

「第3回高速増殖炉懇談会用資料」

平成9年4月15日

将来のエネルギー需給と電源選択

(財) 電力中央研究所 内山洋司

(東京工業大学 客員教授)

1. 急増する世界のエネルギー消費

エネルギーは目に見えないため、私たちは世界の膨大なエネルギー消費に気が付いていない。世界のエネルギー消費は、過去100年で25倍、戦後の50年間で4.6倍にまで急増している。現在、総消費量は石油換算で81億トにもなり、それは石油40%、石炭27%、天然ガス23%と全体の9割が化石燃料で賄われている。膨大な化石燃料の燃焼によって大気が汚染されつつある。排出される汚染物質も目に見えないが、毎年の放出量は、炭酸ガス220億ト、硫黄酸化物1.3億ト、窒素酸化物0.9億トにもなる。

エネルギーの消費には地域間の不公平さがある。膨大なエネルギーは主に先進国で消費されている。世界人口57億人の24%に相当する先進国と旧ソ連・東欧諸国の消費量は全体の75%になる。それに対し途上国の一人当たりのエネルギー消費量は先進国のわずか9分の1である。世界には南アジアと中央アフリカを中心に10億人の人々が農作物や家畜の廃棄物などの非商業エネルギーだけで生活しており、まだ20億人もの人々が電気なしの生活を送っている。

しかし途上国のエネルギー消費も徐々に増加しつつある。一人当たりのエネルギー消費量は、20年前までは先進国の20分の1であったのが今は2倍にまでなっている。先進国の物質的な豊かさや生活の快適さを求めて経済も発展しており、それに伴ってエネルギー需要も高まっている。そして人口増加がそれを加速している。1800年頃、世界人口は10億人程度であったが、その後、1900年までは年率0.5%で、1950年までの50年間は0.8%、そして現在までの40年間は1.75%の割合で増加し続けている。その結果、世界人口は1900年に17億人、1950年に25億人、そして現在は57億人にもなっている。増加の勢いは今後も衰えることはなく、国連の人口予測によると2050年に100億人になるといわれている。増大しつつある人口のうち、9割以上が途上国の人口である。

途上国の人口増加と一人当たりエネルギー消費の増大は、将来のエネルギー需要を膨大にする。図1は人口と一人当たりエネルギー消費の関係を、先進国と途上国とで描いたものである。図の四角に囲まれた面積はエネルギー需要を表しており、もし途上国の一人当たりのエネルギー消費が先進国の2分の1にまで高まると、人口が増えなくても途上国のエネルギー需要は世界全体の60%にもなる。さらに国連の人口予測でいわれたように2050年に途上国の人口が現在の2倍にまで増え

