

電力中央研究所報告

非CO₂温室効果ガスの削減について

調査報告：Y07012

平成20年 3 月

財団法人 電力中央研究所

IR **CRIEPI**

非 CO₂ 温室効果ガスの削減について

西村 嘉晃* 杉山 大志*

キーワード：非 CO₂ 温室効果ガス

メタン

一酸化二窒素

六フッ化硫黄

削減ポテンシャル

Key Words : Non-CO₂ Greenhouse Gases

Methane

Nitrous oxide

SF₆

Mitigation potential

Mitigation of Non-CO₂ Greenhouse Gases

by Yoshiaki Nishimura and Taishi Sugiyama

Abstract

The emissions of non-CO₂ greenhouse gas (Non-CO₂ GHG) such as methane (CH₄), nitrous oxide (N₂O) and fluorinated gases (HFCs, PFCs and SF₆) are estimated to increase by 44% from 1990 to 2020. The non-CO₂ GHGs have large mitigation potential at negative or low costs, especially in the developing countries. IPCC suggests that the reduction of non-CO₂ GHG emissions is effective option for the mitigation of global warming.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA) has developed two comprehensive reports on non-CO₂ GHG emissions covering all over the world for the period from 1990 to 2020 and their mitigation potentials. This report summarizes the EPA assessments on non-CO₂ GHG mitigation potentials and extracts necessary information for the mitigation strategies against global warming. There are large mitigation potentials in the energy sector as well as in agricultural sector especially in the developing countries. The emissions of fluorinated gases are expected to grow rapidly in the future especially in the developing countries such as China.

There are variety of barriers against non-CO₂ GHG reductions. There are also sustainable development synergies/trade-offs when non-CO₂ GHG reductions are carried out. These have to be appropriately considered when large amount of mitigation are put into practice especially in the developing countries. Voluntary efforts to reduce SF₆ emissions by electric power sector in Japan has been successfully carried out, and will be a good example to show the effectiveness of gas-by-gas and sectoral approaches.

(Socio-economic Research Center, Rep.No.Y07012)

(平成 20 年 2 月 29 日 承認)

* 社会経済研究所 上席研究員

背景

メタン、一酸化二窒素、代替フロン等の二酸化炭素以外の温室効果ガス（非 CO₂ 温室効果ガス）の排出量は、今後、途上国を中心に大幅に増加する見通しである。また、温暖化防止対策の効率的実施には非 CO₂ 温室効果ガスの削減が不可欠であるとの指摘がある（図 1）。このため、関連情報の蓄積と評価が必要である。

目的

米国環境保護庁（EPA）による、全世界を調査対象とした非 CO₂ 温室効果ガスの削減ポテンシャル（削減技術の適用性や削減効率などを考慮して推定した最大削減可能量）推計報告（2006 年）等にもとづき、(1)非 CO₂ 温室効果ガスの排出状況、削減ポテンシャル、部門別・ガス別の削減技術や障壁および持続可能な開発に対するシナジー等について整理し、(2)今後の温暖化防止活動への活用可能性について検討する。

主な成果

1) 非 CO₂ 温室効果ガスの排出状況

世界全体の排出量は、1990 年の 89 億 t CO₂-eq¹から、2020 年には 44%増加し、129 億 t CO₂-eq に達する見通しである。この間、先進国の排出量は若干減少する一方、途上国の排出量は大幅に増加する。2020 年のガス別の排出量は、メタンが 79 億 t CO₂-eq、一酸化二窒素が 39 億 t CO₂-eq、代替フロン等が 9 億 t CO₂-eq と推計され、排出量の多い国は、中国、米国、ブラジル、インド、ロシア、メキシコ等である。

2) 削減ポテンシャル

2020 年に世界全体で、負のコスト²（対策によって得られる利益が対策コストを上回る場合）で約 6 億 tCO₂-eq の削減が可能であり、50 ドル/t CO₂-eq 以下のコストで約 27 億 tCO₂-eq の削減が可能とされている。ガス別ではメタンの削減ポテンシャルが最も大きい。具体的には、炭鉱からのメタン排出（中国他）、天然ガスシステムからのメタン排出（ロシア、メキシコ他）、農耕地土壌からの一酸化二窒素排

¹ 二酸化炭素換算量

² 0ドル/t CO₂-eq 以下のコスト。例えば農業部門の施肥料削減による N₂O 削減対策の場合、収穫量の減少を考慮してもマイナス数百ドル/t CO₂-eq となる場合がある。

出（中国、ブラジル他）、反芻動物の腸内醗酵によるメタン排出（中国、インド、ブラジル他）などについて、低コストあるいは負のコストでの削減ポテンシャルが大きい。

3) SF₆ 削減における日本の先進的取組み

電力分野における電気遮断機の絶縁ガスなどに使われている SF₆ は、排出量は温室効果ガス全体に比べて小さいが、日本の民間業界による自主的な削減への取組みが進んでいる（図 2）。このことは、日本の自主的取組みの実効性を訴える良い事例であり、また、温暖化防止のための将来枠組みにおいては、部門別・ガス別・技術別の具体的な行動へのコミットメントが適切なことを示す一例となっている。

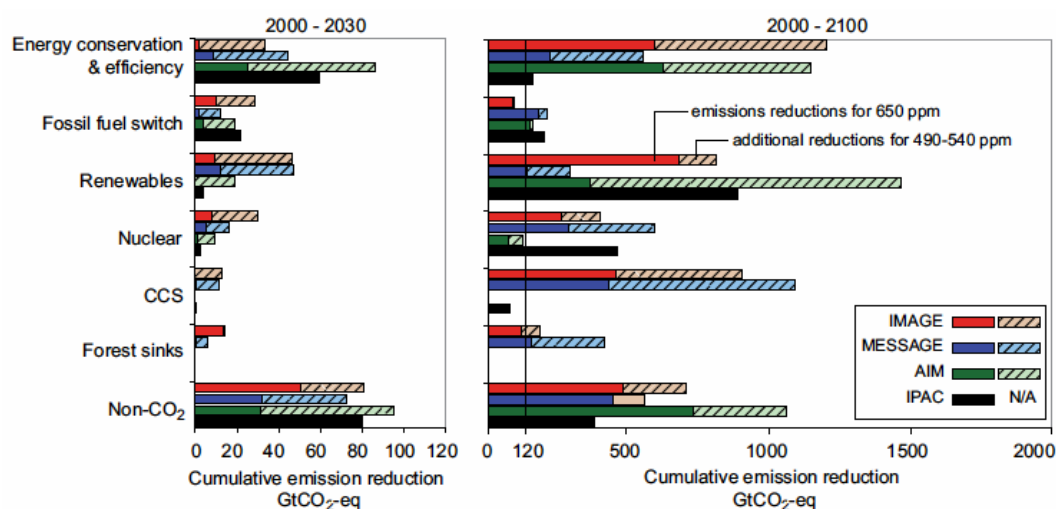


図 1 2000～2030 年（左のグラフ）および 2000～2100 年（右のグラフ）に必要な対策技術別の累積削減量を、目標安定化濃度 650ppm（濃い色の棒グラフ）と 490～540ppm（斜線の棒グラフ）について示したもの（4 種のモデルによるシナリオ事例）。特に 2030 年までの濃度安定化については、非 CO₂ 温室効果ガスの削減が大きな役割を果たすことが分かる。

出典：IPCC, Fourth Assessment Report 2007

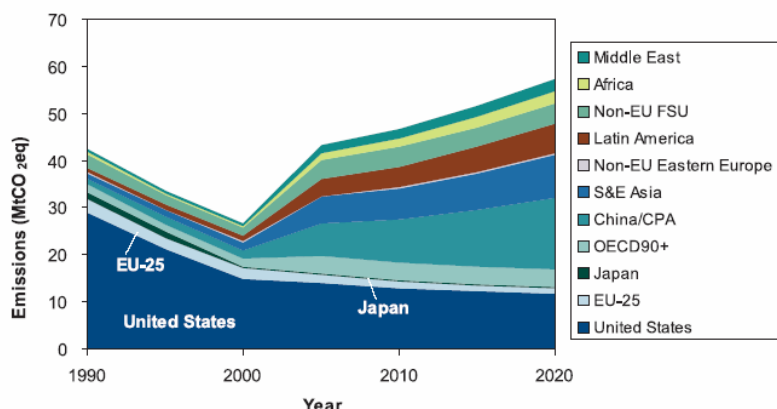


図 2 2020 年までの電力部門における SF₆ の国別排出量見通し

日本が自主的取組により大幅な削減を達成している一方で、将来の途上国の排出量増加は著しい。

出展：EPA, Global Mitigation of Non-CO₂ Greenhouse Gases, 2006

目 次

1. はじめに	1
1.1 背景	1
1.2 本調査の目的	3
2. 非 CO ₂ 温室効果ガスの排出量	3
2.1 世界全体の温室効果ガス排出量および大気中濃度の変化	3
2.2 附属書 I 国と非附属書 I 国における排出量の傾向	5
2.3 国別排出量	7
2.4 主要排出国のガス別排出量	8
2.4.1 主要排出国のメタン排出量	8
2.4.2 主要排出国の一酸化二窒素排出量	9
2.4.3 主要排出国の代替フロン等排出量	9
3. 部門別排出源と排出削減技術	10
3.1 部門別排出量全般について	10
3.2 エネルギー部門	10
3.3 農業部門	12
3.4 廃棄物部門	14
3.5 産業部門	15
4. 削減コストと削減ポテンシャル	16
4.1 EPA レポートにおける削減コストの評価法	16
4.2 非 CO ₂ 温室効果ガスの削減ポテンシャル	18
4.3 部門別の削減ポテンシャル	20
4.3.1 エネルギー部門の削減ポテンシャル	20
4.3.2 廃棄物部門の削減ポテンシャル	20
4.3.3 産業部門の削減ポテンシャル（電力システムからの SF ₆ 排出削減ポテンシャル）	21
4.3.4 農業部門の削減ポテンシャル	22
5. 排出削減に対する障壁および持続可能な開発に対するシナジー／トレードオフ	23
6. 代替フロン等の排出削減の取り組み事例	25
6.1 日本の電気事業による自主的な SF ₆ 排出削減目標	25
6.2 世界半導体会議（WSC）による自主的 PFC 排出削減目標	27
7. 温暖化防止活動への活用の可能性について	27
参考文献	29

1. はじめに

1.1 背景

京都議定書の削減対象である温室効果ガスは、二酸化炭素（CO₂）、メタン（CH₄）、一酸化二窒素¹（N₂O）、ハイドロフルオロカーボン²（以下 HFC）、パーフルオロカーボン³（以下 PFC）および六フッ化硫黄（以下 SF₆）である。HFC、PFC および SF₆ の 3 種類のガスは代替フロン等⁴と呼ばれる。二酸化炭素については早い時期から排出削減のための取り組みが進められているが、その他の 5 種類のガス（以下「非 CO₂ 温室効果ガス⁵」）については対応が遅れている（Lucas,P.L. et al. ,2005）。非 CO₂ 温室効果ガスは、エネルギー、廃棄物、農業、産業（製造）など様々な部門の多様な排出源から排出されている。主に途上国において、低コストでの削減ポテンシャルが大きいことから近年注目を集めている。

今後、世界全体で温室効果ガス排出量の大幅な削減を進めるに当たっては、二酸化炭素の削減だけではなく、非 CO₂ 温室効果ガスの削減を組み合わせることにより、効率的な対策が可能となる（IPCC,2007a）。

図 1-1 は、IPCC 第三作業部会第四次評価報告書「政策決定者向け要約」に掲載された図（Figure SPM 9）である。大気中温室効果ガス濃度を 650ppm で安定化させる場合（濃い色の棒グラフ）と 490～540ppm で安定化させる場

合（斜線の棒グラフ）に、それぞれどのような対策技術がポートフォリオとして導入され、かつ、それぞれの対策技術によってどのくらいの削減が必要となるかを、4 種類のモデルに基づく実例シナリオを比較して示したものである。図の左のグラフは、2000 年から 2030 年までの対策によって安定化を達成する場合、右のグラフは 2000 年から 2100 年までの対策によって安定化させる場合の各対策技術による期間中の累積削減量を表している。2030 年までの短期間の取り組みでは、「非 CO₂ 温室効果ガス削減対策」（Non-CO₂）によって、「省エネルギーおよびエネルギーの効率化」（Energy conservation & energy efficiency）と同等、あるいはそれ以上削減される必要があり、最も重要な対策のオプションと言える。2100 年までの対策では、モデルによってばらつきはあるが、「省エネルギーおよびエネルギーの効率化」や「再生可能エネルギーの利用」（Renewables）とほぼ同程度の削減が想定されている。このように、大気中温室効果ガスの安定化のためには、非 CO₂ 温室効果ガス削減が重要な役割を果たすことが期待されている。

非 CO₂ 温室効果ガスの削減ポテンシャルについては 1990 年代から欧米を中心に多くの研究が行われてきている。米国では、スタンフォード大学の Weyant を中心とした研究プロジェクト・チーム（EMF21）がマルチガス・アプローチ（Multi-gas approach）に基づく温暖化対策とその気候政策への適用について多くの研究成果をまとめた⁶。これらの成果をベースとした米国環境保護庁（以下 EPA）による 2 つの報告書（「Global Anthropogenic Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions: 1990-2020」,2006 および「Global Mitigation of Non-CO₂

¹ 亜酸化窒素（俗称）と呼ばれることもある。

² HFC-23 等、ハロゲン化合物を含む 11 種類の炭化化合物

³ PFC-14 等 10 物質。ただし、IPCC 第一作業部会では SF₆ を PFC に含め 11 物質とされている（IPCC,2007b）。

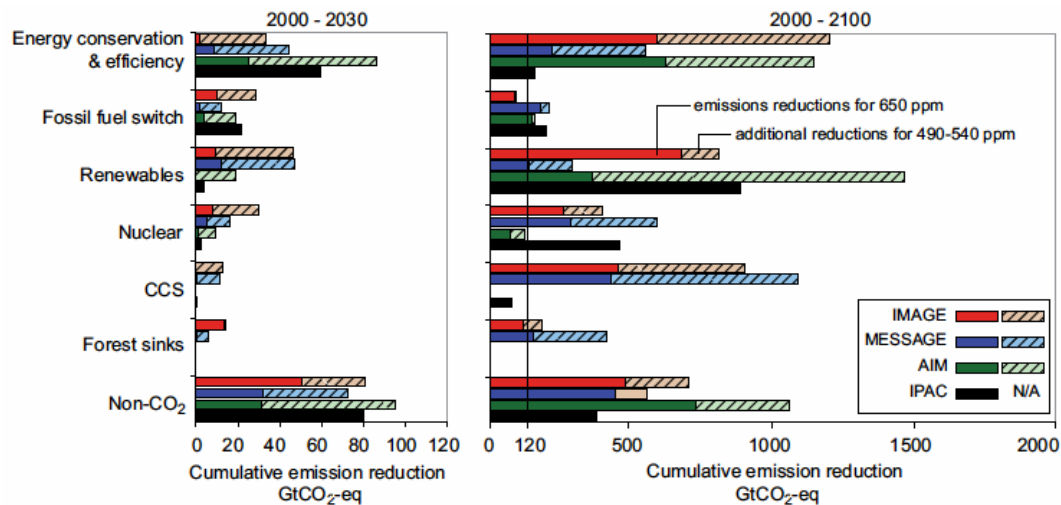
⁴ 「代替フロン等 3 ガス」、「F ガス（Fluorinated Gas、F-Gases）」などと呼ばれることもある。

