

# 統合評価モデル DNE21 の概要

## 第1章 構築したモデルの特徴

地球温暖化問題は、グローバルかつ長期、しかも、我々の社会基盤であるエネルギーシステムと密接に結びついている非常に複雑な問題である。そのため、地球温暖化対策は、グローバルかつ長期的な視点に立って、その対策費用と温暖化抑制への効果を評価し、政策の方向付けを行うことが重要である。しかし、問題の複雑さゆえ、頭の中での思考や机上での計算では、多くの事柄を統合的に捉えた上での効率的な対策評価を行うことは不可能である。そこで、複雑な事象を数多くの数学式によって記述し、これをコンピュータによる高速計算によって解くことによって、考えられる膨大な対策の中から、ある基準の下で望ましいと考えられる温暖化対策を見出すことが可能となる。



図 1-1 グローバルかつ長期の温暖化対策シナリオの提示

### 1.1 モデル分類

エネルギー・地球温暖化問題を扱う数学モデルを簡単に分類すると、下記のように分類できる。

< 計算手法的分類 >

## シミュレーション型モデル

### 最適化型モデル

シミュレーション型は、過去のトレンド等を基にした将来の推定（化石燃料の今後の使用量推移をロジスティック曲線で想定等）を行うことが多く、予測型とも言える（ただし前提条件下での予測）。これに対して、最適化型は、想定した条件下での合理的な将来のシステムを提示することができ、規範的モデルと言える。ただし、シミュレーション型においても、一般均衡モデルのように、各財の需給が一致するような解を繰り返し計算によって導出し、ある種の最適解を得ているモデルも多い。一方、計算の困難さの点から見ると、一般に、シミュレーション型の方がモデルを大規模化し易く、一方、最適化型モデルは、大規模化すると、急激に解法時間が増大し、解法が困難になる傾向がある。本調査研究で、開発・利用した DNE21 モデル、LDNE モデル、世界地域細分化エネルギーモデルは、すべて最適化型モデルに分類される。

#### < 技術の記述方法 >

##### トップダウン型

##### ボトムアップ型

トップダウン型は、弾性値パラメータを用いるなど、マクロ的な扱いをするタイプであり、一方、ボトムアップ型は、個々の技術の積み上げをするタイプである。前者は、概ね、マクロ経済モデルに相当し、主に経済学者のモデルに多く見られる。また、後者は、工学分野の研究者のモデルに多く見られる。個々の技術の評価をするためには、ボトムアップ的なモデル化が必要である。DNE21 モデル、LDNE モデル、世界地域細分化エネルギーモデルは、すべてボトムアップ型モデルに分類されるが、エネルギー利用サイドの技術（例えば、燃費の良い自動車、効率の良いエアコンなど）については、技術が非常に広範に亘り、2100 年という長期的な分析においてボトムアップ的な評価は困難なため、いずれのモデルでもトップダウンアプローチをとっている。

これらモデルのタイプは、どちらが優れているというものではなく、評価したい目的に応じて選ばれるべきである。ただし、対策技術の評価を行うという目的には、ボトムアップ的にモデル化された最適化型モデルが適している。

## 1.2 DNE21 モデルファミリーの位置付け

本調査研究では、評価目的に応じて、統合評価モデル DNE21、LDNE モデル、世界地域細分化エネルギーモデルという 3 種類のコンピュータモデルを開発した(表 1-1)。いずれのモデルも、2100 年もしくはそれ以上の期間について複数時点を同時に最適化する動学的最適化型モデルであり、将来世代の負担も考慮した上でのコスト効率的な温暖化対策を導出可能である。また、いずれのモデルも特にエネルギー供給側技術、CO<sub>2</sub> 回収・貯留技術といった温暖化対策技術が詳細にモデル化されているため、具体的な対策技術の評価が可能である点に特徴を有している。更に、3 種類のモデル別にも、表 1-1 で示すような特徴を有しており、今後も評価目的に合わせて、適宜、適切なモデルを選択して分析することが可能である。

一方、これら本調査研究で開発したモデルの位置付けを、世界における他の主要モデルと共に、図 1-2 に示す。ただし、世界における各モデルは改良が続けられており、また、モデル構造の情報公開の程度にもモデルによって差があるため、モデルの概要を正確に把握することは容易ではなく、図 1-2 は概略と認識されたい。このように多くの世界におけるモデルにあっても、DNE21 ファミリーは、特に温暖化対策技術の分析・評価において、際立った特色を有していると言える。また、世界地域細分化エネルギーモデルについては、地域解像度についても、他のモデルと一線を画している。

表 1-1 開発した DNE21 ファミリーモデルの特徴

モデル名	モデル構造	3 種類のモデル間の特徴
統合評価モデル DNE21	非線形最適化形モデル 地域分割：世界 10 地域	気候変動、マクロ経済モデルの統合に特徴。温暖化対策に伴う GDP 損失等も算出可能。
LDNE モデル	線形最適化形モデル 地域分割：世界 10 地域	核燃料サイクルなどの長期将来技術の評価が可能。短時間でモデル計算可能なため、多くの感度解析が実施可能。
世界地域細分化エネルギーモデル	線形最適化形モデル 地域分割：世界 50 地域以上*	世界に類を見ない詳細な地域解像度を有する。地域解像度を生かしたエネルギー・CO <sub>2</sub> の長距離輸送や地域的な評価に有用。

\* エネルギー需要側、供給側、エネルギー種、CO<sub>2</sub>等により異なり、54～158 地域分割程度

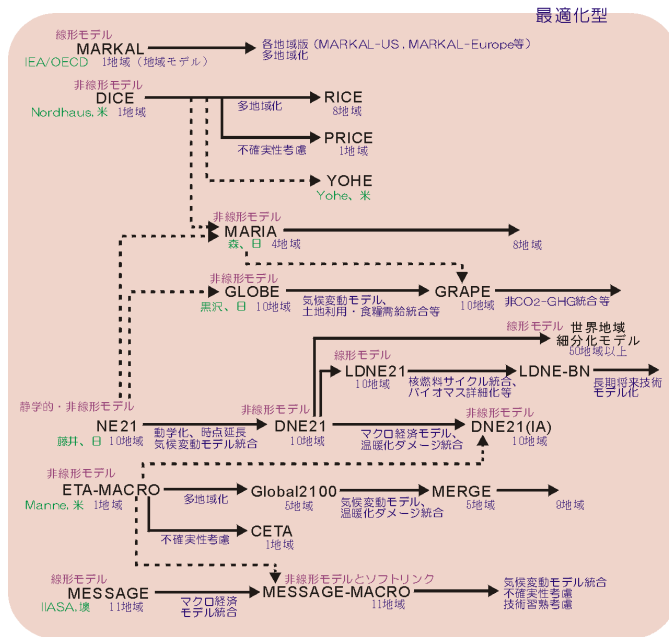
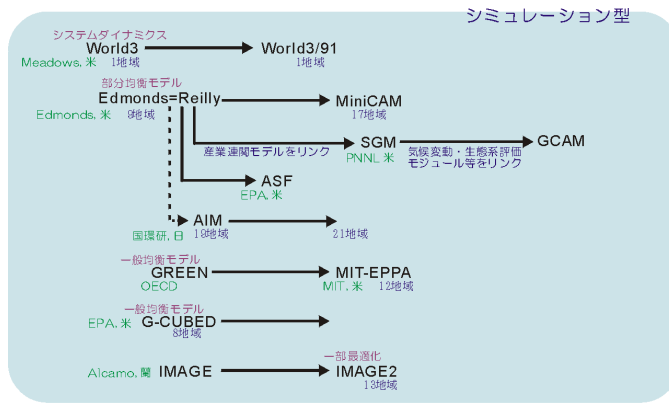


図 1-2 各種モデル系譜及び開発状況

## 第2章 DNE21 モデルの概要と主な前提条件

### 2.1 DNE21 モデルの概要

DNE21 (Dynamic New Earth 21) モデルは、グローバルかつ長期的な視点から、どのような温暖化対策を取るのが世界全体にとってコスト効率的なのか、そしてその際、各地域はどのような対策分担を行うのがそれぞれの地域にとってコスト効率的なのかを見出すことを目的に開発してきた。

