

転換期に立つ電源開発

大橋 康 次*

明治 11 年 3 月 25 日、東京虎の門工部大学校で日本最初の電気、アーク灯がともされた（電気記念日のはじまり）。点灯わずか 15 分間であったが、近代日本の興隆とともに発展の一途をたどったわが国電力事業の誕生を象徴する合図であった。

変動する社会の事象について、その渦中にあるものがことの重大さと意義を的確に認識することは必ずしも容易でない。第一次、第二次世界大戦への突入や現在の学生運動のもつ歴史的な意味を、そのときどきの国民がどれだけ確実に理解できるか、疑問であろう。

わが国電源開発の姿と今後の見通しを考えると、今やまさにわれわれはエネルギー革命の中に息づいているのであり、電源開発の方策も今までにない重大な転換期にさしかかっているように思われる。このような姿をできるだけ客観的に素描してみよう。

世界第三位に躍進した電力

戦後におけるわが国経済の急速な成長につれて、電力エネルギーの需要は止まるところを知らず急上昇し、昭和 42 年には発電電力量でわが国は世界第 3 位（アメリカ、ソビエトの次ぎ）の地位を占めるに至った。

このような飛躍的發展をとげた電気事業の内部では、単に量的にめざましい増加があっただけではなく、質的な面でも、従来に見られないような大幅の変化が認められ、しかも、特にこの 10 年間に将来の大変換を予想させるような動きがある。

すなわち、昭和 30 年ごろから始まった新鋭大容量火力をベースとし、貯水池、調整池式水力にピーク部分を分担させる方式は、今や原子力と揚水発電の組合せ方式へと急速に移行しつつあり、内容的に今までの教科書の知識では理解しがたいものになりそうである。何がこのような変化を促し、どのような具体的事実が生まれてゆくか、われわれ土木技術者も、大いに注視すべきであろう。

移り変わるエネルギー供給体系

* 正会員 北海道電力（株）常務取締役

世界の主要国のエネルギー需要は、ほぼ 10 年で倍増するペースで進むものと予想され、わが国も例外ではない。

このエネルギー供給体系が、年とともにどう変わってゆかかを総合エネルギー調査会の答申数字でみると、一次エネルギーは昭和 30 年には石炭がほぼ 50%、水力と石油がそれぞれ 20% 近くを占めていたのが、しだいに石油が台頭して他を押し、昭和 50 年には石油が 73% と躍進するのに対し、水力は 7%、石炭は 10% 台になる。しかも、この石油も昭和 60 年ごろをピークとして、以降は原子力が新しいエネルギーとして前面に出るようになり、急速に石油の王座に迫ってゆく。

さて、次にこれを電力エネルギーの供給体系についてながめてみよう。

前に述べたようなめざましい電力エネルギー需要の増加に対応する電源開発の姿勢としては

- ① できるだけ安いコストで
- ② 良質の電気を安定して供給でき
- ③ 社会的、国民経済的要請にこたえる

ことが必要である。ここではおもに電力の安定供給という立場から、わが国のおかれているエネルギー事情について触れて見る。

(1) 水 力

わが国の包蔵水力は昭和 43 年度末で既開発 1770 万 kW、工事中 280 万 kW、未開発 1680 万 kW、合計 3730 万 kW と公表されている。未開発水力の量は、今後水力だけで電力を供給するものとすれば、わずか 4 年で全部開発しつくす程度しかない。

しかし、今後の技術の進歩、多目的開発、揚水発電、既設の再開発などを考慮すれば、前記の包蔵量は大幅に増加するものと見られる。水力のすぐれた供給特性と国内循環資源の活用という面からも、今後引き続き開発が進められよう。