⁵ 一般的名称は確立していない。英文では「non-CO₂ Greenhouse Gases」（EPA）、「non-CO₂」（IPCC）などと記述される。

⁶ EMF-21 の成果は「A Special Issue of the Energy Journal: Multi-Greenhouse Gas Mitigation and Climate,2006」に集大成されている。

Greenhouse Gases”,2006) は、非 CO₂ 温室効果ガスのベースライン排出量と削減ポテンシャル

取り組みに加えて CDM⁸/JI⁹などの京都メカニズム¹⁰の活用や、セクトラル・アプローチな



注) 温室効果ガスの大気中濃度を 650ppm (濃い色の棒グラフ) または 490~540ppm (斜線の棒グラフ) で安定化させるために、必要な技術、およびその技術による削減量を表わしている。削減量は、2000 年から 2030 年の期間で濃度安定化を達成する場合 (図の左のグラフ) と 2000 年から 2100 年の期間で安定化する場合 (右のグラフ) の期間中の累積削減量である。4 種類のモデルによる実例シナリオを比較して示してある。特に 2030 年までの濃度安定化については、非 CO₂ 温室効果ガスの削減が大きな役割を果たすことが分かる。

(出典: IPCC, Fourth Assessment Report: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III, 2007)

図 1-1 温室効果ガスの大気中濃度を安定化させるために必要な対策技術別の累積削減量

Fig.1-1 Cumulative Emission Reductions for Alternative Mitigation Measures Aiming at the Stabilization of Greenhouse Gas Concentration in the Atmosphere

ルの推計を行ったものであり、世界全体をカバーしている点で有意義な報告である。

日本の温室効果ガス排出の 95% 以上は二酸化炭素であり (2005 年)、他国と比べて非 CO₂ 温室効果ガスの排出割合は小さい。これは、産業構造の違いによるとともに、様々な対策技術の導入によって、既に非 CO₂ 温室効果ガスの削減に取り組んできた結果と考えられる。しかし、日本が 2050 年までの世界全体の温室効果ガス排出量半減⁷に貢献するためには、国内の

どの国際レベルでの取り組みが必要である。その際、削減ポテンシャルがどの国のどの部門に多く存在するかといった情報を整理しておくことは非常に有益と思われる。

通目標」を提案した。

⁸ クリーン開発メカニズム (Clean Development Mechanism)

⁹ 共同実施 (Joint Implementation)

¹⁰ 2013 年以降の京都メカニズムの扱いは現在のところ未確定である。

⁷ 日本政府は 2007 年 5 月に「世界全体の温室効果ガスを 2050 年までに現状から 50%削減する世界共

1.2 本調査の目的

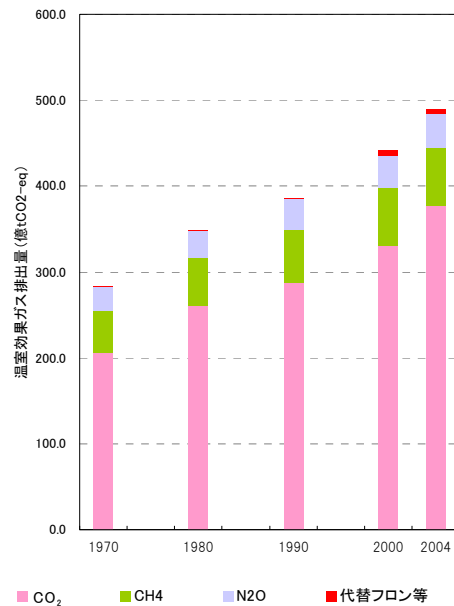
EPA による、全世界を調査対象とした非 CO₂ 温室効果ガスのベースライン排出量と削減ポテンシャル推計報告他にもとづき、非 CO₂ 温室効果ガスの排出状況、削減ポテンシャル、ガスの排出源、削減技術、削減実施に対する障壁、持続可能な開発に対するシナジー／トレードオフ効果等について整理した結果を踏まえ、今後の世界レベルでの日本の温暖化防止活動への活用の可能性について検討する。

2. 非 CO₂ 温室効果ガスの排出量

2.1 世界全体の温室効果ガス排出量および大気中濃度の変化

図 2-1 に、1970 年から 2004 年にかけての世界の温室効果ガス排出量を示す（IPCC, 2007a の Figure1.1a より作成）。2004 年の温室効果ガス排出量は 490 億 t CO₂-eq¹¹／年であり、このうち、二酸化炭素は 76.7%¹²、メタンは 14.3%、一酸化二窒素は 7.9%、HFC 等は 1.1%を占める。1970 年から 2004 年にかけて、二酸化炭素は約 80%、メタンは約 40%、一酸化二窒素は約 50%増加した（IPCC,2007a）。今後、人口増加や経済活動の活動の拡大により、主に非付属書 I 国¹³において二酸化炭素のみならず、メタン、一酸化二窒素、代替フロン等の排出量が大幅に

増加することが予想される（EPA¹⁴,2006a）。



（出典：IPCC AR4 WGIII Figure1.1a を基に作成）

図 2-1 世界全体の温室効果ガス排出量

Fig.2-1 Global Greenhouse Gas Emissions

非 CO₂ 温室効果ガスの大気中濃度は、二酸化炭素炭素濃度と同様に、産業革命以降大幅に増大している。メタン濃度は産業革命以前の 715ppb から 2005 年には 1774ppb に、一酸化二窒素濃度は約 270ppb から 319ppb に増大した（この間、二酸化炭素濃度は 280ppm から 379ppm に増大した）（IPCC, 2007b）。ただし、二酸化炭素の濃度増加率が継続して増大傾向を示しているのに対して、一酸化二窒素の濃度増加率は 1980 年以降、ほぼ一定である。また、メタン濃度は 1993 年頃から増加率が下がり始め、1999 年から 2005 年にかけて濃度は殆ど増加していない（IPCC, 2007b）。人為的起源による排出量が増加しているにもかかわらず大気中濃度が増加しないということは、増加した大気中のガスが自然界のプロセスにおいて吸収あるいは分解されていることを示唆していると考え

¹¹ 温室効果ガス排出量の単位は、ガス別の温暖化能力に基づき二酸化炭素換算で表す。

¹² CO₂ 排出量の内訳は、化石燃料の燃焼による排出 56.6%、その他起源による排出 2.8%、森林破壊による吸収減 17.3%である。

¹³ 附属書 I 国とは、気候変動枠組条約の附属書 I に記載された国。日本、米国、EU 諸国、カナダ、オーストラリア、ロシアなど 39 カ国と国の集合体としての EU。京都議定書で定められた削減義務を負っている。非附属書 I 国は、附属書 I に記載されていない国であり、基本的には発展途上国である。

¹⁴ 米国環境保護庁（U.S. Environment Protection Agency）

られるが、これらの物質の収支については未解明な部分が多い(IPCC, 2007b)。

代替フロン等の大気中濃度は極めて小さい。2003年のHFCの大気中濃度2.6～26ppt¹⁵、PFCは0.26～76ppt (IPCC,2005)、また、SF₆の大気中濃度は、2005年の観測結果では約6ppt¹⁶であり、二酸化炭素の大気中濃度の100万分の1のオーダーだが、単位質量あたりの温室効果が数千倍と大きいため、わずかな増加でも地球温暖化への影響は無視できない(気象庁,2001)。

ここで、様々な温室効果ガスの温暖化の能力を表す「地球温暖化係数」について述べておく。一般に、各温室効果ガスの排出量はすべてガスの種類別に定義された地球温暖化係数を用い、二酸化炭素の量に換算した値を用いて表される。単位はt CO₂-eqである。地球温暖化係数とは、ある評価期間(一般的には100年間とする場合が多い)の積分値として、そのガスの放射強制力(そのガスが大気中に存在することによって地表面を暖める能力を単位地表面当りの熱量で表した量)や大気中に残留する期間を考慮して、同じ重量の二酸化炭素による温暖化能力の何倍の温暖化能力を持つかを表す指標である。表2-1に各温室効果ガスの地球温暖化係数を示す。表に示した数値はIPCC第三次評価報告書による推計値である。2007年に公表された第四次評価報告書では若干の修正が行われているが、EPAによる削減ポテンシャルの推計は第三次評価報告書による地球温暖化係数が用いられている。

メタンの地球温暖化係数(評価期間100年)は21、一酸化二窒素は310であり、代替フロン等はガスの種類によってHFC-152aの140からSF₆の23900まで幅広い値を持つ。各温室効果ガスの大気中の残留期間が異なるため、評

価期間の取り方により地球温暖化係数は異なる。メタンの残留期間は12年であるため、評価期間を20年とした場合の地球温暖化係数は評価期間100年の場合(21)よりも大きな値となる。逆に、大気中残留期間の長い一部の代替フロン等(例えばSF₆は3200年、PFC-14は50000年)の場合は評価期間が長いほど地球温暖化係数は大きくなる(詳しくは、IPCC第4次評価報告書(第1作業部会)のTechnical Summary参照)。

1970年から2000年までの期間で評価した代替フロン等全体の放射強制力は、0.0121W/m²であり、京都議定書における温室効果ガス全体の放射強制力(0.7501W/m²)の約1.6%、非CO₂温室効果ガス全体の放射強制力(0.0801W/m²)の約15%に相当する(IPCC,2005)。

表 2-1 主な温室効果ガスの地球温暖化係数

Table 2-1 Global Warming Potentials for GHGs

温室効果ガスの種類	地球温暖化係数 (評価期間100年)
二酸化炭素炭素 (CO ₂)	1
メタン (CH ₄)	21
一酸化二窒素 (N ₂ O)	310
代替フロン等	
ハイドロフルオロカーボン	
HFC-23	11700
HFC-125	2800
HFC-134a	1300
HFC-143a	3800
HFC-152a	140
HFC-227ea	2900
HFC-236fa	6300
HFC-4310mee	1300
パーフルオロカーボン	
PFC-14 (CF ₄)	6500
PFC-116 (C ₂ F ₆)	9200
PFC-3-1-10 (C ₄ F ₁₀)	7000
PFC-5-1-14 (C ₆ F ₁₄)	7400
SF ₆	23900

備考：IPCC 2007b の Technical Summary Table2.14

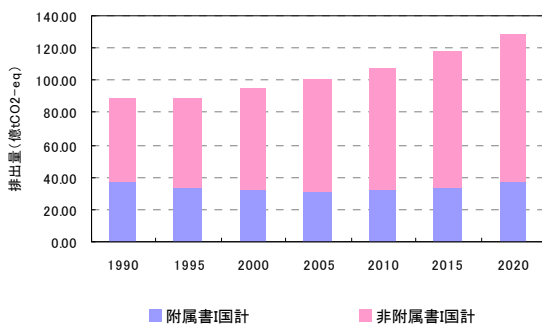
より作成。表中の数値はIPCC第三次評価報告書の数値。

¹⁵ 一兆分の一分率

¹⁶ 東北大学理学研究科大気海洋変動観測研究センター物質循環分野 HP による。

2.2 附属書 I 国と非附属書 I 国における排出量の傾向

1990 年から 2020 年までの附属書 I 国と非附属書 I 国それぞれの非 CO₂ 温室効果ガス排出量を推計した結果を図 2-2 に示す（米国 EPA による 1990 年から 2020 年までの 5 年毎の世界各国の非 CO₂ 温室効果ガス排出量推計値データベースから作成）。1990 年から 2000 年までは実績に基づく推計であり、2005 年以降は様々な前提に基づく予測値である。これによると、非 CO₂ 温室効果ガスの排出量は、1990 年から 2020 年にかけて 44% 増加する。非附属書 I 国の合計排出量は、1990 年には、附属書 I 国全体の約 1.4 倍となっており、2020 年には約 2.5 倍になる見通しである。



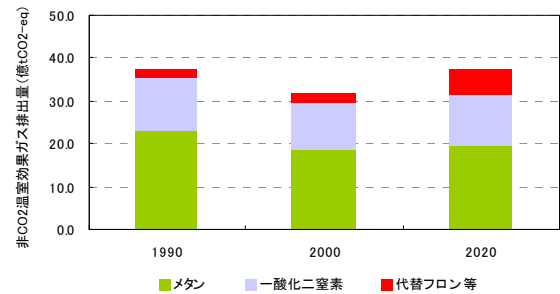
（出典：EPA,2006a の Appendix A のデータより作成）

図 2-2 1990 年から 2020 年までの附属書 I 国と非附属書 I 国の非 CO₂ 温室効果ガス排出量

Fig.2-2 Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions by Annex-I and Non-Annex-I Countries (1990-2020)

図 2-3 に附属書 I 国の非 CO₂ 温室効果ガスの排出量、図 2-4 に非附属書 I 国の非 CO₂ 温室効果ガスの排出量をガスの内訳とともに示す。附属書 I 国（図 2-3）では 1990 年から 2000 年にかけてメタンの排出量は 23 億 tCO₂-eq から 18.5 億 tCO₂-eq へと 20% 近く減少したが、その後 2020 年にかけて増加し、19.6 億 tCO₂-eq となる見通しである。一酸化二窒素も 1990 年

の 12.4 億 tCO₂-eq から 2000 年の 10.8 億 tCO₂-eq へと 13% 減少したが、その後メタンと同様に増加し、2020 年には 11.9 億 tCO₂-eq になると見られている。代替フロン等は単調増加し、2020 年には 1990 年の 185% 増となる。

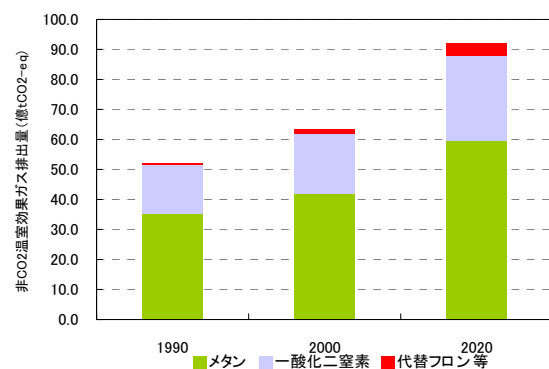


（出典：EPA,2006a の Appendix A のデータより作成）

図 2-3 附属書 I 国の非 CO₂ 温室効果ガスの排出量とガス種の内訳

Fig.2-3 Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions of Annex I Countries by Gas

非附属書 I 国（図 2-4）では、すべてのガスが大幅に増加する見通しである。メタンは 1990 年の 35.1 億 tCO₂-eq から 2020 年の 59.5 億 tCO₂-eq へ約 70%、一酸化二窒素は 1990 年の