DNE21 モデルファミリーには、評価目的に応じて、様々なバージョンが存在するが、ここでは、「マクロ経済モデル」、「気候変動モデル」を統合した統合評価モデル DNE21 の概要を説明する。DNE21 モデルは、エネルギー生産、変換、消費および CO<sub>2</sub> 回収、貯留・隔離等のプロセスを詳細に記述した「エネルギーシステムモデル」を中心に、マクロ経済全体を把握する「マクロ経済モデル」、CO<sub>2</sub> 濃度や気温上昇等を算出可能な「気候変動モデル」を一体化した最適化型のモデルとなっている(図 2-1 参照)。DNE21 モデルは、世界全体を 10 地域に分割(図 2-2 参照)、2100 年までの長期に亘る期間を評価対象としており、世界の 2100 年までの消費効用を最大化するエネルギーシステムを中心とした CO<sub>2</sub> 削減方策を導出することが可能である。なお、消費効用の最大化は、エネルギーシステムコストも含んだ、より広範な経済システムの最適化を意味する。また、これによって得られるシナリオは、100 年間に及ぶ期間を同時に考慮したものであり、例えば、計算により得られた 2010 年の温暖化対策は、2100 年までの将来世代の負担も考慮した上でのコスト効率的な対策を意味する。特に、エネルギー供給部門の技術および CO<sub>2</sub> 回収・貯留技術を具体的にモデル化しているため(図 2-3)、これらについてマクロ的な評価のみならず、具体的な技術オプションの提示が可能となっている。具体的には、1 次エネルギーは、天然ガス、石油、石炭、バイオマス、水力・地熱、太陽光、風力、原子力の 8 種類に、最終需要は、気体燃料、液体燃料、固体燃料、電力の 4 部門にモデル化している。また、天然ガス、石油、合成油、石炭、メタノール、水素、CO<sub>2</sub> の 7 種類の品目は 10 地域間の長距離輸送をモデル化している。一方、エネルギー変換技術としては、各種発電技術を始め、バイオマスのガス化、液化、メタン醗酵、石炭のガス化、液化、これらガスや天然ガスからの水素生成、水電気分解による水素生成、メタノール合成、合成油生成など現行技術のみならず現在開発中の技術もモデル化している。また、時代が進むにつれ技術改良が進展する(たとえば、化石燃料燃焼発電の熱効率の向上、太陽光や風力発電のコスト低減など)との想定も取り入れている。化石燃料については資源量データをもとに低コストのものから生産され、累積生産量が増大するにつれコストが増大するとしている。CO<sub>2</sub> 貯留技術としては、石油増進回収、地下帯水層注入、廃ガス田注入、海洋貯留の 4 つの技術をモデル化している。これらを統合的に表現するために、約 1 万個の変数と約 1 万本の方程式を含む大規模なモデルとなっている。これをコンピュータによって最適化計算することにより、2100 年までの将来を考慮した上で、10 地域別、時点別に、コスト効率的な温暖化対策シナリオを整合性を持って具体的に描き出すことができる。

