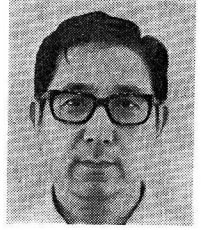


論 説

原子力開発の最近の動向

Recent Status of Nuclear Power Development



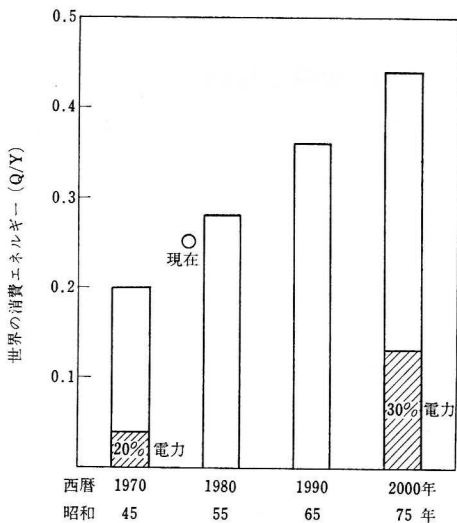
高温構造安全技術研究組合

藤村 理人 (TADATO FUJIMURA)

1. エネルギー開発の長期展望

「原子力は化石燃料にとって代って、エネルギー需給の担い手になる」との予測は、巷間に喧伝され過ぎているようである。石油、石炭、天然ガスなどの化石燃料が原子力に主座を譲るのは、かなり遠い将来の予測であって、われわれが取組まなければならない問題は、その前段、すなわち現在の数%エネルギー占有率である原子力をいかに他のエネルギー源と比肩し得る安定なエネルギー源に育て上げるかにある。

種々の参考資料をもとに著者が西暦1970~2000年の世界のエネルギー需要状態をまとめると図1のようになる。1970年に世界で消費した年間エネルギー量は0.2Q*



$$Q = 10^{18} \text{ Btu} = 3 \times 10^{14} \text{ kWh}$$

図1 世界の年間エネルギーの消費の増加傾向

といわれているが、30年後の2000年には2倍の0.4Qのエネルギーを消費することになる。このうち電力消費は1970年に20%、2000年には30%と考えるとそれぞれ40mQ、130mQが電力エネルギーとして消費されることになる。

