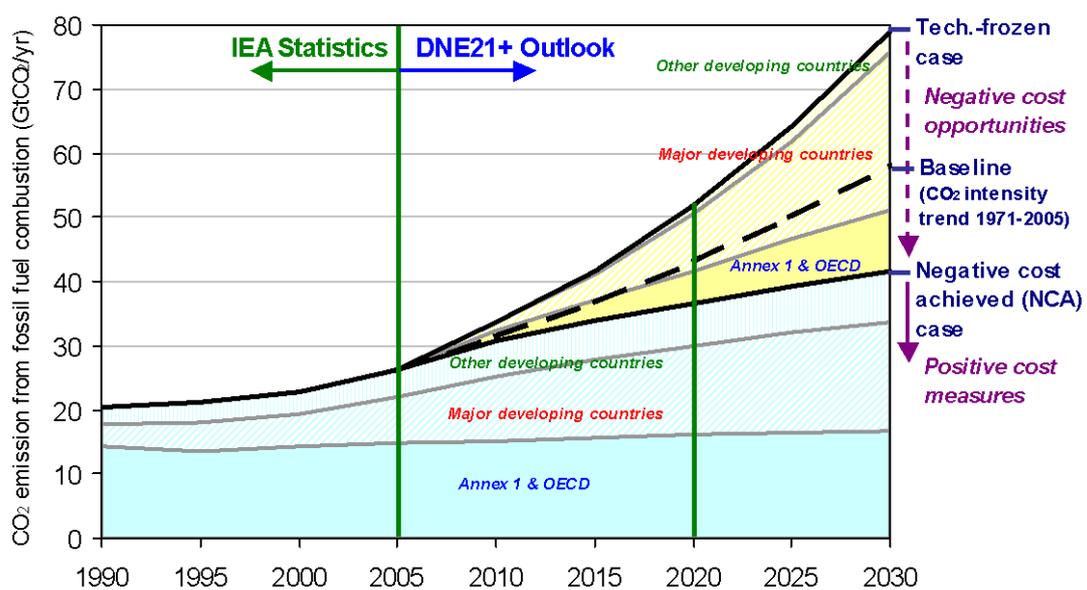


図 1-13 世界の排出量の見通し

(2) 世界の削減ポテンシャルの推定

- 負の削減費用及び比較的安い費用 (<20 \$/tCO<sub>2</sub>) での排出削減ポテンシャルは大きい。
- 米国の 20 \$/tCO<sub>2</sub> 以下の費用での排出削減ポテンシャルが同費用での附属書 I 国&OECD の排出削減ポテンシャルに占める割合は大きい。
- 中国+インドの 20 \$/tCO<sub>2</sub> 以下の費用での排出削減ポテンシャルが同費用での主要発展途上国の排出削減ポテンシャルに占める割合は大きい。

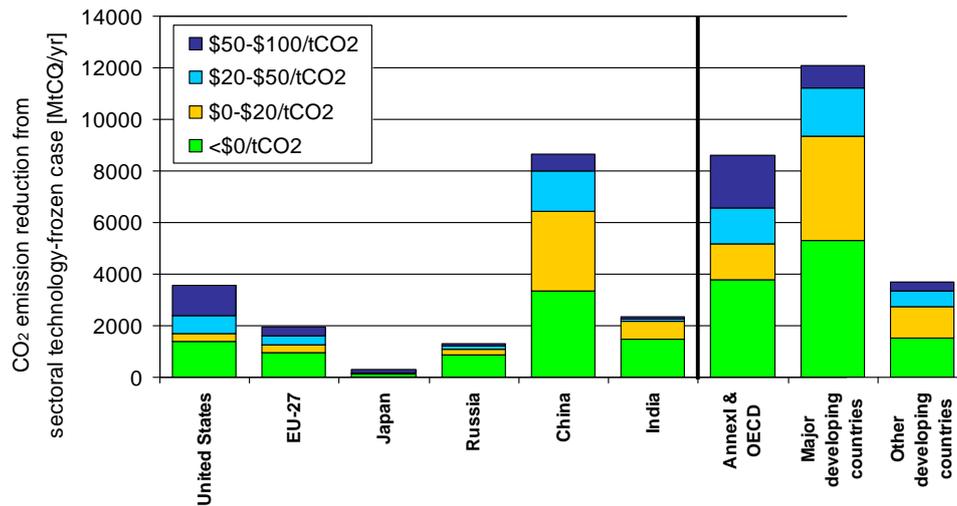
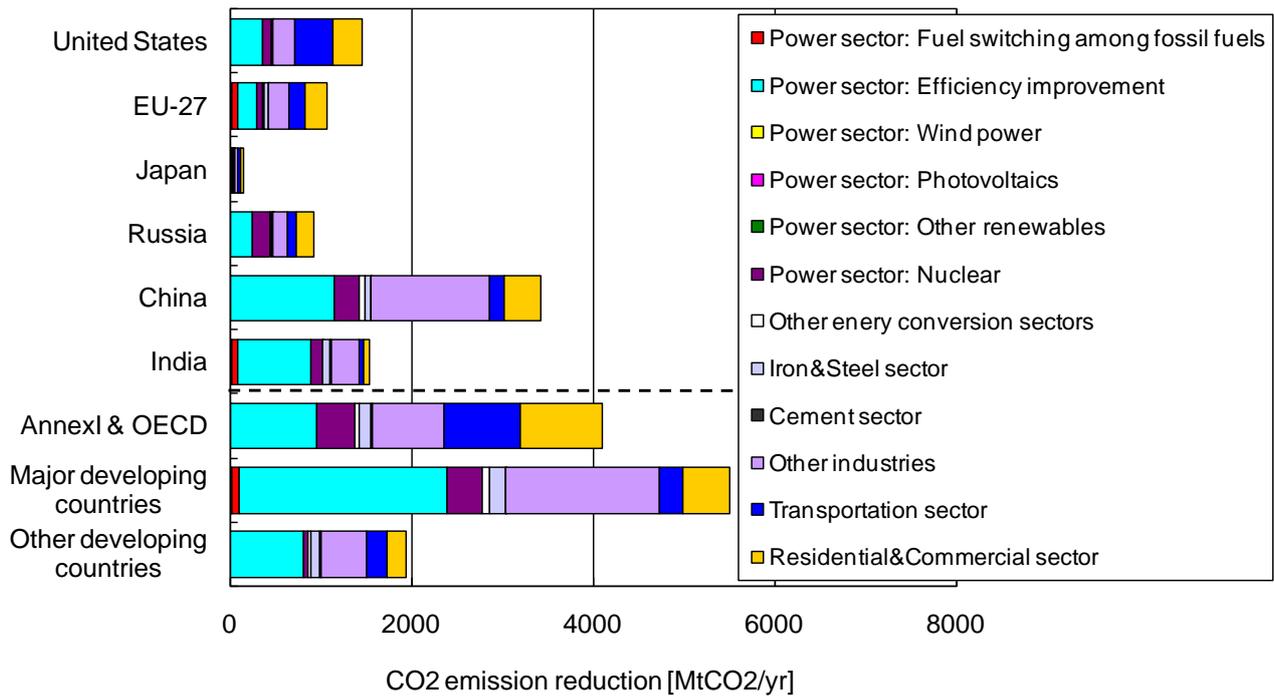


図 1-14 2020 年における限界削減費用別にみた世界の主要国別の排出削減可能量の推定

- 2020 年における世界の主要国別・セクター別の排出削減可能量を限界削減費用レンジ別に表示したものを図 1-13 に示す。

(a)  $\leq 0\$/tCO_2$  (技術固定ケースから)



