

将来のエネルギー資源について

(原子力の役割)

苦米地 顕

I. 世界の人口とエネルギー消費量

(1) 将来の世界の人口

人類の文明社会を維持するために必要な二つの重要な資源は、食糧とエネルギーであると言われている。ところが、間もなく 21 世紀を迎えようとする我々の人類社会の姿は、この二つの資源について既にその供給についての限界が見え始めており、長期的な展望については楽観を許さない状況に立ち到りつつあると言っても過言ではない。その大きな原因の一つは、ほぼこの 100 年間のごく最近に起こった世界の人口の急激な増大であり、人口爆発という言葉が使われ始めてから既に久しい。

将来、人類はどれだけの食糧を地球上で生産出来るのであろうか。1975 年のある統計によれば、陸上での光合成による一年当たりの有機物質の純生産量は約 1100. 億トンであり、そのうちの農耕地での生産量は約 91. 億トンであった。今後、遺伝子操作などの研究が進み、画期的に生産性の高い生物が生み出されるかも知れない。しかしながら、科学技術が生み出した人畜無害の便利な化学物質であると思われたフロンという物質が、オゾン層の破壊という当初は思いもしなかったことを引き起こしたという苦い経験が警告しているように、人工的なものを地上に大量に生み出して用いることは、地球の生態系を破壊する恐れがある。従って、そのような人工的な生物を大量に生産して用いることには、十分に慎重でなければならず、出来ることなら避けるのが賢明であると言うべきであろう。

このようなことから、世界の農産物の生産量が、既に陸上での光合成によって生産される有機物の約一割近くにも達しているという現実を考えれば、世界の食糧生産がその上限に近づきつつあるという懸念は全く根拠のないものであるとは言いきれないと言うべきである。

将来のエネルギー問題を考える上で、人類の未来社会の望ましい姿としてどのような社会を想定し、どれ程の人口を念頭に置くべきかということは重要な前提条件の一つである。もちろん、将来人類は食糧もエネルギーも問題にならない程度に人口を抑制すべきであるというのも、一つの説得力ある議論ではある。しかし、一方、現実の問題として、現在増え続けつつある人口を如何にして抑制すべきかということ自身が困難な大問題であるとして様々な議論が行われている現状を考えると、更にそれ以上の大幅な人口の減少までを期待した議論をすることは、当面実現性の乏しい議論であるという辞を免れないことになる。

従って、以下の議論では現状を事実として受けとめた上で、今後の人類社会が人口の抑制にある程度成功するだろうという楽観的な仮定をして、現状の二倍程度の 100. 億人が地球上の終達人口となるであろうという想定で、将来のエネルギー問題を考えてみることにしたい。

すなわち、現在の知識に照らして利用可能であると考えられるエネルギー資源が、量的にどれ位あるのか、またどれ位利用できそうであるのか、について以下詳細に考えてみる。

資源量は一般にその価格や需要によって変動する。価格が上昇すれば資源量も増大するするのが常であるので、資源量は本来流動的なものである。しかしここでの議論は、各種のエネルギー資源に関して、その供給量についての大まかな見通しを得ようとするものであるから、細かい数字についての議論は不要であり、それよりもむしろ出来るだけまとまった統計に基づいた議論の方が重要であると考えられる。従ってここでは、1993 年度の統計として世界エネルギー会議が 1995 年にまとめたものを中心に、不足の部分を他の資料で補って議論してみることにする。

以下の議論では、先ず最初に現在の世界のエネルギー消費の現状について概観し、ついで各種のエネルギー資源について、個別に論ずることとする。

(2) 世界のエネルギー消費量

現代の人類社会を支えているエネルギー量はすでに膨大なものとなっており、年々少しづつ増え続けている。そこで以下の議論では、便宜上エネルギーの単位として 10^{21} J を Zeta (10^{21}) Joule と呼び、この

ZJ という単位を主として用いることにする。そのエネルギー量は、石炭約 400 億トンを燃焼させた時に発生するエネルギー量に相当する。なお、この ZJ というエネルギー量は、これまでのエネルギー関係の多くの論文で屢々用いられている、 10^{18} BTU を表す Q というエネルギー量に略等しい値であって、この Q という値は 1.053 ZJ に相当するエネルギー量である。

ある統計によれば、世界の人口が約 53 億人であった 1990 年度の先進諸国と開発途上諸国別の一次エネルギー消費量は、世界全体では年間約 0.387×10^{21} J、つまり 0.387 ZJ であった。

世界のエネルギー消費量（1990 年度）

	先進国 (ZJ)	開発途上国 (ZJ)	合計 (ZJ)
石炭	0.059	0.034	0.093
石油	0.093	0.032	0.126
天然ガス	0.062	0.010	0.073
バイオマス	0.008	0.043	0.051
水力	0.015	0.008	0.023
原子力	0.021	0.001	0.021
合計	0.258	0.129	0.387

この統計は、当時の先進諸国の人口が約 13 億人で世界全体の 25. % であったのに、それらの国々が消費したエネルギー量は全体の 67. % にも達していたことを示している。このことは、次のことを暗示する。すなわち、仮に将来の文明社会において、現在の開発途上諸国の人々が今日の先進諸国の一人あたりのエネルギー消費量と同じ量のエネルギーを消費するようになったと考えただけで、世界全体のエネルギー必要量は現在の約 2.6 倍の 1.0×10^{21} J、すなわち約 1.0 ZJ の値に増大することを意味する。さらに、もし将来の世界の人口が現在の約二倍の 100 億人になるものと考えたと、必要なエネルギー量はそのまた二倍の 1.94 ZJ という値になる。従って以下の議論では、このように将来の世界が年間 1.0—2.0 ZJ 程度のエネルギー量を必要とするであろうという事情を念頭において、各種のエネルギー資源量を検討する必要があることになる。