（出典：EPA,2006a の Appendix A のデータより作成）

図 2-4 非附属書 I 国の非 CO₂ 温室効果ガスの排出量とガス種の内訳

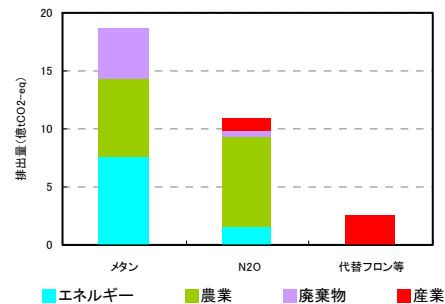
Fig.2-4 Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions of Non-Annex I Countries by Gas

16.4 億 t CO₂-eq から 2020 年の 28.6 億 t CO₂-eq へ約 140%、代替フロン等は 1990 年の 0.4 億 t CO₂-eq から 2020 年には約 9 倍の 3.7 億 t CO₂-eq に増加する見通しである。EPA の見通しによれば、代替フロン等の排出量増加傾向は長期間に渡って継続し、増加率も 21 世紀前半は上昇を続ける。これは、ODS¹⁷（Ozone Depletion Substances）の製造・使用がモントリオール議定書により禁止されるため、代替フロン等の製造・利用が必要となるためである（EPA,2006a）。

図 2-5 および図 2-6 に 2000 年における附属書 I 国と非附属書 I 国のガス種別、部門別の排出量を示す。

EPA の部門区分では、エネルギー部門には、化石燃料の燃焼¹⁸（メタン、N₂O）、天然ガス・石油システム（メタン）、石炭採掘（メタン）およびバイオマス燃焼¹⁹（メタン、N₂O）が含まれており、農業部門には、耕作地土壌（N₂O）、稲作（メタン）、反芻動物の腸内醗酵（メタン）、家畜排泄物管理（メタン、N₂O）が含まれる。また、廃棄物部門には、埋立処分場（メタン）、廃水・下水（メタン、N₂O）が含まれる。産業部門には、代替フロンの製造、利用に伴う漏出およびアジピン酸²⁰・硝酸の製造に伴う N₂O の排出が含まれている。

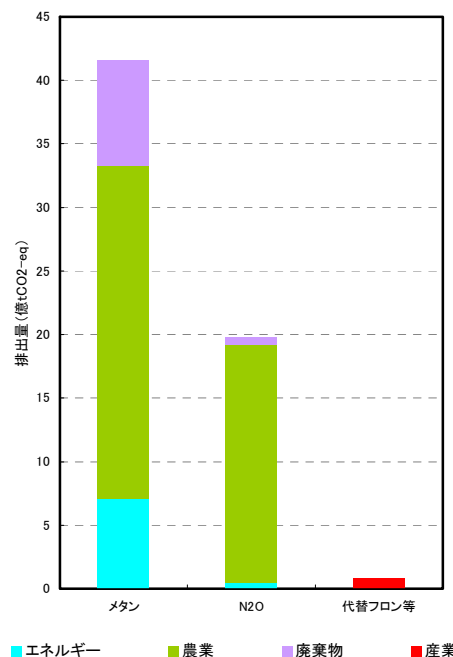
附属書 I 国（図 2-5）、非附属書 I 国（図 2-6）ともに農業部門のメタン、N₂O の排出量が多い。ただし、附属書 I 国ではメタンの排出量が最も多いのはエネルギー部門である。これは天然ガスシステム、石炭採掘からの発生（主に米国、ロシア）である。非附属書 I 国では一酸化二窒素の排出量の約 95%が農業部門における排出である。2000 年時点では非附属書 I 国の代替フロン等の排出量は限定的である。



（出典：EPA,2006a の Appendix のデータより作成）

図 2-5 2000 年における附属書 I 国のガス種別、部門別排出量

Fig. 2-5 Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions of Annex-I Countries by Gas and by Sector



（出典：EPA,2006a の Appendix のデータより作成）

図 2-6 2000 年における非附属書 I 国のガス種別、部門別排出量

Fig. 2-6 Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions of Non-Annex-I Countries by Gas and by Sector

¹⁷ オゾン層破壊物質

¹⁸ 固定発生源および移動発生源

¹⁹ 主に途上国の家庭におけるバイオマス利用

²⁰ ナイロン、ポリエステル樹脂などの合成原料

2.3 国別排出量

表 2-2 に国別の非 CO₂ 温室効果ガス排出量（2000 年のデータ。EPA 統計）を示す。最も多い国は中国で 14.83 億 t CO₂-eq であり、世界全体の排出量（63.23 億 t CO₂-eq）の 15.6%を占める。上位 10 カ国による排出量は世界全体の 52.8%である。このうち附属書 I 国は米国、ロシア、ウクライナ、オーストラリアの 4 カ国であり、合計で 17.84 億 t CO₂-eq（世界全体の 18.82%）、その他の 6 カ国が非附属書 I 国で、排出量の合計は 32.41 億 t CO₂-eq（世界全体の 34.1%）である。日本の排出量は 1.00 億 t CO₂-eq（19 位）である。

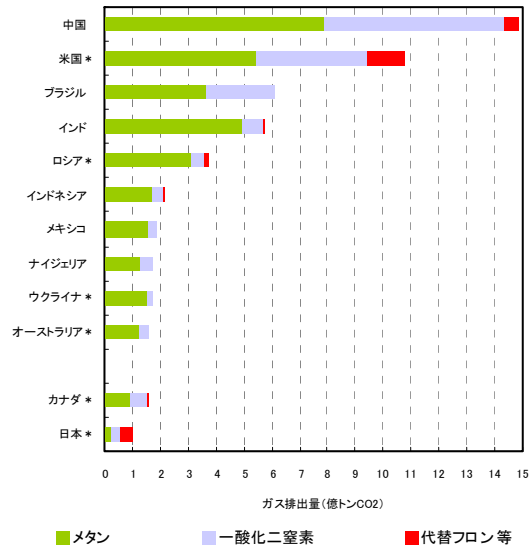
表 2-2 2000 年における非 CO₂ 温室効果ガス排出量上位 10 カ国の排出量と全体に対する比率

Table 2-2 The Top 10 Countries' Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions and the Rates to the Global Total

Non-CO ₂ Greenhouse Gas Emission				
順位	国名	排出量 (億 tCO ₂ -eq)	比率 (%)	累積比率 (%)
1	中国	14.83	15.6	15.6
2	米国	10.76	11.3	26.9
3	ブラジル	6.13	6.4	33.3
4	インド	5.72	6.0	39.3
5	ロシア	3.76	4.0	43.3
6	インドネシア	2.12	2.2	45.5
7	メキシコ	1.90	2.0	47.5
8	ナイジェリア	1.71	1.8	49.3
9	ウクライナ	1.71	1.8	51.1
10	オーストラリア	1.60	1.7	52.8
	ア			

（出典：EPA,2006 の Appendix A-1 より作成）

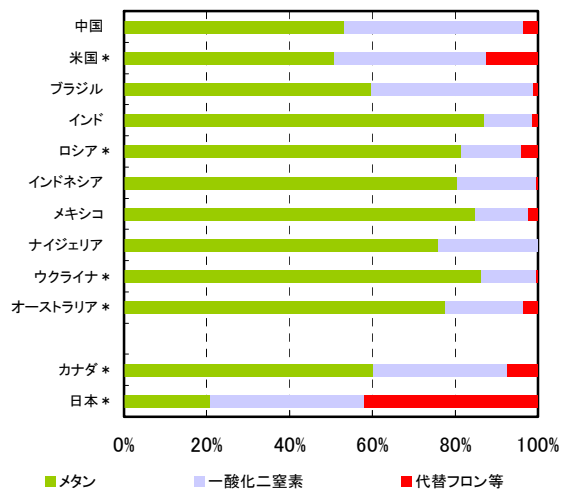
上位 10 カ国およびカナダ（11 位）と日本（19 位）の排出量とそのガス種別比率を図 2-7 と図 2-8 に示す。



（出典：EPA,2006a の Appendix A のデータより作成）

図 2-7 非 CO₂ 排出量上位 10 カ国の排出量

Fig.2-7 The Top 10 Countries' Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions



（出典：EPA,2006a の Appendix A のデータより作成）

図 2-8 非 CO₂ 排出量上位 10 カ国のガス種比率

Fig.2-8 The Top 10 Countries' Non-CO₂ Greenhouse Gas Emission Rates by Gas

中国は非 CO₂ 温室効果ガス全体の排出量が世界で最も多く、ガス種別でもメタン、一酸化二窒素排出量が一位である。代替フロン等は米国に次ぐ排出量となっている。ガス比率（図

2-8) で見ると、中国とブラジルは、他の主要な非附属書 I 国と比べてメタン排出量の比率が小さく、一酸化二窒素排出量の比率が大きい。これは農業部門（耕作土壌からの排出）と廃棄物部門における一酸化二窒素の排出量が多いためである。対照的に、インドはメタンの比率が大きく一酸化二窒素の比率は小さい。これは、インドでは反芻動物の腸内醗酵および家畜排泄物起源のメタン排出量が多いためである。

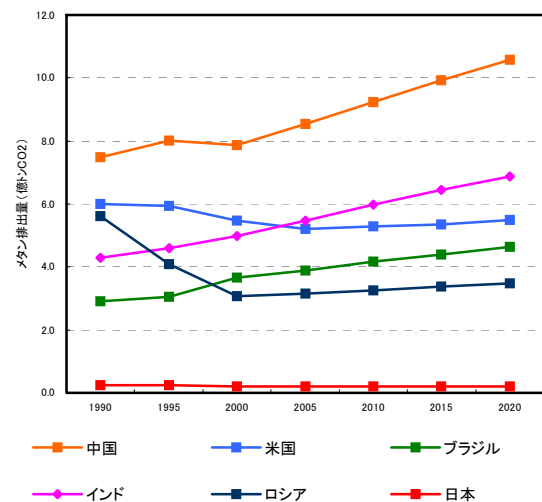
一般的に附属書 I 国では代替フロン等の比率が大きく、非附属書 I 国では小さい。これは代替フロン等の排出源が産業部門（化学工業、エアコン冷媒など）に限定されるため、工業化がある程度進んだ先進国や一部の途上国以外は排出が限定的であることによる。

メタンと一酸化二窒素の比率も、各国の産業構造条件によって左右される。工業化が進んだ米国においても、農業生産が多く、天然ガス生産も盛んなためにメタンおよび一酸化二窒素の排出量が多い。図 2-8 に示されるとおり、日本は特異なガス比率を示している。非 CO₂ 温室効果ガスのうちで代替フロン等の排出量がもっとも多く、メタン排出量がもっとも少ない。これは、農業生産や化石燃料の採掘が少なく、廃棄物の管理が進んでいる一方で、代替フロン等に関する産業（化学工業、半導体製造、エアコン冷媒など）が盛んなためと考えられる。

2.4 主要排出国のガス別排出量

2.4.1 主要排出国のメタン排出量

図 2-9 に、米国 EPA が推計した 1990 年から 2020 年までの世界の排出量データベースによる、主要排出国（実績ベースのデータに基づき推計された直近の年である 2000 年の排出量上位 5 カ国である中国、米国、ブラジル、インド、ロシアの 5 カ国）および日本のメタン排出量を示す。



(出典：EPA, 2006a の Appendix A-2 より作成)

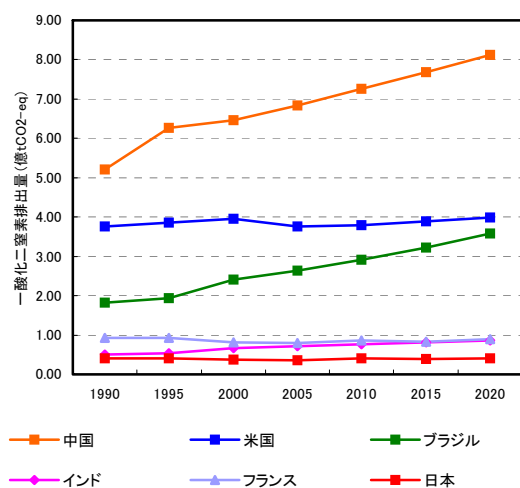
図 2-9 メタン排出量上位 5 カ国および日本のメタン排出量

Fig.2-9 Methane Emissions of Top 5 Methane Emitting Countries and Japan

中国は 1995 年から 2000 年にかけて若干減少したが、全期間にわたって最も排出量の多い国である。増加の傾向は 2020 年以降も減少に転ずる兆しは見られない。米国は 2005 年にかけて減少した後、2020 年にかけて微増する。インドは 2005 年に米国の排出量を抜いて中国に次いで 2 番目の排出国となり、その後も増加を続ける。ブラジルは 2000 年にかけて大幅に排出量が減少したロシアを抜いて 4 番目の排出国となり、徐々に米国の排出量に迫る勢いを見せている。2020 年時点で、米国を含めて上位 5 カ国の排出量はすべて増加傾向を示している。2015 年から 2020 年にかけての増加率はインド (9.9%)、中国 (6.6%)、ブラジル (5.5%) の順で大きく、以下、ロシア (3.3%)、米国 (2.7%) の順である。

2.4.2 主要排出国の一酸化二窒素排出量

図 2-10 に 2000 年の排出量上位 5 カ国(中国、米国、ブラジル、フランス、インド) および日本の一酸化二窒素排出量を示す。一酸化二窒素の排出量は、中国、米国、ブラジルの 3 カ国が極端に多く、4 位以下を大きく引き離している。中国、ブラジル、インドは 1990 年から 2020 年にかけて一貫して増加している。3 番目に排出量の多いブラジルは、1990 年から 2020 年にかけてほぼ排出量に変化していない米国を抜いて 2 番目の排出国となることが予想される。



(出典：EPA,2006a の Appendix A-3 より作成)

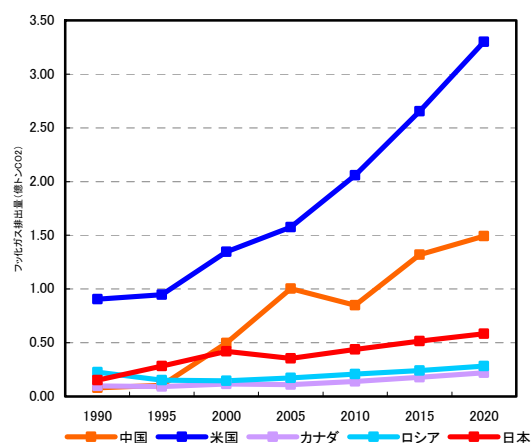
図 2-10 一酸化二窒素排出量上位 5 カ国および日本の一酸化二窒素排出量 (1990～2020 年)

Fig.2-10 N₂O Emissions of Top 5 N₂O Emitting Countries and Japan

2.4.3 主要排出国の代替フロン等排出量

図 2-11 に 2000 年の排出量上位 5 カ国(米国、中国、日本、ロシア、カナダ) の代替フロン等の排出量を示す。米国の排出量が圧倒的に大きく、2020 年まで増加を続ける見通しとなっている。中国は 2000 年に日本を抜いて 2 番目の排出国となった。中国の排出量が、2005 年から

