

超長期世界エネルギー需給モデルによる計量分析

理事・計量分析部長	伊藤浩吉
湘南エコノメトリックス代表	室田泰弘
第 2 研究部 石油グループ マネジャー	森田裕二
計量分析部 需要予測研究グループ マネジャー	星野光秀
計量分析部 計量分析グループ 研究員	高瀬香絵
計量分析部 統計情報グループ 研究員	沈 中元
計量分析部 需要予測研究グループ 研究員	杉山 淳
計量分析部 需要予測研究グループ 研究員	河田裕子
国際協力プロジェクト部 新再生可能エネルギーグループ 研究員	南條 敦
(現、日石三菱株式会社、技術開発部 機能商品事業グループ 主事)	

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託により行った「革新的エネルギー技術の実用化に関する基礎調査」により、再生可能エネルギーの供給可能量・コスト、在来型・非在来型化石燃料の資源量等の条件に基づき、2100 年に至る超長期の経済、人口、エネルギー需給を「超長期世界エネルギー需給モデル」により論理的・整合的・定量的に分析し、各種シミュレーション（シナリオ展開）を通じて、太陽光をはじめとした再生可能エネルギー、具体的には、ソーラー、バイオマス、風力、地熱等の導入量、導入時期等の分析を行うことにより、我が国における超長期のエネルギー政策の企画立案の基礎資料とすることを目的として行ったものである。

1. モデルの特徴・概要

(1) モデルの範囲

計算期間：2100 年まで

対象地域：世界を以下の 12 の地域に分類

アメリカ、中南米、アフリカ、中東、日本、中国、旧ソ連東欧、インド等、NIES/ASEAN、欧州 OECD、オセアニア、その他

エネルギー源の種類：

最終エネルギー：固体、液体、ガス、電力

一次エネルギー：石油（在来型のみならず、オイルサンド、ヘビーオイル等の非在来型も含む）、天然ガス（在来型のみならず、コールベットメタン、タイトサンドガス等の非在来型も含む）、石炭（固体利用、液化、ガス化）、水力、原子力、再生可能エネルギー（ソーラー（近郊型太陽光、大型太陽光、大型太陽熱）、バイオマス、風力、地熱、海洋（波力、海洋温度差、潮汐、潮流）

(2) モデルの特徴

本モデルの特徴は以下のとおりである。モデルの構造は図 2 を参照。

経済発展段階と人口、エネルギー消費を明示的に扱っている。

本モデルの大きな特徴は、経済発展段階を 1 人あたり所得で表現し、1 人あたり所得の水準が高くなればなるほど経済発展が進んだと考え、人口の伸び、経済成長率、エネルギー弾力性が経済発展段階、すなわち、1 人あたり所得によって決まってくるという形になっていることである。

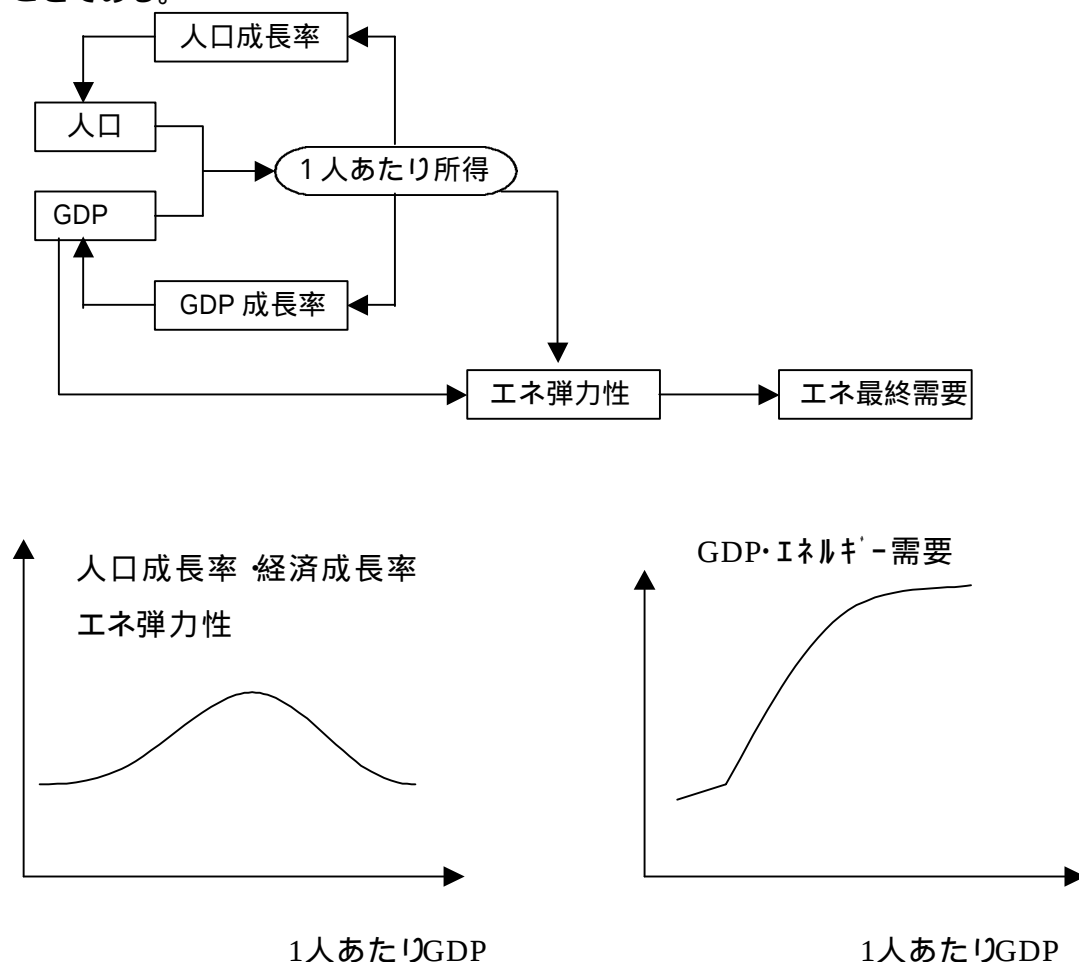


図1 モデルの基本的なメカニズム

これまでのモデルは、人口、経済成長率などを外生として与えているため、人口爆発などの問題を仮定から排除してしまう。また、構造変化がないか、あっても極めて緩やかと仮定してしまうという問題点があった。しかし、地球温暖化問題のように、対象は世界でかつ 1 世紀にも及ぶ長期的な問題をこうした仮定のもとに、狭い範囲で考えることに対する疑問もあって、このモデルは作られた。なお、最近、このモデルの発想を裏付けるような実証研究が出始めている。