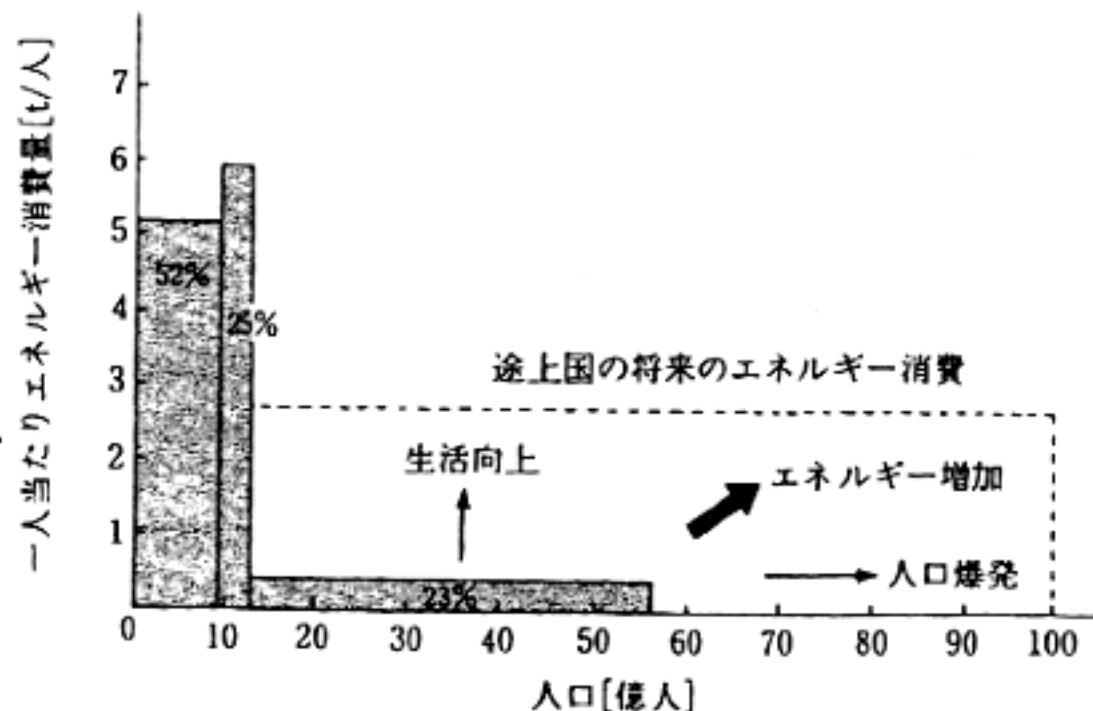


図1 人口と一人当たりのエネルギー消費量

たら、世界のエネルギー需要は現在の3倍にもなり、途上国の割合は75%に達する。

2. 三段階で起きるエネルギー危機：化石エネルギーの資源制約

爆発する世界人口とそれに伴うエネルギー需要の増大に対して、私たちは将来もエネルギー資源を十分に確保していけるのだろうか。化石エネルギーの確認埋蔵量は、石油が1.08兆バレル、天然ガスが1.02兆バレル（石油換算）、石炭が4.36兆バレルである。しかし質の悪い化石エネルギーを含めた資源量でみると膨大で、石油換算で石油系資源が5.9兆バレル、天然ガス系が6.3兆バレル、石炭など固形資源が24兆バレルと、全体で36兆バレルにもなると言われている。それは石油の現在の確認埋蔵量の36倍にも相当する膨大な量である。

世界の将来のエネルギー需要を世界人口に比例して単純に増大していくと仮定し、その需要に見合う供給可能な化石エネルギー資源の供給曲線を描くと図2のようになる。すなわち図の需給曲線は、世界人口が将来は120億人で飽和することを前提に、世界の一人当たりのエネルギー消費を現在のまま一定としてエネルギー需要を求め、その需要の9割（現在の化石エネルギー依存度）を化石エネルギーで供給したと仮定して描いたものである。

