

超長期世界エネルギー需給モデルによる核融合導入シナリオ分析

財団法人日本エネルギー経済研究所

理事・研究統括本部長・計量分析部長 伊藤浩吉
計量分析部 計量分析グループマネージャー 奥村憲博
計量分析部 主任研究員 沈中元

International Energy Agency

Energy Technology Policy Division Principal Administrator 星野光秀

1. はじめに

これまで核融合については、技術が実用化段階に至っていないこともあり、将来のエネルギー源としてのポテンシャルについて定量的な分析がなされてきていない。そこで、ここでは、核融合の発電コスト、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(WING Model)」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、核融合の導入量、導入時期等のシナリオ分析を行う。

2. モデルの特徴・概要

(1)モデルの範囲

モデルの計算期間、対象地域、エネルギー源の種類は、次のとおりである。

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(核分裂、核融合)
- ・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)モデルの特色

本モデルの特徴は以下のとおりである。なお、モデルのメカニズム及び構造については、Fig.1、Fig.2を参照されたい。

経済発展段階と人口、エネルギー消費の明示的取扱

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によって決まってくるという構造になっている[1]。

これは、従来のモデルは、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ったり、また、構造変化についてもないか、あっても極めて緩やかなものを仮定してしまうという問題点があった。しかし、1 世紀にも及ぶ超長期に渡る世界のエネルギー需給や地球温暖化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り、それらの課題を解決すべく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）。