以上が世界のエネルギー需給であるが、それでは日本の場合をみてみよう。図2に示すように、1970年に1次

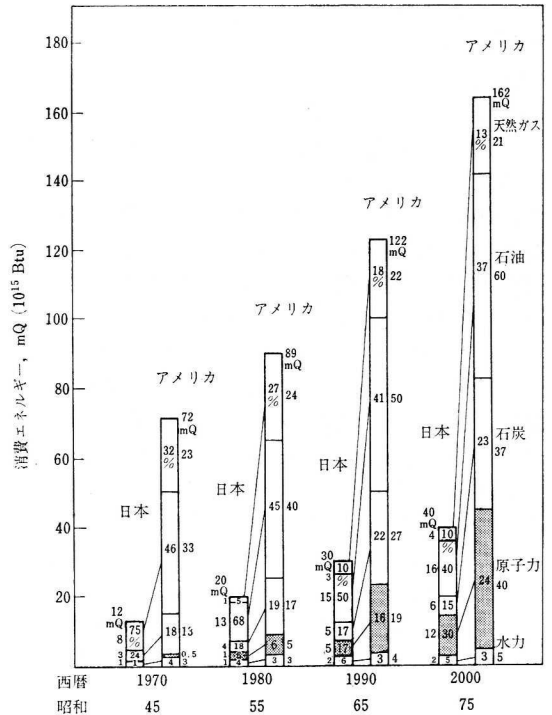


図2 日本とアメリカのエネルギー消費の実態

* Q: Q というエネルギー単位は大量のエネルギー、すなわちエネルギー問題を論ずるときに使用される。

$$1Q = 10^{18} \text{ Btu} = 3 \times 10^{14} \text{ kWh}$$

原稿受付日: 昭和52年5月30日

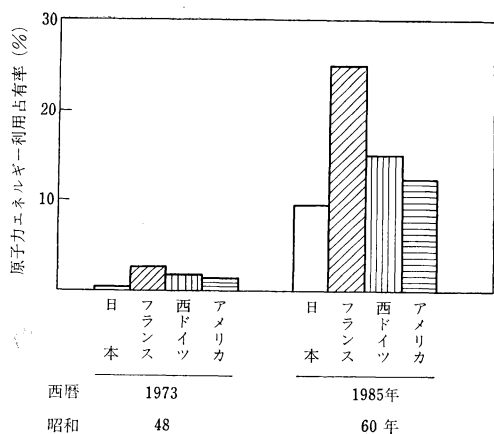


図3 各国の原子力エネルギー利用が全1次消費エネルギーに占める割合

エネルギーを12mQ消費した。世界の消費量の6%である。因みにアメリカのエネルギー消費は72mQで、日本の6倍、世界の消費量の36%にあたる。2000年においては日本は1970年の3.3倍の40mQを消費し、世界消費の9%のエネルギー消費を占有することが考えられる。

これらの1次エネルギー消費の傾向において、問題はあるどのような種類のエネルギーによってまかなうかを分析する必要がある。

1970年において、アメリカでも原子力発電量は0に等しかったが、1973年には3%を占め、1980年には全エネルギー需給の6%を占めることになる。日本は同時点で全消費エネルギーの5%を占めるようになる。1985年(昭和60年)に日本では4900万KWeの原子力発電設備をもつまでに原子力を成長させねばならないということが国策的によくいわれている*が、4900万KWeの発電設備で1.5mQのエネルギー消費をまかなおうということで、それは同年の1次エネルギーの9%をまかなう計画である。他国ではどのような状態であるかを比較すれば図3のようになり、先進国のなかで日本は低位にある。現在の日本は石油依存度が大きく、原子力とそれに加えてLNGの利用が先進国のなかで小さい比率を占めている。日本がエネルギー問題において今後開発を必要とするのは原子力、LNG、石炭の液化、ガス化利用技術であることは歴然としている。

しかしながら、LNGは、資源的に3Q相当量しかないと考えられ、地球においては天然ウラン資源量と等量であって、これも、世界が現状のように利用していけば、2000年には枯渇することが必然的で石油の埋蔵量にも及ばない。石炭の液化、ガス化技術はこれからスタートする開発技術であるが、原子力技術開発に相当する多

額の研究投資を必要とする。日本ではサンシャイン計画のなかに組入れられているが、余程努力しないと2000年前後のエネルギー消費を大きくまかなう技術に成長することは困難であろう。原子力技術と同様、アメリカで成長した技術を輸入することになりはしないか。

このような観点に立てば、2000年前後のエネルギー事情がいかに困難になるか明確である。かつて石油が低廉な時代においてエネルギーをすべて石油中心にまかなえばよいとする展望があった。農家のかまどまで石油コンロにおきかえられたのがそれを象徴している。しかしアメリカの需要と日本の需要ののびが余りにも著しく、その需要に、中東石油の生産が追いつけず、日米石油戦争が必至であろうとの観測がなされた。1973年頃より、石油価格の高騰を呼び、石油消費にブレーキがかかってきた。このため、日本において、過度の石油依存の誤りが指摘され、エネルギーの多角的利用を唱えられるに至ったが、日本のエネルギー利用技術開発は遅々として進展していない。

アメリカがカーター政権を出現させ、原子力技術開発を低位に抑制する方針が出れば、日本も追従するかのようになり縮してしまう。そして原子力発電所の建設はくれ、火力発電所の建設が進められている。石油価格は埋蔵量の見極めがついてくればくる程、高騰することは目に見えているが、それは経済原理の当然の帰結であろう。

現在、日本が世界で最高の電力料金となっていることを認識すれば、価格の低廉な原子力エネルギー利用に大きく依存しなければ電気エネルギー価格を抑えることができなくなることは明らかであろう。

2. 原子力開発の動向

日本が原子力開発をエネルギー開発の重点に捉えなければならぬことは前述の展開でおわかり頂けたと思う。

それではどのような原子力開発方策が考えられるであろうか。

原子力エネルギー開発の第一歩は、1945年に不幸にも広島長崎における原子爆弾の投下に始まった。全世界は第2次世界大戦の終結をもたらしたあのエネルギーの大きさと放射能の恐怖をみせつけられたのである。

