

# 超長期世界エネルギー需給モデルによる シミュレーション分析 中国に関するケーススタディー

Simulation Analysis by a Model Projecting World Energy Supply  
and Demand Over the Very Long Term  
— A Case Study on China —

松井賢一 (Ken-ichi Mastui)\* 伊藤浩吉 (Hiroyoshi Ito)<sup>†</sup>  
山田昭 (Akira Yamada)<sup>‡</sup>

**要約** 中国は昨年（1994年）5月、2050年までに現在の日本の9倍にあたる3.0～3.5億kWの原子力発電所を建設する計画を発表した。本研究では、中国の原子力発電能力が従来予想されていた2000年500万kW、2030年1,100万kW、2050年1,600万kW、2100年3,200万kWを基準ケースとし、原子力発電能力を2030年1億6,000万kW、2050年3億2,000万kW、2100年3億7,000万kWと拡大したケースを原子力拡大ケースとして、炭酸ガス排出量にどのような影響がでるか等のシミュレーションを行った。中国の炭酸ガス排出量は、原子力拡大ケースでは、基準ケースに比べ、2050年で約4.5億トン、2100年で約4.6億トン減少すると推定された。

**キーワード** 地球環境問題、エネルギー需給モデル、経済成長、経済発展段階、炭酸ガス排出量、中国

**Abstract** In May 1994, China announced a plan to construct nuclear power plants with total output of 300 to 350 million kW by the year 2050, nine times that of the current nuclear power plants in Japan. In this study, simulations were made to see the effect of nuclear power plants on emission of carbon dioxide gas by using conventionally expected capability of nuclear power generation in China as BAU (Business As Usual) cases, namely 0.5 million kW in 2000, 11 million kW in 2030, 16 million kW in 2050 and 32 million kW in 2100, as well as using expanded cases of nuclear power, namely 160 million kW in 2030, 320 million kW in 2050 and 370 million kW in 2100. The current study estimated that the emission of carbon dioxide gas in China would be reduced by approximately 450 million tons in 2050 and 460 million tons in 2100 in the expanded cases of nuclear power in comparison with the BAU cases.

**Keywords** global environmental problem, energy demand and supply model, economic growth, economic development, emission of carbon dioxide gas, China

\* 龍谷大学国際文化研究所

<sup>‡</sup> (株)原子力安全システム研究所 社会システム研究所

<sup>†</sup> 日本エネルギー経済研究所

エネルギー計量分析センター

## 1. 超長期世界エネルギー需給モデルの構成

### 1.1 モデルの概要

#### (1) 本モデルの目的

本モデルは、超長期のエネルギー需給構造の決定メカニズムを定量化することにより、炭酸ガスを主因とする地球温暖化問題に対し、地球規模で長期にわたって何が起こるのか、環境税等の地球環境対策が世界の経済成長、エネルギー需給にどのような影響を与えるのか、そして地球環境問題に対して日本は何ができるのか等を検討するための定量的な情報を提供しうることを目的として開発したものである。

温暖化問題に関する世界モデルは海外では既にいくつかのモデルが開発され、それを用いて様々な試算が行なわれている。しかし、こうした問題に対して「日本は何ができるのか」、「世界の中で日本の経済やエネルギー需要水準がどのような位置づけになるのか」等、日本が明示的に扱われていないことなどにより、充分に対応ができない。また、モデル構造上も改善の余地があると考えられるが、本来モデルとは、目的が違えば構造も異なるし、解も異なってくるものである。

#### (2) モデルの特徴

以上のことから、エネルギー計量分析センター(EDMC)では次のようなことを考慮しつつモデル開発を行った。

地域分類としては、将来のエネルギー・環境問題を考える際、その動向が極めて大きな影響を及ぼすであろうアメリカ、中国、旧ソ連、日本を明示的に扱うとともに、今後、世界経済・エネルギー需給に大きな影響を及ぼすと考えられる環太平洋地域とりわけアジア地域についても明示的に扱う。

既存モデルでは充分扱われていない「経済発展段階と人口やエネルギー消費」との関係を示的に扱う。これと関係して「弾力性の可変性」等の相互関連をモデルに織り込む。これは長期の問題を扱う場合、極めて重要な問題であるが、これまでは外生的あるいは相互に独立的に扱わ

れているといつてよい。

再生可能エネルギーに関する具体的な導入(コスト、利用可能量)を取り上げる。

コストや潜在的な利用可能上限等の条件を与えて、競合性・経済合理性、市場規模等に基づいて導入量を決定するモデル化を行う。

食料、鉄鋼、自動車などの需給を取り上げる。超長期の展望を行う場合、人口、食料、エネルギー問題は極めて重要なファクターであり、またこれらは密接に関連しているため、食料需給についてもモデル化を行う。

また、「鉄鋼」は具体的にシナリオを見ていくうえで、代表的な基礎物資としてモデルで取り扱う。「自動車」は生活水準、ライフスタイルを示す重要な指標であると同時に、将来の交通用エネルギーを決定する要素である。モデルで明示的に扱うことにより省エネ(燃費の改善等)の政策分析も可能となる。

土地利用を考慮する。

人口、食料(耕地面積)、バイオマスエネルギーとの相互依存・トレードオフの関連を明示的にとらえる。

価格均衡経路を検討する。

枯渇性エネルギー資源需給とりわけ資源埋蔵量と需要との整合をはかるため、需給が均衡するエネルギー価格の問題も扱えるようにモデル化を行う。

環境税(炭素税)の地域別導入を可能とする。様々なエネルギー価格政策に対応させるため、各地域の経済発展段階に応じた負担(あるいは援助)等を明示的に扱えるようにする。

温暖化効果を算定する。

温暖化効果を計量的に把握するために、炭酸ガスの排出に伴う気温上昇を測定するモデルを加える。

“OPEN BOX APPROACH”をとる。つまり分かりやすく、構造が明快なモデルとする。

温暖化問題は、さまざまな分野の人の意見交換が重要。そのためにもモデルの計算結果の意味やその出てきた構造が読み取れることが必要。また、さまざまな政策分析(省エネ、代エネ(新エネ)、炭素税など)が可能なシミュレ

ーション型のモデルとする。

### (3) モデルの構成

モデル構成の概略は以下のとおりである。

計算期間

基準年を1990年とし、2100年までを対象とする。計算の年刻みは(1990, 2000, 2010, 030, 2050, 2070, 2100年)とする。

対象地域

日本を明示化し、以下のような基準に従い12地域に分割する。

潜在大国 : 中国, インド等, 旧ソ連東欧  
成長率の高い地域: NIES/ASEAN

資源消費先進圏 : アメリカ, OECD 欧州, 日本  
資源生産国 : 中東, オセアニア

途上圏 : アフリカ, 中南米, その他

エネルギー源の種類

エネルギーデータとしては、IEAのエネルギーバランス表をEDMCで統合・加工したデータを利用している(実績値1971-1990年)。エネルギー源は以下のような分類で扱っている。

最終エネルギー需要: 固体, 石油, 天然ガス, 電力

一次エネルギー需要: 固体, 石油, 天然ガス, 水力, 原子力, 再生可能エネルギー

参考までに主な世界モデルと本モデルとの比較を掲げておく。

## 1.2 モデルの概要

(1) 発展段階モデルであること(途上国を含む超長期問題を扱っている)。

基本的メカニズムを図1-1に示す。つまり発展段階を一人あたり所得で代表させ、その変化によって人口の伸び、経済成長率、エネルギー弾性値などが変化する形になっている。こういう機構を取り入れることによって、経済成長の加速化現象、エネルギー需要の工業化にともなう急拡大、経済の成熟化(あるいはエネルギー消費機器普及の飽和)による弾性値の低下などを明示的に取り入れることができる。これに対し、これまでのモデルではこうした発展過程が考慮されておらず、経済や人口の伸びなどは通常外生化されている。つまり、現在発展途上にある国が、将来とも発展途上国であるわけではなく、やがて先進国に仲間入りし、そのときのエネルギー消費の構造は途上国の時代とは異なってくると考えたほうがよいということである。

なお、この際得られる飽和曲線(GDPなど)はロジスティック曲線を更に一般化したものと見ることができる。

モデル名	モデルの型	計算期間	地域区分	エネルギー源
本モデル	発展段階型 部分均衡	2100年	12	最終: 4 一次: 6 BT: 7
EDMONDS-REILLY	部分均衡 シミュレーション型	2095年	9	最終: 4 一次: 6
GREEN	逐次決定型 動学的一般均衡	2050年	12	最終: 2 一次: 4 BT: 3
GLOBAL-2100 (MANNE-RICHELS)	最適化型	2100年	5	BTを含み9

(注) BT: バックストップテクノロジー

表1-1 主要な世界エネルギーモデル構成の比較

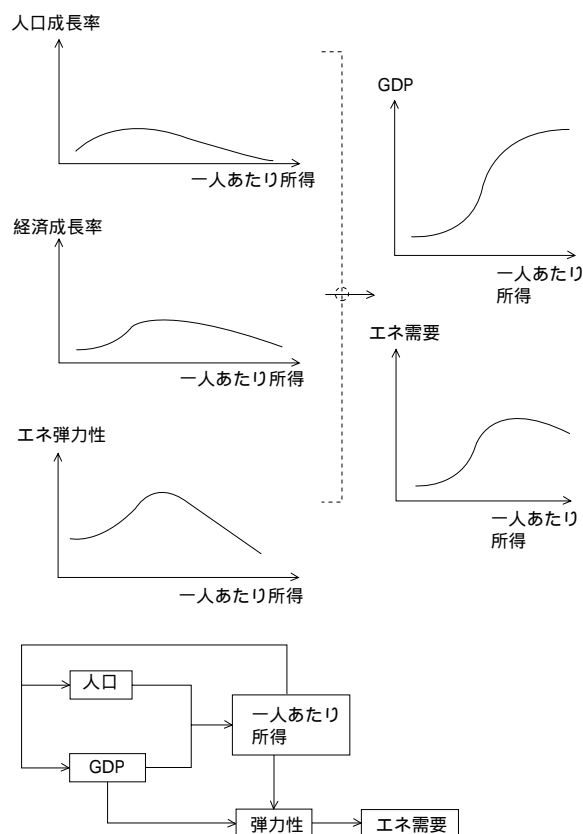


図 1 - 1 発展段階モデルの基本的メカニズム

## (2) 価格効果の考え方

以上を所得効果（所得水準の変化にともなう構造変化）とすれば、エネルギー面では更に価格効果が考慮されている。これは以下のように分けられる。

エネルギー高価格化に伴う需要削減効果

- a. ラッシュ・タトム効果：いわゆるエネルギー高価格化にともなう生産関数の下方シフトによる経済成長率の低下のことである。ここではその弾力性を日本における計測例などを参考にして - 0.05 と想定している。
- b. 需要の価格弾力性：最終需要の価格弾力性は - 0.2 と想定されている。こうした想定に関しては以下の文献を参照した（Bohi[11], Pindyck[5], 大山・中島[6], 室田・中上・伊藤[7]）。

代替効果

ここでは最終需要 i 階と電源構成に関して代替効果を含めている。具体的な想定値は後述する。

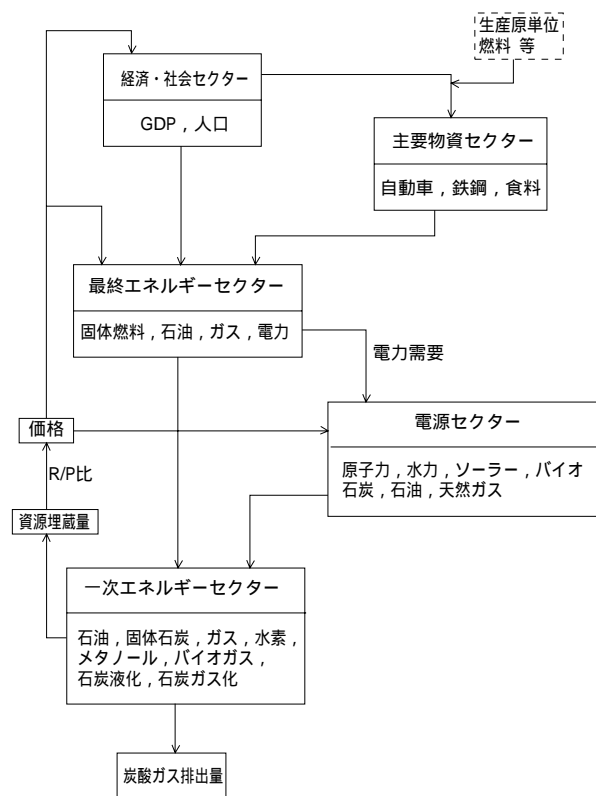


図 1 - 2 EDMC 超長期世界エネルギー需給モデルの全体構成

## 1.3 モデルの全体構成

図 1 - 2 にモデルの全体構成を示す。モデルは大別して次の 6 つのセクターに分けることができる。

- ・ GDP・人口セクター
- ・ 主要物資生産セクター
- ・ 最終需要セクター
- ・ 電源構成セクター
- ・ 一次エネルギーセクター

図に従って流れを上からみていくと、まず人口や経済成長率と一人あたり所得との関係が示されている。こうして決まった GDP や人口、生産効率に基づいて主要物資の生産（食料生産、鉄鋼生産、自動車保有）が決定される。この物資生産や GDP、エネルギー価格が弾力性を通じてエネルギー最終需要を決めている。この最終需要は更にエネルギー源別に分かれる（固体、石油、天然ガス、電力）。この算出にあたっては各エネルギー源のシェアが発展段階と相対価格によって影響されるものとしている。

つまり長期効果としての流体化，電力化，短期効果としての相対価格の変動（例えば炭素税による固体燃料の相対的高価格化によるシェアの減少など）によってシェアが決定されるのである．

こうして最終需要が決められたら，それは転換部門を経て一次需要に戻される．まず電力は発電源別に分けられる．水力，原子力が想定された後，バックストップテクノロジーに基づく再生可能エネルギーによる電力生産，化石燃料間でのシェアが発展段階と各燃料の相対価格によって決定される．なおここで発電効率も発展段階にともなって変化していくことが想定されている．それ以外の転換過程（石油精製，コークス製造，都市ガス製造など）に関しては一定の転換比率を地域毎に乗じて求めている．こうして化石燃料（固体，石油，天然ガス）の一次需要が求められたらそれは供給側（資源賦存量など）と比較されエネルギー価格の動きに反映されることとなる．こうして需給水準が決まったら，化石燃料の使用量から炭酸ガス排出量が求められ，更にそれが炭酸ガス濃度を経て温暖化効果に結び付けられることとなる．