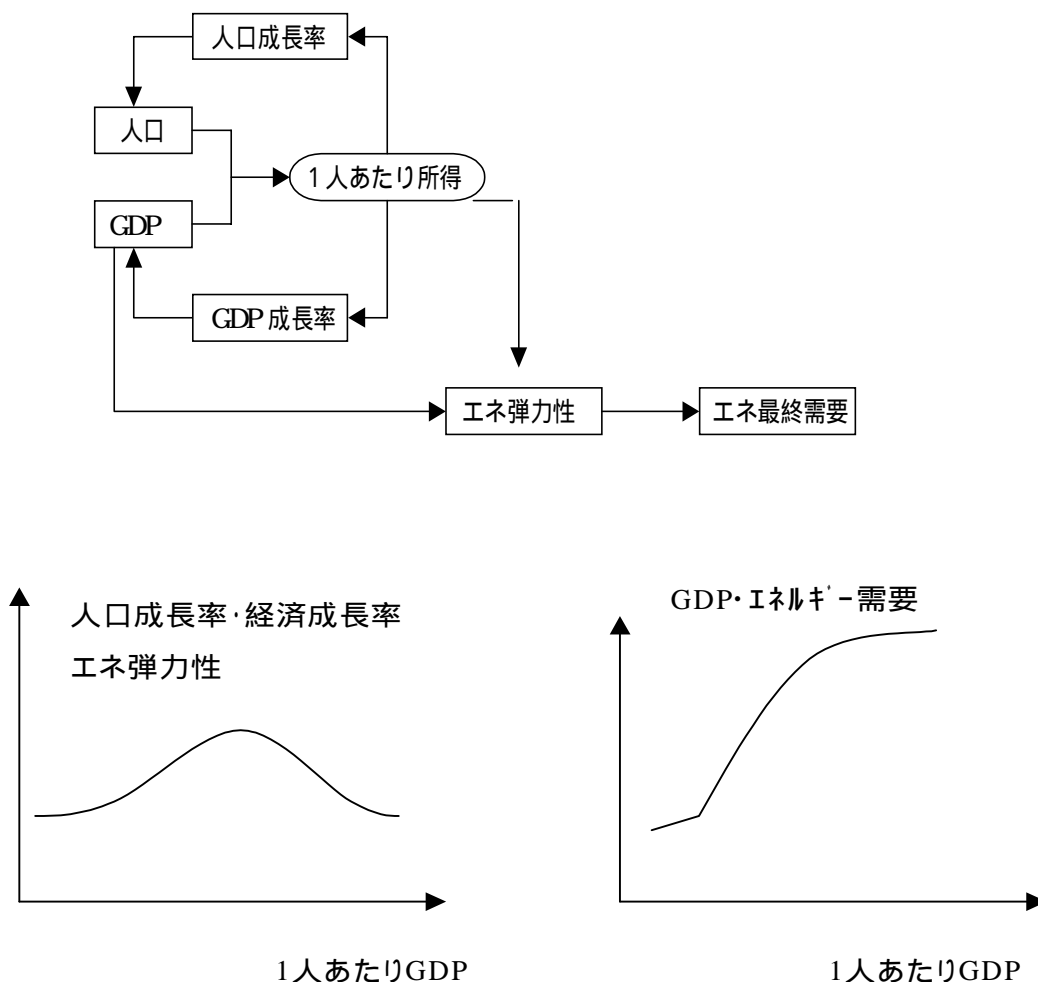


Fig.1 モデルの基本メカニズム

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）

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。

核融合エネルギーの導入についての詳細な分析（コスト、利用可能量等）

核融合のコスト(Fig.3)や政策的スタンス等の条件を与えて、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た。なお、発電のみならず、21 世紀の有望なエネルギーと言われている水素の製造まで考慮に入れた。

