

B-54 アジア太平洋地域における温暖化対策統合評価モデル (AIM) の適用と改良に関する途上国等共同研究

(2) AIMモデルの更新と普及のための改良に関する途上国等共同研究

研究代表者 国立環境研究所 地球環境研究グループ

温暖化影響対策研究チーム 甲斐沼 美紀子

環境庁国立環境研究所

地球環境研究グループ 温暖化影響対策研究チーム 甲斐沼美紀子・増井利彦

社会環境システム部 環境経済室/環境計画室 森田 恒幸・日引 聡・原沢 秀夫・高橋 潔

(委託先) 京都大学工学部 松岡 譲

(海外共同研究機関) 中国エネルギー研究所・インド経営研究所・韓国エネルギー経済研究院・韓国サンミュン大学・インドネシア環境省

平成9～11年度合計予算額	93,710	千円
(平成11年度予算額)	31,359	千円)

[要旨] 本研究の目的は、アジア太平洋地域において排出される温室効果ガスを予測し、その抑制方策を評価するための温暖化統合評価モデル (AIM) を改良、拡張するとともに、普及のための簡略AIMモデルを開発することである。普及版AIMモデルは主に、途上国において温暖化対策の効果を簡便に分析することを目的としているが、政策決定者とのインタフェースとしても重要な役割を果たす。世界経済モデルは温暖化対策が与える影響について、国際市場を通じた影響などを分析するためのものである。この他、大気汚染、土地利用変化等を分析するためのサブモジュールを組み込み、IPCCの新排出シナリオの定量化、京都議定書の経済影響、二酸化炭素・二酸化硫黄の削減シナリオの分析などを行なった。

[キーワード] 地球温暖化、アジア太平洋地域、温室効果ガス、エンドユース・モデル、世界経済モデル

### 1. 研究の背景と目的

AIMモデルはわが国を始めとして、海外共同研究機関、IPCC、エコアジア、国連環境計画等において、様々な政策決定過程に適用されてきた。AIMモデルを活用する過程で、政策決定者からの新しいニーズに対応することが要求され、モデルの更新、改良、拡張の必要性が生じた。特に、これまで国レベルのモデルが中心であったが、地域レベルでの詳細な二酸化炭素削減計画に利用するため、技術メニュー毎に二酸化炭素削減量が簡便に計算できるモデルの開発が必要とされた。また、温暖化対策が与える影響について、エネルギーの国際市場を通じた影響、エネルギー以外の財の国際市場を通じた影響、国際的な資本市場を通じた影響、および国際排出量取引、共同実施やCDMを通じた影響などの様々な影響を分析できる世界経済モデルの開発が必要とされた。さらに、化石燃料の大量消費がもたらす大気汚染等の環境問題とリンクした政策ミックスのあり方を検討することが望まれているが、大気汚染、酸性雨、土地利用変化等が取り扱え

るよう、サブモジュールを追加した総合的なシミュレーション・モデルを開発するが必要とされた。本研究では、これらの要請に対応するモデルを開発することを目的とする。

## 2. AIM モデルの基本構造

本研究で開発したシミュレーション・モデルは、温室効果ガス排出・気候変化・その影響といった一連のプロセスを統合して分析できる「統合評価モデル」である。このモデルは、各国や地域の経済活動と地球規模の気候変化を結びつけて検討できるだけでなく、地球規模の気候変化が国や地域の社会経済にどのような影響を及ぼすかについても検討できるため、各種温暖化対策を総合的に評価することが可能である。この種の統合モデルの例としては他に、米国のバツテル研究所の GCAM、米国の MIT モデル、オランダの RIVM の IMAGE などがある。

これらの統合モデルと比較した場合の AIM モデルの特徴は、アジア太平洋地域に焦点をあてていること、及び、エネルギー技術の評価を重視している点にある。これはアジア太平洋地域においてわが国が果たすべき役割であるエネルギー関連及び環境技術の開発・移転とその支援に対応したものである。

AIM モデルは、アジア太平洋地域の各国の温暖化対策の効果を地球環境の変化及び世界の社会経済トレンドとの係りあいの中で評価する。AIM の全体構成は、図 2.1 に示すように、人為起源の温室効果ガス排出量を予測する温室効果ガス排出モデル (AIM/排出)、排出された温室効果ガスの大気中濃度を予測して温度上昇を推定する温暖化現象モデル (AIM/気候)、それに、気候変化がアジア太平洋地域の自然環境や社会経済に及ぼす影響を推定する温室効果ガス影響モデル (AIM/影響) から構成されている。

AIM/排出モデルは、エネルギー消費、土地利用変化、農業生産等の温室効果ガス排出の原因になる社会経済活動のモデルで構成されている。その構造は、図 2.2 に示すように、世界モデルとアジア太平洋地域の国別モデルからなる。世界モデルは、エネルギーや農産物などの需要と供給の関係を一般均衡によって集約的に表現する、いわゆる「トップダウン型モデル」であるのに対し、国別モデルは、エネルギーの消費や生産をつかさどる人々の活動やそこで使われる技術の変化に焦点を置き、これらの詳細な記述から全体としてのエネルギー消費や生産を積み上げ方式で予測していく「ボトムアップ型モデル」である。長期の予測には、市場均衡を基本にして世界の経済活動の推移を予測するトップダウン型の世界経済モデルが、政策の具体的展望の方向とその効果を政策決定者や政治家に対して説明するには、具体性と説得性を持ったボトムアップモデルが不可欠である。

AIM/気候モデルの特徴は、今までに開発されてきた大気化学反応、海洋交換、放射加熱、炭素循環、フィードバック、気候変化等の個別のモデルを、独自のフレームに基づいて組み合わせたところにある。これによって、温室効果ガスの排出と気候変化を結びつけることが可能となった。

AIM/影響モデルについては、水資源変化、植生変化、健康影響、災害リスクの変化、農業影響、海面上昇等のモデルの開発を進めてきた。これらのモデルの特徴は、10~100 キロメートル四方を単位地域とした高解像度の分析が可能である点である。これによってアジア太平洋地域の温暖化影響による被害を詳細に分析できるようになった。

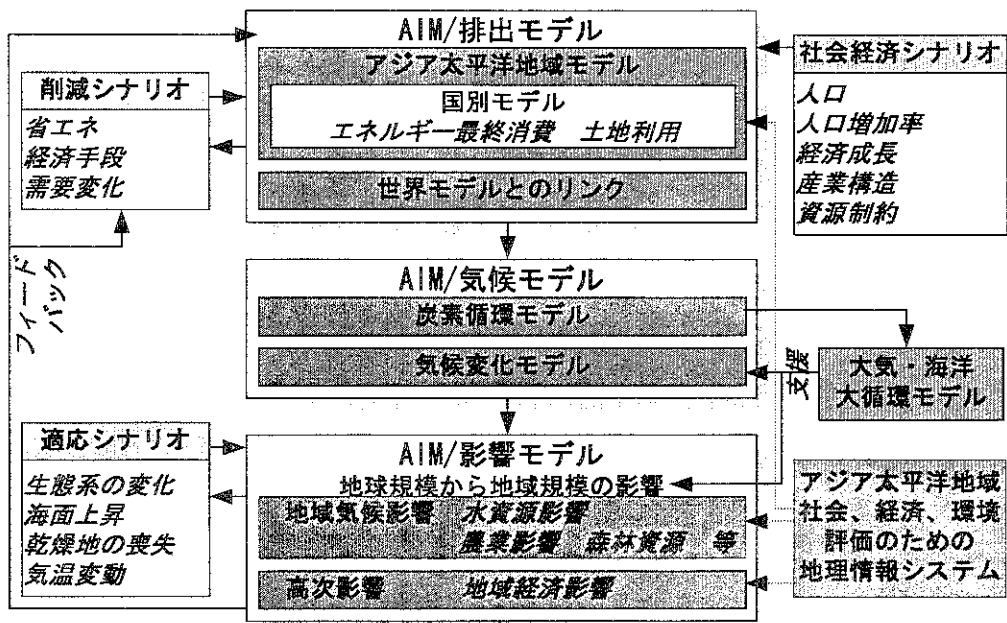


図 2.1 AIMモデルの全体構成

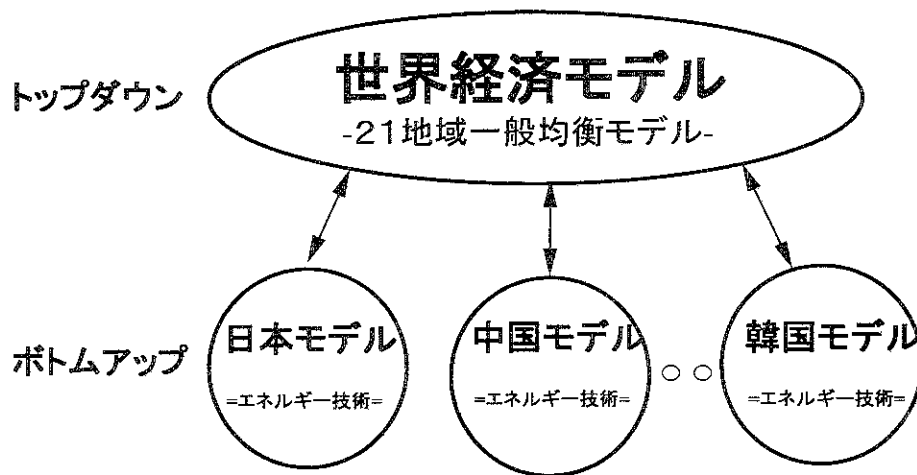


図 2.2 AIM/排出モデルの構成

### 3. エネルギー技術モデルの開発

ボトムアップ型には、エネルギーの供給・転換の側面に焦点を当てて、より効率の高い技術やその組み合わせを分析するものと、エネルギーの需要・消費の側面に焦点を当てて、各部門ごとに人間活動の変化がエネルギー需要をどう変化させるかについて詳細な積み上げ計算を行うエンドユース型のモデルがある。AIM のボトムアップ型モデルは、両者の側面から、エネルギー技術に焦点をあてて分析できるエネルギー技術モデルである。

AIM/エネルギー技術モデルでは、図 2.3 に示すように、エネルギーサービスの需要を、人口、経済成長、産業構造、ライフスタイルなどを勘案して予測し、このエネルギーサービスを供給するためにどのようなエネルギー技術がどれだけ使われるかを計算する。日本モデルにおいては200種類近い技術を検討した。そして、使われるエネルギー技術が決まったところで、必要なエネルギーサービスを提供するために使われるエネルギーと、個々のエネルギー技術が稼働した時に排出される二酸化炭素の量を計算する。

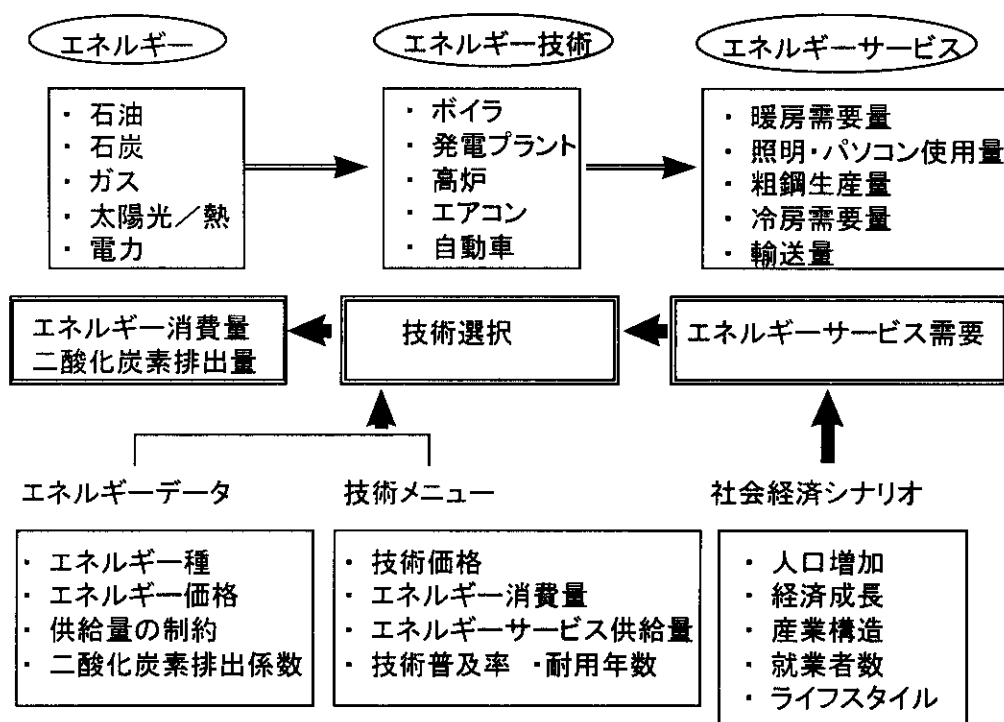


図 2.3 AIM エネルギー技術モデルの構成

#### 3.1. エネルギー技術の選択

このモデルでは、費用を最小化する方向で技術が選択される。費用には固定費用と燃料費用など維持管理に係わる費用がある。維持管理に係わる費用は毎年必要だが、固定費用は機械を買う時に必要である。エネルギー技術は何年も使うから、技術の導入を検討する場合には、将来のことも考えて値段を比較する。比較の方法は図 2.4 に示すように2つある。技術を持っていないか、既にある技術が交換時期に来ている場合には、導入価格も含めて最も安くなる技術を選択する。

既に技術があり、それがまだ交換時期に達していない場合には、古い技術では運転費用だけを、導入を考えている新しい技術では導入コストあるいは改良コストと運転費用を合計した費用を考慮する。買い換えたり改良した方が、運転費用が安くなり、導入費用分を補って余りある場合に買い換えることになる。

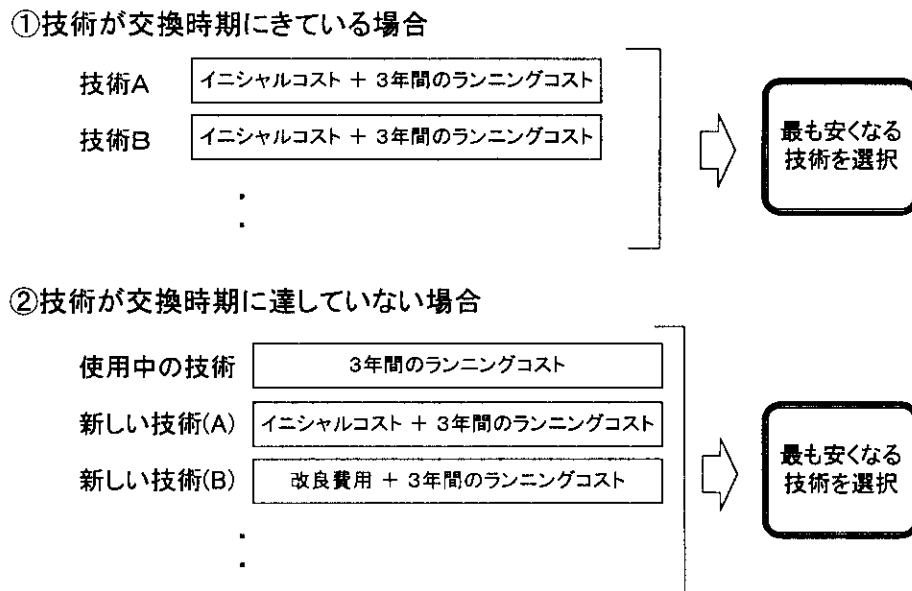


図 2.4 モデルにおける技術選択（資本回収期間3年の場合）

### 3.2. 日本モデルの構成

AIM エネルギー技術モデルは各国ごとに開発しているが、ここでは、日本モデルについて述べる。日本モデルでは、まず最終需要部門である産業部門、家庭部門、業務部門、運輸部門のエネルギーサービス量や技術選択を決定し、エネルギー消費量が算定される。そして、最終需要部門のエネルギー需要量に基づいて、エネルギー転換部門の技術選択を決定し、わが国全体のエネルギー消費量及び二酸化炭素排出量を決定する。そのため、まず、各部門毎にモデル化を行い、そのモデルに対応するように各種エネルギー技術に関する情報の整備を行った。図 2.5 にエネルギーサービスシステムの全体像を示す。エネルギーシステムでは、産業部門、家庭部門、業務部門、運輸部門、エネルギー転換部門が相互に関連しており、本モデルでは、個別の工程で省エネルギーを図るとともに、システム全体でエネルギー消費量を抑制する方策を分析できる。表 2.1 に検討した主要なエネルギー技術を示す。以下、部門ごとのモデル化について示す。

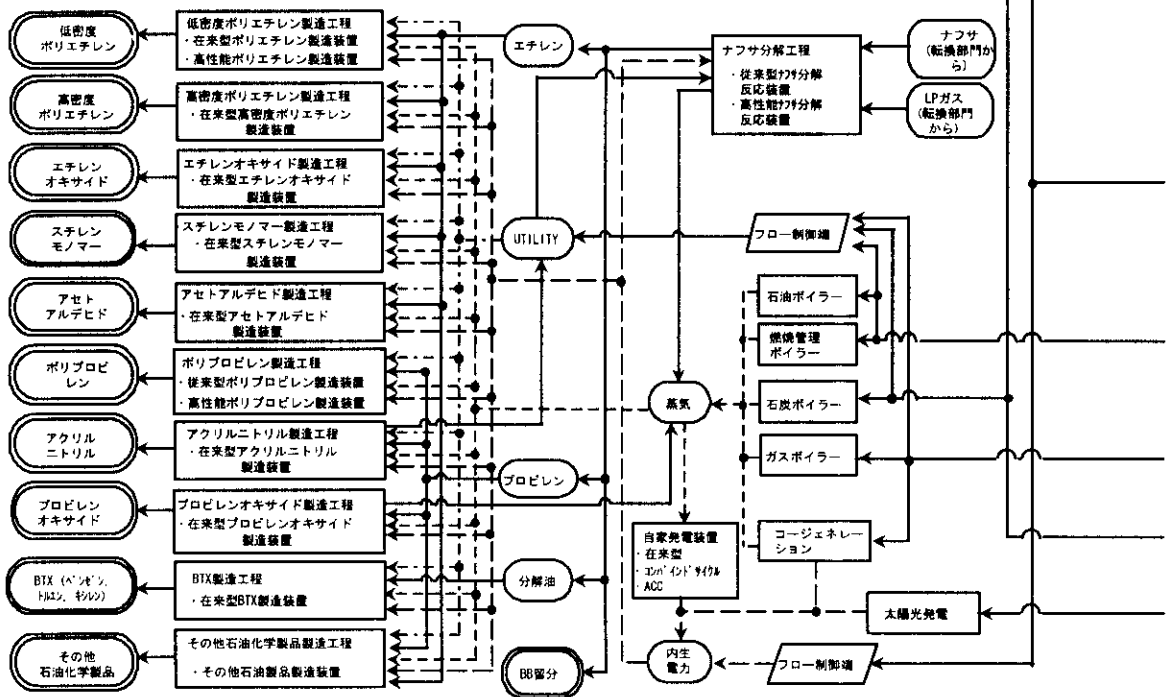
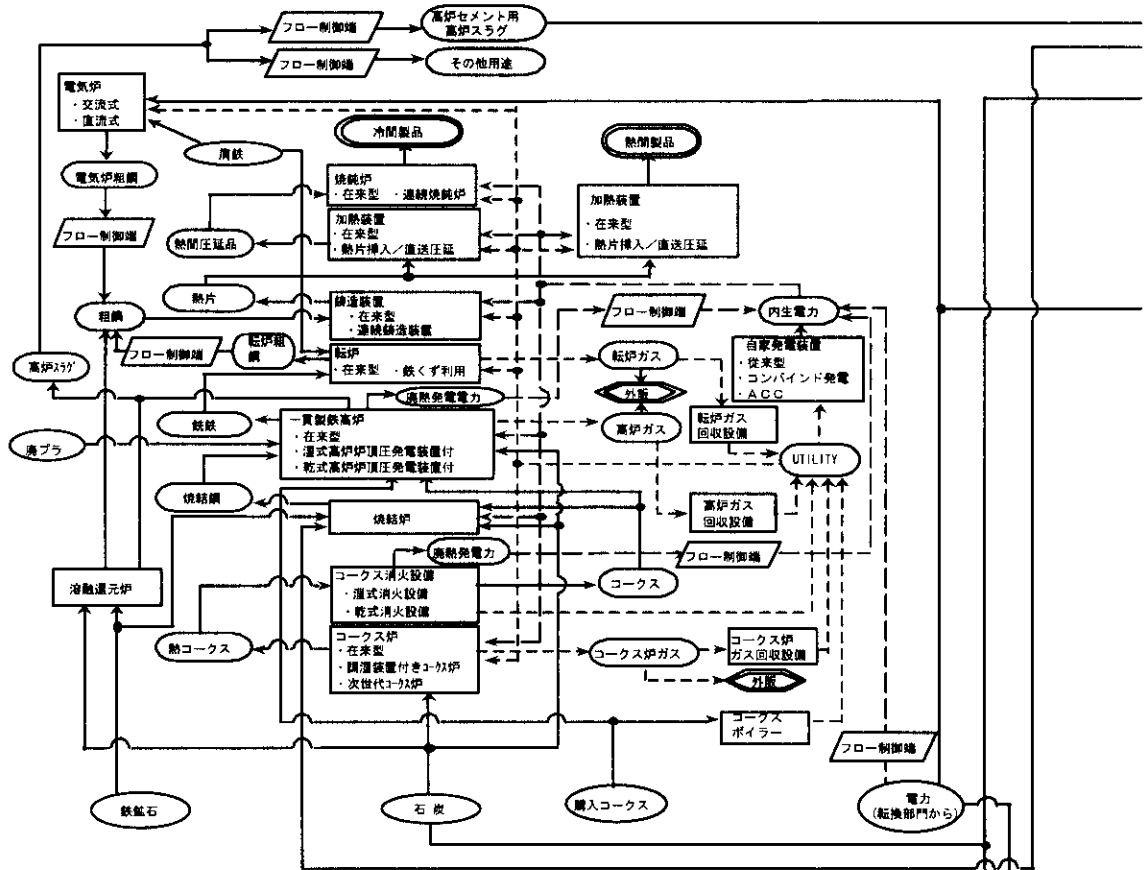


図 2.5a エネルギーシステムのフロー図 (鉄鋼、石油化学)