とりわけ日本は肌身をもって原子力の恐威を知ったのであった。

アメリカは原子爆弾の製造責任者としての責任からか平和利用は急がなかった。イギリスはガス冷却炉を開発することで原子力発電所第1号コールダー・ホール型原子力発電所が稼働したのは1956年(昭和31年)であった。それはアメリカのPWR 第1号炉 Shippingport 炉

* 現在はこの目標は3000万KWeまで低下している。

電所が臨界に達した1957年の1年余前のことであった。それよりほぼ10年間、イギリスのガス冷却炉の主導が目立った。日本においてはその影響をうけ、日本原子力発電(株)が導入した発電炉もガス冷却炉(東海1号炉)で、運転開始は1965年(昭和40年)であり、この炉は現在でも順調に運転を続けている。

アメリカはおくれを取りもどすことに努力し、微濃縮ウランを使用した軽水炉を開発し、現在では熱中性子炉の原子力発電所である限り、軽水型発電炉が定着化するようになった。日本はイギリスに比べてアメリカの実績の低いことを理由として、試験炉としてBWRを日本原子力研究所に導入した。運転開始は1963年(昭和38年)で東海1号炉の運転開始より2年早かったが、軽水炉の建設技術の未熟なことなどがあって、運転実績は全くあがらないままに今日に至っている。

しかしながら、世界のすう勢は1960年代において、ガス冷却発電炉より軽水冷却発電炉の方が経済性が高いことが明らかになった。とくにアメリカにおいて、オイスター・クリーク(BWR)発電所の経済性解析が詳細にコンピューターで計算され、火力発電より経済性が高いことが明らかになると、日本でも各電力会社が競って軽水炉を導入し、原子力発電所の建設ラッシュ時代を迎え、現在図4にみられるように運転されている。その後オイルショックを迎え、また原子力発電所の安全性技術につ

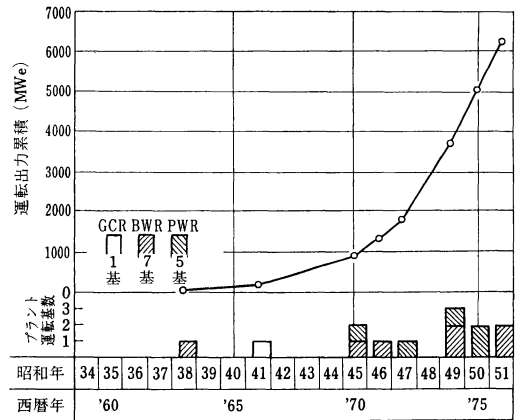


図4 日本における原子力発電の運転情勢

いて反省時代となる。昭和51年には原子力発電所の着工は全くなく、その前年より停滞の時期に入った。しかしエネルギー事情を考慮すれば大局的において今年より着工しなければならないことは明らかとなっている。

3. 原子炉型の多様化

原子力発電所は、前述のように、ガス冷却炉(GCR)の開発が先行し、軽水炉がすぐその後を追うようにして軽水炉(LWR)が加圧水型(PWR)と沸騰水型(BWR)にわかれて開発された。図5に各炉のシステムを示す。

