小特集

核融合炉の経済性と環境負荷 - その解析と今後の課題 -

1. 核融合を活用した21世紀のエネルギー戦略

奥村 憲博

(財団法人 日本エネルギー経済研究所)

Energy Strategy of the 21st Century Taking Advantage of Fusion

OKUMURA Norihiro

Institute of Energy Economics, Kachidoki 104-0054, Japan

(Received 30 August 2002)

Abstract

There is some general concern that economic development in developing countries will hasten global warming. In terms of reducing CO₂ emissions, fusion will have great potential as a primary energy in the late 21st century according to the results of WING model simulations based on scenario analysis, if the cost of fusion with hydrogen generation would become competitive compared with those of other substitutive energies. However, securing social acceptance is very important to maintain the fossil research funded by the government suffering from cumulative debt.

Keywords:

scenario analysis, WING model, hydrogen generation, global warming, CO₂ emission

1.1 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、導入時期等の分析を行い、21世紀のエネルギー戦略について検討する。

1.2 モデルの特徴・概要

1.2.1 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、
author's e-mail: okumura@edmc.ieej.or.jp

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)

1.2.2 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および構造については、Fig. 1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り扱い

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わ

た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づ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)

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. 2)や政策的スタンス等の条件を与えて、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。

1.3 ケース設定・前提条件

1.3.1 ケース設定

ベースとなるケースとしてBAU(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BAU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、再生可能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。

Fig. 1 Structure of the model.

Fig. 2 Cost of fusion.

1.3.2 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 IIASA-WEC によ

Table 1 Case scenarios.

			Nuclear Fusion Energy Progress	Energy Conservation Progress	Renewable Energy Acceleration
Reference	BAU: Business as usual (Negative Case for Nuclear Fusion Energy)				
Nuclear Fusion Scenarios	F1	Medium Cost Case only for Power Generation	△		
	F2	Medium Cost Case for Power Generation and Hydrogen Production	△		
	F3	Low Cost Case for Power Generation	○		
	F	Low Cost Case for Power Generation and Hydrogen Production	◎		
Other Scenarios	C	Energy Conservation Progress		◎	
	R	Renewable Energy Acceleration			◎
Combined Scenarios	F+C	Nuclear Fusion + Energy Conservation	◎	◎	
	F+R	Nuclear Fusion + Renewable Energy	◎		◎
	F+C+R	Nuclear Fusion + Energy Conservation + Renewable Energy	◎	◎	◎

Table 2 The estimates of energy reserves.

Fossil energy	Proven reserves	Unproven reserves	Total	1997 Production
Oil	900	800	1,500	
Conventional Gas	2000		2,000	
Unconventional		2000	2,000	
Total	900 (10P)	2,400	4,300	24.8
Coal	4,000	4,500	8,500	
Conventional	4,000	4,500	8,500	
Unconventional		15,000	15,000	
Total	4,000 (10P)	20,500	24,500	8.1
Coal	4,000 (10P)	20,500	24,500	8
Gas	2,000		2,000	
Nuclear	Installed capacity, MW	Reserve %	Generation, TWh	Ratio %
1990	2100	2100/2100	1990	2100
2050	2100	2100/2100	2050	2100
2100	2100	2100/2100	2100	2100
Ratio	100	100	100	100
Expansion	2,100	1.0	10,000	2
Fusion	Proven reserves, MWh	Unproven reserves, MWh	Total, MWh	Ratio %
1990	2000	2000	2000	2000
2050	2000	2000	2000	2000
2100	2000	2000	2000	2000
Ratio	100	100	100	100
Expansion	2,100	1.0	10,000	2
Hydro	Installed capacity, MW	Reserve %	Generation, TWh	Ratio %
1990	2100	2100/2100	1990	2100
2050	2100	2100/2100	2050	2100
2100	2100	2100/2100	2100	2100
Ratio	100	100	100	100
Expansion	2,100	1.0	10,000	2
Solar	Large scale	On the spot	World total	Ratio %
1990	2000	2000	2000	2000
2050	2000	2000	2000	2000
2100	2000	2000	2000	2000
Ratio	100	100	100	100
Expansion	2,100	1.0	10,000	2
Renewable, other renewables	Renewable	Expansion	Ratio %	
1990	2000	2000	2000	2000
2050	2000	2000	2000	2000
2100	2000	2000	2000	2000
Ratio	100	100	100	100
Expansion	2,100	1.0	10,000	2

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ないと考えてよいため、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。

1.4 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。

1.4.1 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

Table 3 Summary of BAU case in 1990, 2050, and 2100.