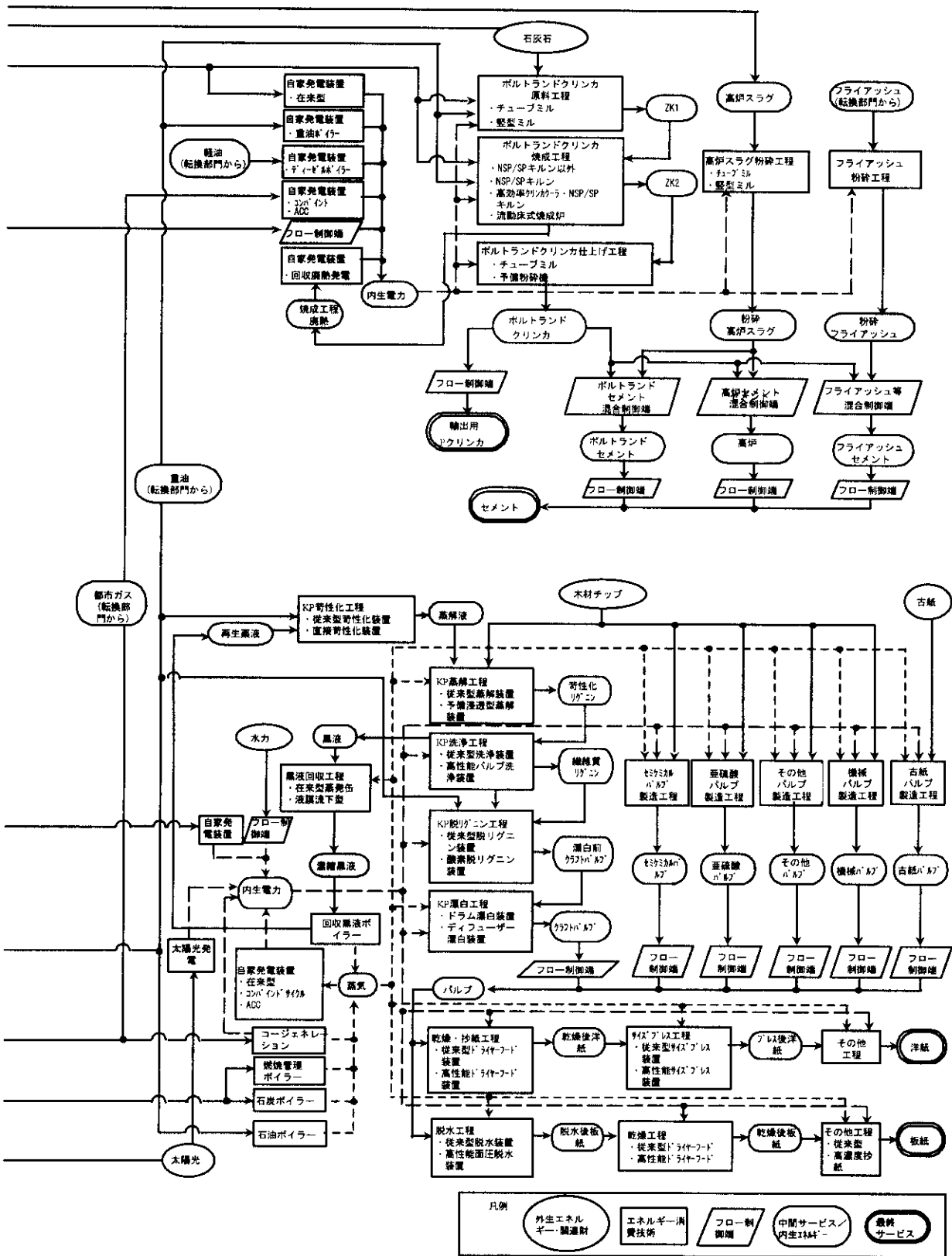


図 2.5b エネルギーシステムのフロー図 (セメント、紙・パルプ)

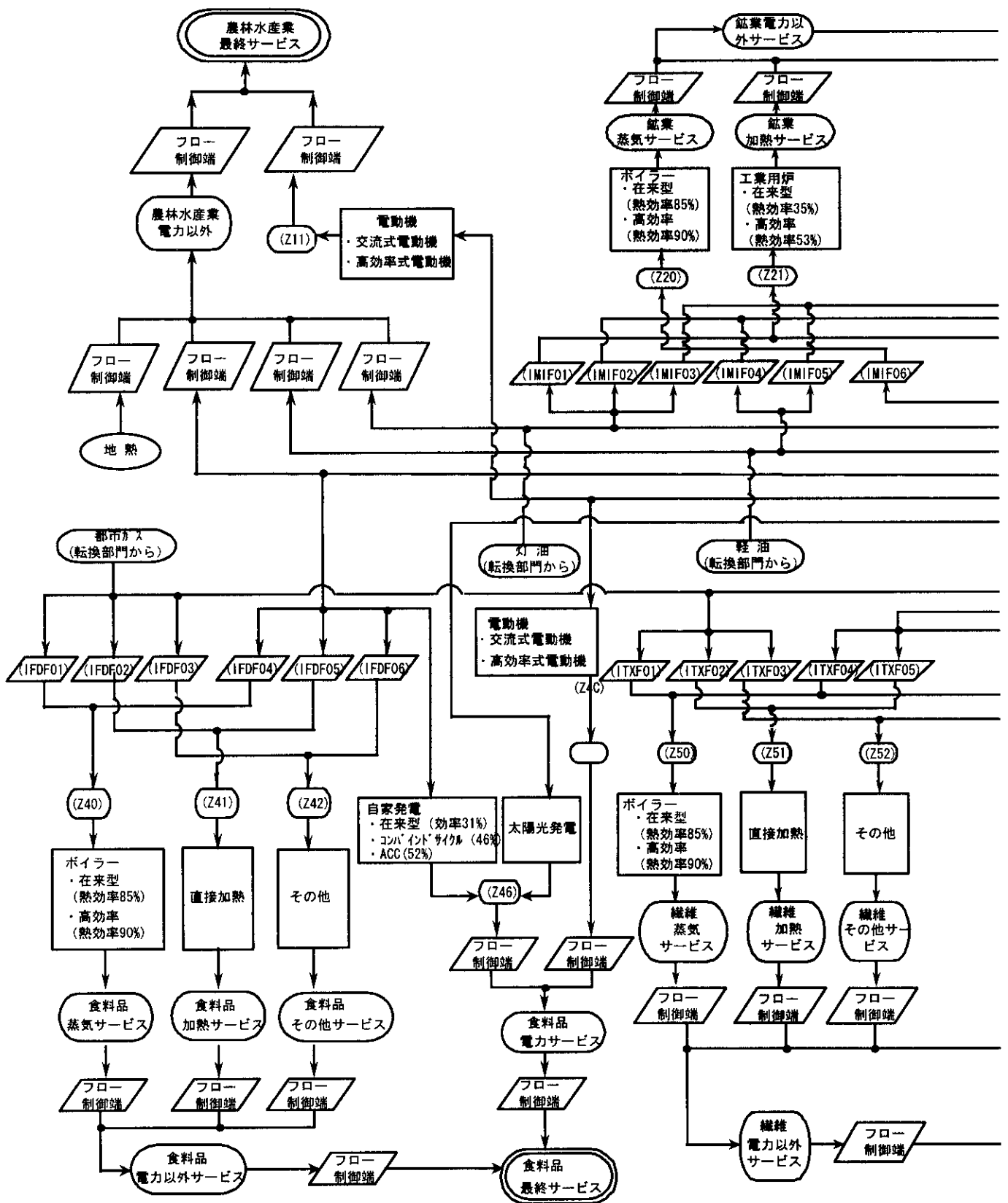


図 2.5c エネルギーシステムのフロー図 (農林水産業、食料品)



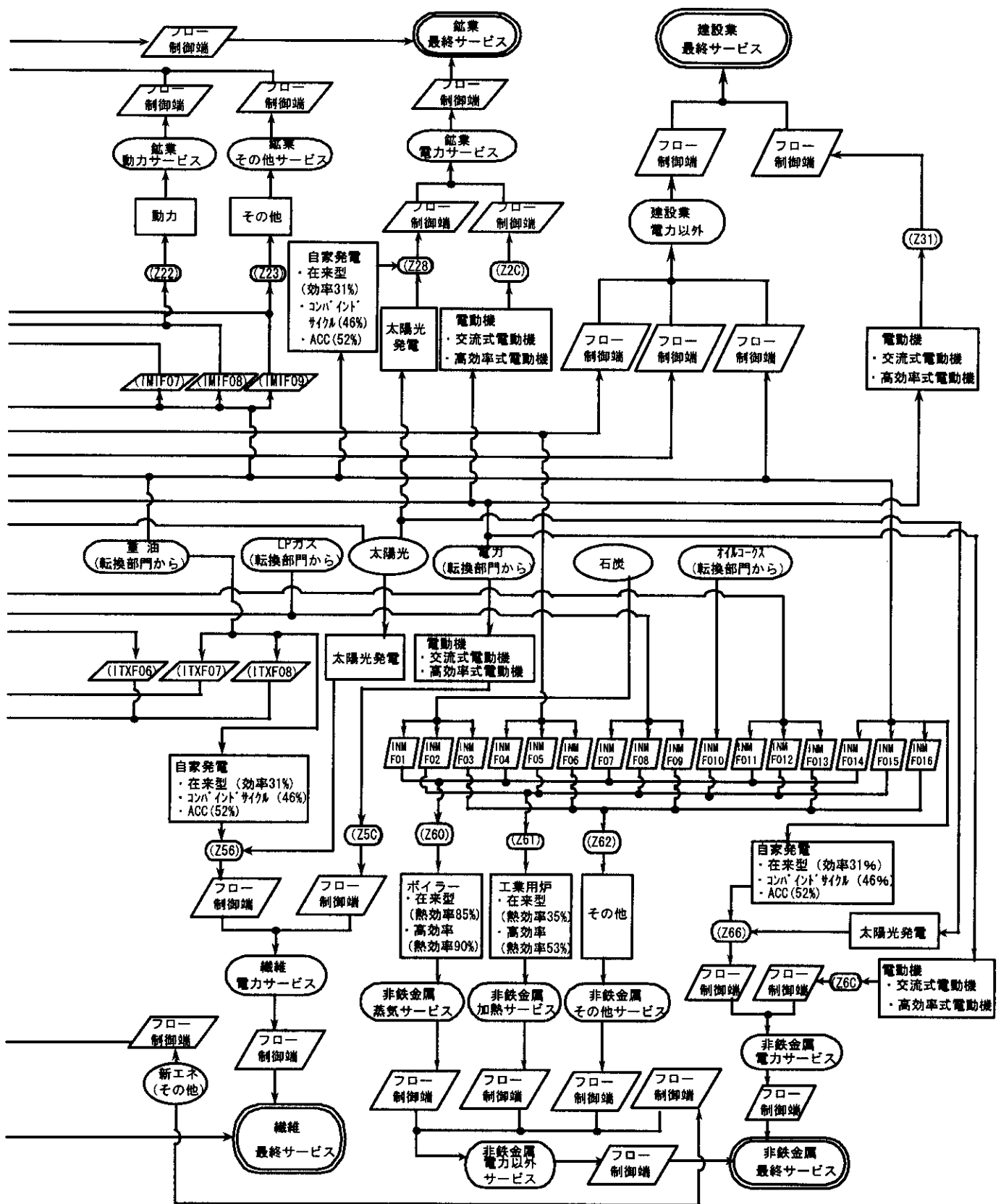


図 2.5d エネルギーシステムのフロー図 (鉱業、建設業、繊維、非鉄金属)

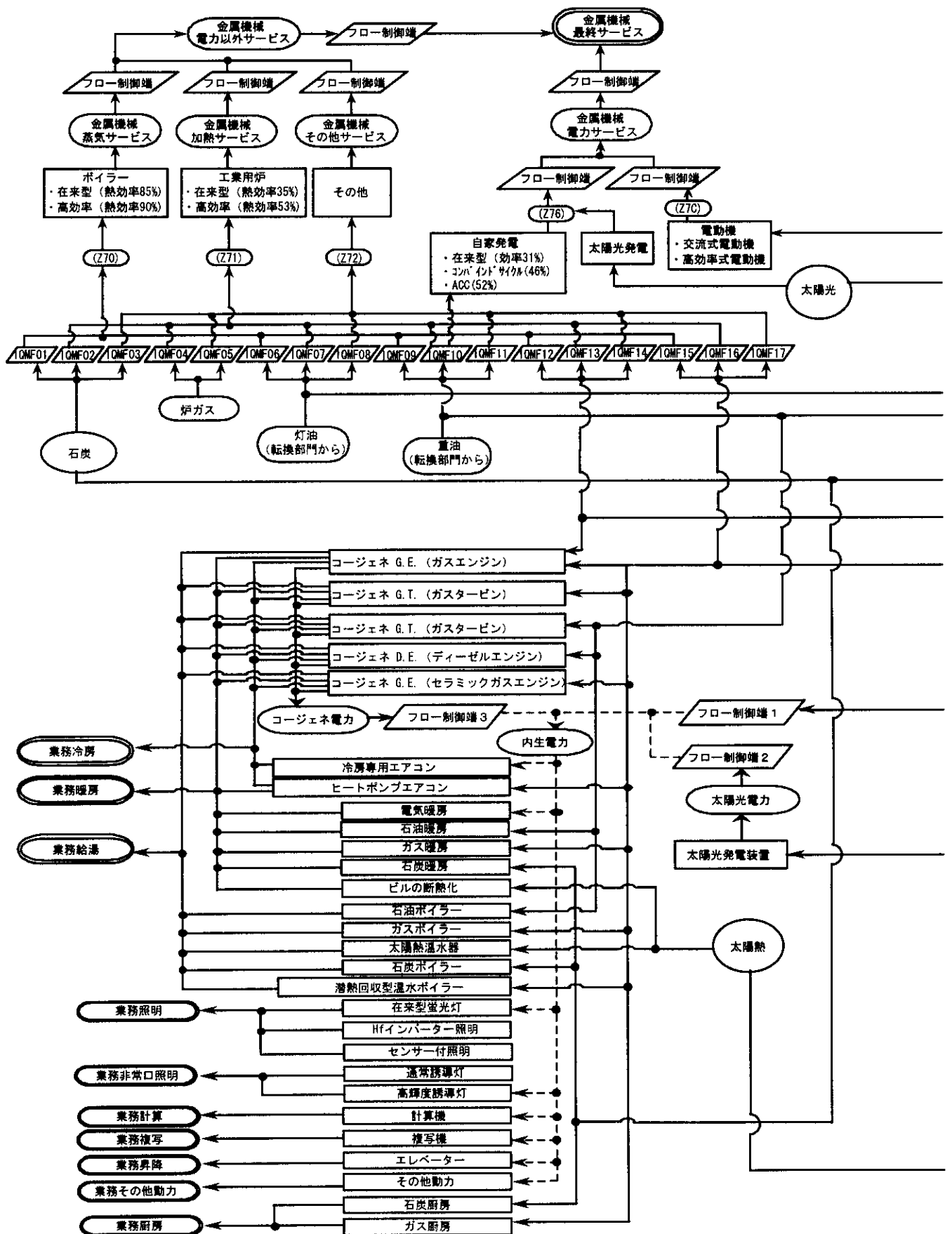


図 2.5e エネルギーシステムのフロー図 (金属機械、業務)

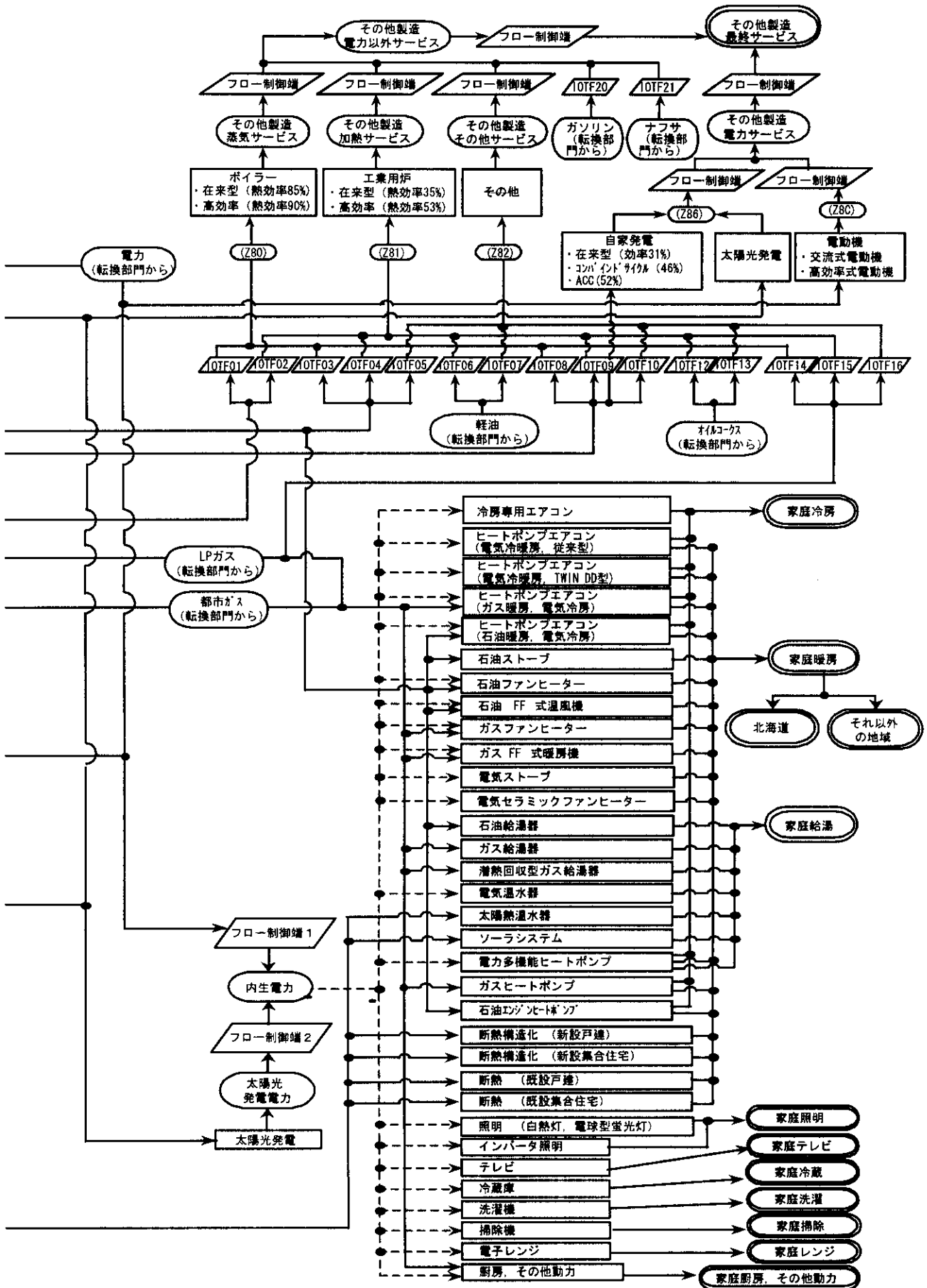


図 2.5f エネルギーシステムのフロー図 (その他製造、民生)

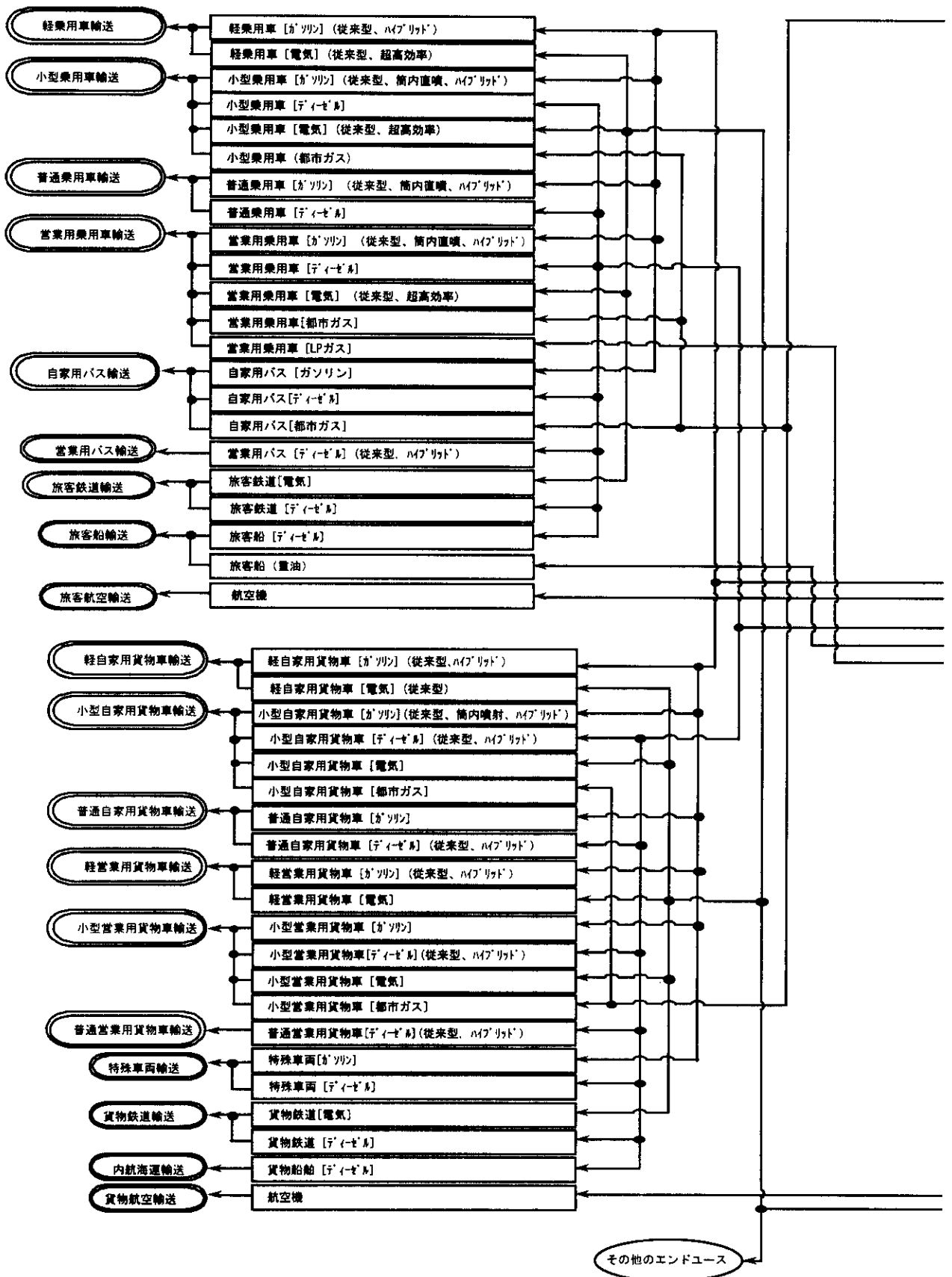


図 2.5g エネルギーシステムのフロー図 (運輸)