2010 年にかけて大幅に減少するのは、現在計画されている CDM プロジェクトによって HFC-23 の破壊が想定されるからである。しかし、その後は CDM による削減にもかかわらず、大幅に生産量の増加が予想される HCFC-22²¹ の製造に伴い HFC-23 の排出量は再び上昇に転じる見通しである²²(EPA,2006a)。日本は 2000 年から 2005 年にかけて若干減少したのち、少しずつ増加するとの見通しである。なお、実際には日本の代替フロン等排出量は、1995 年の基準年以降大幅に減少し、2005 年には 1995 年の排出量 (51.1t CO₂-eq) の約 1 / 3 (16.9t CO₂-eq) まで削減されている。



(出典：EPA,2006a の Appendix A-4 より作成)

図 2-11 代替フロン等排出量上位 5 カ国の代替フロン等排出量 (1990～2020 年)

Fig.2-10 F-Gas Emissions of Top 5 F-Gas Emitting Country

²¹ HCFC-22 はモントリオール議定書の対象物質である。議定書のスケジュールによれば、先進国は 2004 年以降、生産量を 1989 年レベルで凍結し、2019 年末には消費量をゼロとする予定だが、途上国は、生産量を 2016 年以降、2015 年レベルで凍結し、2039 年末に消費量をゼロとする予定である。

²² HFC-23 は HCFC-22 の製造工程で発生する。

3. 部門別排出源と排出削減技術

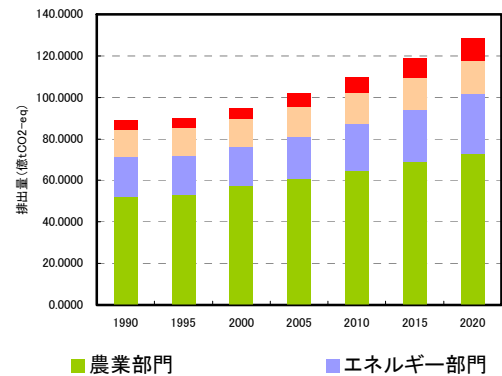
3.1 部門別排出量全般について

世界全体の部門別の非 CO₂ 温室効果ガス排出量を図 3-1 に示す。農業部門の排出量が最も多く、1990 年から 2020 年にかけて増加する見通しである。非 CO₂ 温室効果ガス排出量全体に占める割合は、多少の変動はあるものの、57～60%である。排出されるガスの種類は、後述 (3.3) するようにメタンと一酸化二窒素である。

エネルギー部門の排出量は、全体の 20%前後を占めており、1990 年から 1995 年にかけて若干減少したものの、以後、2020 年にかけて増加する。全体に占める割合も徐々に増加し、2020 年には 29%となる。エネルギー部門で排出される非 CO₂ 温室効果ガスの 87～90%はメタンである。

廃棄物部門の排出は、1990 年以降、単調増加し、非 CO₂ 温室効果ガス全体に占める割合も 13 から 16%へと増加する。排出されるガスの種類はメタンが 92%を占める。この割合は 1990 年から 2020 年にかけてほぼ一定である。

産業部門（製造部門）の排出量は、部門別では最も少ないが、増加率は最も大きく、全体に占める割合は 1990 年の 4.7%から、2020 年には 10.8%に増加する。排出されるガスは、代替フロン等のほか、アジピン酸・硝酸製造過程で排出される一酸化二窒素が含まれる。排出されるガスは、1990 年には代替フロン等の占める割合が約 52%だったが、その後、主にエアコン、冷凍機用の冷媒の製造・使用が大幅に増加するため、2020 年には約 84%となる見通しである。



(出典：EPA,2006a の Appendix A,B,C より作成)

図 3-1 非 CO₂ 温室効果ガスの部門別排出量
(1990～2020 年)

Fig.3-1 Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions by Sector

3.2 エネルギー部門

EPA の推計では、エネルギー部門における非 CO₂ 温室効果ガスの排出源は以下の 4 つの活動に分類されている：①天然ガス・石油システムからの排出、②炭鉱からの排出、③化石燃料の燃焼による排出（附属書 I 国についてはバイオマス燃焼を含む）、④バイオマス燃焼による排出（途上国におけるバイオマス燃焼）および⑤その他。以下に①から③までの活動別の排出について述べる。

①天然ガス・石油システムからの排出（メタン）

天然ガスは成分の 95%がメタンであり、採掘、精製、貯蔵、輸送の各プロセスからなる天然ガスシステムからの漏出がメタンの排出となる。天然ガスシステムからの排出量は世界全体で約 9.6 億 t CO₂-eq (2006 年) であり (EPA,2006b)、メタン排出量全体の約 8%を占めている。天然ガスシステムのうち、採掘時の漏出、パイプラインや LNG 船からの漏出などにより、メタン排出が定常的に発生している (EPA,2006b)。

排出削減技術としては、パイプラインにガスを送るための圧縮ステーションにおけるコンプレッサーの改善や老朽設備の管理強化、パイプラインからの漏出防止対策（具体的にはパイプライン改善、各プロセスにおける機器のシールの改善、点検の強化・徹底・適正化など）、天然ガスの除湿処理の効率向上（グリコール循環除湿に伴う漏出ガスの削減）などがある。これらの対策技術による排出削減効果は 0～7%であり、このうちパイプラインの改善（7%）とコンプレッサーの改善（5%）による削減効果が大きい（EPA,2006b）。

石油システムからのメタン排出源としては、採掘時の採掘井からの漏出、重油精製時の排出などがある。排出削減技術としては、採掘井からの漏出ガスのフレアリング、ガスの回収・利用および油層への再注入などがある。排出削減効果は、ガスの回収・利用が 13%、再注入が 8%、フレアリングが 3～6%である（EPA,2006b）。

②石炭採掘による排出（メタン）

石炭採掘に伴うメタン排出量は 37.7 億 t CO₂-eq（2000 年）であり、メタン排出量全体の 3.3%に相当する（EPA,2006b）。排出量の多い国は、中国、米国、インド、オーストラリア等であり、これらの国の排出は石炭採掘によるメタン排出量全体の 56%を占める（EPA,2006b）。炭層では有機物から石炭が生成する際にメタンが生成する。このため、石炭の採掘時にはこの炭層に蓄積されたメタンを排除する必要がある。従来の採掘法では排除されたメタンは大気中に放出されていた。このため、炭鉱中のメタンを回収しパイプラインに供給したり、発電に利用するなどの対策が可能である。回収設備のコストがかかる一方で、回収メタンの売却やエネルギー利用が可能となる。

主な排出削減技術としては、炭鉱およびボタ山からのメタン回収（パイプラインへのメタン

ガス売却収入などによるコスト軽減が可能）、炭鉱からのメタン含有排気²³の触媒による酸化処理（熱利用が可能）、排メタンガスのフレアリング、回収メタンによる発電がある。このうち削減効果が大きいのは、回収メタンのパイプラインへの供給（28%）、回収メタンによる発電（28%）、触媒による参加処理（18～24%）である（EPA,2006b）。

③化石燃料の燃焼（一酸化二窒素、メタン）：

火力発電所やその他ボイラーなどの固定排出源および自動車をはじめとした移動排出源による化石燃料の燃焼に伴い、燃料中の窒素の酸化によって一酸化二窒素が発生する。排出量は、燃料、燃焼技術、排ガス対策技術あるいは運転条件などによって様々である。排出量は一酸化二窒素排出量全体の約 6%程度とされている（EPA,2006b）。なお、化石燃料の燃焼条件によってはメタンも発生するが発生量はごく少量である。

石炭火力発電所は一酸化二窒素の主たる発生源であるため、高効率石炭火力発電技術の普及や、ガスへの燃料転換が進むことにより一酸化二窒素の排出が削減されることになる。ただし、化石燃料の燃焼によって発生する温室効果ガスの主たるものは二酸化炭素であり、高効率燃焼技術や原子力、再生可能エネルギー、天然ガスの利用などによる二酸化炭素の排出削減が結果的に一酸化二窒素の排出も抑えることとなる。

図 3-2 にエネルギー部門における非 CO₂ 温室効果ガス排出量の 1990 年から 2020 年まで推計結果を示す（EPA,2006b）。天然ガス・石油システムからの排出量が大半を占めており、1990 年には部門全体の 51%、2020 年には 63%を占めている。1990 年から 2020 年までの増加率は 84%である。これは多くの国で天然ガスの使用が増加しているためである。

²³ VAN : Ventilation Air Methane

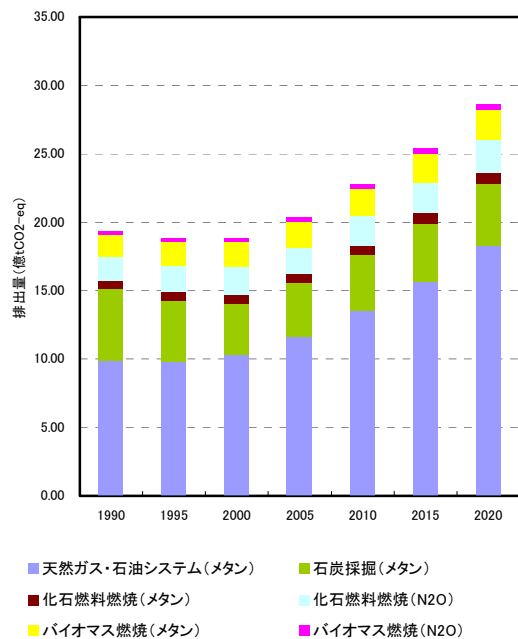


図 3-2 エネルギー部門における排出量の推移

Fig.3-2 Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions of Energy Sector

(出典：EPA,2006a の Appendix B,C より作成)

3.3 農業部門

農業部門における主な排出源としては、①耕作土壌からの一酸化二窒素の放出、②反芻動物の腸内発酵によるメタン、③稲作（水田）によるメタン、④家畜排泄物管理によるメタンおよび一酸化二窒素、⑤野焼きおよび農業残渣の焼却によるメタンおよび一酸化二窒素の排出がある。

①耕作地土壌からの排出（一酸化二窒素）

一般に、土壌からの一酸化二窒素の発生は、微生物が有機物を分解することによって発生するアンモニウム（NH₄）が好気性環境において酸化（窒化）され、さらに嫌気性環境において脱窒される過程で生ずる。農耕地の土壌におい

ても自然土壌と同様の反応が起こるが、施肥²⁴によるアンモニウムの追加的供給が大量の一酸化二窒素の排出を促す（IPCC,2007a）。EPA による推計は、農耕地土壌中の物質反応の素過程を再現する DAYCENT モデル²⁵を用いて行われており、以下、その結果について概説する。

人為的起源による一酸化二窒素は、全世界で約 21 億 tCO₂-eq（2000 年）発生しており、農業部門では最大の温室効果ガス発生源である。排出量の多い国は、中国（5.09 億 t CO₂-eq）、米国（2.46 億 t CO₂-eq）、ブラジル（1.54 億 t CO₂-eq）、アルゼンチン（0.59 億 t CO₂-eq）、インド（0.55 億 t CO₂-eq）、フランス（0.54 億 t CO₂-eq）、等である（EPA,2006b）。

排出削減技術としては、施肥量の削減（Simple fertilization reduction）、分割施肥（Split fertilization）など、施肥技術の合理化により不必要な窒素を土壌に供給しない技術、土壌への有機物の鋤き込みを制限する無耕作農法²⁶（no-till）などがある。施肥量の削減による一酸化二窒素の排出削減効果を DAYCENT モデルによって推定した結果によれば、施肥量を 30%削減した場合の効果（一酸化二窒素排出削減量）は-0.6²⁷から 0.9%、施肥量 20%削減の場合は-0.3 から 0.6%、10%削減の場合は-0.1 から 0.3%であった²⁸。また、分割施肥の効果は、0.0%から 4.2%、無耕作農法による効果は、

²⁴ 窒素系化学肥料、有機肥料の別を問わずアンモニウム供給源となる。

²⁵ DAYCENT モデルとは、作物の生長、土壌有機物の分解、N₂O、CO₂排出量等を、土壌・気候・水文条件および耕作地管理条件等をもとに推定するプロセス・モデルである。詳細は Del Grosso et al., 2001 参照）

²⁶ 無耕作農法とは、耕作地土壌の掘り返しを制限することにより、土壌中への酸素供給を削減し、アンモニウムの窒化を抑える農法である。

²⁷モデル（後述の DAYCENT モデル）による推定結果は、対策によって逆に排出量が増える場合もあることを示している。

²⁸ 施肥量の削減により、収穫量は減少する。施肥量 30%削減の場合の収穫量減少は最大で 23.7%との結果となっている。

-7.7%から 2.3%である²⁹。作物の窒素肥料の施肥量削減や、無耕作農法の導入などはコストの削減にもつながる。ただし、地域によって土壌、水文、気候条件が多様であり、また、作物種や農法も多様なため条件によっては逆効果となるケースも見られるため、条件に適した技術を選ぶ必要がある。

②反芻動物³⁰の腸内発酵（メタン）

反芻動物の腸内で発酵作用によりメタンが排出される。排出量は世界全体で約 18 億 tCO₂-eq（2000 年）である。排出量の多い国は、中国（2.31 億 t CO₂-eq）、ブラジル（2.08 億 t CO₂-eq）、インド（2.02 億 t CO₂-eq）、米国（1.16 億 t CO₂-eq）、オーストラリア（0.64 億 t CO₂-eq）、アルゼンチン（0.52 億 t CO₂-eq）等である。なお、日本の排出量は 0.08 億 t CO₂-eq である（EPA,2006b）。

排出削減技術としては、腸内発酵を抑えるための飼料転換（Improved feed conversion）³¹、腸内発酵抑制物質（Antimethanogen）の投与、抗生物質の投与、家畜（牛）への成長ホルモンの投与（Bovine somatotropin(bST)）、プロピオン先駆体／前駆物質（Propionate precursors）、集約放牧（Intensive grazing）などがある。これらの排出削減技術は、家畜一頭当たりのメタン排出量の削減効果は小さい³²が、肉や牛乳の生産量当たりのメタン排出量削減には顕著な効果がある。生産量当たりのメタン排出量で評価した場合、最も効果がある対策は飼料転換であり、約 15%の削減が可能である。

③稲作（メタン）

水田における嫌気性環境のもとでメタン生成菌により有機物が分解される際にメタンが発生する。2000 年の排出量は世界全体で約 6.3 億 t CO₂-eq である。排出量の多い国は、中国（2.16 億 t CO₂-eq）、インド（0.90 億 t CO₂-eq）、インドネシア（0.48 億 t CO₂-eq）、タイ（0.45 億 t CO₂-eq）、ベトナム（0.37 億 t CO₂-eq）、ミャンマー（0.35 億 t CO₂-eq）などである。なお、日本の排出量は 0.06 億 t CO₂-eq である。（EPA,2006b）

稲作におけるメタン排出削減技術としては、中干し（Full midseason drainage）の実施（栽培期間中に一時的に水田の水を排水する）、低水位灌水（Shallow flooding）の间断灌水期間の長期化、稲わらの鋤き込みを無耕作期に実施（Off-season straw）、硫酸アンモニウム（硫酸）の散布（硫酸還元菌の活性を高め、その結果メタン発生量が低下する）、緩効性肥料の使用、陸稲栽培（Upland rice）への転換などがある。対策の効果としては、陸稲への転換（中国では 45.1%、インドでは 15.7%の削減）、低水位灌水（中国では 28.6、インドでは 14.9%の削減）、硫酸アンモニウム散布（中国では 13.1%、インドでは 2.0 % の削減）が大きい（EPA,2006b）。