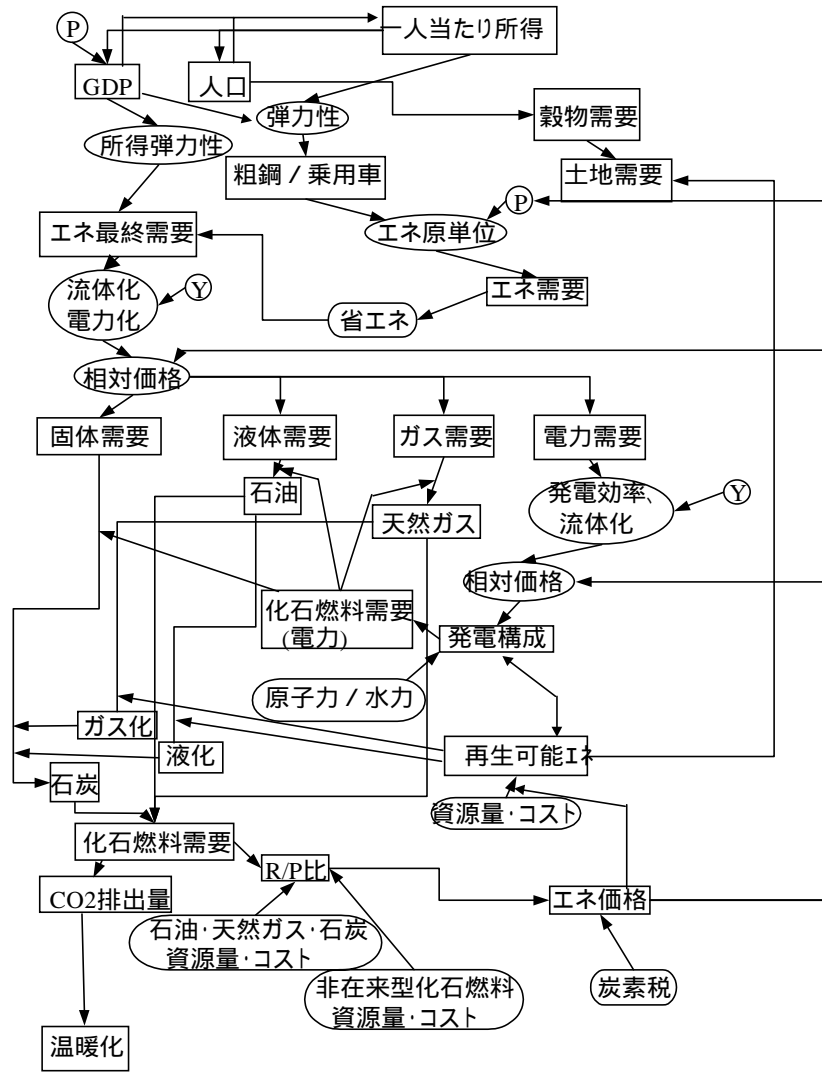


Fig. 2 モデルの構造

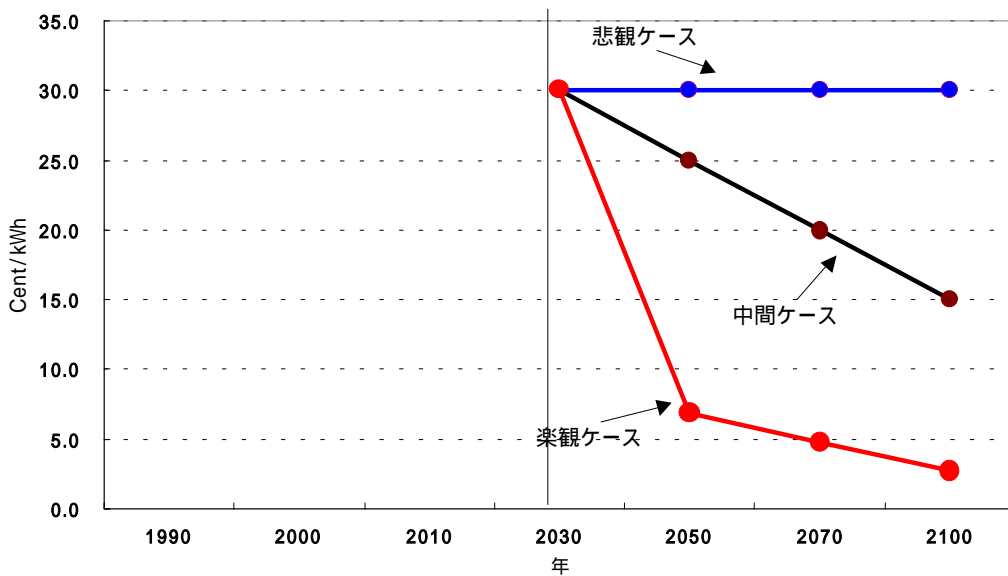


Fig. 3 核融合発電コスト (想定)

3. 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 Table 1 である。まず、ベースとなるケースとして B A U (自然体ケース)¹を想定している。BAU ケースは、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。しかし、今後の地球環境問題を考えると、省エネルギーと非化石燃料(再生可能エネルギー、核融合等)への代替をいかに進めていくかが重要である。そこで、本スタディでは B A U ケースに対し、核融合促進(低コスト + 水素製造含む) ケース、省エネルギー進展 ケース及び 新エネルギー促進 ケースの分析を行った。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。

		省エネ 促進	新エネ 促進	核融合 促進
		BAU : 自然体ケース		
シナリオ 要素	C	省エネ進展ケース		
	R	新エネ促進ケース		
	FE	核融合発電促進ケース		
	E	核融合促進ケース (水素製造を含む。)		
シナリオ 組み合わせ	FC	核融合・省エネケース		
	FR	核融合・新エネケース		
	FCR	核融合・省エネ・新エネ ケース		

Table 1 ケース設定一覧

(2) 前提条件

前提条件を一覧表に示したのが Table 2 である。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。

化石エネルギーの資源量については I I A S A - W E C による長期エネルギー見通し[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[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[4] (1995 年末値) を資源量のべ

¹ Business-as-Usual (自然体ケース) = なりゆきまかせ

Table 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(核分裂)発電

	発電能力 百万 kW			発電量 TWh		
	1990 年	2100 年	伸び率(%)	1990 年	2100 年	伸び率(%)
	344	580	0.5	1,990	3,800	0.6

核融合

	発電コスト ¢/kWh			水素製造コスト \$/bbl		
	2050 年	2070 年	2100 年	2050 年	2070 年	2100 年
BAU	30.0	30.0	30.0	111	97	97
促進ケース	6.9	4.8	2.8	31	25	19

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 MTOE /年	6,372 MTOE	4,644
うち発電 TWh /年		14,409(TWh)
風力発電 TWh /年	48,000	4,256
地熱発電 TWh /年	46,000	930