II. エネルギー資源各論

以下の議論では、まず最初に、化石燃料資源である石炭を主とする固体燃料、石油、天然ガス、頁岩油等の資源量について述べる。

それから後は、順を追ってその他の各種のエネルギー資源、すなわち太陽エネルギーである太陽光、水力、潮汐力及び波力、風力、海洋温度差によるエネルギー資源量、植物からのエネルギーであるバイオマス資源について論じ、更に地球内部のエネルギーである地熱のエネルギー資源量、そして最後に、原子力のエネルギーとして核分裂エネルギー資源と将来開発が期待される核融合エネルギー資源とについて述べることにする。

(1) 固体燃料（石炭）

瀝青炭と呼ばれる通常の石炭の他、亜炭、褐炭などを含む固体燃料の資源を保有する主要な資源国は、次の表に示すように、中国、アメリカ、旧ソビエトなどの限られた国々であって、それらの国々だけで世界の総埋蔵量の約 85. % と、その大部分を占めている。このように、石炭資源は地球上にかなり偏在している資源である。

固体燃料の埋蔵量と生産量

	確認埋蔵量 (兆トン)			生産量 (億トン/年)		
	石炭	亜炭	総量	石炭	亜炭	総量
南ア	0.0553	0.	0.0553	1.8	0.	1.8
インド	0.0680	0.0019	0.0699	2.5	0.2	2.6
ドイツ	0.0240	0.0433	0.0673	0.6	2.2	2.9
オーストラリア	0.0490	0.0419	0.0909	1.8	0.5	2.2
中国	0.0959	0.0186	0.1145	11.5	0.	11.5
旧ソビエト	0.1410	0.1000	0.2410	4.1	1.3	5.4
アメリカ	0.2090	0.0315	0.2406	7.8	0.8	8.6
全世界	0.7165	0.3152	1.0316	35.4	9.3	44.7

これらの固体燃料から得られるエネルギー量を、石炭及び亜炭について、それぞれ 1. トン当たり平均 29.3 GJ 及び 15. GJ のエネルギーを発生するものとして計算すると、石炭と亜炭の確認埋蔵量の合計である 1.03 兆トンの固体燃料から得られるエネルギーの総量は、25.7 ZJ と計算される。現在の生産量の合計約 45. 億トンは、0.118 ZJ のエネルギー量に相当する。

また、固体燃料の究極埋蔵量は 12.1 兆トンと推定されているので、それがすべて石炭であるとして計算すると、そのエネルギー量は 355. ZJ となる。

(2) 石油

ここでいう石油には原油と液体天然ガスとを含むものとするが、資源量としては液体天然ガスは全体の約 2. %程度で、極く僅かな量である。石油の確認可採埋蔵量は次の表に示すように、0.14 兆トンと推定されている。この確認埋蔵量のうちでは、中東地域の埋蔵量が特に大きく、資源量全体の約 25.8 %を占めるサウジアラビアを含めて、石油資源全体の 64.4 %を占めている。

石油の資源量と生産量

	確認埋蔵量 (億トン)	生産量 (億トン/年)
中東	903.	9.52
ベネゼイラ	98.	1.29
ロシア	67.	3.54
中国	33.	1.45
メキシコ	69.	1.56
アメリカ	39.	4.10
全世界	1407.	31.79

全世界の確認埋蔵量の可採年数は 45. 年であるが、アメリカについて見れば、それは既に 10. 年を割っている。

石油の究極可採埋蔵量は、2. 兆バレル、すなわち 0.27 兆トンと推定されている。これらの石油の資源量について、石油一トン当たり平均 42. GJ のエネルギーを発生するものとしてエネルギー量を計算して見ると、その確認埋蔵量及び究極埋蔵量からは、それぞれ 5.9 ZJ 及び 11.3 ZJ のエネルギー量が得られることになる。また、現在の世界の生産量の 31.8 億トンは 0.134 ZJ のエネルギー量に相当する。

(3) 天然ガス

天然ガスについては、旧ソビエトとイランが圧倒的に多い量を保有しており、世界の確認埋蔵量の約 5 割を占めている。これらの埋蔵量については、その探掘技術の進歩と埋蔵量の見直しによって、毎年少しづつ増大して来ており、近い将来には、確認埋蔵量が 150. 兆立方メートルに達するであろうと観測されている。

天然ガスの資源量と生産量

	確認埋蔵量		生産量	
	(兆 m ³)	(億トン)	(兆 m ³ /年)	(億トン/年)
旧ソビエト	56.	480.	0.623	5.33
イラン	21.	180.	0.058	0.50
アメリカ	4.6	39.	0.525	4.50
全世界	141.	1208.	2.485	21.30

天然ガスの可採年数は、57. 年と計算されるが、アメリカについて見れば、それは石油同様既に 10. 年を割っている。

天然ガスの究極埋蔵量は 400. 兆立方メートルと推定されており、それは石油に換算すれば 0.343 兆トンに相当する量である。これらの天然ガスの資源量を、石油のところで用いた換算係数を用いてエネルギー量に換算してみると、それは次のようになる。すなわち、確認埋蔵量、究極埋蔵量及び生産量は、それぞれ、5.07 ZJ、14.4 ZJ、及び 0.089 ZJ というエネルギー量に相当することとなる。

(4) 頁岩油等

頁岩油の確認埋蔵量として分類され得るものは、178. 億トンと極く限られており、オーストラリアは頁岩油の 25. % を、ナイジェリアはタール・サンドの油の 81. % を保有している。また、この確認埋蔵量に更に追加可能と推定されている埋蔵量を加えた総埋蔵量については、頁岩油が 0.336 兆トン、タール・サンドの油に関しては 0.0574 兆トンと言う値が推定されており、合計で 0.393 兆トンと推測されている。

これらの資源のエネルギー量は、石油と同等と考えて計算すると、確認埋蔵量及び総埋蔵量からは、それぞれ 0.75 ZJ 及び 16.5 ZJ というエネルギー量が得られることになる。