再生可能エネルギーの導入について詳細な分析（コスト、利用可能量等）を行っている。

コストや潜在的な利用可能量上限（資源量＝ポテンシャル）投資による利用可能量の

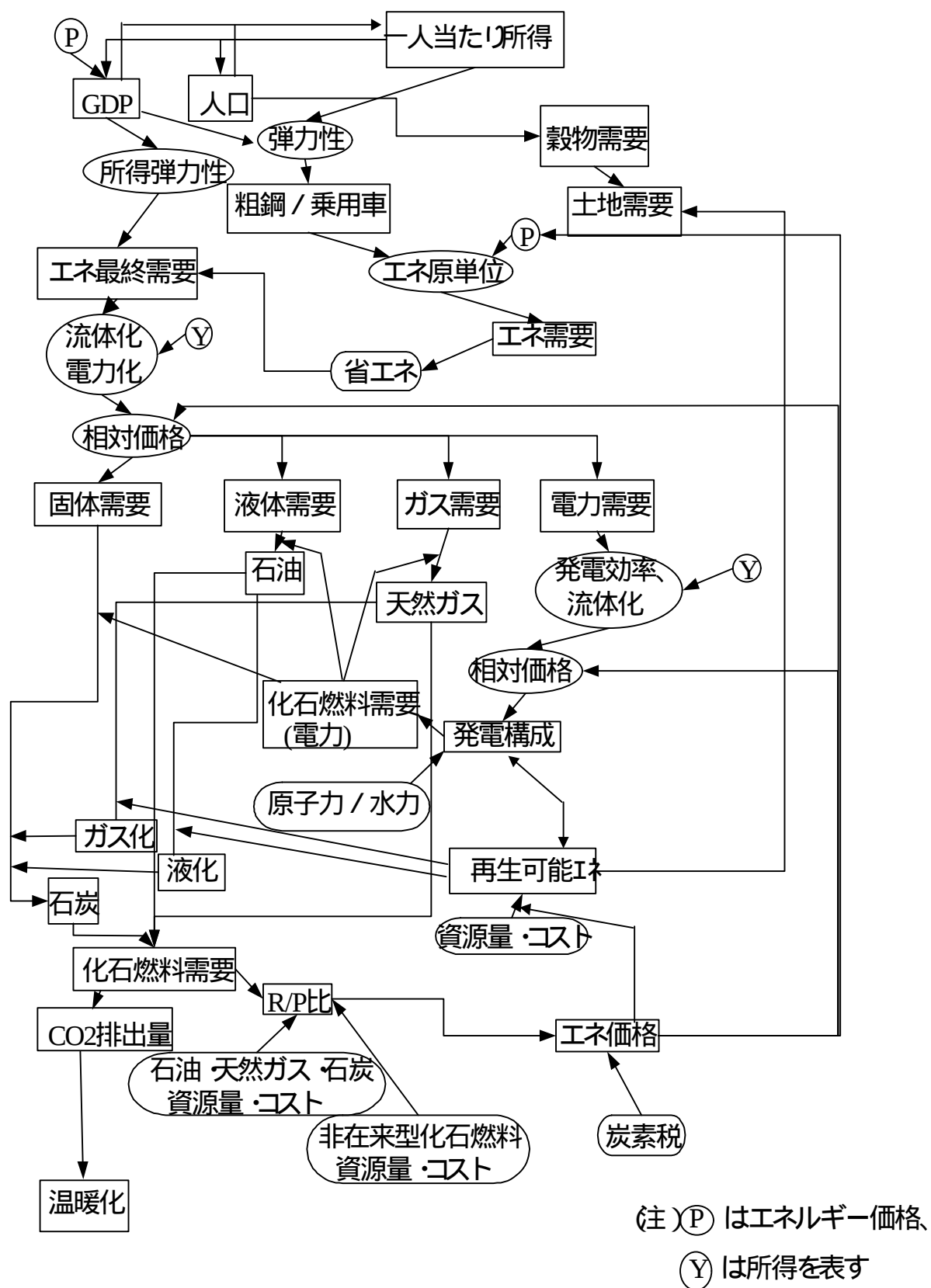


図2 モデルの構造

増加等の条件を与えて、競争性・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っている。

価格均衡経路の検討を行っている。

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図るため、需給が均衡する価格の問題も扱っている。

食料、鉄鋼、自動車などの需給を取り上げている。

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っている。また、鉄鋼は代表的な基礎物質として、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、エネルギー需要を決定する要素であるため、モデルで明示的に扱っている。

土地利用を考慮している。

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捉えている。

環境税（炭素税）の地域別導入を可能にしている。

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している。

“OPEN BOX APPROACH” をとっている。

地球温暖化問題は様々な分野の人の意見交換が重要である。そのためにもモデルのシミュレーション結果の意味やその構造が読みとれることが必要である。また、種々の政策分析（代エネ、省エネ、炭素税等）が可能なシミュレーション型のモデルとしている。

2. ケース設定・前提条件

(1) ケース設定

ケース設定を一覧表に示したのが表 1 である。

表 1 ケース設定一覧

			新エネ促進	省エネ進展	原子力拡大	炭素税導入
シナリオ要素	自然体ケース（BAU）					
	A	新エネ促進ケース				
	B	省エネ進展ケース				
	C	原子力拡大ケース				
	D	炭素税導入ケース				
シナリオ組合せ	AC	新エネ・原子力ケース				
	AB	新エネ・省エネケース				
	ABC	新エネ・省エネ・原子力				
	ABD	新エネ・省エネ・炭素税				

まず、ベースとなるケースとして自然体ケース（BAU）を想定する。BAU ケースは基本的には、過去のエネルギー・経済・技術進歩のトレンドの延長で、特段の環境制約を考えないケースである。今後の地球環境問題を考えた場合、BAU ケースはエネルギー資源や CO₂ 排出量からみてもおそらく許容できないものであり、より少ない CO₂ 排出量で持続的な経済発展を図るには、省エネルギーと非化石燃料への代替をいかに進めていくにかかっている。また、炭素税等の経済的手段も市場原理を活用した有力な手段の一つである。

そこで、本スタディーでは自然体ケースに対し、まず、典型的な地球環境対策手段として新エネ促進ケース、省エネ進展ケース、原子力拡大ケース、炭素税導入ケースの 4 つのシナリオ要素による個別の分析を行い、それぞれの効果を把握するとともに、これらの単独シナリオでは CO₂ の削減は不十分であるため、CO₂ 排出量削減目標の達成にむけて、さらに、この 4 つのシナリオ要素を組み合わせたケースを検討している。

以下、各ケースにつき概説する。

自然体ケース(BAU)

BAU ケースとは、基本的には、過去のエネルギー・経済・技術進歩のトレンドの延長で、特段の環境制約を考えないケースである。特段のブレークスルーを考えないケースと言ってもよい。様々な政策手段・シナリオ展開を考えていく際の基準となるケースである。