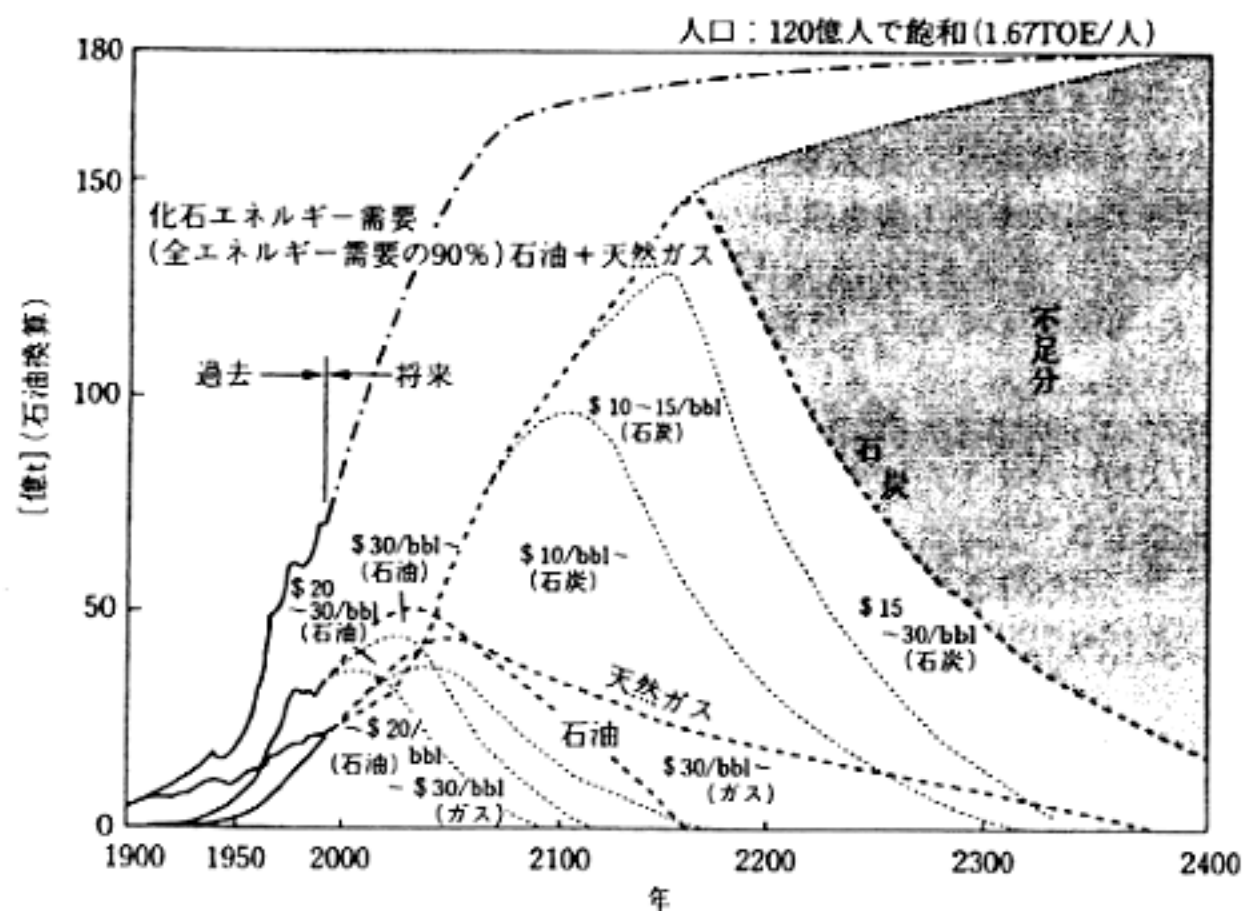


図2 超長期にみたエネルギー需要と化石エネルギーの供給曲線

図から将来も現在と同様に化石エネルギーに依存し続けたとすると、その供給には三段階で危機的な資源制約が訪れることがわかる。

第一段階（2015年）：安価な石油の減産時期

第二段階（2050年頃）：石油と天然ガスの減産時期

第三段階（2150年頃）：石炭の減産時期

第一段階は、2015年頃に現れる安価な石油の減産である。安価で良質な石油（生産コストが\$20/バレル以下）は未確認埋蔵量を含めてまだ1.5兆バレルほど残っているといわれているが、今の生産量240億

バレル/年で掘り続けると2015年頃から減産せざるを得なくなる¹⁾。それ以降は生産コストが高い石油や重質油、あるいは天然ガスに頼ることになる。しかしその生産も増大していく需要を賄っていくには限界があり、21世紀の半ばには減産していくことになる。2050年頃が液体系と気体系に頼れなくなる第二の化石エネルギー危機である。そしてそれ以降は資源が豊富な石炭など固体系燃料に急速に依存していくことになる。ピートや泥炭を含めた石炭の資源量は膨大で、石油やガスの不足分を補填するだけでなく増大する世界のエネルギー需要をしばらくは賄うことができる。しかしその能力も22世紀の半ばなると限界が現れ始め、減産時期を迎えることになる。23世紀の中葉は第三の化石エネルギー危機で、図に示す化石エネルギーの供給不足が生ずる。同時にその頃には石油や天然ガスの資源も枯渇しており、大半のエネルギーはオイルシェール、タールサンド、あるいはピートや泥炭といった質の悪い化石エネルギー源に依存することになる。環境問題は地域のみならず地球規模で極めて深刻な状態になっていく。

