

特集

原子燃料サイクルの新動向

エネルギー資源としての原子力

Nuclear Power as a Energy Source

池本一郎*

Ichiro Ikemoto

1. 人類とエネルギー

地球上には色々な国があり、生活レベルも千差万別である。図-1に世界の人口と一人当たりのエネルギー消費量を示すが、エネルギー消費量は先進諸国と発展途上国間で大きな差があり、膨大なエネルギーは主として先進国で消費されている。図に示すように、現在、世界人口の1/4弱を占めるに過ぎないOECD諸国と旧ソ連・東欧諸国が、全世界の3/4のエネルギーを消費している。しかし、これらの先進国は今後、人口や経済成長が飽和してくるため、エネルギー消費の増加はそれほど大きくないと予想される。

これに対して、現在、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1/9である。そのうちの10億人は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、20億人もの人々が電気の恩恵を受けていない。このため途上国では、先進国の物質的な豊かさや生活の快適さを求めて経済成長を目指しており、エネルギー需要もそれに伴って急増している。

人口増加がそれを加速している。現在増加している

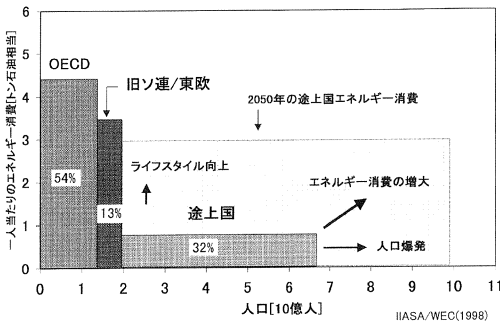


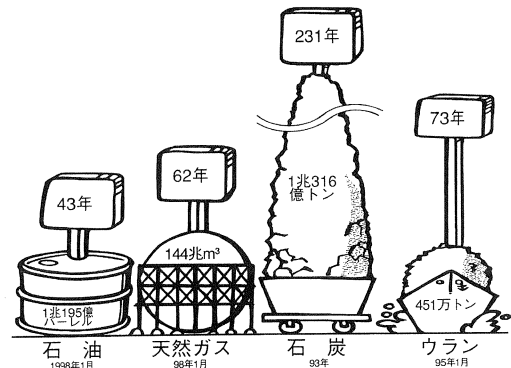
図-1 先進国と途上国の人口とエネルギー消費

人口の90%は途上国で占められている。図中の棒グラフの面積は全エネルギー消費量を表しており、仮に途上国の一人当たりのエネルギー消費が現在の先進国の半分まで増えると、図中に矢印で示すように、人口が100億人になると予想される2050年頃の世界のエネルギー消費量は現在の3倍になり、その3/4を途上国が消費するようになる。

特に、電気エネルギーは使い勝手が良いことから、途上国はもちろん先進国においても電化率は今後とも上昇すると予想されており、21世紀の人類に必要な膨大な電力エネルギー需要を、地球環境問題を悪化させずにどのように満たすのか、というのが21世紀のエネルギー問題の重要な問いかけである。

2. 各種電源の特徴

増大する電力需要を満たすためには、環境にやさしい豊富な電力エネルギー源が必要であるが、その電源



出典: 「総合エネルギー統計 (平成9年度版)」

(注1) 年数は可採年数(可採年数=確認可採埋蔵量/年生産量、ただし、ウランについては十分な在庫があることから、年生産(3.1万トン)が年需要量(6.1万トン)を下回っている。このため可採取年数については、確認可埋蔵量を年需要で除した値とした。)

(注2) プルトニウム利用によりウランは数倍から数十倍利用年数が増える。

図-2 世界のエネルギー資源確認埋蔵量

* 勲電力中央研究所 原子力政策室室長
(京都大学大学院エネルギー科学研究科)

〒100-8162 東京都千代田区大手町1-6-1

が備えるべき特徴は何であろうか。10年や20年で問題を捉えるのではなくて、50年、100年先までを見通した戦略性を持った電源の確保を考える必要がある。

2.1 エネルギー資源量

図-2には各種のエネルギー資源の確認埋蔵量を示す。

ここ当分の間、途上国では化石燃料が電源の主流とならざるを得ない。石炭の資源量は可採年数にして200年以上と比較的豊富であり、当分枯渇の心配はない。しかし、石炭の大量利用には大規模な輸送インフラの整備が必要となるのに加えて、単位発電量当たりの炭酸ガス排出量が、石油の35%増、天然ガスの50%増となり、環境上の問題から大量導入は難しい。