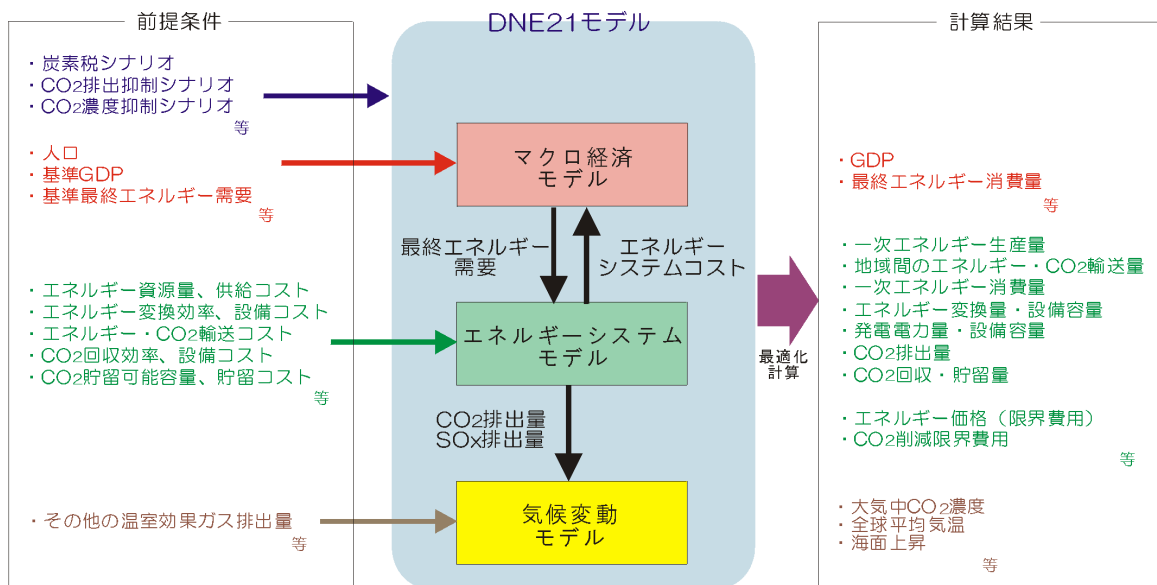


図 2-1 DNE21 モデルの構成概略と主な入出力

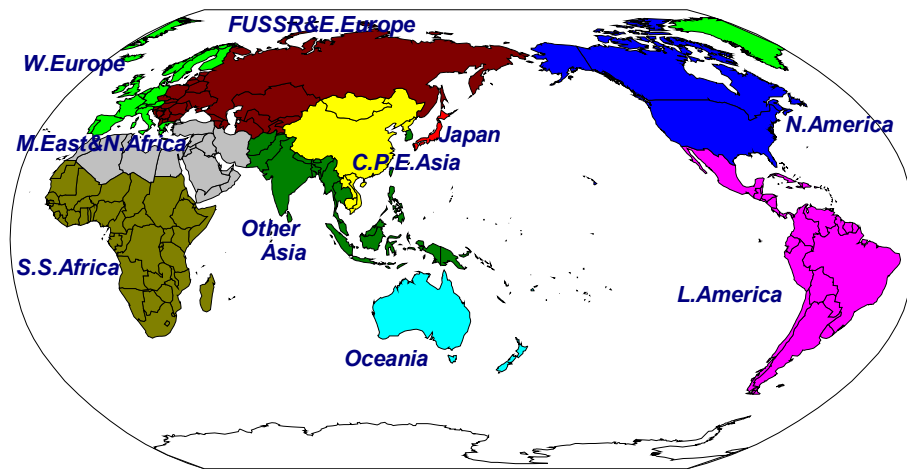


図 2-2 DNE21 モデルにおける世界地域区分

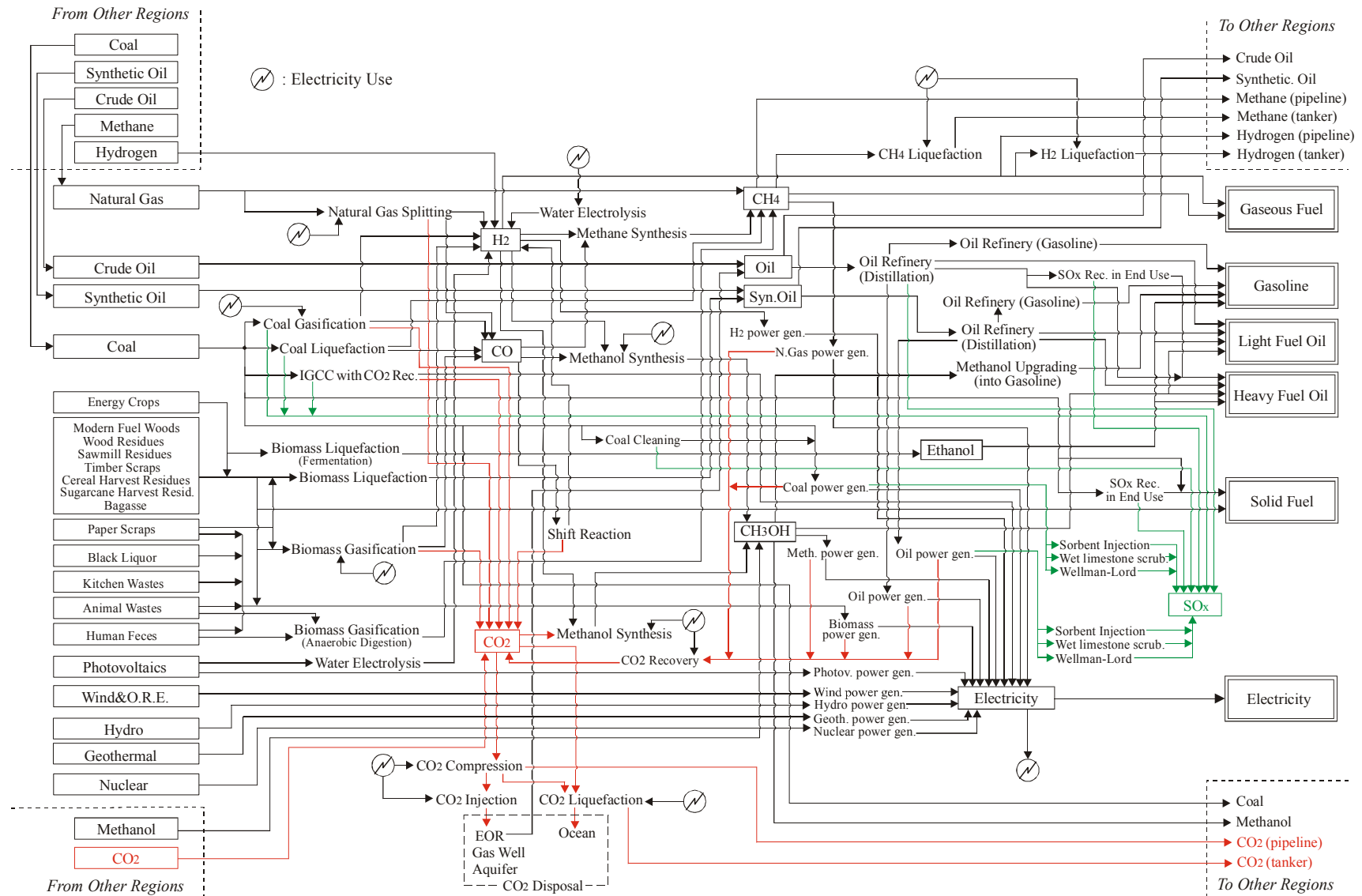


図 2-3 DNE21 モデルにおけるエネルギー変換、CO<sub>2</sub> 回収・貯留プロセスの想定

## 2.2 DNE21 モデルの主な前提条件

### 2.2.1 エネルギーシステムモデル関連データ

#### (1) 化石燃料資源量と採掘コストの想定

表 2-1 に、Rogner<sup>12)</sup>によってまとめられた石油の資源量推定を示す。これは、1992年の世界エネルギー会議(WEC)、1996年のBP(British Petroleum)のデータ等に基づいて作成されている。これによると、在来型石油の確認埋蔵量は150Gtoe(約1兆1000億バレル)、非在来型もすべて含めると、約2,600Gtoe(約19兆5000億バレル)と膨大な石油資源が推定されている。一方、表 2-2 に天然ガス資源の推定量を示す。天然ガス資源量についてもWECやBP等のデータに基づき作成されている。在来型天然ガスの確認埋蔵量は129Gtoe(約5530兆立方フィート)、メタンハイドレード等、非在来型も含めた資源量としては、約20,000Gtoeという極めて大きな資源量が推定されている。石炭資源については、Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe(BGR)の推定を基に表 2-3 のようにまとめられている。一方、国際応用システム分析研究所(IIASA)とWECによる研究<sup>13)</sup>では、化石燃料の採掘コストについて、表 2-1～表 2-3 に対応するそれぞれの資源グレードごとに表 2-4 のような想定値が用いられている。

DNE21 モデルでは、これらの推定値を参考にして、化石燃料の供給コストを図 2-4 のように想定した。ただし、図 2-4 は世界全体で合計したものであるが、実際には、DNE21 モデルの地域分割別にデータを与えている。モデルにおける石炭の供給コストについては、石炭の陸上輸送費は高つくため、地域内輸送費として30\$/toeを想定し、全グレードに対して更に付加している。なお、表 2-1、表 2-2 のように、石油、天然ガスのグレードVII、VIIIの資源量が極めて大きく想定されているが、モデル計算の結果、本報告書で示すいずれのケースにおいても、これらのグレードに分類された資源を使用する結果とはなっていない。



表 2-1 石油資源の推定

地域	従来型			増進回収	非従来型				合計
	確認回収 可能埋蔵 量	追加的推 定埋蔵量	追加的予 測埋蔵量		オイルシェール、ピチュメン、重質油				
					回収可能 埋蔵量	資源	追加的な可能性		
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
北アメリカ	8.5	8.6	6.7	15.9	7.6	98.8	172.8	287.4	606
ラテンアメリカ	17.4	8.9	15.5	18.9	2.6	91.5	160.1	270.8	586
西ヨーロッパ	5.6	2.1	3.6	5.1	1.3	7.6	13.3	34.6	73
東ヨーロッパ	0.3	0.2	0.6	0.7	0.0	0.5	1.0	3.8	7
旧ソ連	17.1	13.6	19.3	23.4	3.3	19.4	34.0	125.6	256
中東・北アフリカ	87.9	17.0	21.9	56.2	22.3	39.6	69.3	279.0	593
サハラ以南のアフリカ	4.0	3.4	4.9	5.4	1.4	5.1	8.9	29.7	63
計画経済圏アジア	5.1	4.7	8.2	7.4	2.3	42.2	73.8	118.7	262
太平洋 OECD	0.4	0.3	0.6	0.7	3.7	25.8	45.1	60.3	137
他の太平洋アジア	2.9	1.6	2.5	3.4	0.6	4.8	8.3	23.0	47
南アジア	1.0	0.3	0.6	0.8	0.1	0.3	0.5	3.5	7
世界全体	150	61	84	138	45	336	587	1237	2638

単位) Gtoe (石油換算 10 億トン)

出典: H-H. Rogner, 1997<sup>12)</sup>

表 2-2 天然ガス資源の推定

地域	従来型			増進回収	非従来型				合計
	確認回収 可能埋蔵 量	追加的推 定埋蔵量	追加的予 測埋蔵量		コールベッドメタン、タイトガス等				
					回収可能 埋蔵量	資源	追加的な可能性		
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
北アメリカ	11.8	14.3	15.6	8.4	35	70	105	6100	6361
ラテンアメリカ	7.6	8.0	13.8	3.9	13	30	44	4571	4691
西ヨーロッパ	7.3	4.9	7.2	3.0	4	9	13	765	813
東ヨーロッパ	0.7	0.7	1.2	0.5	1	2	3	1	10
旧ソ連	39.1	45.0	65.0	20.2	26	45	68	4208	4517
中東・北アフリカ	48.2	23.0	26.9	12.5	13	29	44	203	400
サハラ以南のアフリカ	3.9	5.3	8.4	2.2	4	9	14	383	431
計画経済圏アジア	1.1	4.6	7.1	1.6	21	24	36	432	527
太平洋 OECD	2.1	0.5	0.8	0.5	14	30	45	1523	1616
他の太平洋アジア	5.4	3.8	5.0	1.9	3	8	11	192	231
南アジア	1.6	1.8	2.6	0.8	1	2	3	381	395
世界全体	129	112	153	56	138	258	387	18759	19990

単位) Gtoe (石油換算 10 億トン)

出典: H-H. Rogner, 1997<sup>12)</sup>

表 2-3 石炭資源の推定

地域	石炭					褐炭					合計
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	
北アメリカ	140	0	104	97	387	12	0	3	28	111	883
ラテンアメリカ	6	1	3	7	28	0	0	0	0	1	47
西ヨーロッパ	18	3	14	46	185	9	1	8	1	4	289
東ヨーロッパ	22	22	26	9	35	8	4	2	0	2	129
旧ソ連	88	0	22	506	2025	22	0	2	44	176	2885
中東・北アフリカ	0	0	0	3	12	0	0	0	0	0	15
サハラ以南のアフリカ	37	0	37	16	64	0	0	0	0	0	153
計画経済圏アジア	34	40	274	165	660	14	28	22	12	47	1295
太平洋 OECD	20	147	18	47	188	9	23	1	0	0	452
他の太平洋アジア	2	0	1	0	1	0	0	0	1	3	9
南アジア	7	28	19	7	28	1	0	0	0	0	89
世界全体	372	241	518	903	3612	75	56	38	86	344	6246

単位) Gtoe (石油換算 10 億トン)

出典: H-H. Rogner, 1997<sup>12)</sup>

表 2-4 化石燃料資源のコスト想定

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
石油	<12	12-19	19-25	25-35	35-38	38-52	52-62	62-160
天然ガス	<10	10-16	16-25	25-29	29-34	34-42	42-50	50-145
	A	B	C	D	E			
石炭	1-9	9-11	11-16	16-24	24-36			