(2) 石 炭

資源量に限度があり、採掘条件がしだいに悪化する現状では、コスト上昇を免がれず、石油や原子力にその位置をゆずりつつある。石炭火力と重油火力の比率は、昭

和 40 年に 48 : 52 であったものが、今後 10 年間で、19 : 81 となる。

(3) 石 油

増大する電力需要に対しては、今後当分は安い石油に依存しなければならない。

ただ、石油は大部分が政情不安な中近東からの輸入に依存するので、供給の確保に不安がある。また、たとえば昭和 60 年には 10 万 t のタンカーが年間に 3 800 隻も日本のどこかに入港するような量を輸入せねばならず、輸送、貯油などの点からも問題が出てくる。このほか、いおうによる公害、これを避けるための原油生だきなど、多くの問題をかかえている。

(4) 核 燃 料

以上のエネルギー源は、今後採鉱および技術開発によって使用年数の延長が可能であるにしても、結局は有限な資源として老朽化と高コスト化が懸念される。この点、

原子力エネルギーは、特に潜在資源力として見ると、他のものに比べ莫大な量がある(表一)。

天然ウランの価格を 1 kg 20 ドル以下とすれば、この価格で採掘可能な埋蔵量が石炭換算で約 400 億 t となり、これは石炭の 1/20 にすぎないように見える。しかし、これは次のような前提に立っている。

現在の発電用原子炉はウラニウム 235 を使用しているが、これは天然ウラン中 0.7%しか存在しておらず、残りの 99.3%はウラニウム 238 である。これが核燃焼中に中性子を吸収してできるプルトニウム 239 も核燃料として使用可能で、さらにトリウムからつくられるウラン 233 も同様である。

プルトニウム 239 を使用する原子炉を増殖炉というのが、核燃焼と同時に核燃料が生れるという理想的な原子炉である。これが完成すると、利用可能量が 100 倍に増加するだけでなく、採算可能な採掘限界コストも現在の 100 倍まで上がるので、資源量は飛躍的に拡大することになる。電力エネルギー供給上、原子力が次代のホープと見なされるゆえんである。

以上のような概観から、わが国の電源開発劇を大きく分けると、次の 3 幕にくることができよう。もちろん、各幕の内容は多少趣きの変ったいくつかの場がある。

第 1 幕：水力が主役で、石炭火力がピーク時または渇水期に補充用として、相手役をつとめた長い舞台(昭和 30 年頃まで)。

表一 世界のエネルギー資源

区 分	既知の資源で現在利用可能なもの	潜在エネルギー資源
石 炭	18	320
石 油	1.9	26
天 然 ガ ス	1.9	20
シェールオイル	—	12 000
歴 青 炭 中 の 油	0.2	6.1
ウ ラ ン	0.9~1.2	4 000 000
ト リ ウ ム	—	5 600 000

注：単位 Q, 1 Q=2.5×10¹⁷ kcal, 石炭約 400 億 t 相当。

表二 電源設備と電源構成

区 分	昭和 40 年		昭和 60 年		昭和 75 年 (2000 年)		昭和 105 年 (2030 年)	
	出力 (万 kW)	比率 (%)	出力 (万 kW)	比率 (%)	出力 (万 kW)	比率 (%)	出力 (万 kW)	比率 (%)
一般水力	1 490	41	2 000	12	2 700	7	3 500	2
揚水水力	40	1	1 600	10	4 800	13	15 200	12
計	1 530	42	3 600	22	7 500	20	18 700	15
火力	2 120	58	9 000~7 000	54~42	11 000	32	19 000	15
原子力	0	0	4 000~6 000	24~36	17 000	48	89 300	70
計	2 120	58	13 000	78	28 000	80	108 300	85
合 計	3 630	100	16 600	100	35 500	100	127 000	100

注：① 昭和 60 年は超長期展望による。
 ② 昭和 75 年は原子力産業会議資料による。
 ③ 昭和 105 年は電力中央協議会資料による。

第 2 幕：舞台は暗転して、高能率、大容量の新鋭火力が、舞台いっぱいに踊り回り、水力は、主として貯水池、調整池式の女房役として舞台をつとめる。石炭火力は、場が進むにつれて衣装を落して重油火力に変わってゆく(昭和 45 年頃まで)。