(5) 太陽光

太陽から地球に向けて降り注ぐ太陽光のエネルギー密度は、大気圏外で 1.39 kW/m² である。地表への到達エネルギー密度は最大約 1. kW/m² で、年間の総量は 4030. ZJ であり、その約 3 割の 1180. ZJ が陸地に降り注いでいる。しかし、連続平均とした場合の地表でのエネルギー密度は、東京での実測によれば、約 163. W/m² であり、希薄なエネルギー密度である。ニューヨークのマンハッタン島では、その廃熱量が既にこの太陽エネルギー密度の約 4. 倍にも達している。

統計によれば、現在、先進諸国の一次エネルギー消費量の約三割は、ビルの照明や冷暖房用に使われている。従って、こうしたビルに対する低放射ガラスと呼ばれる熱線反射ガラスなどの新しい窓材の採用の他建物の構造ならびに断熱方法の改善などによる、太陽からの光と熱のより有効な利用は、エネルギー問題全体からすれば大きな意味を持つものである。

太陽光発電については、北緯 36. 度の日本の場合、総合変換効率 20. % の高性能太陽電池を用いるものと仮定すると、稼働率が 75. % の 100. 万 kW の原子力発電所に相当する出力の太陽光発電所の建設には、約 6.2 km x 6.2 km という広大な面積の太陽電池が必要になる。しかし、実際には、太陽電池の保守作業のためなどの面積も必要となるので、こうした太陽電池の設置には、この面積の 2. - 3. 倍の敷地が必要となるであろう。また、この発電所の最大出力は 625. 万 kW という大きな値になり、送電電力の平坦化を計るための、巨大な蓄電池が必要となる。

また、我が国の戸建ての総数は約 2330. 万戸であるから、一戸当たりの平均で、15. m² の総合効率 20. % の高性能太陽電池が南向に設置されたとすれば、その総設備容量は約 6990. 万 kW となる。こうした設備の稼働率は年間平均約 12. % であるから、年間発電量は約 730. 億 kWh になる。だが、1995 年度の統計によれば、我が国の発電設備容量は約 2.03 億 kW で、年間発電量は約 8720. 億 kWh であった。従って、このような極端な想定をして見ても、太陽電池によって発電され得る総発電量は、1995 年度の我が国の発電量の約 8.4 % に相当する値に過ぎないことになる。

なお、この場合の太陽電池そのものの全面積は、国全体の面積の約 0.09 % を占めることになる。保守作業などを考えた必要面積は、この何倍かになるであろう。1994 年の統計によれば、我が国の田の面積は、国全体の約 7.3 % である。従って、太陽電池の設置面積としては、物理的に考えても、国土の約 0.1 % 程度が最大値と考えるべきであろう。

太陽エネルギーは希薄なエネルギーではあるが、その総量は膨大なものである。従って、一つには、低放射ガラスの採用や構造の工夫によるビルの照明や冷暖房用エネルギーの節約へ向けた、太陽の光と熱のより有効な利用が期待される。また、太陽電池の改善と、画期的な蓄電池の発明などの補機類に関する技術開発の成功も期待される。そして、その結果、仮に陸地に降り注ぐ太陽エネルギー量の 0.1 % を利用出来たとすれば、それは現在の世界の消費量の約二倍以上に相当する年間約 1. Z のエネルギー量になることを示している。

(6) 水力

水力の資源量と利用量

	開発可能量 (TWh/y)	発電量 (TWh/y)	設備容量 (GW)
ブラジル	1116.9	252.8	47.3
カナダ	593.0	315.8	62.0
中国	1923.3	138.7	44.6
コロンビア	418.2	27.8	7.7
フランス	100.0	60.9	23.8
インドネシア	709.0	7.6	2.1
日本	132.4	74.1	17.7
ノルウェー	171.4	115.9	26.2
ペルー	412.0	11.4	2.5
アメリカ	376.0	267.3	74.4
旧ソビエト	3338.0	160.6	42.8
全世界	13974.3	2286.0	609.3

世界各国がそれぞれ独自に行った調査結果に基づく値を集計した結果によれば、上の表に示すように、技術的に開発可能な水力発電の最大量は 13974.3 TWh/y、現在の水力発電量は 2286. TWh/y である。この技術的な開発可能量の数値は、年間 0.0503 ZJ のエネルギー量に相当しており、また、年間発電量として示されている約 2286. TWh は 0.00823 ZJ のエネルギー量に相当し、開発可能な値の約 16. % が既に関係され、利用されていることを示している。

(7) 潮汐力及び波力

全世界の潮汐力のエネルギーの総量は、年間 2.2×10^4 TWh の 7.92×10^{19} J、つまり約 0.079 ZJ であると推定されている。そのうちの約 1. % が経済的に利用可能であろうと見積もられており、潮汐力から期待し得るエネルギーの総量は、年間約 200. TWh、つまり 7.2×10^4 ZJ であろうと推定されている。

潮汐力利用に有望な地域

	平均落差 (m)	計画設備容 (GW)
カナダの Bay of Fundy	11.	6.26
イギリスの Severn Estuary	9.	8.00
フランスの北西海岸	8.	?
オホーツク海	7.	?
中国の南東海岸	6.	?

現在稼働している最大の潮汐力発電所は、フランス西海岸の Rance にある 240. MW のものである。世界の総発電量は約 0.6 TWh で、それは 2.2×10^4 ZJ に相当するエネルギー量である。

全世界の波のエネルギー量は 2.7×10^{12} W、年間のエネルギー量にして 0.085 ZJ 程度と見積もられている。仮に、この波のエネルギーの 0.1 % を利用できるとすれば、利用可能なエネルギー量は年間 8.5×10^4 ZJ となる。従って、潮汐力と波力から期待できるエネルギーの総量は、年間 8.0×10^4 ZJ と推計される。

(8) 風力

地球全体の風のエネルギーは、約 3×10^{11} GW という大きな値であると推定されており、その約 3 割が陸上で吹いている。ある推計によれば、この風力エネルギーの利用可能最大量は 2×10^4 GW 程度と見積もられており、そのエネルギー量は年間約 2×10^5 TWh、約 0.72 ZJ と推定されている。

風力エネルギーの利用状況

	設備容量 (GW)	発電 (GWp)
デンマーク	0.534	1137.
イギリス	0.130	211.
ドイツ	0.650	?
オランダ	0.130	131.
南ア	0.050	?
アメリカ	1.814	3042.
全世界	3.515	4878.