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)に対応して減少しているが、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。なお、新エネルギー導入促進ケースにおいては、資源量等を別途想定した。

核融合については、資源制約が基本的にはないと考えて良いため、コスト見通しや各国・地域の政策的スタンスを前提条件としており、水素製造を考える際は、産業・運輸・民生部門の各部門の市場浸透可能性をも考慮している。核融合のコスト見通しは日本原子力研究所から提供を受けたデータ、水素のコスト見通しはエネルギー総合工学研究所から提供を受けたデータに基づいており、BAU では核融合について悲観的な見方をしている。なお、核融合も再生可能エネルギーと同様、石油価格(電力価格)の上昇に対応して導入可能量はむしろ増加する。

4. BAU ケースの予測結果

BAU ケースの予測結果の概要を示したのが Table 3 である。

人口 (億人) 年	1990	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	93 兆 US\$
	2100 年	225 兆 US\$
GDP 伸び率%	1990-2050 年	2.6%
	2050-2100 年	1.8%
一人あたり所得 (千\$/人)	1990 年	4.0 千\$/人
	2050 年	9.0 千\$/人
	2100 年	19.4 千\$/人
一次エネルギー消費量 (石油換算)	1990 年	83 億トン
	2050 年	209 億トン
	2100 年	285 億トン
原単位改善率 (%/年)	1990-2050 年	1.0%/年
	2050-2100 年	1.2%/年
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	25 億トン (11.9%)
	2100 年	58 億トン (20.5%)
	2100 年	3.7 億トン (1.3%)
炭酸ガス排出量 (炭素換算)	1990 年	59 億トン
	2050 年	136 億トン
	2100 年	166 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	0.58

Table 3 BAU 予測結果の概要

(1)全体の流れ

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 227 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 千ドルへと増加することとなり、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 285 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 21% 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 (炭素換算、以下同じ) から 166 億トンへと 2.8 倍程度の増加に留まる。一次エネルギー消費あたりの二酸化炭素排出量は 1990 年の 0.7 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

一次エネルギーの構成の推移を示したのが Fig.4 である。在来型の石油は 2030 年を過ぎる頃に生産のピークを迎え、非在来石油の生産が開始される。天然ガスについては 2050 年を過

ざるあたりから非在来型天然ガスの生産が開始される。

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、消費の抑制が無いことと、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31%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。

脱カーボンの動きから、天然ガスの導入は進み、現在の21%程度のシェアは、2030年頃には24%程度まで増加し、在来型が枯渇に至る2100年に至っても現在と同レベルのシェアを維持す