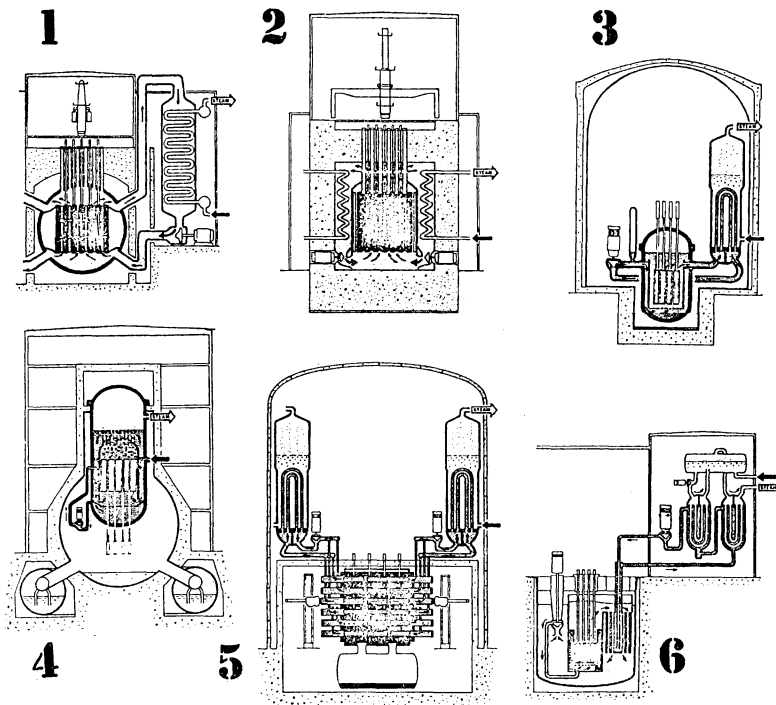


図5 動力炉の型式 (Nuclear Eng. Intern, Sep. 1973 より)

1. マグノツクス型ガス冷却炉 (GCR)
2. 改良型ガス冷却炉 (AGR)
3. 加圧水型軽水炉 (PWR)
4. 沸騰水型軽水炉 (BWR)
5. 加圧水型重水炉 (PHR)
6. 液体金属高速増殖炉 (LMFBR)

GCR はイギリスが開発してイギリスとフランスで発達した。この型式の炉の特色は、マグノックス被覆天然金属ウラン燃料を使用する。このため、軽水炉 (LWR) がジルカロイ被覆微濃縮セラミック・ウランを使用するのと著しく異なる。

前者の GCR は燃料コストは低くなるが炉心が大きくなり、核熱設計が困難となるとともに、大型圧力容器が必要となり、鋼製圧力容器の限界を生じ、プリストレス・コンクリート圧力容器 (PCPV) が出現することになる。

LWR は GCR より小型に設計され、熱効率がよく、建設資本費が小さく経済性において優位となった。GCR は LWR の経済性に対抗するためには、ガス冷却温度をあげて熱効率をあげる方法で、改良ガス冷却炉 (AGR) がイギリスで開発されており、冷却材のガスは炭酸ガスをヘリウムにかえた。しかし機器コンポーネントのトラブルが続ぎ、未だ順調な定常運転に入っていない。

このような状態のなかで、ドイツは LWR のうち、PWR がもっとも優れているとの判断に立ち、ドイツ型 PWR の開発に力を入れている。

このようにしてガス冷却炉と軽水冷却炉が熱中性子炉型として、過去20年の開発歴史を有し、最近ようやくエネルギープラントとして定着しつつあるといえよう。熱中性子炉というのは、天然ウラン中にわずかに 0.7% 存在する同位元素ウラン 235 に熱中性子を衝突させて核分裂をおこさせ、連鎖反応によってエネルギーを発生させ、原子炉 1 次冷却材によって熱エネルギーを取出すプラント・システムである。天然ウランをそのまま核燃料に使用すれば、わずか 0.7% の U の利用のため、大量の天然ウランが必要となり、エネルギーの出力密度が低下して炉心構造が大きくなる。この不経済を解決するため、経済性に見合う程度に、 U^{235} を 3% に濃縮した状態で核燃料とするいわゆるウラン濃縮プラントが建設され、LWR はこの微濃縮ウランを専ら使用しており、従来の GCR が天然ウランを使用しているのに比較して、出力密度が高く、経済性において LWR は GCR を凌駕することになった。

ウラン濃縮プラントはアメリカにおいて独占的に建設、稼動され、濃縮ウランは世界各国ともにアメリカより輸入する以外に方法がなかった。このことは原子力エネルギーのアメリカ支配に連がることを示している。このような状態を脱却するため、ヨーロッパでも、日本でも自国でウラン濃縮プラントを持とうとする努力がここ 5 年間で進展している。アメリカが開発したウランの拡散濃縮法は多大の電力を要することから、ヨーロッパ、日本は遠心濃縮法の開発を展開している。しかしながら、ウラン濃縮プラントは原子力プラントのなかで資金