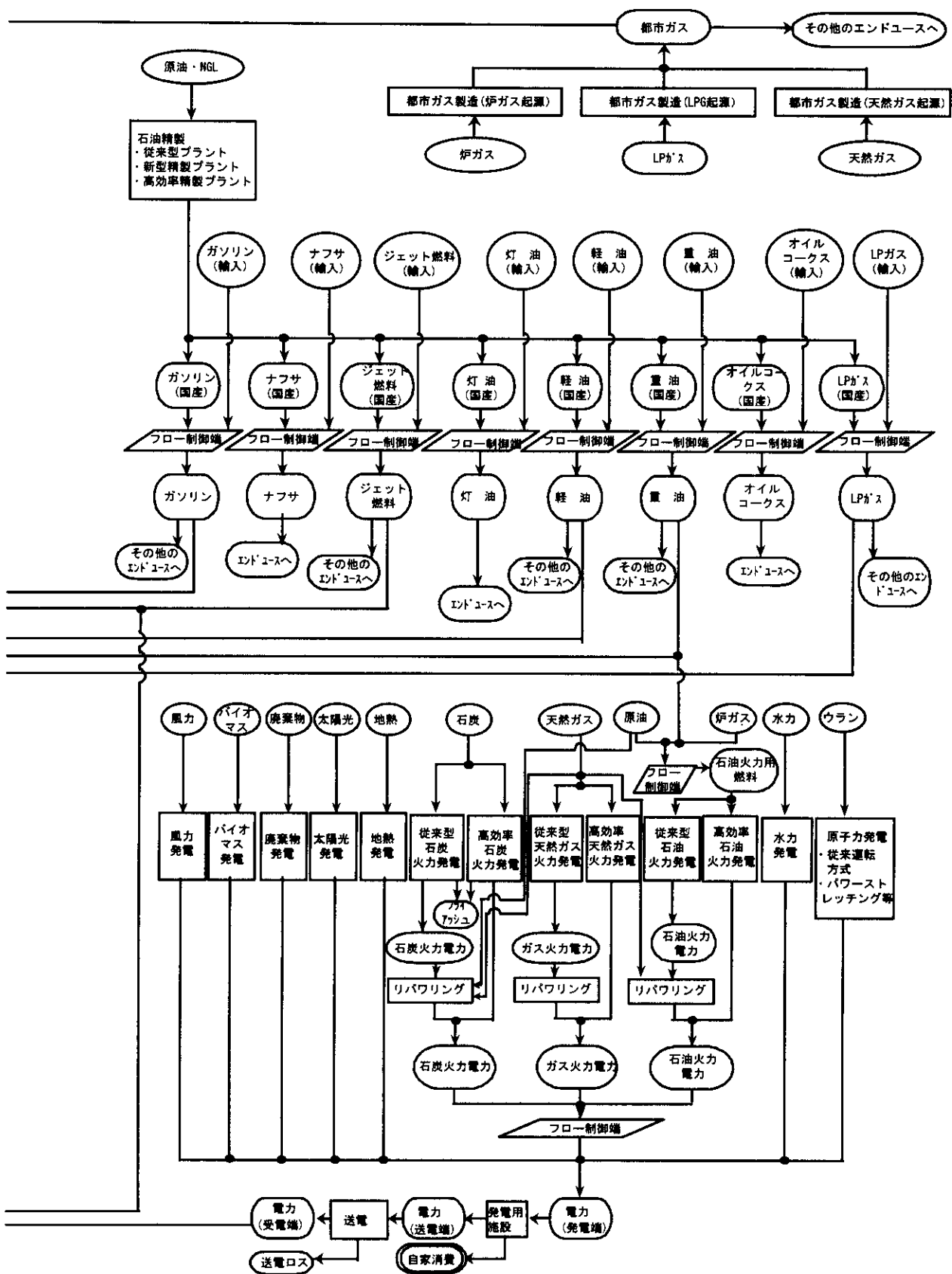


図 2.5h エネルギーシステムのフロー図 (エネルギー転換部門)

表 2.1 エネルギーサービス技術一覧

部門	分野	サービス技術
産業	鉄鋼	コークス炉調湿装置 スクラップ予熱装置 次世代コークス炉 焼結炉 高炉 転炉 溶融還元炉 交流式電気炉 直流式電気炉 鋳造装置 連続鋳造装置 従来型加熱装置 直送圧延/熱片装入 焼鈍装置 連続焼鈍装置 コークス乾式消火設備 コークス湿式消火設備 湿式高炉炉頂圧発電設備 乾式高炉炉頂圧発電設備 自家発電 自家発電リパワリング コンバインドサイクル発電
	セメント	チューブミル 予備粉砕機 NSP/SP以外 NSP/SP 高効率クリンカーラ 堅型ミル 流動床焼成炉 ディーゼル発電 廃熱発電 自家発電リパワリング コンバインドサイクル発電
	石油化学	ナフサ分解反応装置 高効率ナフサ分解反応装置 低密度ポリエチレン製造装置 高効率低密度ポリエチレン製造装置 高密度ポリエチレン製造装置 ポリプロピレン製造装置 高効率ポリプロピレン製造装置 エチレンオキシド製造装置 スチレンモノマー製造装置 アセトアルデヒド製造装置 ポリプロピレン製造装置 高性能ポリプロピレン製造装置 重油ボイラー-低空気比重油ボイラー アクリルニトリル製造装置 プロピレンオキシド製造装置 BTX製造装置 その他石油化学製品製造装置 自家発電 自家発電リパワリング コンバインドサイクル発電
	紙パルプ	従来型蒸解装置 予備浸透型連続蒸解装置 従来型洗浄装置 高性能パルプ洗浄装置 従来型脱リグニン装置 酸素脱リグニン装置 ドラム漂白装置 ディフューザー漂白装置 従来型蒸発缶 液膜流下型蒸発缶 古紙パルプ製造装置 セミケミカルパルプ製造装置 機械パルプ製造装置 亜硫酸パルプ製造装置 従来型ドライヤーフード置 高性能ドライヤーフード装置 従来型サイズプレス装置 高性能サイズプレス装置 洋紙抄紙その他 従来型脱水装置 高性能面圧脱水装置 従来型苛性化 直接苛性化 石炭ボイラー 重油ボイラー 低空気比重油ボイラー 黒液ボイラー 自家発電 自家発電リパワリング コンバインドサイクル発電
	業種横断的技術	高性能工業炉 ボイラー燃焼管理 自家発電リパワリング コンバインドサイクル発電 インバータ制御 高効率モーター 太陽光発電
家庭	冷房	通常型エアコン 省エネ型エアコン
	冷房・暖房	通常型エアコン 省エネ型エアコン ガスエアコン 石油エアコン
	暖房	石油ストーブ 石油ファンヒーター 石油温風暖房機 ガスファンヒーター (都市ガス仕様、LPガス仕様) ガス温風暖房機 (都市ガス仕様、LPガス仕様) 電気ストーブ 電気セラミックファンヒーター
	給湯	ガス給湯機 (都市ガス仕様、LPガス仕様) 石油給湯機 電気温水機 ソーラーシステム 太陽熱温水器 潜熱回収型給湯器 (都市ガス仕様、LPガス仕様)
	冷房・暖房 ・給湯	電力多機能ヒートポンプ ガスヒートポンプ 石油ヒートポンプ
	照明	白熱灯 蛍光灯 白熱灯型蛍光灯
	動力他	テレビ 冷凍冷蔵庫 洗濯機 掃除機 電子レンジ その他
	電力	太陽光発電
	住宅	高断熱化住宅
	冷房	電気冷房空調
業務	冷房・暖房	ガスヒートポンプ
	暖房	電気暖房 石油暖房 ガス暖房 (都市ガス仕様、LPガス仕様) 石炭暖房
	給湯	石油ボイラー 石炭ボイラー ガスボイラー (都市ガス仕様、LPガス仕様) 太陽熱温水器 潜熱回収型温水ボイラー (都市ガス仕様、LPガス仕様) 廃熱利用給湯器
	電力・冷房 暖房・給湯	コージェネガスエンジン コージェネガスタービン コージェネディーゼルエンジン 太陽光発電
	照明	蛍光灯 Hfインバータ照明 センサー付照明
	非常口照明	通常型誘導灯 高輝度誘導灯
	厨房	厨房ガス (都市ガス仕様、LPガス仕様) 厨房石炭
	建物	省エネ型ビル
	動力他	複写機 計算機 昇降機 その他動力
	運輸	旅客輸送
貨物輸送		ガソリン車 (軽/小型/普通) ディーゼル車 (小型/普通) 電気自動車 (軽/小型) CNG車 (軽/小型) ハイブリッド車 (普通) 鉄道 貨物船 航空
エネルギー 転換	都市ガス製造	都市ガス (LPG) 都市ガス (炉ガス) 都市ガス (天然ガス)
	石油精製	従来型石油精製プラント 高効率石油精製プラント
	電気事業者	石炭火力発電 (従来型、リパワリング、高効率) LNG火力発電 (従来型、リパワリング、高効率) 石油火力発電 (従来型、リパワリング、高効率)、水力発電、太陽光発電、 風力発電、燃料電池、廃棄物発電、バイオマス発電、原子力発電

### 3.2.1. 産業部門のモデル化

産業部門では、エネルギー多消費産業である鉄鋼業、セメント業、石油化学工業、紙パルプ業と、その他部門に分類して分析を行っている。エネルギー多消費産業の4部門では図 2.5a、図 2.5b に示すように各種の製造工程及び機器のフローを忠実にモデル化しており、各部門独自のエネルギーサービス技術による詳細なエネルギー消費構造分析が可能になっている。エネルギー多消費産業で産業部門における二酸化炭素の半分程度を占めている。また、その他産業では、農業、鉱業、建設業、食料品業、繊維業、その他窯業土石、その他化学工業、非鉄金属、金属機械、その他産業に分類して分析を行っているが、これらは、最終製品が多種に及び、各産業について個々の技術情報を採取してモデル分析を行うことが現実的に不可能である。そこで、その他産業については業種横断的対策を考慮し、簡易なエネルギーサービスフローを想定した。その一部を図 2.5c～図 2.5f に示す。

#### 3.2.1.1. 鉄鋼業のモデル化

鉄鋼の製造工程は、粗鋼を生産するまでの工程と、粗鋼を鋳造・圧延によって鋼材を生産する工程とに大別できる。粗鋼を生産するまでの工程には、平炉法、高炉法、電炉法がある。但し、我が国では数十年前より平炉法による粗鋼の生産は行われていない。

高炉法では、原料の鉄鉱石は焼結炉で副原料の石灰石と焼結され、還元剤のコークスとともに、高炉炉頂から投入される。焼結鉱とコークスは、高炉内で炉底から吹き込まれた空気とともに反応し、高炉炉底で溶銑と不純物に別れ取り出される。高炉で生産された銑鉄は、転炉に移され石灰石等の副原料を加え成分調整し、酸素を吹き込み銑鉄中の炭素を酸化し粗鋼となる。一方、電炉法は、電炉中で超高電圧のアーキによって溶解した鉄スクラップを成分調整して、粗鋼を生産する。また、現在、高炉法を代替する製鋼法として、熔融還元製鉄は2000年以降の導入を目指して研究開発中である。熔融還元製鉄の特徴として、容易な生産調整、エネルギー原単位低減、石炭資源制約の緩和などがあげられる。

高炉法や電炉法によって生産された粗鋼は、鋳造装置により適当な大きさのスラブとされ、熱間圧延設備によって各種熱間圧延製品となる。高品質や高強度の鋼板を製造する場合には、熱間圧延の後、冷間圧延や焼鈍処理を行い、冷間圧延製品を製造する。

本モデルでは、これらの製造工程を図 2.5a のようにモデル化した。熱間圧延製品及び冷間圧延製品を最終エネルギーサービスとして、これらの生産量を満たすように技術選択ロジックによって各エネルギーサービス技術の導入が決定される。鉄鋼の製造工程には多種にわたる燃料が用いられているが、主要な燃料以外はUtilityとして一括して扱っている。また、鉄鋼業では、様々な工程で排ガスや廃熱が発生しており、それらを回収利用する技術が導入されているが、このモデルではそれらを忠実に再現している。

#### 3.2.1.2. セメント工業のモデル化

セメント製品の種類は、①ポルトランドセメント、②混合セメント、に大別される。これらは、石灰石を分解して製造されるポルトランドクリンカと、高炉スラグ等の混合材との含有率によって決定される。

ポルトランドセメントには、混合材の含有率が5%以下であることがJIS規格で定められている

セメント（表 2.2参照）で、日本のセメント生産量の8割を占めている。主に土木・建設構造物の建設用、左官用モルタルとして使用されている。混合セメントは、相当量の混合材を混合したセメントで、①高炉スラグ、②シリカ質混合材、③フライアッシュが混合材として JIS 規格に定められている。混合材の混合率は、セメントの種類によって異なり、高炉セメントでは 5～70%、シリカセメント・フライアッシュセメントでは 5～30%となっている。

セメント工業では、電力や燃料消費に伴う二酸化炭素排出のみならず、石灰石の分解によっても二酸化炭素が発生する。1990 年度における窯業土石業（セメント業以外にガラス製造業などを含む）の二酸化炭素排出量は、石炭起因 6.0MtC、電力起源 2.6MtC、石灰石起源 11.0MtC（二酸化炭素排出量調査報告書、1992）となっており、ポルトランドクリンカ製造のための石灰石分解に伴う寄与が非常に大きいことがわかる。そのため、混合セメントのシェアの拡大は、ポルトランドクリンカの消費量の削減につながり、しいては二酸化炭素排出量の削減につながる。

表 2.2 セメント種別生産量と混合材の割合(1992 年度)

ポルトランドセメント			混合セメント			
製品種別	生産量(千t)	混合材(%)	製品種別	生産量(千t)	混合材(%)	
普通	69,480	5	高炉セメント	A	327	5～30
				B	16,374	30～60
				C	39	60～70
早強	3,417	-	シリカセメント	A		5～10
				B	48	10～20
				C	15	20～30
中庸熱	92	-	フライアッシュセメント	A	15	5～10
				B	346	10～20
				C	299	20～30
耐硫酸塩	5	-	規格外	187		
その他	1	-	計	17,650		
計	72,995					

\* セメントハンドブックより作成

\* 生産量は1992年度値

本モデルでは、これらの製造工程を図 2.5b のようにモデル化した。セメント生産量及び輸出入ポルトランドクリンカ生産量を最終エネルギーサービスとしている。セメント材料に対する高炉セメントやフライアッシュのシェアをシナリオで与えることで、混合セメントシェアの拡大による二酸化炭素排出削減効果の分析を行うことができる。

### 3.2.1.3. 石油化学工業のモデル化

石油化学工業は、石油や天然ガスを出発原料として、様々な生産工程を経て、合成樹脂、合成繊維原料、合成ゴムなど多種多様な化学製品を製造する産業である。石油化学工業に使用する原料は、その国の資源事情などによって異なるが、日本やヨーロッパでは原油を精製して得られる石油製品のうち「ナフサ（粗製ガソリン）」を主原料としている。それに対して、米国、カナダ、中東産油国では天然ガスや原油採取時の随伴ガスに含まれているエタンを主原料として使用している。



ナフサ分解工程では、原料用に投入されたナフサや LPG が分解・精製され、エチレン、プロピレン、B-B 留分等の基礎石油化学製品が生産される。また、改質精製油や分解油などからベンゼン、トルエン等の芳香族が生産される。さらにエチレンやプロピレン等から低密度ポリエチレン、高密度ポリエチレン、塩化ビニルモノマー、エチレンオキサイド、ポリプロピレン等が生産される。

本分析では、これらの生産工程を図 2.5a のようにモデル化した。生産量の多いエチレン、低密度ポリエチレン(LDPE)、高密度ポリエチレン(HDPE)、ポリプロピレン(PP)、ポリスチレン(PS)を最終エネルギーサービスとし、また、生産量の少ない製品は「その他の石油化学製品」として一括し、エチレン生産量をその最終エネルギーサービス量とした。低密度ポリエチレンや高密度ポリエチレンなどはエチレンから製造され、また、ポリプロピレンなどはプロピレンから製造されるため、エチレン生産量やプロピレン生産量、さらには原料ナフサ投入量は、下流側の低密度ポリエチレンやポリプロピレン生産量によって決定されるはずである。しかし、これらのフローを忠実にモデル化するのは困難であり、また、将来の最終製品構成を予想するのも困難であるため、現段階では、エチレンまでの工程とそれ以降を分解してモデル化を行っている。

#### 3.2.1.4. 紙パルプ工業のモデル化

紙パルプ生産部門の製造工程は、木材から繊維を抽出するパルプ製造工程と、調成されたパルプから紙層を形成し、脱水・乾燥する抄紙工程に分けられる。パルプ製造工程には、主に1)単に木材を擦り潰してつくる機械パルプ、2)薬品処理によって木材中のリグニンを溶出除去して繊維を取り出す化学パルプ、3)古紙からつくる古紙パルプに分類できる。化学パルプ製造工程では、繊維を取り出した後の廃液(黒液)から薬品を分離し、かつ水分を除去した残りかすを燃料として再利用している。

本分析では、紙パルプ工業の生産工程を図 2.5b のようにモデル化した。紙パルプ工業では、古紙パルプの促進が省エネの鍵となる。本モデルにおいては、パルプ生産量に占める古紙パルプの生産量シェアを増大させることで、古紙パルプ促進による省エネ効果を考えることが可能となる。

#### 3.2.1.5. その他産業のモデル化

エネルギー多消費産業以外の産業部門(農林水産業、鉱業、建設業、食料品業、繊維業、セメント以外の窯業土石、石油化学以外の化学工業、非鉄金属、金属機械、その他製造業)については、最終製品が多品種に及び、各産業について個々の技術情報を採取しモデル分析を行うことは、現実的に不可能である。しかし、高効率工業炉、コンバインドサイクル発電、モータのインバータ制御、高効率モータ、ボイラー空気比低減、太陽光発電など業種横断対策によって、二酸化炭素排出の削減が期待される。そこで、エネルギー多消費産業以外の産業部門については、業種横断的対策技術を考慮し、簡易なエネルギーサービスシステムを想定した。本モデルでは、その他産業に関して、各業種毎にシナリオを与え、分析を行っているが、エネルギーサービスシステムは業種によって差異がほとんどない。図 2.5c~図 2.5f にはその他産業の典型的なエネルギーサービスシステムを示す。

### 3.2.2. 家庭部門のモデル化

通常、家庭部門のエネルギー消費用途は、冷房、暖房、給湯、厨房、その他動力の5つに分けられることが多い。しかし、近年及び将来に向けての我が国の状況を考えると、暖房、給湯、厨房等のサービスは既に飽和気味で単位世帯当たりのエネルギー消費量に大きな変化はないと考えられるのに対し、情報機器を含む家電製品によるサービス等は大幅に延びる可能性がある。そこで、その他動力の詳細な分析の実施をデータ利用可能性も含めて検討した結果、ここでは、家庭部門のサービスを基本的に、冷房、暖房、給湯・厨房、照明、冷蔵、テレビ、洗濯、掃除、レンジ、その他の10サービスに分割することとした（図2.5f参照）。

実際の計算時には上記で定めた基本の10サービスのサービス量の内、暖房を非寒冷地と寒冷地、給湯・厨房を都市ガス供給地域と非供給地域、照明を蛍光灯照明と白熱灯照明に分割している。これは、サービスの種類としては同じでも選択の対象となる技術のメニューに違いがあるためである。

暖房については、ヒートポンプを利用したエアコンが選択対象技術の中で重要な役割を果たすが、原理的に寒冷地での使用には難があり選択対象に加えるのは不適であるとの指摘を受け、エアコンを選択対象に加えた非寒冷地暖房と対象から外した寒冷地暖房の2つに分割した。

給湯・厨房については、都市ガスが供給可能な範囲とそうでない範囲を分け、都市ガス非供給地域のガス器具はLPGをエネルギーとするものとした。

照明については、日本の家屋では蛍光灯照明が大きく普及しており、白熱灯とはその形状や設置場所による住み分けが進んでいるため、通常、蛍光灯と白熱灯が同列の選択対象になりにくいことを考慮し、蛍光灯による照明サービスと白熱灯による照明サービスを分割した。これは、白熱灯と白熱灯型蛍光灯の技術選択を記述するためでもある。

これによって実際の計算時のサービスは、冷房、暖房（非寒冷地）、暖房（寒冷地）、給湯・厨房（都市ガス地域）、給湯・厨房（LPG地域）、照明（蛍光灯）、照明（白熱灯）、冷蔵、テレビ、洗濯、掃除、レンジ、その他の13サービスとした。

サービスの単位はエネルギー消費の用途に応じて定義される。ここでは、冷房は冷房カロリー量、暖房は暖房カロリー量、給湯・厨房は給湯・厨房カロリー量、照明は明るさ、冷蔵、テレビ、洗濯、掃除、レンジは性能を補正した台数、その他は電力消費量をもとに算出した。なお、本分析においては、基準年の基準住宅を設定し、その住宅の一世帯に需要されているサービスを1と定義して、用途間の単位を統一した。

### 3.2.3. 業務部門のモデル化

国によって、業務部門の分類が異なると考えられるが、日本版モデルでの業務部門は事務所ビル、卸、小売、飲食店、学校、試験研究機関、ホテル、旅館、病院医療機関、劇場娯楽施設、その他のサービス業を含んでいる。

業務部門のサービス分野は国によって異なる可能性があるが、原則として多サービス分野を詳細に分類する必要がある。家庭部門と同様に、通常、業務部門のエネルギー消費用途は、冷房、暖房、給湯、厨房、その他動力の5つに分けられることが多いが、現在のエネルギー消費の傾向や

今後の我が国の状況を考えれば、その他動力部分を更に詳細に記述することが望ましい。ここでは、業務部門のサービスを基本的に、冷房、暖房、給湯、厨房、照明、非常口照明、複写、計算、昇降、その他の10サービスに分割した（図2.5e参照）。

サービスの単位はエネルギー消費の用途に応じて定義される。ここでは、冷房は冷房カロリー量、暖房は暖房カロリー量、給湯は給湯カロリー量、照明は明るさ、複写、計算等は床面積当たりのエネルギー消費量から単位サービス量を算出した。

#### 3.2.4. 運輸部門のモデル化

日本における運輸部門の二酸化炭素排出量は1990年度に58.2MtC、2000年で72.6MtCで、日本の総排出量の19%（1990）、20%（2000）を占める。なりゆきシナリオでは、2010年における運輸部門の排出量は1990年比38%増加すると予想され、対策が重要な反面、非常に対策効果の現れにくい部門である。