(b)  $0 \sim 20\$/tCO_2$

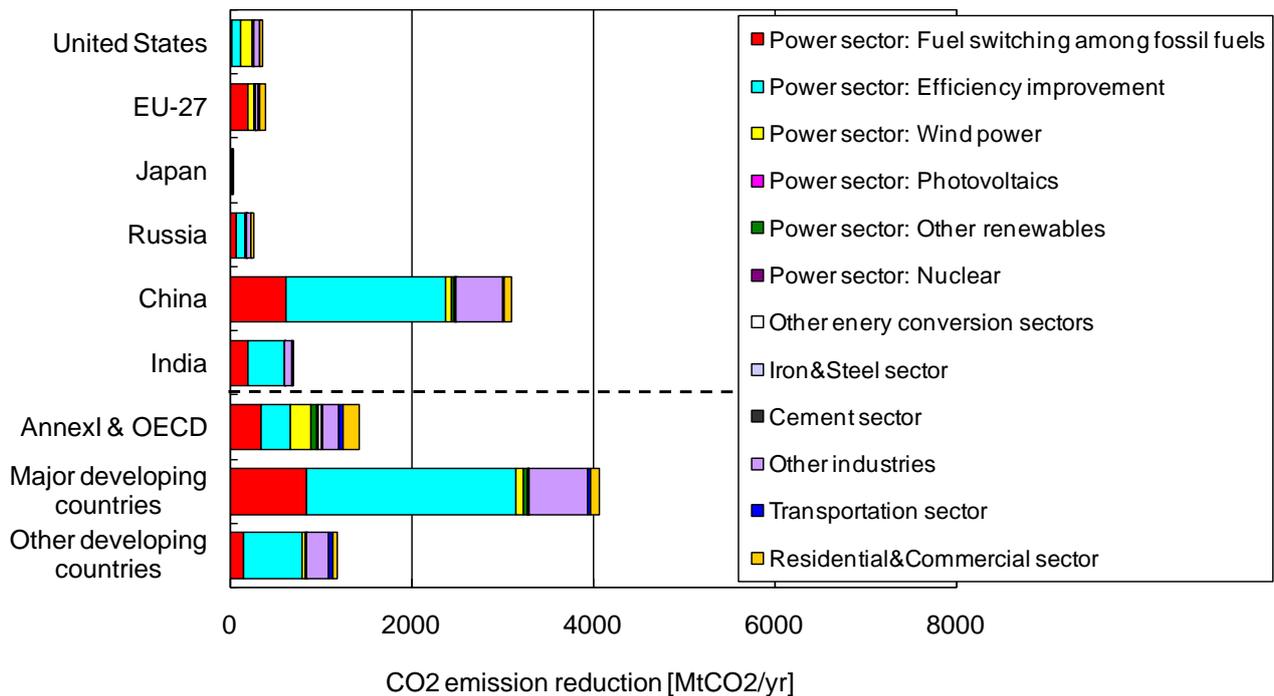
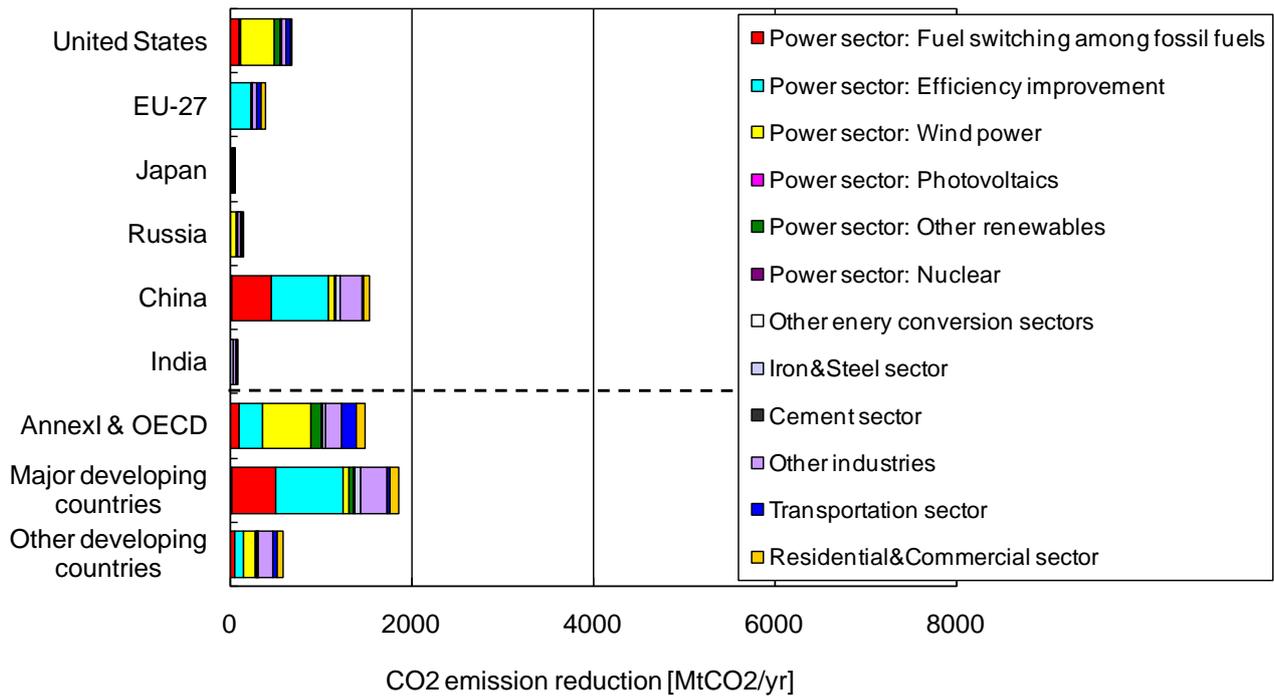


図 1-15 2020 年における世界の主要国別・セクター別の排出削減可能量の推定

注) 石炭火力からガス複合発電への転換に伴う排出削減効果は、「発電部門：火力発電効率向上」（一般に石炭火力よりもガス複合発電の方が発電効率が高いため）および「発電部門：化石燃料間転換」に分離されて計上されている。

(c) 20~50\$/tCO<sub>2</sub>



(d) 50~100\$/tCO<sub>2</sub>

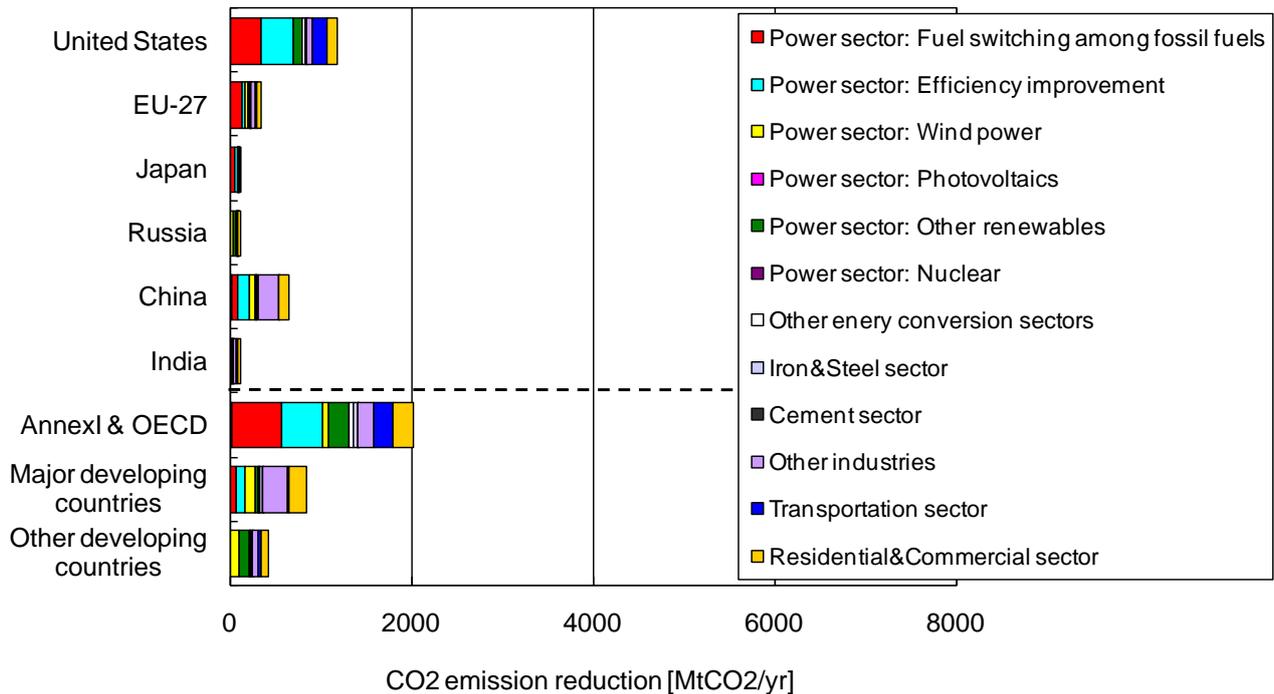


図 1-14 2020 年における世界の主要国別・セクター別の排出削減可能量の推定 (続き)

注) 石炭火力からガス複合発電への転換に伴う排出削減効果は、「発電部門：火力発電効率向上」(一般に石炭火力よりもガス複合発電の方が発電効率が高いため) および「発電部門：化石燃料間転換」に分離されて計上されている。

- EU27、米国と日本を比較すると、日本の削減可能性が小さいようにも見えるが、EU内の多くの国やカナダなどでも、日本と同様に1990年比の削減率でみた削減可能性が小さい国も多く見られる。

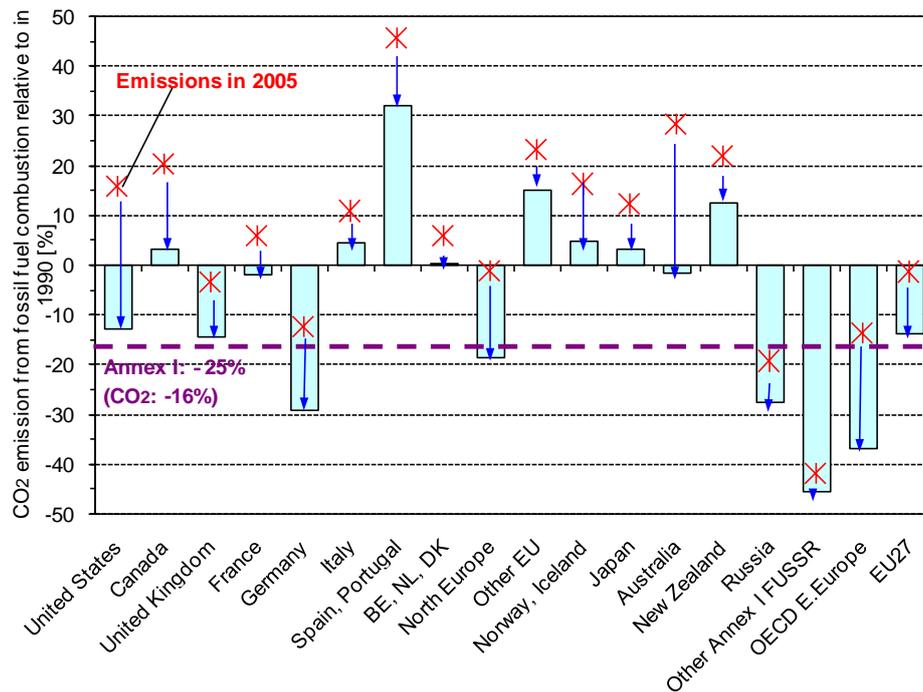


図 1-16 2020年附属書I国1990年比25%減（エネルギー起源CO<sub>2</sub>は16%減）における限界削減費用均等化時の各国CO<sub>2</sub>排出量の推定