がもっとも多額に必要とするため、国家資金がどの程度投入できるかにその成功の鍵がかかっているといえよう。

しかしながら、ウラン資源も U^{235} 利用のみを考えるならば、世界にそれ程多いわけではない。現在埋蔵量は 2 Q 程度であろうと考えられている。その量は LNG とほぼ匹敵している。前述のように現在の世界のエネルギー消費量が 0.2Q であるから、原子力エネルギーのみでこの消費を負担すれば 10 年で枯渇する量である。現在の原子力エネルギー利用計画において 2000 年では枯渇するような資源量である。

ここに高速中性子炉を開発しなければならない理由がある。高速中性子炉 (FBR) の核燃料は熱中性子炉において、 U^{238} を Pu^{239} に転換してつくられる。その量は天然ウランの U^{238} が U^{235} に比べて 100 倍以上の存在比があることから、さらに高速炉の増殖システムを考えれば 1000Q のエネルギー資源が期待できる。このように考えて 21 世紀のエネルギーは高速炉でまかなうことができることになる。ここまでは高速炉開発の大義名分であるが、しかし忘れてはならないのは Pu の毒性である。U は使用前に人間が近寄れる程度の毒性であるが、Pu はきわめて毒性が強く数 g を人間が吸収することによって致死量となる。ここに Pu の管理が、大げさのようだが人類社会の破滅に結びつき得る恐怖がある。核拡散防止の基本的な思想基盤が Pu の管理に根ざしていることを認識しなければならない。

Pu は熱中性子炉の運転によって得られるのであるから、現在の発電炉を動かさない限り、Pu 製造はできない。原子力を準国産エネルギーと称するのは、ウラン資源のない日本が、例え濃縮ウランを輸入しても、発電炉で燃やした後、日本がプルトニウム燃料をもち、高速増殖炉を稼動せしめることによってはじめて準国産エネルギーを確保したことになる。現在のように、日本は住民パワーによって熱中性子発電炉の稼動を抑制してしまえば、プルトニウムは蓄積されないし、また、1990 年以降の高速増殖炉時代において、プルトニウム燃料も輸入ということになればとても原子力は準国産エネルギーとはいえない。

そこで、日本が熱中性子炉時代より高速炉時代に移行させなければならないのは 1990 年ごろであるというのが著者の主張である。一般には 2000 年以後になろうとする悲観的観測が行われている。ここに 10 年のくい違いがある。しかしここ 10 年は重大である。

確かに、熱中性子炉時代より高速炉時代に移行するためには、国内の再処理プラントが順調に移動していなければならない。ところがわが国では、原子炉開発プロジ

ェクトの華々しさに比較すれば再処理プラントの開発意欲はそれ程ではなかった。

熱中性子炉すなわち現在の軽水炉の運転の定着が第1第2は再処理プラントの稼働への努力、第3が高速炉開発そして核融合開発へと進展すべき開発路線を、日本において往々取り違えられている。

このような開発基本姿勢は日本の工業力を基盤にして、日本のエネルギー自立を希求する考え方であるが、一方日本は資金のみを準備し、アメリカ依存のエネルギー政策の推進を唱える一派がある。この一派はアメリカの原子力開発に全く依存し、核燃料の供給から、プラント建設、再処理、高速炉開発までアメリカ従属的に考えている。確かに大型プロジェクトの推進の拙劣な日本は、無駄な開発投資は眼を覆うばかりであって、一向に焦点が定まらない。アメリカの開発に従属した方が効率的であり、アメリカ技術を応用することによる模倣改良技術が経済繁栄をもたらすかもしれない。

しかし日本には日本の独得の風土とナショナルリズムがある。アメリカのカーター政権の出現で、原子力スローダウン政策が唱えられると日本がそれに追従して、果して、日本のエネルギーが確保されるだろうか。日本こそ世界に先駆けて原子力エネルギー依存度を高くしないとエネルギー自給態勢がとり得ないのではなからうか。

ここに日本における軽水炉→高速炉開発路線において、重水炉バイパス開発を入れるかどうかの議論がおきている。重水炉は主としてカナダで開発され現在に至っている。日本では動燃事業団が ATR という重水炉を開発している。