統計では、年間の発電量は 4.878 TWh で 1.76×10^5 ZJ に相当するエネルギー量となっているが、発電以外をも含めた全設備容量が 4.5 GW であるとし、エネルギー発生量が設備容量に比例しているものとして総発生エネルギー量を推算すると、それは約 2.26×10^5 ZJ となる。

(9) 海流温度差

海面の水温と約 3000. m の深海の水温との温度差を利用して発電しようという考えは、たとえばメキシコ湾流などの利用で考え得る方法である。メキシコ湾流の場合には、こうした深海と海流の表面の温度差が約 16.-22. °C であり、その流量は一日当たり約 2200. km³ である。従って、平均温度差を 20. °C として計算すると、そのエネルギー量は年間約 67. ZJ と求められ、それを利用して得られる発電量は年間約 1.8×10^5 TWh、約 0.65 ZJ であると推計されている。

全世界のエネルギー量はメキシコ湾流の十倍以上と推定されているから、可能な発電量は約 10. ZJ 程度であろうと考えられる。しかしその利用については、海岸から近い場所に利用が限られるなどの制約があるので、結局利用可能なエネルギー量としては最大で全体の 1. % 程度であろうと見積もられており、それは年間約 0.1 ZJ のエネルギー量に相当することになる。

(10) バイオマス

ここで言うバイオマスとは、薪炭、家畜の乾燥糞、植物性の廃棄物などを含む、植物に起因するエネルギー資源を表すものとする。世界の薪炭の消費量は、世界の木材の全消費量の約半分である約 13.7 億トンと推計されており、それから得られるエネルギー量は 0.022 ZJ の値に相当し、現在の世界のエネルギー消費量の約 5. % を占めている。1990 年度の統計によれば、薪炭を含めたバイオマスによる全エネルギー量は、全一次エネルギー消費量 0.387 ZJ の約 13. % に相当する、0.051 ZJ と推計されている。

将来利用可能なバイオマスエネルギーの最大値については、陸地における有機物の純生産量の 1/10 程度であろうと考えれば、それは年間約 0.2 ZJ というエネルギー量に相当する値となる。

(11) 地熱

地球の内部全体の室温以上のエネルギー量は、約 4×10^9 ZJ と推定されている。地殻を通過して地球の内部から表面へと移動する熱量は、平均約 0.54 J/cm²/d であって、地球表面全体では年間約 1.01 ZJ のエネルギー量を宇宙に放出していることになる。地殻の熱エネルギーの利用方法の一つは地殻中の温水を利用する方法であり、すでに実用化されている。もう一つの方法は地殻の高温岩石の熱を利用するもので、それは技術的により困難であるが、その利用法の研究が進められている。

地熱の利用状況

	発電設備容量 (GWe)	年間発電量 (TWh)
インドネシア	0.140	1.1
イタリア	0.626	3.4
日本	0.299	1.7
メキシコ	0.740	5.9
ニュージーランド	0.259	2.2
フィリピン	1.051	5.5
アメリカ	2.817	16.5
全世界	6.456	38.0

地熱の利用状況については、現在の発生電力量の 38. TWh は、 0.000137 ZJ のエネルギー量に相当する。仮にそれらの設備の熱効率を平均 30. % であると仮定すれば、それは温水で 0.000456 ZJ のエネルギーを利用したことになる。この他に、温水を直接利用するものもあり、そうした温水の直接利用によるものは、総設備容量が 8.8 GW で、年間約 $1.29 \times 10^{-4} \text{ ZJ}$ のエネルギー量に相当するものと推定されている。従って、地熱の全利用量は $5.85 \times 10^{-4} \text{ ZJ}$ のエネルギー量ということになる。

陸地の地下の深度 10. km までに存在する温水の持つエネルギーの総量は、約 10. ZJ と推定されており、そのうちの 4. % 程度の約 0.4 ZJ が発電に利用可能であろうと見込まれている。また、同じように、陸地の地下 10. km までの高温の岩石中のエネルギーの総量は、約 $3.1 \times 10^5 \text{ ZJ}$ と推定されており、利用可能な最大量はその 0.1 % 程度の 310. ZJ 位であろうと見積もられている。

(12) ウラン

西側諸国のウランの資源量については、ウラン 1. kg 当たり 80. \$ 以下の低価格のものと、80.-130. \$ の高価格のものに分類され、更にそれぞれが確認埋蔵量と推定追加可能量とに分類されている。東側諸国の統計は、必ずしもこれと同じ分類でまとめられていない。しかしながら、公表された資料を出来るだけ整理してみれば、その確認埋蔵量は 478. 万トン、これにその他の資源量を加えた総埋蔵量は 1500. 億トンと求められる。

これらの確認埋蔵量と総埋蔵量とについて、それらを軽水炉でウンス・スルーで利用したとすれば、それぞれ 2.6 ZJ 及び 8.2 ZJ のエネルギー量が得られる。また、増殖炉でその 60. % を核分裂出来ると仮定した場合には、それぞれ 233. ZJ 及び 722. ZJ が得られることになる。

ウラン資源から得られるエネルギー量

	総埋蔵量		確認埋蔵量	
	(10^6 t)	(ZJ)	(10^6 t)	(ZJ)
全世界	14.84	722. (8.2)	4.78	233. (2.6)

1994 年度の統計によれば、世界の原子力発電所の総数は 432 基で、総設備容量は 340.3 GW、年間の発電総量は約 $2.1 \times 10^{15} \text{ Wh}$ であった。それは、エネルギー量としては 0.00756 ZJ の値に相当する。また電力への変換効率を 33. % と想定して、その一次エネルギー量を求めて見ると、それは約 0.023 ZJ という値になる。