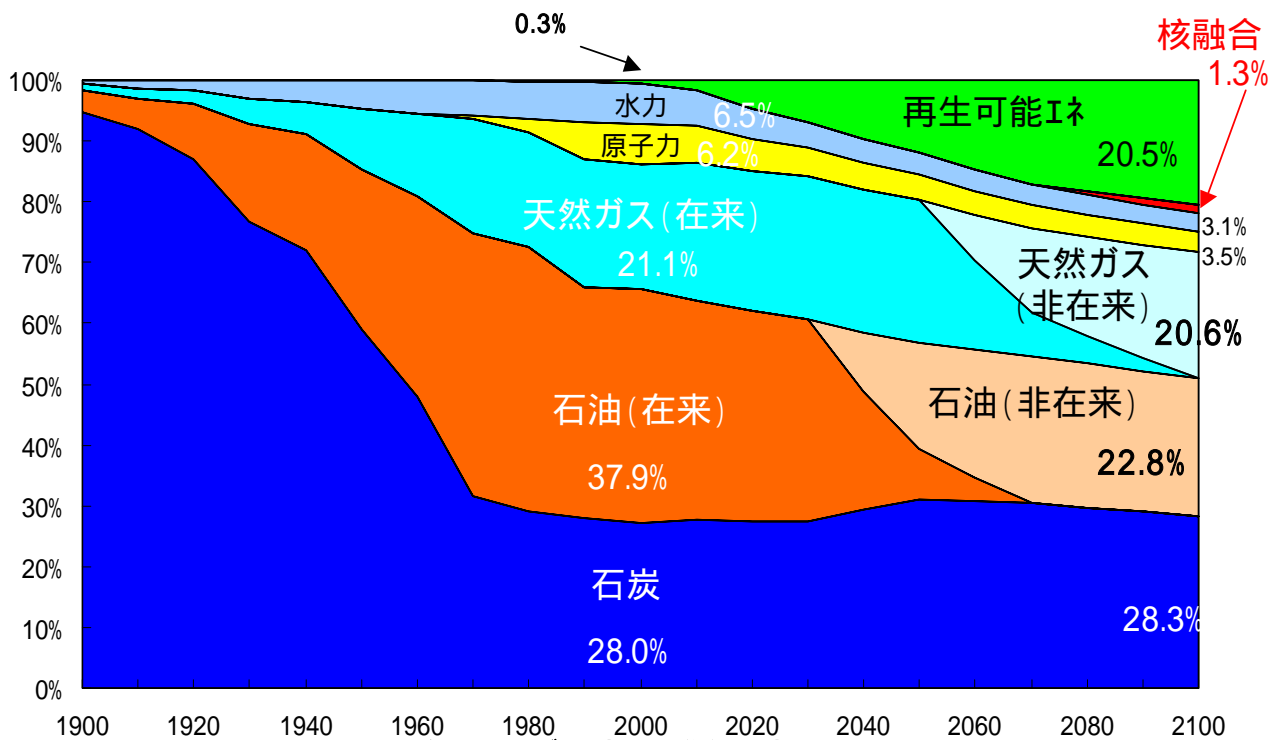


Fig. 4 一次エネルギー構成の推移 (消費シェア%)

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23%程度に低下するものと予測される。これに対し再生可能エネルギーは0.6%のシェアから、2030年頃から導入が加速し、2100年には20.5%に達する。中でもバイオマスと太陽エネルギーの利用が顕著であり、その他の再生可能エネルギーには風力や地熱などが含まれるが、量としてはわずかなものに留まる。

核融合については発電コストの低下が進まないことから、商業炉ベースの運開の目処がなかなか立たず、2100年に、一次エネルギー供給の1.3%のシェアと極めて限定的に導入されるにとどまる。

5. 各ケースの比較

BAU ケース及び各種シナリオのシミュレーションを行なったケース比較を示したのが Table4 及び Fig5、6 である。

(1)省エネルギー進展ケース

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、BAU ケースと比較して約 66 億トン減少 (40% 減) する。

(2)新エネルギー促進ケース

再生可能エネルギー促進ケースは大規模ソーラーが増加の牽引役となるが、風力などの導入も促進され、2100 年における一次エネルギーにおけるシェアは 31% 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 20 億トン (約 12%) 程度削減される。

(3)核融合発電促進ケース

核融合発電促進ケースでは、核融合発電コスト低下がかなり進展し、2050 年頃に経済性を有するようになることから、2100 年には発電量に占めるシェアが 25. % に達する。同年における一次エネルギーに占めるシェアは 11% となり、この結果、脱炭素化が進展し、2100 年の CO₂ 排出量は BAU に比べ 21 億トン (約 13%) 程度削減される。

Table 4 各ケースの比較(2100 年)