④家畜排泄物からの排出（メタン、一酸化二窒素）

家畜排泄物によるメタン排出量は全世界で 2.25 億 t CO₂-eq、一酸化二窒素排出量は 1.96 億 t CO₂-eq（ともに 2000 年）である。メタンの排出量の多い国は、米国（0.38 億 t CO₂-eq）、ドイツ（0.23 億 t CO₂-eq）、インド（0.22 億 t CO₂-eq）、中国（0.20 億 t CO₂-eq）、フランス（0.13 億トン）等である。日本の排出量は 0.01 億 t CO₂-eq である。一酸化二窒素の排出量の多い国は、中国（0.62 億 t CO₂-eq）、米国（0.18 億 t CO₂-eq）、ロシア（0.17 億 t CO₂-eq）、日

²⁹ 分割施肥および無耕作農法による収穫量の減少は見られなかった。

³⁰ 牛、羊、山羊、バッファロー、駱駝など

³¹ 飼料転換とは、穀物系の飼料に切り替えることにより、牛乳や肉の生産を効率的に行う方法である。

³² 一頭当たりの排出量は増えることもある。

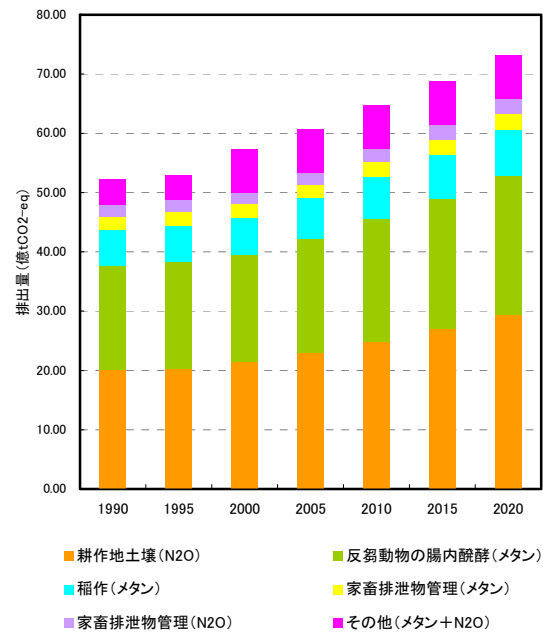
本（0.12 億 t CO₂-eq）、フランス（0.07 億 t CO₂-eq）、ポーランド（0.06 億 t CO₂-eq）等である（EPA,2006b）。

排出削減技術としては、排泄物消化槽の効率化、発生するメタンの漏出防止と回収利活用などがある。排泄物消化槽の効率化によりメタンと一酸化二窒素の合計排出量を 2.5%（米国）から 3.9%（EU15 カ国）の削減可能とされている（EPA,2006b）。

⑤その他農業起源（メタン、一酸化二窒素）

その他農業起源としては農業残渣、農業関連バイオマスの焼却、焼畑などがある。これらによるメタンと一酸化二窒素の合計排出量は 7.3 億 t CO₂-eq（2000 年）と推計されている。排出量の多い地域は中南米、アフリカ、アジアであり、この 3 地域で世界全体の 91%を占める。ただし、2000 年以降の排出量推計のための情報は必ずしも十分ではない（EPA,2006b）。

図 3-3 に農業部門の非 CO₂ 温室効果ガス排出量の見通しを示す。排出量が多いのは、耕作地土壌からの一酸化二窒素と反芻動物の腸内醗酵によるメタンの排出量で、これらを合わせると、農業部門全体の 70%弱を占める（2000 年）。農業部門のすべての活動において 2020 年にかけて排出量の増加が見られる。これは、途上国における人口増加に対応したものである。



（出典：EPA,2006a の Appendix B,C より作成）

図 3-3 農業部門における排出量の推移

Fig.3-3 Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions of Agricultural Sector

3.4 廃棄物部門

廃棄物部門における非 CO₂ 温室効果ガスの排出としては、埋立処分場から発生するメタン、排水・下水から発生するメタンおよび一酸化二窒素、廃棄物の焼却による一酸化二窒素およびメタンがある。

埋立処分場メタンの排出量は世界全体で約 7.3 億 t CO₂-eq（2000 年実績）であり、国別では米国（1.31 億 t CO₂-eq）、中国（0.46 億 t CO₂-eq）、ロシア（0.35 億 t CO₂-eq）、メキシコ（0.33 億 t CO₂-eq）、カナダ（0.25 億 t CO₂-eq）などが多い。

埋立処分場からのメタン排出削減技術は、発生したメタンを回収して燃焼させるか、あるいは燃料として利用する技術と、堆肥などに再利用することによって廃棄物の量を削減する技術がある。具体的には、ガス収集井とパイプライ

ンからなる収集システムと、有効活用する場合
には脱水機、コンプレッサー、ボイラー、エン
ジンなどにより、発電、熱利用を行う。大規模
埋立処分場では環境対策として従来よりこれら
のメタン回収が行われているケースが多い。回
収されたメタンを単に燃焼させるだけでも温室
効果ガスの削減にはなるが、これをバイオガス
として有効活用することは、費用回収及び燃料
代替という付加価値を生む。埋立処分場メタン
の回収と発電あるいは熱利用を組み合わせた事
業が、途上国における CDM プロジェクトとし
て数多く実施されている。対策による削減効果
は 6～13%と推定される（EPA,2006b）。

排水・下水からのメタン排出量は世界全体で
5.23 億 t CO₂-eq（2000 年実績）であり、国別
では、中国（1.08 億 t CO₂-eq）、インド（1.05
億 t CO₂-eq）、米国（0.34 億 t CO₂-eq）、イン
ドネシア（0.22 億 t CO₂-eq）、ブラジル（0.22
億 t CO₂-eq）が多い。排水・下水からのメタン
排出削減技術としては、メタンの回収と利用、
パイプラインへの販売、フレアリング、嫌気性
分解などによる排水処理技術の改善などがある。

排水・下水からの一酸化二窒素排出量は、世
界全体で 0.9 億 t CO₂-eq であり、排出量の多い
国は、中国、米国、ブラジル、ロシア、インド
ネシアである。

図 3-4 に廃棄物部門の非 CO₂温室効果ガス排
出量の見通しを示す。この部門で最も排出量
が多いのは埋立て処分場からのメタン排出であり、
次が排水施設からのメタン排出である。これら
を合わせると、廃棄物部門全体の約 93%を占め
る（2000 年）。

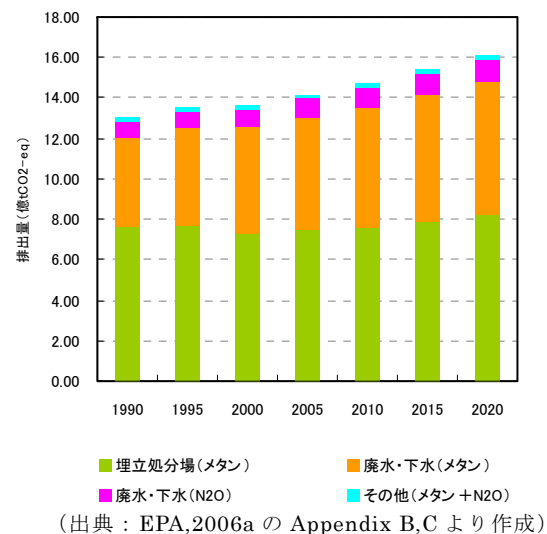


図 3-4 廃棄物部門における排出量の推移

Fig.3-4 Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions of
Waste Management Sector

3.5 産業部門

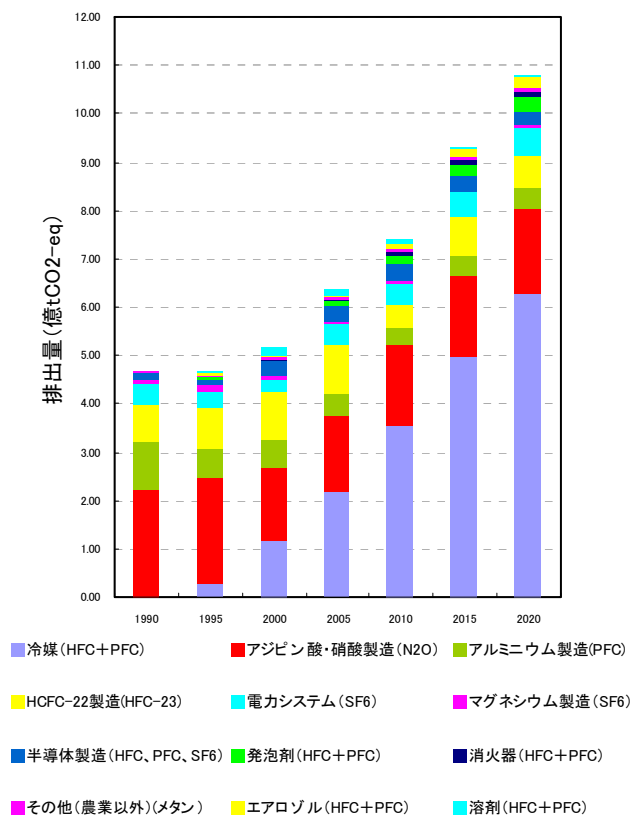
産業部門の排出は、大きく分類すると、化学
工業と金属工業に分かれる。化学工業では、代
替フロン等の製造・使用によるガスの漏出、硝
酸・アジピン酸製造に伴う一酸化二窒素の排出
などが主たる排出源である。金属工業では、アル
ミ製造工程からの PFC の排出、マグネシウム
製造工程からの SF₆ の排出がある。

代替フロン等のうち HFC 類は主にエアコン、
冷凍機の冷媒、溶剤、スプレー剤、発泡剤、半
導体洗浄などに使用されている。PFC は HFC
とほぼ同様の用途に使われているが、アルミニ
ウム精製にも利用されている。SF₆ は電気遮断
機の絶縁ガス、半導体洗浄のほかマグネシウム
精製過程でも利用されている。これらのガスは、
製造過程や機器内で使用されるガスが点検・廃
棄時に漏出する。

排出削減技術としては、製造過程での漏洩防
止、封入されている機器からの漏洩防止（冷却
器、電気絶縁器）、機器からの回収・再利用ある

いは回収・破壊などの技術のほか、代替技術の開発・利用などがある。

アジピン酸および硝酸の製造工程で一酸化二窒素が副生産物として発生し、対策を採らない場合は大気中に放出される。排出削減技術としては、触媒による除去と熱分解がある。



(出典：EPA,2006a の Appendix B,C,D より作成)

図 3-5 産業部門における排出量の推移

Fig.3-5 Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions of Industrial (Manufacturing) Sector

図 3-5 に産業部門の非 CO₂ 温室効果ガス排出量の見通しを示す (EPA,2006b)。産業部門では、ナイロン等の原料となるアジピン酸や化学肥料等様々な目的で利用される硝酸の製造工程で発生する一酸化二窒素の排出量が 1995 年頃まで部門全体の半分程度を占めていたが、製造技術の改善によって 1995 年から 2000 年にかけて大幅に減少し、その後 2005 年から 2020 年に

かけて若干増加する。代替フロン等の排出量は、1995 年には世界全体で約 2.46 億 tCO₂-eq だったが、モントリオール議定書により使用できなくなる代替フロンとしての利用が増加し、2020 年には 9.02 億 t CO₂-eq に達する見通しである。2000 年の排出実績は、産業部門全体が 5.17 億 t CO₂-eq であり、代替フロン等が 3.62 億 tCO₂-eq で全体の 70%強を占めている。アジピン酸・硝酸製造に伴う一酸化二窒素の排出量が 1.54 億 t CO₂-eq (約 30%) である。

4. 削減コストと削減ポテンシャル

4.1 EPA レポートにおける削減コストの評価法

EPA は 1990 から 2020 年までの非 CO₂ 温室効果ガス (Non- CO₂ GHG) の排出量推定結果 (EPA,2006a) をもとに 2020 年までのベースライン排出量を設定し、全世界を対象に部門別、地域別に、非 CO₂ 温室効果ガスの限界削減曲線 (MAC : marginal abatement curve) を作成した。

EPA の分析における削減ポテンシャルの推計のための手順としては次のとおりである：

- ①ベースライン排出量の設定
- ②削減のためのコストと、削減することによる利益がバランスする時のガスの限界削減コストを求める。
- ③削減コストの安い技術から先に順次コストと削減可能量をプロットし、限界削減カーブを描く。
- ④このようなカーブを国別、部門別、ガス種別に作成する。

ベースライン排出量の設定は、国別報告書³³、各国の国家計画などに基いている。1990 年から 2000 年までは実績データに基づく推計を行っているが、2005 年から 2020 年までの推計は、様々な条件のトレンドを外挿するなどして推計されている（EPA, 2006a）。

農業部門のベースラインは、個別のモデル（耕作地の N₂O 収支については「DAYCENT」モデル、水田からのメタン放出については「DNDC」モデルが用いられている。DAYCENT モデルは、日々の気象条件（気温および降水量）、土壌管理状況（施肥量等）、土壌の物理的性質に関するデータに基づき、農耕地土壌における物質反応の素過程をシミュレートすることにより、作物の生長量、土壌有機物の分解量、温室効果ガスのフラックスなどを推定するためのモデルである（Del Grosso et al., 2001）。

DNDC モデルは、土壌条件（土質、pH、土壌炭素量等）、米作面積と耕作タイプ（一毛作、二毛作、陸稲栽培など）、気象条件、水田管理条件のデータに基づき、米の収穫量や温室効果ガス排出量を推定するためのモデルである（EPA, 2006b）。

削減ポテンシャル率³⁴（abatement potential）は、削減対策によって削減可能な量を部門別ベースライン排出量に対する比率（%）で表したものである。削減ポテンシャル率（A）は、「技術の適用率³⁵」（T）（ベースライン排出量に対する当該技術・対策が適用可能な排出量の比率をパーセントで表した指標）、「他の対策との重複

効果の調整率³⁶」（I）（複数の技術・対策が適用される場合に削減量が重複してカウントされないよう、各技術・対策による削減量の重み付けをパーセントで表した指標）および、「削減効率³⁷」（R）（当該技術・対策の削減効率）の積で表される。すなわち、削減ポテンシャル R は、 $R/100=T/100 \times I/100 \times R/100$ で求められる。削減ポテンシャルはベースライン排出量に R/100 を乗じることによって得られる。

削減コストは、削減のためのコストと、削減による便益がバランスする際のガス価格として求めている。このようなバランスが成立するために必要な条件が満たされ、経済合理性が確保されるという前提に基づいている。

部門別、ガス別、削減技術別に次式で削減コスト（P）を計算する：

$$\sum_{t=1}^T \left[\frac{(1-TR)(P \cdot ER + R) + TB}{(1+DR)^t} \right] = CC + \sum_{t=1}^T \left[\frac{(1-TR)RC}{(1+DR)^t} \right] \quad \dots \text{式 1}$$

$$P = \frac{CC}{(1-TR)ER \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+DR)^t}} + \frac{RC}{ER} - \frac{R}{ER} - \frac{CC}{ER \cdot T} \cdot \frac{TR}{(1-TR)} \quad \dots \text{式 2}$$