このため、ここ当分の間は、使い勝手の良い石油と天然ガスに需要が集中することが予想される。C. D. Mastersらによる石油と天然ガスの資源量評価¹⁾では、1994年の時点での石油の確認埋蔵量は1.1兆バレル、究極可採量は2.27兆バレルであり、人類は既に約1/4の石油資源を消費している。また、天然ガスについては、確認埋蔵量145兆m³、究極可採量は327兆m³となっており、既に約1/7の資源を消費している。その後、石油、天然ガスの新たな発見があったため、図-2のとおり現在の確認埋蔵量もほぼ同じであり、可採年数は石油が43年、天然ガスが62年である²⁾。

原子力発電の燃料であるウランについては、軽水炉でウラン235だけを利用し、使用済燃料をそのまま処分するワンスルー・サイクルでは、現在の確認埋蔵量で451万トン、可採年数は73年となっており、資源量としては石油や天然ガスとそれほど変わらない。このため、わが国ではウラン資源の有効利用を図ることを目的として、使用済燃料から回収されるプルトニウムの軽水炉や高速増殖炉（FBR）でのリサイクル利

用を目指している。

軽水炉でのプルトニウム・リサイクル（プルサーマル）を行うと、ウラン資源使用量を数10%程度節約できることになる。さらに、FBRでウラン238を効率的にプルトニウムに変えて有効に利用すると、ウラン資源は60~100倍有効に利用できるため、資源の枯渇を考えなくても良いことになる。

また、図に示されるのは鉱山から採掘されるウランであるが、海水中に微量溶けている海水ウランは鉱山で確認されているウラン量の1,000倍以上あるため、これが利用できるようになると、人類はほぼ無限のウラン資源を手に入れることになる。

新エネルギーも量的には無限であり、枯渇が心配されることはない。

2.2 エネルギー収支比

図-3は各種発電システムの正味エネルギー収支についてのライフサイクル分析を示す図である³⁾。つまり、一つのエネルギー、例えば太陽光発電であれば、それが製品として実際に発電に使われるまでのプロセスのすべて、すなわち原料の調達、発電用の機械の製作、プラントの建設、あるいは運転などにおいて投入された全エネルギー量に対する、発電される全エネルギー量の比を示すものである。これが大きいほど電源として効率的であるといえる。

図のように、石炭火力では発電のために投入されたエネルギーの20倍程度を生産することができるが、炭酸ガス回収を行なうと半分以下になる。LNG火力では、ガスの液化にエネルギーを使うため、エネルギー収支比は良くない。