第 3 幕：重油火力はさらに衣装を変えて原子力発電の姿を現わし、明るい照明とにぎやかな伴奏の中で踊りを高めてゆく。相手役の水力は揚水発電所となって、いつも舞台の上にいる。石炭・重油火力は端的にとときどき舞台に現われる程度で、一般水力はむしろはやし方として歌を続ける(今後の舞台進行)。

第 3 幕を具体的に数字であげると表二のようになるが、これは、あまりにも先のことまでの予測なので、出場者の健康状態やお家の事情、それに今は考えられていない若手役者の登場によって、趣向が大きく変わることもあり得よう。

このようなことを考えると、新しい時代に生きる土木技術者としても、これからの主役を果たすことになる原子力発電所と揚水発電所についての認識を持つことは、きわめて必要な条件というべきであろう。

ここまで育った原子力発電

世界最初の原子炉(シカゴ・パイル)が連鎖反応に成功したのは 1942 年、ソビエトの発電所(5 MW)が初

めて電気を起したのが1954年、営業用として試験送電を始めたのが1957年(イギリスのコールダーホール発電所)である。それから10数年たった現在は、表-3に示すように、世界で運転中の原子力発電所は1200万kW近くに達し、建設・計画中のものを含めると、1億kW(わが国現有設備の2倍)という驚くべき規模に育ってきた。

わが国でも1954年ごろからいろいろな機関で調査を開始し、1963年には試験炉で初めて発電に成功、1967年には東海発電所(出力166MW)が本格的に発電を開始した。以後各種炉型の大出力原子力発電所を続々と建設中である(表-4参照)。

原子力発電あれこれ

原子力発電の原理や機構については他書にゆずること

表-3 海外の原子力発電開発状況

国名	運転中		建設・計画中		合計	
	出力(MW)	基数	出力(MW)	基数	出力(MW)	基数
アメリカ	3330	17	64443	79	67773	96
イギリス	4128	27	6389	11	10517	38
フランス	1654	8	1617	3	3271	11
ソビエト	1140	10	2363	5	3503	15
イタリア	597	3	84	1	631	4
西ドイツ	838	6	2861	8	3699	14
カナダ	220	2	5330	9	5550	11
日本	171	2	2296	5	2467	7
その他、12カ国	672	7	11724	29	12396	36
計	11750	82	97707	151	110457	233

注:1969年6月30日現在、原子力産業会議資料による。

として、一般読者に興味がありそうな話題を拾ってみよう。

(1) 経済性

わが国の原子力発電は、技術導入、試験研究の段階であるため、現状では必ずしも火力発電所に比べて経済性が高いとはいえない。

しかし、最近では、外国諸国の原子炉に改良が加えられ、アメリカでは軽水炉が火力発電に見合うようになってきた。

原子力発電は火力発電より資本費のウェイトが高いので、スケールメリットが大きく、技術の進歩とあいまって、商業ベースに入ってくる。重油火力は亜硫酸ガスによる公害が大きな問題となり始め、その対策費が増加する傾向にあるため、原子力発電は相対的に優位性を増すであろう。

(2) 燃料の輸送問題の解消

100万kWの原子力発電所は、燃料を一度装荷するとほぼ3年もつが、同じ容量の石炭火力が3年間に消費する石炭は、30t貨車で28万両となる。重油火力では10万tタンカー約40隻で中近東から油を運んでこなければならぬ。すなわち、濃縮ウラン1tは石炭300万tに匹敵するわけで、燃料の輸送、貯蔵という問題はほとんどなくなる。したがって、発電コストの地域差は解消し、また、戦争などに起因する供給の不安定さはまず避けることができる。