単位) 1990 年米ドル / 石油換算バレル

出所: H-H. Rogner, 1997<sup>12)</sup>

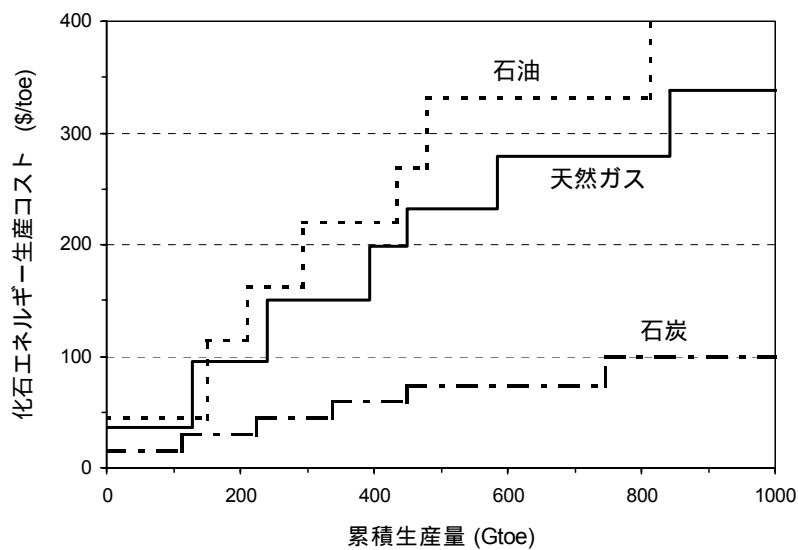


図 2-4 化石エネルギー生産コストの想定

(2) 再生可能エネルギーの供給可能量と供給コストの想定

バイオマス

バイオマスポテンシャルについては、食糧需給や食糧生産を含む土地利用競合等を世界 11 地域別に統合的に評価することが可能な世界土地利用エネルギーモデル GLUE (Global Land Use and Energy Model) <sup>13)15)</sup> を簡略化した表計算ソフトによって統合的に算出している。バイオマスポテンシャル算出のための人口想定は IPCC SRES B2 を用いている (後述の図 2-12 参照)。図 2-5 にバイオマスエネルギー資源のポテンシャル想定を示す。また、表 2-5 には、バイオマスエネルギー資源のコスト想定を示す。なお、コストが負となっている資源があるが、これは、現状で処分費用がかかっている状況を反映したものである。

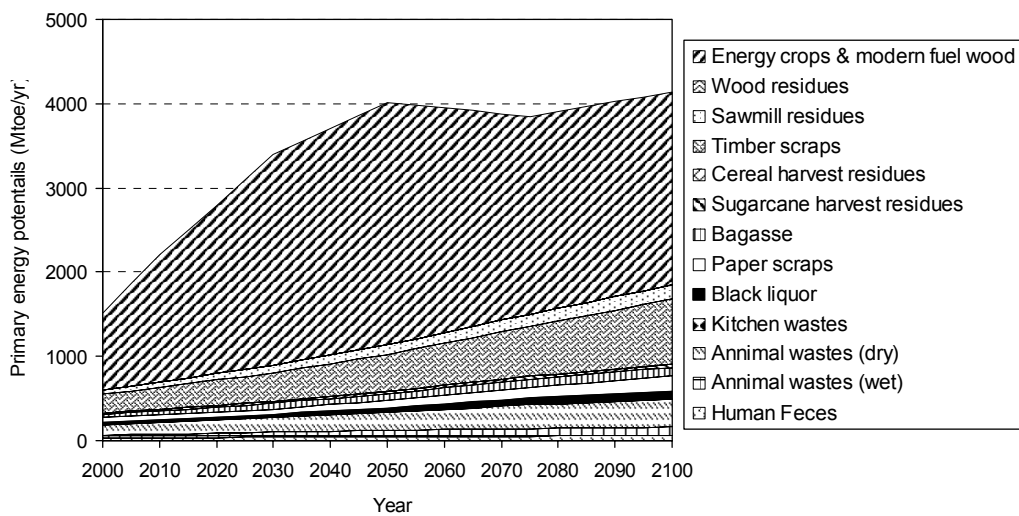


図 2-5 バイオマスエネルギー資源のポテンシャル想定

表 2-5 バイオマスエネルギー資源のコスト想定

	供給コスト(\$/toe)
エネルギー作物・新型燃料用丸太	120 - 1200 <sup>†</sup>
産業用丸太伐採残渣	80
製材残渣	30
廃材等	30 - 60 <sup>†</sup>
穀物収穫時残渣	80
サトウキビ収穫時残渣	60
バガス	30
古紙	320 - 390 <sup>‡</sup>
黒液	-340
家庭ゴミ	0
家畜糞尿 (乾)	-550
家畜糞尿 (湿)	-550
人糞	0

<sup>†</sup> 供給量に依存

<sup>‡</sup> 地域に依存

## 水力・地熱

水力・地熱発電、風力発電の供給可能量については、IIASA の Nakicenovic らの報告<sup>16)</sup>を参考に想定した。これを基に、水力・地熱発電の最大供給可能量は世界全体で約 15,000TWh/yr (水力：約 13,500TWh/yr、地熱：約 1,500TWh/yr)、水力・地熱発電のコスト供給曲線を、図 2-6 のように想定した。

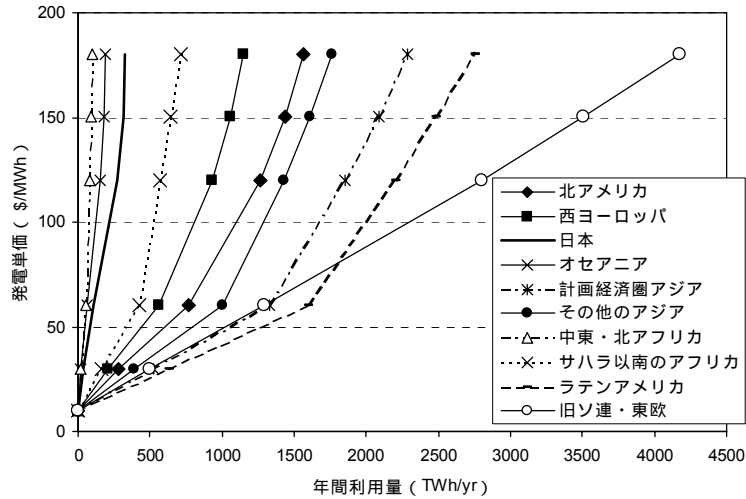


図 2-6 水力・地熱発電のコスト供給曲線の想定

## 風力

一方、風力発電のポテンシャルについても、IIASA の Nakicenovic らの報告<sup>16)</sup>を参考に約 7,600TWh/yr とした。そして、風力発電のコスト供給曲線を図 2-7 のように想定した。ただし、風力発電については、2050 年まで年率 1%でコスト低減するものと想定した。

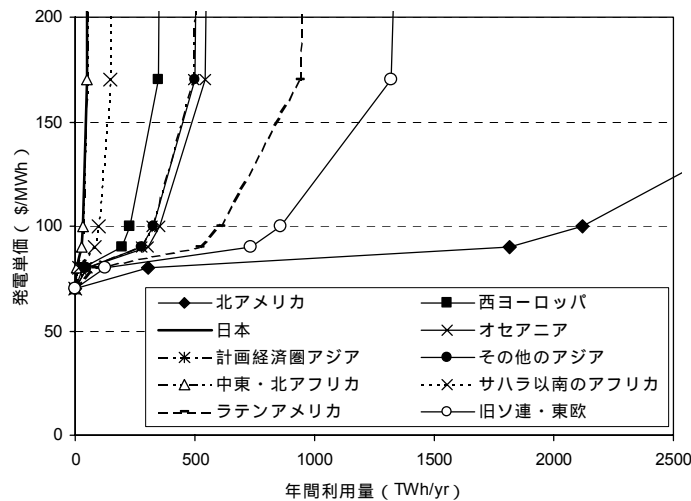


図 2-7 風力発電のコスト供給曲線 (1990 年時点) の想定

## 太陽光

太陽光発電の地域別の年間利用可能量と発電単価の想定を表 2-6 に示す。年間利用可能量は、世界全体で約 286,000TWh/yr と大きなポテンシャルを想定している。発電単価については、米国電力研究所 (EPRI) の見通し<sup>17)</sup>を参考に、2050 年まで年率 3.4% で低減するものと想定した。ただし、近年のコスト低減傾向からすると、楽観的な推定であることには注意されたい。太陽光発電は、昼間においてのみ発電可能なため、後述の図 2-10 に示される年負荷持続曲線におけるピーク時間帯でのみ発電可能であるとした。ただし、西ヨーロッパ、旧ソ連・東欧地域のような高緯度地域では、電力需要のピークが朝夕にあるため、中間時間帯でのみ発電可能なものと想定した。太陽光発電は、出力が間欠にならざるを得ないため、電力系統の信頼性を維持するためには、太陽光発電の導入量のある一定値以下に抑える必要がある。そのため、DNE21 モデルでは、太陽光発電の供給電力の上限を、電力需要の 15%と想定した。ただし、電力貯蔵設備を通して他の時間帯に供給される電力や、水電気分解に供給される電力に関しては、この制約からは除外している。

表 2-6 太陽光発電プラントに関する想定

地域	年間利用可能量 (TWh/yr)	2000 年時点単価 (\$/MWh)	2050 年以降の単価 (\$/MWh)
北アメリカ	2,528	282	50
西ヨーロッパ	673	469	83
日本	208	396	70
オセアニア	23,310	317	56
計画経済圏アジア	20,097	384	68
その他のアジア	4,284	302	54
中東・北アフリカ	122,796	235	42
サハラ以南のアフリカ	94,799	256	45
ラテンアメリカ	10,544	384	68
旧ソ連・東欧	7,200	396	70