人類は、古生代や中世代に1億年以上もかけて蓄えられた化石燃料をこのままのペースで消費し続けると、わずか400～500年で使い果たそうとしている。良質な資源は先に使われ、子孫には質の悪い資源だけが残されていく。良質の化石燃料が使えない子孫は、生き延びるていくためには、環境影響が大きい低質の化石エネルギーや原子力も使わざるを得ない。彼等はエネルギーの安定供給のためには好むと好まざるに係わらず原子力に頼らざるを得なくなる。

何万年先に地下に処分した放射性物質が漏洩して人々に大きな影響を与えるかもしれないという不確実な心配よりも、50～60年先には良質な化石エネルギーに頼れなくなるという危機が実際に迫りつつある。エネルギー技術といった社会インフラ施設を整備していくには、かなりの時間がかかる。危機が発生してから対策を立ててもその時はすでに遅い。将来の危機を回避するには、エネルギーにまだ余裕がある今から対策を立てる必要がある。対策技術には、省エネルギー以外に石炭のクリーン化、安全な原子力技術の確立、そして再生可能エネルギーといった代替エネルギー開発がある。子孫の選択の余地を増やすためにも、脱化石エネルギー対策は今から積極的に行っていくべきである。

3. 深刻になるアジアのエネルギー情勢

世界のエネルギー需要は、現在、途上国の経済発展に伴い急激に増え続けている。特に太平洋沿岸のアジア諸国のエネルギー需要が急速に拡大している。タイ、マレーシア、インドネシアのエネルギー需要は、過去10年間の平均で年率10%を超える高い伸び率を示している。エネルギー需要の高まりは、アジアの人口爆発により加速されており、この増加傾向は今後も続き、2000年初期まで年率7～8%の高い水準で推移していくものとみなされている。

問題は、将来のエネルギー源の確保である。アジアのエネルギー供給の脆弱性は、他の地域と比べた化石燃料の資源量を比較すれば理解できる。表1は、石油、天然ガス、石炭の確認埋蔵量と一人当たり資源量を地域別に比較したものである。石油と天然ガスのアジアにおける資源量は、世界の4.4%と6.7%であって、それを一人当たりの資源量で比べるとアジアは最も少ない地域になる。石油は西欧の3.5分の1、北米の23分の1、中東の340分の1である。天然ガスはアフリカ、中南米、西欧の5分の1、北米の10分の1、中東の100分の1である。世界の埋蔵量の30%を占める石炭（そのうちの3分の1はオーストラリア）についても、一人当たりの資源量でみると西欧、旧ソ連・東欧の5分の1、北米の10分の1である。アジア地域は化石資源に恵まれていないことを再認識する必要がある。

表1 地域別にみた化石燃料の資源量

() 内は割合

地 域	石油		天然ガス		石炭	
	[億バレル]	[バレル/人]	[兆 m^3]	[千 m^3 /人]	[億トン]	[トン/人]
アジア・オーストラリア	441(4.4)	13.4	9.5(6.7)	2.89	311.49(30.2)	9.49
北アメリカ	866(8.5)	302.8	8.4(6.1)	29.37	250.39(24.2)	87.55
西欧	177(1.7)	45.6	5.5(4.0)	14.18	156.67(15.2)	40.38
旧ソ連・東欧	570(5.5)	138.0	56.0(40.0)	135.59	241.00(23.4)	58.35
中南米	789(7.8)	159.7	5.7(4.1)	11.54	10.20(1.0)	2.06
中東	6,595(64.9)	4,396.7	45.2(32.4)	301.33	0.19(0.0)	0.13
アフリカ	731(9.8)	97.1	9.4(6.7)	12.48	61.67(6.0)	8.19
世界計	10,169 (100)	176.4	139.7 (100)	24.23	1,031.61 (100)	17.89