表-4 わが国の原子力発電所

区分	運転中		建設中				
	J PDR	東海	敦賀	福島1号機	美浜1号機	福島2号機	美浜2号機
発電所名							
事業者	日本原子力研究所	日本原子力発電(株)	日本原子力発電(株)	東京電力(株)	関西電力(株)	東京電力(株)	関西電力(株)
位置	茨城県那珂郡東海村	茨城県那珂郡東海村	福井県敦賀市浦底	福島県双葉郡大熊町双葉町	福井県三方郡美浜町	福島県双葉郡大熊町双葉町	福井県三方郡美浜町
炉型式	軽水減速軽水冷却型 コールダーホール型	黒鉛減速炭酸ガス冷却型 (BWR型)	軽水減速軽水冷却型 (BWR型)	軽水減速軽水冷却型 (BWR型)	軽水減速軽水冷却型 (PWR型)	軽水減速軽水冷却型 (BWR型)	軽水減速軽水冷却型 (PWR型)
原子炉熱出力	45 MW	587 MW	970 MW (1065 MW)	1213 MW (1380 MW)	1031 MW	2381 MW	1456 MW
電気出力	12.5 MW	166 MW	322 MW (357 MW)	400 MW (460 MW)	340 MW	784 MW	500 MW
燃料種類 装荷量	濃縮ウラン 4.2 t	天然ウラン 186 t	濃縮ウラン 61 t	濃縮ウラン 79 t	濃縮ウラン 40 t	濃縮ウラン 107 t	濃縮ウラン 48 t
着工	1960年10月	1959年12月	1966年4月	1966年12月	1966年12月	1968年3月	1968年5月
運転開始	1965年3月	1967年7月 (1部1966年7月)	1970年4月予定	1970年10月予定	1970年10月予定	1972年5月予定	1971年6月予定
建設費	35億円	465億円	※300億円	※384億円	※298億円	※510億円	※360億円

注:① 原子炉出力および電気出力の()内数字はストレッチ(増加出力)後の値、

② ※印は初装荷燃料成形加工費を含まない。

(3) 有限資源の活用温存

石炭や石油などの有限資源を、将来とも限りなく発展することが予想される合成化学工業の原料として活用することができる。

(4) 安全性と立地上の制約

原子力発電所を運転すると、原子炉の中の燃料が燃えて放射能をもった原子灰がたまる。これが万一の事故の場合でも発電所外に放出しないよう、幾重にも防壁があり、絶対安全な構造になっている。また、用地を広く確保して周囲の人々には影響を与えないようにしているほか、日本では特に地震に対する考慮が払われる（構造物の耐震設計にさいしては 300 gal を想定した例もある）。

このほか、冷却水取水が容易なこと、需要地に近いこと、燃料・機器の輸送の便利なことなどがあげられる。

これらの条件を満たすため、わが国では四方を海で囲まれていることから、現在運転中および建設中のものは全部海岸に面して設けられている。しかし、その適地は無限にあるわけではないため、ロードセンターから離れた所に原子力発電所を設け、そこから長い超高压送電線で送電したり、山をくり抜いて地下に発電所を建設するとか、海上または海中に原子力発電所を設けることなども検討されるようになる。

なお、諸外国では約7割が内陸に設けられ、冷却水を河川から取水している。

揚水発電の本格的登場

揚水発電所は、1892年 スイスで水車と発電機、ポンプとモーターをそれぞれ別に設けたのが初めて、1910年頃から発電機とモーターを共用する方式が開発され、ヨーロッパで広く用いられた。

その後、水車を逆回転してポンプとして使用する可逆ポンプ水車が開発された。これによって揚水発電所の経済性は著しく向上し、その後はこの形式が主流を占め、性能、利用可能の揚程、落差の範囲も拡大されてきた。

たとえば、わが国で現在工事中の沼原は世界最高の落差（477 m）の領域へ挑戦したもので、新高瀨川の計画もわが国最大の容量（295 MW×4）を持つ発電所として注目されている。