### (3) 原子力発電に関する想定

原子力発電には、放射能汚染のリスクも存在すると考えられるが、そういったリスクに対する評価は本モデルには含まれていない。前述のように、本モデルにおいては、エネルギーシステムコストの最小化という評価基準での技術評価を行っている。これは、原子力発電に限ったことではないが、本モデルによって示される結果は、あくまでこの評価基準の下での結果であることを理解すべきである。しかし、原子力発電に対する社会的受容性等を鑑み、非現実的に大きな原子力発電の導入という計算結果が導かれないように、原子力発電の最大発電設備容量に図 2-8 のような容量制約を設けている。この制約は、昨今の先進国における原子力発電に対する情勢からすると、比較的緩い制約とも考えられるが、本モデルが行っているエネルギーシステムコストの最小化という評価基準での技術の評価を大きく歪めないように、あえて厳しい上限制

約を課すことは避けている。なお、原子力発電の可変費としては、2 cent/kWh を想定した。

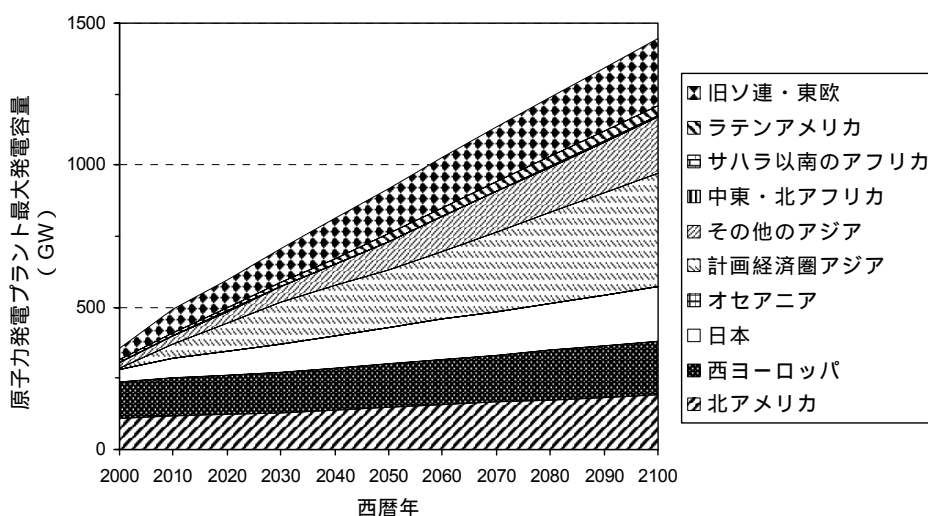


図 2-8 原子力発電プラント最大発電容量の想定

#### (4) 各種エネルギー変換プラント諸特性の想定

各種発電プラントの建設単価、年経費率、稼働率の想定値を表 2-7 に、日本における発電効率の想定値を表 2-8 に示す。他地域については、現状における発電効率の地域的な差異を考慮しつつ、将来的には表 2-8 の効率に収斂するような想定を行っている。また、各種化学プラントの建設単価、稼働率の想定値を表 2-9 に示す。なお、各種化学プラントの年経費率は 25%と想定した。想定値は、NEA/IEA による報告<sup>18)</sup>、IEA の World Energy Outlook (WEO)<sup>18)</sup>、IPCC 第 2 次評価報告書における報告<sup>20)</sup>、藤井らによる研究<sup>21)</sup>、Herzog らによる研究<sup>22)</sup>等を基に想定した。各種プラントの耐用年数は基本的に 30 年としている。なお、表 2-7 中の稼働率は、メンテナンス等で休止しなければならないことから生じる値であり、電力負荷追従の際の休止は、後述の年負荷持続曲線を用いたモデル化により、最適化計算結果として求められる。

表 2-7 各種発電プラントの諸特性の想定

発電プラント	建設単価(\$/kW) <sup>†</sup>	年経費率(%)	稼働率(%)
天然ガス	1060 - 500	17	85
石油	410 - 270	17	85
石炭(脱硫装置付)	2050 - 970	17	85
CO <sub>2</sub> 回収装置付石炭ガス化複合発電	2170 - 1240	17	85
バイオマス	1230 - 1000	17	85
メタノール	1200 - 600	17	85
水素	1100 - 500	17	85
原子力	2620 - 1790	19	80
電力貯蔵(揚水)	1500 - 1000	13	90

<sup>†</sup> 地域、時点に依存

表 2-8 各種発電プラントの発電効率の想定（日本）

発電プラント	2000年	2010年	2030年	2050年	2100年
天然ガス	47.0	49.6	54.8	60.0	65.0
石油	36.0	41.2	46.4	49.0	49.0
石炭火力（脱硫装置付）	40.7	42.6	46.3	50.0	55.0
CO <sub>2</sub> 回収装置付石炭ガス化複合発電	36.0	38.2	42.6	47.0	52.0
バイオマス	24.1	29.6	40.6	45.0	45.0
メタノール	44.9	48.3	51.6	55.0	60.0
水素	51.4	52.3	54.1	55.9	65.0
電力貯蔵（揚水）	70.0	70.0	75.0	75.0	75.0

注）低位発熱量基準。CO<sub>2</sub>回収装置付石炭ガス化複合発電の発電効率にはCO<sub>2</sub>回収に伴うエネルギー損失を含めている。

表 2-9 各種化学プラントの諸特性の想定

エネルギー変換プロセス	建設単価 (\$/(toe/day))	稼働率(%)	変換効率(%) <sup>†</sup>
石炭ガス化	203,000	90	61
天然ガス分解	164,000	90	76
バイオマスガス化	193,000	90	52
シフト反応	14,000	90	99
メタノール合成 (CO から)	113,000	90	62
メタノール合成 (CO <sub>2</sub> から)	126,000	90	62
メタン合成	112,000	90	77
水電気分解	223,000	90	80-90 <sup>‡</sup>
石油精製	29,000	70	95
ガソリン精製	42,000	70	90
石炭液化	200,000	90	67
バイオマス液化	230,000	90	75
メタノールのガソリン化	46,000	70	93

<sup>†</sup> 発電効率を 33%と仮定したときの値

<sup>‡</sup> 時点に依存

#### (5) 二酸化炭素分離回収、貯留・隔離に関する想定

CO<sub>2</sub>の分離回収法としては、アミン系溶剤による発電所排ガスからの化学吸収法と、SELEXOL プロセスによるガス化プラントにおける物理吸収法を想定した。CO<sub>2</sub>の分離回収設備コストおよび分離回収に伴うエネルギー損失は、Herzogらによる報告<sup>22)</sup>等を基に、表 2-10 のように想定した。一方、CO<sub>2</sub>貯留・隔離としては、CO<sub>2</sub>を注入し石油を回収する石油増進回収、枯渇した天然ガス田に圧入する方法、地下の帯水層に圧入する方法、および、海洋貯留の 4 種類を想定した。CO<sub>2</sub>貯留・隔離に要するコストと貯留・隔離容量の想定値は、表 2-11 のとおりである。

表 2-10 CO<sub>2</sub>分離回収設備に関する想定

	建設単価 (\$/(tC/day))	エネルギー損失 <sup>†</sup> (MWh/tC)
発電所排ガスからの化学吸収	56,500	0.927 – 0.719
ガス化プラントにおける物理吸収	14,500	0.902 – 0.496

<sup>†</sup> 時点に依存

表 2-11 CO<sub>2</sub>貯留・隔離に関する想定

	CO <sub>2</sub> 貯留・隔離単価(\$/tC) <sup>†</sup>	CO <sub>2</sub> 貯留容量(GtC)
石油増進回収	87 – 125 <sup>‡</sup>	9.2
廃ガス田注入	46	8.2 <sup>††</sup>
地下帯水層注入	10 – 150	499.0
海洋隔離	25 <sup>‡‡</sup>	–

出所：「グローバルエネルギー戦略」他

<sup>†</sup> 貯留・隔離地点までの輸送コストは別途考慮している。

<sup>‡</sup> 回収される石油の売却益は別途考慮している。

<sup>††</sup> 2000年時点の初期値であり、2000年以降の天然ガス採掘量に依存して増加する。

<sup>‡‡</sup> 陸上でのCO<sub>2</sub>液化コストと洋上処理施設コストの合計額である。

#### (6) 植林による大気中CO<sub>2</sub>固定に関する想定

植林によるCO<sub>2</sub>固定については、植林から30年(2075年時点、2100年時点の計算では25年)で成熟林になると仮定し、成熟林に達するまでの期間中一定率で大気中のCO<sub>2</sub>を固定できるものとした。想定した値を表2-12に示す。ただし、本モデルでは、CO<sub>2</sub>固定のために植林するバイオマスと、エネルギー利用としてのバイオマス、気候変動モデルで想定される森林破壊によるCO<sub>2</sub>排出とのリンクはしていない。