太陽光に代表される新エネルギーのエネルギー収支比も、在来型については余り良くない。つまり、発電

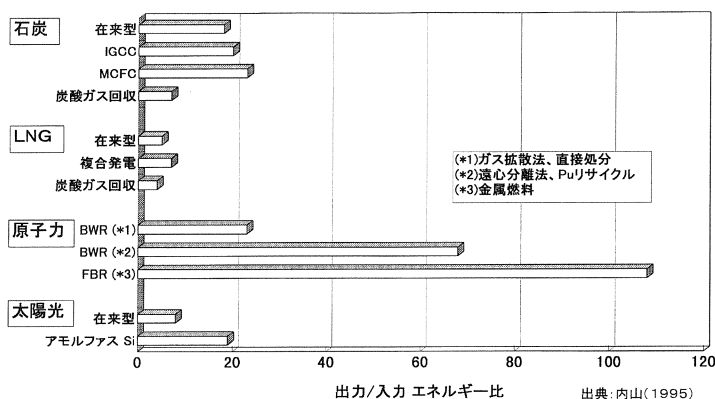


図-3 各種電源のエネルギー収支

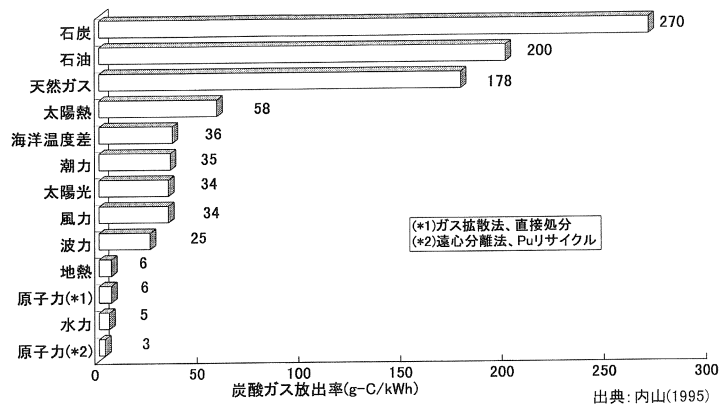


図-4 各種電源の炭酸ガス放出原単位

設備を作るのに使うエネルギーに比べて、それほど効率よく発電されていないということになる。アモルファス・シリコン素子の実用化など、新エネルギーにおいては、製造や発電の工程などにおける効率化・技術革新が必要であるといえる。

これに比べて、原子力発電はエネルギー収支が最も大きいことがわかる。ウラン濃縮に多くの電力エネルギーを必要とするガス拡散方式においても、発電のために投入されたエネルギーの20倍以上を生産することができる。遠心分離方式のウラン濃縮であれば60倍以上に、さらに濃縮ウランを必要としないFBRになれば100倍以上と飛躍的に増える。

2.3 炭酸ガスの排出量

図-4は図-3と同様のライフサイクル分析により、各種電源の単位発電量 (kWh) あたりの炭酸ガス排出量を示したものである³⁾。

石炭を燃料とする石炭火力発電が最も多くの炭酸ガスを出している。100万kWの石炭火力発電所は、年間220万トンの石炭を消費する。燃える部分(炭素)はその70%で、炭素が燃えると約4倍の重さの炭酸ガスになるので、560万トン位の炭酸ガスが出ることになる。石油を燃やす石油火力にしても、天然ガスを燃やすLNG火力にしても、炭酸ガスの排出の観点からは量の大小こそあれ同じようなことがいえる。

太陽光発電や風力発電などの新エネルギーは、発電時には温暖化ガスを排出しないが、設備を造るのに電力を多く使うことと、発電する電力量が少ないため、kWhあたりにすると結構多くの炭酸ガスが出ていることがわかる。

これに対して核分裂エネルギーを利用する原子力は、kWh当たりの炭酸ガスの排出が極めて少ない。原子

力が地球温暖化の防止に対して大変有効なエネルギーであることが分かる。

2.4 備蓄性

原子力は同重量の石油に比べて100万倍以上のエネルギーが取り出せるため、100万kWの発電所を年間運転するために必要な燃料はわずか30トン程度で済む。これに比べて火力発電所では燃料として、天然ガスで110万トン、石油で140万トン、石炭では220万トン必要である。

1970年代の二度にわたる石油危機の教訓から、現在わが国では国家備蓄として5,000万kl、民間備蓄としてほぼ同量の約4900万kl、合わせて国内需要の約170日分の石油を備蓄している(1998年2月)。これには大掛かりな設備と広いスペースに加えて年間約3,000億円の費用が必要である⁴⁾。また、石油のほかに液化石油ガス(LPガス)の備蓄も行われている。2010年度までに150万トンの備蓄が計画されており、それに必要な資金は2,000億円と試算されている⁵⁾。

これと比較して原子燃料は、石油に比べて発電という目的にしか使えないというデメリットはあるにしても、同じ電力量に対する備蓄量が石油の1/50,000で済むことは注目されるべきである。この結果、国内の原子燃料製造工程におけるランニングストック分だけで数年分の燃料備蓄に相当する量になる。つまり、原子力はエネルギー安全保障上からも有利という特長を備えているといえる。

2.5 新エネルギーの特徴

新エネルギーは、その潜在的に膨大なエネルギー量と地域的な偏在性が少ないことから、中長期的に化石燃料に代わって導入されるエネルギー源としての期待が高い。一方、エネルギー密度の低さ、供給の信頼性・

表1 各種電源のエネルギー密度の比較

対象	エネルギー密度		備考
	kWh/m ² /年	kW/m ²	
家庭電力需要	35	0.024	一戸建て2階(敷地165m ² , 契約40A)
事務所電力需要	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	緯度35度, 年設備利用率15%(設備価値50%)
風力発電	21	0.012	テハチャビウィンドファーム(7.7km ²), 275kW×340基, 年設備利用率20%(設備価値20%)
木材バイオマス発電	2	0.00032	ポプラプランテーション(6年サイクル), 100MW, 発電効率34%
石炭火力発電	9,560	1.6	碧南石炭火力発電所: 70万kW×3基, 敷地面積133.6万m ² (含貯炭場)
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%, 敷地面積420万m ²