1 式の左辺は「（削減による）正味の利益の現在価格（Net present value benefits）」、右辺は「正味の削減コストの現在価格（Net present value costs）」に対応する。式 1 および式 2 に含まれる記号の定義は以下のとおりである：

P：非 CO₂ 温室効果ガス価格（\$/tCO₂-eq）

ER：非 CO₂ 温室効果ガス削減量（\$/t CO₂-eq）

R：削減活動によって発生するエネルギー生産収入、副製品収入、農業製品価格の変化等（\$）

³³ 気候変動枠組条約に基づいて各国から提出される温室効果ガス排出量の報告書

³⁴ EPA の報告書では、削減可能量を絶対値で表したのを「Mitigation potential」と呼んでおり、これを本稿では「削減ポテンシャル」とした。他方、「Abatement potential」はベースライン排出量のうち削減可能な割合を%で表したものであり、本稿では「削減ポテンシャル率」とした。

³⁵ Technical applicability

³⁶ Implied adoption rate

³⁷ Reduction efficiency

T：削減期間（years）

DR：想定割引率（10%）

CC：初期設備投資額（\$）

RC：削減経費（\$/年）

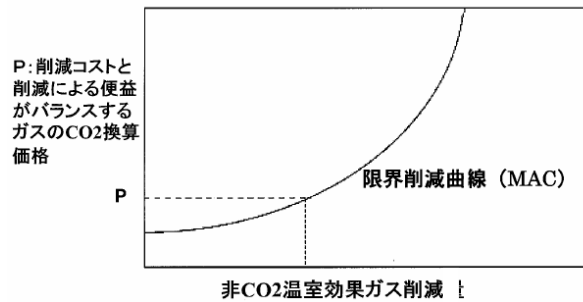
TR：想定税率（40%）

TB：減税額³⁸(\$): $CC/T \times TR$

推計の前提条件は以下のとおりである：

- ①削減減活動（プロジェクト）の立ち上げコストは除外
- ②税率（TR）と割引率（DR）はそれぞれ 40% と 10%に固定
- ③削減による便益としては、対策によって生じるエネルギーや副産物の販売収益等が含まれる。
- ④削減技術に関する条件（適用性、コスト、効果など）は期間中不変
- ⑤国別、地域別情報の不足は専門家の判断によって補われる
- ⑥間接的な GHG 排出削減は考慮されていない（例えば、埋立て処分上からの回収メタンによる発電については、生産されたエネルギー（電力）の販売、節約による利益はカウントされるが、それによる系統発電所の化石燃料使用削減は考慮されない）

図 4.1 は限界削減曲線を模式的に表したものである。縦軸 P は、削減コストと削減による便益がバランスするときのガス（CO₂ 換算）価格である。具体的には、排出権の価格等に相当する。単位削減量当りのコストが、ガスの価格以下であれば、その削減活動は実施される。また、P は、正味の削減コスト（削減コストから削減による利益を差し引いた残りのコスト）と考えることができる。この正味の削減コストがガス価格でカバーされれば、その削減活動は実施され得ると考えられる。



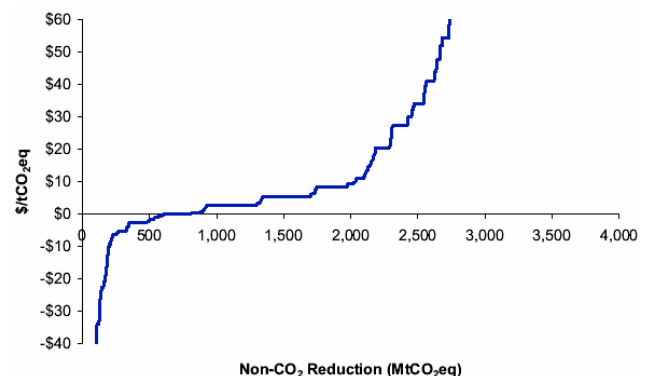
（出典：EPA,2006b）

図 4-1 限界削減曲線の模式図

Fig.4-1 Schematic Diagram of Non-CO₂ Marginal Abatement Curve(MAC)

4.2 非 CO₂ 温室効果ガスの削減ポテンシャル

2020 年における全世界の非 CO₂ 温室効果ガス削減ポテンシャルを表す限界削減曲線を図 4-2 に示す（EPA）。



（出典：EPA, 2006b）

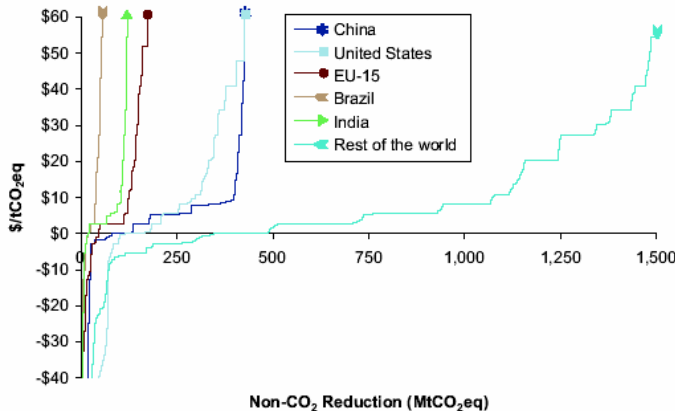
図 4-2 2020 年における世界全体の非 CO₂ 温室効果ガスの限界削減曲線

Fig.4-2 Global Total Aggregate MAC for Non-CO₂ Greenhouse Gases (2020)

³⁸ 投資控除に当る

このカーブは、6 億 t CO₂-eq（ベースライン排出量の 5%）までは負のコスト³⁹で削減可能であり、削減費用 10 ドル/t CO₂-eq では 20 億 t CO₂-eq（ベースライン排出量の 15%）、20 ドル/t CO₂-eq では約 22 億 tCO₂-eq（ベースライン排出量の 17%）の削減が可能であることを示している。また、削減コスト 50\$/t CO₂-eq では約 27 億 tCO₂-eq の削減が可能である。

図 4-3 に国別の非 CO₂ 温室効果ガスの限界削減曲線（2020 年）を示す。これによると中国と米国の削減ポテンシャルが大きいことがわかる。特に中国では、10\$/t CO₂-eq 以下の削減コストで約 4 億 tCO₂-eq の削減が可能である。さらにインドとブラジルの削減ポテンシャルも大きい。前章までにみてきたようにこれらの国々はもともとベースライン排出量が多い。中国、インド、ブラジルは 2020 年にかけて排出量が大幅に増加する国々である。



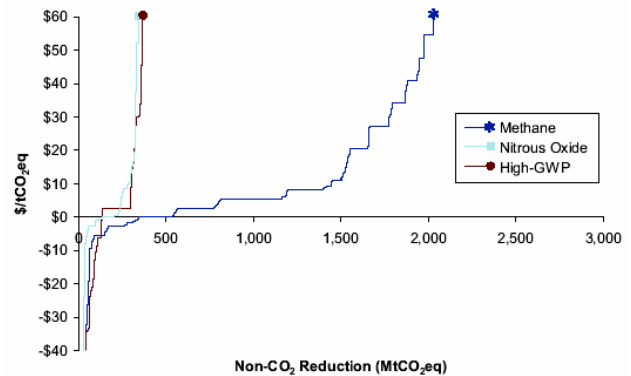
（出典：EPA, 2006b）

図 4-3 国別の非 CO₂ 温室効果ガスの限界削減曲線

Fig. 4-3 Non-CO₂ MACs by Country and Region/Group of States (2020)

³⁹ 負のコストとは、削減を行うことによって追加的なコストが発生せず、逆にコストの削減となる場合を言う。例えば、農耕地への施肥量削減による一酸化二窒素の排出抑制などがこれに当たる。

図 4-4 にガス別の限界削減曲線を示す。



（出典：EPA, 2006b）

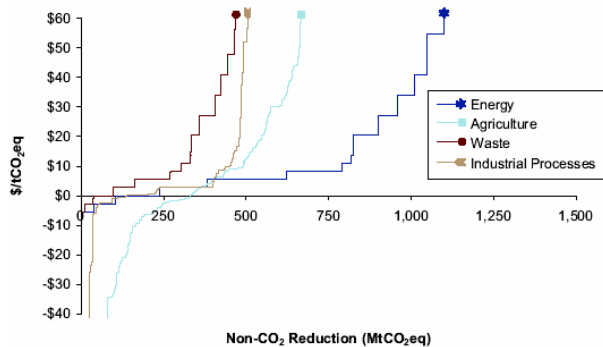
図 4-4 ガス別の限界削減曲線

Fig. 4-4 Non-CO₂ MACs by Gas Type (2020)

ガスの種類別では、メタンの削減ポテンシャルが最も大きい。負のコストで 5 億 t CO₂-eq の削減が可能であり、削減コスト 30\$/t CO₂-eq では 18 億 t CO₂-eq の削減が可能である。

メタン以外のガスについても負のコストで、それぞれ 1 億 t CO₂-eq 以上の削減が可能である。しかし、これらのガスでは、削減量が 3 億 t CO₂-eq を超えるあたりから削減コストが急増し削減ポテンシャルはそれほど大きくないことがわかる。

図 4-5 に部門別限界削減曲線を示す。農業部門では負のコストで約 3 億 tCO₂-eq の削減が可能であることがわかる。削減コストを 30\$/t CO₂-eq まで許容すれば、エネルギー部門で約 10 億 tCO₂-eq、農業部門で約 6 億 tCO₂-eq の削減が可能となる。また、廃棄物部門で約 4 億 tCO₂-eq、産業部門では 5 億 t CO₂-eq 近い削減が可能となる。



(出典：EPA, 2006b)

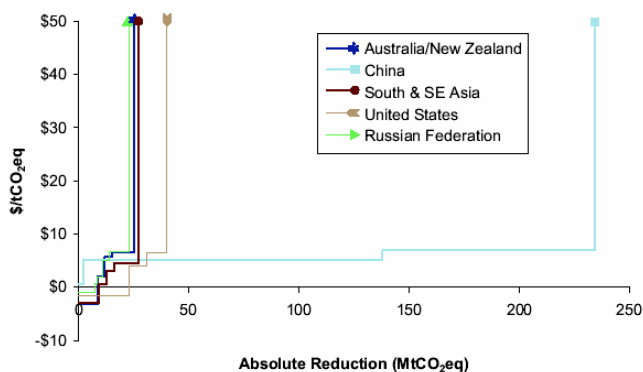
図 4-5 部門別限界削減曲線

Fig.4-5 Non-CO₂ MACs 2020 by Sector (2020)

4.3 部門別の削減ポテンシャル

4.3.1 エネルギー部門の削減ポテンシャル

エネルギー部門のうち、主な国、地域別の石炭採掘に伴うメタン排出の限界削減曲線を図 4-6 に示す。中国だけで、削減コスト 10\$/t CO₂-eq で 2 億 3000t CO₂-eq 近い削減が可能である。2020 年の世界全体のベースライン排出量約 4.5 億 t CO₂-eq に対して、10 \$ t CO₂-eq 以下のコストで約 3.6 億 t CO₂-eq の削減が可能である。



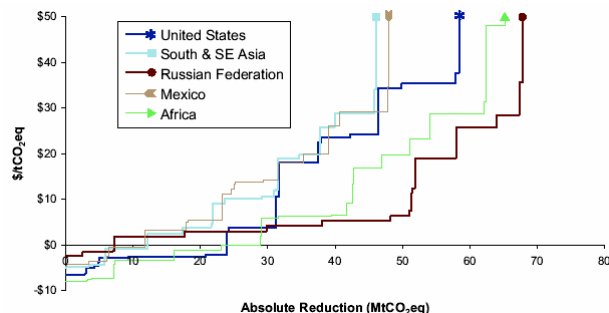
(出典：EPA, 2006b)

図 4-6 石炭採掘に伴う排出メタンの限界削減曲線

Fig.4-6 Non-CO₂ MACs for Top 5 Emitting

Countries/Regions from Coal Mining (2020)

同じくエネルギー部門の天然ガスシステム（天然ガスの採掘・精製・輸送・貯蔵）から排出されるメタンの限界削減曲線を国／地域別に図 4-7 に示す。



(出典：EPA, 2006b)

図 4-7 天然ガスシステムから排出されるメタンの限界削減曲線

Fig.4-7 Non-CO₂ MACs for Top 5 Emitting

Countries/Regions from Natural Gas (2020)

国別ではロシア、米国、メキシコ、地域としてはアフリカ、南・東南アジアの削減ポテンシャルが大きいことがわかる。

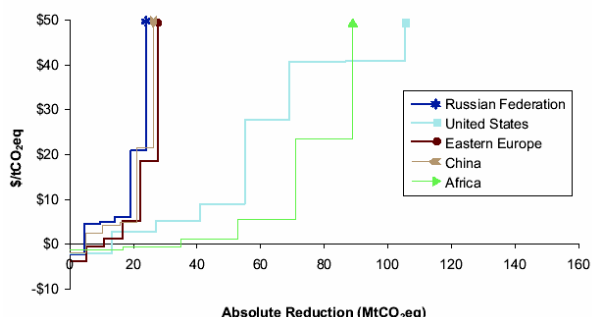
2020 年の世界全体のベースライン排出量 17.0 億 t CO₂-eq に対して、60 \$ 以下のコストで約 9.1 億 t CO₂-eq の削減が可能である。

4.3.2 廃棄物部門の削減ポテンシャル

廃棄物部門のうち、埋立処分場（廃棄物処分場）からのメタン排出の主な国／地域別の限界削減曲線を図 4-8 に示す。

2020 年の世界全体のベースライン排出量 8.2 億 t CO₂-eq に対して、60\$以下のコストで約 7.2 億 t CO₂-eq の削減が可能である。

削減ポテンシャルは、国別では米国がもっとも大きく、次いで中国、ロシアの順である。地域ではアフリカ、東欧が多い。



(出典：EPA, 2006b)

図 4-8 埋立処分場メタンの限界削減曲線

Fig.4-8 Non-CO₂ MACsTop 5 Emitting

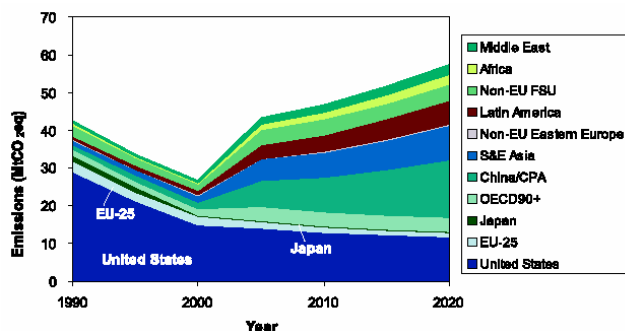
Countries/Regions from Landfills (2020)