資料：B P統計(1996年)より作成：石炭は褐炭も含む

中東への石油依存度にしてもアジアはすでに50%（日本は75%）を超えており、西欧の29%、北米の10%に比べかなり高い。2000年には1970年代の石油危機当時の65%以上になることが予想されており、このまま石油の中東依存度を高めていくと、石油危機が再発する恐れもある。石油危機の安全保障と代替エネルギー開発はアジア地域のエネルギー安定供給にとって不可欠であり、今後は地域的な協力体制を築くなど積極的な対応が各国に求められている。

高い経済成長とエネルギー需要の急増が予想されるアジア諸国にとって、原子力は将来の重要な発電源になることは間違いない。しかしその巨大技術を安全に駆使していくには、発電だけでなく濃縮や再処理、廃棄物処分といった燃料サイクルを含めて、しっかりしたインフラの整備を図る必要がある。わが国はアジアでも最も進んだ技術力をもつ国であり、アジア地域において原子力技術の基盤整備に果たす役割は大きい。原子力のインフラ整備には、技術力の他に巨額な資金と核拡散防止などの核管理が必要になる。将来のアジアにおけるエネルギーの安定供給を確保するには、原子力平和利用の管理体制をわが国が率先して今から準備しても遅くはない。

4. エネルギー供給源としての条件：大量供給と信頼性

前節ではエネルギー資源について供給問題を長期的な視点から説明したが、ここでは供給問題をエネルギー技術について供給力と信頼性から説明する。

エネルギーの消費は都市を中心に年々増え続けている。エネルギーの消費密度を敷地面積当りの電力消費量で調べてみると、家庭で35kWh/ m^2 、事務所ビルで400kWh/ m^2 になる（表2）。電力需要は、今後も高齢化、冷房機器や情報化機器の普及、大型住宅や建物の高層化などにより高まっていくことは間違いない。

表2 エネルギー密度（電気エネルギー）の比較

対 象	エネルギー密度（敷地面積）		備 考
	kWh/m ² ・年	kW/m ²	
家庭の電力需要	35	0.024	一戸建て2階（敷地165m ² 、契約40A）
事務所の電力需要	400	0.45	8階建て事務所ビル（延床3,000m ² ）
太陽光発電	24	0.082	日本（緯度35度）、年設備利用率15%
風力発電	21	0.012	米国デハチヒットウィントファーム、出力275 kW 340基（3 mile ² ）、年設備利用率20%
木材発電プラント	2.0	0.00032	ポプラプランテーション（6年サイクル） 100 MW、発電効率34%
火力発電所	9,560	1.6	碧南石炭火力発電所、70万kW x 3基 年設備利用率75%、敷地：133.6万m ²
原子力発電	12,400	2.0	柏崎刈羽原子力発電所、821.2万kW 年設備利用率75%、敷地：420万m ²

高まるエネルギー消費密度に対して、エネルギー供給密度はどのようなになっているのだろうか。表1には、太陽光発電、風力発電、木材バイオマス発電、石炭火力、原子力発電について供給密度の値を示している。表の値から太陽光発電や風力発電は、エネルギー密度が20kWh/m²程度で、それは家庭の消費密度の3分の2である。バイオマス発電になると最も成長の早いポプラで、それも南米のような成育の早い地域に植林する条件で計算しても、そのエネルギー密度は2kWh/m²である。それに対して、石炭火力と原子力発電は、貯炭場や構内の緑地帯を含めて計算しても、敷地面積当りの密度はそれぞれ9,560kWh/m²と12,400kWh/m²にもなっている。その密度は、太陽光発電の500倍、バイオマス発電の5,000倍にも相当しており、わずかな土地で大量のエネルギーを発生する電源であることがわかる。この結果は、優れたエネルギー密度を持つ火力や原子力が国土の狭いわが国で今日の大量エネルギー消費社会を支えている所以でもある。