出典: 内山(1997)

安定性の問題,あるいは相対的に資本コストの高いことなどから,21世紀初頭における市場への導入規模には制約がある。しかし,将来は技術革新や大量生産による経済性の達成,人々の環境への意識の変化等によって,その普及に拍車がかかるものと予想されている。

表1には,新エネルギーの代表的なものとして太陽光,風力,木材バイオマス発電を取り上げ,石炭火力,原子力発電とエネルギー供給密度の比較を示した⁶⁾。参考のために,家庭およびオフィスビルの敷地面積当たりの電力消費量を示す。太陽光や風力はエネルギー密度が20kWh/m²程度で,家庭の電力消費密度の2/3である。バイオマスでは更にその1/10となる。

一方,原子力や火力はエネルギー密度が高く,太陽光の500~600倍,バイオマスの5,000~6,000倍となっており,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事が分る。

自然エネルギーは希薄なエネルギー密度と少ない供給力と言う欠点とは別に,供給の信頼性・安定性の問題がある。間欠的なエネルギー源である自然エネルギーは全て自然任せであり,需要家が必要な時に電気が供給されるとは限らない。たとえば,太陽光発電の発電出力の時間的変化(出力曲線)と電力需要の負荷曲線はパターンが異なり,ある程度以上の規模で導入されると電源としての有効性が低下すること,夜や曇りの日には発電ができないため,わが国の比較的条件の良い場所でも年間を通すと15%ぐらいしか発電設備の利用率が期待できないこと,出力が安定しないため商業用電力系統への連携が難しいことなどから,わが国への太陽光発電の有効な導入量は最大でも総発電量の5%以下であると評価されている^{7) 8)}。

風力発電も設備利用率は20%程度といわれている。

以上のように,21世紀の膨大な電力需要を満たすことができる可能性があり,しかも温暖化ガスの排出量

が少ないエネルギー源としては新エネルギーと原子力への期待が大きいが,両者それぞれの特長があり適材を適所に使うという工夫が必要である。すなわち,太陽光や風力などの新エネルギーはコストが高いが,人口が密集していない地域では分散型エネルギーとして大きな役割を果たすと思われる。また,途上国,特にアジアでの急速な経済成長を支えるためには,原子力の相当大規模な導入が期待されることになる。

3. なぜ原子力を選択するのか

3.1 わが国のエネルギー資源としての原子力

(1) わが国の原子力政策

原子力委員会が設置され,最初の「原子力研究,開発及び利用に関する長期計画」(原子力長計)が策定された1956年ごろは,戦後のエネルギー不足の影響もあり,エネルギー自立という政策目標が重要視された。すなわち,1953年のアイゼンハウアー大統領の国連演説“Atoms for Peace”の呼びかけを積極的に受け入れ,原子燃料サイクルの国産化によりエネルギー自立を果たすことを目指して,原子力開発をエネルギー安全保障の最重要手段の一つとして選択した。

まず軽水炉を導入し,軽水炉の原子燃料サイクルすなわち,ウラン探鉱,ウラン濃縮,再処理の技術を確認する。これと併行して,プルトニウムを利用する新型転換炉(ATR)や高速増殖炉(FBR)を開発し,ウラン資源制約を無くすという考え方である。1956年の第1回原子力長計には,すでに熱中性子炉の導入に続いて,高速増殖炉とその原子燃料サイクルを自主開発することがうたわれている。以降,40年以上にわたり原子燃料サイクルを前提とした原子力の積極的な推進というこの考え方を基本的に継続している。この一貫した政策により,わが国の原子力の研究開発や産業は大きな発展を遂げ,世界の原子力最先進国の一つとして,いまや全電力の約1/3を原子力発電でまかな