(3) 世界のエネルギー供給量の推定

- 世界の一次エネルギー消費量は、限界削減費用が高くなるにつれて省エネルギー量が大きくなり、また、天然ガス、再生可能エネルギーの比率が高まる（図 1-17）。

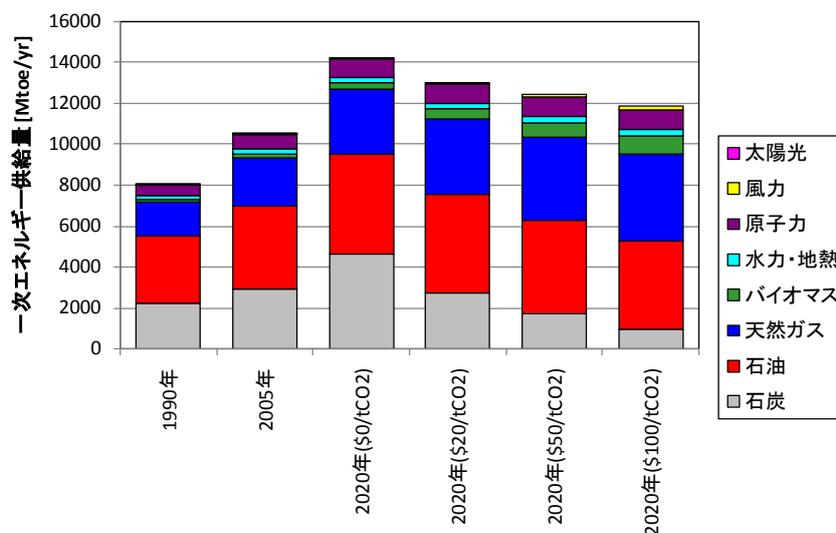


図 1-17 2020年における限界削減費用別の世界の一次エネルギー消費量

## II. 非エネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出

### 1. 概要

○ 外生的なシナリオ（各選択肢によって変化しない）として想定した。理由は以下のとおり。

#### <Fugitive に関して>

- ・ 既に、フレア減少のための対策が進んでいること
- ・ フレア減少のためのコスト分析を行った文献が十分得られていないこと

#### <Industrial processes に関して>

##### セメント部門

- ・ 混合セメントの販売量を確保するなどすることにより、クリンカセメント比を低下させることが可能であるが、混合セメントは養生期間の長期化が避けられないといった要素があるなどセメント需要家の要請に対し十分にこたえられないため、クリンカセメント比の変化を、政策により誘導しにくいこと
- ・ 原理的には、フライアッシュをクリンカ原料として利用することで、原料としての石灰石追い出しが可能であるが、他の廃棄物を受け入れることが難しくなるという社会的な障壁が存在すること
- ・ キルン排ガスに対し CCS を導入することで、プロセス由来の CO<sub>2</sub> 排出を削減できるが、セメント価格に対する原価上昇比率が高いこと、途上国を含めセメント企業の財務的制約、などから考えて、大幅な CCS 導入は考えにくいこと

##### 鉄鋼部門

- ・ プロセス由来の CO<sub>2</sub> が工場内で分散しており、CCS などの対策が実質的に困難であること

#### <Waste に関して>

- ・ CO<sub>2</sub> 削減という社会的要請もある一方、廃棄物に関する適正な処理処分といった社会的要請も強く、CO<sub>2</sub> 削減のみを目的とした対策をとるのが困難であること

### 2. 排出量の推定方法

- 各部門毎に下記のような方法で、非エネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出の将来推定を行った。
- 1990～2005 年の排出量実績値は、附属書 I 国は UNFCCC (2009)、非附属書 I 国は IEA 統計 (IEA, 2007a) をベースにしている。

#### <Fugitive に関して>

主に油田、ガス田で、フレアとして燃焼した際に発生する CO<sub>2</sub> である。フレアの量は、石油、ガスの産出量という要素より、むしろ、地域特有の地質学的な要素や、発生したガスを有効利用したり、あるいは地下に埋め戻したりする対策によって左右される。

従って、ここでは、将来の CO<sub>2</sub> - Fugitive を、過去のトレンドが今後も継続するとして簡易的に推計

した。過去のトレンドは、ガスを有効利用・地下への埋め戻しといった努力を含むため、この推計法は、過去の努力が今後も継続した場合を意味する。(一部地域で Fugitive の排出増加率が極めて高くなっているが、このような地域では増加率の上限を年 2% として設定した。)

<Industrial processes + Waste に関して>

UNFCCC の Industrial processes の内、セメント部門とアルミ部門からの排出は、セメント生産量、アルミ新地金生産量とそれぞれ強い関連がある。そこで、これら部門からの 0.5 ガス排出については、今後もこの関係が維持されるものとしてセメント生産量、アルミ新地金生産量シナリオを基に将来の排出シナリオを作成した。

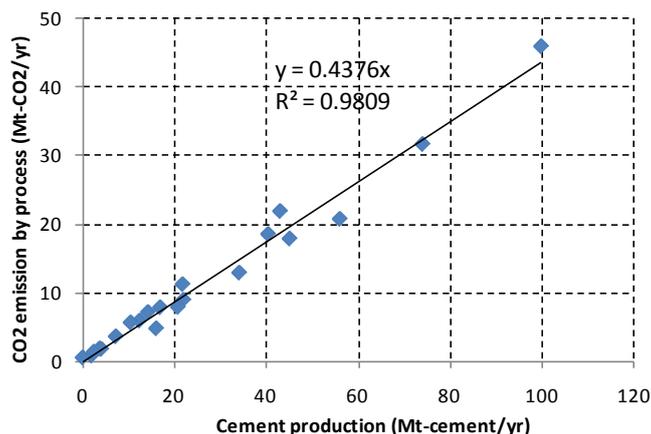


図 2-1 セメント生産量とプロセス由来 CO<sub>2</sub> 排出量の関係 (2005 年)

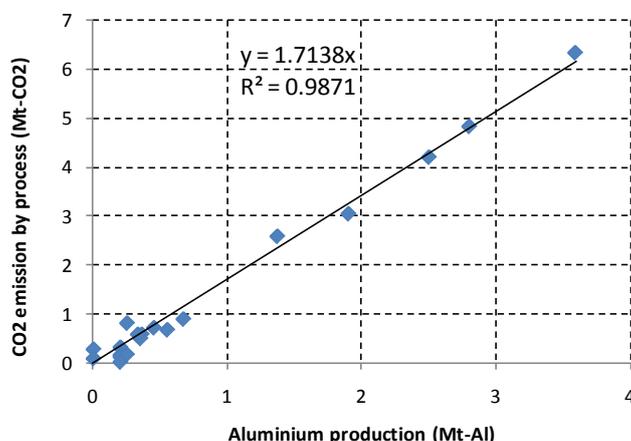


図 2-2 アルミ新地金生産量とプロセス由来 CO<sub>2</sub> 排出量の関係 (2005 年)

セメント部門、アルミ部門以外の Industrial processes + Waste 排出量は、排出要因が多岐に渡り、かつ地域別の特殊事情による影響が大きく、詳細な分析は現在の統計データからは困難である。そこで、ここでは「工業部門の物理的生産量全般」を粗鋼生産量に代表させ、また地域別の事情(粗鋼生産で表現できない残差項)は、今後も存続するとして、粗鋼生産量シナリオをベースとしつつ、地域別の事情を反映させた Industrial processes + Waste 排出量シナリオ(セメント、アルミ部門除く)を作成した。

### 3. 排出量シナリオ

作成した 0.5 ガス排出シナリオの概要を図 2-3、2-4 に示す。基本的に先進国はセメント生産量などの増加が緩いシナリオとしているため、0.5 ガス排出シナリオの増加も遅い（あるいは横ばい、減少となるシナリオである）。カナダは、石油（非在来型含む）、ガス生産に起因する排出量（Fugitive）が増加する影響が大きく、先進国の中では増加率が高くなっている。中国、インドなどの途上国は、鉄鋼、セメント、アルミなどの素材生産量が今後とも増加すると見込まれるため、全般的に 0.5 ガス排出増加が著しいシナリオとなっている。

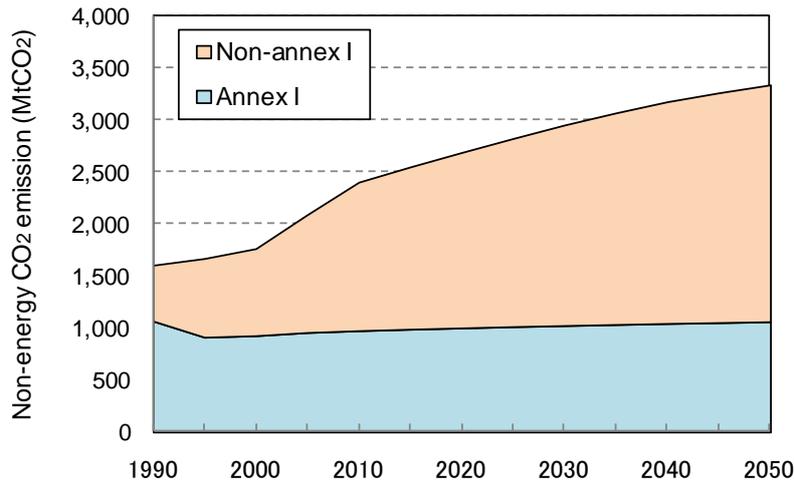


図 2-3 2050 年までの非エネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出シナリオ (附属書 I、非附属書 I 国別)