経済

経済については、先進国は比較的低成長で推移するも、途上国は、アジアを中心に高い経済成長を続けるため、全体として順調な成長を遂げる。

エネルギー需要

エネルギー需要については、途上国を中心に伸びていき、21 世紀後半には、世界のエネルギー需要の太宗は途上国が占め、最終エネルギー需要の電力化が進展する。

資源量

資源量については、様々な見方があるが、ここでは、手堅い見方をとっている。

一次エネルギー供給

（化石燃料）

21 世紀半ばには、世界の在来の石油、天然ガス資源は枯渇に近づき、石炭・非在来型石油・天然ガスの利用が進むことになる。

（再生可能エネルギー）

再生可能エネルギーは、21 世紀前半は、コスト的に化石エネルギーとの競合は難しい状況が続くが、21 世紀後半には、ある程度導入される。

（原子力）

原子力は、先進国を中心に導入を続ける国もあるが、削減に動く国もあるため、全体として、緩やかに増加するとの見方をとっている。

A．新エネルギー導入促進ケース

投資、技術移転、技術進歩、政策の力点が新エネルギーに置かれるとの想定を行っている。より具体的には、

市場導入条件が整う前の初期段階における公的部門における R&D 投資への補助金等のバックアップ。

加速的技術開発によるコストの低減。
関連プロジェクト推進のための産学官協力の推進。
途上国に対する技術協力
等により世界的に広範に導入されとの想定を行っている。

B．省エネルギー進展ケース

特に、途上国がエネルギー需要の増大を押さえつつ経済発展を達成するためには、先進技術を積極的に取り入れつつ、産業構造面でも高付加価値産業を主体にした成長を指向することが肝要である。本シナリオにおいては、このような観点に立ち以下の想定を置いている。

情報技術等の進歩及びその技術の途上国への移転による産業構造の情報化等によるエネルギー原単位の一層の改善。

先進国における一層の省エネルギーの推進と、発展途上国に対する省エネルギー技術の移転。

革新的エネルギー利用技術の浸透（燃料電池、コンバインドサイクル、マイクロガスタービン等）

C．原子力拡大ケース

非化石エネルギーの中でも原子力は大量導入のポテンシャルをもっているが、経済性以外の制約も多いのは確かであり、BAU ケースでは比較的控えめな想定を置いている。

原子力拡大ケースでは、世界的に原子力発電の拡大が容認され、21 世紀に半ばには高速増殖炉の実用化が本格化し、日本をはじめとした現在の先進国における穏やかな原子力導入拡大と、アジアの大国を中心に意欲的な導入が進むと想定している。

D．炭素税導入ケース

当初は先進国のみ導入（5 \$/バレル）を開始するが、次第に、他の地域も比較的低率で導入を開始し、21 世紀後半には世界一律の税率（20 \$/バレル）となるとの想定を行っている。価格メカニズムを通じた省エネルギーの進展と再生可能エネルギーへの代替が期待される。

BAU と比較すると、以上の 4 ケースでは CO₂ 排出量は削減されるが、これだけでは不十分である。そこで、CO₂ 排出量削減目標の達成にむけて、さらに、この 4 つのシナリオ要素を組み合わせたケースを検討している。

AC．新エネルギー・原子力 ケース

非化石エネルギーの新エネルギーと原子力の導入が促進される。

AB．新エネルギー・省エネルギー ケース

新エネルギーの促進に加え省エネルギーが進展する。

ABC．新エネルギー・省エネルギー・原子力ケース

新エネルギーの促進、省エネルギーの進展に加え、原子力の拡大を想定したケース。

ABD．新エネルギー・省エネルギー・炭素税ケース

新エネルギーの促進、省エネルギーの進展が、炭素税の導入という経済的な手段によって一層加速するケース。

(2) 前提条件

原子力と水力については外生値を与えている。これは原子力の導入量はむしろ社会的な要請に基づき政策的に定まり、水力も将来の導入量がほぼ固定化されたものと考えられるからである。この 2 つを除いたエネルギー資源の導入量は内生値しており、モデルではエネルギー資源採取における経済性を反映した指標として投資額を採用し、まず投資額に対応した「利用可能量」をモデル内部で、あるいは外生値として求めている。次いで、「利用可能量」と技術、採取コストを反映した指標としての石油価格（あるいは石油価格により定まる電力等の二次価格）によりモデル内部で「導入量」を求めるという 2 つのステップを踏んでいる。

投資のための原資はエネルギー使用に対する“使用税”に近い概念により確保され、各期間に蓄積された資金を次の期のエネルギー開発に配賦・投資することにより資源の確保を行なうものと想定している。石油資源の各カテゴリー段階における埋蔵量について R/P（埋蔵量/生産量）比を計算し、石油価格に代表されるエネルギーコストが関数的に上昇するように設定している。従ってあるエネルギー資源は適切な投資が行なわれかつコストが石油価格に見合う水準に達した時点で初めて導入されることになる。

化石エネルギーの資源量については IIASA^{注1)}-WEC による長期エネルギー見通し^{注2)}ならびに見通しの前提となった Hans-Holger Rogner によるスタディ結果^{注3)}を参考とし、在来型石油、天然ガスの資源量評価については石油鉱業連盟のスタディ結果^{注4)}（1995 年末値）を資源量のベースとしている。化石エネルギーは枯渇性の資源であり、利用可能量は毎年の導入量（生産量）に対応して減少するが、太陽エネルギーや地熱、風力といった再生可能エネルギーは、石油価格の上昇に対応して導入可能量はむしろ増加する。想定した BAU ケースの各エネルギー資源の利用可能量等は以下の通りである。なお、原子力拡大ケース、新エネルギー導入促進ケースを別途想定している。

注1) IIASA : International Institute for Applied Systems Analysis

注2) IIASA-WEC “ Global Energy Perspectives 1998 ”

注3) Hans-Holger Rogner “ An Assessment of World Hydrocarbon Resources, WP-96-56, May 1996 ”
Rogner は技術・石油価格の発展段階別に「在来型」「非在来型」の資源の採取可能量を区分している。

注4) 石油鉱業連盟、“石油・天然ガス等の資源に関するスタディ、1997 年 6 月 ”

表 2 資源量等前提条件

化石エネルギー

		確認埋蔵量	未発見量	計	1997 年 生産量
石油	在来 億 BBL	9,200	6,300	15,500	
	非在来		28,000	28,000	
	計	9,200 (R/P 38 年)	34,300	43,500	244
天然ガス	在来 Tcf	4,800	4,500	9,300	
	非在来		15,600	15,600	
	計	4,800 (R/P 60 年)	20,100	24,900	81
石炭	億トン	6,400 (R/P 130 年)	26,400	32,800	50

原子力発電

	発電能力 百万 kW			発電量 TWh		
	1990 年 実績	2100 年	伸び率 %	1990 年 実績	2100 年	伸び率 %
BAU ケース	344	580	0.5	1,990	3,800	0.6
拡大ケース		2,570	1.8		16,900	2.0

水力発電

	1990 年 実績	2100 年	伸び率% 2100/1990
発電量 TWh	2,105	3,150	0.4

ソーラー発電

	大規模ソーラー	住宅型ソーラー	世界の総発電電力量 (参考)1997 年 TWh
資源量 TWh/年	505,000	34,560	14,000

バイオマス、その他再生可能エネルギー

	資源量	導入可能量 (Max.)
バイオマス バイオガス MTOE /年	6,372 MTOE	540
バイオ水素		960
メタノール		1,905
発電 TWh /年		14,409(TWh)
風力発電 TWh /年	48,000	4,256
海洋エネルギー 波力 TWh /年	7,200	500
海洋温度差	330	9
潮汐	150	24
潮流	440	5
地熱発電 TWh /年	46,000	930