	BAU ケース	省エネ進展 ケース	新エネ促進 ケース	核融合発電 促進 ケース	核融合促進 (水素製造を 含む) ケース	核融合促進 & 省エネケース	核融合促進 & 新エネケース	核融合促進 省エネ 新エネケース	IIASA CaseB (一部推定)
GDP(10億 \$: 1987年価格)	226,609	228,052	227,932	226,985	227,158	228,460	228,372	229,674	201,601
人口(百万人)	11,679	11,665	11,677	11,678	11,678	11,665	11,676	11,664	11,652
一人当たり所得(千 \$ /人)	19.4	19.5	19.5	19.4	19.5	19.6	19.6	19.7	17.3
一次エネルギー消費/GDP(TOE/百万 \$)	126	87	128	127	127	88	129	89	172
一次エネルギー消費/人(TOE/人)	2.4	1.7	2.5	2.5	2.5	1.7	2.5	1.7	3.0
エネルギー最終需要(MTOE)									
固体需要	2,852	1,932	2,939	2,877	2,888	1,949	2,968	2,001	3,312
液体需要	7,218	4,961	7,437	7,280	7,308	5,005	7,510	5,137	5,844
ガス需要	3,801	2,656	3,915	3,833	3,848	2,679	3,953	2,748	6,100
電力需要	4,336	3,065	4,466	4,372	4,389	3,091	4,509	3,172	6,235
合計	18,208	12,614	18,755	18,362	18,433	12,724	18,940	13,057	21,491
エネルギー最終需要(シェア%)									
固体需要	15.7	15.3	15.7	15.7	15.7	15.3	15.7	15.3	15.4
液体需要	39.6	39.3	39.7	39.6	39.6	39.3	39.7	39.3	27.2
ガス需要	20.9	21.1	20.9	20.9	20.9	21.1	20.9	21.0	28.4
電力需要	23.8	24.3	23.8	23.8	23.8	24.3	23.8	24.3	29.0
合計	100.0	100.0	100.1	100.0	100.0	100.0	100.1	99.9	100.0
一次エネルギー消費(MTOE)									
固体燃料	8,065	4,940	7,251	6,783	6,150	3,823	5,531	3,385	7,486
在来石油	0	187	165	0	0	305	273	488	2,642
新規石油	6,515	3,567	4,742	5,974	5,206	2,693	3,601	1,568	
在来天然ガス	0	835	377	0	560	1,271	560	1,308	4,883
新規天然ガス	5,875	2,772	5,735	5,113	4,236	1,717	4,439	1,801	
原子力	990	972	990	990	990	972	990	972	8,277
水力	873	813	873	873	873	813	873	813	1,644
再生可能エネルギー	5,839	5,648	8,940	5,754	5,716	5,552	8,627	7,589	9,756
核融合	373	171	0	3,281	5,149	2,931	4,553	2,486	
合計	28,531	19,905	29,073	28,768	28,879	20,077	29,446	20,410	34,688
一次エネルギー消費(シェア%)									
固体燃料	28.3	24.8	24.9	23.6	21.3	19.0	18.8	16.6	21.6
在来石油	0.0	0.9	0.6	0.0	0.0	1.5	0.9	2.4	7.6
新規石油	22.8	17.9	16.3	20.8	18.0	13.4	12.2	7.7	
在来天然ガス	0.0	4.2	1.3	0.0	1.9	6.3	1.9	6.4	14.1
新規天然ガス	20.6	13.9	19.7	17.8	14.7	8.6	15.1	8.8	
原子力	3.5	4.9	3.4	3.4	3.4	4.8	3.4	4.8	23.9
水力	3.1	4.1	3.0	3.0	3.0	4.0	3.0	4.0	4.7
再生可能エネルギー	20.5	28.4	30.7	20.0	19.8	27.7	29.3	37.2	28.1
核融合	1.3	0.9	0.0	11.4	17.8	14.6	15.5	12.2	
合計	98.7	99.1	100.0	88.6	82.2	85.4	84.5	87.8	100.0
CO ₂ 排出量(10 ⁶ CT)	16,643	10,008	14,676	14,494	13,064	7,933	11,492	6,809	11,353
CO ₂ 排出量/人(CT/人)	1.40	0.90	0.00	1.20	1.10	0.70	1.00	0.60	0.97
CO ₂ 排出量/一次エネルギー消費(CT/TOE)	0.60	0.50	14,676.20	0.50	0.50	0.40	0.40	0.30	0.33

a) IIASA Case B is the most realistic case in IIASA-WEC "Global Energy Perspectives 1998"

(4)核融合促進ケース (水素製造を含む。)

水素製造まで含んで核融合促進を考えたケースでは、核融合の導入はさらに進展し、2100 年における一次エネルギーに占めるシェアは 18% に達する。この結果、2100 年の CO₂ 排出量は BAU に比べ 35 億トン (約 22%) 程度削減される。