うまでになり、わが国の経済成長を支えている。

(2) エネルギー安全保障と原子力

過去、グローバル規模で石油危機が起こったのは、1973年、1979年、それに1990年の3度である。これらの危機は、中東への過度な石油供給依存が不穏な国際情勢と結びついたことによっている。この危機の教訓から、様々なエネルギー安全保障策がとられるようになった。一方、北海を始め多様な石油供給源が採算性を持つようになり、1980年代初めには石油が再び市場で取り引きされるようになったことから、エネルギー安全保障の確立という意識は薄れ、エネルギーについても市場メカニズムにまかせようという動きが強くなってきている。

しかし、中東湾岸産油国には、世界の確認可採埋蔵量約1兆バレルの66%が存在するが、その年間生産割合は現在世界の30%に過ぎないことから⁹⁾、世界の石油供給の中東依存が今後継続的に高まり、2010年には石油危機が発生した時のように再び50%を越えると予想されている。

石油危機の発生した1970年代においては、原子力は石油代替電源の切り札的存在であった。この後の原子力発電の伸びは著しく、1971年には世界の発電量の2%ほどであったが、1998年には18%にまで上昇している。その供給力は、石炭だと10億トン相当、石油だとサウジアラビアの生産量に対応する規模となっており、供給の多様化と石油市場への圧力の軽減に寄与している。このように、エネルギー安全保障の観点から、大規模な非化石エネルギー源としての原子力の重要性は論をまたない。

(3) 地球温暖化と原子力

平成9年12月に京都で開催されたCOP-3では、先進諸国の温暖化ガスの削減目標が決められ、わが国は1990年のレベルに比べて2008～2012年までに6%削減することになった。省エネルギーやエネルギー利用の高効率化が進んでいるわが国では、この削減目標は達成が極めて難しいと言われており、エネルギー政策に大きな影響を与えずにはいられないものである。

総合エネルギー調査会・需給部会中間報告¹⁰⁾では、更なる省エネルギー対策の推進やエネルギー利用の高効率化、新エネルギーの導入などに取り組む方針であり、特に、温室効果ガスを排出しない原子力発電は極めて有効な対策として、2010年までに発電容量を6,600～7,000万kWまで増設する目標が立てられている。このためには、およそ20基の原子力発電所の新增設が必

要となる。

COP-1からCOP-3の会議を通じて、地球温暖化対策としての原子力エネルギーの評価は、各国の政府および非政府組織(NGO)の利害がからむことから、本会議では政治的な理由で議論を避けてきたのが現実である。しかし、今後の途上国の膨大なエネルギー需要を満たすためには、現実的なエネルギー源としての原子力の評価は必要不可欠と考えられる。

3.2 アジアのエネルギー資源としての原子力

(1) アジアの電力需要と原子力

1980年代に入って以来、近隣アジア地域は著しい経済発展を遂げたが、1997年のタイにおける通貨危機をきっかけに、各国で経済混乱が拡大し、ここ数年は経済発展の停滞が予想されている。しかし、この地域は中・長期的には依然として高い成長ポテンシャルを有しており、世界経済の持続的成長に対する牽引車の役割を果たしてゆくものと期待されている。この経済発展を支え、生活向上をはかるためのエネルギー・電力需要の伸びは著しく、電力需要はかなり長期に年間5%を上回るものと予想される。その需要を満たす上で、地球環境保全の観点、およびエネルギー源の多様化というエネルギー安全保障の観点から、原子力開発の利用・拡大への機運は高い。

原子力発電は既に韓国、台湾では電力供給の30～40%程度を占めている。また、中国では3基、インドでは10基が運転中であるが、その電力供給全体に占める割合は数%以下と小さい。しかし、いずれの国も今後の拡大が計画されており、日本を除くアジア地域の原子力発電規模は、2010年後早々には5,000万kWを超え、日本に並ぶ規模になると予想されている。

(2) アジアの化石燃料資源

このような原子力への関心の高さはアジア地域の化石燃料資源の少なさによっている。

図-5に示すように石油、天然ガス、石炭の確認埋蔵量を地域別に比較すると、アジアの化石燃料資源量は豊富とは言えない。特に、一人あたりの資源量を見ると極端な非資源地域である事がわかる。使い勝手がよい石油、天然ガスは世界の最貧資源地域である。石炭は大産出国であるオセアニア(オーストラリア)を含めているが、それでも欧米に比べると相当少ない。

アジア地域の石油の域外依存度は2010年には70%に達するものと予想されており、エネルギー安全保障への対応策の策定はアジア地域全体の課題である。将来、適切なエネルギー確保策を講じなければ、アジア地域