なお、海水中のウランの総量は約 47. 億トンと計算される。このウランを増殖炉で燃焼させることが出来たとすれば、それからは $2.3 \times 10^5 \text{ ZJ}$ という大きなエネルギーが得られることになる。

(13) トリウム

トリウムの原子核は、中性子を吸収すれば放射線を放出して核変換を起こし、核分裂をしやすい ^{233}U の原子核に変換する。従って、トリウムは炉内で ^{233}U を増殖する増殖炉用の燃料として使用し得るものである。トリウム資源の確認埋蔵量 140. 万トンから得られるエネルギーは 70. ZJ、総埋蔵量の 240. 万トンからは 120. ZJ が得られると計算される。

(14) 核融合

近い将来に実現されることが期待されている核融合反応は DT 反応であって、天然に豊富に存在する重水素の D と、リチウムに中性子を衝突させて作り出される三重水素 T とを利用することになる。従って、この DT 反応によって得られるエネルギー量は、実際上リチウムの資源量に依存することになる。

リチウムの主要な資源国として公表されているものは、ボリビアとチリで、その埋蔵量は 830. 万トンである。しかし、旧ソビエトや中国などのようにその埋蔵量を公表していない国も多いので、実際の世界の埋蔵量は公表されている数字よりもかなり多いものと推測される。

リチウム資源量

	資源量 (10^6 t)
ボリビア	5.4
チリ	1.4
西側諸国合計	8.3

核融合反応で得られるエネルギー量については、炉内で中性子の吸収によって付随的に発生するエネルギーをここでは無視することとし、反応当たり発生するエネルギーが 17.59 MeV であるとして計算すると、 8.3×10^6 t のリチウム資源から得られるエネルギー量は 175. ZJ となる。

なお、海水中のリチウム量は約 2400. 億トンと推計され、その資源から DT 反応で得られるエネルギー量は 5.1×10^6 ZJ という大きな値となる。

III. 各種のエネルギー資源についてのまとめ

これ迄述べた各種のエネルギー資源について、それらの資源から得られると期待されるエネルギー量を、別表にまとめてみた。すなわちこの表は、各種のエネルギー資源について、それらの量的な面を一つのエネルギー単位、ZJ を用いてまとめたものである。

初めに述べたように、将来の人類社会が年間 1.0—2.0 ZJ のエネルギー量を必要とするであろうと考えてこの表を眺めたならば、その問題の深刻さは明らかである。石油と天然ガスの資源量は心細い限りであり、石炭も今後何世紀にも亘ってエネルギー供給を保障できそうにはない。太陽関係の、所謂再生可能なエネルギーは、様々な仮定に基づいて推定した最大値を全部足し合わせたものがやっと 2.0 ZJ 程度であるから、そのみに将来の社会が頼るのは無理なことと考えるべきであろう。だが、幸いなことに原子力は、その開発が進められ、それが適切に用いられるならば、人類社会への長期に亘るエネルギー供給を約束して呉れる有力な候補として、期待することが出来るものである。

実際、この表に示された各種のエネルギー資源についての数字は、それ自身、それぞれ、将来の人類社会に対する意義を端的に物語っているもので、これ以上、それらが意味することをここに繰々述べる必要はないものとする。

もちろん、将来の人類社会のエネルギー問題は単にその量的な問題のみではなく、それを利用するために付随して生ずる各種の問題、たとえば化石燃料の燃焼に伴う CO_2 の排出の問題、地表や地下及び海洋などへの環境影響の問題、原子力の利用に伴う放射性廃棄物の処理処分の問題、などの他にも、化石燃料資源や鉱物資源などについては、そのエネルギー発生以外のための資源としての有用性など、将来の人類社会のあり方についての展望と関連した、複雑に絡み合った諸問題を同時に考えなければならないのは言うまでもない。しかしながら、それらのエネルギー資源が量的に一体どれ位期待できそうなのかということは、長期的な人類社会のエネルギー問題を考える時の第一義的な、最も重要な要素であり、その他のことは主として技術やコストに関係する二義的な問題である。

人類の長い歴史の中で、我々のこの 20 世紀という時代は、エネルギーを発生するという目的のために太古の大昔から地球上に存在してきた化石燃料を大量に消費し、とりわけ石油や天然ガスについては今やそれを燃焼し尽くさんばかりの勢いで消費しつつあるという意味で、特異な時代であると言うべきである。他方、原子核の結合エネルギーを解放して利用するという画期的な知識と技術を手にすることができたという意味で、特別な幸運に恵まれた時代でもある。この原子力の開発によって、人類の将来のエネルギー供給に有力な選択肢が付加されることになったからである。

新しいエネルギーの技術開発には、通常、数十年の長い努力が必要である。石油などの可採年数を考える時、早急に新エネルギー開発を強力に推進すべきなのは明らかである。

人類社会は、近い将来再び、我々の現在の知識では想像し得ないような画期的なエネルギー発生方法を発見してそれを実用化するという僥倖に恵まれるのであろうか。もし、そうではないかも知れないとして

将来を考えるとしたら、当面、ここに述べた各種のエネルギー資源の中から、未来の人類社会に相応しい賢明な組み合わせを選択して行かざるを得ないのである。

何れにしても、現在の我々の知識に照らしてみれば、我々の子孫が手に出来るであろうエネルギー資源には大きな制約が待ち受けているであろうことは、この分析から明らかである。このような観点から将来を展望するならば、以下に述べるような事柄を真剣に考え、早急に適切な行動を起こして行くことが肝要であると言い得よう。

- (1) 先進諸国の人々が現在使用している一人当たりのエネルギー消費量の程度で、世界中の人々が幸せな人生を送るための新しいライフ・スタイルを考え出すこと。
- (2) 早急に、実質的に無限のエネルギーである原子力エネルギーの利用の推進、なにかんづく新しいエネルギーである核融合エネルギーを開発し、利用すること。
- (3) なお、再生可能なエネルギー、すなわち太陽エネルギー関連のエネルギーを出来るだけ利用するように努力すること。

このようにするならば、我々の子孫は、将来少なくとも数千年に亘ってエネルギーの問題について重大な困難に直面することなく、豊かな生活をおくれる筈であると考えられるものである。

別表

各種のエネルギー資源

	究極埋蔵量		確認埋蔵量		現在の使用量
	(兆トン)	(ZJ)	(兆トン)	(ZJ)	(ZJ/年)
固体燃料 (石炭)	12.	360.	1.0	26.	0.118
石油	0.27	11.	0.14	5.9	0.134
天然ガス**	0.34	14.	0.12	5.1	0.089
頁岩油等	0.39***	17.	0.018	0.75	0.