火力と原子力の優れた供給力は、ライフサイクル分析からも明らかである。それは、発電だけでなく燃料の採掘、精製、輸送、廃棄物処理などのプロセスを含めて、設備の建設、運転、廃棄のライフサイクルについて投入エネルギーと産出エネルギーとを調べるものである。図3は100万kWの設備について、耐用年数を30年とし、その間に生産する電力量から設備の建設と運転に消費するエネルギー量を差し引いて社会に供給可能な電力量を求めた正味のエネルギー収支の結果である。

図から石油火力などの火力発電と原子力発電は、正味エネルギー収支が大きく、社会への電力供給量は太陽光発電の6倍にもなっている。正味エネルギー収支の値は、発電設備の年間設備利用率に大きく影響を受ける。設備利用率は、貯蔵燃料である火力や原子力の場合は技術進歩で表の計算に用い

た75%より大きな値にすることは可能である。しかし自然エネルギーの場合は、立地場所によりその値が決まるため、技術進歩は図の白い部分のエネルギー損失を減少させるだけで全体の量を大きくすることはできない。すなわち図に示した火力と原子力の優位さは将来、燃料が安定に供給されている限りはさらに大きくなることがあっても小さくなることはない。エネルギーの大量消費社会に火力や原子力が必要な理由がこの図からもわかる。