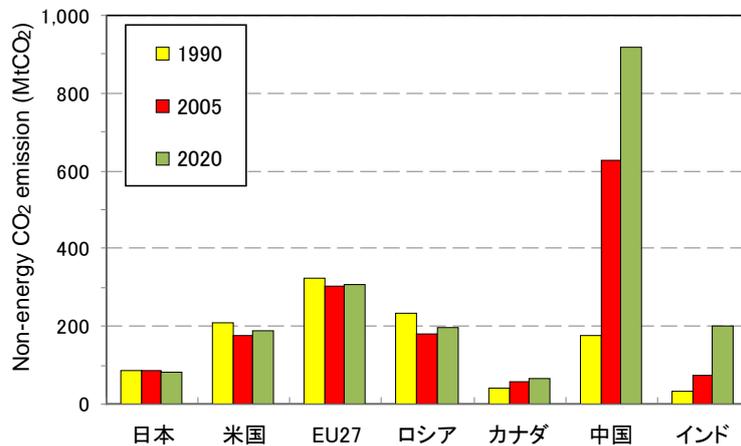


図 2-4 非エネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出の実績値と 2020 年シナリオ (主要国)

### Ⅲ. Non CO<sub>2</sub> GHG モデル

#### 1. 概要

RITE の Non-CO<sub>2</sub> GHG 評価モデルは、CH<sub>4</sub>（7 部門）、N<sub>2</sub>O（6 部門）、HFCs、PFC、SF<sub>6</sub>（それぞれ 1 部門）について 18 地域別にベースライン排出量を推定し、排出削減費用と削減ポテンシャルを評価できる。エネルギー起源 CO<sub>2</sub> 分析の DNE21+モデルの地域区分 54 地域と整合させる際には、基準年の排出量実績で配分することとした。基本的には、USEPA の分析・評価モデルに基づいたものであるが、最新の実績値などで補正を行っている。

なお、基準年の総 GHG 排出量は、UNFCCC に報告のある附属書 I 国については UNFCCC の実績値（平成 21 年 2 月時点のデータ）を、UNFCCC に報告のない非附属書 I 国については IEA の統計値を基準として用いた（詳細は本資料冒頭に記載済み）。

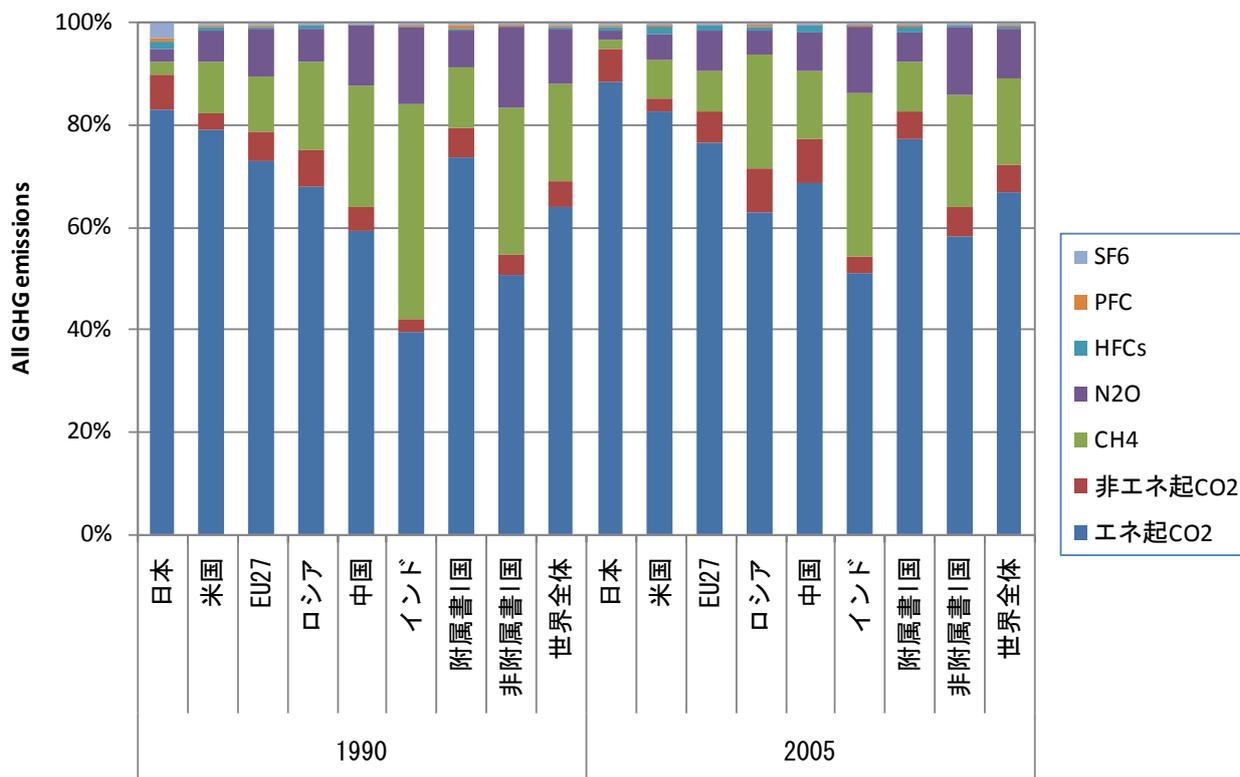


図 3-1 各国における 6 ガスの比率 (実績値)

注) 附属書 I 国は UNFCCC、非附属書 I 国は IEA のデータ

## 2. ベースライン排出量の推計方法

CH<sub>4</sub>は、農業、石油、石炭、天然ガス、民生・運輸部門、エネルギー多消費産業、その他産業の7部門からの排出量を考慮した。N<sub>2</sub>Oは、農業、石油、天然ガス、民生・運輸部門、エネルギー多消費産業、その他産業の6部門からの排出量を考慮した。HFCs、PFC、SF<sub>6</sub>に関してはそれぞれ1部門を考慮した。各排出部門からのベースライン排出量の推計に関して、以下に整理した。

### <CH<sub>4</sub> 農業部門>

稲作、草原への焼入、農業廃棄物の燃焼、腸内発酵、家畜糞尿、土地利用変化の6グループに分割してそれぞれ地域別に推計した。稲作からの排出量は、EPAの推計方法に基づき、当該地域の人口に比例するとしてベースライン排出量を推計した。草原への焼入からの排出量は、Masui(2001)の推計方法に基づき、IPCC SRES-B2シナリオの牧草地の面積に応じて変化するものと仮定して推計した。この際、基準年における各地域の牧草地面積は、FAOSTATデータ(FAO, 2005)を使用した。農業廃棄物の燃焼からの排出量は、草原への焼入からの排出量と同様に、SRES-B2シナリオの耕地面積に応じて変化するものと仮定して推計した。腸内発酵からの排出量は、EPAの推計方法(EPA, 2002)に基づき、牧草地面積・家畜数・畜産生産率に基づき推計した。腸内発酵による排出原単位はIPCCガイドライン(IPCC, 1996)で固定した。ただし、土地利用の不確実性が大きいため、EPAの2020年までのトレンドに合わせるように調整を行った。家畜糞尿からの排出量は、腸内発酵からの排出量と同様に、牧草地面積・家畜数・畜産生産率に基づきベースラインを推計した。土地利用変化からの排出量は、バイオマス系廃棄物の焼却処分や腐敗であるとしていると想定し、SRES-B2シナリオの牧草地及び森林面積の変化に反比例するとして推計した。

### <N<sub>2</sub>O 農業部門>

CH<sub>4</sub>の農業部門排出と同様の6グループに、土壌からの排出を加えた7グループからの排出をそれぞれ地域別に推計した。前述の6グループのN<sub>2</sub>O農業部門に関しては、CH<sub>4</sub>農業部門と同様の方法で推計した。土壌からのN<sub>2</sub>O排出量は、化学肥料、窒素固定植物、農作物の残渣、その他の4種からの排出合計とし、それぞれ推計した。化学肥料からの排出量に関して、Tilman(2002)、Masui(2001)、USDA(2003)の推計方法を参考に、窒素肥料生産量に対して、時点、人口、1人あたりGDPを説明変数とした指数関数回帰式を用いて、将来推計した。窒素固定植物に関して、FAOSTAT(FAO, 2005)とIFPRI(IFPRI, 1999)による2015年までの将来予測データを用いて将来の大豆及び食用種の生産量を推計した。2020年以降については、耕地面積に応じて収穫量が変化するものとして、SRES-B2シナリオの耕地面積のデータを用いてベースラインを推計した。農作物の残渣からの排出量に関して、前述の窒素固定作物に米、麦を加えたものからの排出と想定し、推計した。その他からの排出量に関して、前述の家畜数に家畜からの糞尿中の窒素分によるN<sub>2</sub>O排出原単位を乗じて推計した。ただし、不確実性が大きいため、EPAの2020年までのトレンドに合わせるように調整を行った。

### <石油、石炭、天然ガス部門におけるCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O排出>

EPAの方法に準拠し、1人当たりGDPと、EIAによる石油・石炭・天然ガス部門の生産量及び需要量推計シナリオをもとに、石油・石炭・天然ガス部門のベースライン排出量をそれぞれ推計した。

### <CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 民生・運輸部門>

輸送部門、埋立処理、下水処理からの排出の3種類を考慮した。輸送部門からの排出量に関しては、EPAの方法に準拠し、1人当たりGDPとEIA推計の輸送用エネルギー消費シナリオをもとに、ベースラインを推計した。埋立処理と下水処理に関する排出量に関しては、EPAの方法に準拠し、1人当たり