## 1.4 モデルの具体的な内容

### （１）人口の算出

人口の場合，発展段階との関係はかなり明示的に議論されている．特に重要なのは図 1 - 3 に示されるような低所得の罫である．つまり一人あたり所得が伸びないから，人口増加率が高く，これが経済成長の足を引っ張るという形である．ここでは以下のような推定結果を利用した．なお推定対象は 89 年における 12 地域である（以下の推定でも同じ）．この式に基づくと，所得上昇による人口の伸びの変化は以下ようになる．

一人あたり所得	人口伸び率
1.0 (千ドル/人)	1.7 (%)
5.0	1.4
20.0	0.8

実際の計算はまず推定結果からダミー部分を除き，次に以下のように地域・時間変数を付加することによって求められている．地域・時間変数は各地域における特殊事情，時間的構造変化の地域的特性

$$\text{LOG(POPR)} = 0.280 - 0.0422 \times \text{PCY} + 0.640 \times \text{DUM34} \quad (1)$$

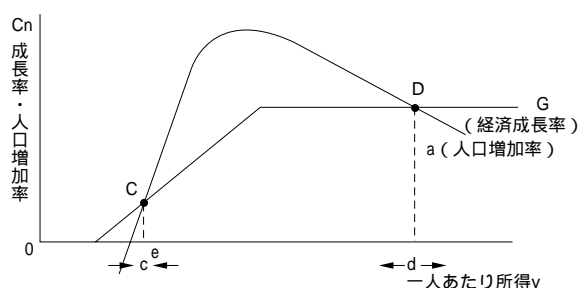
(2.8)      (-2.5)      (1.9)

$$R^2 = 0.543, \text{SE} = 0.41, \text{D/W} = 1.77$$

POPR : 人口の伸び率(%), PCY : 一人あたり所得(千ドル/人)

DUM34 : 中東, アフリカ = 1

$$\text{人口伸び率(地域, 時間)} = \text{推定結果} + \text{地域} \cdot \text{時間変数} \quad (2)$$



(資料) 安場保吉「経済成長論」筑摩書房，1980年

図 1 - 3 低所得均衡の罫

などを考慮するために含まれている．

### （２）経済成長率の算出

ここでは成長の加速化現象を扱うために図 1 - 4 のようなテーブル関数を想定している．すなわち一人あたり所得が 1,000 ドルから 3,000 ドルの間で成長率は 7 % という高い値を保つが，それ以前でも，

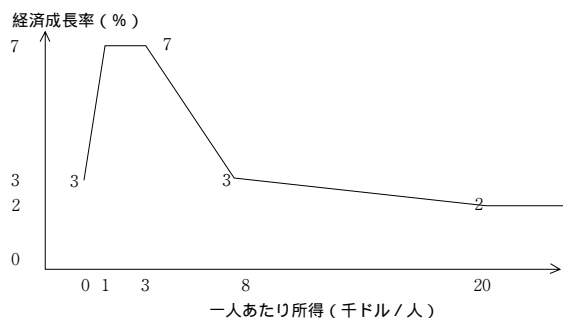


図 1 - 4 一人あたり所得水準と経済成長率

$$\text{経済成長率(地域, 時間)} =$$

$$f(\text{一人あたり所得, 地域} \cdot \text{時間変数, エネルギー価格}) \quad (3)$$



以降でもそれを下回るとい形になっている．実際にはこれに更にエネルギー価格の影響（ラッシュ・タトム効果）と地域・時間変数を加えて成長率が求められている．

### （３）主要物資の生産（食料生産，鉄鋼生産，自動車保有）

本モデルでは，経済発展にともなう鉄鋼需要や自動車の保有台数，人口増に伴う食料需給を組み込んでいる．これは以下の理由による．

最終エネルギーの規模のチェックを行うためである．通常は最終需要を産業，運輸，民生と分けるが，ここでは発展的需要（鉄鋼＋自動車＋民生用電力）とその他に最終需要を分けてみる．前者の分け方は細かい検討が可能な先進国では有効だが，発展途上にあり，その内容が大幅に変化する途上国にあっては必ずしもそうではない．

こうすることによって省エネの具体策が検討できるようになる．例えば鉄鋼業の省エネ化や自動車の燃費向上といった形での検討が可能になる．

エネルギー需要の経済発展にともなう変化を具体的にみることができる．

前半：重化学工業化：鉄鋼などの需要が増大

後半：耐久財（自動車，家電）の使用によるエネルギー需要の増大

モデル化にあたっては一人あたりGDP（発展段階）に基づき，以下のような式を用いている．

#### <鉄鋼>

$$STL = -586.5 + 101.6 \times \text{LOG(PCY)} + 330.6 \times \text{DUM7} \quad (4)$$

( - 3.4) (4.8) (2.9)

$$R^2 = 0.829, SE = 98.4, DW = 1.45$$

STL：一人あたり鉄鋼消費量，PCY：一人あたりGDP

#### <自動車保有>

$$CAR = 639.8 - 69.3 \times \text{LOG(PCY)} + 938.9 \times \text{DUM6} \quad (5)$$

(3.0) ( - 2.7) (6.9)

$$R^2 = 0.904, SE = 113.1, DW = 2.15$$

CAR：乗用車一台あたり人口，PCY：一人あたりGDP

#### <穀物消費>

$$\text{FODC} = -100.1 + 49.69 \times \text{LOG(PCY)} + 444.2 \times \text{DUM1} - 90.6 \times \text{DUM7} \quad (6)$$

( - 0.8) (3.2) ( ) ( - 1.2)

$$R^2 = 0.884, SE = 63.5, DW = 2.44$$

FODC：一人あたり穀物消費（間接分含む），PCY：一人あたりGDP

### （４）エネルギー最終需要合計の所得弾力性と価格弾力性

$$\text{LOG(FEN)} = A + b \times \text{LOG(GDP)} - c \times \text{LOG(PE)} \quad (7)$$

FEN：エネルギー最終需要（MTOE），GDP：GDP

PE：エネルギー価格（ドル／バレル，89年価格）

b：所得弾力性，-c：価格弾力性

所得弾力性（b）に関しては以下の式から求める．

$$\text{LOG(b)} = 0.1734 - 0.0615 \times \text{PCY} + 1.375 \times \text{DUM4} \quad (8)$$

(1.1) ( - 4.6) (3.7)

$$R^2 = 0.787, SE = 0.35, D/W = 2.1$$

DUM4：中東 = 1

本モデルでは最終需要を発展的需要（鉄鋼用，自動車用）とその他用に分類しており，前者については生産量・保有台数に（想定した原単位）を乗じてもとめ，後者については基本的には上記の式から求められる．

この式を使うと，一人あたり所得と所得弾力性の関係は以下ようになる．

一人あたり所得	エネルギー所得弾力性
1.0（千ドル／人）	1.12
5.0	0.87
20.0	0.35

なお価格弾力性に関しては - 0.2 と想定した．

### （５）再生可能エネルギーの導入メカニズムとエネルギーの“均衡価格”

#### <基本的な考え方>

まず主役となる化石エネルギー源（枯渇性エネルギー）があると考ええる．

現在の主役は石油である．これが21世紀前半に液化石炭に交代するものとする（石油の前は石炭）．

上の2つにホテリング定理を当てはめると，図1 - 5が描ける(DASGUPTA & HEAL[11])．これで経時的なエネルギー価格が決定されるものとする．ここで長期的な需給関係はR/P比の変化で表されるものとする．つまり各期（フロ

$$S/R = 1 - \exp(b - aP) \quad (9)$$

S: 価格Pの供給量, R: このときの利用可能量, P: エネルギー価格

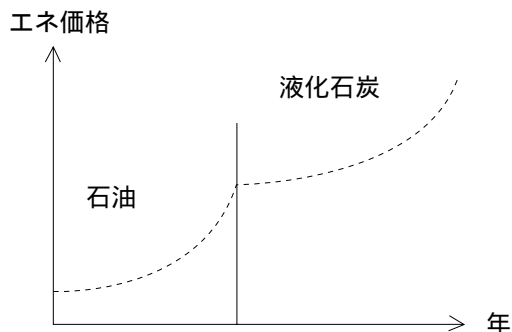


図1 - 5 化石燃料価格の決定

一)での需給均衡価格を求めるのではなく、ストック面（資源の残存量と累積需要との比）によって価格が動いていくと考えるのである。これはホテリング定理において、将来の割引率がR/P比の減少と共に、高まると考えてもよいだろう。つまり価格の上昇率をR/P比に反比例するものと想定するのである。

再生可能エネルギーは、バックストップテクノロジーと考える。しかしながらその供給量は各時点で有限とする（一定価格で無制限には入らない）。

再生可能エネルギーの供給曲線を、上のことを考えて10%普及時と90%普及時の価格（各PA, PB）、その時点での究極利用可能量（R）とし、以下の式から供給曲線を求める。もちろんRは時間とともに増加する（量産効果等）のでその可能性も含める（図1 - 6）。

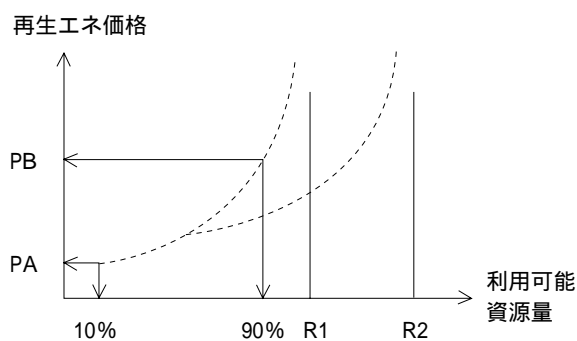


図1 - 6 再生エネルギー価格

#### < 利用する資料 >

各再生可能エネルギーに関する利用可能量Rや導入価格(PA, PB)を決めていく必要があるが、それにはJohansson et al[12]を用いる。こうした技術・経済的知見に基づいて、本書では2050年までの再生可能エネルギーを重視した場合（RIGES: RENEWABLES-INTENSIVE GLOBAL ENERGY SCENARIO）の展開が行われており（表1 - 2）、そこでは需要規模をICPP（気候変動に関する政府間パネル）とほぼ同じに置いて、供給側で大胆に再生可能エネルギーの導入を図ることにより、炭酸ガス排出量の削減を図っている。この意味でも再生可能エネの可能性を積極的な形で示したシナリオとしても利用が可能である。

		1985年	2050年
IPCC	電力(TWh)	8,432	31,639
	直接燃料(EJ)	219	288
RIGES	電力(TWh)	9,239 (100)	32,376 (100)
	うち再生エネ(EJ)	1,880 (20)	20,128 (62)
	燃料(注)	287 (100)	395 (100)
	うち再生エネ(EJ)	0 (0)	181 (46)
	炭酸ガス(C - MT)	5,633 (100)	4,191 (74)

(注) 電力用も含む 再生可能エネ: 水力、ソーラー等(風力など含む)、バイオマス

表1 - 2 再生可能エネルギー等に関するIPCCとRIGESの相違

#### (利用方法)

##### 資源利用量(R)について

この本では、具体的に再生可能エネルギーの利用可能量が示されている。幸いにして地域区分もほぼわれわれの用いるものと同様（唯一の違いは南アジアとアセアン等が分けられないことだが、ここでは簡単な比例配分で配分した）なのでこの数字を参考として地域別の資源利用量を決めた。なおここで扱う再生可能エネルギーの種類は、以下になる。

ソーラー等: 太陽光, 太陽熱, 風力を含む  
バイオマス: エタノール, メタノール, バイオ

ガス等  
水 素：二次エネルギーであり、ソーラー等、バイオマスから作られる。

再生可能エネルギーの価格について(PA,PB)  
これについてもかなり具体的な仮定が示されているのでこれを参考とすることにした(表1-3)。但し、問題なのは化石燃料価格が恣意的に決められていることであり、この点に関する留意が利用にあたっては必要である。

	\$/GJ	\$/BBL	
原油		20	
灯油	5.3	32	
ガソリン	9.18	56	
電力	25.0	152	
エタノール	11.0	67	石油代替
水素 / SOLAR	28.5	85	石油 / ガス 50 : 50
水素 / BIOMAS	13.9	85	石油 / ガス 50 : 50
メタノール	13.4	81	石油代替
バイオガス	1.05	6.4	ガス代替

IBBL = 6.1GJ

表1-3 再生可能エネルギーの価格想定

#### (6) 土地利用(穀物生産とバイオマスとの関係)

今後の供給源として再生可能エネルギーに重点を置いている。ここでバイオマスの役割は大きい。これの実現可能性を見るためには食料生産の方も見なければならない。つまり土地の取り扱いである。

耕地面積は現在上の想定とは反対に余り増えないと見られている。

他方で人口増のため食料生産に必要な耕地面積は拡大する。日経センター予測[17]によれば、もしも耕地面積があまり伸びないとすると、耕地面積haあたり扶養人口は現在の3.1人から2010年には4.5人へと増大するという。これは特に途上国で著しい(現在の3.4人が2010年には5.7人に)。

以上のようなことから、エネルギーだけでな

く食料(特に穀物)生産と土地利用可能性の面を同時にみていく必要があり、本モデルでは土地の生産性を考慮し下記のように必要耕地面積を求めた。

$$\text{耕地面積} = \text{穀物消費} \times \text{土地利用原単位} \quad (10)$$

#### (7) エネルギー価格と炭素税の想定

##### エネルギー価格

エネルギー価格としては固体(石炭)、石油、天然ガス、電気を取り上げた。前3者については最終需要と一次需要との2種類がある。ここでは以下のような形で想定している。

a) GDP成長率や最終需要計などに影響を与えるエネルギー価格として“代表エネルギー価格”があるものとする。ここではそれを石油価格としている。このためエネルギー価格の単位をドル/バレル(89年価格)とする。

b) 他の燃料の価格はこの“代表価格”との相対で決まるものとする。この相対比は、各燃料の単位容量あたり熱量、利便性、資源的希少性、代替可能性などさまざまな需給要因によって決まってくるが、ここでは以下のような比率を用いた。

	石油	石炭	天然ガス	電気
一次	100	50	70	
二次	(1.1)	(1.3)	(1.6)	700

なお一次と二次との価格比率は(加工度などを勘案して)上のような値を用いている。

##### 炭素税について

BAUケースでは税額はゼロとする。モデルとしては様々なエネルギー価格政策に対応させるため、各地域の経済発展段階に応じた負担(あるいは援助)等を明示的に扱えるようにしてある。