4.3.3 産業部門の削減ポテンシャル（電力システムからの SF₆ 排出削減ポテンシャル）

産業部門のうち、電気事業と関連の深い電力システムにおける SF₆ の削減ポテンシャルについて示す。SF₆ は絶縁物質としての機能と放電防止物質としての優れた機能を持ち、変電設備におけるガス絶縁開閉装置やガス遮断機の絶縁ガスとして広く利用されている気体である。SF₆ は、装置の廃棄時および点検時に排出される。他のガスに比べて排出量は微量だが、温暖化係数は 22,800 であり、非常に高い温暖化能力を持つ物質である。大気中の残留期間は 3,200 年といわれている。

図 4-9 に SF₆ の排出量を示す。2000 年までは実績排出量であり、2005 年以降は排出見通しである。2005 年以降については、現在一部の先進国において自主的に実施されている業界レベルの取組みが継続されることを前提としている。

SF₆ 排出による温暖化への影響が認識されてきたため、1990 年以降 2000 年にかけて、付属書 I 国においては排出量が減少あるいは横ばいとなっている。特に日本では 1998 年に「電気事業における SF₆ 排出抑制に関する自主行動計画」が策定され、以後これにもとづいた取り組みが実施されたことにより 2005 年には削減目



(出典：EPA,2006b)

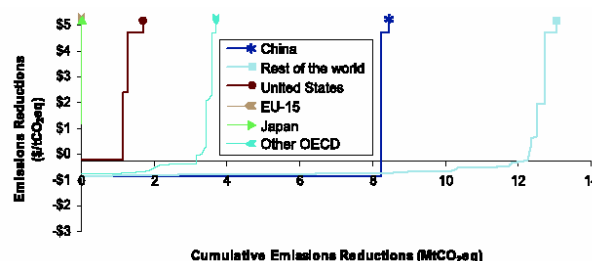
図 4-9 電力システムからの SF₆ の排出量

Fig.4-9 SF₆ Emissions from Electric Power Systems

標（機器製造時排出率 3%、点検時排出率 3%、機器廃棄時排出率 1%）を達成した。なお、日本の電気事業による SF₆ 排出削減については、6.1 で述べる。

EU25 カ国では、日本と同様に削減が進むが、米国の削減はあまり進まず、2015 年から 2020 年の間に中国に抜かれるまでは世界最大の排出国である。他方、2000 年以降、中国をはじめとしたその他の国や地域では排出量が大幅に増加する見通しである。2020 年の電力システムからの SF₆ 排出量は、世界全体では約 5700 万 tCO₂-eq で、このうち非付属書 I 国全体の排出量は 4400 万トン（全体の約 77%）となる。

図 4-10 に電力システムからの SF₆ の限界削減曲線を示す。



(出典：EPA,2006b)

図 4-10 電力システムにおける SF₆ の限界削減曲線（2020 年）

Fig.4-10 2020 MACs for Electric Power Systems(Technology-Adoption Case)

SF₆の排出削減技術としては、変圧器の点検、工事時に SF₆を吸引・再利用する技術、SF₆の漏洩を監視し、必要に応じて修理する技術などがある。コストは殆どがマイナスであるが、これは、変圧器からの漏洩を削減することにより SF₆の購入コストが削減されるためである。このほか、CO₂などの代替ガスを用いた絶縁技術が開発され、日本では既に 77kVA の電気遮断機が商品化されている。

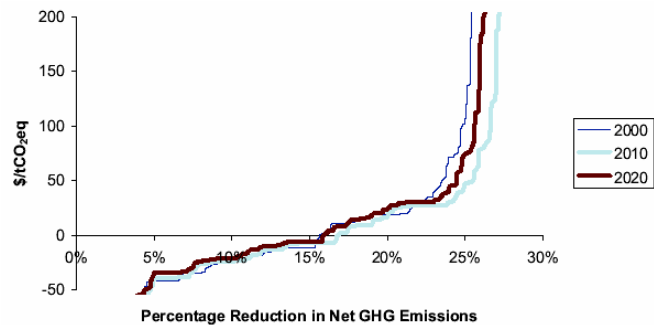
2020 年の世界全体のベースライン排出量 0.06 億 t CO₂-eq に対して、5 \$ 以下のコストで 0.03 億 t CO₂-eq の削減が可能である。

4.3.4 農業部門の削減ポテンシャル

EPA (EPA,2006b) による、農業部門の非 CO₂ 温室効果ガス排出削減量推定のうち、耕作地からの一酸化二窒素排出と稲作によるメタンおよび一酸化二窒素について以下に示す。

農耕地からの一酸化二窒素の排出量は気候、土壌条件、施肥条件によって異なる。また、削減コストには作物の収量も影響する。そこで、土壌中および土壌表面の様々な物質変換の素過程をモデル化した「DAYCENT」モデルを用いて排出量の推定が行われた。DAYCENT モデルでは、土壌中有機物の分解、水収支、農作物の成長、耕作地管理などがサブモデル化され、二酸化炭素、窒素などの収支が計算される (Del Grosso et al.,2001)。これにより、排出削減技術を適用した場合と適用しなかった場合の一酸化二窒素の排出量を推定することができる。また、施肥量、収穫量、耕作方法の違いなどによるコストが求められる。

図 4-11 は、耕作地からの温室効果ガスの限界削減曲線を示した図である⁴⁰。この温室効果ガスには、耕作地から排出される一酸化二窒素と土



(出典：EPA,2006b)

図 4-11 農耕地からの一酸化二窒素等温室効果ガスの排出限界削減曲線

Fig. 4-11 Global MACs for Net Greenhouse Gas Emissions from Croplands

壌炭素の収支が含まれている。95%以上が一酸化二窒素であり、残りは土壌炭素の収支量である。なお、農業部門については、推定されたベースライン排出量が必ずしも全てのタイプの耕作地をカバーしている訳ではない（例えば、一酸化二窒素については牧草地は除外されている）ため、絶対量ではなく、ベースライン排出量に対する比率（%）で削減ポテンシャルが表現されている。これは、次に示す水田からのメタン、一酸化二窒素についても同様である。また、図 4-11 では、2000 年、2010 年および 2020 年における限界削減曲線が示されている。

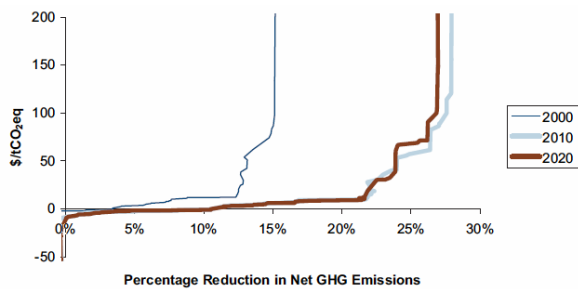
負のコストで、ベースライン排出量の約 15%(約 1.3 億 t CO₂-eq) の削減が可能である。2020 年の世界全体のベースライン排出量は 8.9 億 t CO₂-eq に対して 60 \$ 以下のコストで約 2.0 億 t CO₂-eq の削減が可能である。

稲作によるメタン、一酸化二窒素排出については、水田における物質交換の素過程を組み込んだプロセス・モデルである DNDC を用いて評価された。図 4-12 に稲作によるメタンおよび一酸化二窒素の排出ポテンシャルを示す。

2020 年の世界全体のベースライン排出量 10.6

⁴⁰ 主要な 3 種類の削減対策技術（窒素肥料の使用料削減、分割施肥、無耕作農法）を適用した場合。

億 t CO₂-eq に対して 60 \$ 以下のコストで約 2.6 億 t CO₂-eq の削減が可能である。



(出典：EPA, 2006b)

図 4-12 稲作による温室効果ガス（メタンおよび一酸化二窒素）の排出限界削減曲線

Fig.4-12 Global MACs for Net Greenhouse Gas Emissions from Rice Cultivation

5. 排出削減に対する障壁および持続可能な開発に対するシナジー⁴¹／トレードオフ⁴²

EPA による非 CO₂ 温室効果ガスの削減ポテンシャル推計においては、削減を実施する際の様々な障壁 (barrier) は、基本的には考慮されていない。ただし、エネルギーや農業生産の需要の増加が障壁となる場合があり、これについては、ベースライン排出量推計の段階で考慮されていると考えることができる。また、対策のための追加的コストがほとんどの部門で障壁となるが、追加的コストは限界削減曲線で評価されていると考えることができる。

また、EPA による削減ポテンシャルの推計は、持続可能な開発に対するシナジー効果やトレードオフ効果については検討されていない。ある

対策を行うことがシナジー効果を生み出し、持続可能な開発に資する効果を発揮する場合、あるいは逆にトレードオフ効果が生ずる場合がある。非 CO₂ 温室効果ガスの排出削減を行うことにより、燃料費や施肥費用の節減、地域環境改善、地域雇用の増大、先進国から途上国への技術移転など、持続可能な開発に対するシナジー効果が期待できる。他方、収穫量の減少（農業部門）や追加的削減コストによるエネルギー、製品などの価格上昇などのトレードオフも存在する。途上国に大量に存在する非 CO₂ 温室効果ガスの削減ポテンシャルを活用して地球温暖化対策を効率的に進めるには、どのような障壁が存在するかを検討するとともに、途上国の持続可能な開発に対するシナジー／トレードオフについても検討することが重要である。

本章では、部門別あるいは活動別に非 CO₂ 温室効果ガスを削減するに当たっての、障壁とシナジー／トレードオフ効果について、IPCC 第四次評価報告書（第三作業部会）の該当する部門に関する記述をもとに整理する。

（エネルギー部門）

①天然ガス・石油システムからのメタン排出

この活動における排出削減に対する障壁としては、まず、世界的規模での天然ガス需要増加が挙げられる。また、削減技術によっては、例えば高性能コンプレッサー（50 万～300 万ドル）のように設備投資額が高額なものがあり、これが障壁となると考えられる。これらの障壁は、EPA の削減ポテンシャル推計に反映されているといえる（需要増はベースライン排出量推計に折り込まれている。また、コストが障壁となるかどうかは、炭素価格とのバランスで決まる）。EPA の推計では考慮されていないが、例えば、当該国が温室効果ガスの排出削減義務を負っていない場合（途上国および米国）は、削減活動に対してインセンティブを与えない政策が障壁

⁴¹ ここでは、IPCC 評価報告書に倣い、温暖化防止対策を行うことによって持続可能な開発の促進につながる効果を「持続可能な開発に対するシナジー」と呼ぶ。

⁴² ここでは、温暖化防止対策を行うことによって持続可能な開発が損なわれる効果を「持続可能な開発に対するトレードオフ」と呼ぶ。

になっていると言える。

持続可能な開発に対するシナジーとしては、ガス漏れが減少することによる利益、雇用の創設、技術移転、対策技術の開発促進、大気環境の改善⁴³などがある。

②石炭採掘におけるメタン排出

この活動における排出削減に対する障壁としては、天然ガス・石油システムからの排出と同様に、需要増加と削減のための追加的コストの発生が上げられる。ただし、回収したメタンをパイプラインに供給することによる収入によってコストの一部を回収することが可能である。また、削減活動に対してインセンティブを与えない政策も天然ガス・石油システムの場合と同様に障壁となる。

持続可能な開発に対するシナジーとしては、回収したメタンを周辺地域へ供給することによる周辺住民の生活向上、雇用の創出、技術移転、対策技術の開発促進、大気環境の改善などがある。

（農業部門）

①農耕地土壌からの N₂O 排出

この活動における排出削減に対する障壁としては、人口増加による食料需要の増大、追加的コストの発生、安価な肥料価格、伝統的農法への執着、途上国の地方農村については技術・情報へのアクセスの制約、削減活動に対してインセンティブを与えない当該国の政策などが挙げられる。

持続可能な開発に対するシナジーとしては、合理的施肥による肥料コスト削減、対策技術開発促進、技術移転、環境改善（窒素酸化物の削減）、地下水水質の改善などが挙げられる。他方、

トレードオフとしては、施肥量削減による収穫量の減少、無耕作農法による雇用機会の減少、などが考えられる。

②反芻動物の腸内醗酵によるメタン排出

この活動における排出削減に対する障壁としては、人口増加による需要の増大、追加的コストの発生（穀物系食料利用、薬品など）、技術・情報へのアクセスの制限、削減活動に対してインセンティブを与えない当該国の政策などが揚げられる。

持続可能な開発に対するシナジーとしては、生産量の向上（牛乳、肉）、雇用の創出、大気環境の改善、技術移転などがある。他方、トレードオフとしては、家畜1頭当りの排出量の増大（穀物系飼料の利用により単位生産量（肉、牛乳）当りのメタン排出量は減少するが、1頭当りの排出量が増えることがある）などが考えられる。

③稲作によるメタン排出

この活動における排出削減に対する障壁としては、人口増加による需要の増大、需要増加と削減のための追加的コストの発生、技術・情報へのアクセスの制限、削減活動に対してインセンティブを与えない当該国の政策、伝統的農法への執着などが揚げられる。

持続可能な開発に対するシナジーとしては、雇用の創出、大気環境の改善、技術移転、水資源の節減などがある。他方、トレードオフとしては、収穫量の減少が考えられる。

（廃棄物部門）

埋立処分場からのメタン排出

産業部門の活動のうち、「埋立処分場からのメタン排出」削減に対する障壁としては、都市人口の増大による処分場の増加、追加的コストの発生、技術・情報へのアクセスの制限、削減活動に対してインセンティブを与えない当該国の

⁴³ メタンと N₂O は、温室効果ガスであり大気汚染物質でもある対流圏オゾンの前駆物質であるため、メタンの減少は対流圏オゾンの減少につながる。

政策などが揚げられる。

持続可能な開発に対するシナジーとしては、雇用の創出、周辺への環境負荷軽減、技術移転、などがある。

（産業部門）

代替フロン等の製造・利用

産業部門の活動のうち、「代替フロン等の製造・利用」における排出削減に対する障壁としては、ODS 利用制限による代替フロンの需要増大、経済発展によるエアコン等の需要増加、追加的コストの発生、技術・情報へのアクセスの制限、削減活動に対してインセンティブを与えない当該国の政策などが揚げられる。代替フロンの価格（が安い場合）が上げられる。

持続可能な開発に対するシナジーとしては、雇用の創出、周辺への環境負荷軽減、技術移転、技術の普及と開発促進などがある。他方、トレードオフとしては、製品価格の上昇、製品の品質低下（半導体洗浄を代替手法で行った場合の洗浄能力低下など）が考えられる。

部門別の主な非 CO₂ 温室効果ガス削減活動に対する障壁については、全ての部門について、需要（エネルギー需要、食料需要、代替フロン等の需要等）の増大と対策のためのコストの増加が障壁となっている。また、排出削減に対するインセンティブが働かない制度や政策も、全ての部門に共通の障壁といえる。また、部門によっては、削減技術へのアクセスの欠如も障壁となっている。ただし、これらの障壁は、非 CO₂ 温室効果ガスの削減に特有の障壁ではなく、温室効果ガスの排出削減全般に共通な障壁とも言える。特徴的な事例としては、モントリオール議定書によるオゾン層破壊物質の製造・使用の禁止・制限が、代替フロン等の製造・利用を増大させている例が挙げられる。

持続可能な開発に対するシナジーについては、

環境負荷の軽減、雇用の創出、技術移転など、ほとんどの部門に共通した効果といえる。トレードオフについては、農業部門の収穫量の低下や産業部門における製品低下など、部門による特徴が見られる。