産業部門のように生産に関わる複雑な工程（生産工程）が存在するわけではないが、運輸サービスが行われる移動体の種類によって、用途、使われ方、エネルギー消費量原単位が大きく異なるため、図2.5gのように旅客運輸、貨物運輸にモデル化して取扱った。なお、二輪車（原付を含む）によるエネルギー消費量は、運輸部門の1%程度であるため、日本モデルにおいては対象外とした。

なお、現状の技術選択モデルは、経済性のみを技術の選択基準としているため、現実には、乗り心地、環境への影響等の価格以外の評価基準を考慮する必要がある。このためいくつかの技術については、固定費用に負の効用価格を加味するという条件をつけている。

#### 3.2.5. エネルギー転換部門のモデル化

エネルギー転換部門のエネルギーサービスシステムのフローを図2.5hに示す。ここでは、都市ガス生産、石油精製、発電部門をモデル化した。

##### 3.2.5.1. ガス製造業のモデル化

都市ガス製造では、最終需要部門におけるガス需要量を最終エネルギーサービス量とし、それを満たすようにエネルギーサービス技術が選択される。都市ガス製造段階において燃焼用に消費されるエネルギー及びそれに伴う二酸化炭素排出量は、都市ガス製造部門における自家消費分として勘定される。原料用に使用されているエネルギーの構成比から、都市ガスの二酸化炭素排出係数を算定し、最終需要部門における都市ガス需要量に乗じて都市ガス消費に伴う二酸化炭素排出量を算定する。

##### 3.2.5.2. 石油精製業のモデル化

石油精製は、最終需要部門の様々な石油製品に対する需要量のバランスに応じるため、精製プラントから製造される製品バランスを変化させたり、輸出入量で石油製品の供給量を調整したりしている。それらをモデル化することは困難であるため、本分析では図2.5h示すように非常に単純なフローで石油精製部門のモデル化を行った。最終需要部門における様々な石油製品の需要量

の総和を最終エネルギーサービス量とし、それを満たすようにエネルギーサービスの技術選択が行われる。石油精製業において燃焼用に消費される石油製品の量と石油製品の輸入量とは近年においてほぼ同じレベルで推移している。そのため、将来にわたり石油精製業において燃料用として消費される石油製品は、すべて輸入品によって賄われると想定した。

### 3.2.5.3. 電気事業者のモデル化

電力転換部門は、最終需要部門における電力需要量を最終エネルギーサービス量とし、それを満たすようにエネルギーサービス技術が選択される。「FCCC に基づく日本国報告書」に準拠し、電力転換部門の自家消費及び送電ロス、エネルギー転換部門の二酸化炭素排出量として勘定する。

エネルギー政策や立地条件の制約などから電源種の選択は、必ずしもコストのみで選択されているわけではない。そこで、本分析の電源構成に関わる技術選択ロジックを以下のように構築した。

①最終需要部門（産業・民生・運輸）における電力需要量を算定する。

②計算年において退却する発電所の総発電量を控除し、既存発電所における総電力供給量を計算する（耐用年数の想定：火力発電所 35 年、水力発電所 40 年）。

③既存発電所の総電力供給量から転換部門の電力自家消費量及び送電ロスを差し引いた量が、最終需要部門における電力需要量を上回っている場合、二酸化炭素排出係数が高い火力発電から順番に発電プラントの稼働率を低下させる。

1) 石炭 2) 石油 3) 天然ガス 4) その他

④既存発電所の総電力供給量から転換部門の電力自家消費量及び送電ロスを差し引いた量が、最終需要部門における電力需要量を下回っている場合、二酸化炭素排出係数が低い発電所から順番に新規設置する。

1) 原子力・水力・地熱・ごみ発電・太陽光発電

2) 天然ガス

3) 石油

4) 石炭

但し、1)～3)に関しては以下のような制約条件を設けている。

1) 環境庁技術評価検討会における検討結果の想定値を最大発電量とする。

2)～4) 電事審による見通しを最大発電量とする。2)～4)の全てが電事審の見通しを上回ってしまった場合には、電事審における火力発電の構成比を将来にわたり維持したまま、2)～4)の発電所を増設していく。

### 3.3. エネルギー技術モデルの特徴と限界

二酸化炭素排出量を減らすには、エンドユースの側面で、どのような省エネ技術をどこまで導入できるかが大きな鍵を握っている。AIM/エネルギー技術モデルでは、エネルギー価格の変化により技術代替が生じる現象を中心にして、エネルギー消費の変化を積み上げ方式により推定できる。従って、個々の具体的な政策の有効性を評価したり、種々の政策を組み合わせた場合の効果を評価することが可能である。また、エネルギー需要モデルに技術選択モデルをつなぐことによって、

個別の技術の実態を踏まえたエネルギー効率改善の予測を可能にしている。

しかしその一方で、このエネルギー技術モデルにはいくつかの限界がある。第一に、今のところトップダウンの経済モデルと連動しておらず、エネルギーサービス需要をシナリオによって与えている。このため、エネルギー価格上昇の直接的な需要抑制効果や消費の抑制や貯蓄の減少を通じた間接的な経済影響を考慮していないため、マクロ経済的なロスを推定するには不向きである。第二に、技術選択の際に制度面の障害等の社会的なコストを考慮していないため、個々の技術選択による二酸化炭素排出削減が大きめに見積もられる可能性がある。第三に、現在実用化されていない技術を対象としていない等、対象とした技術が包括的ではないために、全体として二酸化炭素排出の削減量が小さめに見積もられる可能性がある。

このため、AIM モデルでは、エネルギー技術モデルの結果をトップダウンモデルの入力として対策の経済影響、将来のエネルギー効率の改善を想定した場合の二酸化炭素排出量等を推定している。

#### 4. 世界経済モデルの開発

先進各国の二酸化炭素排出量抑制に伴って、国際市場を通じた波及効果や、排出量取引制度の効果を推計するため、エネルギー以外の財を含めた国際貿易を再現できる応用一般均衡モデルを開発した。このモデルの構造を図 2.6 に示す。

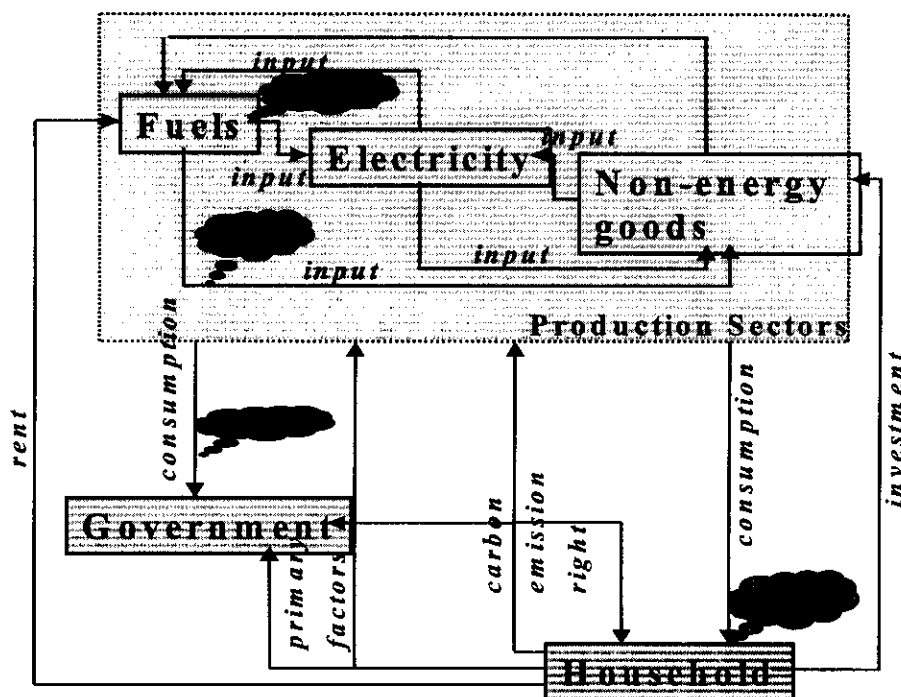
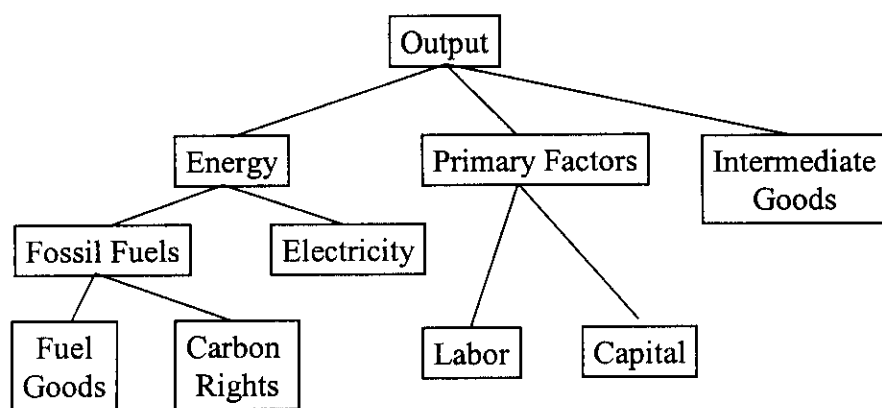


図 2.6 世界経済モデルの構造

世界経済モデルは世界を21地域に分割し、石油、石炭等のエネルギー財およびエネルギー集約型製品（EIS）、農業生産品等に代表される非エネルギー財について生産、消費、貿易量を推計

し、各種温暖化対策の効果を推定するものである。このモデルは静学的一般均衡モデルから出発し、次の4つの改良を加えることにより国際排出権取引やクリーン開発メカニズム、さらに国際市場を通じた産油国や発展途上国への経済影響が分析できるように改良した。即ち、① 静学的一般均衡モデルの動学化、② エネルギーのマテリアル収支の整合化、③ 資本のヴィンテージ概念の導入によるリジディティの再現、④ AIM/Bottom-upモデルとの技術効率改善の整合化を図ることである。

図 2.7 に生産の構造及び代替弾力性を示す。生産はエネルギー、生産要素（資本及び労働）、中間投入を用いて CES 生産関数によって決定される。エネルギー集約型製品（EIS）の生産については、エネルギー、生産要素、中間投入間で 0.3、それ以外の生産については 0.2~0.5 とした。電力と化石燃料間では 0.3、化石燃料同士では 1 とした。また、資本と労働間では 1 であり、化石燃料と炭素排出権は 0 である。炭素排出権を設定することにより、排出量取引の効果が分析できる。



#### Nesting of Production Structure in AIM

**Elasticity of Substitution:**  
 Energy/Primary/Intermediates=0.3(EIS), 0.2~0.5(others)  
 Electricity/Fossil fuels=0.3, Fuel/Fuel=1  
 Labor/Capital=1, Fuels/Carbon=0

図 2.7 生産の構造

#### 4.1. 京都議定書による削減シナリオ

2010年における付属書I国の二酸化炭素排出量および排出権取引を行わない場合の限界費用を図 2.8 に示す。各国の棒グラフに示した値は左から、1990年の排出量、目標排出量、基準ケースの排出量及び排出権取引なしの場合の各国の排出量である。2010年の目標排出量と排出権取引なしの場合の排出量は、基準排出量が目標量を上回っている場合は、目標排出量以下になるよう

に対策を講ずるので同じである。東欧と旧ソ連邦をまとめた地域では2010年の基準排出量が目標量よりもかなり下回っているので、対策は行われぬ。むしろ他の地域の削減対策の影響を、エネルギーや財の貿易を通じて受けるので、結果的には基準排出量よりも排出量は増加する。これは炭素漏洩と呼ばれている問題である。

折れ線グラフは目標を達成するための限界費用である。限界費用とは1単位の炭素排出量を削減するために必要とする経費であるが、ここでは炭素税を想定しており、限界費用以上の炭素税を導入すると排出目標値以内に収めることのできる額である。東欧および旧ソ連では、1990年レベルに排出量を安定化させることを目標としているが、基準シナリオによる排出量が既下回っているため、特別な対策を必要としない。オーストラリアは8%の増加が認められているので、削減を必要とする地域の中では、限界費用が一番低い。ニュージーランドの1990年の排出量は7百万トンCであったが、2010年には1千百万トンCとなると予想され、これを1990年レベルである7百万トンCまで下げるには4百万トンCの排出量を削減しなければならず、これは排出量の50%近くを削減することに相当するため、限界費用が高くなった。これらの地域を除くと、限界費用は、日本、EU、カナダ、米国の順に高い。

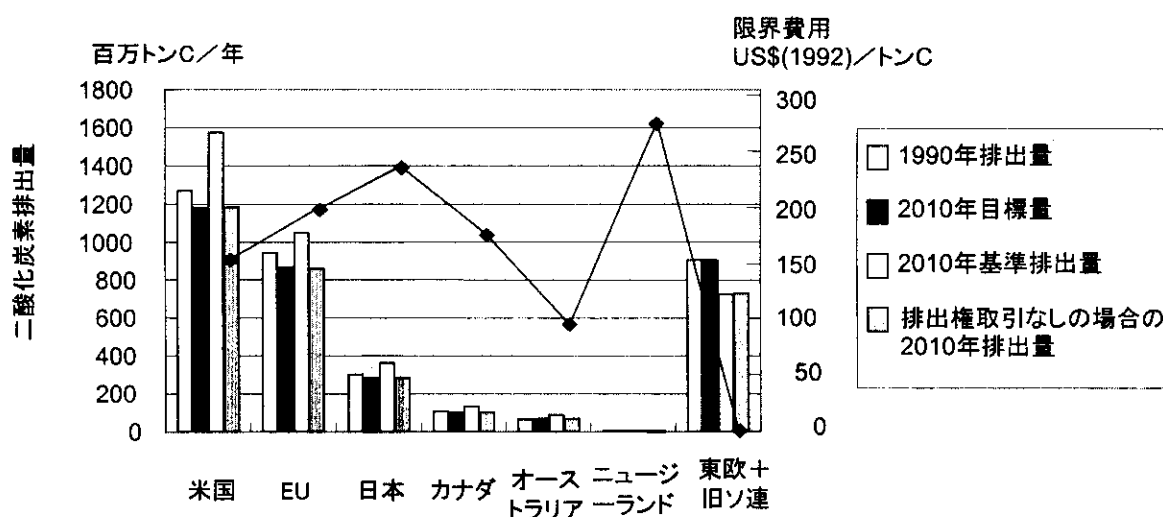


図 2.8 2010年における付属書I国の二酸化炭素排出量と限界費用

#### 4.2. 付属書I国内での排出量取引

付属書I国間のみで排出権取引を行ったシミュレーション結果の経年変化を図2.9に、2010年における排出量取引量を図2.10示す。米国、EU、日本が排出権を買い、旧ソ連が売るという構図になっている。この図は排出権取引量に制限を設けないケースである。旧ソ連は図2.8にも示すように、2010年の排出量が、1990年レベルより下回ると予想されており、排出権取引に制限がないと、2010年基準排出量と1990年排出量の差、約1億8千万トンCを権利として売ることができ、市場原理のもとではすべての権利を売る解が得られる。このため、総排出量は排出権取引なしに各国ごとに削減した場合より増える。これはホット・エアと呼ばれ、今後途上国を巻き込んで排出権取引を行う場合、途上国の許容排出量をいくりにするかの議論の際に重要な問題となる。

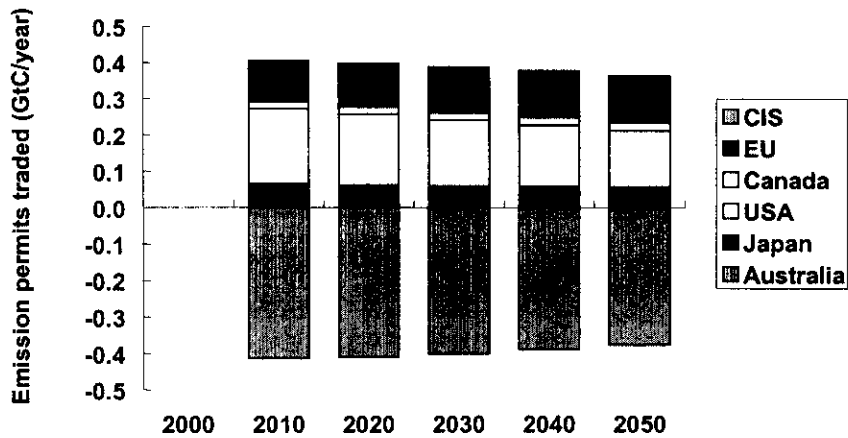


図 2.9 付属書 I 国間取引における取引量の経年変化

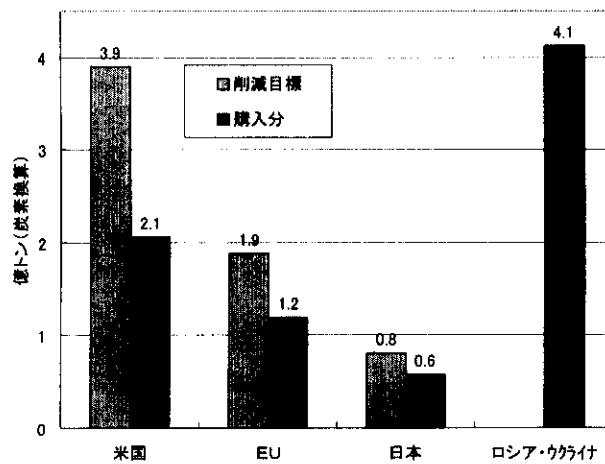


図 2.10 付属書 I 国間取引の場合の 2010 年の排出量取引量

日本の二酸化炭素排出量は、基準ケースで 2010 年には約 8 千万トン増加すると予想されているが、付属書 I 国間の排出権取引では、そのうち約 75% を輸入した方が経済的な損失が少ないと推定される。2010 年での目標削減量は約千 8 百万トンであるから、約 6 千万トンを輸入した場合の日本の総排出量は 1900 年レベルより約 4 千 2 百万トンも増えることになる。もちろん排出権の輸出国である旧ソ連の排出量は相応分だけ減少している訳であるが、もともと排出権取引は国内の削減対策の補完的なものと位置付けられており、EU を中心として排出権取引に制限を設けるべきだとの議論が盛んに行われている。



#### 4.3. 対策による二酸化炭素排出量の変化

対策を行うことにより当然二酸化炭素排出量は変化するが、途上国の中には逆に二酸化炭素が増加する場合もある。図 2.11 は付属書 I 国の 2010 年における排出量を、対策を行わなかった場合と比べたものであり、図 2.12 は途上国の二酸化炭素排出量の変化を示したものである。排出権取引なしのケースおよび付属書 I 国間の排出権取引のケースでは、途上国は対策に関与していないが、それぞれの国の排出量は財の貿易の効果を通じて増加している。韓国、シンガポール、ラテンアメリカ等の炭素漏洩率は高いが、中国の漏洩率は低い。途上国も含んだ場合の取引では、途上国は排出権の輸出国となり、自国での排出量を減らすことにより、排出権を売っている。

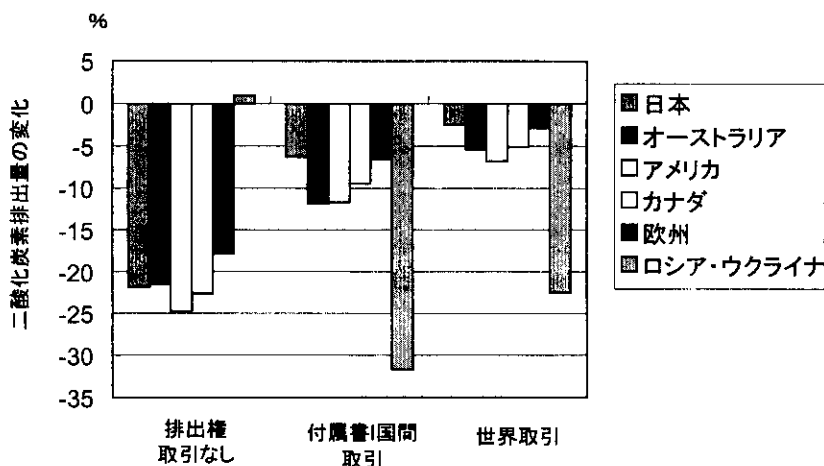


図 2.11 2010 年における二酸化炭素排出量の基準排出量に対する変化（付属書 I 国）

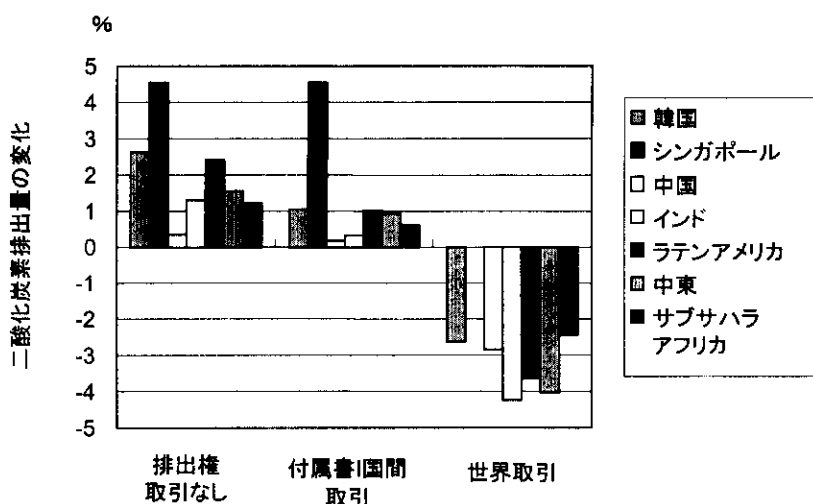


図 2.12 2010 年における二酸化炭素排出量の基準排出量に対する変化（途上国）

#### 4.4. 削減シナリオの経済的影響

二酸化炭素削減を行った場合の経済影響を検討した。図 2.13 は 2010 年における付属書 I 国の基準ケースに対する GDP ロスを、図 2.14 は途上国の GDP ロスを示している。対象としたシナリオは、排出権取引なし、付属書 I 国間での排出権取引、途上国も含めた排出権取引、ダブルバブル、および削減率を 5% 高上げた排出権取引なしのケースである。嵩上げの根拠としては、森林による二酸化炭素吸収や京都議定書に含まれる二酸化炭素以外のガスの対策が大幅に進むケースなどが考えられる。

排出権取引なしの場合の GDP ロスは、米国、EU、日本の順に大きかった。米国は炭素削減のための限界費用は比較的小さいが、GDP への影響は他の付属書 I 国に比べて大きい。理由としては、米国では削減率が日本に比べて大きいこと、また EU は共同で削減を実施していることなどが上げられる。

シナリオ間の比較では、排出権取引なしの場合の GDP への影響が一般には大きいですが、ダブルバブルの場合の EU の GDP への影響は排出権取引なしの場合より大きくなり、ダブルバブルは EU にとって利点がないことが解る。