Population (billion persons)	1990	5.1
	2050	10.4
	2100	11.7
GDP (1990yr. Trillion US\$)	1990	20
	2050	92
	2100	225
GDP growth rates (%)	1990-2050	2.1
	2050-2100	2.1
Per capita GDP (1000\$/p)	1990	4
	2050	8.9
	2100	19.2
Primary Energy Consumption (GTOE)	1990	8.3
	2050	20.3
	2100	27.3
Primary energy intensity improvement (%/yr.)	1990-2050	1
	2050-2100	1.1
Fusion (GTOE)	1990	0.0(0.0)
(primary energy share (%))	2050	0.0(0.0)
	2100	0.37(1.3)
Renewables (GTOE)	1990	0.03(0.3)
(primary energy share (%))	2050	2.5(11.9)
	2100	5.8(20.5)

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．

1.4.2 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. 3 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年を過ぎ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，消費の抑制がないことと，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．

Fig. 3 Primary energy shares.

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．

1.5 各ケースの比較

BAU ケースおよび各種シナリオのシミュレーションを行ったケース比較を示したのが Table 4 および Figs. 4, 5 である．

1.5.1 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．

1.5.2 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．

1.5.3 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．

1.5.4 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，

Table 4 Scenarios comparison.

	BAU Case	Nuclear Fusion (F1 Case: Medium Cost)	Nuclear Fusion (F2 Case: Medium Cost + H ₂ Production)	Nuclear Fusion (F3 Case: Low Cost)	Nuclear Fusion (F Case: Low Cost + H ₂ Production)	Energy Conservation Progress (C Case)	Renewable Energy Acceleration (R Case)	Nuclear Fusion (F Case) + Energy Conservation	Nuclear Fusion (F Case) + Renewable Energy	Nuclear Fusion (F Case) + Energy Conservation + Renewable Energy	IIASA (Case B) a)
GDP (US\$ billion, 1987 prices)	226,609	226,650	226,665	226,985	227,158	228,052	227,932	228,460	228,372	229,674	201,601
Population (Millions)	11,679	11,679	11,679	11,678	11,678	11,665	11,677	11,665	11,676	11,664	11,652
Per capita income (US\$ 1000)	19.4	19	19.4	19.4	19.5	19.5	19.5	19.6	19.6	19.7	17.3
Final energy/GDP (TOE/US\$ millions)	126	126	126	127	127	87	128	88	129	89	172
Per capita final energy (Toe)	2.4	2.4	2.4	2.5	2.5	1.7	2.5	1.7	2.5	1.7	3.0
Final energy demand by energy form (Mtoe)											
Solid	2,852	2,855	2,856	2,877	2,888	1,932	2,939	1,949	2,968	2,001	3,312
Liquid	7,218	7,225	7,227	7,280	7,308	4,961	7,437	5,005	7,510	5,137	5,844
Gas	3,801	3,805	3,806	3,833	3,848	2,656	3,915	2,679	3,953	2,748	6,100
Electricity	4,336	4,340	4,342	4,372	4,389	3,065	4,466	3,091	4,509	3,172	6,235
Total	18,208	18,225	18,231	18,362	18,433	12,614	18,755	12,724	18,940	13,057	21,491
Share by energy form (%)											
Solid	15.7	15.3	15.7	15.7	15.7	15.3	15.7	15.3	15.7	15.3	15.4
Liquid	39.6	39.3	39.6	39.6	39.6	39.3	39.7	39.3	39.7	39.3	27.2
Gas	20.9	21.1	20.9	20.9	20.9	21.1	20.9	21.1	20.9	21.0	28.4
Electricity	23.8	24.3	23.8	23.8	23.8	24.3	23.8	24.3	23.8	24.3	29.0
Total	100.0	100.0	100.1	100.0	100.0	100.0	100.1	100.0	100.1	99.9	100.0