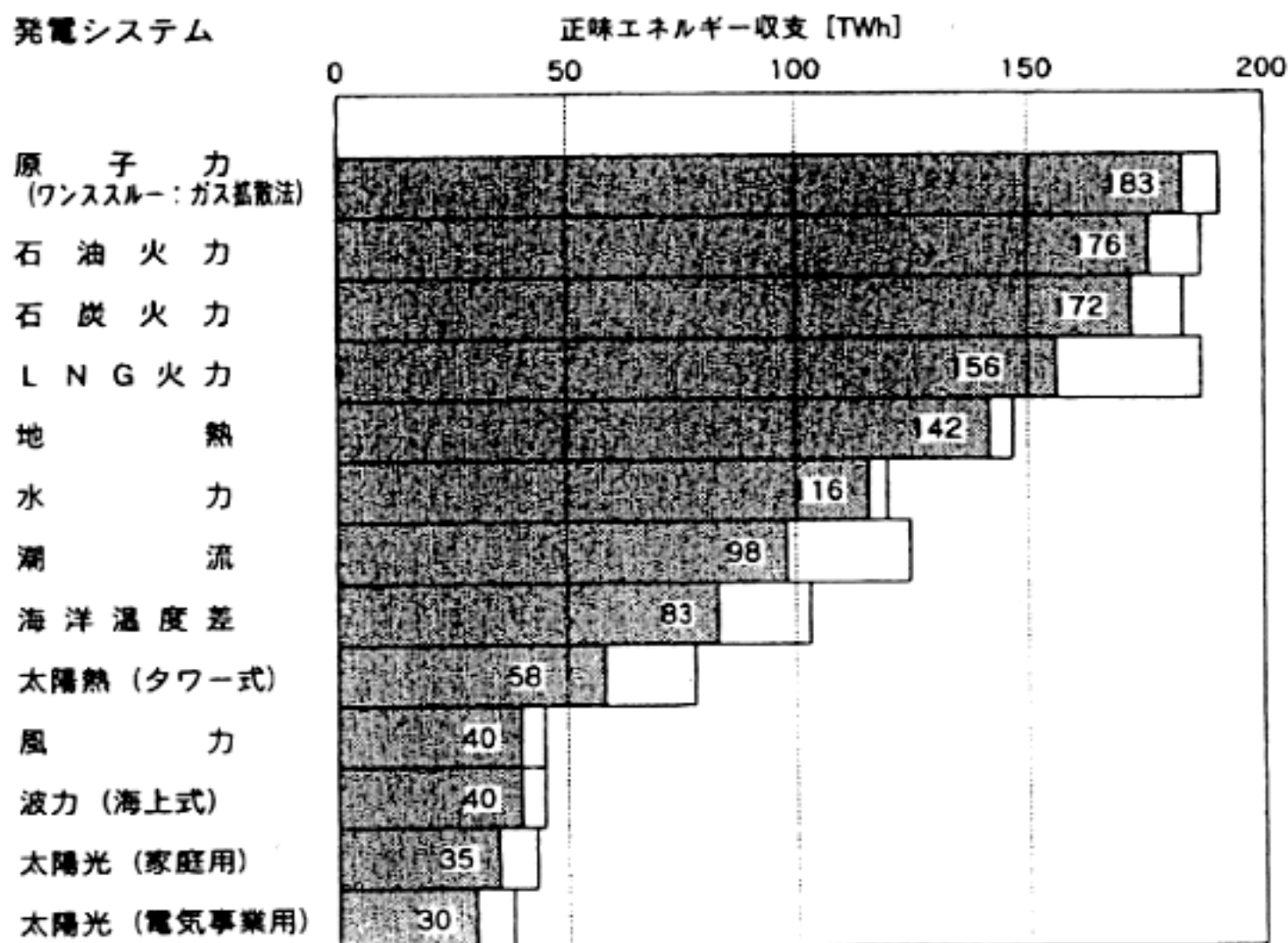


図3 発電システムの正味エネルギー収支 (100万kW、寿命：30年)

自然エネルギーには、希薄なエネルギー密度と少ない供給力とは別に、供給の信頼性問題もある。火力や原子力のように貯蔵されているエネルギーを使う発電システムは、燃料の備蓄があればいつでも電気を生産することができる。しかし間欠的なエネルギー源である自然エネルギーの電力供給はすべて自然任せである。もし需要家が必要なときに電気が供給されなければ、発電設備としての価値がなくなる。

太陽光発電を例に設備価値を調べてみよう。図4はわが国で最大ピークが現れる夏季の日負荷曲線と太陽光発電の出力曲線を示したものである。すなわちパネルの温度上昇と気候変動を無視した理想状態で太陽光発電が電力を生産したときの電力需要の負荷曲線の変化を描いている。我が国の電力需要の最大ピークは夏季7月頃の午後2時から3時頃に現れるが、その時の太陽光発電の出力は定格出力の9割程度になる。