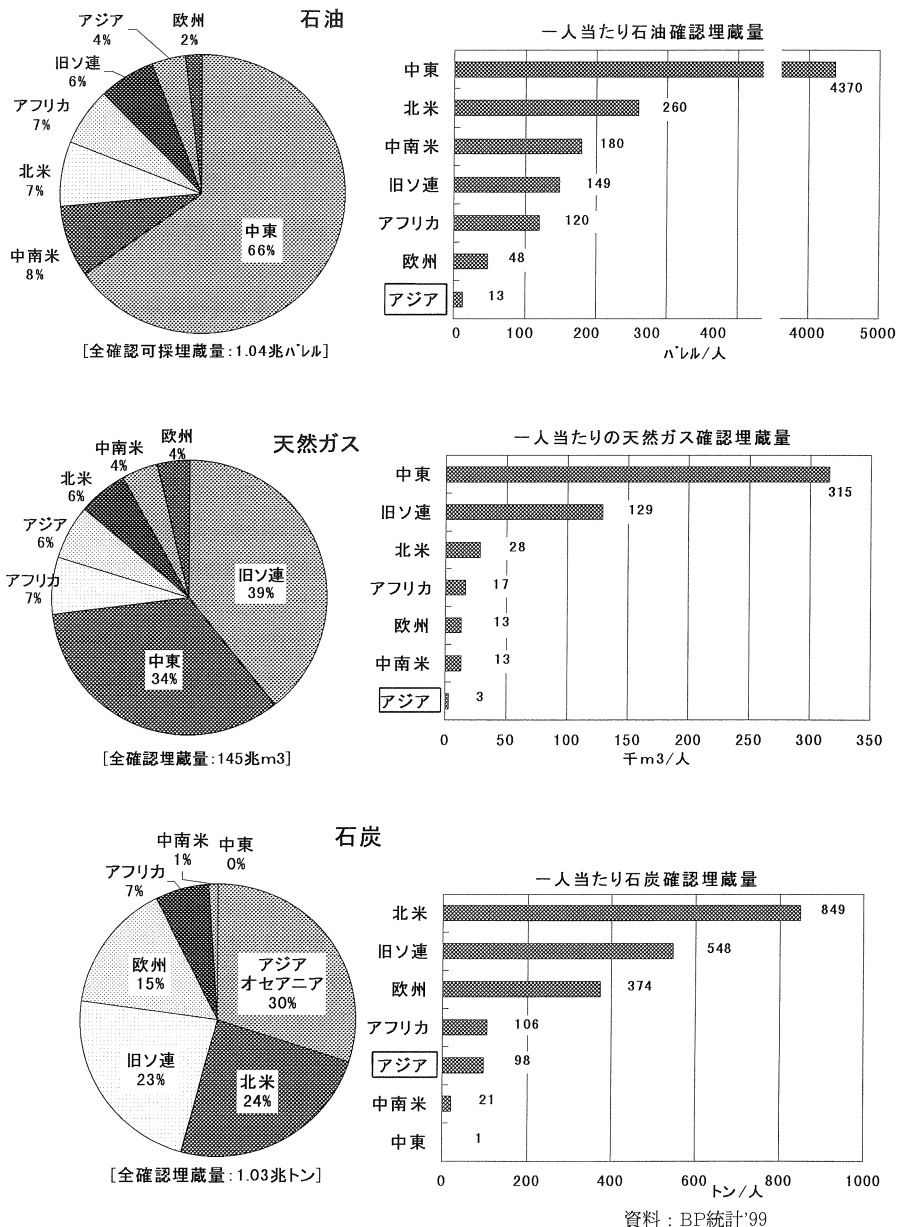


図-5 地域別に見た化石燃料の確認資源量

におけるエネルギー争奪から国際紛争にまで発展する可能性が指摘されている¹⁰⁾。

(3) アジアのエネルギー安全保障と原子力

アジア地域への原子力の導入は、「地球温暖化の防止」、「経済成長の達成」、「膨大なエネルギー・資源の供給」の同時達成というトリレンマ問題の解決に大きく寄与するものと考えられる。その結果、将来中東において不安定性が発生した場合に予想される、アジア地域のエネルギー安全保障への影響の緩和にも貢献す