GDP シナリオをもとに、ベースラインを推計した。

<HFCs、PFC、SF<sub>6</sub>>

SRES-B2 シナリオの SRES4 地域別の各排出シナリオを、SRES4 地域内の GDP シェアに基づき、地域別にベースライン排出量を推計した。

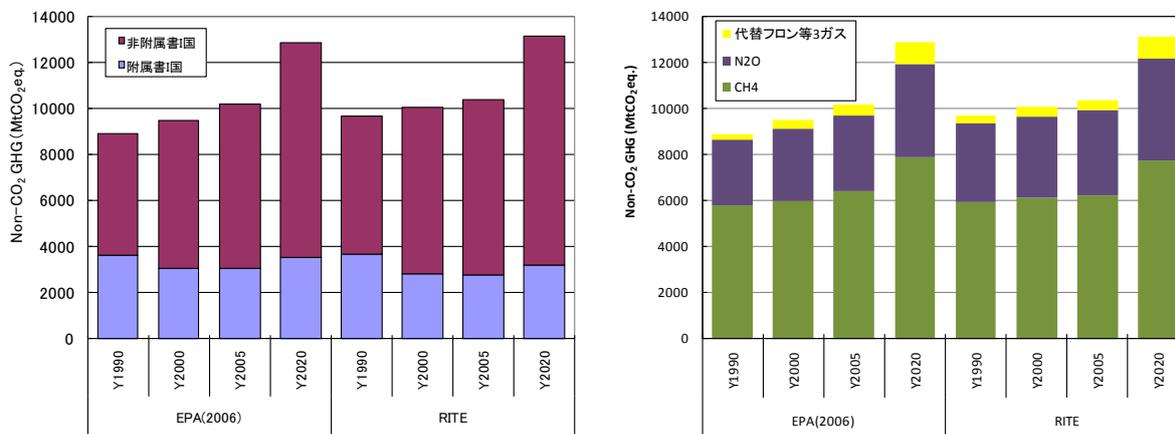


図 3-2 2020 年の Non-CO<sub>2</sub> GHG ベースライン排出量の比較 (左図：附属書 I、非附属書 I 国別、右図：ガス種類別)

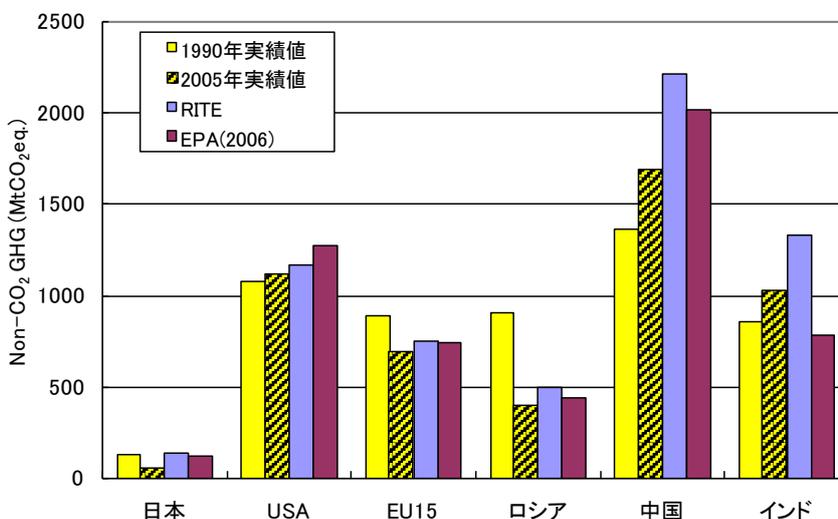


図 3-3 2020 年の Non-CO<sub>2</sub> GHG ベースライン排出量の比較 (主要国別。1990、2005 年実績値は、附属書 I 国は UNFCCC、非附属書 I 国は IEA のデータ (RITE の想定値))

### 3. 排出削減ポテンシャルの推計方法

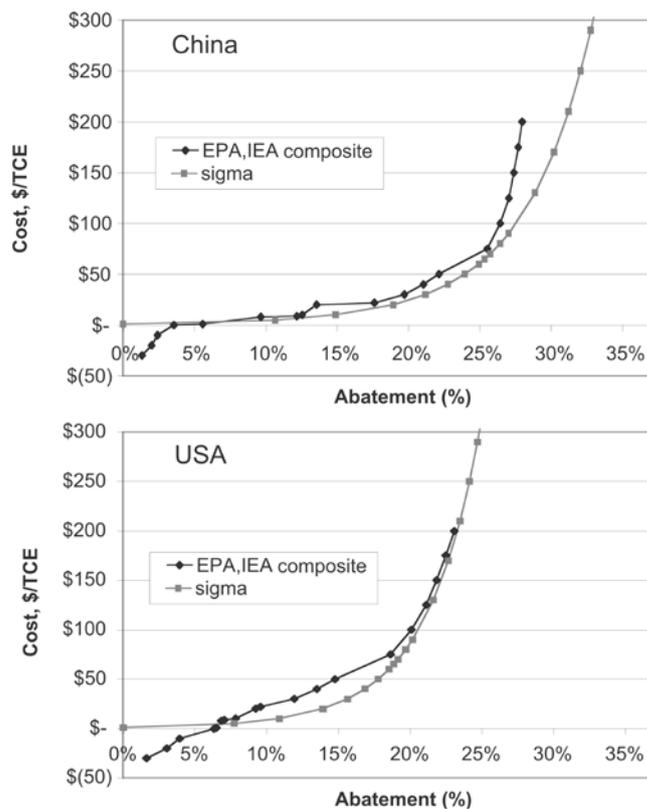
Non-CO<sub>2</sub> GHG 削減ポテンシャル評価モデルは、EPA(2002), EPA(2006), Hyman et al.(2002)による評価法にもとづき、(3-1)式のように各 Non-CO<sub>2</sub> GHG の削減率と限界削減費用との関係を代替弾性値で表現するモデルである。CO<sub>2</sub> 限界削減費用と同額を Non-CO<sub>2</sub> GHG 削減にかけた場合に削減される Non-CO<sub>2</sub>

GHG 削減量を世界 18 地域別に推計するモデルである。EPA の Non-CO<sub>2</sub> GHG 対策に関する技術データベースから算定される部門別・ガス別の限界削減費用曲線を再現するように弾性値が決定される。そのため、直接的には技術積み上げのモデルとはなっていないものの、そのベースは技術積み上げによって削減費用と削減可能性が算出される形となっている。

RITE のモデルでは、基本的に Hyman et al. (2002)の弾性値を利用しているが、割引率（投資回収年数）に関する感度解析を実施している EPA(2002)を参考に 20%/yr の割引率相当の分析結果と整合するように弾性値の調整を行っている。また、EPA(2006)の削減効果のレポート結果も一部参考にして、弾性値の調整を行っている。この結果、Hyman et al. (2002)よりも多くのガスにおける弾性値の想定は小さく、Hyman et al. (2002)よりも削減ポテンシャルを小さく見積もっている。

$$\text{Red}_r(g, h, n, t) = 1 - \left( \frac{1}{P(g, h, n, t)} \right)^{\sigma(g, h, n)} \quad (3-1)$$

g:ガス、h:排出部門、n:地域、t:年、  
 Red<sub>r</sub>(g,h,n,t): t 年 n 地域 g ガス h 排出部門の削減率(%)、  
 P(g,h,n,t): t 年 n 地域 g ガス h 排出部門の限界削減費用、  
 σ : n 地域 g ガス h 排出部門の代替弾性値(EPA(2002), EPA(2006), Hyman et al.(2002)に基づく)



**Figure 2.** Comparison of EPPA parameterization (squares) with methane marginal abatement curves (diamonds) for China (top panel), and the USA (bottom panel) *Source:* Bottom-up abatement curves were derived by combining data from IEA (1998, 1999) and U.S. EPA (1999); for details, see Hyman (2001).

図 3-4 EPA の Non-CO<sub>2</sub> GHG 排出削減技術の技術データベースから算出される限界削減費用曲線と弾性値を用いた近似モデルの整合性（出典：Hyman et al.(2002)）

表 3-1 割引率 20%/年ケースの(3-1)式の弾性値  $\sigma$  の想定 (一部)

Non-CO <sub>2</sub>	排出部門	日本	米国	EU
CH <sub>4</sub>	農業	0.04	0.05	0.04
	石油	0.00	0.04	0.02
	天然ガス	0.14	0.12	0.10
	石炭	0.59	0.29	0.08
	民生・輸送部門	0.20	0.19	0.15
	エネルギー多消費産業	0.11	0.11	0.11
	その他産業	0.11	0.11	0.11
N <sub>2</sub> O	農業	0.02	0.05	0.03
	石油	0.00	0.00	0.00
	天然ガス	0.00	0.00	0.00
	民生・輸送部門	0.00	0.00	0.00
	エネルギー多消費産業	0.37	0.37	0.37
	その他産業	0.00	0.00	0.00
HFCs		0.03	0.03	0.03
PFC		0.15	0.15	0.15
SF <sub>6</sub>		0.29	0.29	0.29

農業部門 CH<sub>4</sub> では、稲作や家畜(反芻動物)からの CH<sub>4</sub> 排出が含まれる。稲作では、削減オプションとして、中干しの徹底 (Full midseason drainage)、浅水管理 (Shallow flooding)、農閑期の麦藁すきこみ (Off-season straw)、硫酸アンモニウムの利用 (Ammonium sulfite)、陸稲 (Upland rice) などがある。家畜による腸内発酵 CH<sub>4</sub> 排出では、飼料改善、抗生物質、ウシ成長ホルモンの管理が対策としてあげられる。一方、農業部門 N<sub>2</sub>O は、耕作地土壌からの排出が大きく、窒素肥料の分割施肥・施肥量削減、無耕農作が削減オプションとしてあげられる。農業は地域によって土壌や水環境、気候条件などが多様であり、各地域の条件に適した想定が必要ではあるが、食糧需要と密接に結びつくことからコスト増を伴う大幅な削減は難しく、他の部門に比べて比較的低い弾性値を想定している。先進国に関しては、農業生産が今後も大きく増加する可能性は低く、先進国のベースライン排出量は基準年の 2005 年からほぼ一定の値をとると想定した。