#### (8) 最終需要エネルギー源別シェア

ここでは最終需要としては固体、石油、天然ガス、電気の4種を取り上げている。ここでも発展段階による変化と、相対価格による変化との2つからシェ



アが決まる形となっている．

$$\begin{aligned} \text{LOG(ESHARE}_i) = & f(\text{PCY}) \times \{b_0 + b_1 \times \text{LOG(PCLF)} + b_2 \times \text{LOG(POLF)} \\ & + b_3 \times \text{LOG(PNGF)} + b_4 \times \text{LOG(PELF)}\} \quad (11) \end{aligned}$$

ESHARE<sub>i</sub> : 第 i 源のエネルギーシェア ( % ), PCY : 一人あたり所得  
PCLF : 固体燃料価格 ( 最終需要ベース, ドル / バレル )  
POLF : 石油価格 ( " ), PNGF : 天然ガス価格 ( " )  
PEL : 電力価格 ( " )

発展段階による変化

#### a . 流体化現象

これは経済が発展するにつれて，需要構成が固体から液体（気体）燃料へとシフトする現象を意味する．以下のような推定結果を利用した．

$$\begin{aligned} \text{CLS} = & 15.17 - 0.589 \times \text{PCY} + 13.1 \times \text{DUMCL} + 45.1 \times \text{DUM5} \quad (12) \\ & (2.8) \quad (-1.3) \quad (2.0) \quad (3.6) \\ R^2 = & 0.787, \text{SE} = 0.35, \text{D/W} = 2.1 \\ \text{CLS} : & \text{固体燃料のシェア} \\ \text{DUMCL} : & \text{アメリカ, 中国, 欧州OECD, オセアニア,} \\ & \text{旧ソ連東欧, インド等} = 1 \\ \text{DUM5} : & \text{中国} = 1 \end{aligned}$$

この式を使うと，一人あたり所得と固体燃料のシェアとの関係は以下ようになる．

一人あたり所得	固体燃料のシェア ( % )
1.0 (千ドル / 人)	14.6
5.0	12.3
20.0	3.4

なお計算にあたっては，固体燃料のシェアは 3 % 以下にはならないものとした．

#### b . 電力化現象

一人あたり所得が上昇するにつれ，電力のシェアが上昇する傾向である．これは以下のように推定された．

$$\begin{aligned} \text{LOG(ELS)} = & 2.44 + 0.0213 \times \text{PCY} - 0.51 \times \text{DUM5} \quad (13) \\ & (28.7) \quad (2.9) \quad (-2.6) \\ R^2 = & 0.643, \text{SE} = 0.18, \text{D/W} = 2.2 \\ \text{ELS} : & \text{電気のシェア} \quad \text{DUM5} : \text{中国} = 1 \end{aligned}$$

この式を使うと，一人あたり所得と電気のシェアとの関係は以下ようになる．

一人あたり所得	電気のシェア ( % )
1.0 (千ドル / 人)	11.7
5.0	12.7
20.0	17.1

#### c . 石油と天然ガスの配分について

流体エネルギー燃料間の配分については以下の式を利用した．

$$\begin{aligned} \text{NGS}/(\text{NGS} + \text{OLS}) = & 0.10 + 0.007 \times \text{PCY} + 0.24 \times \text{DUM9} \quad (14) \\ & (2.7) \quad (2.1) \quad (2.7) \\ R^2 = & 0.465, \text{SE} = 0.09, \text{D/W} = 1.65 \\ \text{NGS} : & \text{天然ガスのシェア, OLS} : \text{石油のシェア, DUM9} : \text{旧ソ連東欧} = 1 \end{aligned}$$

この式によれば，一人あたり所得と流体燃料中に占める天然ガスのシェアとの関係は以下ようになる．

一人あたり所得	流体燃料中の天然ガスシェア
1.0 (千ドル / 人)	0.11 %
5.0	0.14
20.0	0.24

#### 相対価格の変化によるシェアの変化

基本的には(5)式によるわけだから，自己並びに交差価格弾力性があればよい．ここでは以下の文献（Bohi[5], Pindyck[14], 大山・中島[6], 室田・中上・伊藤[7]）を参照して表 1 - 4 のように想定した．

	石炭	石油	天然ガス	電気
石 炭	- 0.8	0.30.3	0.1	0.1
石 油		- 0.6	0.5	0.1
天然ガス			- 0.6	0.1
電 気				- 0.2

表 1 - 4 価格弾力性の想定（最終需要）

#### ( 9 ) 一次需要と二次需要との関係

電力に関しては送配電ロスがあるので発電電力量は最終需要を上回る．また化石燃料についても転換や輸送ロスがあり，これは地域によっても異なっている．ここでは実績を参考にしながら，表 1 - 5 のような想定を置いた．

#### ( 10 ) 発電効率について

経済が近代化するにつれ発電効率も向上する．こ

	石炭	石油	天然ガス	電力
アメリカ	1.10	1.05	1.20	1.15
中南米	1.30	1.10	1.45	1.15
アフリカ	2.00	1.08	2.10	1.15
中東	1.00	1.10	1.50	1.20
中国	1.10	1.15	1.50	1.20
日本	1.25	1.05	1.00	1.10
欧州(OECD)	1.20	1.10	1.10	1.10
オセアニア	1.20	1.05	1.30	1.15
旧ソ連東欧	1.50	1.20	1.50	1.15
NIES/ASEAN	1.10	1.10	1.50	1.10
インド等	1.20	1.08	1.20	1.20
その他	1.10	1.05	1.30	1.15

表 1 - 5 最終需要と一次需要との関係

ここでは以下のような式を用いている。

$$\text{LOG(ELEF)} = 3.45 + 0.072 \times \text{LOG(PCY)} \quad (15)$$

(109.6) (4.6)

$R^2 = 0.646$ ,  $SE = 0.08$ ,  $D/W = 1.26$

ELEF : 発電効率 (%)

この式によれば、一人あたり所得の上昇と発電効率改善との関係は以下ようになる。絶対値自体は統計のとり方によってかなり異なるようであるが、ここでは I E A 統計によっているためこのような値となっている。

一人あたり所得	発電効率
1.0 (千ドル/人)	31.5 %
5.0	35.4
20.0	39.1

#### (11) 発電源構成

発電源としては固体、石油、天然ガスなどの化石燃料ならびに水力、原子力、再生可能エネルギーがある。ここでは後者の3つについては外生としてある。これは経済変数と言うよりも、技術的、政治的、社会的、自然的条件のもとで決められると考えたからである。

石炭、石油、天然ガス火力のシェアに関しては、

$$\begin{aligned} \text{ELG} &= \text{ELGEN} + \text{NUC} + \text{HYD} & (16) \\ \text{ELGENP} &= \text{ELGEN}/\text{ELEFF} \times 100 & (17) \\ \text{ELELRTO} &= \text{ELCL} \times 100/\text{ELGENP} & (18) \\ \text{ELNGRTO} &= \text{ELNG} \times 100/\text{ELGENP} & (19) \\ \text{EOLRTO} &= 100 - (\text{ELCLRTO} + \text{ELNGRTO} + \text{ELNRTO}) & (20) \end{aligned}$$

ELG : 発電量 (出力ベース)  
 ELGEN : 固体、石油、天然ガス、再生可能エネルギーによる部分 (出力ベース)  
 NUC : 原子力 (出力ベース), HYD : 水力 (出力ベース)  
 ELGENP : 固体、石油、天然ガス、再生可能エネルギーによる部分 (入力ベース)  
 ELCLRTO : 石炭火力比率, ELNGRTO : 天然ガス火力比率  
 ELNRTO : 再生可能エネルギー比率, EOLRTO : 石油火力比率

ここでも発展段階による変化と相対価格による変化との2つからシェアが決まる形となっている。

#### 発展段階による変化

化石燃料に関しては構造変化を以下のような形で取り入れた。こうして石炭火力と天然ガス火力のシェアが決まるので、それに再生可能エネルギーのシェアを与えて、残りを石油火力とした。

$$\begin{aligned} \text{LOG(ELSHARE}_i) &= f(\text{PCY}) \times \{b_0 + b_1 \times \text{LOG(PCL)} + b_2 \times \text{LOG(POL)} \\ &\quad + b_3 \times \text{LOG(PNG)}\} \quad (21) \end{aligned}$$

ESHARE<sub>i</sub> : 第 i 源の発電シェア (%)  
 PCL : 固体燃料価格 (一次ベース, ドル/バレル)  
 POL : 石油価格 (＄), PNG : 天然ガス価格 (＄)

#### a. 石炭火力

公害問題や利便性などから、経済発展と共に石炭火力の比重は低下する。

$$\begin{aligned} \text{ELCLRTO} &= 43.3 - 9.103 \times \text{LOG(PCY)} + 47.7 \times \text{DUMCL} & (22) \\ &\quad (4.6) (-2.0) & (3.4) \end{aligned}$$

$R^2 = 0.472$ ,  $SE = 21.95$ ,  $D/W = 2.55$

ELCLRTO : 石炭火力比率 (%)  
 DUMCL : アメリカ, 中国, 欧州 OECD, オセアニア, 旧ソ連東欧, インド等 = 1

この式によれば、一人あたり所得の上昇と石炭火力比率との関係は以下ようになる。

一人あたり所得	石炭火力比率
1.0 (千ドル/人)	43.3 %
5.0	28.6
20.0	16.0

### b. 天然ガス火力

天然ガス火力は石炭火力と逆の関係にある。

$$\begin{aligned} \text{ELNGRTO} &= 10.33 + 1.92 \times \text{LOG(PCY)} + 27.8 \times \text{DUMNG} & (23) \\ & \quad (3.2) \quad (1.3) \quad (5.3) \\ R^2 &= 0.717, \text{SE} = 7.86, \text{D/W} = 2.62 \\ \text{ECLRTO} &: \text{天然ガス火力比率} (\%) \\ \text{DUMNG} &: \text{中南米, 中東, 旧ソ連東欧} = 1 \end{aligned}$$

この式によれば、一人あたり所得の上昇と発電効率改善との関係は以下ようになる。

一人あたり所得	天然ガス火力比率
1.0(千ドル/人)	10.3%
5.0	13.4
20.0	16.1

相対価格の変化による部分

既存の推定結果を参考にして、下記のように想定した。ここでも交差弾力性の対称性を仮定している。

	石炭	石油	天然ガス
石炭	- 0.3	0.2	0.1
石油		- 0.2	0.5
天然ガス			- 0.5

表 1 - 6 発電部門の価格弾力性の想定

### (12) 最終需要と一次需要との関係

固体、石油、天然ガスの最終需要に関しては、上のような想定のもとで一次転換される。電力に関しては発電源が上のような形で決まってくる。以上を合計した値が一次需要となる。

### (13) 炭酸ガス排出量の算出

炭酸ガス排出量は炭素トン換算で求めることにした。以下の換算率を使用している。

	TC/TOE	TC/BBL
石炭	0.996	0.130
石油	0.804	0.105
天然ガス	0.574	0.075

従ってセメント工業からの排出量を無視し、他方で石油化学のフィードストック分が算入されていることになるが、世界全体での計算であるためこのような単純化を行った。この場合世界の89年の排出

量合計は約58億トン（炭素換算）、日本が2.8億トンとなる。1990年の世界排出量の試算値がEDMONDS-REILLYモデルで58億トン、GLOBAL 2100(MANNE & RICHELIS)で60億トンだから、ここでの想定は他のモデルによるものとほぼ整合的であると考えられる（日本エネルギー経済研究所[21]）。

<炭酸ガスの排出と温暖化効果>

ここではMintzer[22]の式を用いることにする。ここで排出量と濃度との関係は、おなじくMintzerより以下の式を用いる。初期値は300PPMV程度にとればよいだろう。

$$\begin{aligned} \text{濃度 } \text{CO}_2\text{D}(t) &= 0.58 \times 0.471 \times \text{CO}_2(\text{t,GT}) + \text{CO}_2\text{D}(t-1) & (24) \\ \text{温度上昇 } \text{TEMP} &= -0.677 + 3.019 \times \text{LOG}(\text{CO}_2\text{D}/\text{CO}_2\text{D}(t-1)) & (25) \end{aligned}$$

## 2. シミュレーション結果とその評価

中国「核工業総公司」の諮問機関である「科学技術委員会」は、1994年5月、シドニーで開催された「環太平洋原子力会議」で、2050年までに、現在の日本の約9倍にあたる3.0～3.5億kwの原子力発電所を建設する計画を発表した。本章では、このような中国の大規模な原子力発電所の建設が、中国の炭酸ガス排出量をどの程度抑制するかを、原子力発電規模に2つのケースを設けてシミュレートしたものである。またこのシミュレーションでは、経済発展についても2つのケースを設けて、エネルギー需要量、炭酸ガス排出量などへの影響を推定している。

### 2.1 ケース設定

#### - 中国を中心とした3つのケース -

シミュレーションのためのケースは、まず温暖化防止等のための特段のエネルギー対策や環境対策などを仮定しない、いわゆるBusiness as Usual ケース（BAUケース）を想定する。

次に、経済、人口、資源、エネルギー、環境等、あらゆる面で今後の世界の動向の大きな鍵を握るであろう中国に着目したケースとして、中国の経済成長率が高まったケースと、中国における原子力の導入が拡大したケースを想定し、BAUケースとの比較で、エネルギー需給、環境問題（炭酸ガス排出量）

に対してどのようなインパクトがあるのかを分析することとする。

成長標準	B A U ケース (基準ケース)
	原子力拡大ケース
高成長	高成長 (原子力拡大) ケース

#### (1) 中国の経済成長率

	1990 ~ 2050 年	2050 ~ 2100 年
成長標準	6.4 %	3.5 %
高成長	7.2 %	4.3 %

基準ケースは、2030 年 ~ 2050 年にかけて中国の経済成長率はピークとなり、その後 2100 年までは比較的穏やかな成長率に落ちついていくとし、2050 年まで年率 6.4 %、2100 年まで年率 3.5 % と想定している。拡大ケースの基本にはこのパターンで推移するが、年平均成長率は基準ケースに対して 0.8 ポイント程度拡大するとしたケースである。この結果 G N P の規模では、基準ケースに比べ 2050 年時点で約 1.6 倍、2100 年時点で約 2.35 倍となる。

#### (2) 中国の原子力 (発電容量)

	2030 年	2050 年	2100 年
基準	1,100 万 kW	1,600 万 kW	3,200 万 kW
拡大	1 億 6,000 万 kW	3 億 2,000 万 kW	3 億 7,000 万 kW