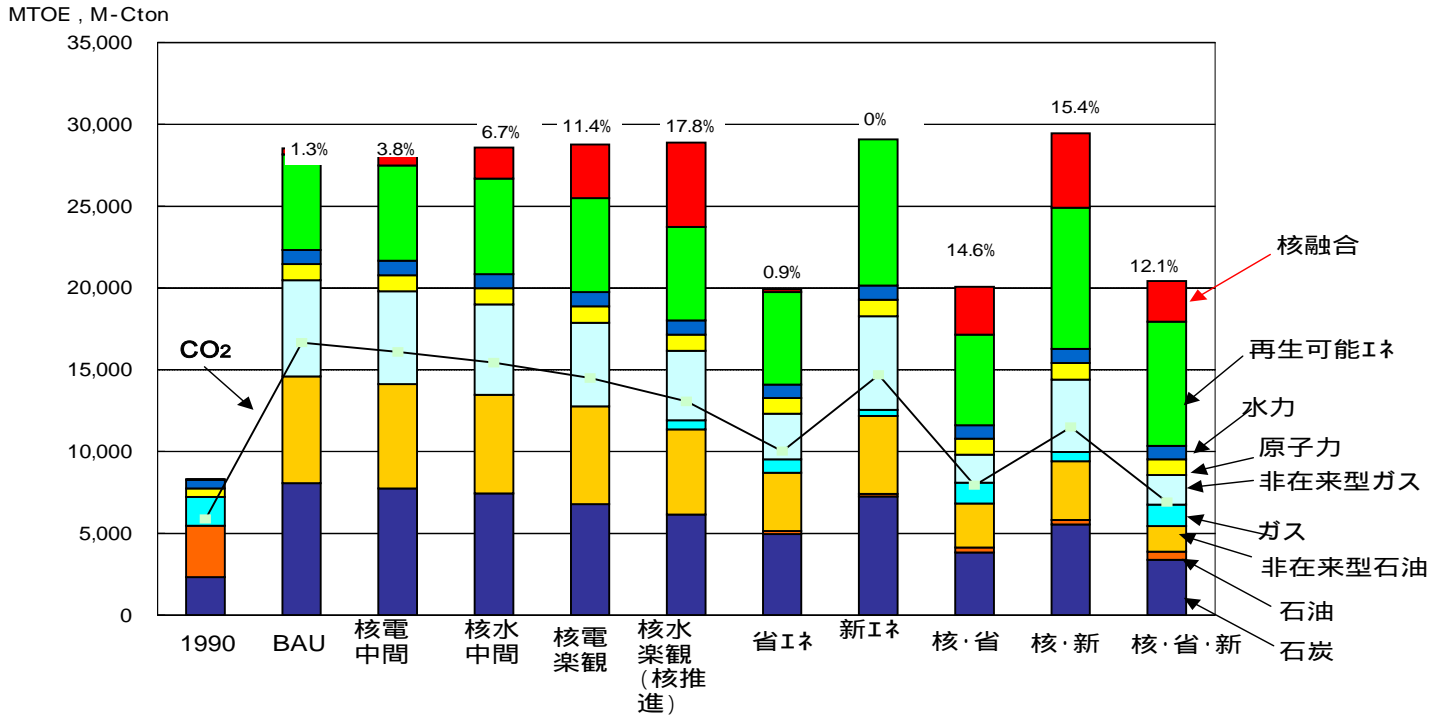


Fig. 5 一次エネルギー消費及びCO₂排出量のケース間比較

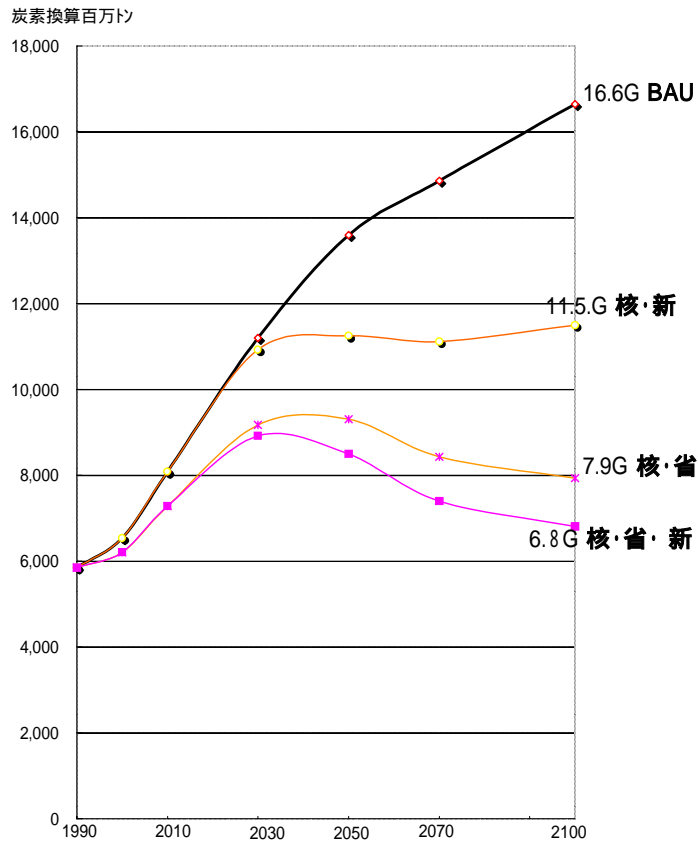


Fig. 5 ケース別 CO₂ 排出量の推移

(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。核融合促進ケース（水素製造を含む。）に省エネルギー新エネルギー促進を組み合わせたケースの予測結果を Fig.5~6 に示した。核融合促進と新エネルギー促進を組み合わせたケースでは、CO₂排出量では114億トンと省エネルギー進展ケースに及ばない。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排出量で見ると新核融合促進に省エネルギー進展を組み合わせたケースでは79億トンとなる。これに更に新エネルギー促進ケースを組み合わせたケースでは、68億トンと1990年水準（59億トン）に近づく。

6. 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が、本スタディのインプリケーションのポイントは次のとおりである。

(1)核融合の可能性

核融合は技術進歩とコストダウンの目標達成に成功した場合には、温暖化対策に貢献し得る21世紀後半における主要なエネルギー源の一つとなり得る。また、水素製造を行った場合はその役割はさらに大きくなる。

(2)省エネルギー推進、新エネルギー促進等他の取り組みの重要性

核融合は、二酸化炭素排出の観点から環境負荷が小さく、地球温暖化に貢献するクリーンなエネルギーとなり得る。しかし、核融合推進だけでは地球温暖化対策としては不十分であり、省エネルギー推進、新エネルギー促進等他の施策との組み合わせが重要となる。

(3)世界規模における取り組みの重要性

また、これらの取り組みは、先進国のみならず途上国を含めて世界規模でなされる必要がある。この観点から先進国と途上国の間の国際協力、技術移転が極めて重要となる。

(4)核融合の開発戦略

日本の厳しい財政状況を勘案すると、核融合開発も研究開発投資を確保するための短期的課題をクリアしていく必要があると思われる。それは、一つには核融合の優位性であるクリーン性・安全性・安定性等を他の代替エネルギーとの客観的総合評価でそれなりのポイントをかせぎ社会的受容性を高度化していくことが必須であろう。また、実用化の目処を早急に立て、コスト（生産、インフラ、バックエンドも含む）を含めた費用対効果評価の洗礼を受けなければならないと思われる。それらのハードルをクリアして初めて、21世紀後半における主要エネルギー源となりうるポテンシャルを確保することになると思われる。

参考文献

- [1] Kindleberger, CP Economic Development 2nd edn, McGraw-Hill, New York
- [2] IIASA-WEC “Global Energy Perspectives 1998”
- [3] Hans-Holger Rogner “An Assessment of World Hydrocarbon Resources, WP-96-56, May 1996”
- [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

お問い合わせ : ieej-info@tky.ieej.or.jp