エネルギー部門 CH<sub>4</sub> は、①石炭採掘に伴うメタン排出、②天然ガスの採掘・貯蔵・輸送に伴うメタン排出 ③石油に伴うメタン排出、が含まれる。①に関して、炭鉱からの CH<sub>4</sub> 回収、炭鉱からのメタン含有排気 (VAN : Ventilation Air Methane) の触媒による酸化処理、排メタンガスのフレアリング、回収メタンによる発電などがオプションとしてあげられる。②に関して、天然ガスに関しては、老朽設備の管理強化などがあげられる。③に関して、石油精製に関しては、フレアリング・直接削減などが想定される。当該部門の日本の排出量は非常に小さい。先進国の中ではロシアの天然ガス部門の CH<sub>4</sub> 排出が大きく、また削減ポテンシャルが大きいため、附属書 I 国全体で見ると、エネルギー部門 CH<sub>4</sub> の削減ポテンシャルが大きくなる。

民生・運輸からの CH<sub>4</sub> の排出には、埋立てや廃水・下水からの排出が含まれる。途上国の CDM プロジェクトで多く実施されているように、対策が比較的容易であることから、先進国においても比較的大きな弾性値を想定している。ここでは、廃水・下水からの N<sub>2</sub>O 対策は考慮していない。

エネルギー多消費産業における N<sub>2</sub>O 排出は、硝酸やアジピン酸製造に伴う排出である。Hyman ら(2002) では非常に大きい弾性値を用いているように、ベースラインからの削減ポテンシャルは大きいと考えられる。排出抑制装置やプロセス改善、熱分解が主な削減オプションである。

HFC に関しては、日本以外の多くの先進国では 1990 年から 2005 年にかけて HFCs 排出量が急増し、また今後日本を含め多くの国において発泡・断熱材としての利用が見込まれることから、ベースライン排

出量は伸びる想定とした。HFCの削減オプションとしては、ガス代替、生産・廃棄過程での漏洩逋減・回収・再利用・破壊、エアゾール(日本では、ダストブロワーのみ)のガス代替、業務用冷凍空調機器における回収・漏洩防止(漏洩率・回収率の改善)、洗浄剤・溶剤におけるガス代替が考えられる。日本では既にカーエアコン・自動販売機の回収100%を達成するなど削減余地は小さく、今後の削減ポテンシャルも小さいと想定した。

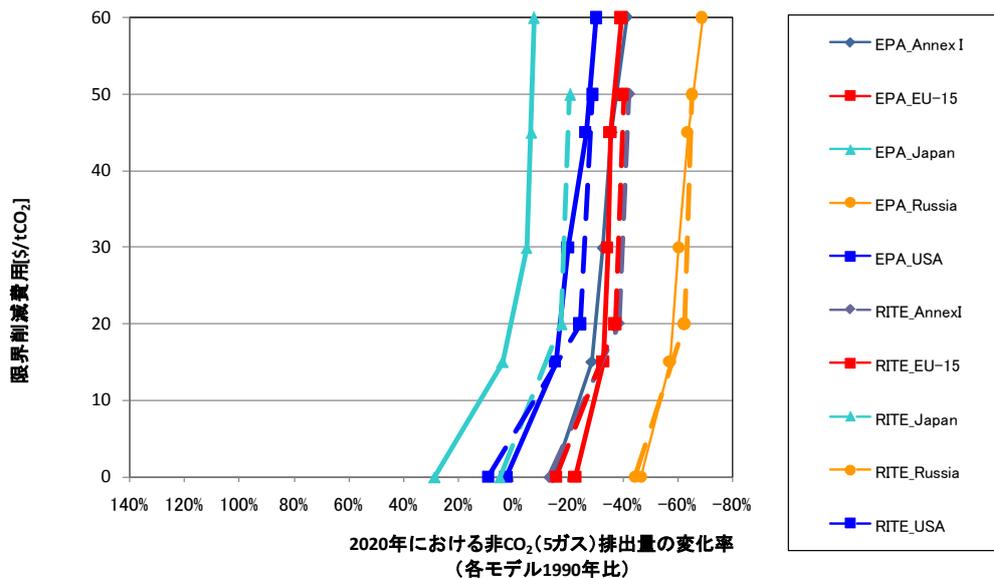
PFCやSF<sub>6</sub>に関しては、今後も破壊装置の設置による削減効果を見込む。電力部門におけるSF<sub>6</sub>の削減は2005年時点で日本や米国では既に大幅な削減がされていることから、ベースライン排出量が今後大きくは伸びることはない想定した。

#### 4. 排出削減ポテンシャルの推定例

図3-5は2020年における限界削減費用別の主要地域別Non-CO<sub>2</sub> GHG排出量変化について、RITEとEPA(2006)の分析を、1990年比および2005年比基準で示したものである。1990年比で見ると、地域別には大きな違いがあるように見られるが、2005年比で見るとかなり整合している。なお、1990年比で見たとき、日本についてRITEとEPAでかなり大きく異なっているが、これは、EPAが利用している1990年の実績排出量が、UNFCCCの報告値よりもかなり小さく、逆に2005年についてはEPAが利用している実績排出量は、UNFCCCの報告値よりも大きいためである。RITEのモデルではUNFCCC登録の実績値を用いてできる限り調整してある。

また、図3-6は主要地域別に見たものである。各地域ともに50\$/tCO<sub>2</sub>eq.程度までは削減ポテンシャルがかなり見込むことができるものの、それを超えると削減が見込みにくいことがわかる。

a) 1990 年基準



b) 2005 年基準

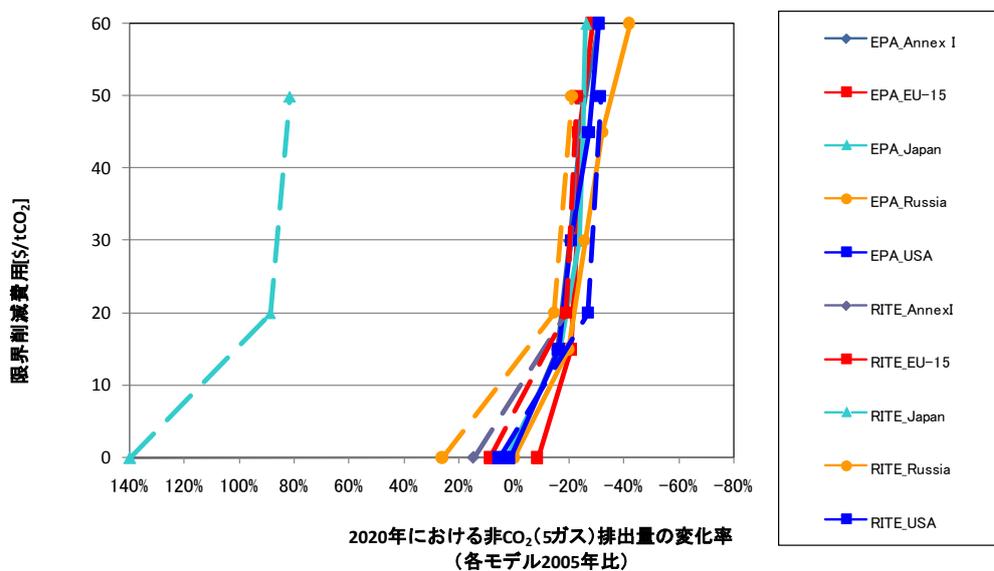


図 3-5 2020 年における限界削減費用別の基準年比の主要地域別 Non-CO<sub>2</sub> GHG 排出量変化 (EPA(2006)との比較)

注) EPA(2006)、RITE の推計はそれぞれ割引率 10%/年、20%/年を使用。基準年の排出量は EPA、RITE がそれぞれ利用している排出量を利用。