(稼働率は 75 % と仮定)

基準ケースの原子力発電はかなり控えめの想定である。これに対して、拡大ケースは 2050 年には、ほぼ現在の世界全体の原子力発電設備量に匹敵する 3 億 2 千万 kW、更に 2100 年までに 5 千万 kW の拡大を想定している。

なお、参考までに、中国の主要機関の原子力の見通し一覧を表 2 - 1 に示す (計量分析センター李主任研究員調べ)。拡大ケースは表の核工業公司 (CNCC) の見通しを参考に設定したものである。

表 2 - 1 によると、2010 年については、1,070 ~ 2,570 万 kW とかなりの幅をもっているが、1,070 ~ 1,500 万 kW と見る I E A、中国能源研究所の見方が低すぎで、2,000 ~ 2,500 万 kW と見る中国核工業総公司の見方が妥当ではないかと考える。

2010 年以後については、中国核工業総公司は 2020 年で 6,400 ~ 8,400 万 kW、2030 年で 13,500 ~

17,000 万 kW、2050 年で 30,000 ~ 35,000 万 kW とかなり大規模の建設を見込んでいる。これに対して、色々な見方がある。例えば、日本エネルギー経済研究所生田豊朗理事長は、「2050 年に 3 億キロワットというのは大変なスケール。実現すれば世界最大規模だが、簡単にはできないだろう。万一事故が起きれば、世界全体の原子力開発の全面見直しという問題にもなるので、安全性について徹底的に検証する必要がある」と述べており、技術評論家の桜井淳氏は、「中国の原子力開発は (中国核工業総公司の見込みより) 更に急速に進むのではないか。問題は安全管理で、秦山原発など自前で建設した施設は、製

	1994 年	2000 年	2010 年	2020 年	2030 年	2050 年
中国電力工業部	210	300				
中国能源研究所	210	210	1,500			
核工業総公司 (CNCC)	210	350	2000-2500	6400-8400		
ケース 1		350	2,000	6,400	13,500	30,000
ケース 2		350	2,500	8,400	17,000	35,000
水利電力研究所	210	210	1500-2000	3500-6000		
低ケース		210	1,500	3,500		
中ケース		210	2,000	4,500		
高ケース		210	2,000	6,000		
IEA94	210	220	1070-1500			
基準ケース		220	1,070			
樂觀ケース		220	1,500			

(単位: 万 kWh)

資料: ・中国能源研究所長周鳳起『日中能源交流会』NO.1, 1993。

・ZHAO REN-KAI) Vice President, Commission of Science and Technology, CNNS. 『1994 Pacific Basin Nuclear Conference』。

・『World Energy Outlook 1994』(IEA)。

・中国電力工業部史大禎部長 (電力省長官) 1994 / 12 / 23 講 (『原子力産業新聞』1995 / 1 / 12)。

注: 電力工業部の 2000 年の容量計画 300 万 kW の中に、新エネも含まれる。

表 2 - 1 機関別原子力設備容量見通しに関する比較



	世界計	日本	中国	NIES/ ASEAN	インド	アメリカ	欧州OECD	旧ソ連・ 東欧
発電投入エネルギー (MTOE)								
原子力	513 100%	48 9.4%	0 0.0%	21 4.1%	3 0.6%	147 28.7%	192 37.4%	75 14.6%
水力	543 100%	24 4.4%	30 5.5%	9 1.7%	33 6.1%	69 12.7%	108 19.9%	78 14.4%
石油	286 100%	53 18.5%	12 4.2%	28 9.8%	6 2.1%	29 10.1%	43 15.0%	48 16.8%
ガス	355 100%	32 9.0%	1 0.3%	9 2.5%	8 2.3%	66 18.6%	26 7.3%	154 43.4%
石炭	1,042 100%	24 2.3%	124 11.9%	22 2.1%	65 6.2%	386 37.0%	160 15.4%	156 15.0%
その他	0	0	0	0	0	0	0	0
合 計	2,739 100%	181 6.6%	167 6.1%	89 3.2%	115 4.2%	697 25.4%	529 19.3%	511 18.7%
発電量 (TWh)	10,860 100%	791 7.3%	593 5.5%	326 3.0%	349 3.2%	2,953 27.2%	2,116 19.5%	2,012 18.5%
最終エネルギー需要 (MTOE)	5,555 100%	298 5.4%	498 9.0%	200 3.6%	201 3.6%	1,373 24.7%	963 17.3%	1,219 21.9%
炭酸ガス排出量 (C-百万トン)	5,848 100%	293 5.0%	612 10.5%	205 3.5%	249 4.3%	1,396 23.9%	899 15.4%	1,389 23.8%
一次エネルギー (MTOE)	7,571 100%	384 5.1%	652 8.6%	259 3.4%	289 3.8%	1,811 23.9%	1,213 16.0%	1,860 24.6%
GDP (10億ドル)	20,171 100%	2,848 14.1%	360 1.8%	656 3.3%	407 2.0%	4,872 24.2%	5,491 27.2%	3,369 16.7%
人口 (百万人)	5,083 100%	124 2.4%	1,134 22.3%	388 7.6%	1,232 24.2%	250 4.9%	416 8.2%	429 8.4%
一人当たり所得 (ドル/人)	3,968 100%	22,968 578.8%	317 8.0%	1,691 42.6%	330 8.3%	19,488 491.1%	13,200 332.6%	7,853 197.9%

表2-2 シミュレーション結果の要約 (1990年 実績)

	世界計			日本	中国			NIES/ ASEAN	インド	アメリカ	欧州OECD	旧ソ連・ 東欧
	BAU	原子力拡大	高成長		BAU	原子力拡大	高成長					
発電投入エネルギー (MTOE)					(0.16)	(3.2)	(3.2)					
原子力	807 100%	1,320 100%	1,320 100%	69 8.6%	27 3.3%	540 40.9%	540 40.9%	42 5.2%	24 3.0%	195 24.2%	231 28.6%	123 15.2%
水力	756 100%	756 100%	756 100%	33 4.4%	54 7.1%	54 7.1%	54 7.1%	18 2.4%	60 7.9%	84 11.1%	129 17.1%	102 13.5%
石油	1,444 100%	1,332 100%	1,657 100%	37 2.6%	295 20.4%	183 13.7%	508 30.7%	441 30.5%	43 3.0%	39 2.7%	20 1.4%	71 4.9%
ガス	1,195 100%	1,145 100%	1,278 100%	32 2.7%	131 11.0%	81 7.1%	214 16.7%	215 18.0%	44 3.7%	96 8.0%	15 1.3%	190 15.9%
石炭	1,926 100%	1,613 100%	2,227 100%	10 0.5%	822 42.7%	509 31.6%	1,123 50.4%	192 10.0%	170 8.8%	26 1.3%	48 2.5%	159 8.3%
その他	1,474 100%	1,474 100%	1,474 100%	18 1.2%	195 13.2%	195 13.2%	195 13.2%	57 3.9%	202 13.7%	181 12.3%	115 7.8%	323 21.9%
合計	7,602 100%	7,640 100%	8,712 100%	199 2.6%	1,524 20.0%	1,562 20.4%	2,634 30.2%	965 12.7%	543 7.1%	621 8.2%	558 7.3%	968 12.7%
発電量 (TWh)	31,419 100%	31,419 100%	36,209 100%	907 2.9%	6,360 20.2%	6,360 20.2%	11,151 30.8%	4,209 13.4%	2,012 6.4%	3,605 11.5%	2,314 7.4%	4,116 13.1%
最終エネルギー需要 (MTOE)	13,605 100%	13,605 100%	16,103 100%	263 1.9%	3,580 26.3%	3,580 26.3%	6,078 37.7%	1,599 11.8%	837 6.2%	1,239 9.1%	781 5.7%	1,902 14.0%
炭酸ガス排出量 (C-百万トン)	13,881 100%	13,429 100%	16,802 100%	213 1.5%	4,524 32.6%	4,072 30.3%	7,445 44.3%	2,063 14.9%	863 6.2%	1,027 7.4%	496 3.6%	1,968 14.2%
一次エネルギー (MTOE)	19,932 100%	19,628 100%	23,149 100%	334 1.7%	5,005 25.1%	4,701 24.0%	8,222 35.5%	2,399 12.0%	1,273 6.4%	1,735 8.7%	981 4.9%	3,032 15.2%
GDP (10億ドル)	95,287 100%	95,287 100%	104,484 100%	8,195 8.6%	14,577 15.3%	14,577 15.3%	23,774 22.8%	19,890 20.9%	6,060 6.4%	12,217 12.8%	15,615 16.4%	9,020 9.5%
人口 (百万人)	10,249 100%	10,249 100%	10,202 100%	120 1.2%	1,927 18.8%	1,927 18.8%	1,880 18.4%	929 9.1%	2,493 24.3%	342 3.3%	445 4.3%	614 6.0%
一人当たり所得 (ドル/人)	9,297 100%	9,297 100%	10,242 100%	68,292 734.5%	7,565 81.4%	7,565 81.4%	12,646 123.5%	21,410 230.3%	2,431 26.1%	35,722 384.2%	35,090 377.4%	14,691 158.0%

表2-2 シミュレーション結果の要約 (2050年)

造工程などで問題が見られ、我が国としては人やソフト面、運転・品質管理の面などでより技術協力していくことが急務だろう」と述べている（『読売新聞』(1994/5/27)）。また、中国国内からは、誘導型の見通しだという批判的な見方がある（以上、

分析センター李主任研究員まともに基づく）。

## 2.2 シミュレーション結果

表2-2は、電源構成、エネルギー需要、経済、人口、炭酸ガス排出量等の主要指標について、



	世界計			日本	中国			NIES/ ASEAN	インド	アメリカ	欧州OECD	旧ソ連・ 東欧
	BAU	原子力拡大	高成長		BAU	原子力拡大	高成長					
発電投入エネルギー (MTOE)					(0.32)	(3.7)	(3.7)					
原子力	927 100%	1,503 100%	1,503 100%	69 7.4%	54 5.8%	630 41.9%	630 41.9%	54 5.8%	36 3.9%	210 22.7%	231 24.9%	138 14.9%
水力	807 100%	807 100%	807 100%	33 4.1%	69 8.6%	69 8.6%	69 8.6%	24 3.0%	75 9.3%	87 10.8%	138 17.1%	117 14.5%
石油	3,114 100%	2,942 100%	3,754 100%	0 0.0%	749 24.1%	577 19.6%	577 37.0%	1,389 18.4%	572 4.8%	148 0.7%	22 0.0%	0 3.7%
ガス	2,305 100%	2,233 100%	2,550 100%	0 0.0%	312 13.5%	240 10.7%	557 21.8%	345 15.0%	102 4.4%	52 2.3%	0 0.0%	275 11.9%
石炭	2,388 100%	2,166 100%	2,832 100%	0 0.0%	962 40.3%	740 34.2%	1,406 49.6%	117 4.9%	250 10.5%	124 5.2%	0 0.0%	194 8.1%
その他	2,230 100%	2,230 100%	2,230 100%	67 3.0%	315 14.1%	315 14.1%	315 14.1%	135 6.1%	270 12.1%	315 14.1%	76 3.4%	450 20.2%
合計	11,771 100%	11,881 100%	13,676 100%	169 1.4%	2,461 20.9%	2,571 21.6%	4,366 31.9%	1,247 10.6%	881 7.5%	810 6.9%	445 3.8%	1,288 10.9%
発電量 (TWh)	51,512 100%	51,512 100%	60,849 100%	581 1.1%	11,663 22.6%	11,663 22.6%	21,000 34.5%	6,035 11.7%	3,640 7.1%	3,477 6.7%	2,012 3.9%	5,674 11.0%
最終エネルギー需要 (MTOE)	18,274 100%	18,274 100%	19,933 100%	192 1.1%	4,882 26.7%	4,882 26.7%	6,541 32.8%	1,321 7.2%	1,318 7.2%	991 5.4%	572 3.1%	2,255 12.3%
炭酸ガス排出量 (C-百万ト)	21,812 100%	21,348 100%	24,359 100%	80 0.4%	6,533 30.0%	6,069 28.4%	9,080 37.3%	1,964 9.0%	1,333 6.1%	674 3.1%	214 1.0%	2,871 13.2%
一次エネルギー (MTOE)	28,359 100%	28,084 100%	31,107 100%	253 0.9%	7,087 25.0%	6,812 24.3%	9,835 31.6%	2,258 8.0%	2,005 7.1%	1,428 5.0%	658 2.3%	3,670 12.9%
GDP (10億ドル)	307,782 100%	307,782 100%	418,568 100%	9,611 3.1%	82,034 26.7%	82,034 26.7%	192,820 46.1%	96,754 31.4%	3,200 1.0%	16,912 5.5%	20,524 6.7%	17,902 5.8%
人口 (百万人)	11,429 100%	11,429 100%	11,088 100%	98 0.9%	1,948 17.0%	1,948 17.0%	1,607 14.5%	935 8.2%	2,871 25.1%	366 3.2%	375 3.3%	630 5.5%
一人当たり所得 (ドル/人)	26,930 100%	26,930 100%	37,750 100%	98,071 364.2%	42,112 156.4%	42,112 156.4%	119,988 317.9%	103,480 384.3%	1,115 4.1%	46,208 171.6%	54,731 203.2%	28,416 105.5%

表 2 - 2 シミュレーション結果の要約 (2100年)

1990年実績および2050年、2100年のシミュレーション結果を要約したものである。

以下、主要項目についてシミュレーション結果をみていくことにする。

#### (1) 人口

世界の人口は1990年の51億人から、2010年には60億人、2050年には102億人、2100年には114億人に達する。つまり、1990年に比べて約2倍強になる。増加のペースをみると、21世紀前半までは毎年約1億人ずつ人口が増えていくが、2050年以降は極めて穏やかな増加となる。つまり人口爆発は起きないと想定しているわけである。これは、発展段階と人口との関連で説明される。つまり、21世紀後半には中国経済も成熟化の段階に入り、これに伴い人口の伸びが安定化するという結果になっている。

仮に、中国がこのような人口増加で留まるならば、今後、人口問題で注目すべき地域はアフリカとインドであろう(2100年には両地域で世界人口の47%を占める)。

高成長ケースでは中国の人口は2100年で16億人

人口 (単位: 億人)

	1990年	2050年	2100年	高成長
世界	50.8	102.5	114.3	110.9
日本	1.24	1.20	0.98	
中国	11.3	19.3	19.5	16.1
(中国の比率)	22.3%	18.8%	17.0%	