途上国の GDP への影響は国によってかなり違う。中国や中東では GDP に対して負の影響が現れているが、インドや韓国ではむしろ GDP は増加する。中東は石油輸出国であるため、石油消費量の減少が GDP へ影響していると推定される。また、中国は今後とも石炭への依存が大きいと推定され、国際石油価格の影響よりも、その他の財の貿易による影響の方が大きいと推定される。インドおよび韓国については今後石油需要の増大が見込まれており、先進国の石油需要の減少の影響が GDP を上げる方向に作用している。

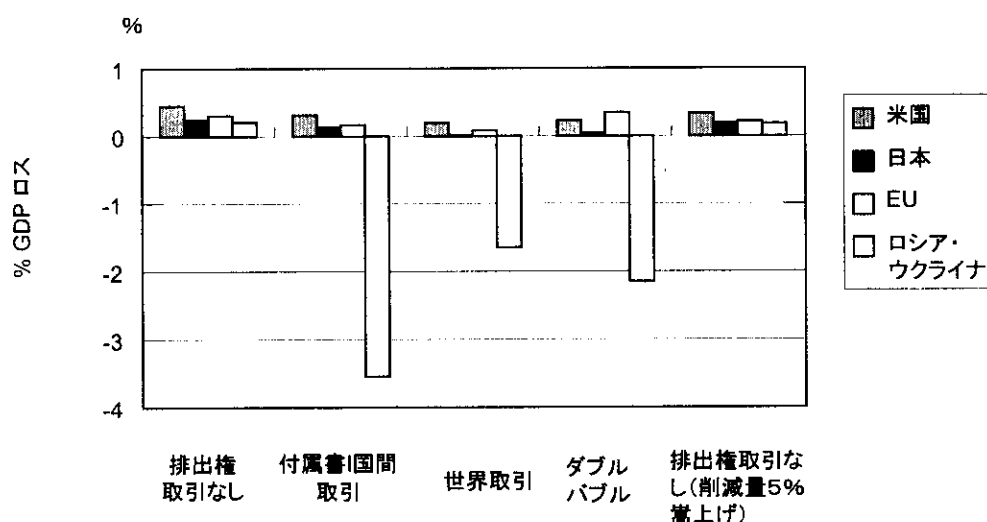


図 2.13 2010 年における付属書 I 国での GDP ロスの比較

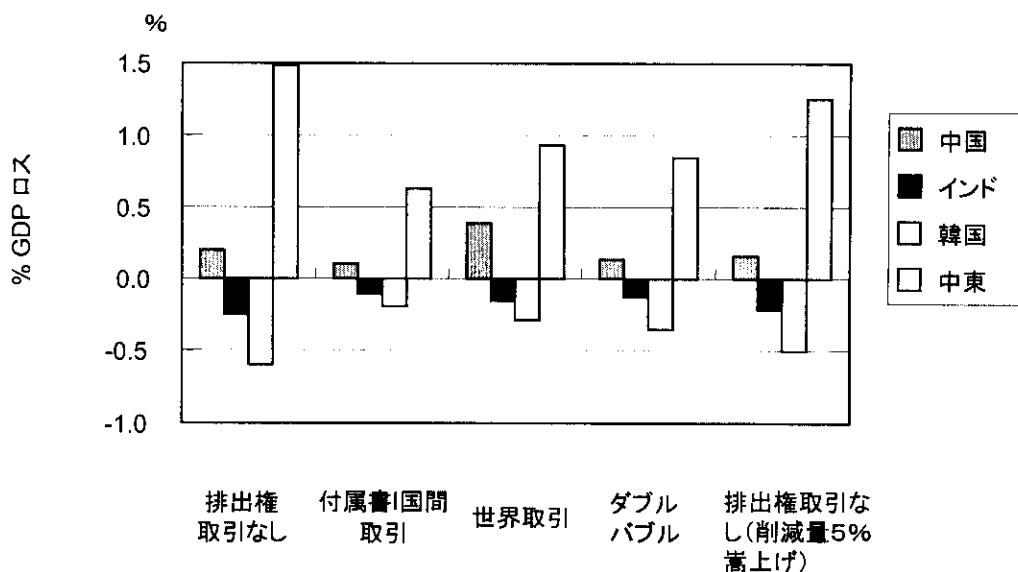


図 2.14 2010 年における途上国での GDP ロスの比較

本モデルを用いて、京都議定書に従って排出削減を行った場合の産油国及び発展途上国への影響を推計した。図 2.15 になりゆきシナリオと京都シナリオにおける 2010 年におけるエネルギー貿易量を示す。図 2.16(a) には、2010 年におけるエネルギー貿易量の変化量を金額ベースで示す。欧州から中国までは輸入量の変化量、ソ連から中東までは輸出量の変化量を示す。西欧、米国、日本の順で輸入量の減少量が大きい。中国、及びその他地域では、輸入量は増加している。中東における輸出量の減少が顕著である。図 2.16(b) は GDP の変化量の推計結果である。米国は炭素削減のための限界費用は比較的小さいが、GDP への影響は大きい。理由としては、米国では削減率が日本に比べて大きいこと、また、欧州は共同で削減を実施していることなどが上げられる。ヨーロッパ、中東、日本が米国に続いて GDP への影響が大きい。途上国への GDP への影響は国によってかなり違う。中国や、アフリカ、南アメリカでは GDP へ負の影響が現れているが、ダイナミックアジア及びインド等では GDP が増加している。中国は今後とも石炭への依存が大きいと推定され、国際石油価格の影響よりも、その他の財の貿易による影響の方が大きいと推定される。インドおよびダイナミックアジアなどについては、今後石油需要の増大が見込まれており、先進国の石油需要の減少の影響が GDP を上げる方向に作用している。

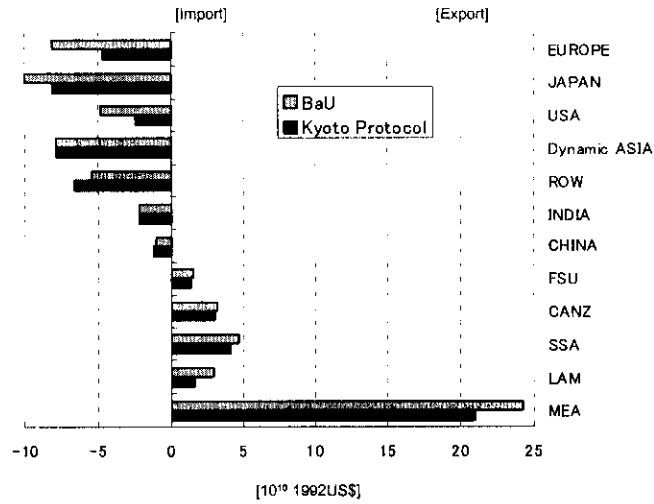


図 2.15 標準シナリオと京都シナリオにおけるエネルギー貿易量 (2010年)

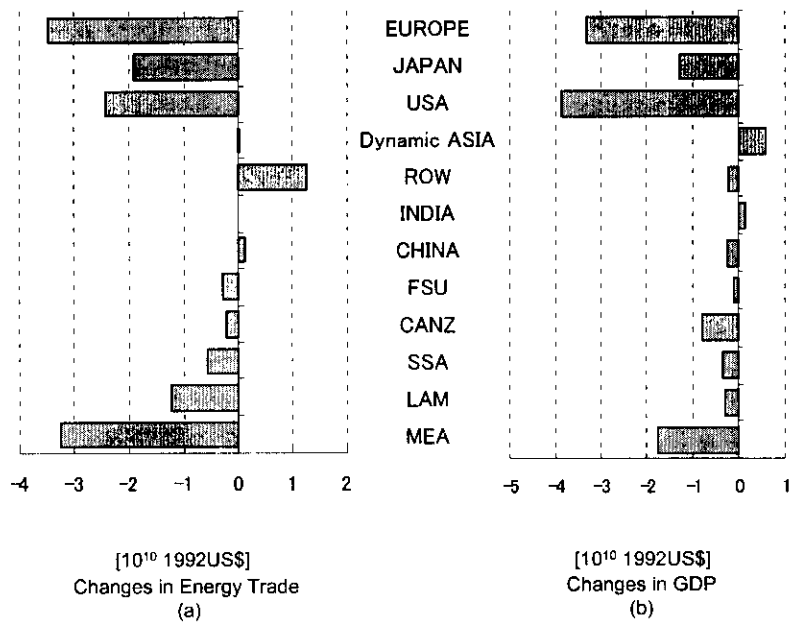


図 2.16 京都議定書を実施した場合のエネルギー貿易量及びGDPの変化 (2010年)

## 5. 普及版AIMモデルの開発


AIMエネルギー技術モデルは、経済的手段と個別対策技術との関係及び個別対策技術と二酸化炭素排出削減量との関係を明確にし、各種対策手段の組み合わせ効果の予測を行うことにより、温暖化防止のための具体的な施策展開に資することを目的としたものである。本モデルは主に国レベルの削減対策の効果分析に用いられてきたが、今後地域レベルでの詳細な削減計画を策定する上で、技術メニュー毎に二酸化炭素削減量が簡便に計算できるモデルの開発が必要とされている。また、これまで開発してきたAIMモデルは、エネルギー消費技術を詳細に記述し、エネルギー消費者の機器選択行動を市場メカニズムを通じて追跡するボトムアップ型の最適化モデルである。このため、コスト以外の削減要因による効果分析、特にライフスタイルの改善によるエネルギーサービス量の削減や、地域レベルでの詳細な対策メニューによる削減効果を簡便に推定することは困難であった。このため各種施策の二酸化炭素削減効果および温暖化による影響を検討するため、スプレッドシート型のインタフェースを持った普及版モデルを開発した。普及版AIMモデルは、大規模発生源を対象とした発生源別推計モデルと、最終需要部門の分析が簡便に行えるモデルとから構成される。

### 5.1. 発生源別推計モデル

本モデルは、二酸化炭素発生量を大規模発生源別のエネルギー消費量をベースとして推計するものである。将来のエネルギー消費量は産業部門の活動量の変化や大規模発生源における省エネルギー設備の置換のシナリオなどを想定し、温暖化対策を実施した場合の変化量を推計する。推計はピボットテーブルの形式で示され、ユーザーが自由な切り口で推計結果を分析することを可能にしている。また、市町村別に集計された排出量は地理情報システムを通じて地図上に表示される。

#### 5.1.1. 排出量の推計方法

本モデルでは2時点における排出量の推計を行う。一つは現状における排出量であり、もう一つは将来における排出量である。それぞれどの年を適用するかはユーザーにまかされている。ここでは、現状の推計を行う年を基準年（Base Year）、将来の推計を行う年を目標年（Target Year）と呼ぶ。

本モデルの初期画面を図 2.17 に示す。画面上部にある10個のボタンは、排出量を推計するために必要なデータを入力するためのものであり、画面中央にある3個の  は排出量を推計するプログラムを実行させるためのものである。また、画面下部にある9個のボタンは排出量の推計結果を表示させるためのボタンである。

本モデルでは二酸化炭素排出量や二酸化硫黄排出量を市町村毎に推計することができるが、推計結果から様々な分析を行うために、市町村分類を集約した地域分類を設定できる。その他、事業所ごとの属性、排出係数、炉別のエネルギー消費量、業種別活動量、事業所別活動量等を入力することにより、排出量の推計を行う。

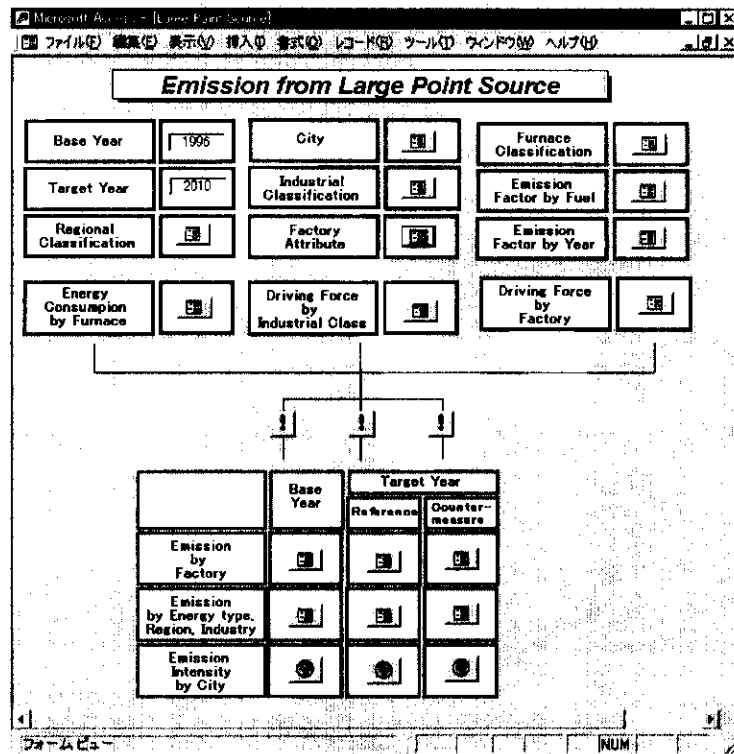


図 2.17 発生源別推計モデルの初期画面

### 5.1.2. 推計例

本モデルを走らせることにより、エネルギー消費量、二酸化炭素排出量、二酸化硫黄排出量を炉別ごとに求めることができる。また、エネルギー消費量や二酸化炭素排出量などの推計結果を色々な角度から分析できる。

市町村別排出量について地図上に表示できる。図 2.18 は愛知県における 2010 年の二酸化炭素排出量を推計したものである。

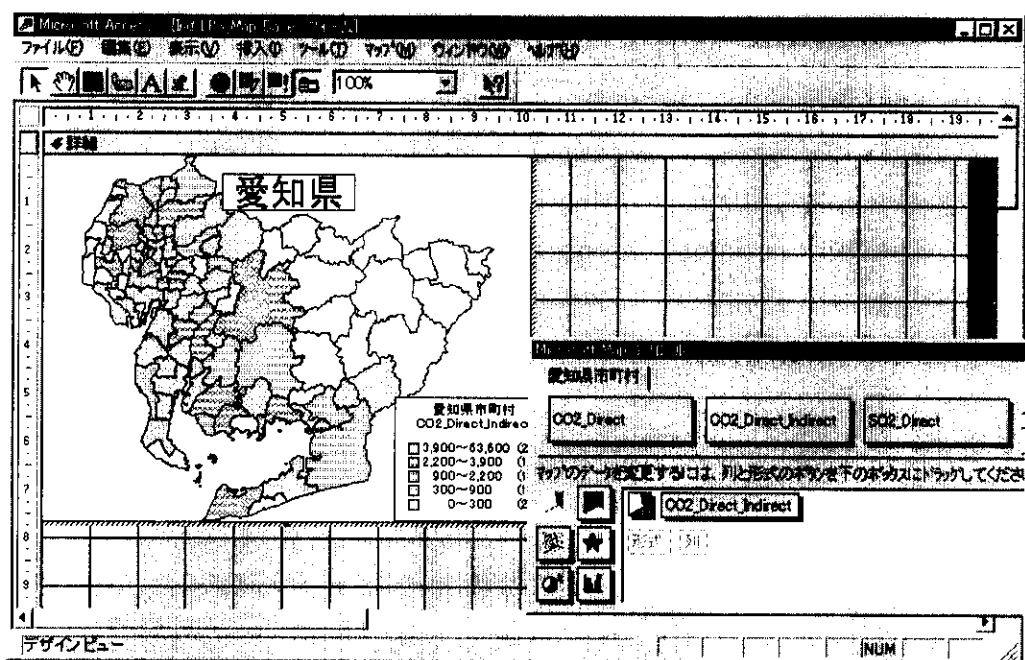


図 2.18 単位面積当たりの二酸化炭素の表示

## 5.2. 最終需要部門分析モデル (Mini-AIM)

図 2.19 に最終需要分析モデル (Mini-AIM) のメイン画面を示す。本モデルはエネルギー最終消費部門に焦点をあて、最終消費部門での細かい対策を行ったときの削減量を推計するものである。AIM エネルギー技術モデルの本体とは異なり、ヴィンテージを考慮した技術の代替の計算は行わない。即ち、導入費用を比較して安い技術の導入を決定するものではない。このため、将来の技術シェアを自動的に推計するためには AIM エネルギー技術モデルを使用する必要がある。

Mini-AIM では分析する年の技術シェアが予め与えられたとき (AIM エネルギー技術モデルで決定、シナリオとして入れるなど) をベースとして、個別対策を実施した場合の効果を対話的に検討するものである。このため、活動量、技術シェア、消費者の対策行動を変えてみた場合の分析が容易にできる。主な入力項目は、地域区分、活動量、エネルギーデータ、技術メニュー、保有率・稼働条件、地球温暖化対策メニュー、地球温暖化対策導入率である。

本モデルでは、異なる地域分割を設定し、それぞれの地域における排出量を推計できる。「活動量」のボタンをクリックすると、部門ごとの活動量を入力するためのテーブルが立ち上がり、活動量を入力できる。予め入力されている活動量は産業部門 (鉄鋼、セメント、石油化学、農林水産業などのボイラー用・直接加熱用・その他用の化石燃料消費量と動力用・その他用の電力消費量)、家庭部門 (世帯数)、業務部門 (業務用床面積)、運輸部門 (自家用旅客輸送、営業用貨物輸送など) であるが、独自に入力可能である。「エネルギーデータ」の項は、エネルギーの二酸化炭素排出係数やエネルギー価格を入力するものである。



図 2.19 最終需要部門分析モデルのメイン画面

図 2.20 に技術メニュー入力画面を示す。エネルギーサービス技術の緒元を入力するためのテーブルである。図 2.21 に削減対策メニューの入力画面を示す。サービス技術毎の保有率、使用頻度、使用状況、等のデータをもとに、温暖化対策によって、二酸化炭素排出量がどの程度変化するかを対話的に求めることができる。

番号	用途	エネルギーサービス技術	単位	消費	エネルギー消費量 (kWh/年)	CO <sub>2</sub> 排出量 (t/年)	CO <sub>2</sub> 排出量 (t/年)
20001	冷暖	エアコン(冷暖)	1台	2.85	電力	0.646617	0
20002	冷暖	エアコン(暖房)	1台	2.94	電力	0.819048	0
20003	暖房	石油ストーブ	1台	0.95	石油	2.634737	0.1
20004	暖房	石油ファンヒーター	1台	0.95	石油	2.634737	0.4
20005	暖房	石油ファンヒーター	1台	0.95	石油	2.634737	0.4
20006	暖房	IGファンヒーター	1台	0.95	都市ガス	2.634737	0.2
20007	暖房	IGファンヒーター	1台	0.95	都市ガス	2.634737	0.4
20008	暖房	LPGファンヒーター	1台	0.95	LPG	2.634737	0.2
20009	暖房	LPGファンヒーター	1台	0.95	LPG	2.634737	0.4
20010	給湯	電気給湯	1台	0.90	電力	26.62667	0
20011	給湯	石油給湯	1台	0.76	石油	32	8
20012	給湯	都市ガス給湯	1台	0.75	都市ガス	32	6

図 2.20 技術メニュー入力画面 (家庭部門)



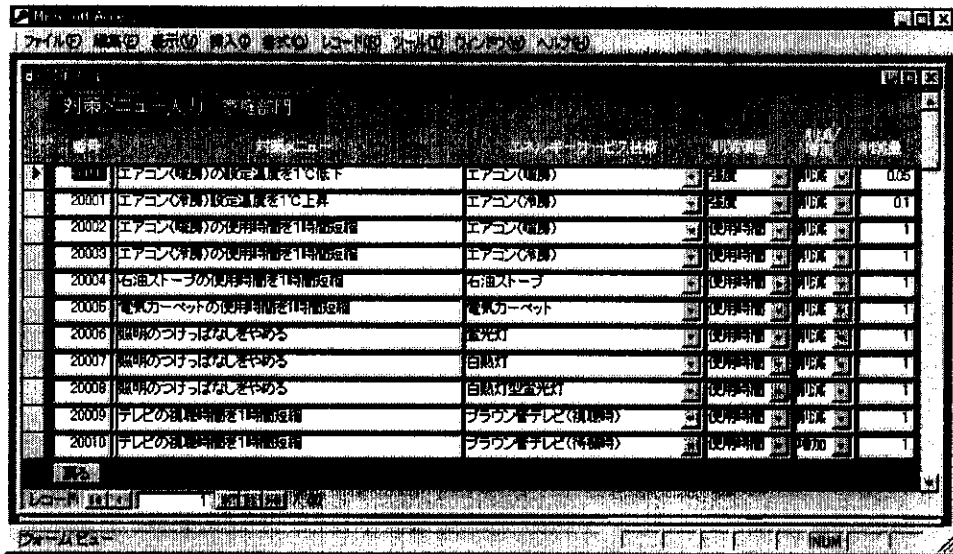


図 2.21 対策メニュー入力画面（家庭部門）

図 2.22 に推計結果表示画面を示す。図 2.23 に技術ごとのエネルギー消費量・二酸化炭素排出量の一部を示す。また、図 2.24 に家庭部門における用途別二酸化炭素排出量の表示例を示す。