表 2-12 植林による大気中CO<sub>2</sub>固定に関する想定値

地域	最大植林可能面積 (Mha)	年間最大植林 可能面積(%)	成熟林時の単位面積 当りの炭素固定量(tC/ha)	植林費用 (\$/tC)
北アメリカ	43.80	2	100	30
西ヨーロッパ	6.84	2	100	30
日本	0.08	2	100	30
オセアニア	15.75	2	100	30
計画経済圏アジア	4.95	2	100	15
その他のアジア	17.10	2	150	10
中東・北アフリカ	2.70	2	100	15
サハラ以南のアフリカ	88.00	2	150	10
ラテンアメリカ	43.80	2	150	10
旧ソ連・東欧	27.90	2	100	15

注) 年間最大植林可能面積の比率は、最大植林可能面積に対する比率である。



### (7) エネルギー・二酸化炭素輸送コストの想定

地球的規模で最適なエネルギーシステムの構築を目指すには、従来の石油や天然ガス等のエネルギー輸送に加え、水素やメタノール、そして回収された二酸化炭素の長距離輸送が重要な役割を果たすと考えられる。そこで、DNE21 モデルにおいては、天然ガス、石油、石炭、水素、メタノール、二酸化炭素の 6 品目の輸出入を考慮している。図 2-9 には、DNE21 モデルで想定している各種エネルギーの長距離輸送コストを輸送距離の関数として示す。ただし、図中の試算では便宜的に液化動力の電力単価は 5 (cent/kWh)を想定したが、実際の計算における電力単価は地域別に内生的に求められる。モデル内においては、地域間の輸送距離は、各地域の代表都市間の距離で見積もっている。ただし、石油、石炭、メタノールの輸送コストは、比較的安価なため、それらの輸送コストは距離に依らず一定としている。

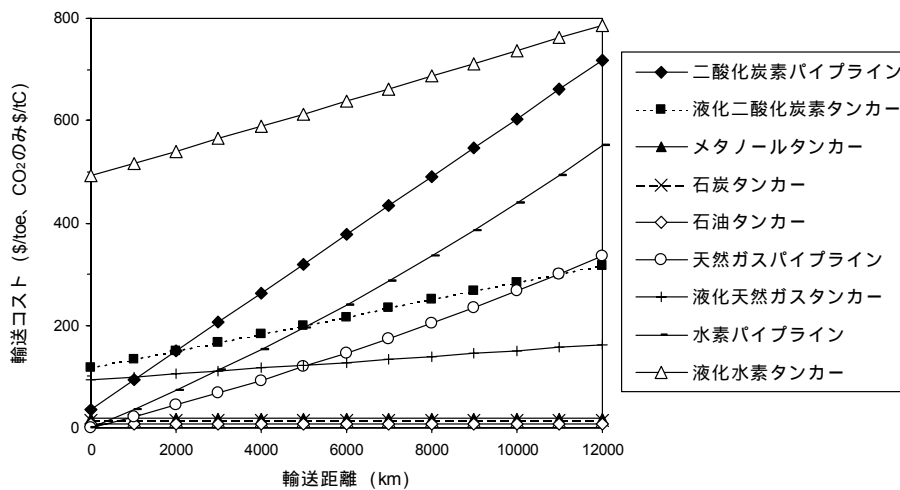


図 2-9 各種エネルギー、CO<sub>2</sub>の長距離輸送コスト

### (8) 電力需要年負荷持続曲線の想定

電気は、さまざまなエネルギーから転換が可能であり利便性も高い。エネルギーの電力化は着実に進んでおり、今後も続くものと考えられる。しかし、電気は、現状では保存がほとんどできないという欠点がある。電力需要は刻々と変化するため、それに合わせて発電する必要がある。発電の経済性を考えると、単位発電電力当りのプラント建設コストは高いが燃料費は安い発電プラント（原子力等）を、電力需要に負荷追従させずに運用し、燃料費は高いが単位発電電力当りのプラント建設コストは安い発電プラント（天然ガス火力、石油火力等）を負荷追従させるのが、コスト的に有利になる。DNE21 モデルにおいては、発電部門の定式化はこの年負荷持続曲線を介して行っている。一年の電力需要を大きな需要から並べたものが年負荷持続曲線である。年負荷持続曲線の利用により、実際には複雑な発電プラントの運用パターンを比較的簡単に表現することができる。その年負荷持続曲線として図 2-10 に示すような 4 時間

帯（瞬時ピーク、ピーク時間帯、中間時間帯、オフピーク時間帯）で表現される矩形状のものを想定している。

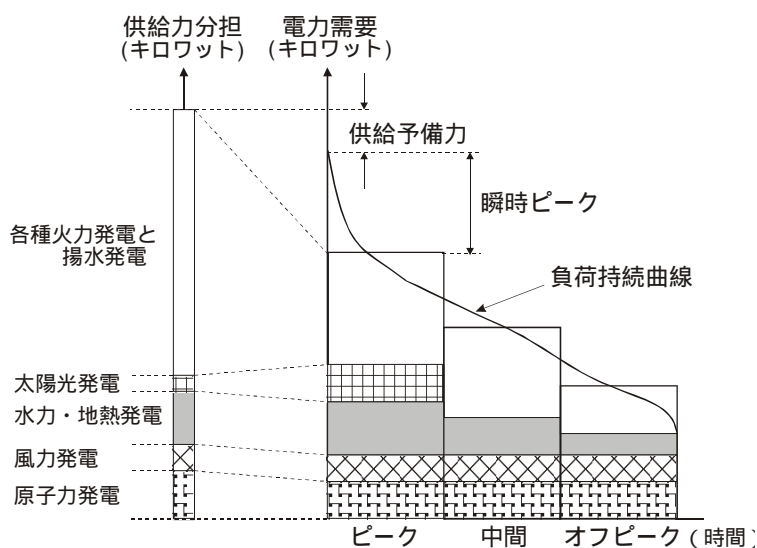


図 2-10 年負荷持続曲線の想定

## 2.2.2 マクロ経済モデル関連データ

### (1) 人口、基準 GDP、基準最終エネルギー需要の想定

人口、基準 GDP、基準最終エネルギー需要は、図 2-11 のように、IPCC SRES<sup>6)</sup>の B2 シナリオと OECD/IEA の統計データ<sup>7)8)</sup>を基にシナリオを作成している。なお、SRES B2 の人口シナリオは、国連の 1998 年における中位推計<sup>23)</sup>が利用されており、本モデルにおける人口想定もそれを利用している。基準 GDP は、SRES B2 における一人当たり GDP 成長率と、人口シナリオより作成している。なお、「基準」GDP は、「リファレンスケース」における GDP であり、CO<sub>2</sub> 濃度制約等の CO<sub>2</sub> 排出抑制政策を想定した場合には、GDP は変化する。一方、基準最終エネルギー需要は、固体、液体、気体燃料、電力の 4 燃料種別に、SRES B2 における GDP 当たり最終エネルギー需要成長率と、GDP シナリオより作成している。なお、「基準」最終エネルギー需要は、「基準 GDP」と同様に、「リファレンスケース」における最終エネルギー需要であり、CO<sub>2</sub> 濃度制約等の CO<sub>2</sub> 排出抑制政策を想定した場合には変化する。

DNE21 モデルで想定している 10 地域別の人口、基準 GDP を、それぞれ、図 2-12、図 2-13 に示す。また、燃料種別の世界全体の基準最終エネルギー需要を図 2-14 に示す。