重水炉は軽水炉が＜濃縮ウラン－軽水＞の組合せであるのに対して、重水炉は＜天然ウラン－重水＞の組合せである。簡単にいえば、燃料を濃縮して経済性を高めるか、減速材の軽水を濃縮して経済性を高めるかという炉構成上の違いである。アメリカは前者をとり、カナダは後者をとった。しかし現在において、重水炉を見なおす動きは、アメリカ以外の国でも進んでいる。前述のように Pu を蓄積したものが Pu 燃料の価格すなわち、原子力エネルギー・コストを支配することになる。このことが Pu バーナーとしての重水炉の役割の見なおしである。濃縮ウランは1980年より供給不足になることが予想されている。それは濃縮ウラン製造プラントの容量が、世界の熱中性子炉需要量を下廻ることが想定されるからである。そのときアメリカが濃縮ウランの価格を決定することができ、アメリカ以外の国は高くてもアメリカより濃縮ウランを輸入しなければならない。

そのような事態をさけるため、天然ウランを燃やし、Pu が多量生産できる重水炉は魅力的である。この場

合、別なトリウムサイクルも考えられるので、新しい原子燃料資源が得られる増殖サイクルとなり得る。第2に高速炉時代が2010年以降にのびたときのつなぎとして有効であると考えられている。

最後に高温ガス炉に触れなければならない。ガス冷却炉はイギリス、フランスで多く稼働した。しかし大型炉において経済性を高めるためには、軽水炉の方が優れている。このような熱中性子ガス炉は低温（300℃以下）の運転である。熱効率を高めるためには、600℃程度にガス温度を高める必要があり、イギリスで改良ガス冷却炉 AGR が開発されたがトラブルが多く定常稼働にならない。イギリスは重水炉を模さくし、高速炉へつなげている。フランスは高速炉を開発し、ガス炉→高速炉路線では世界のトップをきっている。しかし、高速炉の実用化のおくれ、それは主として開発資金調達にからむものであるが、熱中性子炉時代が予想より長期化することを考えて軽水炉の建設が組込まれつつある。

西ドイツはおくれて出発した原子力開発を軽水炉でとりもどし、高速炉へつなげ、そしてプロセス・ヒートとしての高温ガス炉（HTGR）を考えている。HTGRは軽水炉との競争において、出力密度を上げるため、850℃以上の温度を必要とする日本における多目的高温ガス炉は、プロセス・ヒートを含めた、いわゆる多角的利用、すなわち原子力製鉄を始め、数多くの工業分野において原子力エネルギーを応用しようとするものであって、日本のような石油依存の高い国において至当なプロジェクトであるが、いきなり 1000℃ の高温ガス炉を目論んだところに飛躍があり過ぎている。

このように多様化した原子力開発において日本のエネルギーまたは工業政策の特殊性のなかにあってどのような具体的原子力開発方法が見出されるであろうか。

4. 3 基プラント・システムの提案

わが国の開発指標を具体的に実現する方法について一つの提案を試みたい。

原子力エネルギーは2000年において石油消費を抑制し、エネルギーの需給増分をまかなうことになる見通しだが、同時点におけるわが国の原子力発電需給量は、年間3兆 KWh に達することが予想される。この時点で必要なわが国の原子力発電設備容量は3億 KWe となることが考えられ、現在のほぼ40倍の原子力発電設備容量となるであろう。そのうち高速増殖炉発電がどのような位置を占めるかが大きな課題となる。

2000年においてわが国が10%を高速炉でまかなうとすれば、100万 KWe 級発電所が30プラント稼働しなければならない。同様に軽水炉も100万 KWe 級発電所が300プ

年	第1年												第2年											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
プラ ン ト	定検												定検											
							定検												定検					

図 6 3基プラント・システムの運転パターン

ラント稼動している想定となる。ここに原子力プラント大型化の課題がある。アメリカにおいては100万 KW 級原子力プラントが標準化されつつあり、西ドイツにおいても130万 KW 級のプラントを建設している。わが国においても80万 KW 級と110万 KW 級を、後者に重点をおきながら標準化して建設することが検討されている。