このモデルの効果を確かめるため、日本国内の地方公共団体に適用するとともに、韓国に適用した。発展途上国における普及版としても、今後活用が期待されている。

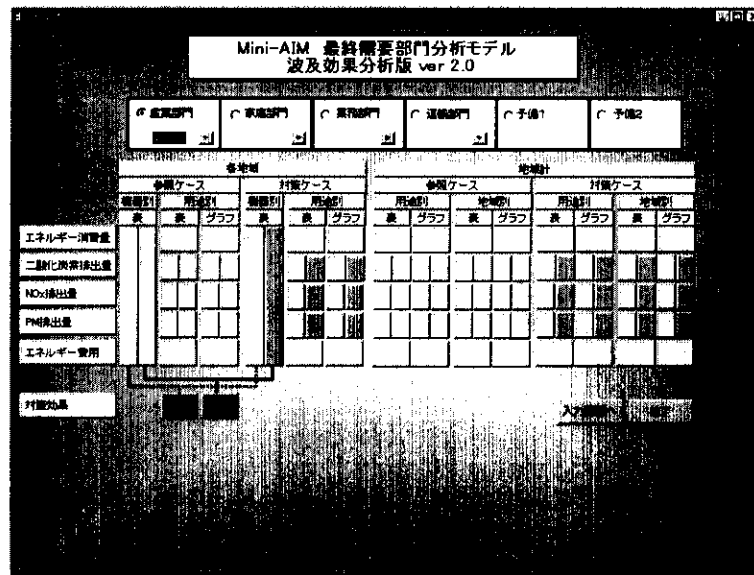


図 2.22 推計結果表示画面

執務別エネルギー消費量・二酸化炭素排出量・エネルギー消費内訳・電力内訳

参照データ: 家庭部門

項目	用途	消費品	消費量	単位	CO2排出量	単位	電力消費	単位	CO2排出量	単位	電力消費	単位	CO2排出量	単位	電力消費	単位	CO2排出量	単位
21001	生活	エアコン(冷暖)	13107910	電力	1533	1.5%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	44240	31.1%
21002	生活	エアコン(電熱)	2723660	電力	2420	2.6%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	69773	4.9%
21003	生活	LPガスファンヒータ	4991403	LPガス	13740	13.9%	939	22.7%	1	11.1%	0	0.0%	101678	7.1%	0	0.0%	101678	7.1%
21004	生活	石油ファンヒータ	2151105	石油	5949	6.0%	441	11.1%	1	9.5%	0	0.0%	27353	1.9%	0	0.0%	27353	1.9%
21005	生活	石油暖房器具	706280	石油	1950	2.0%	132	3.7%	0	3.1%	0	0.0%	6907	0.5%	0	0.0%	6907	0.5%
21006	生活	LPガスファンヒータ	1452487	都市ガス	4026	4.1%	235	5.7%	0	3.2%	0	0.0%	36648	2.7%	0	0.0%	36648	2.7%
21007	生活	LPガス暖房器具	4796301	都市ガス	1320	1.3%	77	1.9%	0	2.1%	0	0.0%	12674	0.9%	0	0.0%	12674	0.9%
21008	生活	LPガスファンヒータ	827626	LPガス	1726	1.7%	113	2.9%	0	1.4%	0	0.0%	12765	0.9%	0	0.0%	12765	0.9%
21009	生活	LPガス暖房器具	207235	LPガス	570	0.6%	39	0.9%	0	0.5%	0	0.0%	4221	0.3%	0	0.0%	4221	0.3%
21010	生活	電気給湯器	793414	電力	3661	3.6%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	111205	7.7%	0	0.0%	111205	7.7%
21011	生活	石油給湯器	1025780	石油	6224	6.3%	482	11.7%	2	15.9%	0	0.0%	26831	2.0%	0	0.0%	26831	2.0%
21012	生活	都市ガス給湯器	2255501	都市ガス	13174	13.3%	789	19.6%	2	26.2%	0	0.0%	126476	8.8%	0	0.0%	126476	8.8%
21013	生活	LPガス給湯器	2167595	LPガス	12660	12.8%	805	20.9%	3	27.4%	0	0.0%	93653	6.6%	0	0.0%	93653	6.6%
21014	生活	電気暖房器具(都市ガス給湯器)	0	都市ガス	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
21015	生活	電気暖房器具(LPガス給湯器)	0	LPガス	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
21016	生活	太陽熱温水器	532830	新工事業	3112	3.1%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
21017	生活	ソーラーシステム	41447	新工事業	242	0.2%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
21018	照明	LED	13808638	電力	2601	2.6%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	74902	5.2%	0	0.0%	74902	5.2%
21019	照明	省電力+センサー付き照明	0	電力	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
21020	照明	白熱灯	38943340	電力	2394	2.4%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	84505	5.9%	0	0.0%	84505	5.9%

図 2.23 技術エネルギー消費量・二酸化炭素排出量の表示画面

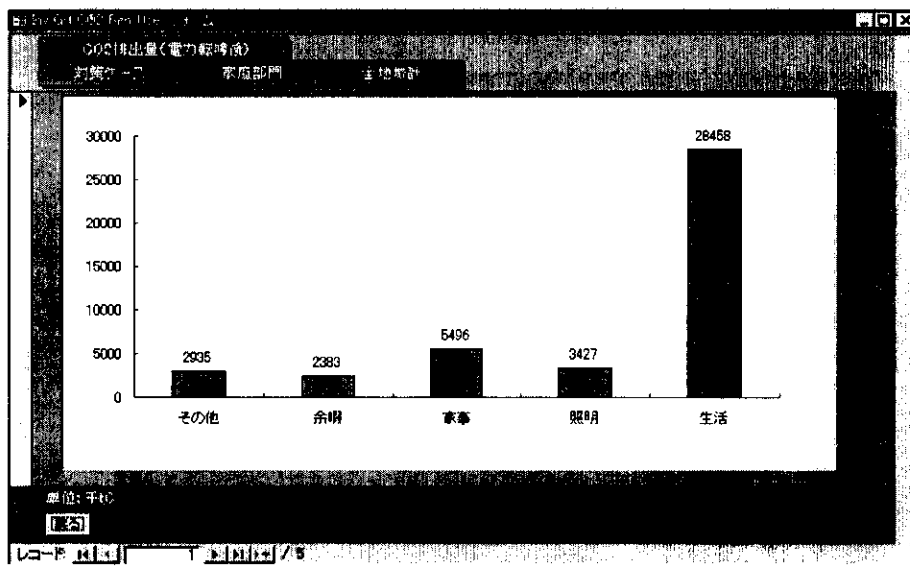


図 2.24 用途別二酸化炭素排出量

## 6. IPCC 新排出シナリオに対応した土地利用モデルの開発

IPCC では 1996 年から特別のプロジェクトチームを組織し、新しい排出シナリオの作成作業を進めてきた。長期排出シナリオの作成にあたっては、4つの社会経済発展のシナリオを想定した。西欧型経済発展シナリオ (A1)、経済ブロック化シナリオ (A2)、持続型発展シナリオ (B1)、及び環境重視型地域協調シナリオ (B2) である。A1 シナリオは、経済成長が今後も世界規模で続き、技術進歩も世界規模で広まるといったストーリーをもとに描かれたシナリオである。A2 シナリオは地域のブロック化が進み、技術の普及等も遅く、地域格差が広まるといったものである。B1 シナリオは、地球規模で環境問題の解決が図られるというシナリオであり、B2 シナリオは地域ごとに環境問題の解決が図られるというシナリオである。このシナリオ作成作業では、将来のエネルギー利用や工業プロセスだけではなく、土地利用変化に関するシナリオが求められ、エネルギー、工業プロセス及び土地利用から排出される二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、メタンガス(CH<sub>4</sub>)、亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)、二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)などの推計が必要となった。こうした背景のもと、国立環境研究所では、逐次均衡型一般均衡モデルをベースに土地利用を併せて評価するモデルを開発し、IPCC 新シナリオのストーリーラインに基づく土地利用変化とそれに伴う各種温室効果ガス排出量の推計を行ってきた。

本モデルの基本となる一般均衡モデルは、GTAP (Global Trade Analysis Project) で推計された世界規模のデータベースを参考に構築されている。GTAP データベース第 4 版では、1995 年を対象に、世界を 45 の地域、各国の経済活動を 50 の部門に分けて各データを推計しているが、ここでは表 2.3 に示すように、アジアの各国を中心に世界を 17 の国や地域に統合し、経済活動を 10 の部門に統合している。また、10 の経済部門にはもとの GTAP データベースにはない『バイオマスエネルギー供給部門』も含んでいる。

表 2.3 本モデルの地域、部門分割

地域区分*		部門区分**	
ANZ	オーストラリア・ニュージーランド	AGR	農業
JPN	日本	LVS	牧畜業
KOR	韓国	FRS	林業
IDN	インドネシア	FSH	水産業
MYS	マレーシア	MIN	鉱業
THA	タイ	DAR	酪農製品製造業
CHN	中国	FOD	食料品製造業
IDI	インドネシア	MAN	その他製造業
RAS	その他アジア	SER	サービス業
CAN	カナダ	BIO	バイオマスエネルギー生産
USA	米国		
LAM	ラテンアメリカ		
EUR	西ヨーロッパ		
FSU	旧ソ連・東ヨーロッパ		
MEA	中東		
AFR	アフリカ		
ROW	その他の地域		

\* オリジナルなGTAPデータベースは45地域である。

\*\* オリジナルなGTAPデータベースは50部門である。

各部門では図 2.25 に示すように資本、労働、土地、中間財を投入要素として財・サービスを産出するという生産構造を有する。このうち、資本、労働、土地は付加価値投入要素を構成する。投入要素間の代替弾力性は、バイオマスエネルギー部門 (BIO) を除いて 0.5 と仮定する。ただし、BIO では土地とその他の付加価値投入要素間の代替弾力性は 0 と仮定する。土地は BIO のほか、農業 (AGR)、林業 (FRS)、牧畜 (LVS) の各部門においてのみ利用可能であり、各土地面積を FAO が分類する農地、森林、牧草地とそれぞれ対応させる。バイオマスエネルギー農地の面積は、エネルギーモデルで計算されるバイオマスエネルギーを供給するのに必要な土地面積とする。バイオマスエネルギーの供給量は本来なら他のエネルギーとの価格競争を通じて市場で決定されるものであるが、ここではエネルギーモデルの結果から導かれるバイオマスエネルギー需要量を満たすように供給するものと仮定する。一方、各中間財は国内供給と輸入分に分けられ、輸入財は輸入国別に評価される。各中間財は統合されて中間財投入要素なる。付加価値投入要素と中間財投入要素が統合されて財が産出されるが、産出された財は国内需要と輸出に振り分けられる。このモデルをもとに、食肉需要の変化や貿易、技術進歩など、IPCC の新シナリオにあわせたシナリオを想定して、シミュレーションを実施し、土地利用変化とそれに伴うガスの排出量の推定を行った (図 2.26)。

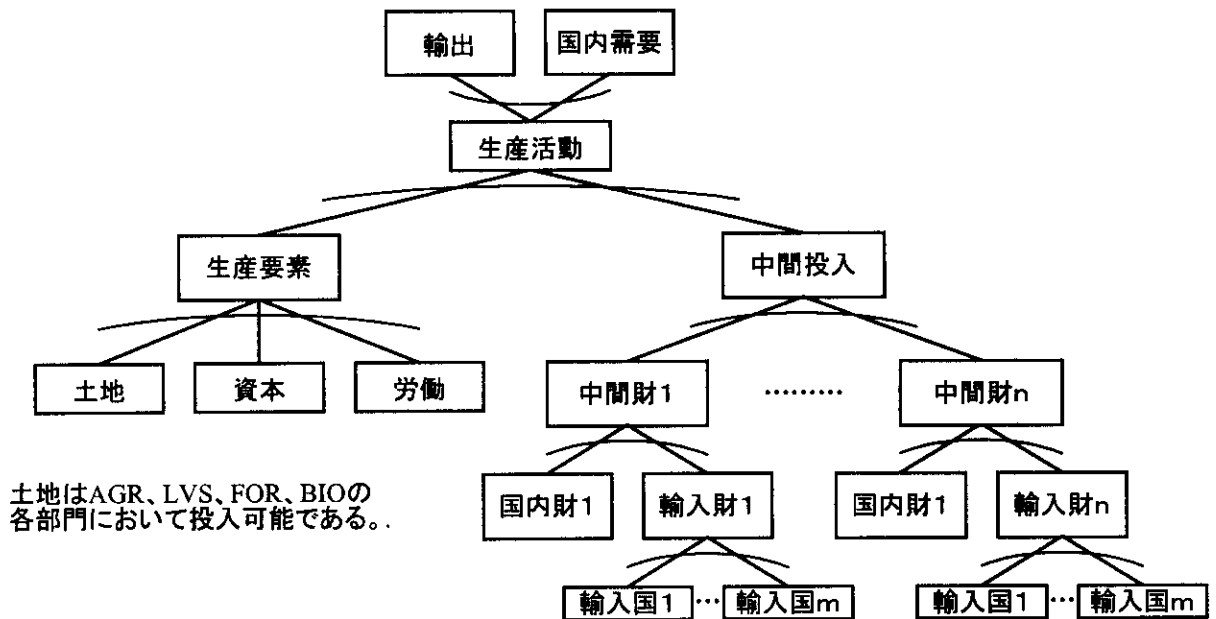


図 2.25 本モデルの生産構造

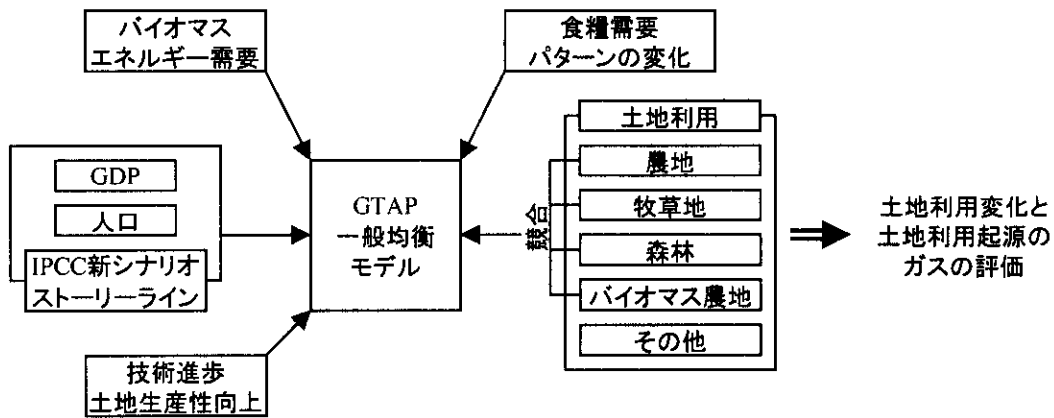


図 2.26 モデルの構成

本モデルで評価する温室効果ガスと関連ガスの排出量は表 2.4 の通りである。表 2.5 にガス排出量の計算方法を示す。森林起源の二酸化炭素等のガスの排出量は、伐採面積に比例して排出量を計算する。森林以外の起源のガスの排出量については、各土地利用面積に比例してガスが排出するとみなして計算する。排出原単位は、森林伐採による二酸化炭素の排出は森林等の吸収源問題に関するワーキング・グループ（1998 年）の『温室効果ガスの吸収源問題について（中間とりまとめ）』のデータを参考に想定し、その他のガスの排出量については地域別、土地利用別に 1990 年の排出実績に合致するように想定する。また、各土地の生産性の向上の想定は、表 2.6 に示すとおり想定する。

表 2.4 対象とするガスとそれらの 1990 年時点における排出量

ガス	発生源	発生量(1990年)	総排出量(1990年)*
CO <sub>2</sub>	森林伐採	0.88 GtC	6.99 GtC
	Total	0.88 GtC	
CH <sub>4</sub>	耕作	59.76 MtCH <sub>4</sub>	337.37 MtCH <sub>4</sub>
	サバンナ焼失	8.87 MtCH <sub>4</sub>	
	家畜腸内発酵	80.30 MtCH <sub>4</sub>	
	バイオマス焼却	15.15 MtCH <sub>4</sub>	
	農業廃棄物焼却	14.26 MtCH <sub>4</sub>	
	民生用バイオマス燃料	6.97 MtCH <sub>4</sub>	
	Total	185.31 MtCH <sub>4</sub>	
NO <sub>x</sub>	森林伐採	4.94 MtN	33.32 MtN
	サバンナ焼失	1.73 MtN	
	農業廃棄物焼却	1.35 MtN	
	民生用バイオマス燃料	2.27 MtN	
	Total	10.29 MtN	
CO	森林伐採	378.75 MtCO	1089.26 MtCO
	サバンナ焼失	221.67 MtCO	
	農業廃棄物焼却	51.94 MtCO	
	民生用バイオマス燃料	174.37 MtCO	
	Total	826.73 MtCO	
N <sub>2</sub> O	サバンナ焼失	0.11 MtN <sub>2</sub> O-N	6.95 MtN <sub>2</sub> O-N
	肥料管理	4.32 MtN <sub>2</sub> O-N	
	農業廃棄物焼却	0.08 MtN <sub>2</sub> O-N	
	森林焼失後	1.06 MtN <sub>2</sub> O-N	
	民生用バイオマス燃料	0.14 MtN <sub>2</sub> O-N	
Total	5.72 MtN <sub>2</sub> O-N		
SO <sub>x</sub>	森林伐採	1.30 MtS	70.60 MtS
	サバンナ焼失	0.76 MtS	
	農業廃棄物焼却	0.18 MtS	
	民生用バイオマス燃料	0.60 MtS	
	Total	2.84 MtS	

\* 総排出量は、エネルギー起源、工業起源の発生分も含めた値。

表 2.5 ガス排出量の計算方法

ガス	発生源	計算方法
CO <sub>2</sub>	森林伐採	[森林純伐採面積]*[排出原単位]
CH <sub>4</sub>	耕作	[耕地面積]*[排出原単位]
	家畜腸内発酵	[牧草地面積]*[排出原単位]
	バイオマス焼却	[森林伐採面積]*[排出原単位]
	農業廃棄物焼却	[耕地面積]*[排出原単位]
	民生用バイオマス燃料	[耕地面積]*[排出原単位]
NO <sub>x</sub>	森林伐採	[森林伐採面積]*[排出原単位]
	農業廃棄物焼却	[耕地面積]*[排出原単位]
	民生用バイオマス燃料	[耕地面積]*[排出原単位]
CO	森林伐採	[森林伐採面積]*[排出原単位]
	農業廃棄物焼却	[耕地面積]*[排出原単位]
	民生用バイオマス燃料	[耕地面積]*[排出原単位]
N <sub>2</sub> O	サバンナ焼失	[耕地面積]*[排出原単位]
	肥料管理	[耕地面積]*[排出原単位]
	農業廃棄物焼却	[耕地面積]*[排出原単位]
	森林焼失後	[森林伐採面積]*[排出原単位]
	民生用バイオマス燃料	[耕地面積]*[排出原単位]
SO <sub>x</sub>	森林伐採	[森林伐採面積]*[排出原単位]
	農業廃棄物焼却	[耕地面積]*[排出原単位]
	民生用バイオマス燃料	[耕地面積]*[排出原単位]

表 2.6 土地生産性向上の想定 (%/年)

		A1B	A2	B1	B2
耕地	先進国	1.5	1.5	2.0	1.0
	途上国	1.5	1.0	2.0	1.0
牧草地	先進国	1.5	1.5	2.0	1.0
	途上国	1.5	1.0	2.0	1.0
森林	先進国	0.5	0.5	1.0	0.5
	途上国	0.5	0.3	1.0	0.5
バイオマス農地	先進国	0.5	0.5	1.0	0.5
	途上国	0.5	0.3	1.0	0.5

以上のモデルとシナリオから、図 2.27、図 2.28、図 2.29 に示すような土地利用、二酸化炭素排出量の各推移を得た。森林面積は各シナリオとも 21 世紀前半に増加する傾向を示すが、環境保全と経済発展の両立を図るシナリオ B1、B2 においてより多くの森林面積が回復する傾向を示す。食肉需要の増大は、牧草地の面積を拡大させる要因となるが、土地生産性の向上や人口増加の緩和がこうした圧力を低減させる（シナリオ A1）。逆に、シナリオ A2 のように人口増加の圧力が高いシナリオでは、農地の拡大が必要となる。アジアに焦点を当てると、世界全体と比較してやや早い速度で森林の再生、拡大が行われ、植林面積の速度も世界全体と比較して高いことが明らかとなった。