(注) BBL:バレル, Tcf:兆立方フィート, TWh:兆ワット時, MTOE:石油換算百万トン

・ BAU ケースの予測結果

BAU ケースの予測結果の概要を下表に示す。

(1) 全体の流れ

表 3 BAU 予測結果の概要

人口 億人	1990 年	51 億人
	2050 年	104 億人
	2100 年	117 億人
GDP (1990 年価格)	1990 年	20 兆 US\$
	2050 年	92 兆 US\$
	2100 年	225 兆 US\$
GDP 伸び率%	1990-2050 年	2.1%
	2050-2100 年	2.1%
一人あたり所得 (千\$/人)	1990 年	4.0 千\$/人
	2050 年	8.9 千\$/人
	2100 年	19.2 千\$/人
一次エネルギー消費量 (石油換算)	1990 年	83 億トン
	2050 年	203 億トン
	2100 年	273 億トン
原単位改善率 (%/年)	1990-2050 年	1.0%/年
	2050-2100 年	1.1%/年
原子力供給量 (石油換算) (一次エネルギーシェア%)	1990 年	5.1 億トン (6.2%)
	2050 年	8.6 億トン (4.3%)
	2100 年	9.9 億トン (3.6%)
再生可能エネルギー供給量 (石油換算) (一次エネルギーシェア%)	2050 年	28 億トン (13.6%)
	2100 年	62 億トン (22.6%)
炭酸ガス排出量 (炭素換算)	1990 年	59 億トン
	2050 年	133 億トン
	2100 年	159 億トン
CO ₂ /一次エネルギー (炭素ト/石油ト)	1990 年	0.70
	2050 年	0.65
	2100 年	0.58

2100 年の結果を見ると、世界の人口は現在の 60 億人が 117 億人とほぼ倍増する。1990 年と比較すると GDP は 20 兆ドルから 225 兆ドルと年率 2% 程度の成長を続ける。この結果、一人あたりの GDP は約 4 千ドルから約 19 千ドルへと 5 倍近く増加する。現在の多くの途上国も 21 世紀半ばには先進国の仲間入りを果たす。

一次エネルギー消費量は 83 億トンから 273 億トンへと 3 倍以上の大幅な増加を示す。再生可能エネルギーのシェアが 23% と増加する結果、原子力の若干の増加とも相俟って二酸化炭素の排出量としては 59 億トンから 159 億トンへと 2.7 倍程度の増加に留まる。一次エネルギー消費(石油換算/トン)あたりの二酸化炭素排出量は 1990 年の 0.7 炭素換算トンから 2100 年には 0.58 トン程度に低下する。

(2) 一次エネルギー構成の推移

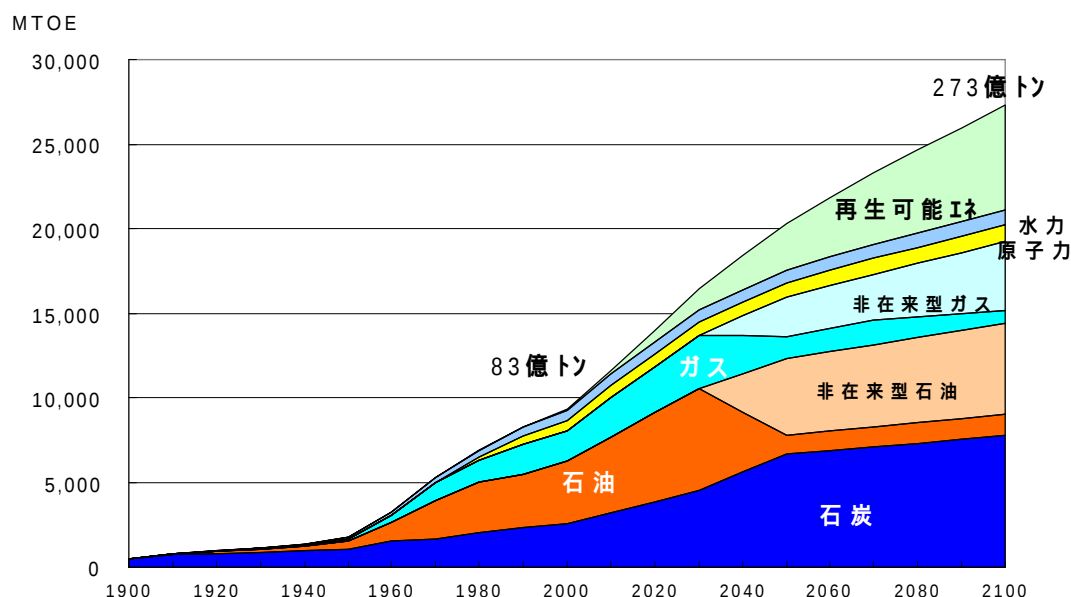


図3 一次エネルギー供給量の推移

一次エネルギーの構成をみると(図3) 在来型の石油は2030年を過ぎる頃に生産のピークを迎え、非在来型石油の生産が開始される。ただ、埋蔵量の豊富な中東では内需見合いでの在来石油の生産が継続される。天然ガスについては、石油よりやや遅れて、在来型天然ガスがピークを打ち、非在来型天然ガスの生産が始まる。ただ、埋蔵量の豊富な中東、ロシアでは内需見合いでの在来型天然ガスの生産が継続される。

一方、脱カーボンの動きから見て一見したところ今後の石炭消費量は減少傾向にあるものと予想されるが、モデルによる予測結果では在来石油、在来天然ガスが生産のピークを迎えるころから、資源量が豊富な石炭の消費量はむしろ増加に転じる。

これは特に中国、インド等石油・天然ガス資源に乏しい産炭国においては消費の抑制が難しいことと、資源量としては豊富に存在することから石炭の液化・ガス化あるいはクリーンコールテクノロジーの進展により利用技術・経済性において他のエネルギー源に対抗することが可能となることによる。シェアで見ると、現在の27%程度のシェアは、2050年頃には33%程度まで増加し、新エネが大量に導入される2100年に至っても現在と同レベルのシェアを維持するものと見られる。

一方、石油は現在の約40%のシェアが2100年には24%程度に低下する。天然ガスは、ほぼ横ばいであるが、最終需要ベースでは、シェアは増加する。これに対し再生可能エネルギーは1990年の0.3%のシェアから、2030年頃から導入が加速し、2100年には22.6%へと大きく増加する。中でもバイオマスと太陽エネルギーの利用が著しい。その他の再生可能エネルギーには地熱や海洋エネルギー、風力などが含まれるが、量としてはわずかなものに留まる。