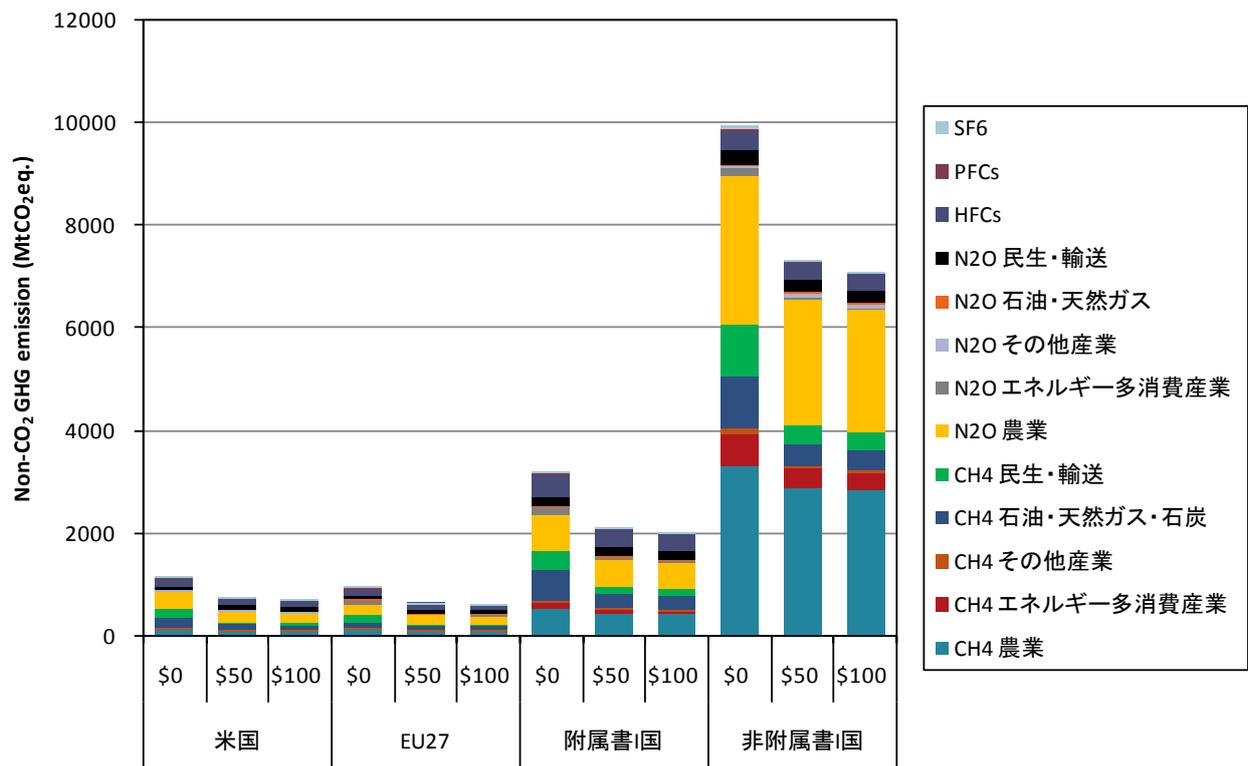


図 3-6 2020 年における限界削減費用別の Non-CO<sub>2</sub> GHG 排出量

#### IV. RITE 世界モデル分析の総括：附属書 I 国の限界削減費用曲線

##### 1. 1990 年排出量基準で見た 2020 年の限界削減費用曲線

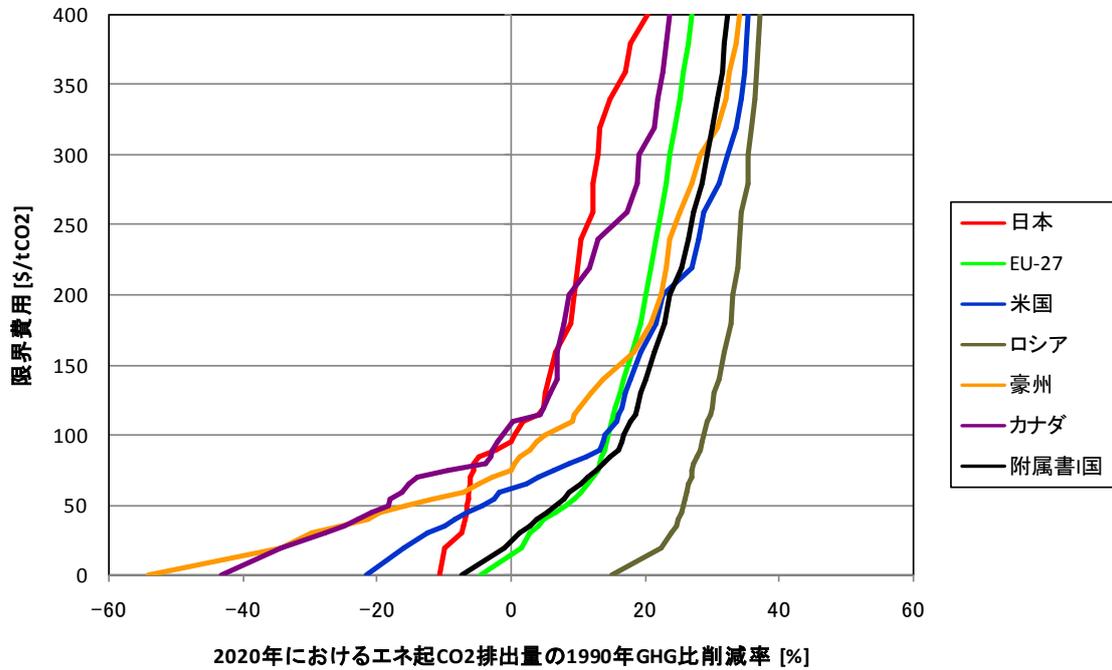


図 4-1 1990 年排出量基準で見た 2020 年のエネルギー起源 CO<sub>2</sub> の限界削減費用曲線

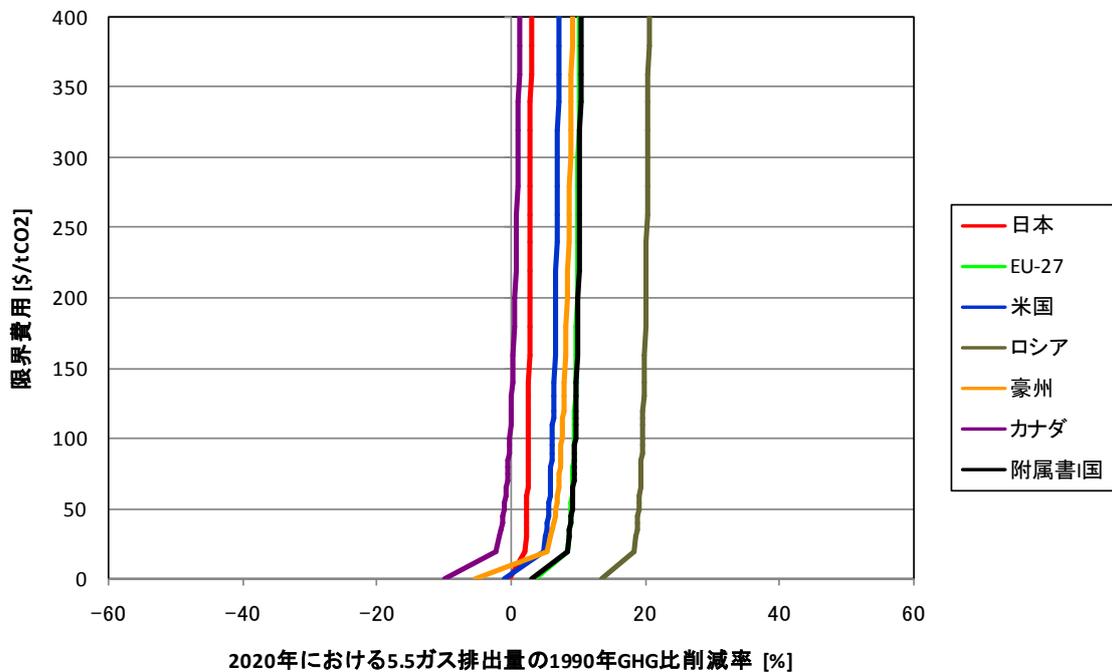


図 4-2 1990 年排出量基準で見た 2020 年の 5.5 ガスの限界削減費用曲線

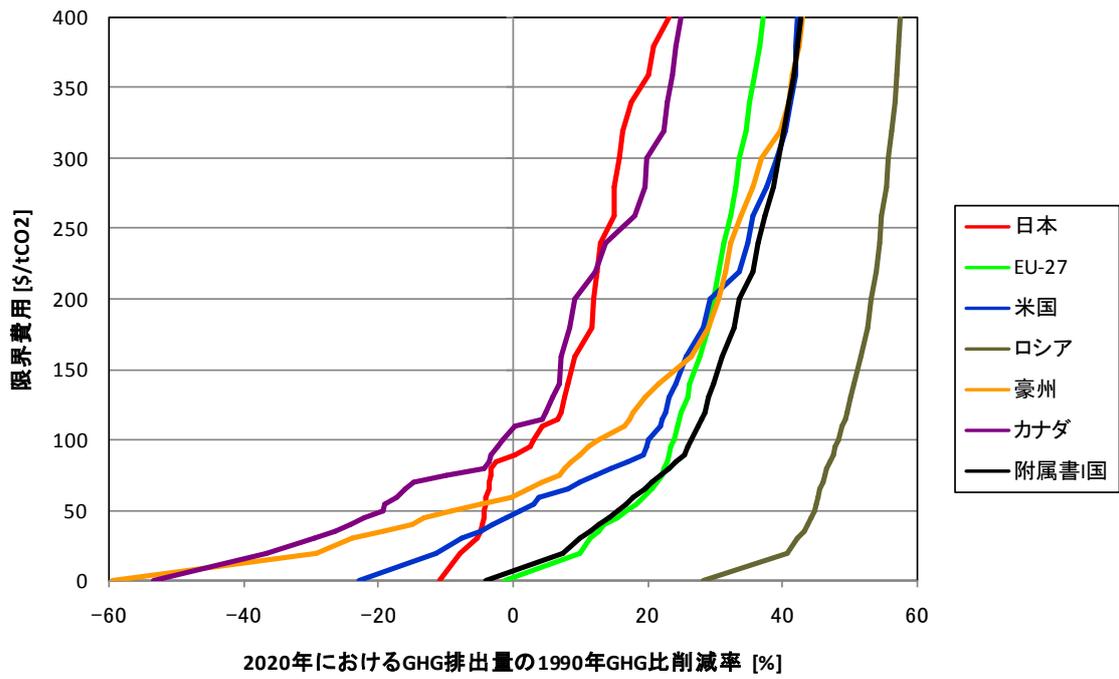


図 4-3 1990 年排出量基準で見た 2020 年の G H G（6 ガス）の限界削減費用曲線

2. 2005 年排出量基準で見た 2020 年の限界削減費用曲線

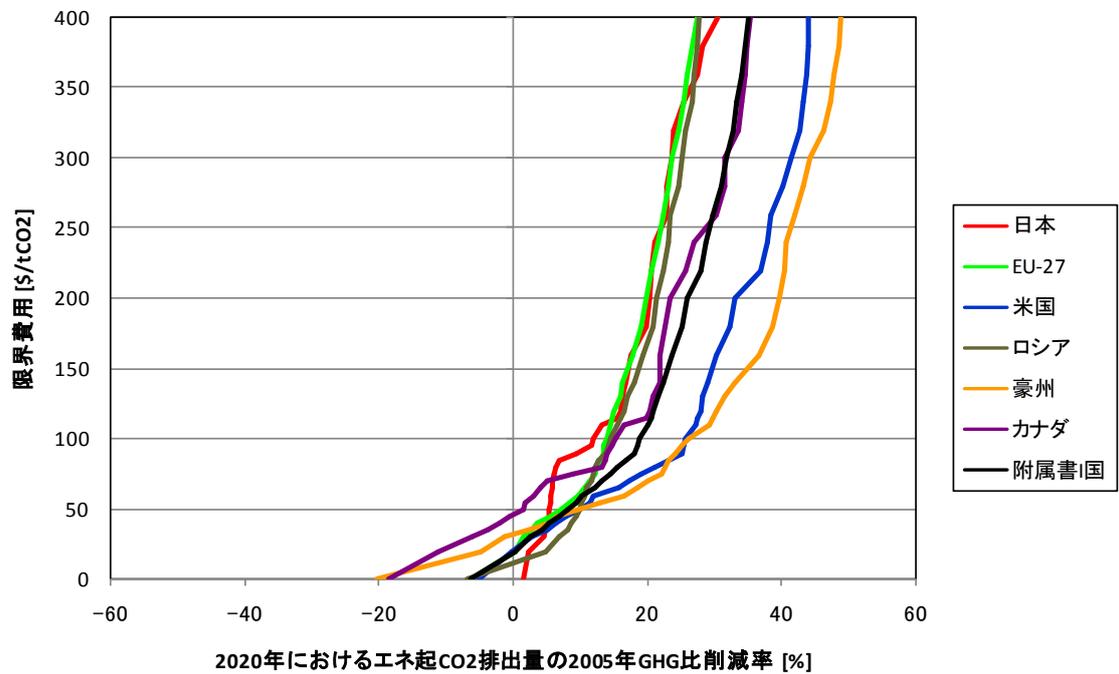


図 4-4 2005 年排出量基準で見た 2020 年のエネルギー起源 CO<sub>2</sub> の限界削減費用曲線

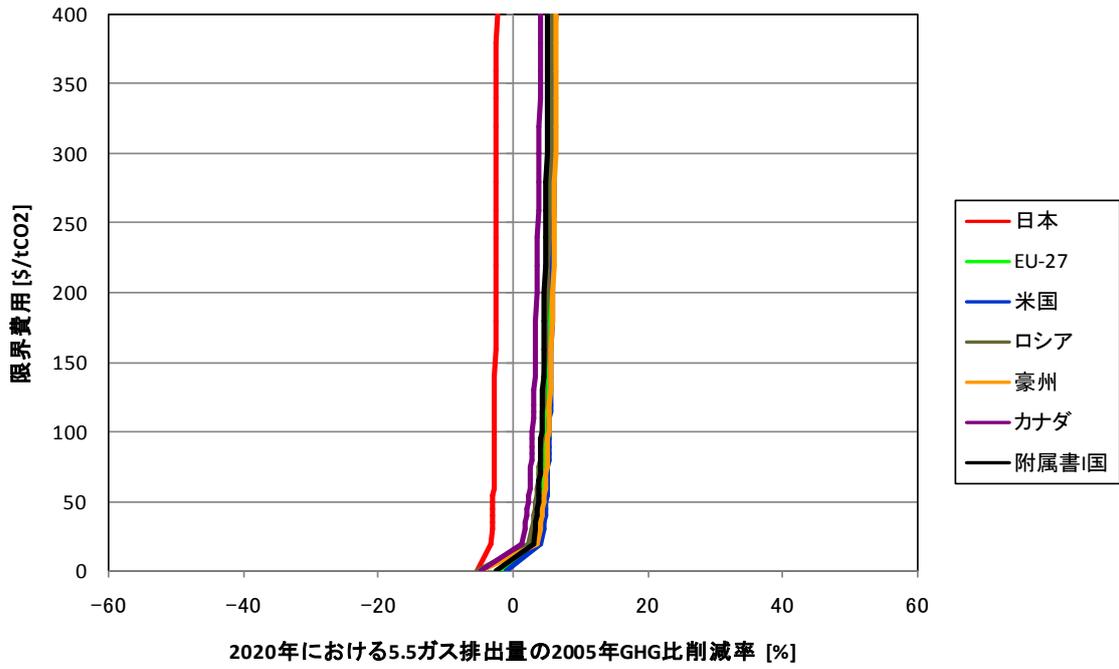


図 4-5 2005 年排出量基準で見た 2020 年の 5.5 ガスの限界削減費用曲線

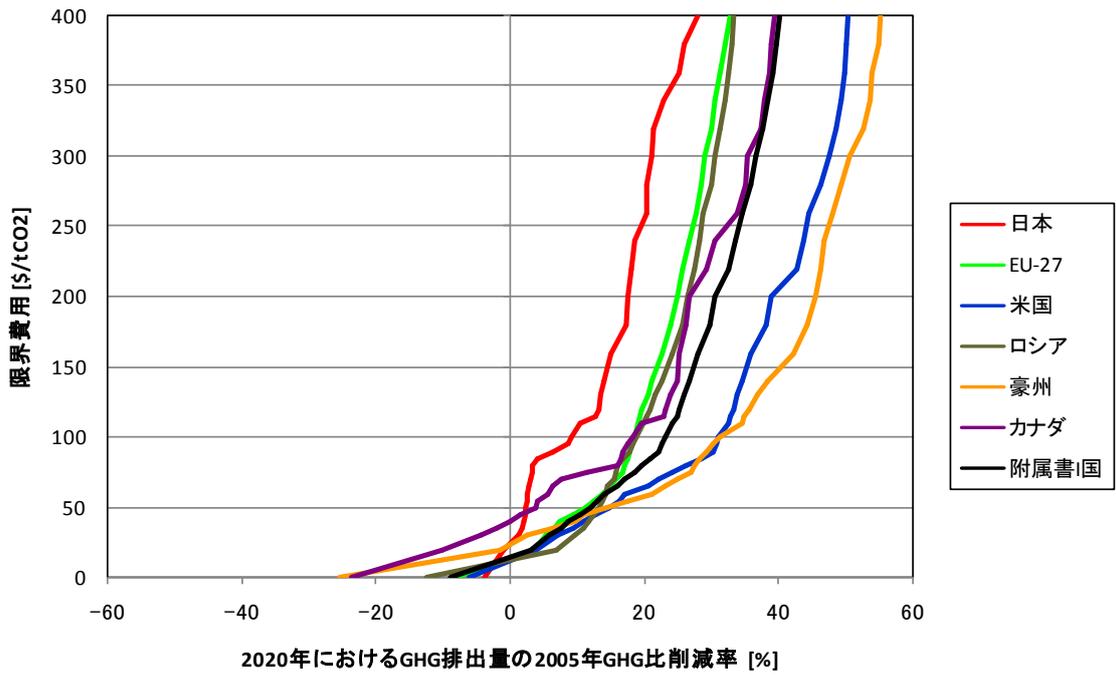


図 4-6 2005 年排出量基準で見た 2020 年の G H G ( 6 ガス ) の限界削減費用曲線

## 参考文献

- de Vries, B.J.M., D.P. van Vuuren, M.G.J. den Elzen, M.A. Janssen, 2001; The Targets Image Energy Regional (TIMER) Model-Technical Documentation, RIVM report.
- EIA, 2005; International Energy Outlook 2005 Data, <http://www.eia.doe.gov/oiaf/forecasting.html>
- EPA, 2002; International Methane and Nitrous Oxide Emissions and Mitigation Data, <http://www.epa.gov/methane/appendices.html>
- EPA, 2006a; Global Anthropogenic Non-CO2 Greenhouse Gas Emissions: 1990-2020.
- EPA, 2006b; Global Mitigation of Non-CO2 Greenhouse Gases, <http://www.epa.gov/climatechange/economics/downloads/GlobalMitigationFullReport.pdf>.
- FAO, FAOSTAT; FAO statistical database, <http://faostat.fao.org/>
- Hyman, R.C., J.M. Reilly, M.H. Babiker, A. Valpergue De Masin and H.D. Jacoby, 2002; Modeling non-CO2 greenhouse gas abatement, MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report No.24.