と、一人当たり所得の上昇により人口増加率は低下し、基準ケースに比べ3億4千万人ほど減少することになる。

#### (2) GNP

世界の経済成長率は実績で2.9% (1975～90年) であったが、今後は(基準ケース)2030年頃まで2.5%、2030年から50年は2%台の後半、そしてその後は2%前半台へと戻る。2030年から50年に掛けて成長率が高まるのは中国とインドという2大国が成長の加速期に達しているためである。また2010年頃まではNIES / ASEANの成長率が高いことが特徴的である。この結果GDPの規模は1990年の20兆ドル(87年価格)から2100年には308兆ドルと1990年の約15倍に達する。

年	1975	1990	2010	2030	2050	2070	2100	75/90	90/10	10/30	30/50	50/70	70/00
アメリカ	216	250	292	320	342	355	366	1.0	0.8	0.5	0.3	0.2	0.1
中南米	296	406	588	754	923	972	995	2.1	1.9	1.3	1.0	0.3	0.1
アフリカ	341	526	957	1,338	1,885	2,004	2,486	2.9	3.0	1.7	1.7	0.3	0.7
中東	79	131	222	344	499	556	644	3.4	2.7	2.2	1.9	0.6	0.5
中国	916	1,134	1,456	1,667	1,927	1,974	1,948	1.4	1.3	0.7	0.7	0.1	0.0
日本	112	124	130	127	120	111	98	0.7	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.4
欧州_OECD	383	416	441	452	445	422	375	0.6	0.3	0.1	-0.1	-0.3	-0.4
オセアニア	17	20	25	30	35	40	47	1.1	1.0	1.0	0.8	0.7	0.5
旧ソ連東欧	385	429	491	554	614	626	630	0.7	0.7	0.6	0.5	0.1	0.0
NIES/ASEAN	288	388	569	798	929	940	935	2.0	1.9	1.7	0.8	0.1	0.0
インド等	880	1,232	1,790	2,120	2,493	2,658	2,871	2.3	1.9	0.8	0.8	0.3	0.3
その他	22	27	31	34	36	36	35	1.4	0.7	0.5	0.3	0.0	-0.1
合計	3,935	5,083	6,990	8,538	10,248	10,695	11,428	1.7	1.6	1.0	0.9	0.2	0.2
アメリカ	5.5	4.9	4.2	3.8	3.3	3.3	3.2						
中南米	7.5	8.0	8.4	8.8	9.0	9.1	8.7						
アフリカ	8.7	10.3	13.7	15.7	18.4	18.7	21.8						
中東	2.0	2.6	3.2	4.0	4.9	5.2	5.6						
中国	23.3	22.3	20.8	19.5	18.8	18.5	17.0						
日本	2.8	2.4	1.9	1.5	1.2	1.0	0.9						
欧州_OECD	9.7	8.2	6.3	5.3	4.3	3.9	3.3						
オセアニア	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4						
旧ソ連東欧	9.8	8.4	7.0	6.5	6.0	5.9	5.5						
NIES/ASEAN	7.3	7.6	8.1	9.3	9.1	8.8	8.2						
インド等	22.4	24.2	25.6	24.8	24.3	24.8	25.1						
その他	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3						
合計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0						

表2 - 3 人口の推移

1990 - 2050年		2050 - 2100年		(単位: 億人)		一人あたり所得 (千ドル / 人)		
世界	2.6%	2.4%				1990年	2050年	2100年
日本	1.8%	0.5%			中国 (基準)	0.3	7.6	42.1
中国 (基準)	6.4%	3.5%			(高成長)	0.3	12.6	120.0
(高成長)	7.2%	4.3%			日本	23.0	68.2	98.1
					アメリカ	19.5	35.7	46.2
					NIES / ASEAN	1.7	21.4	103.5
中国の比率: 基準	1.8%	15.3%	26.7%		世界	0.7	9.3	26.9
: 高成長	22.8%	46.1%				(10.2)	(37.8)	

(中国の高成長によって世界平均も増加)

中国についてみると(基準ケース), 2050年頃までの長期間にわたって年率6%強の経済成長が続く, その後, 3%台から2%台へと成長率が減速していくことになる。水準でみると2030年頃は日米の1/2~1/3程度であるが, 2050年には日米を越えるGNP規模となる。世界に対するシェアは, 1990年の1.8%から, 基準ケースでは2050年には15%, 2100年には24%に, 高成長ケースでは同23%, 46%に達する。

### (3) 一人あたり所得

一人あたり所得(GDP)は, 前章のモデル構造で述べたように発展段階を示す重要なパラメータでもある。主要国(地域)の推移を示すと以下ようになる。

### (4) 最終エネルギー需要

基準ケースの世界の最終エネルギー需要は1990年の56億トン(石油換算)から2050年は136億ト

これをみると, 人口の安定化も相まって中国の一人あたり所得は2050年以降急速に先進諸国に近づいていく(基準ケース)。また, 高成長ケースでは中国は日本やNIES/ASEANをも若干上回り, 世界で最も裕福な国の一つとなる。これは, やや伸びすぎかもしれないが, いずれにしても, 中国のような人口大国が世界のトップに並ぶ所得水準に達したケースと解釈してエネルギー等への影響をみることは興味深い。

1987年価格10億ドル

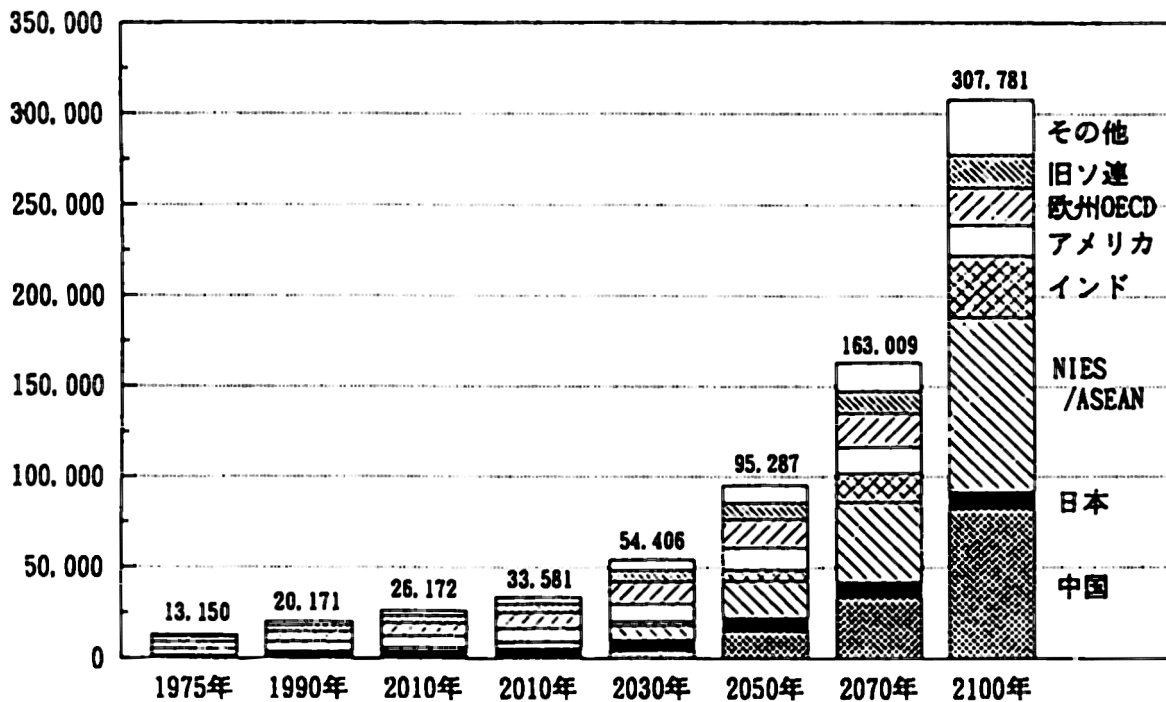


図 2 - 1 GDP の推移

年	1975	1990	2010	2030	2050	2070	2100	75/90	90/10	10/30	30/50	50/70	70/00
アメリカ	14.67	19.49	24.72	30.20	35.68	40.74	46.25	1.9	1.2	1.0	0.8	0.7	0.4
中南米	1.65	1.70	1.93	2.49	3.39	4.71	5.94	0.2	0.7	1.3	1.6	1.7	0.8
アフリカ	0.70	0.69	0.64	0.84	1.14	2.42	6.14	-0.1	-0.4	1.4	1.6	3.8	3.1
中東	4.18	3.38	3.15	3.22	3.53	4.58	6.06	-1.4	-0.3	0.1	0.5	1.3	0.9
中国	0.14	0.32	0.81	2.31	7.56	16.95	42.11	5.8	4.8	5.4	6.1	4.1	3.1
日本	12.88	22.97	37.62	52.70	68.30	80.80	98.37	3.9	2.3	1.7	1.3	0.8	0.7
欧州_OECD	9.85	13.20	19.40	26.52	35.11	44.44	54.80	2.0	1.9	1.6	1.4	1.2	0.7
オセアニア	9.29	12.30	15.66	19.54	24.17	30.42	41.45	1.9	1.2	1.1	1.1	1.2	1.0
旧ソ連東欧	7.10	7.85	9.79	11.73	14.68	19.46	28.43	0.7	0.9	0.9	1.1	1.4	1.3
NIES/ASEAN	0.72	1.69	4.34	9.64	21.41	46.34	103.54	5.9	4.9	4.1	4.1	3.9	2.7
インド等	0.24	0.33	0.51	1.03	2.43	5.96	11.78	2.0	2.4	3.5	4.4	4.6	2.3
その他	12.41	15.81	23.20	33.62	50.66	70.28	90.39	1.6	1.9	1.9	2.1	1.6	0.8
平均	3.34	3.97	4.80	6.37	9.30	15.24	26.93	1.2	1.0	1.4	1.9	2.5	1.9

一人あたり所得の推移 (BAU ケ単位: 千ドル/人)

表 2 - 5 一人あたり所得の推移

ン, 2100年には183億トンと, 90年の約3.3倍となる。

中国は, 基準ケースで2050年36億トン, 2100年には49億トンとなり, 世界全体に占めるシェアは26~27%に達する。高成長ケースでは, 更に25億トン程度の増加となり, 世界全体の1/3程度を中国が占めることになる。つまり, ここでも主役の交代が行われ, アメリカや日本のような先進国のシェ

最終エネルギー需要 (石油換算億トン)

	1990年	2050年		2100年	
		基準	高成長	基準	高成長
中国	5.0	35.8	60.8	48.8	65.4
日本	3.0	2.6		1.9	
アメリカ	12.4	12.4		9.9	
世界	55.6	136.1	161.0	182.7	199.3
中国の比率	9.0%	26.3%	37.7%	26.7%	32.8%

(注) 原子力拡大ケースの最終エネルギー需要は基準ケースと同じ。

年	1975	1990	2010	2030	2050	2070	2100	75/90	90/10	10/30	30/50	50/70	70/00
アメリカ	1,239	1,374	1,387	1,292	1,239	1,152	991	0.7	0.0	-0.4	-0.2	-0.4	-0.5
中南米	163	282	441	652	1,023	1,494	1,883	3.7	2.3	2.0	2.3	1.9	0.8
アフリカ	67	124	228	417	675	1,159	2,418	4.2	3.1	3.1	2.4	2.7	2.5
中東	55	169	419	807	1,436	1,815	2,205	7.8	4.6	3.3	2.9	1.2	0.7
中国	250	498	1,333	2,522	3,580	4,565	4,882	4.7	5.0	3.2	1.8	1.2	0.2
日本	235	298	301	281	263	240	192	1.6	0.1	-0.3	-0.3	-0.4	-0.8
欧州_OECD	835	963	947	890	781	691	572	1.0	-0.1	-0.3	-0.7	-0.6	-0.6
オセアニア	48	68	80	94	104	109	114	2.3	0.8	0.8	0.5	0.2	0.1
旧ソ連東欧	987	1,219	1,491	1,677	1,902	2,046	2,255	1.4	1.0	0.6	0.6	0.4	0.3
NIES/ASEAN	64	200	546	1,134	1,599	1,669	1,321	7.9	5.1	3.7	1.7	0.2	-0.8
インド等	95	201	327	540	837	1,141	1,318	5.1	2.5	2.5	2.2	1.6	0.5
その他	130	159	174	170	168	153	124	1.4	0.5	-0.1	-0.1	-0.5	-0.7
合計	4,168	5,555	7,676	10,475	13,605	16,235	18,274	1.9	1.6	1.6	1.3	0.9	0.4
アメリカ	29.7	24.7	18.1	12.3	9.1	7.1	5.4						
中南米	3.9	5.1	5.7	6.2	7.5	9.2	10.3						
アフリカ	1.6	2.2	3.0	4.0	5.0	7.1	13.2						
中東	1.3	3.0	5.5	7.7	10.6	11.2	12.1						
中国	6.0	9.0	17.4	24.1	26.3	28.1	26.7						
日本	5.6	5.4	3.9	2.7	1.9	1.5	1.0						
欧州_OECD	20.0	17.3	12.3	8.5	5.7	4.3	3.1						
オセアニア	1.2	1.2	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6						
旧ソ連東欧	23.7	21.9	19.4	16.0	14.0	12.6	12.3						
NIES/ASEAN	1.5	3.6	7.1	10.8	11.8	10.3	7.2						
インド等	2.3	3.6	4.3	5.2	6.2	7.0	7.2						
その他	3.1	2.9	2.3	1.6	1.2	0.9	0.7						
合計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0						