6. 代替フロン等の排出削減の取り組み事例

6.1 日本の電気事業による自主的な SF₆ 排出削減目標

4.3.3 で示したとおり、電力部門における SF₆ 排出量に関しては、米国をはじめとした他国と比べて日本の削減が顕著である。これは、日本の電気事業が非常に厳しい削減目標を自主的に設定し、この目標に沿って着実に削減対策を行ってきたためである。ここでは、非 CO₂ 温室効果ガスの排出削減の成功事例として、日本の電気事業の取り組みについて紹介する。

SF₆ は、1900 年にフランスで初めて合成された人工ガスであり、他の代替フロン等と同様に自然界には存在しない物質である。非常に安定度の高い不活性ガスであり、無色、無臭で毒性がなく、不燃性、非水溶性であるとともに極めて優れた絶縁性を持つ。このため、変電所における電気絶縁機器（ガス遮断機等）の絶縁ガスとして 1938 年頃から米国を中心に利用が広まり、日本では 1969 年からガス遮断機に利用されるようになった。

他方、SF₆ は 1997 年の京都議定書によって温室効果ガスに指定され、日本は他の温室効果ガスと合わせて、その排出量を 2008 年から 2012 年までの年平均で、基準年（1995 年）比で 6%削減とすることとなった。政府の「京都議定書目標達成計画」（2005 年）では、代替フロン等の排出削減目標を 2010 年までに、基準年である 1995 年の排出量の +0.1%としている。

このような状況下で、電気事業連合会は当時の通商産業大臣の要請にもとづき、1998年4月に、SF₆排出削減のための自主行動計画（「電気事業におけるSF₆排出抑制に関する自主行動計画」）を策定し、対策を進めるとともに、毎年、計画の進捗状況を経済産業省に報告している。自主行動計画の内容は以下のとおりである：

①機器点検の漏洩防止

- ・ 機器点検時のガス回収を徹底し、排出量の割合を1995年までの40%から、2000年には10%程度、2005年には3%程度まで抑制する。

②廃棄機器からの回収、再利用システムの確立

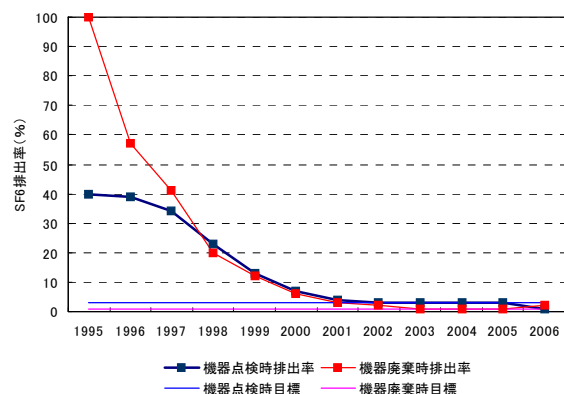
- ・ 機器を廃棄する際のガス回収を徹底し、排出量の割合を1995年までの100%から、2005年にはガス回収装置の能力の限界である1%程度まで抑制する。
- ・ 「SF₆ガス再利用基準」にもとづき、電力会社における再利用、機器メーカーにおける再利用ならびにガスメーカーでの再精製又は破碎処理の要請を行うなど、関係業界と共同歩調をとりつつ、SF₆ガスのクローズドサイクル化を目指す。

③SF₆ガス管理体制の強化

- ・ 「SF₆管理台帳」の整備を行い、電力業界における保有量及び排出量の数値管理の徹底を図る。

このような目標に基づく対策実施の結果、機器点検時の目標排出率3%を2002年に前倒しして達成した。また、機器廃棄時の目標である排出量1%は2004年に達成された⁴⁴。1995年

から2005年までの、機器点検時および機器廃棄時の排出率（機器に含まれているガスの総量に対する、排出されるガス量の割合）を図6-1に示す。



（出典：「電気事業におけるSF₆排出抑制に関する自主行動計画」第9回フォローアップ「分野ごとの行動計画に基づく取組の進捗状況（個表）」2007年より作成）

図6-1 電気絶縁機器の点検、廃棄時のSF₆排出率の変遷

Fig.6-1 SF6 Leakage Rates during Maintenance and Replacement of Equipments

自主行動計画の②の2点目である、SF₆のクローズドサイクル確立については、電力会社は、機器メーカー、ガスメーカーとともに共同検討会を発足させ、回収したガスの受け渡し方法や引取り条件など業界間移動に伴う統一的なルールについて検討しており、これに基づく実運用の推進を図っている（電気事業連合会、2007）。自主行動計画の③に相当する管理体制の強化については、「SF₆管理台帳」を整備し、個別の機器・作業毎にSF₆ガスの保有量・排出量を管理する体制を確立している。

SF₆排出削減対策は、ガスの回収と破壊に分けられる。機器の点検および廃棄時のSF₆ガスの回収は、真空ポンプによるガスの吸引と圧縮機によるボンベへの充填によって行われる。高

⁴⁴ 2006年には、全体の排出量が少ない（14トン）なかで、機器の不具合により回収率が下がった事例があり、排出率が2%となった（電気事業連合会工

務部による）。

度な技術はまったく要さないが、回収率を高めるためには真空ポンプによる長時間の吸引が必要であり、それなりのコストがかかる。500kVクラスのガス遮断機の場合、排出率を1%まで抑制するために10時間以上の吸引が必要である（電気事業連合会,1998）。回収されたSF₆ガスは、ガス中の水分量などを測定した結果、基準を満たした場合は再利用されるが、基準を満たさなかったガスは、ガスメーカーが引き取り、高温燃焼処理（1200℃以上の高温で分解）により破壊処分される。なお、電気事業連合会工務部によれば、日本のように排出率を1%まで削減するような極端な目標を設定しない限り、ガスの回収は高度な技術をまったく要さないため、途上国においても実施可能である。ただし、SF₆の高温燃焼処理に当っては、先進国の技術導入が必要である。削減目標や制度を確立しさえすれば削減は可能である。削減を実施するにはそれなりのコストが掛かるので、何らかのインセンティブが働かない限り誰も実施しないというのが実態である。

SF₆は他の代替フロン等と同様に、自然界では存在せず、人工的に製造されるガスであるため、製造量、使用量、回収量、排出量を管理することが比較的容易である。このような条件を活かして、日本の電気事業が行っているSF₆の排出削減は、特定の業界による自主的な削減目標設定が非常に効果的に機能した事例である。監督官庁の指導に基づき、技術的なフィージビリティを考慮し自主的に目標設定を行ったこと、業界全体の取組みとして各社が横並びで取り組んだことなどが顕著な成果をあげられた要因と考えられる。

6.2 世界半導体会議（WSC）による自主的PFC排出削減目標

SF₆と同じく代替フロン等に含まれるPFCに

関しては、民間の業界団体による国際的排出削減活動の事例として、世界半導体会議⁴⁵（WSC：World Semiconductor Council）による自主的なPFC削減目標の設定がある。WSCは1997年に日本、米国、EU、韓国および台湾の各半導体協会が設立した民間レベルの国際会議であり、当初、貿易問題を民間ベースで解決することを目的としていたが、現在では環境問題、技術協力など様々な議題を扱っている。なお、2006年には新たに中国が加盟した。WSCは、様々な取組みの一つとして、半導体製造に使用されるPFCの排出量削減に取り組んでおり、1999年に各国の半導体業界団体は「2010年までにPFCの排出量をそれぞれの基準年排出量⁴⁶に対し10%以上削減する」ことを確約した。この目標に向けて、WSC加盟団体はPFC排出削減のためのベスト・プラクティスについて情報交換等を行っている。なお、中国半導体産業協会は現在、ベースラインと排出削減プログラムへの参加可能時期について検討中である（JEITA,2007）。

このような民間主導の国際的な枠組に基づく削減対策も、非CO₂温室効果ガス削減に向けた取組みの一つの形態として参考になる。

7. 温暖化防止活動への活用の可能性について

本章では、非CO₂温室効果ガスの削減ポテンシャル、削減実施に対する障壁、持続可能な開発に対するシナジー効果等について整理した結果を踏まえ、今後の世界レベルでの日本の温暖

⁴⁵ 1997年に日本、米国、EU、韓国および台湾の各半導体協会が設立した民間レベルの国際会議であり、当初、貿易問題を民間ベースで解決することを目的としていたが、現在では環境問題、技術協力など様々な議題を扱っている。なお、2006年には新たに中国が加盟した。

⁴⁶ 日本、欧州、米国の基準年は1995年、韓国は1997年。台湾は1997年と1999年の平均排出量を基準とする。

化防止への取り組みについて、以下にいくつかの可能性を示す：

(1) 技術協力および制度形成支援

低コストでの非 CO₂ 温室効果ガスの削減ポテンシャルが大きい途上国（中国、インド、ブラジル、インドネシア他）に対して、排出削減を促していくことが必要である。具体的には、二国間あるいは多国間の枠組を通じた技術協力や制度形成支援などによって、各国、各部門が抱える温室効果ガスの排出削減に対する「障壁」を取り除き、これらの国の排出削減を積極的に支援していくことが日本の役割として重要であろう。

非 CO₂ 温室効果ガスの削減が、負のコストあるいは低コストで実施可能であることについての認識が高まれば、それがインセンティブとして働く可能性がある。このため、知識の普及や教育を含むキャパシティビルディングに加え、必要な情報提供、技術協力、先導的プロジェクトの実施などが、途上国自身による削減活動を促進するきっかけとなると考えられる。

(2) 民間主導の自主的取組

代替フロン等については、日本や EU 諸国などの先進国では排出削減が進んでいるが、将来は、途上国において排出量の大幅な増加が予想される。SF₆ の事例で示したように、日本では電力業界の自主的な目標設定と削減努力によって電力システムからの排出量を大幅に削減することができた。また、マグネシウム業界が自主的に設定した 2012 年までの全廃目標が達成されれば、SF₆ の排出はさらに進むこととなる。この部門での日本の取り組みは、世界でも最も進んでいるということができ、その経験を活かして、排出削減が遅れている国の制度形成に貢献することができる。

また、PFC に関しては、6.2 で示したように、民間の業界団体を通じて国際的に排出削減が進められている事例として、WSC に参加している国の業界団体による自主的な PFC 削減目標の設定がある。WSC は、2010 年までに PFC の排出量を基準年に対し 10%削減することを目標とし、PFC 排出削減のためのベスト・プラクティスについて情報交換を行っている。このような国際レベルでの民間主導の自主的な取り組みも、削減のための有効な方策として参考になると思われる。

(3) ガス別アプローチ

途上国においても、(2)で示した業界主体の自主的取組が進めば理想的であるが、必ずしも業界団体が先進国と同様に機能するとは限らない。ひとつの可能性としては、これらのガスについては、オゾン層破壊物質に関するモントリオール議定書のようなガス別の実効性のある枠組みを設ける事が考えられる。このようなガス別のアプローチには次のメリットがある：

- ① 代替フロン等は、他のガスと違って排出源・排出量を明確に特定できるため、管理がしやすい。
- ② そのため、削減実施可能性を個別具体的に議論でき、実効性のある削減目標を設定できる。
- ③ 途上国の中でも、国情によっては、特定のガスについて対応が可能である（たとえば、韓国における HFC が、この好例と思われる）。

また、エネルギー部門からのメタン排出についても、部門別・ガス別交渉が効果的である可能性がある。これは持続可能な開発に対するシナジー効果があり、回収したガスの有効利用が可能のため、途上国が自ら実施する活動としては比較的バリアが低いと考えられるため、途上国の参加につながると思われるからである。他部門、他ガスと切り離すことにより、温暖化対策への途上国参加の糸口になる可能性がある。

(4)CDM／JIの可能性

CDM については、現在、埋立処分場や排水処理場からのメタン回収・利用や代替フロン等の破壊など、非 CO₂ 温室効果ガスの削減を目的としたプロジェクトがほとんどを占めている。京都議定書以降の CDM や JI の扱いについては未定だが、京都議定書の第一約束期間終了後も何らかの形で同様の仕組みが継続するとすれば、非 CO₂ 温室効果ガスの削減方策のひとつの形態となろう。排出量の多い、農業部門の耕作土壌からの一酸化二窒素排出削減などに関する CDM の方法論が確立されれば、さらに削減活動が活発化する可能性も考えられる。

第 1 章の「背景」で述べたように、日本は 2050 年までに世界全体の温室効果ガスの排出量を半減することを世界共通の目標とすべきであるとの提案を世界に向けて発表した。この目標に向けて日本にできることは、国内対策を進めると同時に、世界レベルでの温室効果ガスの削減を促進することである。非 CO₂ 温室効果ガスの削減ポテンシャルはそのきっかけ作りに役立つ可能性がある。

参考文献

- Del Grosso et al.(2001), Simulate Interaction of Carbon Dynamics and Nitrogen Trace Gas Fluxes Using the DAYCENT Model, in M. Schaffer, et al.(Eds), Modeling Carbon and Nitrogen Dynamics for Soil Management, CRC Press
- EPA(2006a) Global Anthropogenic Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions: 1990-2020
- EPA(2006b) Global Mitigation of Non-CO₂ Greenhouse Gases
- IPCC (1996) Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventory
- IPCC(2005) Special Report on Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System Issues related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons
(http://arch.rivm.nl/env/int/ipcc/pages_media/SROC-final/SpecialReportSROC.html)
- IPCC (2007a) ,Fourth Assessment Report: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the International Panel on Climate Change
(<http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg3.htm>)
- IPCC(2007b) ,Fourth Assessment Report: Climate Change 2007:The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the International Panel on Climate Change
(<http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>)
- Lucas,P.L. et al. (2005), A Multi-gas Abatement analysis of Kyoto Protocol, RIVM Report 550006001/2005
(<http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/550006001.pdf>)
- Multi-Greenhouse Gas Mitigation and

Climate Policy, A Special Issue of the Energy
Journal, 2006

電気事業連合会，電気事業における SF₆ 排出抑制に
関する自主行動計画の進捗状況について，2007 年
JEITA（社団法人 電子情報技術産業協会），「第 11
回 世界半導体会議（WSC）共同声明 2007 年 5
月 24 日、仮訳」，2007

([http://www.jeita.or.jp/japanese/press/2007/0525/
wsc07.pdf](http://www.jeita.or.jp/japanese/press/2007/0525/wsc07.pdf))

東北大学理学研究科大気海洋変動観測研究センター
物質循環分野 HP

[http://tgr.geophys.tohoku.ac.jp/index.php?option=
com_content&task=view&id=20&Itemid=38](http://tgr.geophys.tohoku.ac.jp/index.php?option=com_content&task=view&id=20&Itemid=38)

電力中央研究所報告

〔不許複製〕

編集・発行人

財団法人 電力中央研究所
社会経済研究所



東京都狛江市岩戸北 2-11-1
電話 03 (3480) 2111 (代)

e-mail src-rr-ml@criepi.denken.or.jp

発行所

財団法人 電力中央研究所
東京都千代田区大手町 1-6-1
電話 03 (3201) 6601 (代)

印刷所

株式会社 ユウワビジネス
東京都千代田区神田須田町 1-1
電話 03 (3258) 9380

ISBN978-4-86216-639-5