Primary energy supply (Mtoe)											
Solid	8,065	7,740	7,443	6,783	6,150	4,940	7,251	3,823	5,531	3,385	7,486
Oil	0	0	0	0	0	187	165	305	273	488	2,642
Unconventional Oil	6,515	6,368	6,018	5,974	5,206	3,567	4,742	2,693	3,601	1,568	
Natural Gas	0	0	0	0	560	835	377	1,271	560	1,308	4,883
Unconventional Natural Gas	5,875	5,680	5,524	5,113	4,236	2,772	5,735	1,717	4,439	1,801	
Nuclear	990	990	990	990	990	972	990	972	990	972	8,277
Hydro	873	873	873	873	873	813	873	813	873	813	1,644
Nuclear Fossil	373	1,076	1,073	3,281	3,299	171	0	1,868	3,104	1,682	
Hydrogen by nuclear fossil	0	0	819	0	1,850	0	0	1,063	1,449	804	9,756
Renewables	5,839	5,829	5,825	5,754	5,716	5,648	8,940	5,552	8,627	7,589	
Total	28,531	28,556	28,565	28,768	28,879	19,905	29,073	20,077	29,446	20,410	34,688
Share by energy form (%)											
Solid	28.3	27.1	26.1	23.6	21.3	24.8	24.9	19.0	18.8	16.6	21.6
Oil	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.6	1.5	0.9	2.4	7.6
Unconventional Oil	22.8	22.3	21.1	20.8	18.0	17.9	16.3	13.4	12.2	7.7	
Natural Gas	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	4.2	1.3	6.3	1.9	6.4	14.1
Unconventional Natural Gas	20.6	19.9	19.3	17.8	14.7	13.9	19.7	8.6	15.1	8.8	
Nuclear	3.5	3.5	3.5	3.4	3.4	4.9	3.4	4.8	3.4	4.8	23.9
Hydro	3.1	3.1	3.1	3.0	3.0	4.1	3.0	4.0	3.0	4.0	4.7
Nuclear Fossil	1.3	3.8	3.8	11.4	11.4	0.9	0.0	9.3	10.5	8.2	
Hydrogen by nuclear fossil	0.0	0.0	2.9	0.0	6.4	0.0	0.0	5.3	4.9	3.9	
Renewables	20.5	20.4	20.4	20.0	19.8	28.4	30.7	27.7	29.3	37.2	28.1
Total	100.1	100.1	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
CO ₂ Emission (10 ⁶ CT)	16,643	10,008	15,422	14,494	13,064	10,008	14,676	7,933	11,492	6,809	11,353
Per capita CO ₂ Emission (CT)	1.40	0.90	1.30	1.20	1.10	0.90	1.30	0.70	1.00	0.60	0.97
CO ₂ Emission/Primary energy supply (CT/TOE)	0.60	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.40	0.40	0.30	0.33

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。

1.5.5 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Figs. 3, 4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。

1.6 21世紀のエネルギー戦略

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見たが、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。

1.6.1 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。

1.6.2 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

Fig. 4 CO₂ emissions by scenarios.

Fig. 5 Primary energy consumption by scenarios.

得る。しかし、核融合推進だけでは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の施策との組み合わせが重要となる。

1.6.3 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り、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。

1.6.4 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と思われる。

参考文献

- [1] Kindleberger, *CP Economic Development* 2nd edn, (McGraw-Hill, New York, 1965).
- [2] IIASA-WEC, *Global Energy Perspectives 1998* (Cambridge University Press).
- [3] H.-H. Rogner, *An Assessment of World Hydrocarbon Resources*, WP-96-56, May 1996, IIASA.
- [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).