ることになる。

原子力は先進国で開発された技術であり、途上国が導入を決めたとしても簡単に手に入れられる技術ではないため、教育や訓練を含む途上国のインフラ整備に協力できる体制作りが求められる。したがって、アジアにおける原子力協力のためのメカニズム作りも、わが国のエネルギー安全保障を確立するための政策の一環として進めることが必要である。

このように、わが国のエネルギー安全保障に密接な

関係があるアジア地域のエネルギー安全保障への対応と、地球温暖化防止に対して原子力が果たす役割は極めて大きい。このためアジアの国々、たとえば中国や韓国がFBRによるプルトニウム利用も視野の中に入れて、原子力の開発に積極的に取り組んでいるのは必然の国家戦略であるといえる。

4. まとめ

1998年末において33ヶ国で422基、3.6億kWの発電用原子炉が運転され、既に世界の全発電量の約18%が原子力に頼っている。その中にはロシアやフランスのように3/4以上の電力を原子力に頼っている国もある。わが国は約1/3の電力を原子力でまかなっている。このように既に原子力は先進諸国では主要電源の一つとなっているのに加えて、原子力の導入により石油や天然ガスなど、化石燃料全体の価格が高騰するのを抑えている事実も評価されるべきである。

以上述べたように、人類は原子力によって量的、質的、環境的に満足できるエネルギーを入手できることが期待されるが、そのためには今後以下のような課題を解決する必要がある。

①安全性への不安、技術への不信、放射性廃棄物問題などを解決し、原子力に対する社会の信頼と合意を得ること

- ②規制緩和によるエネルギー市場のオープン化に対応して原子力発電の経済性向上を図ること
- ③原子力エネルギーの平和利用を続けるうえでの最大の政治的な課題である核不拡散問題を制度的、技術的に解決していくこと

参考文献

- 1) C. D. Masters et. al., "World Petroleum Assessment and Analysis", Proc. 14th WPC, Stavanger (1994)
- 2) Oil & Gas Journal, Dec. 28, 1889
- 3) 内山洋司「発電システムのライフサイクル分析」電力中央研究所研究報告Y94009 (平成7年3月)
- 4) 藤「石油備蓄が抱える課題」ENERGY, Vol.32, No.3 (March 1999)
- 5) 吉田「LPガス備蓄と需給状況」同上
- 6) 内山洋司「原子力なくして未来はあるのか—21世紀の人類文明をにらんで展望する—」エネルギーレビュー第17巻・第1号 (平成9年1月)
- 7) 中央電力協議会「太陽光発電の評価」第87回原子力委員会資料第2号 (平成8年9月13日)
- 8) 今村, 内山「太陽光発電システムの普及展望」研究報告RY96002, 電力経済研究, No.36, (1996年7月)
- 9) エネルギー経済研究所「エネルギー・経済統計要覧'99」省エネルギーセンター (平成11年1月)
- 10) 総合エネルギー調査会・需給部会中間報告所 (平成10年6月11日)
- 11) ケント・E・カルダー「アジア危機の構図—エネルギー・安全保障問題の死角—」日本経済新聞社 (1996)

公 募

「東京大学生産技術研究所教官候補者」

1. 公募人員：教授1名
2. 所 属：生産技術研究所・第二部
3. 専門分野：生産システム学または
環境保全機器学
4. 研究・業務内容：
FA, CAD/CAM, CIM, FMS, 物流工学, メンテナンスなどの生産システムに係わる研究, あるいは廃棄物処理技術, 水質汚濁防止技術, 大気汚染防止技術などの環境保全機器に係わる研究。
5. 応募資格：博士の学位を有し, 上記のいずれかの専門分野の研究・教育に十分な熱意と業績を有し, 大学の運営と学生指導に十分な日本語能力を有する
50才前後の方。
6. 着任時期：平成12年4月1日 (予定)
7. 応募締切：平成11年9月末日 (必着)
8. 提出書類：
 - (1)上記の専門分野におけるこれまでの研究内容および今後の研究計画の概要 (4000字程度)……………2部
 - (2)履歴書……………2部
 - (3)業績リスト……………2部
9. 書類提出先および問い合わせ先：
〒106-8558 東京都港区六本木7-22-1
東京大学 生産技術研究所 第二部
主任教授 都井 裕
Tel 03-3402-6231 内線2210
Fax 03-3479-2761