	推定最大値 (ZJ/年)	現在の利用量 (ZJ/年)
太陽光	1.	0.
水力*	0.049	0.0082
潮汐力*	0.0008	0.0000022
風力*	0.7	0.000023
海洋温度差*	0.1	0.
バイオマス	0.2	0.051

	推定最大値 (ZJ)	現在の使用量 (ZJ/年)
地熱 (温水)	0.4	0.00059
地熱 (高温岩石)	310.	0.

	総埋蔵量		確認埋蔵量		現在の使用量
	(百万トン)	(ZJ)	(百万トン)	(ZJ)	(ZJ/年)
ウラン	14.8	722. (8.2)	4.8	233. (2.6)	0.023
トリウム	2.4	120.	1.4	70.	0.
リチウム	?	?	8.3	180.	0.

注：* 印は電気及び動力エネルギー

** 印はエネルギー的に等価な石油重量

*** 印は確認埋蔵量と追加可能埋蔵量の合計値

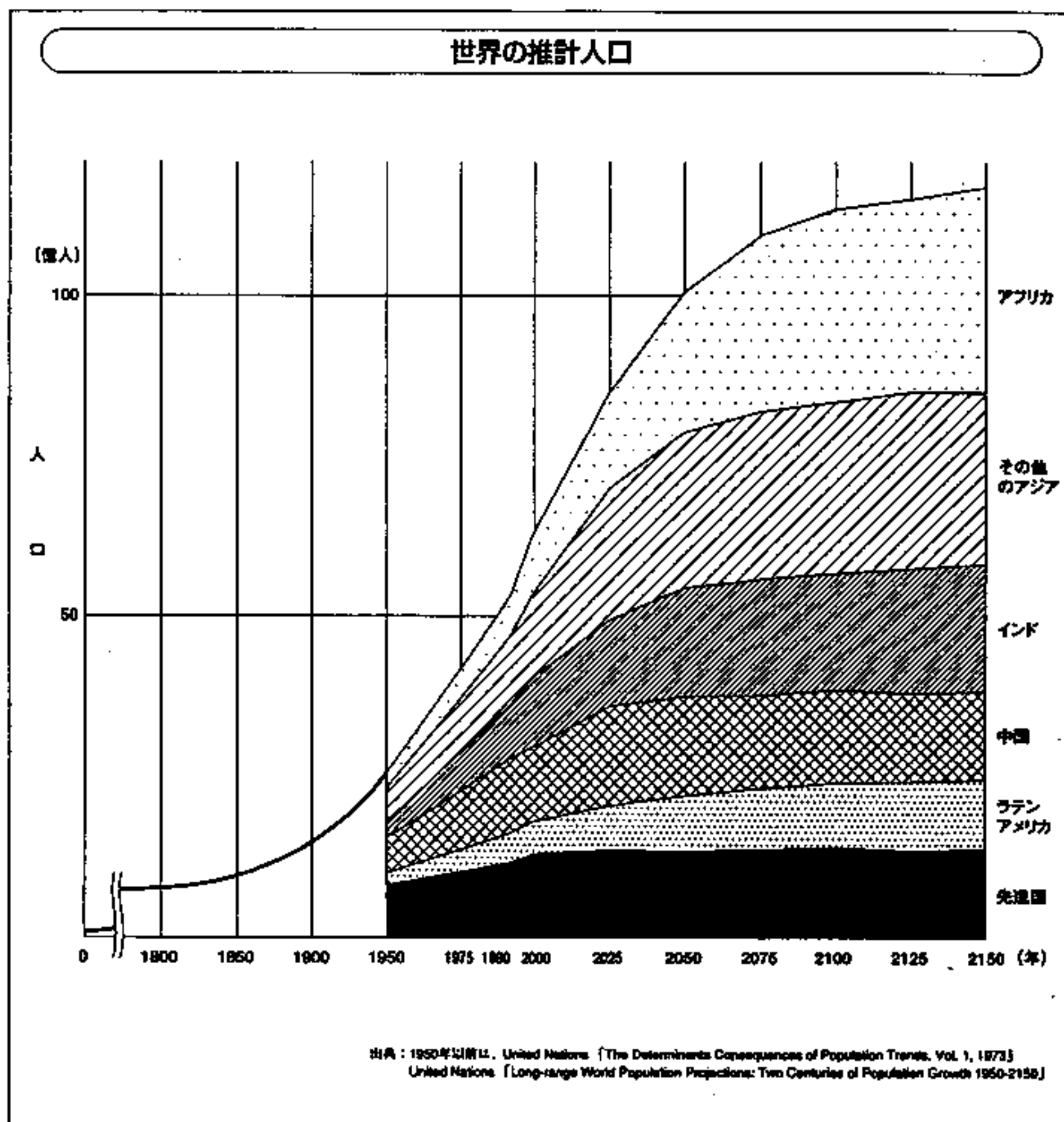
括弧内の数字は軽水炉での場合

リチウム資源は西側諸国のもののみ

1 アジア、アフリカを中心に 急増する世界の人口

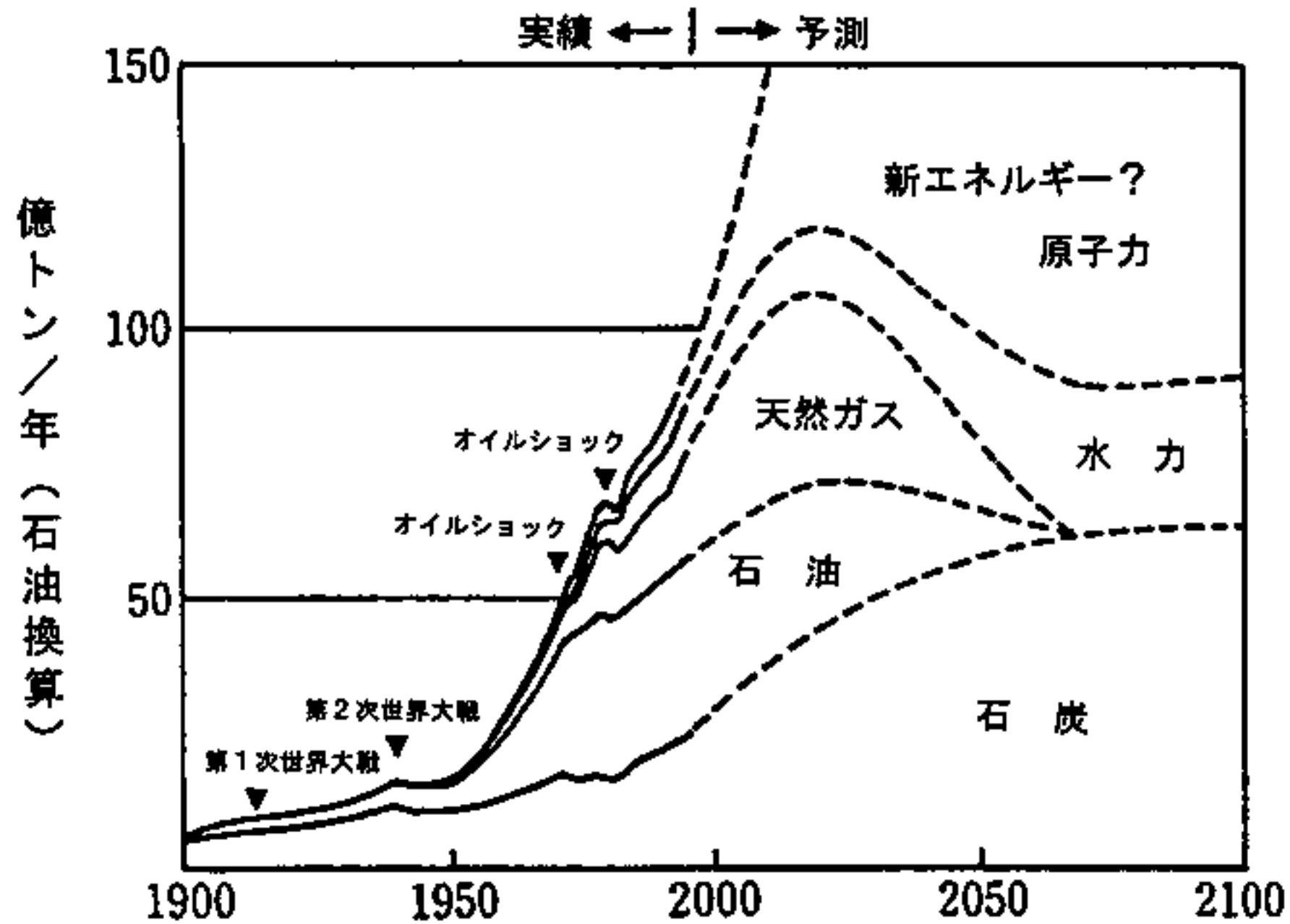
今、世界人口は急増しています。1950年に25億人だった世界人口は、1995年には57億人と45年間で2.3倍に増え、2025年には85億人、2050年には100億人に達すると予想されています。中でも、ア