表 2 - 6 最終エネルギー需要（地域別，MTOE）

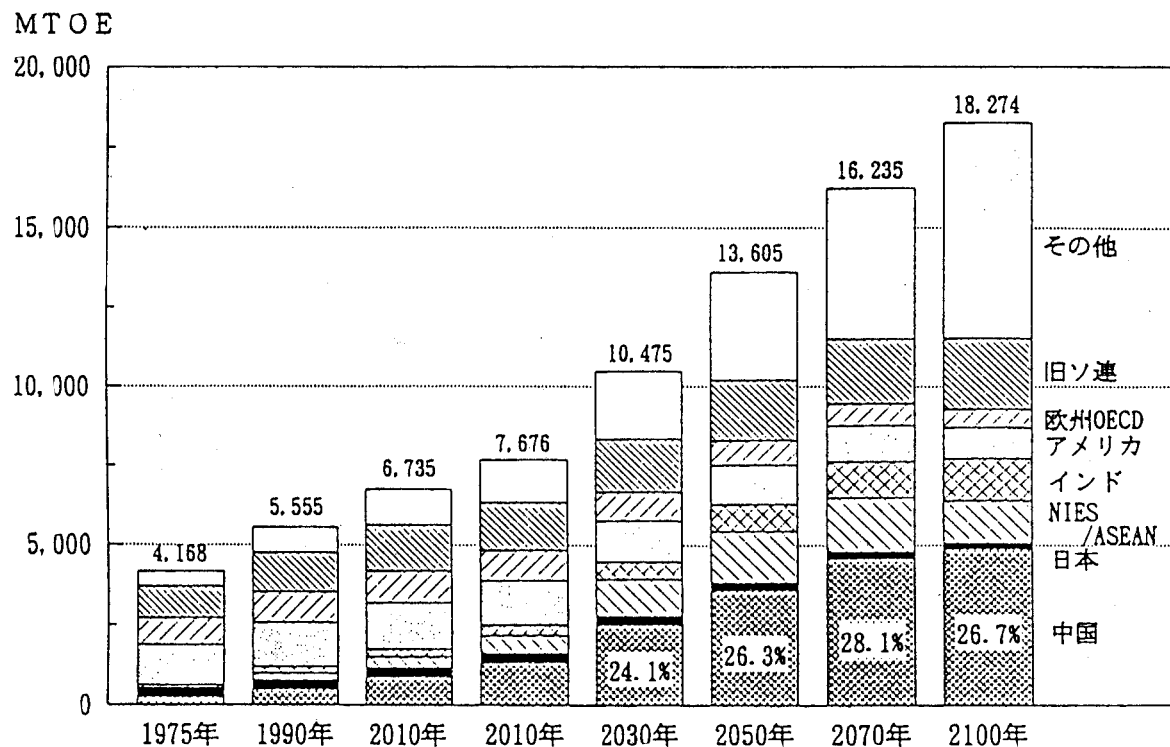


図 2 - 2 最終エネルギー需要（地域別）



年	1975	1990	2010	2030	2050	2070	2100	75/90	90/10	10/30	30/50	50/70	70/00
固体需要	865	1,035	1,677	2,594	3,211	3,473	3,306	1.2	2.4	2.2	1.1	0.4	-0.2
液体需要	2,138	2,605	3,370	4,457	5,809	6,944	7,617	1.3	1.3	1.4	1.3	0.9	0.3
ガス需要	687	1,054	1,383	1,705	2,243	2,830	3,532	2.9	1.4	1.1	1.4	1.2	0.7
電力需要	475	858	1,244	1,717	2,340	2,985	3,818	4.0	1.9	1.6	1.6	1.2	0.8
合計	4,166	5,553	7,674	10,473	13,603	16,232	18,272	1.9	1.6	1.5	1.3	0.9	0.4
固体需要	20.8	18.6	21.9	24.8	23.6	21.4	18.1						
液体需要	51.3	46.9	43.9	42.6	42.7	42.8	41.7						
ガス需要	16.5	19.0	18.0	16.3	16.5	17.4	19.3						
電力需要	11.4	15.5	16.2	16.4	17.2	18.4	20.9						
合計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0						

表 2 - 7 最終エネルギー需要（エネルギー源別，MTOE）

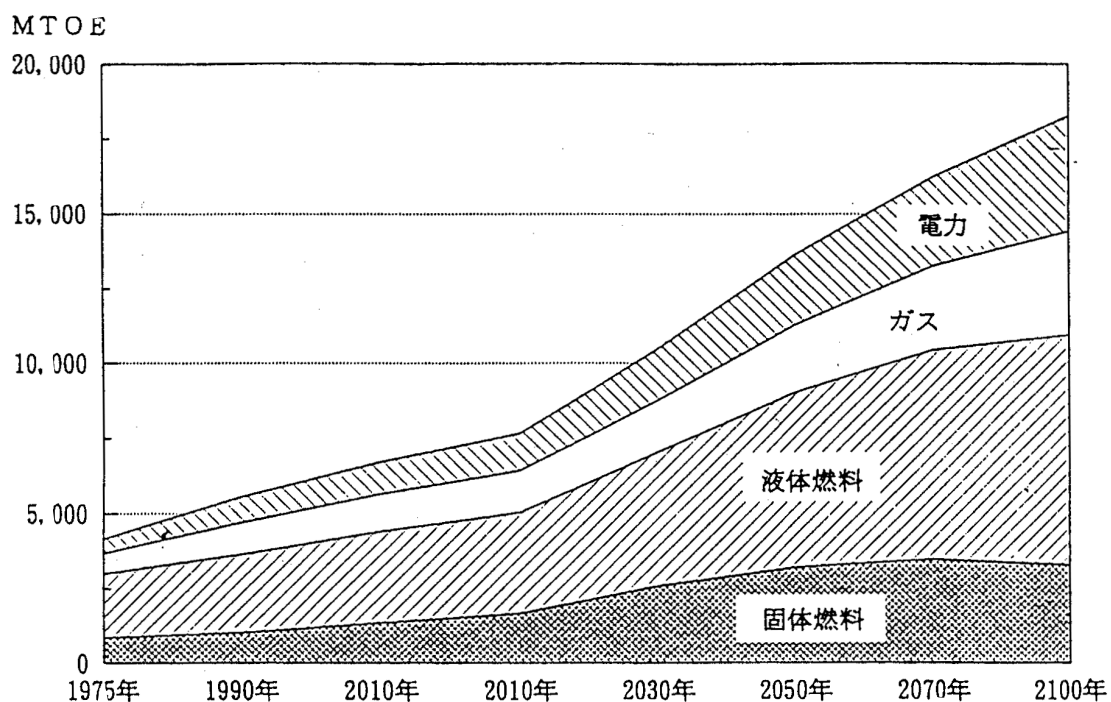


図 2 - 3 最終エネルギー需要（エネルギー源別，MTOE）

アは急減し、中国やその他の途上国のシェアが上昇することになる。

#### < 所得弾力性の変化 >

最終エネルギー需要の所得弾力性（対 GNP 弾力性）は右記のように示される（基準ケース）。

世界全体では実績が 0.66（1975～1990 年）であるのに対し、弾力性は 2010 年以降徐々に低下し、2050 年から 2100 年にかけては 0.2～0.3 程度で推移するという形をとっている。21 世紀前半は、旧ソ連東欧、中国、その他の途上国の動きなどが影響し、比較的高い弾力性となっている。

最終エネルギー消費の所得（対 GNP）弾力性値（世界計 基準ケース）

	1975 ~	1990 ~	2010 ~	2030 ~	2050 ~	2070 ~
	1990年	2010年	2030年	2050年	2070年	2100年
GNP	2.9%	2.6%	2.4%	2.8%	2.7%	2.1%
最終エネルギー	1.9%	1.7%	1.6%	1.3%	0.9%	0.4%
対GNP弾性値	0.66	0.65	0.65	0.46	0.33	0.19

#### < エネルギー源別構成の変化 >

最終需要におけるエネルギー源別シェア推移は以下の通りである（P 位：％）。



	1990年	2030年	2050年	2100年
固体燃料	19%	25%	24%	18%
石油（液体）	47	43	43	42
ガス	19	16	17	19
電気	15	16	17	21

エネルギー源の構成については次のようなことが読み取れる。

- ・経済発展に伴って電力化の傾向が続く。
- ・流体化の傾向は、後半になって顕著になる。2030年に固体燃料の比重が上がるのは前項でみたエネルギー需要の急拡大現象（2030年頃）によるものである。つまり世界全体において、固体燃料比率の高い国の需要が他の国に比べて高い伸びを示すからだ。しかしそうした国においても個別にみれば、流体化は進んでいるのである。

中国においても同様の傾向にあるが、豊富な石炭資源を背景に、固体燃料の比率が依然として大きいのが特徴である。

#### 中国の最終需要構成（基準ケース）

	1990年	2030年	2100年
固体燃料	71.7%	65.8%	43.3%
天然ガス	1.6	4.0	9.4
石油	17.7	23.4	30.1
電気	9.0	12.7	17.1

#### （５）発電電力量と電源構成

途上国を中心としたエネルギー需要の増大と電力化の進展に伴って、世界の発電電力量は（基準ケース）、1990年の10,860TWhから2050年には31,419TWhと2.9倍、2100年には51,512TWhと、約4.7倍の規模に達する。

電源構成の推移は表2-8に示すとおりであるが、これから次のような特徴があげられよう。

#### （基準ケース）

固体燃料

固体燃料の比率は1990年の38%から2100年には20%へと低下する。

#### 液体燃料・ガス

液体、ガスなど流体燃料（当初は石油、天然ガス、それらの枯渇後は石炭液化、ガス化）の比率は1990年の23%から2100年には46%へと上昇する。世界的に流体化、ガス化が進行する。

原子力  
原子力は1990年の513MTOE（投入ベース）から2100年には927MTOEと1.8倍の規模に置いており、これは核拡散等の問題から途上国で余り展開されないという想定である。電力需要全体の拡大規模に比べかなり小さい設定である。

このため、原子力の比重は1990年の19%から2100年には8%へと低下する。

#### 水力

2100年の規模は1990年の1.5倍としているが、電源構成でみると1990年の20%から2100年には7%へと低下する。

#### 再生可能エネルギー

再生可能エネルギーの2100年における比重は19%と大きな位置を占める。

発電用の再生可能エネルギーの中身はソーラー等（風力を含む）とバイオマスである。ソーラーは2010年頃から急速に入り始め2100年には（NIES / ASEANを除いて）地域別でほぼ均衡するシェアとなる。途上国にとっては貴重な電力源である。バイオマス発電の貢献は特にアフリカ、中南米などのその他途上国で大きい。

#### <中国に関するケーススタディー結果>

各ケースの中国の電力需要（発電量）は次のとお

	発電量（Twh）			（年平均伸び率）	
	1990年	2050年	2100年	2050 / 1990	2100 / 2050
基準ケース	593(5.5%)	6,360(20%)	11,663(23%)	4.0%	1.2%
高成長ケース	593(5.5%)	11,151(31%)	21,000(35%)	5.0%	1.3%

（注）（ ）内は世界に占める比率。

りである。

中国の経済発展に伴って、電力需要も堅調に拡大していく。電力需要の対GNP弾性値（基準ケース）は2050年まで0.63、2100年までは0.35となっており、決して高い弾性値ではないが、それでも基準ケ

	1990 年	2050 年			2100 年		
		BAU	原子力拡大	高成長	BAU	原子力	高成長
原子力	18.7 %	10.6 %	17.3 %	15.2 %	7.9 %	12.7 %	11.0 %
水力	19.8	9.9	9.9	8.7	6.9	6.8	5.9
液体燃料	10.4	19.0	17.4	19.0	26.5	24.8	27.4
ガス	13.0	15.7	15.0	14.7	19.6	18.8	18.6
固体燃料	38.0	25.3	21.1	25.6	20.3	18.2	20.7
その他	0	19.4	19.3	16.9	18.9	18.8	16.3
発電量 (Twh)	2,739	31,419	31,419	36,209	51,512	51,512	60,849

表 2 - 8 電源構成の推移 (世界)

	1990 年	2050 年			2100 年		
		BAU	原子力拡大	高成長	BAU	原子力	高成長
原子力	0.0 %	1.8 %	34.6 %	20.5 %	2.2 %	24.5 %	14.4 %
水力	18.0	3.5	3.5	2.1	2.8	2.7	1.6
液体燃料	7.2	19.4	11.7	19.3	30.4	22.4	31.8
ガス	0.6	8.6	5.2	8.1	12.7	9.3	12.8
固体燃料	74.3	53.9	32.6	42.6	39.1	28.8	32.2
その他	0	12.8	12.5	7.4	12.8	12.3	7.2
発電量 (Twh)	593	6,360	6,360	11,151	11,663	11,663	21,000

表 2 - 8 電源構成の推移 (中国)

ースの需要規模は2050年で現在の11倍、2100年では約20倍に達する。更に、高成長ケースはGNP成長率が年率0.8ポイント程度高まったケースであるが、電力需要は2050年、2100年時点で基準ケースの約2倍、世界の電力需要の約1/3は中国が占めることになる。これをみても、中国の経済発展の影響力の大きさがわかる。

一方、電力需要を賄う電源に関して、前述のように中国の原子力発電を次のように想定している（高成長ケースは原子力拡大を想定）。

	2030 年	2050 年	2100 年
基準	1,100万kW	1,600万kW	3,200万kW
拡大	1億6,000万kW	3億2,000万kW	3億7,000万kW

（稼働率は75%と仮定）

2050年を中心にみていくと、原子力の発電構成および世界の原子力発電に占める中国の比率は

(2050年)	基準ケース	原子力拡大	高成長
発電構成比	1.8 %	34.6 %	20.5 %
世界に占める比率	3.3 %	40.9 %	40.9 %

と、原子力拡大ケースでは電源の約1/3を賄うことになり、この規模は世界総原子力発電設備の40%に相当する。高成長ケースでは電力需要が増大するため原子力を拡大しても、20%程度の構成比にとどまる。仮に、高成長ケースでも電源の1/3程度を原子力で賄うとすると、更に2億1千万kWほどの追加、総容量5億4千万kWが必要となる。