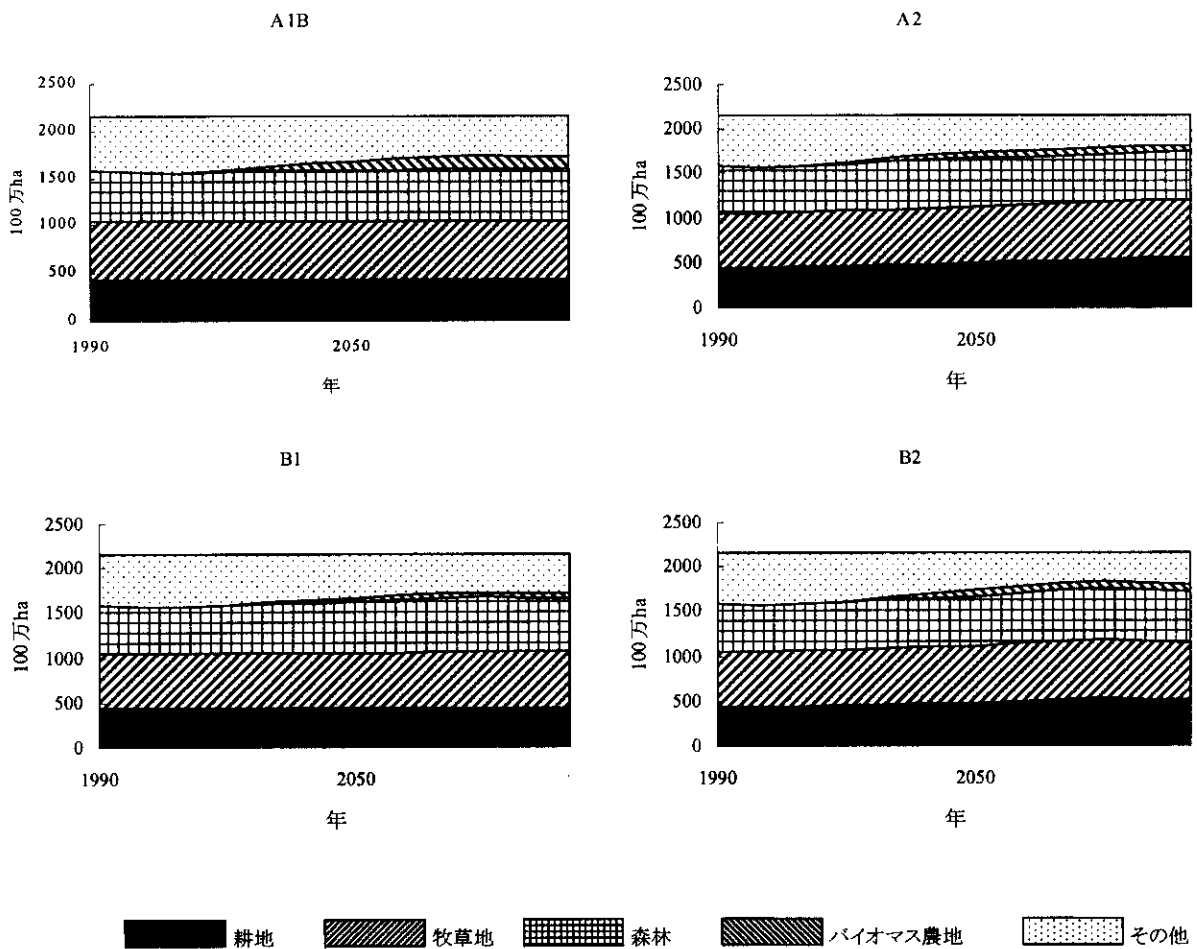


図 2.27 シナリオ別の土地利用変化（アジア）

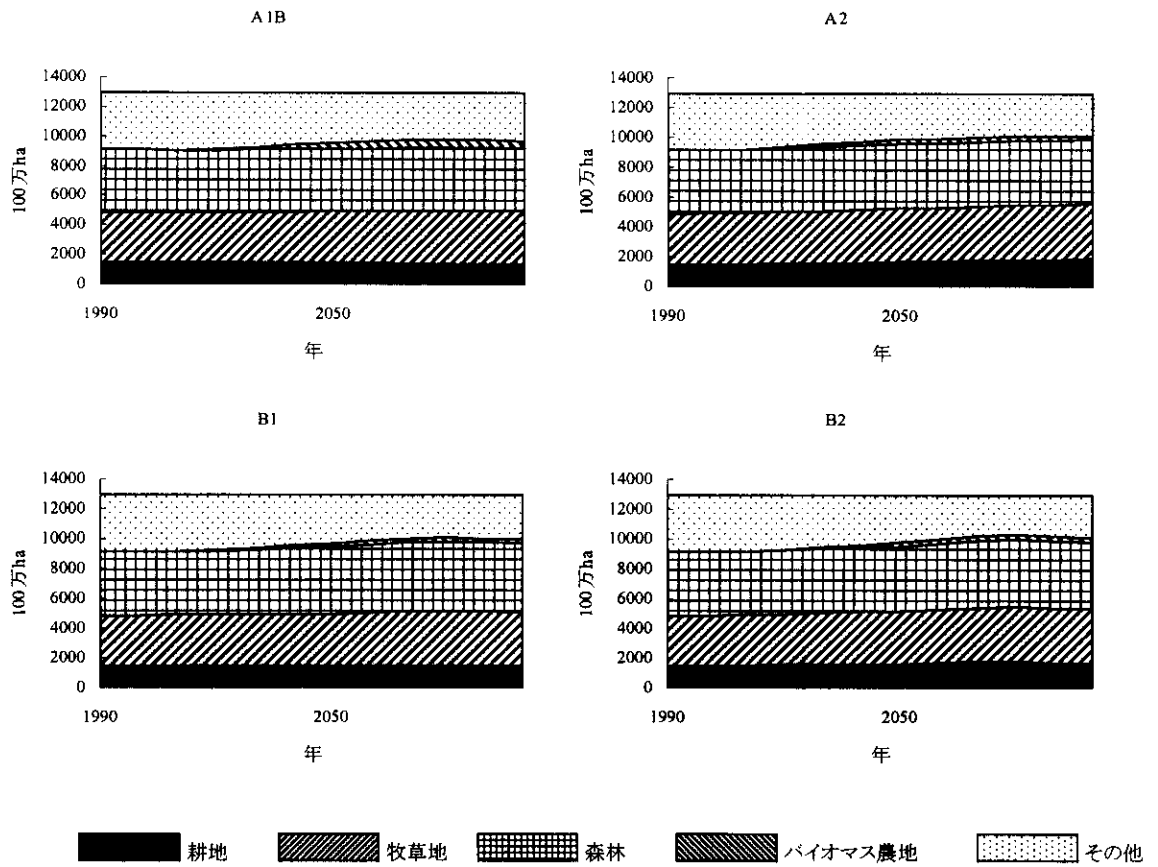


図 2.28 シナリオ別の土地利用変化（世界全体）

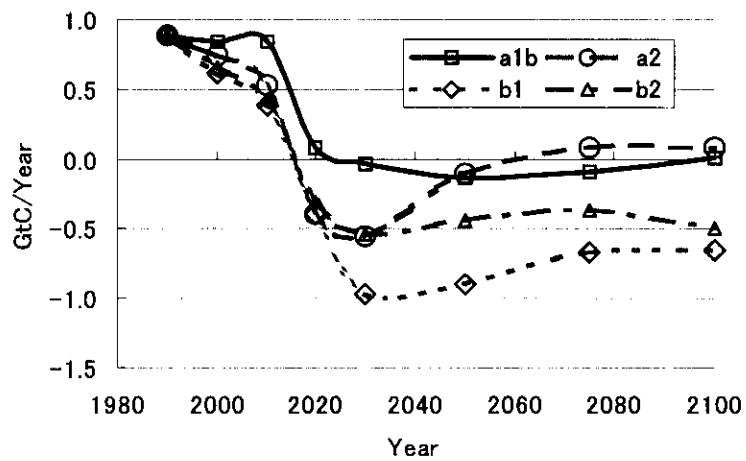


図 2.29 土地利用変化による二酸化炭素排出量の推移（世界全体）



## 7. 気候変動の簡易推計モデルの開発

人間活動に伴う温室効果ガスの排出は、今後数百年の地球の気候に大きな影響を及ぼす。ガス濃度の変化は放射強制力を発生し、複雑なメカニズムを通じて気候変動を引き起こす。こうした因果関係を模試する方法として大循環モデル（GCM）が開発されているが、この方法は、極めて過重な計算労力を必要とすること、広範囲な分野に跨り日々報告されている関連事象や推測を取り込み評価するには重厚過ぎ、より簡易なかつ鳥瞰性に富む方法が望まれること、などの欠点をもつ。このため、① 今までに提唱されている種々の温室効果ガス排出シナリオと組み合わせることによって、21世紀における気候変動の見通しを得ること、② 今後、数百年を対象として、気候安定化に到達する温室効果ガス排出経路を探索し、それらの21世紀中の経路範囲はどのようなものかを明らかにすることを目的とし、種々の設定条件下の気候変化を簡易に算定するためのモデルを開発した。

モデルは図 2.30 に示すように、1)炭素循環に関するモジュール、2)メタン、亜酸化窒素及びハロカーボン類の大気濃度に関するモジュール、3)放射強制力に関するモジュール、4)気温推計に関するモジュール及び5)海水位推計に関するモジュール、から成り立っており、これらのモジュール毎に、既往の知見及び観測報告などと整合性ある挙動を示すモデルの開発に努めた。

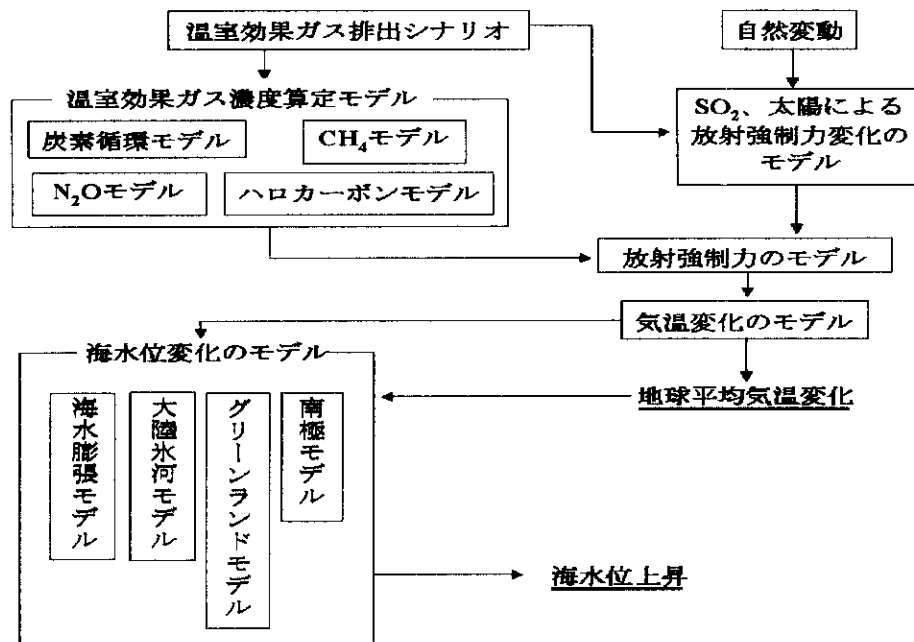


図 2.30 気候変動簡易推計モデルの概要

### 7.1. 1990年～2100年の気候変動

簡易推計モデルを用い現在までに報告・公表されている259種の温室効果ガス排出シナリオに基づいた21世紀中の地球平均気温及び海水位の変化量推計を行った。

気温上昇は、全シナリオにて2100年時点で0.9～4.6℃（中位値：2.4℃）、海面上昇は29.7～73.2cm（中位値：48.0cm）であった。政策介入ケースではこの範囲が下方側に絞られ、気温上昇で0.9～2.5℃（中位値：1.8℃）、海面上昇で29.7～50.5cm（中位値：41.3cm）となっている（表2.7）。図2.31及び図2.32はこれらの変化を図示したものである。

21世紀中における気候変動に関する推計の多くは、IPCCにより策定された2つのシナリオ群に基づいて行われたものが多い。1995年に公表された第二次評価報告書（IPCC、1996）では排出シナリオIS92aと中位的な気候パラメータを入力とした簡易気候モデル計算の結果が紹介され、2100年での気温上昇の中位値としては2.1℃、海面上昇では49cmが、高位値としては高位排出シナリオIS92eと高位の気候パラメータを組み合わせた4.5℃と94cm、低位値としては、低位シナリオIS92cと低位パラメータを組み合わせた0.8℃と13cmとしている。一方、第3次評価報告書には排出シナリオ特別報告書（SRES）に基づく排出シナリオがベースとされ、現在、この排出シナリオに基づいた気候変化推計の報告も公表されつつある。表2.8は、このSRESの4排出シナリオ下の計算諸量を本モデルの推計結果とともに記したものである。表中の参考値はSRES排出シナリオをもとにしてIPCC事務局によって試算的に行われた推計値であり、本計算ともほぼ一致しているが、これらと比べ本計算では二酸化炭素濃度では10ppmv程度小さくなっている。また、図2.33及び図2.34は本モデルにて採用した中位値的なパラメータである $\Delta T_{2\times CO_2} = 2.5^\circ\text{C}$ 及び海水位変化の推計に用いたパラメータの標準値を用いて算定した中位的な推計に加え、 $\Delta T_{2\times CO_2} = 1.5^\circ\text{C}$ 及び海水位パラメータの低位値の組み合わせによる低位的な推計、 $\Delta T_{2\times CO_2} = 4.5^\circ\text{C}$ 及び海水位パラメータの高位値の組み合わせによる高位的な推計を組み合わせた推定幅を示したものである。これらの推計によれば2050年には0.8℃～2.1℃、6cm～45cmの上昇、2100年には1.3℃～4.7℃、13cm～97cmの上昇を示した。

図2.35は1990年及びA1、A2、B1、B2シナリオによる2100年時点の要因別放射強制力を示したものである。1990年時点の放射強制力発生の主要な要因は温室効果ガス、硫酸エアロゾル、対流圏オゾン変化であり、硫酸エアロゾルの冷却効果は加熱効果の40%程度にも及んでいるが、2100年時点には温室効果は2.1～3.8倍になる一方、冷却効果は50～75%と減少している。

表 2.7 計算に使用した排出シナリオの諸統計 (1990年～2100年)

年	全シナリオ(シナリオ数:259)					介入シナリオ(シナリオ数:89)					非介入シナリオ(シナリオ数:123)				
	中位値	最小値	25%値	75%値	最大値	中位値	最小値	25%値	75%値	最大値	中位値	最小値	25%値	75%値	最大値
<b>CO<sub>2</sub>排出量、GtC y<sup>-1</sup></b>															
1990	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3
2050	12.1	2.0	9.2	15.2	36.3	9.5	2.8	6.1	11.0	18.0	14.4	3.0	12.0	16.3	36.3
2100	17.6	-1.1	6.6	23.0	57.2	6.8	-1.1	5.6	17.5	28.1	21.9	0.6	16.1	28.1	57.2
<b>CH<sub>4</sub>排出量、TgCH<sub>4</sub> y<sup>-1</sup></b>															
1990	572.0	572.0	572.0	572.0	572.0	572.0	572.0	572.0	572.0	572.0	572.0	572.0	572.0	572.0	572.0
2050	789.0	653.4	695.0	872.0	1002.9	695.0	653.4	695.0	789.0	872.0	872.0	693.9	765.0	872.0	1002.9
2100	759.0	552.0	630.0	1164.0	1322.1	630.0	552.0	630.0	759.0	1164.0	1037.4	552.0	630.0	1164.0	1322.1
<b>N<sub>2</sub>O排出量、TgN y<sup>-1</sup></b>															
1990	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5
2050	19.1	16.2	17.0	22.0	24.3	19.1	16.2	19.1	19.1	22.2	21.3	16.2	17.0	22.0	24.3
2100	18.2	15.1	15.3	26.6	28.0	18.2	15.1	18.2	18.2	26.6	22.5	15.1	15.3	26.6	28.0
<b>SO<sub>2</sub>排出量、TgS y<sup>-1</sup></b>															
1990	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6
2050	57.2	27.0	51.4	105.4	200.6	51.4	27.0	51.4	57.2	105.4	102.6	51.4	64.3	105.4	200.6
2100	47.3	6.0	28.6	60.3	278.1	28.6	6.0	28.6	47.3	72.6	60.3	11.5	28.6	60.3	278.1
<b>CO<sub>2</sub>濃度、ppmv</b>															
1990	354.9	354.9	354.9	354.9	354.9	354.9	354.9	354.9	354.9	354.9	354.9	354.9	354.9	354.9	354.9
2050	486.1	408.4	461.1	507.6	663.0	464.5	410.7	431.4	474.4	527.4	498.9	408.4	481.0	515.5	663.0
2100	638.6	377.1	524.6	731.0	1452.8	526.7	377.1	469.1	623.6	814.7	709.6	413.4	644.3	788.1	1452.8
<b>CH<sub>4</sub>濃度、ppbv</b>															
1990	1694.0	1694.0	1694.0	1694.0	1694.0	1694.0	1694.0	1694.0	1694.0	1694.0	1694.0	1694.0	1694.0	1694.0	1694.0
2050	2668.1	2205.3	2247.1	2855.7	3498.1	2247.1	2205.3	2247.1	2668.1	2937.7	2855.7	2247.1	2668.1	2855.7	3498.1
2100	2707.4	1876.2	2210.9	4308.4	5100.8	2210.9	1876.2	2210.9	2707.4	4308.4	3872.9	1911.0	2210.9	4308.4	5100.8
<b>N<sub>2</sub>O濃度、ppbv</b>															
1990	310.0	310.0	310.0	310.0	310.0	310.0	310.0	310.0	310.0	310.0	310.0	310.0	310.0	310.0	310.0
2050	366.1	353.9	358.8	380.8	396.3	366.1	353.9	366.1	366.1	388.3	379.8	353.9	358.8	380.8	396.3
2100	400.6	366.3	371.4	459.6	485.8	400.6	366.3	400.6	400.6	459.6	435.1	366.3	371.4	459.6	485.8
<b>気温上昇、C</b>															
1990	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2050	1.3	0.9	1.2	1.4	1.8	1.2	0.9	1.1	1.3	1.5	1.3	0.9	1.2	1.4	1.8
2100	2.4	0.9	2.0	2.9	4.6	2.0	0.9	1.7	2.4	3.2	2.7	1.4	2.4	3.1	4.6
<b>海水位上昇、cm</b>															
1990	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2050	22.8	19.4	21.8	23.4	28.3	22.8	19.4	21.4	23.2	24.8	22.4	19.5	21.7	23.3	28.3
2100	48.0	29.7	43.6	52.4	73.2	43.7	29.7	39.8	47.3	56.5	51.3	35.3	47.4	54.8	73.2
<b>放射強制力、Wm<sup>-2</sup></b>															
1990	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
2050	3.8	2.8	3.6	4.1	5.3	3.7	2.8	3.4	3.8	4.3	3.9	3.0	3.7	4.1	5.3
2100	6.0	2.5	4.8	7.3	11.0	4.9	2.5	4.3	5.8	8.0	6.5	3.6	6.0	7.7	11.0
<b>累積CO<sub>2</sub>排出量、GtC</b>															
1990	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2050	626.8	371.0	548.4	698.9	1175.5	556.3	375.8	447.9	590.2	764.0	668.8	371.0	612.4	722.8	1175.5
2100	1326.5	385.5	976.9	1638.1	3626.3	980.0	385.5	736.4	1295.9	1901.8	1554.5	517.5	1366.6	1821.5	3626.3

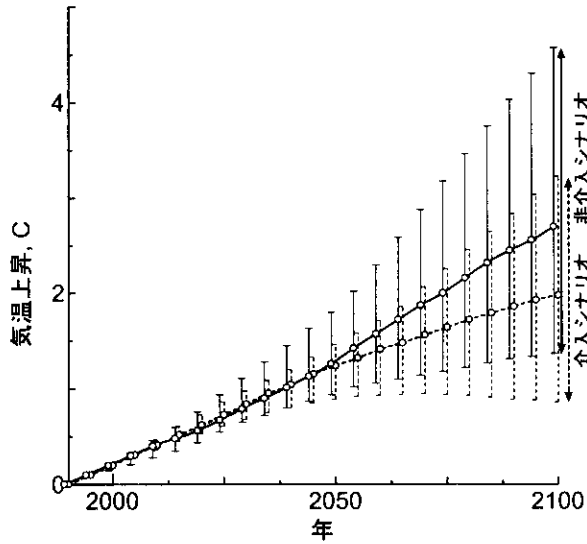


図 2.31 気温の変化

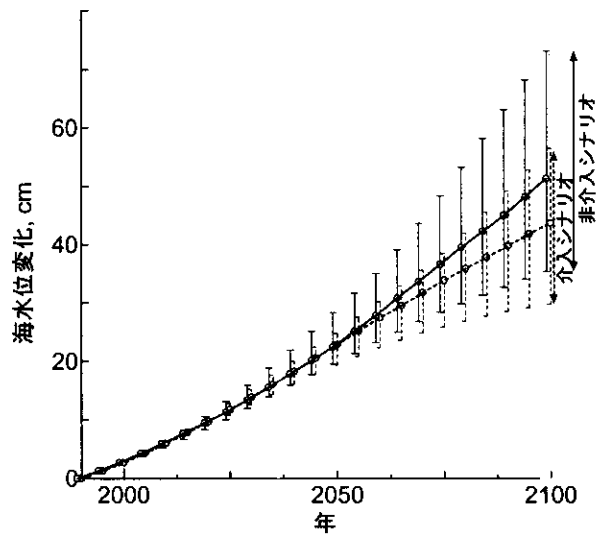


図 2.32 海水位の変化

表 2.8 2050年、2100年におけるSRES マーカーシナリオによる排出時の推計

計算年	A1		A2		B1		B2	
	本計算	参考値	本計算	参考値	本計算	参考値	本計算	参考値
CO <sub>2</sub> 濃度、ppmv								
2050	524	529	522	527	460	464	473	477
2100	671	684	803	819	547	556	594	604
CH <sub>4</sub> 濃度、ppbv								
2050	2693	2701	2856	2836	2247	2244	2668	2665
2100	1911	1934	4308	4297	2211	2230	2707	2720
N <sub>2</sub> O濃度								
2050	359	357	381	378	366	364	354	352
2100	371	369	460	455	401	397	366	364
気温上昇、C								
2050	1.5	1.3	1.3	1.2	1.2	1.1	1.3	1.2
2100	2.6	2.4	3.2	2.9	2.1	1.9	2.2	2.0
海水位上昇、cm								
2050	24	23	23	20	22	21	23	21
2100	52	55	56	59	44	46	47	49

参考値：ガス濃度は、IPCC WGI 事務局による ([http://www.met-office.gov.uk/sec5/CR\\_div/ipcc/wg1](http://www.met-office.gov.uk/sec5/CR_div/ipcc/wg1))。気温上昇及び海水位上昇は、IPCC data distribution centreによる ([http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/cru\\_data/examine/emissions/SRES98.html](http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/cru_data/examine/emissions/SRES98.html))。

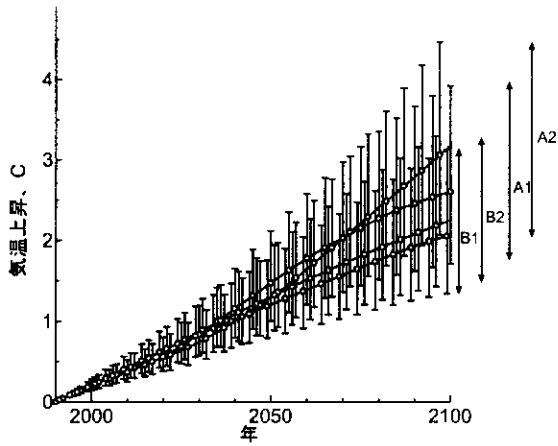


図 2.33 SRES シナリオに基づく  
21 世紀中の気温変化

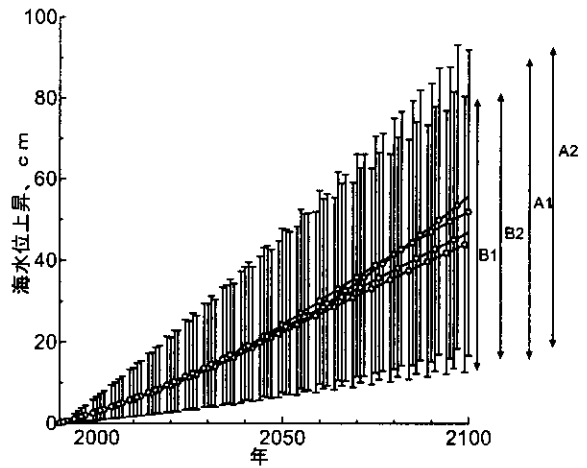


図 2.34 SRES シナリオに基づく  
21 世紀中の海水位変化

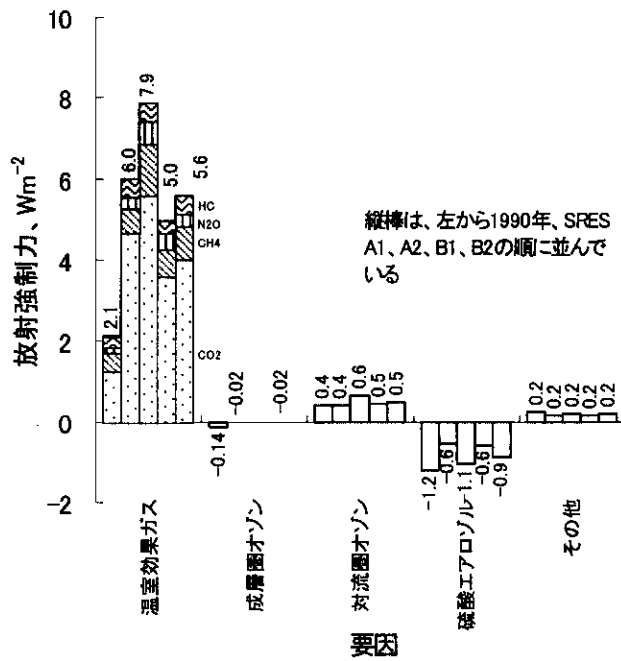


図 2.35 発生要因別の放射強制力

## 7.2. 気候安定化から見た 21 世紀中の排出量

可能な排出量変化速度及び最小排出量の範囲によって排出経路範囲は変化するが、図 2.36 は、排出量変化速度が  $0.15\text{GtC}/\text{year}^2$  以下の排出シナリオの 1990 年～2050 年の累積排出量範囲を描いたものである。併記している階段曲線は、安定化目標に達し得なかったシナリオを含めたシナリオ群の同期間の累積排出量の累積頻度を描いたものであり、実線は全シナリオ、点線は介入シナリオを示す。