ジア、アフリカを中心とした開発途上国では高い伸びが予想されています。人口の増加は食料を含む資源とエネルギーの問題に直結するため、適切な対応が必要とされています。



科学技術庁パンフレット

「もっと知りたい、もっと考えたい、原子力のこと」より抜粋



世界の一次エネルギー消費の増加

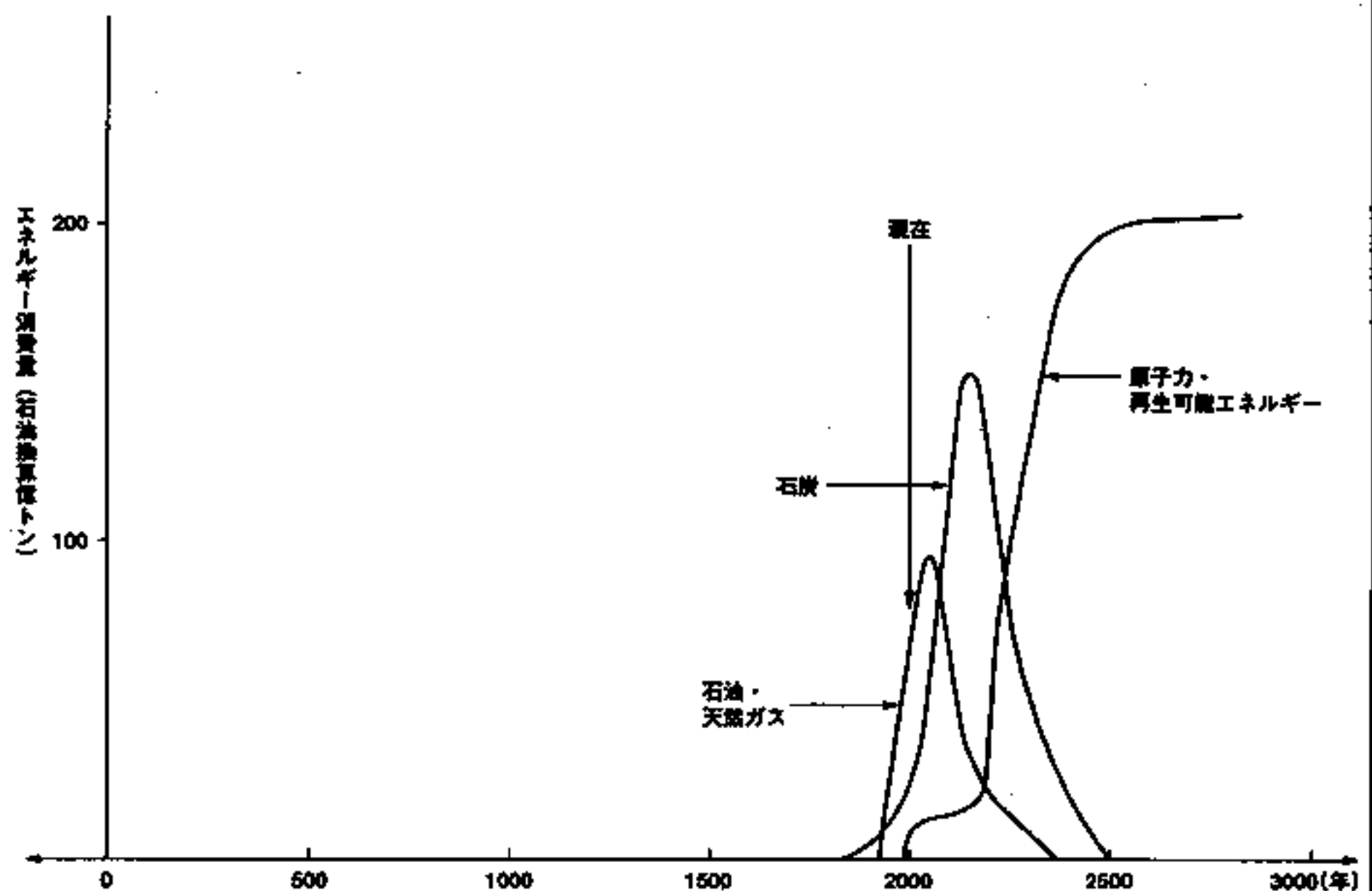
（出典：世界エネルギー会議（WEC））

5 現代を支える化石燃料

火を手に入れた人類は、有史以前から薪などのエネルギーを利用してきました。その後、18世紀後半に起こった産業革命以降、石炭、石油、天然ガスといった化石燃料の利用が急速に拡大し、今日の社会は、まさに化石エネルギーによって支え

られています。この化石燃料は、このまま消費すれば、確認埋蔵量以外の未発見の資源を考慮に入れても21世紀半ばから22世紀にかけて生産が減少に転じ、数百年以内には枯渇してしまうと予想されています。

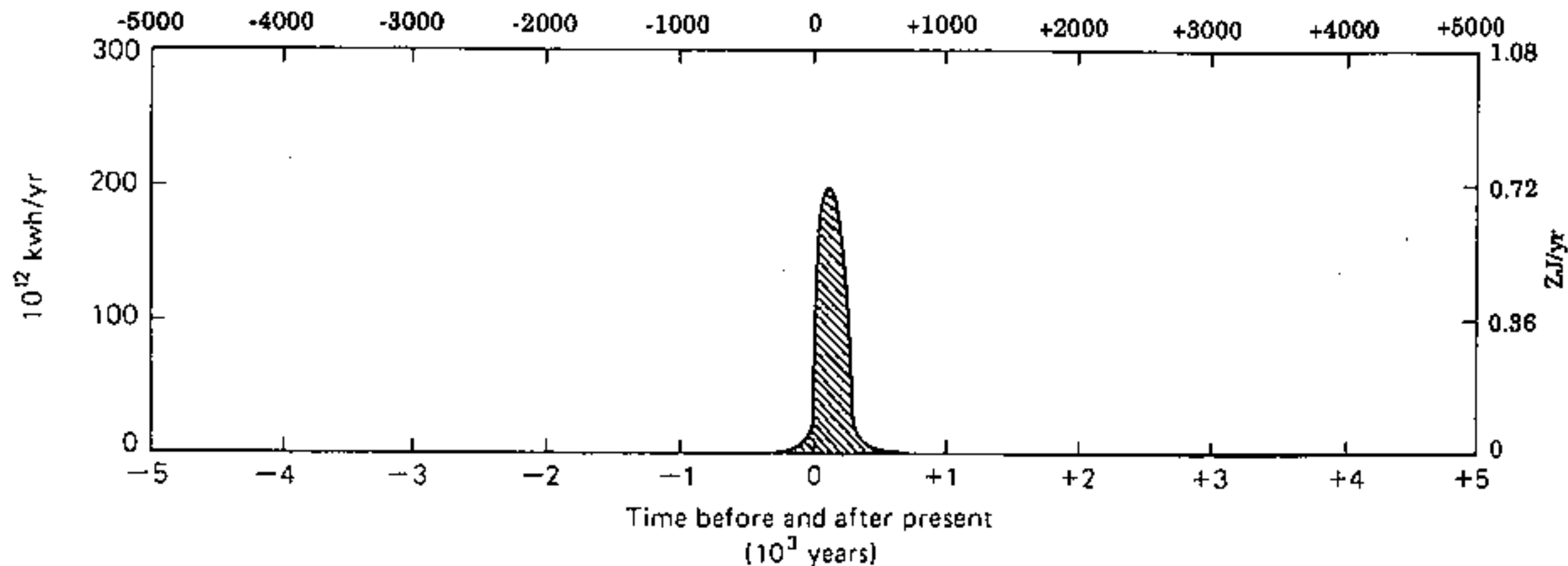
歴史的瞬間としての化石燃料時代



出典：電力中央研究所「石油を中心とする化石エネルギーの枯渇評価Y99009」より作成

科学技術庁パンフレット

「もっと知りたい、もっと考えたい、原子力のこと」より抜粋



Epoch of fossil fuel exploitation in the longer span of human history.

Source: Hubbert, M. King, 1972, Man's conquest of energy: its ecological and human consequences, on the environmental and ecological forum 1970-1971: U.S. Atomic Energy Commission; available as T 1D-25857 from Natl. Tech. Inf. Service, Springfield, Virginia 22151.