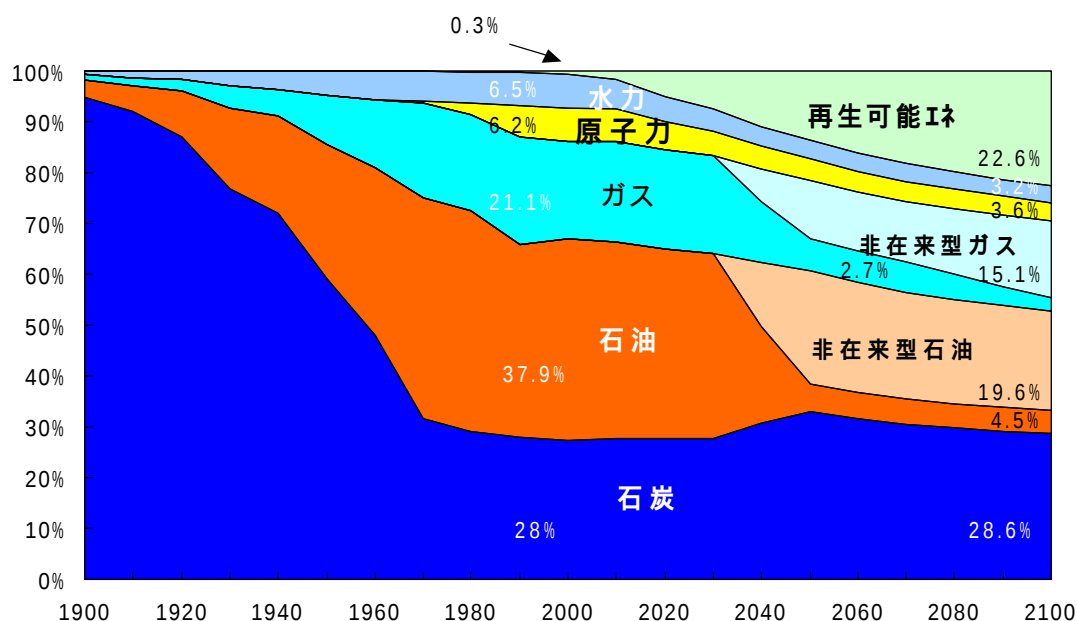


図4 一次エネルギー消費の構成

(3) 現在の先進国と途上国

以上の予測の結果を日本を含む現在の先進国（OECD 諸国）と途上国との対比で見ると、1990年との対比では人口は16%から8%へと低下する。一方GDPも69%から25%に低下し、逆に途上国のシェアが75%と大きな発展が見込まれている。反面、OECD 諸国の一次エネルギー消費におけるシェアは50%から21%へと低下し、途上国のエネルギー消費が大きく増加する。この結果、二酸化炭素の排出量では途上国のシェアが81%へと増加する。

このことから、温暖化問題は途上国のエネルギー問題といっても過言ではなく、地球温暖化対策を考える際には途上国への技術移転、CDM 等の国際協力が極めて重要であることがわかる。

表4 世界における OECD のシェア (%)

		1990 年	2100 年
人口	OECD	16	8
	途上国	84	92
GDP	OECD	69	25
	途上国	31	75
一次エネルギー	OECD	50	21
	途上国	50	79
CO ₂ 排出量	OECD	48	19
	途上国	52	81

同様に世界における日本のシェアを見たものが以下の表である。日本の GDP は世界の 14% を占めていたが 3%にまで低下する。また一次エネルギー消費も 5.2%から 2.3%に、二酸化炭素の排出量は 5.0%から 1.9%へと低下する。このため、地球温暖化というグローバルな問題を考えたときには、もはや日本が単独で二酸化炭素の排出量を抑制したところで効果はわずかなものに留まり、途上国との協力を主体とする地球規模の対応が不可欠なものとなる。

表5 世界における日本のシェア（％）

	実績		予測					
	1975	1990	2000	2010	2030	2050	2070	2100
GDP	11.0	14.1	12.8	11.3	9.0	6.7	4.8	3.0
人口	2.8	2.4	2.1	1.8	1.4	1.1	1.0	0.8
一次エネルギー消費	5.4	5.2	5.4	4.6	3.5	2.9	2.6	2.3
石炭	3.3	3.1	2.5	1.9	1.2	1.7	1.5	1.3
石油	8.4	7.6	6.9	5.7	4.4	4.4	3.8	3
天然ガス	1.1	2.7	3.4	3.0	2.7	3.7	3.7	2.9
原子力	6.1	9.4	15.0	15.9	15.2	14.6	13.8	13.3
水力	5.6	4.4	4.3	4.3	4.3	4.4	4.0	3.8
再生可能エネルギー	0.0	7.1	3.3	2.5	1.9	1.4	1.3	1.1
CO ₂ 排出量	5.5	5.0	4.6	3.8	2.8	2.4	2.2	1.9

表 6 BAU ケースの予測結果

GDP、人口等													
	1990	2000	2010	2030	2050	2070	2100	90/00	00/10	10/30	30/50	50/70	70/00
GDP(10億\$87p)	20,171	26,966	35,978	58,785	92,283	139,353	224,765	2.9	2.9	2.5	2.3	2.1	1.6
人口(百万人)	5,083	6,125	7,136	8,689	10,350	10,893	11,691	1.9	1.5	1.0	0.9	0.3	0.2
一人当たり所得(千\$ / 人)	4.0	4.4	5.0	6.8	8.9	12.8	19.2	1.0	1.4	1.5	1.4	1.8	1.4
最終エネ消費	5,555	6,348	7,756	10,832	13,216	14,852	17,376	1.3	2.0	1.7	1.0	0.6	0.5
一次エネ消費/GDP (TOE/\$)	412	347	322	279	220	167	121	-1.7	-0.7	-0.7	-1.2	-1.4	-1.1
一次エネ消費/人 (TOE/人)	1.6	1.5	1.6	1.9	2.0	2.1	2.3	-0.7	0.6	0.8	0.2	0.4	0.3
最終エネルギー消費													
	1990	2000	2010	2030	2050	2070	2100	90/00	00/10	10/30	30/50	50/70	70/00
固体需要	1,035	1,144	1,439	2,073	2,431	2,511	2,724	1.0	2.3	1.8	0.8	0.2	0.3
液体需要	2,606	3,012	3,523	4,806	5,723	6,290	7,170	1.5	1.6	1.6	0.9	0.5	0.4
ガス需要	1,055	1,114	1,394	1,876	2,343	2,691	3,349	0.6	2.3	1.5	1.1	0.7	0.7
電力需要	859	1,078	1,399	2,077	2,720	3,360	4,134	2.3	2.6	2.0	1.4	1.1	0.7
合計	5,555	6,348	7,756	10,832	13,216	14,852	17,376	1.3	2.0	1.7	1.0	0.6	0.5
シェア(%)													
固体需要	18.6	18.0	18.6	19.1	18.4	16.9	15.7						
液体需要	46.9	47.5	45.4	44.4	43.3	42.4	41.3						
ガス需要	19.0	17.6	18.0	17.3	17.7	18.1	19.3						
電力需要	15.5	17.0	18.0	19.2	20.6	22.6	23.8						
一次エネルギー供給													
	1990	2000	2010	2030	2050	2070	2100	90/00	00/10	10/30	30/50	50/70	70/00
石炭	2,324	2,551	3,211	4,556	6,692	7,093	7,799	0.9	2.3	1.8	1.9	0.3	0.3
石油	3,148	3,719	4,476	5,983	1,094	1,171	1,241	1.7	1.9	1.5	-8.1	0.3	0.2
新規石油	0	0	0	0	4,554	4,882	5,359	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3
天然ガス	1,754	1,779	2,306	3,170	1,289	1,438	724	0.1	2.6	1.6	-4.4	0.5	-2.3
新規天然ガス	0	0	0	0	2,305	2,736	4,120	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	1.4
原子力	513	618	717	789	864	936	990	1.9	1.5	0.5	0.5	0.4	0.2
水力	543	627	690	705	756	816	873	1.4	1.0	0.1	0.3	0.4	0.2
再生可能エネルギー	28	54	189	1,223	2,773	4,245	6,167	6.8	13.3	9.8	4.2	2.2	1.3
合計	8,310	9,349	11,588	16,426	20,326	23,316	27,273	1.2	2.2	1.8	1.1	0.7	0.5
シェア(%)													
石炭	28.0	27.3	27.7	27.7	32.9	30.4	28.6						
石油	37.9	39.8	38.6	36.4	5.4	5.0	4.5						
新規石油	0.0	0.0	0.0	0.0	22.4	20.9	19.6						
天然ガス	21.1	19.0	19.9	19.3	6.3	6.2	2.7						
新規天然ガス	0.0	0.0	0.0	0.0	11.3	11.7	15.1						
原子力	6.2	6.6	6.2	4.8	4.3	4.0	3.6						
水力	6.5	6.7	6.0	4.3	3.7	3.5	3.2						
再生可能エネルギー	0.3	0.6	1.6	7.4	13.6	18.2	22.6						
CO2排出量(百万Cトン)													
	1990	2000	2010	2030	2050	2070	2100	90/00	00/10	10/30	30/50	50/70	70/00
CO2排出量	5,853	6,553	8,120	11,168	13,269	14,327	15,855	1.1	2.2	1.6	0.9	0.4	0.3
CO2/人 (CT / 人)	1.2	1.1	1.1	1.3	1.3	1.3	1.4	-0.7	0.6	0.6	0.0	0.1	0.1
CO2/一次エネ消費(CT/TOE)	0.70	0.70	0.70	0.68	0.65	0.61	0.58	0.0	0.0	-0.2	-0.2	-0.3	-0.2
再生可能エネうちわけ													
	1990	2000	2010	2030	2050	2070	2100	90/00	00/10	10/30	30/50	50/70	70/00
ソーラー													
近郊	0.0	0.0	6.9	96.5	261.7	502.1	881.0	0.0	0.0	14.1	5.1	3.3	1.9
大型	0.0	0.0	0.0	106.4	389.9	734.3	998.4	0.0	0.0	0.0	6.7	3.2	1.0
ソーラー合計	0.0	0.0	6.9	202.9	651.6	1236.4	1879.4	0.0	0.0	18.4	6.0	3.3	1.4
バイオマス	18.7	36.7	127.9	828.1	1797.0	2613.7	3868.0	14.4	13.3	9.8	3.9	1.9	1.3
風力	0.9	5.7	29.5	130.7	238.6	296.7	309.4	20.4	17.8	7.7	3.1	1.1	0.1
地熱	8.3	11.7	21.2	45.5	58.9	64.8	70.9	3.5	6.1	3.9	1.3	0.5	0.3
海洋	0.1	0.1	3.8	15.8	26.7	33.0	38.9	-0.2	39.0	7.4	2.6	1.1	0.6
再生可能エネ合計	28.0	54.3	189.2	1223.1	2772.8	4244.6	6166.6	11.1	13.3	9.8	4.2	2.2	1.3