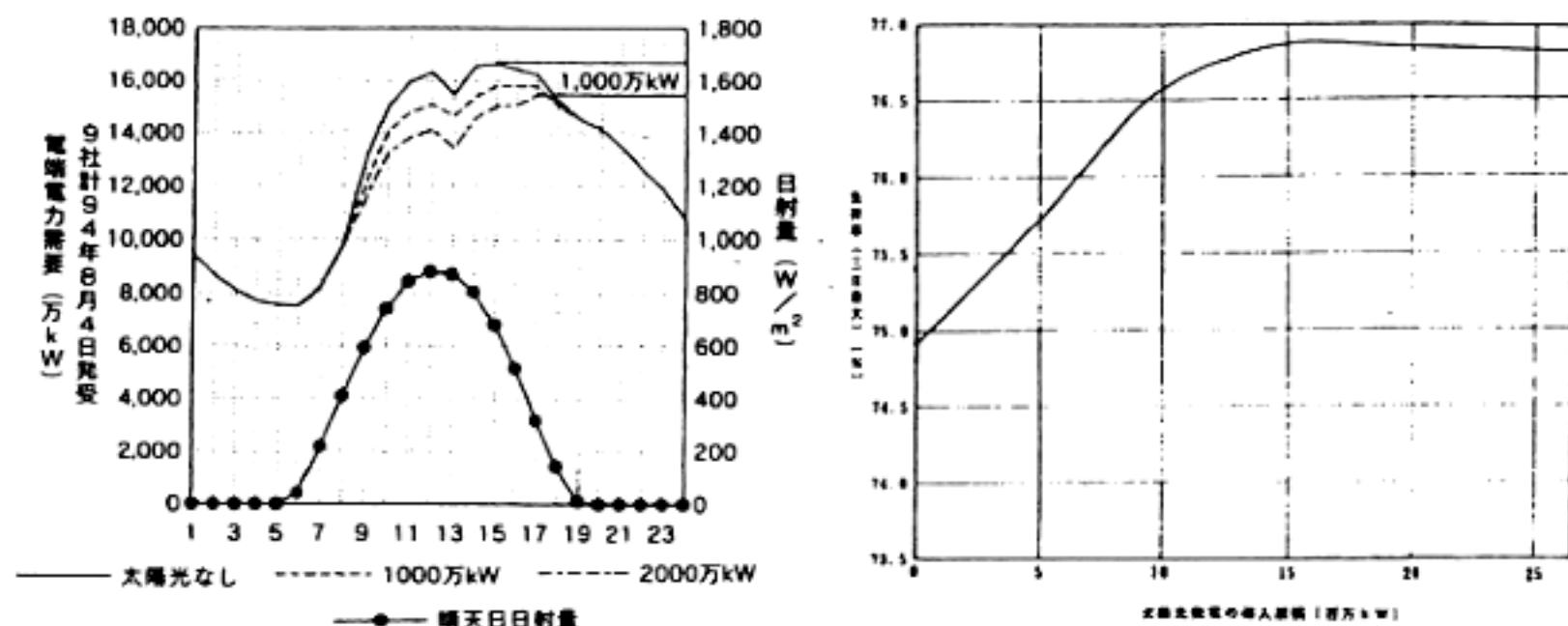


図4 設備価値からみた太陽光発電の導入限界

太陽光発電が社会に大量に普及した場合、電力需要の負荷曲線は最大ピークが夕方にシフトしていく。夕方に最大ピークが移行すると、昼間に発電する太陽光発電の設備価値は減少する。この設備価値の影響は負荷率を計算すれば定量的に明らかにできる。図4には夏期最大ピークの負荷率の変化を太陽光発電の導入規模で示している。それによると1,000万kWまでは負荷率を改善しているが、それ以上の導入規模になると改善効果が急速に減少していくことがわかる。その導入量は現在のわが国の総発電設備量1億7千万kWの6%に相当している。それ以上の太陽光発電の導入は、電力需要の最大ピークの削減にほとんど寄与しないことになる。経済的にみると、1,000万kWまではピークの電力の供給コストである30円/kWh程度の価値があるが、それ以上の設備に対してはkWhと送電クレジットの15円/kWh以下の価値にまで低下する。この設備価値の低下問題は蓄電池の導入で技術的には解消できる。しかし蓄電池を導入すれば高価な太陽光発電の電気が30%も失われるだけでなく、寿命の短い電池の高い設備費で経済性はさらに悪化する。自然エネルギーの設備価値は、風力発電になるとわが国ではもっと厳しくなる。

太陽光発電や風力発電は環境保全から大切な技術である。しかしその導入可能量には限界があることも理解すべきである。火力や原子力のように安定したエネルギー源が確保されている間は、太陽光や風力がわが国の電力消費の5%以上を供給することは至難の技である。エネルギーの社会への安定供給とは、単に資源面だけでなく需要家への信頼性も含めて検討していくことが大切である。

【参考文献】

- (1) 内山洋司「私たちのエネルギー：現在と未来」培風館（1996年9月）
- (2) 内山洋司「原子力なくして未来はあるのか」エネルギーレビュー、17巻(1)(1997年1月)