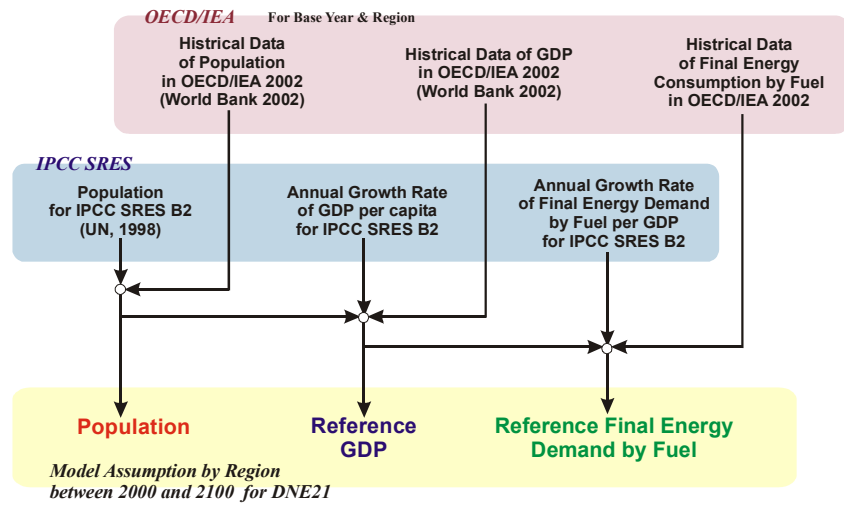


図 2-11 世界 10 地域別の人口、基準 GDP、基準最終エネルギー需要の想定方法

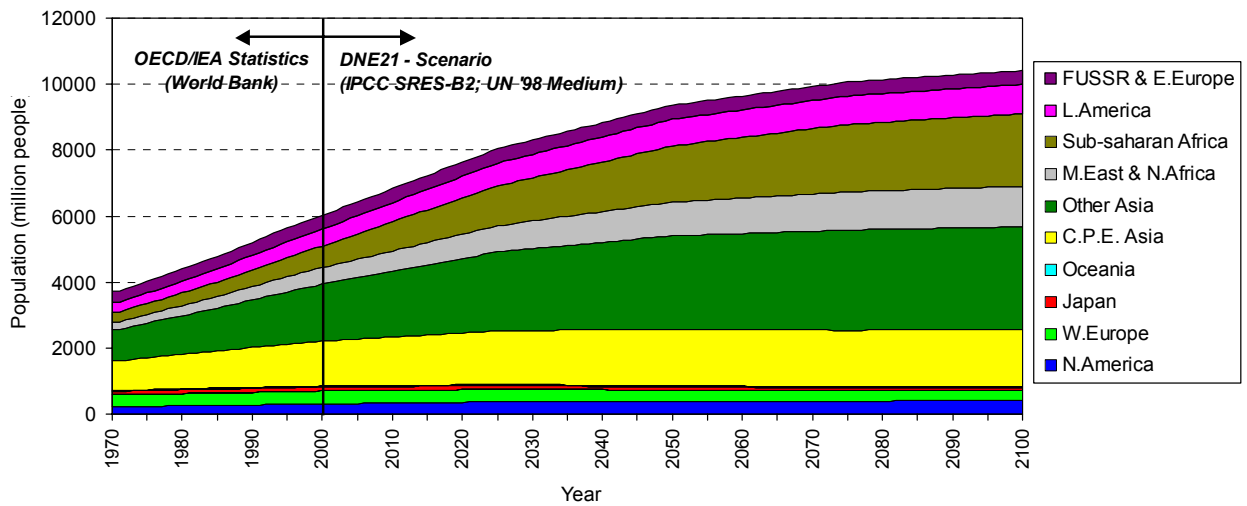


図 2-12 人口シナリオ

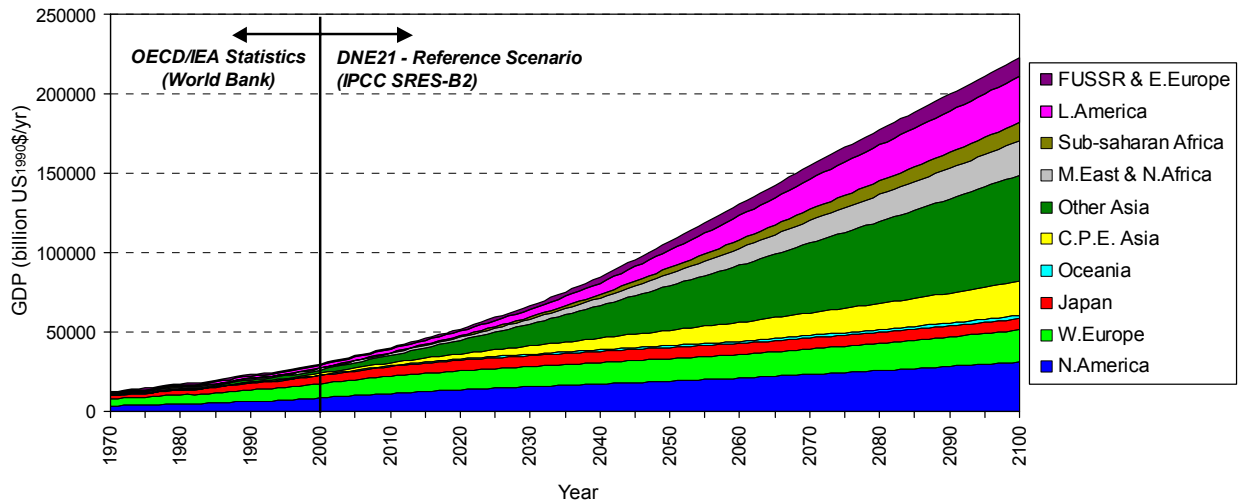


図 2-13 基準 GDP シナリオ

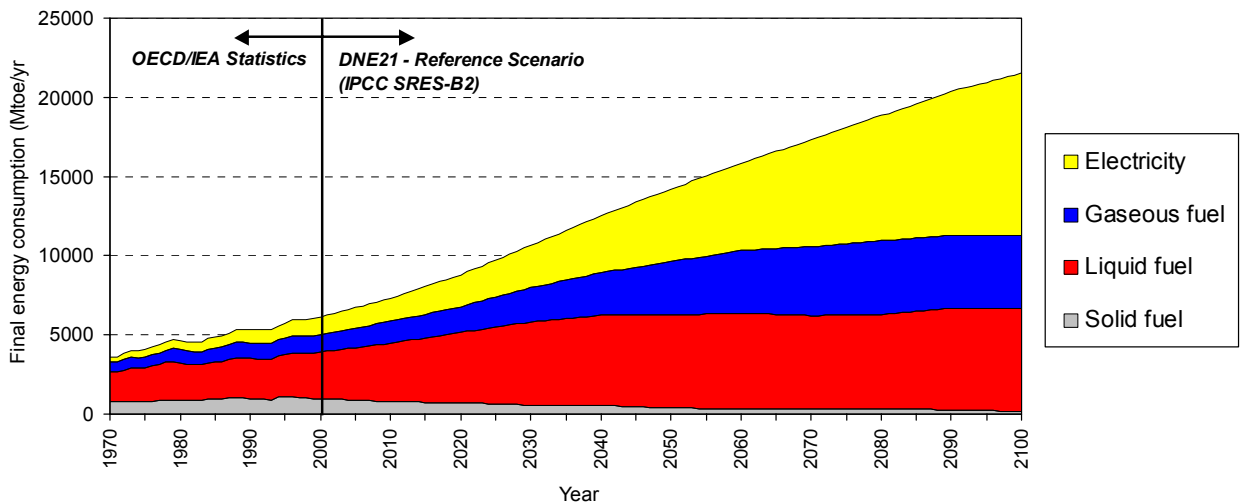


図 2-14 基準最終エネルギー需要シナリオ

### 2.2.3 気候変動モデル関連データ

DNE21 モデルでは、IPCC の第一作業部会( WGI)でもしばしば用いられてきた Wigley らによって開発された MAGICC ( Model for the Assessment of Greenhouse gas Induced Climate Change ) と呼ばれる簡易気候変動モデル<sup>24)25)</sup>に、新データ<sup>26)27)</sup>に基づいて修正を加えた気候変動モデルを統合している。DNE21 モデルでは、二酸化炭素やメタン、亜酸化窒素、ハロカ - ボン(フロン、ハロンなど計 27 種類)の各種温室効果ガスを考慮している。そして、それらの排出量から大気中の濃度、放射強制力、気温上昇(北半球、南半球の陸海別)、海面上昇(半球別に 40 層で表現された 1 次元の湧昇流エネルギーバランス)を計算することができる。また、硫酸化物エアロゾルによる冷却効果も大雑把ではあるが考慮している。本来、気候変動現象は非常に複雑であり、それを記述したモデルは非常に計算量がかかり、スーパーコンピュータを使ってシミュレーション

ョンする必要がある。しかし、この「簡易」モデルは、大気海洋大循環モデルと呼ばれる大規模な気候変動モデルの結果を模擬した結果を、パーソナルコンピュータでも解法できる程度の少ない計算量で解法できる。DNE21 モデルでは、気候変動モデルの入力変数となる各種ガスの排出量に関して、エネルギーシステムからの二酸化炭素と硫黄酸化物の排出量についてはエネルギープロセスモデルとリンクさせている一方、セメント生産、森林破壊による二酸化炭素排出量や、その他の温室効果ガス排出量については、基本的に IPCC の SRES B2 シナリオを外生的に用いている。また、気候変動モデルにおいて計算結果に大きな影響を及ぼすパラメータの一つである 1980 年代の森林破壊による年平均炭素排出量は、IPCC が最良推定値としている 1.1GtC/yr と想定した (IPCC の第 2 次評価報告書<sup>26)</sup>等によると 0.6 ~ 2.6GtC/yr と推定されている)。更に、気温上昇算出に最も大きな影響を及ぼすパラメータである気候感度は、これも IPCC が最良推定値としている 2.5 (IPCC 第 2 次評価報告書では 1.5 ~ 4.5 と推定) を想定した。また、その他、温室効果ガスの放射強制力等のパラメータについては、IPCC の第 3 次評価報告書<sup>27)</sup>に基づいている。