4. 各ケースの比較

表 7 に BAU ケースに対してシナリオ展開によりシミュレーションを行なったケースの比較を示す。

表 7 各ケースの比較 (2100 年)

	BAU ケース	新エネ促進 ケース	原子力拡大 ケース	省エネ進展 ケース	炭素税導入 ケース	新エネ促進 & 省エネケース	新エネ促進 & 原子力ケース	新エネ促進 省エネ 炭素税ケース	新エネ促進 省エネ 原子力ケース
GDP (10億 \$ 1987年価格)	224,765	224,792	225,180	227,382	221,943	227,869	226,501	224,226	227,869
人口 (百万人)	11,691	11,691	11,690	11,679	11,719	11,685	11,694	11,713	11,685
一人当たり所得 (千 \$ /人)	19.2	19.2	19.3	19.5	18.9	19.5	19.4	19.1	19.5
一次エネルギー消費/GDP (TOE/百万 \$)	121.4	121.4	123.9	85.8	112.9	85.4	126.4	80.5	87.6
一次エネルギー消費/人 (TOE/人)	2.3	2.3	2.4	1.7	2.1	1.7	2.4	1.5	1.7
エネルギー最終需要 (MTOE)									
固体需要	2,724	2,726	2,750	1,891	2,468	1,905	2,827	1,701	1,905
液体需要	7,170	7,175	7,239	5,051	6,443	5,088	7,440	4,505	5,088
ガス需要	3,349	3,352	3,381	2,399	2,982	2,413	3,470	2,116	2,413
電力需要	4,134	4,137	4,173	2,992	3,679	3,009	4,283	2,636	3,009
合計	17,376	17,390	17,543	12,333	15,571	12,415	18,019	10,958	12,415
エネルギー最終需要 (シェア%)									
固体需要	15.7	15.7	15.7	15.3	15.8	15.3	15.7	15.5	15.3
液体需要	41.3	41.3	41.3	41.0	41.4	41.0	41.3	41.1	41.0
ガス需要	19.3	19.3	19.3	19.5	19.1	19.4	19.3	19.3	19.4
電力需要	23.8	23.8	23.8	24.3	23.6	24.2	23.8	24.1	24.2
合計	100	100	100	100	100	100	100	100	100
一次エネルギー消費 (MTOE)									
固体燃料	7,799	6,197	6,558	4,903	5,987	3,865	5,411	3,099	3,013
在来石油	1,241	348	1,210	848	777	4	328	0	183
新規石油	5,359	2,567	4,626	3,180	3,995	1,478	2,220	1,350	974
在来天然ガス	724	721	729	491	720	490	744	482	488
新規天然ガス	4,120	4,024	3,470	2,569	3,824	2,552	3,544	2,330	1,951
原子力	990	990	4,344	972	972	972	4,344	972	4,328
水力	873	873	873	813	873	813	873	813	813
再生可能エネルギー	6,167	11,388	6,094	5,740	8,166	9,238	11,067	9,137	8,334
うち大規模ソーラー	998	5,754	979	879	2,913	4,125	5,552	3,897	3,587
合計	27,273	27,106	27,903	19,516	25,315	19,412	28,532	18,184	20,083
一次エネルギー消費 (シェア%)									
固体燃料	28.6	22.9	23.5	25.1	23.7	19.9	19.0	17.0	15.0
在来石油	4.5	1.3	4.3	4.3	3.1	0.0	1.2	0.0	0.9
新規石油	19.6	9.5	16.6	16.3	15.8	7.6	7.8	7.4	4.9
在来天然ガス	2.7	2.7	2.6	2.5	2.8	2.5	2.6	2.7	2.4
新規天然ガス	15.1	14.8	12.4	13.2	15.1	13.1	12.4	12.8	9.7
原子力	3.6	3.7	15.6	5.0	3.8	5.0	15.2	5.3	21.5
水力	3.2	3.2	3.1	4.2	3.4	4.2	3.1	4.5	4.0
再生可能エネルギー	22.6	42.0	21.8	29.4	32.3	47.6	38.8	50.3	41.5
うち大規模ソーラー	3.7	21.2	3.5	4.5	11.5	21.2	19.5	21.4	17.9
合計	100	100	100	100	100	100	100	100	100
CO ₂ 排出量 (10 ⁶ CT)	15,855	11,238	13,633	9,878	12,409	6,787	9,900	5,786	5,331
CO ₂ 排出量/人 (CT/人)	1.36	0.96	1.17	0.85	1.06	0.58	0.85	0.49	0.46
CO ₂ 排出量/一次エネルギー消費 (CT/TOE)	0.56	0.40	0.47	0.48	0.46	0.34	0.34	0.28	0.25