しかしこの大型化の傾向には重大な難点がある。エネルギー需給の見通しと設備計画の、いわばマクロの観点から算定した規模と、個別プラントのスケール・メリット追求が合致した結果が大型化の要請であるが、プラントを支える技術問題が二の次となっていることが危惧されるところである。著者は指向されている100万 KW 級プラントは技術的課題から大き過ぎると考え、50万KW×3 基の原子力プラント・システムを提案するものである。

「大型化することはよいことだ」とした、巨大プラントの建設は反省期に到達している。「現在と近い将来における適性規模がある」とするのが識者の認識となってきた。

その理由の第1は世界のエネルギー需給が加速度的に増加した時期は過ぎ、石油価格の暴騰によって、代替エネルギーが確保されるまではエネルギーの節約を進める必要があること。第2は公害および熱汚染の対応技術および想定事故対策が確立するまで、大型プラントの建設を抑制することが望ましいとする反省。第3は現在の工業技術水準とプラントの健全性の関連である。すなわちプラントの巨大化は設計技術の開発を前提とする。とくに大型構造に使用する材料の大型化と巨大構造の製造技術、試験検査法を解決しないでプラントの健全性を保証することはできない。これらがプラントの大型化を制限する要素である。

これらの要素を検討しないで、徒らにプラントを大型化することが経済性を高めると考えるのは早計である。机上の計算による経済性はプラントの健全性の低下による運転稼動率の低下を考慮していない。

それでは適正規模の原子力発電プラントの大きさはど

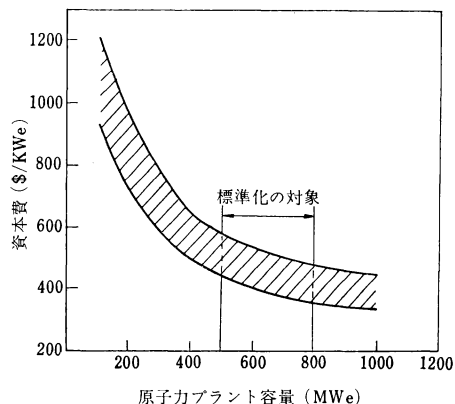


図 7 軽水動力炉の建設費 (IAEA 報告 No.164 (1975) より)

こにあるのであろうか。総合的な評価が適確に行なわなければならないが、プラントの健全性の観点からみれば、電気出力50~80万 KW の規模ではないだろうか。100万 KW 級プラントは大き過ぎると思われる。

次に現在の原子力プラントのように安全防護設備がぼう大になれば、プラントのバランスを失ない、定常運転の機能に障害を及ぼすことになる。安全防護設備はプラントの寿命中に一回作動するかどうかといった低い作動確率の設備であるから、維持に大変な努力を必要とする。「動かさない設備がもっとも傷む」のたとえがある。このような作動確率の低い安全防護設備は3基のプラントで共有してはどうかというのが3基原子力プラント・システムの考え方であり、たとえば50万 KW×3 基というプラント構想である。

この構想によれば、1基は3ヶ月のオーバーホール期間をもたせて、年間平均75%の稼動率を確保できる。

また図6に示すように、夏期需要期は100%稼動を見込むことができる。このように運転に余裕をとれば十分な点検が可能であり、安定した電力供給と排熱利用が可能であろう。加えて図7にみられるように、50万 KWe以上の大型炉では建設コストはそれ程差がないのが現状である。3基原子力プラント・システムの長所をまとめれば次のような点にある。

- (1) 安全防護設備などを共有して有効に運転することができる。
- (2) 運転員はすべて3基を同時に運転することができる。
- (3) 夏期需要期は100%稼動として安定した出力運転が可能である。
- (4) 定期検査に十分な時間と余裕をとるとともに、保守要員を遊休させずにすむ。