DNE21 モデルにおいては、CO<sub>2</sub> 濃度目標や気温上昇目標を満たしつつ、コスト効率的な温暖化対策を導出するために、この気候変動モデルを線形近似した上で、最適化モデルの制約条件式として完全統合している。なお、最適化モデルにおける 10 年といった時点間隔においては、CO<sub>2</sub> 濃度や気温上昇は緩やかな変化に留まるため、多くの場合、収束計算無し、もしくは、1 回程度の収束計算で極めて良好な近似が得られている。

### 2.3 CO<sub>2</sub> 排出削減効果グラフについて

本書では、多くの CO<sub>2</sub> 排出削減効果のグラフを用いている。このグラフは、排出削減ケースを実現するために、特段の CO<sub>2</sub> 排出削減対策を取らないケース(「リファレンスケース」)と比較し、どのような対策によって排出削減し、排出削減ケースを実現するかを対策技術別に示すためのグラフである。本報告書では、それぞれの削減効果を以下のように定義することによって対策技術別に分解している。

まず、CO<sub>2</sub> 排出削減効果を大きく 4 つの要素 (CO<sub>2</sub> 固定による削減、化石燃料代替による削減、非化石エネルギーへの代替による削減、省エネによる削減) に分解する。

$$E_n = \frac{E_n}{E_g} \times \frac{E_g}{PE_F} \times \frac{PE_F}{PE} \times PE \quad (2-1)$$

ただし、 $E_n$  : CO<sub>2</sub> 正味排出量、 $E_g$  : CO<sub>2</sub> 総排出量、 $PE_F$  : 化石燃料の生産量、 $PE$  : 一次エネルギー生産量

右辺の 1 項目が CO<sub>2</sub> 固定 (CO<sub>2</sub> の地中貯留や海洋隔離、植林) による寄与を、2 項目が化石燃料内の構成による寄与を、3 項目が化石エネルギーへの依存による寄与を、4 項目が一次エネルギー生産量による寄与を示す。

今、CO<sub>2</sub> 排出削減対策を取らないケース(「リファレンスケース」)を上付きの添え字で「REF」と表記し、二酸化炭素排出制約ケース(例えば、大気中 CO<sub>2</sub> 濃度を 550ppmv に安定化する「濃度安定化ケース」)を同じく「CON」と表記すると、 $E_n^{REF} - E_n^{CON}$  をそれぞれの要素に分解することを考える。それを本書では、次式のように分解することとし、第 1 項を CO<sub>2</sub> 固定による削減効果、第 2 項を化石燃料内代替による削減効果、第 3 項を非化石エネルギーへの代替による削減効果、第 4 項を省エネによる削減効果と定義した。

$$\begin{aligned}
 E_n^{REF} - E_n^{CON} &= (E_g^{REF} - D^{REF}) - (E_g^{CON} - D^{CON}) \\
 &= (D^{CON} - D^{REF}) + PE^{CON} \left( \frac{E_g^{REF}}{PE^{REF}} - \frac{E_g^{CON}}{PE^{CON}} \right) + \frac{E_g^{REF}}{PE^{REF}} (PE^{REF} - PE^{CON}) \\
 &= (D^{CON} - D^{REF}) + PE^{CON} \frac{PE_F^{CON}}{PE^{CON}} \left( \frac{E_g^{REF}}{PE_F^{REF}} - \frac{E_g^{CON}}{PE_F^{CON}} \right) \\
 &\quad + PE^{CON} \frac{E_g^{REF}}{PE_F^{REF}} \left( \frac{PE_F^{REF}}{PE^{REF}} - \frac{PE_F^{CON}}{PE^{CON}} \right) + \frac{E_g^{REF}}{PE^{REF}} (PE^{REF} - PE^{CON})
 \end{aligned} \tag{2-2}$$

ただし、 $D$  : CO<sub>2</sub> 固定量

式中のそれぞれの値は、DNE21 モデルを特段の CO<sub>2</sub> 排出削減対策を取らないケースと CO<sub>2</sub> 排出制約ケースの 2 ケースを計算することによって求めることができる。

本報告書では、非化石エネルギーへの代替による削減効果を、更に、それぞれのエネルギー源別に要素分解している。それは、CO<sub>2</sub> 排出制約ケースにおける各非化石エネルギーの一次エネルギー生産量が、CO<sub>2</sub> 排出削減対策を取らないケースからどれだけ増加したかに比例させて、それぞれの削減効果と定義している。

ただし、あくまで本報告書では以上のような定義によって削減効果を対策技術別に分解しているにすぎず、他の定義も可能である。また、ここで行った定義では、CO<sub>2</sub> の地中貯留や海洋隔離に伴う増エネルギーは、主として最終需要部門で生じる省エネルギー効果と総計され、「省エネによる削減効果」として表示される。つまり、CO<sub>2</sub> の地中貯留や海洋隔離に要するエネルギーを除いた本来の省エネ分は、「省エネによる削減効果」として表示される効果よりも大きいことにも注意されたい。

## 参考文献

- 1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 / (財)地球環境産業技術研究機構、「平成5年～13年度「地球再生計画」の実施計画作成に関する調査事業報告書」(1994～2002)
- 2) Y. Fujii, and K. Yamaji, “Assessment of technological options in the global energy system for limiting the atmospheric CO<sub>2</sub> concentration”, *Environmental Economics and Policy Studies*, **1**, 113-139 (1998).
- 3) 山地憲治、藤井康正、「グローバルエネルギー戦略」電力新報社 (1995)
- 4) K. Yamaji, J. Fujino, K. Osada, Global energy system to maintain atmospheric CO<sub>2</sub> concentration at 550 ppm. *Environmental Economics and Policy Studies*, **3**, 159-171, (2000).
- 5) 茅 編、「CO<sub>2</sub>削減戦略 - 地球を救うシナリオ」, 日刊工業新聞社 (2000)
- 6) N. Nakicenovic (eds.), “Emissions Scenarios”, Cambridge University Press, 2000.
- 7) OECD/IEA, “Energy Balances of OECD Countries: 1999-2000”, OECD, 2002
- 8) OECD/IEA, “Energy Balances of Non-OECD Countries: 1999-2000”, OECD, 2002
- 9) C.D. Keeling and T.P. Whorf, “Atmospheric CO<sub>2</sub> records from sites in the SIO air sampling network”, In: *Trends: A Compendium of Data on Global Change (Online)*. Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), Oak Ridge National Laboratory, 2002. <http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/trends.htm>
- 10) P.D. Jones, D.E. Parker, T.J. Osborn, and K.R. Briffa, “Global and hemispheric temperature anomalies-land and marine instrumental records”, In: *Trends: A Compendium of Data on Global Change (Online)*. Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), Oak Ridge National Laboratory, 2002. <http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/trends.htm>
- 11) IPCC WGIII, “Climate Change 2001 – Mitigation”, Cambridge University Press, 2001
- 12) H-H. Rogner, “An Assessment of World Hydrocarbon Resources”, *Annu. Rev. Energy Environ.* **22**, 217-262 (1997).
- 13) N. Nakicenovic, A. Grübler and A. McDonald, “Global Energy - Perspectives”, Cambridge University Press (1998).
- 14) 山本、藤野、山地、「多地域型世界土地利用エネルギー・モデルによるバイオエネルギー供給可能量の評価」, 電力中央研究所研究報告 Y98023、1999
- 15) 山地 編、「バイオエネルギー」, ミオシン出版、2000
- 16) N. Nakicenovic, “Long-Term Strategies for Mitigating Global Warming”, *Energy* (1993).
- 17) EPRI/DOE, “Renewable Energy Technology Characterizations”, EPRI Topical Report TR-109496 (1997).
- 18) NEA/IEA, “Projected Costs of Generating Electricity: Update 1998”, OECD, 1998.
- 19) International Energy Agency, *World Energy Outlook: 1998 edition* (OECD/IEA, 1998).
- 20) H. Ishitani, and J.B. Johansson, “Energy Supply Mitigation Options,” in *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses* (eds Watson, R.T. et al.) 587-647 (Cambridge University Press, 1996).
- 21) 藤井、「エネルギーシステムにおける CO<sub>2</sub> 問題対策の評価」, 東京大学学位論文、1992
- 22) J. David and H. Herzog, “The Cost of Carbon Capture”, In: *Proceeding of GHGT-5*, 985-990, 2000.
- 23) UN, “World Population Projections to 2150”, UN, 1998
- 24) T.M.L. Wigley, “Balancing the carbon budget. Implications for projections of future carbon dioxide concentration change”, *Tellus* **45B**, 409-425 (1993).

- 25) T.M.L. Wigley and S.C.B. Raper, "Implications for climate and sea level of revised IPCC emissions scenarios", *Nature* **357**, 293-300 (1992).
- 26) D. Schimel, *et al.*, "Radiative Forcing of Climate Change," in *Climate Change 1995: The Science of Climate Change* (eds Houghton, J.T., *et al.*) 65-131 (Cambridge University Press, 1996).
- 27) IPCC WGI, "Climate Change 2001 – The Scientific Basis", Cambridge University Press, 2001