年	1975	1990	2010	2030	2050	2070	2100	75/90	90/10	10/30	30/50	50/70	70/00
アメリカ	1,613	1,811	1,886	1,766	1,735	1,632	1,428	0.8	0.2	-0.3	-0.1	-0.3	-0.4
中南米	207	363	592	928	1,520	2,299	2,943	3.8	2.5	2.3	2.5	2.1	0.8
アフリカ	110	212	387	726	1,185	2,059	4,316	4.5	3.1	3.2	2.5	2.8	2.5
中東	73	233	612	1,185	2,112	2,713	3,357	8.0	4.9	3.4	2.9	1.3	0.7
中国	315	652	1,834	3,503	5,005	6,415	7,087	5.0	5.3	3.3	1.8	1.2	0.3
日本	303	384	375	355	334	282	253	1.6	-0.1	-0.3	-0.3	-0.8	-0.4
欧州_OECD	1,063	1,213	1,187	1,113	981	859	658	0.9	-0.1	-0.3	-0.6	-0.7	-0.9
オセアニア	66	100	116	137	153	161	173	2.8	0.8	0.8	0.5	0.3	0.2
旧ソ連東欧	1,487	1,860	2,329	2,646	3,032	3,285	3,670	1.5	1.1	0.6	0.7	0.4	0.4
NIES/ASEAN	84	259	786	1,671	2,399	2,592	2,258	7.8	5.7	3.8	1.8	0.4	-0.5
インド等	127	289	474	812	1,273	1,744	2,005	5.6	2.5	2.7	2.3	1.6	0.5
その他	155	196	209	205	203	205	212	1.6	0.3	-0.1	-0.1	0.0	0.1
合計	5,602	7,572	10,787	15,047	19,932	24,245	28,358	2.0	1.8	1.7	1.4	1.0	0.5
アメリカ	28.8	23.9	17.5	11.7	8.7	6.7	5.0						
中南米	3.7	4.8	5.5	6.2	7.6	9.5	10.4						
アフリカ	2.0	2.8	3.6	4.8	5.9	8.5	15.2						
中東	1.3	3.1	5.7	7.9	10.6	11.2	11.8						
中国	5.6	8.6	17.0	23.3	25.1	25.5	25.0						
日本	5.4	5.1	3.5	2.4	1.7	1.2	0.9						
欧州_OECD	19.0	16.0	11.0	7.4	4.9	3.5	2.3						
オセアニア	1.2	1.3	1.1	0.9	0.8	0.7	0.6						
旧ソ連東欧	26.5	24.6	21.6	17.6	15.2	13.5	12.9						
NIES/ASEAN	1.5	3.4	7.3	11.1	12.0	10.7	8.0						
インド等	2.3	3.8	4.4	5.4	6.4	7.2	7.1						
その他	2.8	2.6	1.9	1.4	1.0	0.8	0.7						
合計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0						

表2 - 9 一次エネルギー供給（地域別，MTOE）

年	1975	1990	2000	2010	2030	2050	2070	2100	75/90	90/00	00/10	10/30	30/50	50/70	70/00
石炭	1,711	2,322	2,909	3,335	4,711	11,838	18,764	21,900	2.1	2.3	1.4	1.7	4.7	2.3	0.5
石油	2,680	3,146	3,794	4,188	4,605	0	0	0	1.1	1.9	1.0	0.5	-	-	-
天然ガス	1,052	1,751	2,214	2,379	2,721	3,641	0	0	3.5	2.4	0.7	0.7	1.5	-	-
原子力	33	171	195	222	245	269	292	309	11.6	1.3	1.3	0.5	0.5	0.4	0.2
水力	126	181	209	230	235	252	254	269	2.4	1.4	1.0	0.1	0.3	0.0	0.2
再生可能エネルギー	0	0	86	432	2,530	3,931	4,935	5,880	-	-	17.5	9.2	2.2	1.1	0.6
合計	5,602	7,571	9,408	10,787	15,047	19,932	24,245	28,358	2.0	2.2	1.4	1.7	1.4	1.0	0.5
石炭	30.5	30.7	30.9	30.9	31.3	59.4	77.4	77.2							
石油	47.8	41.6	40.3	38.8	30.6	0.0	0.0	0.0							
天然ガス	18.8	23.1	23.5	22.1	18.1	18.3	0.0	0.0							
原子力	0.6	2.3	2.1	2.1	1.6	1.3	1.2	1.1							
水力	2.2	2.4	2.2	2.1	1.6	1.3	1.0	0.9							
再生可能エネルギー	0.0	0.0	0.9	4.0	16.8	19.7	20.4	20.7							
合計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0							

表2 - 10 一次エネルギー供給（エネルギー源別，MTOE）

中国は現状では石炭火力が75%を占めており，将来，電源の分散・多様化が予想されるものの，依然として電源のかなりを石炭に依存することになる（2050年基準ケース54%，原子力拡大33%，高成長43%）。発電における脱化石燃料化を原子力を主体に進めるには，現在の世界の総原子力設備量と同程度，あるいはそれ以上の導入が必要であるということになる。

#### （6）一次エネルギー供給

最終需要を賄うための一次エネルギー供給の推移を地域別およびエネルギー源別にみたのが表2 - 9，表2 - 10である。

#### ＜一次エネルギー供給量と所得弾力性的変化＞

一次エネルギー供給量（基準ケース）は世界全体で2100年には1990年の3.7倍の280億トン（石油換算）となる。最終需要よりその伸びが大きいのは，

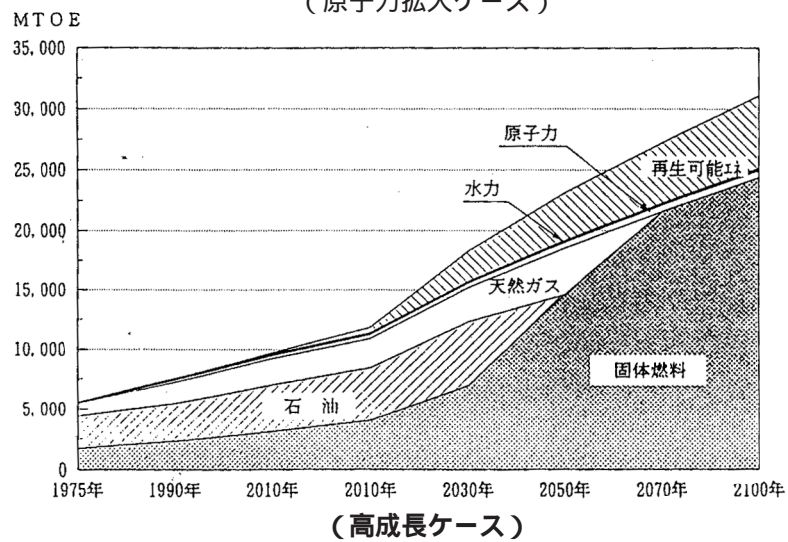
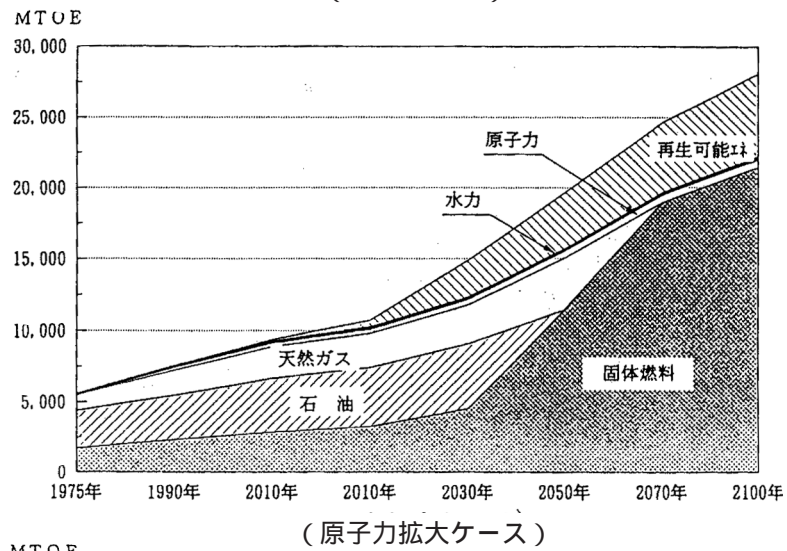
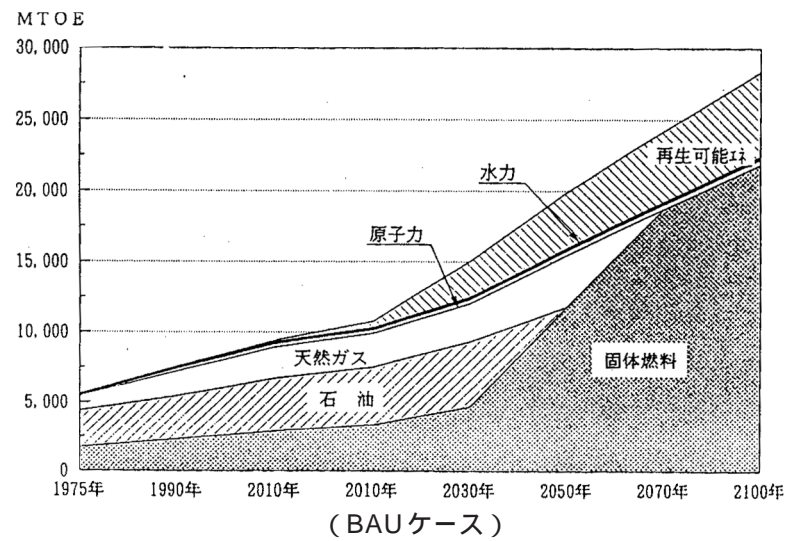


図 2 - 4 一次エネルギー供給構成の推移 (世界)



電力化などによりエネルギーの転換率が増えるためである。

所得弾力性の変化は下記に示すとおりである。世界全体では実績が0.70（1975～1990年）であったのに対し、弾力性は2030年まで同程度の高い値を示し、以降、徐々に低下し2050年以降は0.2～0.3程度となる。この場合にも最終需要のときと同じく、途上国の発展途上におけるエネルギー需要の急増が

	一次エネルギー供給の所得（対GNP）弾力値					
	1975～ 1990年	1990～ 2010年	2010～ 2030年	2030～ 2050年	2050～ 2070年	2070～ 2100年
GNP	2.9%	2.6%	2.4%	2.8%	2.7%	2.1%
一次エネルギー	2.0%	1.8%	1.7%	1.4%	1.0%	0.5%
対GNP弾力値	0.69	0.69	0.70	0.50	0.37	0.24

影響している。

一次需要におけるエネルギー源の構成は以下のと

	1990年	2030年	2050年	2100年
固体燃料*	31%	31%	59%	77%
石油	42	31	0	0
天然ガス	23	18	18	0
原子力	2	2	1	1
水力	2	2	1	1
再生可能エネ	0	17	20	21

(注)固体燃料は固体需要、石炭液化、ガス化の合計

おりとなる（単位：%）。

一次エネルギー供給の構成については次のようなことが言える。

固体燃料の比重が途中低下しないのは、最終需要の項でみたことと同じ理由による。つまり固体燃料比率の高い地域の需要急拡大のためである。

液体需要の比重は余り変わらないが、それは2030年までは石油で、それ以降は石炭液化と再生可能エネルギーによって賄われる。つまり石油の時代は21世紀前半で終わりを告げるのである。

天然ガスは2050年で枯渇し、石炭ガス化と再生可能エネルギーによって代替される。ちなみに再生可能エネルギーによる化石燃料の代替は

以下のように想定している（カッコ内の数字は資源量の10%並びに90%利用時のエネルギー価格：ドル/バレル）。

ソーラーからの水素(0.1 = 50, 0.9 = 100)：液体、ガス半々

バイオからの水素(0.1 = 50, 0.9 = 100)：液体、ガス半々

メタノール(0.1 = 40, 0.9 = 100)：液体用

バイオガス(0.1 = 15, 0.9 = 50)：ガス用

なお、エネルギー源別、地域別の一次エネルギー構造を概観すると以下のとおりである。

固体供給：2100年には1990年の約2.8倍となる。地域別にみると1990年には旧ソ連東欧23%、アメリカ23%、中国22%であったのが、2100年には中国51%、アフリカ19%、インド等10%などとなる。

石炭液化：石油枯渇に伴い、2050年から急速に入り始める。2100年では中国とその他途上国における消費が大きい。

石炭ガス化：天然ガス枯渇に伴い、2070年から導入される。その他途上国と旧ソ連東欧での需要が大きい。

石油：2030年で枯渇する。以降その消費量はゼロとなる。これは価格上昇に伴う資源量増大を含めてもこうなる。

天然ガス：石油よりやや遅れて枯渇することになる。つまりBAUケースの需要拡大が続く限り、温暖化問題以前に化石燃料の枯渇という資源問題が発生することになる。

再生可能エネルギー：再生可能エネルギーはエネルギー価格の上昇に伴い2010年以降急速に導入される。個別にみると以下ようになる。

- ・水素（ソーラーによる）：2030年以降導入される。

- ・その他途上国と日米欧の比率が高い。

- ・水素（バイオによる）：ソーラーからの水素とほぼ同じ動きである。

- ・メタノール：2010年から入ってくる。特にその他途上国での普及が大きい。

- ・バイオガス：2000年から導入される。イン



年	1975	1990	2010	2030	2050	2070	2100	75/90	90/10	10/30	30/50	50/70	70/00
アメリカ	1,228	1,396	1,395	1,061	1,027	993	674	0.9	0.0	-1.4	-0.2	-0.2	-1.3
中南米	152	252	350	195	430	1,068	1,517	3.4	1.7	-2.9	4.0	4.7	1.2
アフリカ	97	175	274	274	445	1,239	3,326	4.0	2.3	0.0	2.5	5.3	3.3
中東	54	170	441	818	1,690	2,523	3,128	8.0	4.9	3.1	3.7	2.0	0.7
中国	294	612	1,661	3,078	4,524	5,972	6,533	5.0	5.1	3.1	1.9	1.4	0.3
日本	244	293	267	217	213	157	80	1.2	-0.5	-1.0	-0.1	-1.5	-2.2
欧州_OECD	837	899	818	596	496	399	214	0.5	-0.5	-1.6	-0.9	-1.1	-2.1
オセアニア	55	81	87	89	103	101	94	2.7	0.3	0.1	0.7	-0.1	-0.2
旧ソ連東欧	1,218	1,389	1,680	1,749	1,968	2,594	2,871	0.9	1.0	0.2	0.6	1.4	0.3
NIES/ASEAN	68	205	613	1,280	2,063	2,366	1,964	7.7	5.6	3.7	2.4	0.7	-0.6
インド等	112	249	351	527	863	1,184	1,333	5.4	1.7	2.1	2.5	1.6	0.4
その他	104	127	117	73	59	90	78	1.3	-0.4	-2.3	-1.1	2.1	-0.5
合計	4,462	5,848	8,054	9,957	13,881	18,688	21,812	1.8	1.6	1.1	1.7	1.5	0.5
アメリカ	27.5	23.9	17.3	10.7	7.4	5.3	3.1						
中南米	3.4	4.3	4.3	2.0	3.1	5.7	7.0						
アフリカ	2.2	3.0	3.4	2.8	3.2	6.6	15.2						
中東	1.2	2.9	5.5	8.2	12.2	13.5	14.3						
中国	6.6	10.5	20.6	30.9	32.6	32.0	30.0						
日本	5.5	5.0	3.3	2.2	1.5	0.8	0.4						
欧州_OECD	18.7	15.4	10.2	6.0	3.6	2.1	1.0						
オセアニア	1.2	1.4	1.1	0.9	0.7	0.5	0.4						
旧ソ連東欧	27.3	23.8	20.9	17.6	14.2	13.9	13.2						
NIES/ASEAN	1.5	3.5	7.6	12.9	14.9	12.7	9.0						
インド等	2.5	4.2	4.4	5.3	6.2	6.3	6.1						
その他	2.3	2.2	1.5	0.7	0.4	0.5	0.4						
合計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0						