(1) 新エネルギー促進ケース

	2050 年	2100 年
新エネルギー導入量 (石油換算 10 億ト)		
BAU	2.7 (13.6%)	6.2 (22.6%)
新エネルギー促進ケース	4.2 (20.7%)	11.9 (42.0%)
CO ₂ 排出量 (10 億 c - t)		
BAU	13.3	15.9
新エネルギー促進ケース	12.0	11.2

新エネ促進ケースは大規模ソーラーが増加の牽引役となるが、風力や海洋エネルギー（波力）の導入も促進され、2100 年における一次エネルギーにおけるシェアは 42%に達する。この結果、脱炭素化が進展し、2100 年の CO₂ 排出量は BAU に比べ 47 億トン（約 30%）程度

削減される。

表 8 再生可能エネルギー導入量(2100 年)のケース比較

	BAU ケース	新エネルギー ケース	原子力拡大 ケース	省エネルギー ケース	炭素税導入 ケース	新エネルギー & 省エネルギー ケース	新エネルギー & 原子力 ケース	新エネルギー 省エネ 炭素税 ケース	新エネルギー 省エネ 原子力 ケース
再生可能エネルギーの内訳(MTCE)									
ソーラー	1879	6636	1861	1755	3795	4998	6427	4770	4403
近郊型ソーラー	881	882	882	877	882	873	875	873	816
大規模ソーラー	998	5754	979	879	2913	4125	5552	3897	3587
太陽光発電	939	5409	921	826	2738	3877	5218	3663	3372
太陽熱発電	60	345	59	53	175	248	333	234	215
バイオマス	3868	3872	3812	3562	3949	3354	3757	3480	3123
風力	309	700	311	316	313	710	705	711	649
地熱	71	72	71	70	71	69	70	69	64
海洋発電	39	108	39	38	39	107	109	108	96
波力	36	105	36	35	36	104	106	105	93
海洋温度差	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.5	0.4
潮汐	1.7	1.7	1.7	1.8	1.8	1.8	1.7	1.9	1.7
潮流	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
合計	6167	11388	6094	5740	8167	9238	11067	9137	8334

(2) 省エネルギー進展ケース

	2050 年	2100 年	1990-2100 省エネ率
一次エネルギー消費量 (10 億トン)			
BAU	20.3	27.3	-1.1%
省エネルギー進展ケース	16.0	19.5	-1.4%
CO ₂ 排出量 (10 億 c - t)			
BAU	13.3	15.9	
省エネルギー進展ケース	9.7	9.9	

省エネルギー進展ケースは、省エネルギー技術の進展と省エネ型産業構造への指向により、途上国を中心にエネルギー弾性値は低下し、省エネルギー率は BAU に比べ年率 0.3%ほど向上する。2100 年における一次エネルギー消費量は BAU ケースに比べ約 30%減少する。CO₂の排出量で見ると、炭素税導入ケースでは BAU ケースと比較して約 60 億トン減少(38%減)する。

(3) 原子力拡大ケース

	1990 年	2050 年	2100 年
原子力設備容量 (百万 kW)			
発電シェア (%)			
BAU	344 (18.3%)	510 (9.2%)	580 (6.9%)
原子力拡大ケース		1,180 (21.5%)	2,570 (30.2%)
CO ₂ 排出量 (10 億 c - t)			
BAU		13.3	15.9
原子力拡大ケース		12.4	13.6

1990 年における原子力発電設備は 344 百万 kW、発電シェアでは 18.3%である。BAU ケースでは、発電シェアは 6.9%に減少するが、原子力拡大ケースでは 30.2%に増加する。ただ、原子力の拡大により発電用の化石エネルギーの消費は減少するものの全体への寄与はさほど大きくないため、CO₂の排出量で見ると、BAU ケースと比較して約 23 億トンの減少（14%減）に留まる。

（４）炭素税導入ケース

	2050	2100	1990-2100 省エネ率
一次エネルギー消費量（10 億 TOE）			
BAU ケース	20.3	27.3	-1.1%
炭素税導入ケース	19.6	25.3	-1.2%
CO ₂ 排出量（炭素換算 10 億トン）			
BAU ケース	12.8	15.9	
炭素税導入ケース	11.7	12.4	

炭素税導入ケースは 2010 年頃に先進国を中心に約 5 ドル/バレル程度（炭素トンあたり約 40 ドル）以後段階的に後進国にも導入が行なわれ、2100 年には一律約 20 ドル/バレル程度の課税になるものと想定している。

価格効果による省エネルギーの進展により、BAU に比べ約 7%（2100 年）の省エネルギーが達成される。省エネルギーの改善率は年率約 0.1%である。

また、炭素税は各エネルギーが有する炭素量に対応して賦課されるため、エネルギー間の比較では再生可能エネルギーに有利に働く。再生可能エネルギーの導入量は 2050 年に 37 億トン、2100 年には 82 億トンに増加し、2100 年には、再生可能エネルギーの一次エネルギーに占めるシェアは、BAU よりも 10%近く多い 32%に達する。CO₂の排出量で見ると、炭素税導入ケースでは BAU ケースと比較して約 35 億トン減少（22%減）する。

（５）各ケースを組み合わせたケース

以上の単独シナリオでは CO₂の削減は不十分であるため、CO₂排出量削減目標の達成に向け、さらに、この 4 つのシナリオ要素を組み合わせたケースを検討した。

新エネルギー導入促進ケースを基準に省エネルギー進展ケース、原子力拡大ケース、あるいは炭素税導入ケースを組み合わせたケースの予測結果を次図に示す。新エネルギー導入促進と原子力拡大を組み合わせたケースでは、CO₂排出量では 99 億トンと省エネルギー進展ケースと同レベルに留まる。他のケースではいずれも一次エネルギー消費量が減少し、CO₂排出量で見ると新エネルギー導入促進に省エネルギー進展を組み合わせたケースでは 68 億トンとなる。これに更に原子力拡大を組み合わせたケース、あるいは炭素税導入を組み合わせたケースでは、それぞれ 53 億トン、58 億トンと 1990 年水準（59 億トン）を下回る。