図 2.36 から 23 世紀の 450 ppmv 安定化あるいは海水位安定化に到達したシナリオは 2050 年には累積排出量  $867\text{GtC}/\text{year}$  以下となっており、この条件を満たすシナリオは全シナリオ中 15%、介入シナリオではほぼ 30% 存在したことがわかる。1.5℃安定化目標ではこれらの割合は、全シナリオ中約 20%、介入シナリオ中では 40% となり、2.0℃安定化目標となると全シナリオ中 50%、介入シナリオ中 80% となる。

図 2.37 は 2100 年時点の累積排出量範囲を描いたものである。450 ppmv 目標及び海水位安定化の場合、全シナリオあるいは介入シナリオで 10% 弱が累積排出量  $1389\text{GtC}$  以下のものであり、1.5℃安定化目標及び 2.0℃安定化目標のとき介入シナリオでそれぞれ 30% 及び 50% のものが累積排出量の目標以下のものであった。

SRES シナリオ (IPCC, 1999) は非介入シナリオの典型例として IPCC により作成されたものであるが、累積排出量は A1、A2、B1 及び B2 のマーカーシナリオで 2050 年に  $940\sim 1178\text{GtC}$ 、2100 年にて  $1782\sim 2780\text{GtC}$  の範囲にある。経済指向社会シナリオである A シナリオでは 2050 年時点にて既に 2.0℃安定化目標の範囲外となっているが、環境指向社会シナリオである B シナリオでは 2.0℃安定化目標の範囲内である。しかし、2100 年時点にはいずれのシナリオでもこの安定化目標範囲から外れてしまうことになる。但し、2100 年以降の排出量変化速度に制限を考慮しない場合には、安定化を果たす軌跡の累積排出量は  $2100\text{GtC}$  程度であるから、B シナリオでも依然として 2℃ 安定化の可能性をもつことになる。

これらのことより、23 世紀の気候安定化について、海水位安定化のためには 450ppmv 安定化目標とほぼ同じ厳しきの削減を行わなければならないが、現在までに提案されている政策介入シナリオ排出量の大部分もこれを満足できないが、1.5℃あるいは 2.0℃目標についてはある程度可能な範囲であることがわかる。

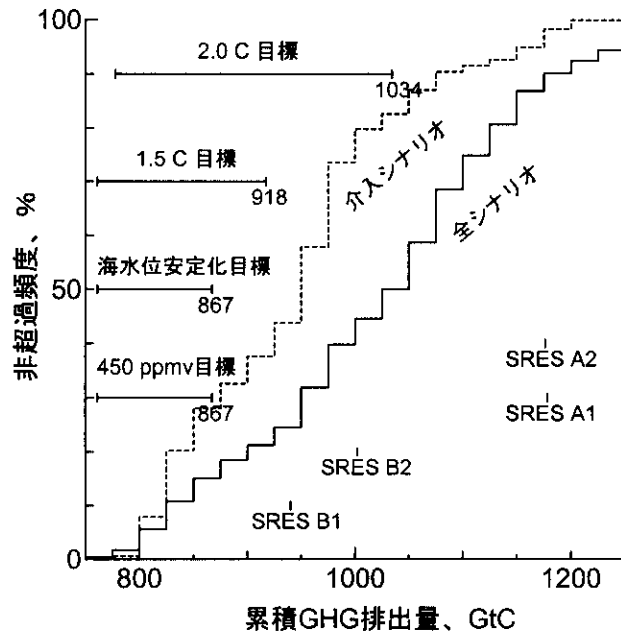


図 2.36 23 世紀における気候安定化が可能な排出経路の 2050 年排出量範囲

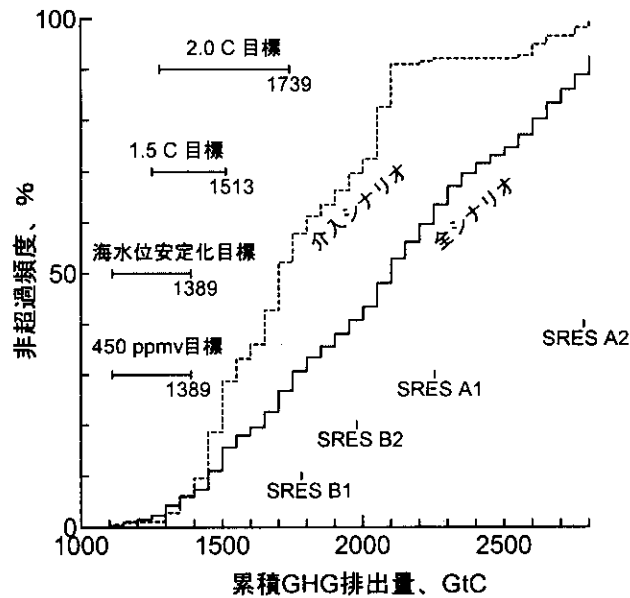


図 2.37 23 世紀における気候安定化が可能な排出経路の 2100 年排出量範囲

## 8. 自然植生影響モデルの開発

地球温暖化は、水資源の変化、自然植生の変化、健康被害、自然災害、農林水産業への影響、海面の上昇等を引き起こし、世界の社会経済に多大な影響を及ぼすと予測されているが、その影響についてはさまざまな分野で研究が進められつつあるものの、依然として不確実性が大きく、問題の解決を遅らせる主要原因となっている。これまでの AIM のモデル開発に関する研究において、水資源の変化、穀物の生産性の変化、マラリアの危険性の変化等を推定してきた。

ここでは、自然植生への影響モデルについて、温暖化のスピードと自然植生の適応可能性との関係に焦点をあてたシミュレーション・モデルを開発した。地球温暖化により自然植生はどの程度の被害を受け、またどの程度まで気候の変化に適応できるのかといった問題、また、自然植生への被害が気候システムへフィードバックすることにより、さらに地球温暖化を加速させることはないのかといった問題は、巨大かつ複雑であるために定量化が難しく、その問題の重要性に反して十分な研究が行われてこなかった。

例えば、IPCC の第 2 次報告書によると、地球温暖化による自然植生への影響については、二酸化炭素濃度が現在の 2 倍になった時点での気温と降水量の変化を大循環モデル (GCM) を用いて推計し、その結果から現存する世界の森林地帯の 3 分の 1 で自然植生に変化が起これると予想されている<sup>2)</sup>。しかし、このような平衡状態での予測では、気候変動に対する自然植生の動的な変化 (気候への適応性) を考慮していないために、自然植生が受ける被害についての予測が十分にされていない。自然植生の動的な変化に関しては、地域レベルでは予測モデルが開発されているが、現在のところ、地球全体の変化の予測に応用するまでには至っていない。

また、地球温暖化による地球規模で自然植生が提供してくれる剤やサービスがどのように変化するかについては、自然植生がもたらしてくれる全てのサービス機能を評価すること自体が困難であり、その変化の予測は、特定の地域内における特定のサービスの変化についての予測にとどまっている。

さらに、地球温暖化により自然植生が被害を受けることによって、気候システムにどのようなフィードバック効果を引き起こすかについては、どの程度の炭素量が大気中に放出されるかについてさえも合意が得られておらず、既存の研究では不十分である。

このような背景から、地球温暖化により自然植生、特に森林植生が受ける影響とそのフィードバック効果のモデル化を試みた。

IPCC の第 2 次報告書によると、今後 100 年間に地球の平均気温が 1℃から 3.4℃上昇する場合、等温線 (気候帯) は局方向へ約 150~550km 移動すると予測されている。これに対し木本植物の移動速度は、過去の気候変動における研究から 100 年間に 4~200km と推定される (表 2.9) ため、移動速度の遅い植物ほど気候帯の移動についていけずに、気候帯の変化にさらされて絶滅の可能性が高くなると考えられている。

また、完新世に起こった気候変動に関する研究から、植生の分散速度は移動ルートが山岳地帯であれ低地であれ大差なく、種子の散乱が風による場合も動物による場合も似たような速度で拡大することが知られている。そして植生の移動速度は分散能力よりもむしろ再生できる場所があるかどうかといった要因に大きく影響されると考えられている。

以上のことから、地球温暖化による森林植生への影響について、植生の移動速度 (0~2.0km/yr)



と植生の再生可能な気候区が存在するかどうかの2点に着目し、モデルを構築した。

図 2.38 に 2100 年までに約 2℃ 上昇し、森林が 1 km/yr の速度で移動した場合の森林の成長および損壊の地理的分布を示す。2100 年の気候区の予測にはカナダ気候センターの GCM の結果を利用した。この図からユーラシア大陸北部と北米大陸において、亜寒帯林および冷温帯林が大陸を横切って帯状に損壊することが見られる。また、インド北部よ南米大陸、アフリカ大陸においては浮島状に熱帯林が損壊することが確認された。損壊面積を図 2.39 に示す。横軸は植生の移動可能距離平均であり、全く移動できないと仮定した場合から、2.0km/yr 移動可能とした場合に、気温が 2100 年において、0.85℃ (低位推計)、2.0℃ (中位推計)、3.5℃ (高位推計) 変化すると想定した場合の損壊面積が示されている。森林が推定平均移動速度 (0.1~0.45km/yr) で移動し、110 年間に均一の割合で損壊すると仮定すると、森林全体の年間損壊面積は 3.99~19.06Mha となり、これは熱帯林で行われている人為的伐採 (1980-1990 年平均で 17Mha/yr) の 23~112% に相当する (但し、自然損壊と人為的伐採の重複地域については考慮していなし)。また 110 年間を通してみると低位シナリオでは全森林面積の 9%、中位シナリオでは 26%、高位シナリオでは 43% が損壊することが予測され、地球の平均気温の上昇にともない森林の損壊面積が急激に増大することが示された。

表 2.9 木本植物の移動可能速度<sup>2)</sup>

種	移動速度(m/年)
モミ・シラビソ	40~300
ハンノキ・ヤシャブシ	500~2000
クリ・ブナ	200~300
クルミ	400
エゾマツ・トウヒ	80~500
マツ	1500
カシワ・コナラ	75~500
ニレ	100~1000
気候帯の移動速度	1500~5500

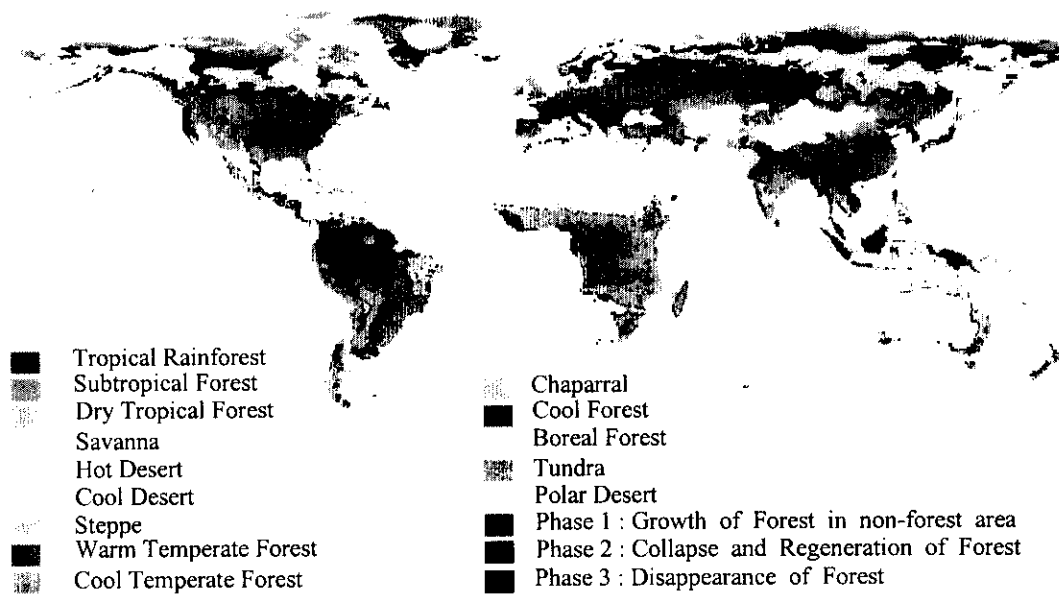


図 2.38 生態系の変化 (2100 年において 2℃ 上昇)

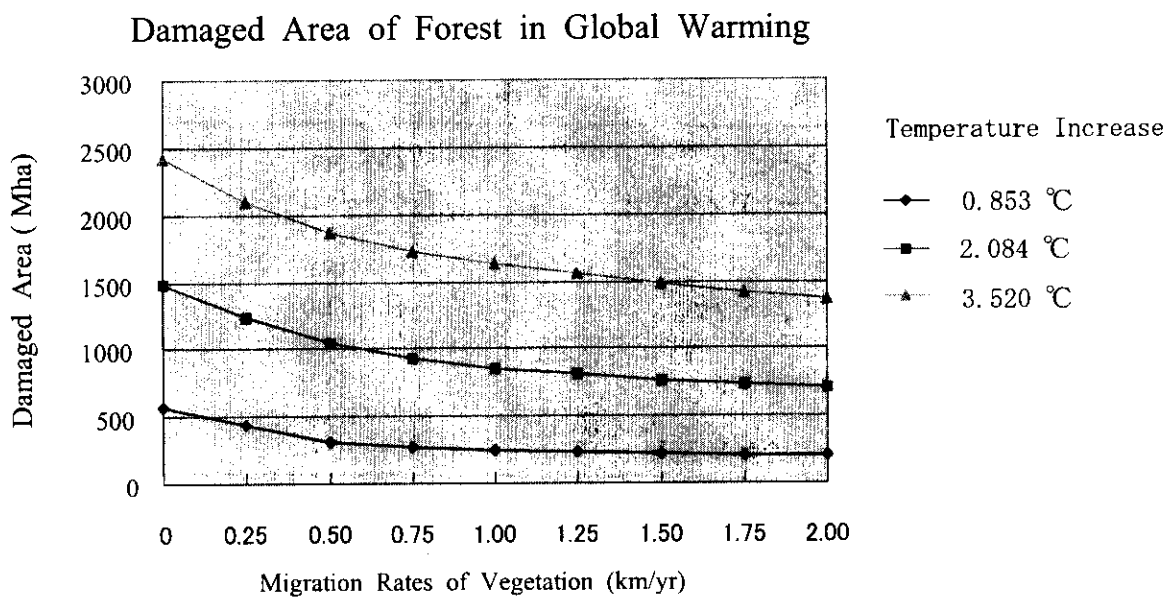


図 2.39 気温上昇時の森林損壊面積

## 9. まとめ

AIM モデルの各モジュールを開発・改良するとともに、普及版 AIM モデルを開発した。これらのモデルは、温室効果ガスの削減可能性を最終需要の側面から評価するエネルギー技術モデル、排出量取引等を分析するための世界経済モデル、長期的シナリオを定量化するための統合排出モデル、発展途上国の統合大気汚染等の効果を評価するための統合排出モデル、IPCC の排出シナリオに対応した土地利用モデル、気候変動の簡易推計モデル、それにいくつかの影響モデルである。長期シナリオについては IPCC のシナリオ・マーカーの一つとして採用され、IPCC の新しいシナリオ作成に貢献するとともに、中国長期シナリオ作成に適用されている。また、普及版 AIM モデルはわが国の地方公共団体や韓国の家庭部門からの削減計画に適用され、有用性が確かめられている。今後さらに適用を図りながら修正・改良を進めていく予定である。

## 参考文献

- 1) M.G.R. Cannell et al.(1996) Climate Change Impacts on Forests, *Climate Change 1995 by IPCC Working Group II*, Cambridge University Press, p101.
- 2) M.R. Davis (1989) Lags in vegetation response to greenhouse warming, *Climate Change*, No.15, pp.75-82.

### [国際共同研究等の状況]

中国エネルギー研究所・インド経営研究所・韓国エネルギー経済研究院・韓国サンミュン大学・インドネシア環境省と共同して、モデルの開発、改良を進めた。

### [研究成果の発表状況]

#### (1) 口頭発表

- ① Kainuma, M., Y. Matsuoka and T. Morita: Joint Meeting of IEW/EMF, Laxenburg, Austria, 1997  
"International distribution of the costs of alternative global emission control proposals"
- ② Kainuma, M., Y. Matsuoka and T. Morita: Workshop on Advanced Methodologies of Software and Decision Support Systems, Laxenburg, Austria, 1997  
"Development of AIM for analyzing policy options to reduce greenhouse gas emissions"
- ③ Kainuma, M., Y. Matsuoka and T. Morita: Joint Meeting of IEW/EMF, Stanford, U.S.A., 1998  
"Recent analysis of emission scenarios based on the AIM model"
- ④ Kainuma, M., Y. Matsuoka and T. Morita: 8th IFAC/IFORS/IMACS/IFIP Symposium on Large Scale Systems: Theory and Applications, Patras, Greece, 1998  
"Development of AIM for Analyzing Policy Options to Reduce Greenhouse Gas Emissions"
- ⑤ Kainuma, M., Y. Matsuoka and T. Morita: Workshop on Advances in Modeling: Paradigms, Methods and Applications, Laxenburg, Austria (1998)  
"AIM/end-use model and its application to forecast Japanese carbon dioxide emissions"
- ⑥ Kainuma, M., Y. Matsuoka and T. Morita: Workshop on Methodologies and Tools for Complex System Modeling, and Integrated Policy Assessment, Laxenburg, Austria, 1998  
"Estimation of embodied CO2 emissions by general equilibrium model"

- ⑦ Kainuma, M., Y. Matsuoka, and T. Morita: IEA/EMF/IIASA Energy Modeling Meeting, Paris, France, 1999  
"recent result of the AIM model"
  - ⑧ Kainuma, M., Y. Matsuoka and T. Morita: 1999 Open Meeting of Human Dimensions of Global Environmental Change, Shonan, Japan, 1999  
"Comparison of strategies to reduce greenhouse gas emissions"
  - ⑨ Kainuma, M., Y. Matsuoka and T. Morita: 14th IFAC World Congress, Beijing, China, 1999  
"Simulation of air pollution scenarios in Asia and Pacific"
  - ⑩ Kainuma, M., Y. Matsuoka and T. Morita: Workshop on Advanced Methodologies of Software and Decision Support Systems, Laxenburg, Austria, 1999  
"New directions of AIM modeling"
  - ⑪ Kainuma, M., Y. Matsuoka and T. Morita: IEEE Systems, Man and Cybernetics Conference, Tokyo, Japan, 1999  
"Development of AIM for coping with global warming"
  - ⑫ 京極純平、増井利彦、森田恒幸：環境経済・政策学会 1998 年大会（1998）  
「リサイクルを考慮した他部門経済モデルによる環境産業の効果分析」
  - ⑬ Masui, T., Y. Matsuoka, and T. Morita: 1999 NIES Workshop on Information Bases and Modeling for Land Use and Cover Change Studies in East Asia, Tsukuba, Japan, 1999  
"Estimation of Greenhouse Gases due to Land Use Changes --Contribution to IPCC Special Report on Emission Scenarios"
  - ⑭ Masui, T., Y. Matsuoka, and T. Morita: 1999 Open Meeting of Human Dimensions of Global Environmental Change, Shonan, Japan, 1999  
"Land use changes and their GHG emissions derived from biomass energy supply and food consumption pattern"
  - ⑮ Matsuoka, Y., M. Kainuma and T. Morita: 1999 Open Meeting of Human Dimensions of Global Environmental Change, Shonan, Japan, 1999  
"Energy policy and reduction of air pollutant in Asia and Pacific region"
  - ⑯ T. Morita: Workshop on Integrated Assessment Modelling for Climate Change Policy Analysis, Ahmedabad, India, 1998  
"Top-down and bottom-up model integration"
  - ⑰ 村岸秀展、森田恒幸：環境経済・政策学会 1998 年大会（1998）  
「環境保全に向けた企業行動の実態とそのモデル化に関する基礎的研究」
- (2) 論文発表
- ① 甲斐沼美紀子：数理科学、424、33-39（1998）  
「環境モデルー温暖化統合評価モデル」
  - ② 甲斐沼美紀子：電気学会論文誌、118 - C(10)、1403-1406（1998）  
「環境政策分析のためのシミュレーションー統合評価モデルによる地球温暖化政策分析」
  - ③ 甲斐沼美紀子：安全工学、38(1)、42-48（1998）  
「地球温暖化問題のシミュレーション分析」

- ④ 甲斐沼美紀子：システム／制御／情報、43(8)、397-401 (1999)  
「地球温暖化対策のための政策分析」
- ⑤ 甲斐沼美紀子、森田恒幸、松岡譲：三田学会誌、92(2)、281-295 (1999)  
「京都議定書達成のコスト分析」
- ⑥ 甲斐沼美紀子：環境研究、115、24-31 (1999)  
「地球温暖化対策技術：ボトムアップアプローチ」
- ⑦ Kainuma, M., Y. Matsuoka, T. Morita and G. Hibino: *IEEE Trans, Sys. Man and Cybern*, 29 (3)、  
317-324 (1999)  
"Development of an End-Use Model for Analyzing Policy Options to Reduce Greenhouse gas  
emissions"
- ⑧ Kainuma, M., Y. Matsuoka and T. Morita: Feature Issue of EJOR on Advances in Modeling:  
Paradigms, Methods and Applications, 122, 392-404 (2000)  
"Estimation of Embodied CO2 Emissions by General Equilibrium Model"
- ⑨ Kainuma, M., Y. Matsuoka and T. Morita: Feature Issue of EJOR on Advances in Modeling:  
Paradigms, Methods and Applications, 122, 416-425 (2000)  
"The AIM/End-Use Model and its Application to Forecasting of Japanese Carbon Dioxide  
Emissions"
- ⑩ Masui, T., T. Morita, and J. Kyogoku: Feature Issue of EJOR on Advances in Modeling:  
Paradigms, Methods and Applications, 122, 405-415 (1999)  
"Analysis on recycling activities using multi-sectoral economic model with material flow"
- ⑪ 松岡譲、森田恒幸、水野健太：土木学会論文集、573/VII-4、81-92 (1997)  
「エネルギー消費技術の改善が二酸化炭素排出量抑制に及ぼす効果のシミュレーション」
- ⑫ 松岡譲、森田恒幸、甲斐沼美紀子、水野健太：土木学会論文集、580/VII-5、27-36 (1997)  
「わが国における二酸化炭素排出量の見通しとその抑制対策の効果について」