表 2 - 11 炭酸ガス排出量（炭素換算百万トン）

炭素換算百万トン

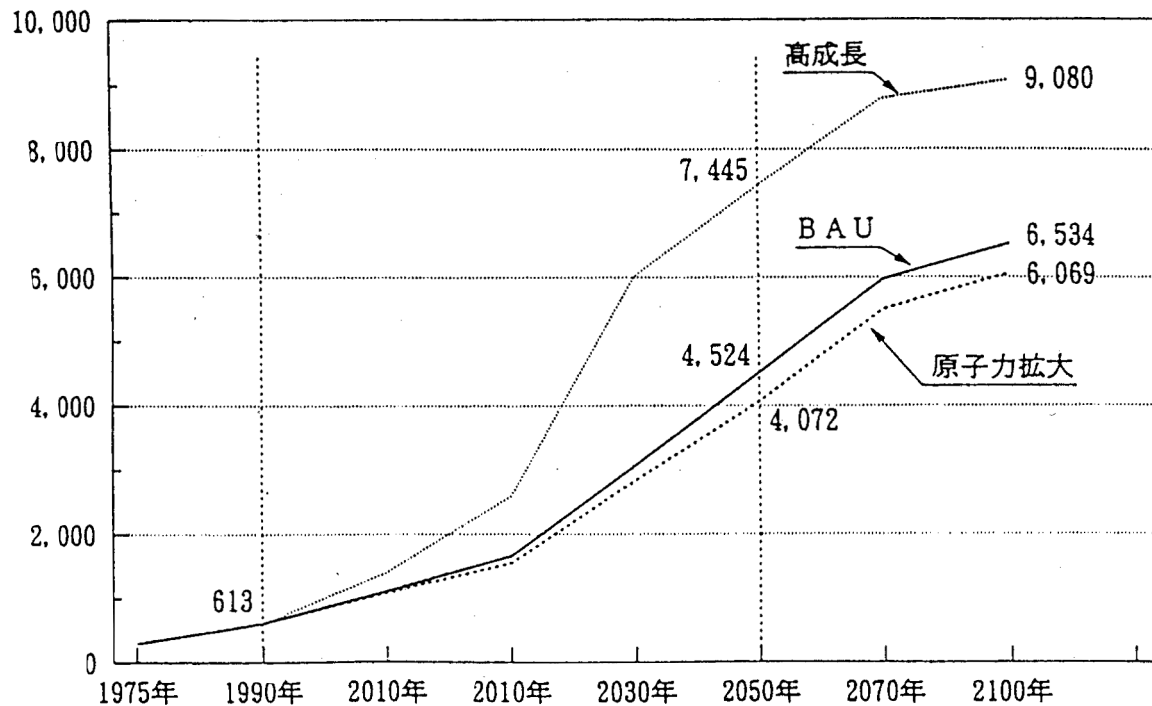


図 2 - 5 中国の炭酸ガス排出量

年	1975	1990	2000	2010	2030	2050	2070	2100
炭酸ガス排出量	4,463	5,848	7,219	8,055	9,957	13,881	18,689	21,813
炭酸ガス濃度	325	346	363	384	433	497	584	749
温度上昇	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.6	1.0	1.8
年	75 / 90	90 / 00	00 / 10	10 / 30	30 / 50	50 / 70	70 / 00	
炭酸ガス排出量	1.8	2.1	1.1	1.1	1.7	1.5	0.5	
炭酸ガス濃度	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	
温度上昇	-	-	-	-	9.4	2.6	2.0	

単位：炭素換算百万トン，PPMV，度

表 2 - 12 炭酸ガス濃度，気温上昇

ド等とその他途上国で普及する．  
 < 中国に関するケーススタディー結果 >

	1990 年	2050 年	2100 年
中 国（基準）	9 %	25 %	25 %
（高成長）	9	36	33
日 本	5	2	1
アメリカ	24	9	5

（注）原子力拡大ケースの一次エネルギーは基準ケースとほぼ同じ．

基本的には最終需要で同様に，2050 年以降，中国の一次エネルギーは基準ケースで世界の約 1 / 4 を占め，更に成長が加速すると 1 / 3 を占めることになる．

次に中国における各ケースの化石燃料消費は下記のとおりである．

中国の化石燃料消費（石油換算百万トン）

	1990 年	2050 年	2100 年
基準ケース	643(7.2%)	4,675(29.7%)	6,560(30.0%)
原子力拡大		4,200(28.0%)	6,093(28.4%)
高成長		7,721(41.7%)	9,116(37.3%)

（注）（ ）内は中国の世界に占める比率

中国は豊富な石炭資源等を背景に，21 世紀後半においても化石燃料のシェアが高く，世界の化石燃料消費のかなりが中国（30 ～ 40 % 程度）で消費さ

れることになる．

原子力拡大によって，4.7 億トン程度の化石燃料消費が削減される．しかし，脱化石燃料化という観点からみると，原子力の拡大だけではなかなか難しそうである．高成長ケースでは（このケースでは原子力は拡大を想定），基準ケースに対して 26 ～ 30 億トンほど化石燃料消費が増大する．この量は原子力発電に換算すると 20 億 kW に相当することになる．言い換えれば，中国の長期的な経済発展のスピードがほんの少し高まると，原子力の拡大だけでは化石燃料の削減はほとんど不可能であるといえる．

やはり，経済発展と化石燃料消費の抑制を両立していく本質的な解決には，GNP 当たりのエネルギー消費をいかに下げていくか，つまり省エネをいかに達成していくかということしかなかろう．かなりの省エネルギーが達成されるという状況中でこそ初めて，原子力の導入や新エネルギーの開発が大きな効果をもつことになろう．

（ 7 ）炭酸ガス排出量

世界の炭酸ガス排出量（炭素換算）の推移を示したのが表 2 - 11，中国の排出量を示したのが図 2 - 5 である．つまり，何もしなければ（BAU ケース），2100 年の炭酸ガス排出量は 1990 年レベル（5.8 億トン）の約 3.7 倍の 218 億トンに達する．現在はアメリカなどの先進国がその主要な排出源であるが，2100 年には中国（65 億トン，26 %）やアフ

	世界の動向（基準ケース）		中国の構成比				
	1990年	2100年		1990年	基準	原発拡大	高成長
人口（億人）	51	114	2.2倍	22.3%	17.0%	17.0%	14.5%
G N P（兆ドル）	20	307	15.4倍	1.8%	26.7%	26.7%	46.1%
鉄鋼生産（億トン）	7.7	39	5.1倍	8.6%	32.5%	32.5%	30.2%
最終エネルギー（億トン）	56	183	3.9倍	9.0%	26.7%	26.7%	32.8%
一次エネルギー（億トン）	77	281	3.6倍	8.6%	25.0%	24.3%	31.6%
発電電力量（Pwh）	11	52	4.7倍	6.1%	22.6%	22.6%	34.5%
炭酸ガス排出量（億トン）	58	213	3.7倍	10.5%	30.0%	28.4%	37.3%
基準ケースに対する炭酸ガス増減量						4.6	+ 25.2

リカ（33億トン，17％）がその位置にとって代わる．  
中国の炭酸ガスの排出量は次のとおりである．

中国の炭酸ガス排出量（炭素換算百万トン）			
	1990年	2050年	2100年
基準ケース	612(10.5%)	4,524(32.6%)	6,533(30.0%)
原子力拡大		4,072(30.3%)	6,069(28.4%)
高成長		7,445(44.3%)	9,080(37.3%)

（注）（ ）内は中国の世界に占める比率

基準ケースでの炭酸ガス排出量は2050年45億トン，2100年65億トンと，現在の世界全体の総排出量に匹敵する量あるいはそれ以上の量が，中国1国で排出されるわけである．原子力の拡大によって4.5億トン程度の排出量が削減される．これは中国にとっては7～10％程度の削減率，世界全体からみると2～3％の削減率に相当する．高成長ケースでは原子力拡大を進めても25～29億トン程度の増加が見込まれる．前述の化石燃料消費量の項で述べたと同様に，原子力だけでは大きな期待はできない．省エネ，新エネルギー導入を含めた3点セットが達成されて初めて，原子力の脱炭素化の役割が評価されよう．

### 2.3 まとめ

以上みてきたシミュレーション結果を1990年と2100年の比較，およびその中で中国の位置についてまとめると次のようになる．

現在中国は世界の人口の22％を占めているが，2100年には17％とその構成比はやや低下する．しかし，潜在的な超大国である中国が本ケースで示し

たように，今後順調な経済発展を遂げ，21世紀後半には現在の先進国並みあるいはそれを越える水準に達するとなると，世界経済への影響のみならず，資源制約，環境問題等々，地球規模での諸問題に対して多大なるインパクトを持つことになる．

先行して経済発展を遂げた現在の先進工業国が，途上国の今後の経済発展にとにかく言う資格はなかろう．地球的規模の資源や環境は人類共通のものであるが，有限な地球資源，環境保全を保ちながら，所得格差の是正をはかることは極めて困難であることが，本基準ケース（B A Uケース）でも示されている．

では，炭酸ガス排出量を現状程度に保つには，どのようなシナリオがあるのか．省エネルギー技術，非化石燃料（再生可能エネルギー，原子力等）技術の開発とその利用促進，更には国際的な技術協力が極めて重要であることは言うまでもない．あるいは，ある程度の経済的な犠牲も伴うかもしれないが，この場合，負担（所得分配）の問題がでてくる．

本スタディーでは，まず温暖化防止等のための特段のエネルギー対策・環境対策などを仮定しない，いわゆるB A Uケース（自然体ケース）を試算し，定量的に問題の大きさを捉えることを試みたが，この場合，人口は現在の2.2倍程度，一方，エネルギー消費量は3.6倍，炭酸ガス排出量は3.7倍の規模に達すると見込まれた．なかでも，将来の中国の経済発展をはじめとした動向が，資源問題，環境問題に対して大きな意味をもっていることが示されている．そこで，有望な対応策の1つのケースとして中国において原子力発電を拡大（3.3～3.5億kW）したケースを取り上げた．原子力拡大によって，4.6

億トン程度の炭酸ガスの排出量が削減されるが、全体の排出規模の大きさと比べると、原子力の拡大だけでは化石燃料消費、炭酸ガス排出量の大幅な削減は難しいそうである。また、中国の長期的な経済発展のスピードがほんの少し高まると（高成長ケース）、原子力の拡大だけでは化石燃料の削減はほとんど不可能であるといえる。やはり、経済発展と化石燃料消費の抑制を両立していく本質的な解決には、GNP当たりのエネルギー消費をいかに下げていくか、つまり省エネをいかに達成していくかということしかなかろう。かなりの省エネルギーが達成されるという状況中でこそ初めて、原子力の導入や新エネルギーの開発が大きな効果をもつことになる。

なお、この研究で利用した超長期世界エネルギー需給モデルは、世界のエネルギー需要と地球温暖化問題を分析するためのモデルとして世界的に知られているエドモンド・ライリーモデル、マン・リッチュルモデル、OECD-GREENEモデルなどの研究を踏まえて開発したものである。これらのモデルの研究については昨年度の報告を参照されたい。

## 参考文献

- (1) W.ロストウ,「経済成長の諸段階」, 木村健康 他訳, ダイヤモンド社, 1964年
- (2) エネルギー計量分析センター,「平成3年度石油製品品質面需給対策調査」, 1992年3月
- (3) A.S.Manne & R.C.Richels, "Global CO<sub>2</sub> Emission Reductions: The Impacts of Rising Energy Costs" Energy Journal, Vol.12, No.1
- (4) J.Edmonds & J.Reilly, "A Long-term global energy-economic model of carbon dioxide release from fossil fuel use" Energy Economics, Apr. 1983
- (5) R.Bohi, "Analyzing Demand Behavior: A Study of Elasticities" Johns Hopkins Press, 1981
- (6) 大山達雄 中島清三,「トランスログモデルにおける我が国の一次エネルギー消費分析」, 企画庁経済研究所シリーズ No.40, 1983年
- (7) 室田泰弘 中上英俊 伊藤浩吉,「家庭用エネルギー需要について」日本経済研究, 1983年
- (8) E.Bos, My Vu, Ann Levin & R.A.Bulatao, "World Population Projections 1992-93 edition", Published for the World Bank, The Johns Hopkins University Press
- (9) R.A.Bulatao, E.Bos, P.W.Stephens & My T. Vu, "Asian Region " Population Projections", 1889-90 edition, Working Paper series 331, Nov. 1989 Population and Human Resources Department, The World Bank
- (10) 国連,「世界人口白書」1992年 UNFPA, "THE STATE OF WORLD POPULATION", 1992
- (11) P.Dasgupta & G.Heal, "The Optimal depletion of Exhaustible Resources", R. E.Studies, May 1974
- (12) T.Johansson, H.Kelly, A.Reddy & R.Williams, Renewable Energy: sources for fuels and electricity, Island Press, 1992
- (13) 日本経済新聞, 93年7月14日
- (14) R.S.Pindyck, "The Structure of World Energy Demand " MIT Press, 1979
- (15) 槌屋治紀,「地球温暖化対策とシミュレーションモデルに関する調査」1990年3月
- (16) 室田泰弘,「エネルギーの経済学」, 日本経済新聞社, 1984年
- (17) 日本経済研究センター,「長期予測一次報告」, 93年3月
- (18) A.S.Manne & R.Richels, "GLOBAL CO<sub>2</sub> EMISSION REDUCTIONS - THE IMPACTS OF RISING ENERGY COSTS", ENERGY JOURNAL, Vol.12, No.1
- (19) OECD, "COSTS OF REDUCING CO<sub>2</sub> EMISSIONS: EVIDENCE FROM SIX GLOBAL MODELS" 1992
- (20) J.Sathaye & A.Kettner, "CO<sub>2</sub> Emissions from Major Developing countries" Energy Journal, Vol.12, No.1
- (21) 日本エネルギー経済研究所,「地球温暖化問題とグローバル経済モデル」1991年9月
- (22) M.Mintzer, "A Matter of Degrees: The Potential for controlling the Greenhouse Effect", World Resource Institute, Research Paper No.5, 1987