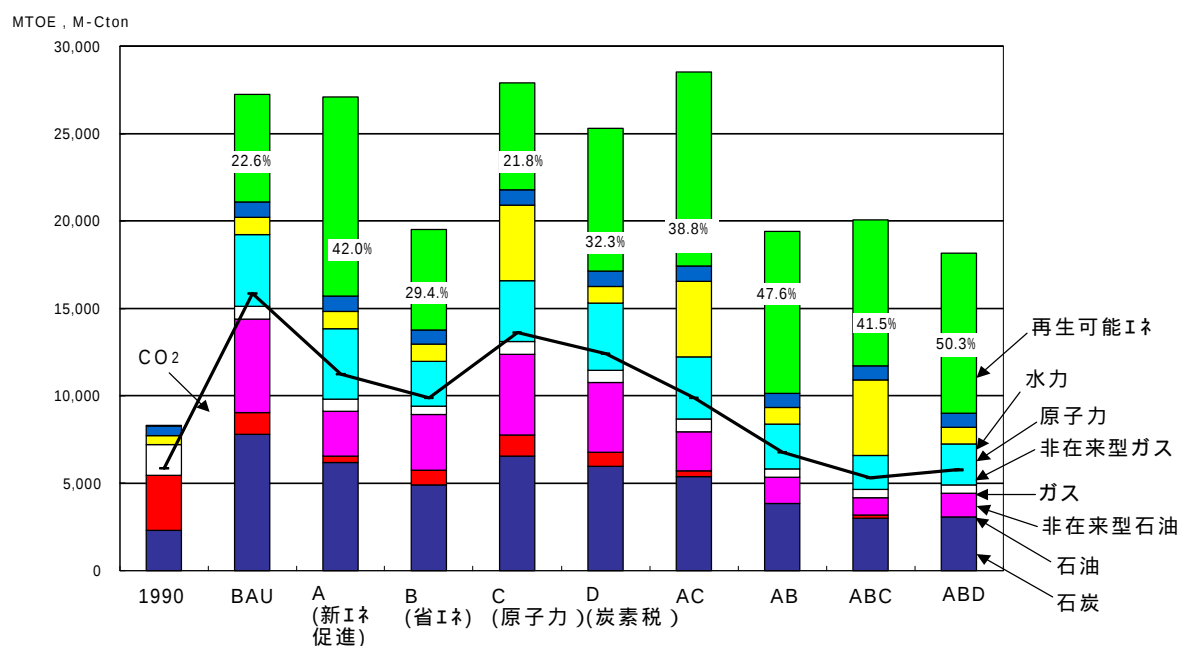


図 5 一次エネルギー消費及び CO₂ 排出量のケース別比較 (2100 年)

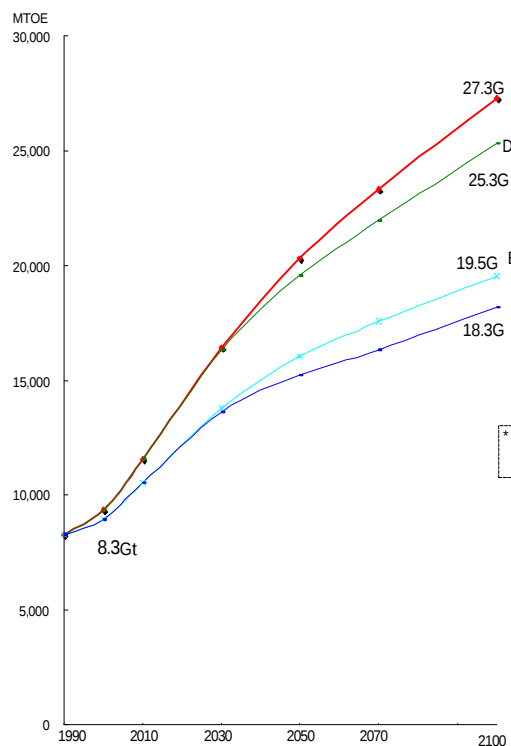


図 6 一次エネルギー消費の推移

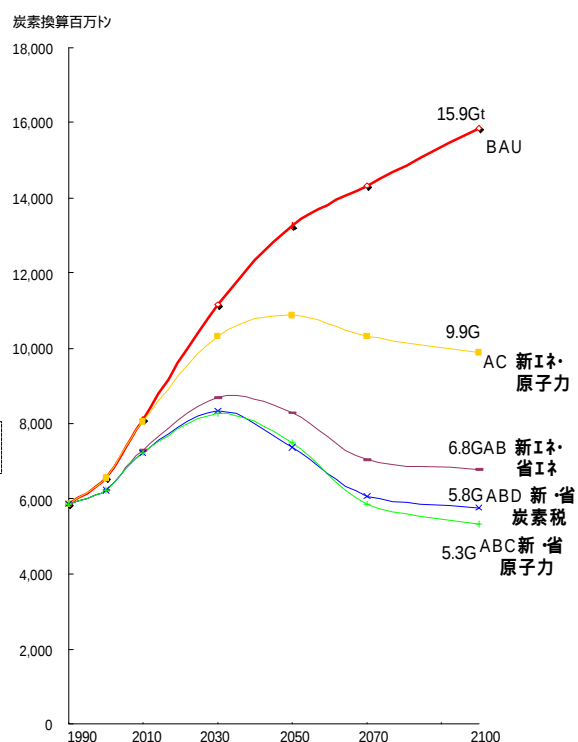


図 7 CO₂ 排出量の推移

5．結論

シミュレーション分析を通じて様々な温暖化対策の効果をみた。本スタディーは未来を予測したものではなく、経済成長、人口、エネルギー需要、化石燃料の資源量、再生可能エネルギーの利用可能量・コスト等の要素に基づき、論理的な整合性をもって、将来の姿を計量的に表現したもので、将来の選択枝、可能性を提示したものである。将来の諸要因の不確実性の幅を考えると、解は幅を持ってみるべき性格のものであるが、本スタディーのインプリケーションを一言で表せば、地球温暖化問題の解決のためには、単一の決定的な方策はなく、下記のような様々な手段を組み合わせた取り組みが重要であるということである。

- (1) 先進国における一層の省エネルギーの推進と、発展途上国に対する省エネルギー技術の移転により世界的な省エネルギーを推進することが重要である（CDM、排出権取引等）。
- (2) 大規模ソーラを始め多くの新・再生可能エネルギーは、その潜在量は極めて大きいものの、開発技術が具象化するには長期のリードタイムを要し、また、現段階におけるコストでは在来エネルギーには太刀打ちできない。大幅なコスト低下が不可欠であるが、このためには、加速的技術開発によるコスト削減、早期の市場参入をはかるべく、投資面における公的部門によるバックアップ、関連プロジェクト推進のための産学官・国際協力が極めて重要である。市場導入条件が整ったのちは、徐々に市場メカニズムにまかせることとなる。しかし、大量導入→コスト低下の循環にのせるまでは、政策的な役割は極めて大きい。
- (3) 環境税も環境保全コストを応分に負担し、マーケットメカニズムの中で、省エネ、脱炭素化を進めるための有効な手段の一つである。
- (4) 化石燃料のよりクリーンな活用、なかでも、資源が豊富で地域的に偏在していない石炭の有効活用（クリーンコール、CO₂固定化技術等）が現実的な選択枝の一つである。

したがって、省エネ・環境技術大国であり、経済大国である日本の役割は極めて大きい。この分野で日本は先導的な役割を担うべきであり、これは世界の長期的な環境問題解決に大きく貢献するばかりでなく、日本自身にとっても、持続的な経済発展を可能にする大きな選択の道である。化石燃料資源はいずれは枯渇するであろうが、技術は永遠に枯渇することのない財産である。

お問い合わせ info@tky.ieej.or.jp