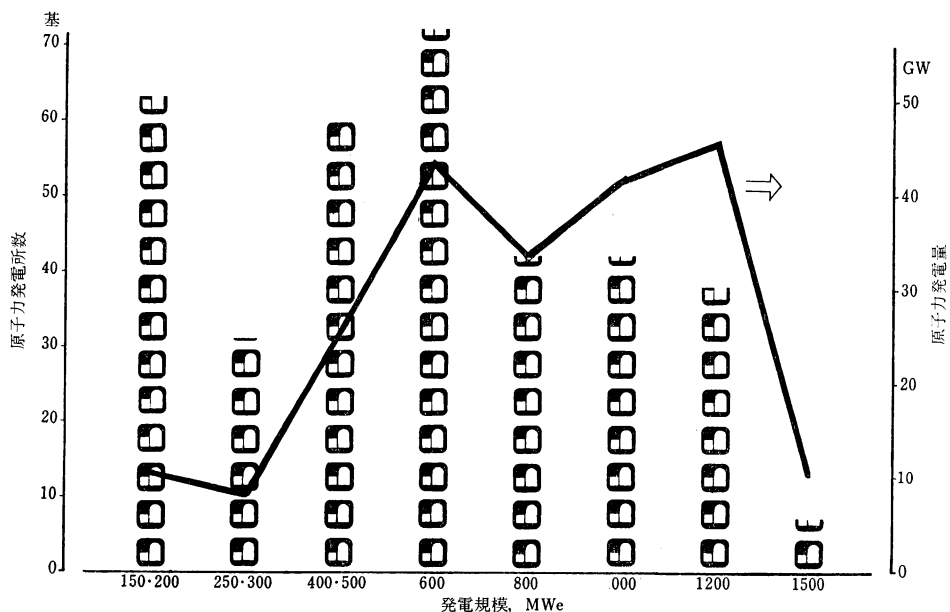


図 8 開発途上国の原子力発電所建設予定数、発電量 (1981～1990年)

- (5) 予備機器を共有すれば、必要最少限の予備で足りる。
- (6) 排熱を安定して利用することができる。
- (7) 機器の標準化が容易となり、研究開発費を低減できる。
- (8) 機器の健全性を高め、安全性が高い原子力プラント・システムとなる。
- (9) 大型生産工場は不要となり、安定生産が可能となる。

IAEA の統計によれば、図 8 に示すように開発途上国は 60 万 KWe 級の原子力発電所をもっとも多く要求しており、発電プラント・ユニットを 50 万 KWe にしておくことは原子力プラントの輸出面からも有利である。

しかしこのような利点ばかりでなく解決しなければならない課題もいくつかある。その第 1 は格納容器の設計について設計思想を変えなければならないこと。第 2 に機器配置の問題などである。しかしながらこれらの課題の解決は技術的にそれ程困難とは考えられない。

造船、溶接技術において独自の技術的地位を世界で築いてきた日本が、原子力技術だけは輸入技術としておくれをとっている。原子力開発 20 年の今日において、独自のプラントシステム設計を考えてもよい時期に到達していると考えられる。

6. 結言

西暦 2000 年における、わが国のエネルギー情勢は、世

界のエネルギー情勢との深いかわりの中で確立されなければならない。

わが国では軽水炉が運転 13 基、建設中 12 基である。この基数が、2000 年までに 60～80 基になることは余裕をもった建設計画となろう。しかし 2000 年において、高速炉の 100 万 KWe 級を 20～30 基稼働せしめることはきわめて困難な目標となってきた。ようやく高速実験炉“常陽”が臨界に達したが、原型炉“もんじゅ”建設の歩みは鈍い。

これまでは主として、エネルギー需給の確立の観点から論じてきたが、原子力開発のもう一つの重要な面に触れなければならない。

それは開発を進める側の社会的責任と子孫への責任である。いうまでもなく、安全性の問題がその最重要課題であるが、とくに Pu 問題は最も心配されるものである。Pu がこの自然界において人類が創造した物質なら、このコントロールも責任をもたねばならない。Pu 処理技術を誤れば、人類は 2000 年において破滅に至る道も考えられるのである。Pu の安全管理は、フィジカルプロテクションを含めて、技術開発手順をきめるものと思われる。

さらに排熱の問題がある。人類が 2000 年において年間 0.5Q を消費すれば、排熱は年間 1Q に達する。この排熱が地球環境における自然現象に与える影響が大きいことは十分予想される。それは再び“ノアの洪水”を地球にもたらすかも知れないのである。