- IEA, 2007a; CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion, OECD/IEA.
- IEA, 2007b; World Energy Outlook 2007, OECD/IEA.
- IFPRI, 1999; Live stock to 2020- The Next Food Revolution-, IFPRI Discussion Paper 28, <http://www.ifpri.org/2020/dp/dp28.pdf>.
- IIASA, 2008; GAINS Model, <http://gains.iiasa.ac.at/gains/EU/index.login?logout=1>
- IPCC, 1996; Greenhouse Gas Inventory Reference Manual. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol. 3. IPCC/OECD/IEA, Geneva.
- IPCC, 2000; Special Report on Emissions Scenarios, Cambridge University Press.
- Masui, T., 2001; Development of Land Use Model for IPCC New Emission Scenarios (SRES), Present and Future of Modeling Global Environmental Change, pp.441-448.
- Tilman, D. et al., 2001; Forecasting Agriculturally Driven Global Environmental Change, SCIENCE Vol. 292-13, pp.281-284.
- UN, 2007; World Population Prospects: The 2006 Revision.
- UNFCCC, 2009; GHG data from UNFCCC. [http://unfccc.int/ghg\\_data/ghg\\_data\\_unfccc/items/4146.php](http://unfccc.int/ghg_data/ghg_data_unfccc/items/4146.php)
- USDA, 2003; Food Security Assessment, GFA-14, <http://www.ers.usda.gov/publications/GFA14/>

### <モデルに関する全般的な参考文献>

- RITE システム研究グループ、<http://www.rite.or.jp/Japanese/labo/sysken/systemken.html>
- Akimoto, K., F.Sano, J.Oda, T.Homma, U.K.Rout, T.Tomoda, 2008; Global Emission Reductions through a Sectoral Intensity Target Scheme, Climate Policy, Vol.8, S46-S59.
- Oda, J., K.Akimoto, F.Sano, T.Homma, T.Tomoda, 2007; Evaluation of Energy Saving and CO<sub>2</sub> Emission Reduction Technologies in Energy Supply and End-use Sectors Using a Global Energy Model, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.2, Issue 1, pp.72-83.