高落差大容量化に伴う技術上の問題点としては、水車では材料の強度および輸送、発電機では冷却の方法などがあげられる。

揚水発電が最近盛んに開発されるようになったのは、前記の通り技術進歩により大容量、高落差への領域が広がったため、経済性が著しく高まったことによるもので、電源開発はここに大きな武器をもつに至った。

揚水発電所は

- ① 河川の自然流量にあまり関係されず、1地点で大出力が得られる
 - ② 深夜の電力需要が下がったときに、火力または原子力に余力が出てくるが、揚水でこれを有効に利用することによって、火力・原子力発電所の熱効率が向上する
 - ③ 揚水時と発電時に調整能力は設備出力の2倍を備えることになる
- などの特性をもつ。

揚水発電所を選定する際には

- ① 落差が大きく、水路長が短い
- ② 上方池または下方池として、天然湖沼や既設ダムをできるだけ利用する
- ③ 需要の中心地や揚水動力供給源に近いことなどを基本的に満足するよう心がける。

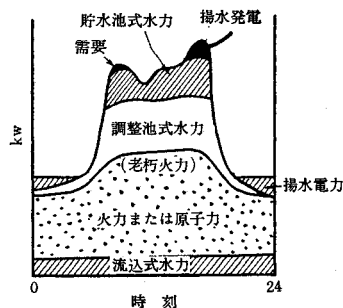
原子力と揚水の発電運用

原子力は、資本費が全コストの半分を占め、燃料費は70～80銭/kWhときわめて安い（重油火力の約半分）。運転特性は火力とあまり変わらず、したがって、常時100%の出力で運転するのが望ましい。

電力需要は常に波打っているのが特色である。

1日の需要の形は（図-1に示す通り）、深夜は低負荷で朝になると急激に立ち上り、昼休みに少し落ち込み日暮れとともに負荷が急上昇（最近では冷房が普及したため、夏は午後2時頃最大となる地域が増加）して最大ピークを発生したのち、夜がふけるとともに減少するという傾向をもつ。

図-1 水・火力運用概念図



負荷の下の部分（ベース部分）は火力または原子力で分担するのが経済的であり、機能的にも、そうせざるを得ない。

原子力の開発量の増加につれて、深夜に余力が生じてくる。これでは不経済なので、その余力を利用し、揚水発電所で水を汲み上げておき、ピーク時に発電すれば、両者ともに機能的にお互いを補完することになり、経済

上のメリットがきわめて大きい。

このように、原子力発電と揚水発電の組み合わせは、将来における理想的な姿と考えられている。

水力斜陽

よく世間でいうことばに「水力斜陽」というのがある。

原子力発電が華やかに開花しようとしているとき、水力は立地条件の良い地点から開発され、有利な地点が残り少なくなったとして、その将来をはかなむ向きがあるのは事実である。

しかし、はたして本当にそうであろうか。

わが国は、古来、地形が急峻で雨が多いため、水力国であるとされた。水力が電力供給の大宗を占め、火力が補完していた「水主火従」時代から、昭和 30 年代の大型高効率火力の登場による「火主水従」時代への過程を表面的に見れば、たしかに相対的開発比率は逆転している。わが国の限りない経済発展と限られた資源の現状から見れば、将来さらに原子力に期待するところが大きいことも、今まで述べた通りである。

しかし、その反面、将来の電力需給と経済性を確保するためには、ピーク供給力としての水力、特に揚水発電が装いも新たに必要とされることについても、また紹介したところである。kW 当り 3~4 万円のできる揚水発電所、需要の変化と電源の事故にただちに既応できるという水力のメリットは、単に静的・量的な見方から離れもっと質的に、ダイナミックな見方から、十分に自己の存在を主張している。

事実、昭和 44 年度を見ると、今後の電力需給ひびくに対処し、新たに 9 ヶ所・193 万 kW の大型水力発電所の着工が認められ、前年度からの継続とあわせ 50 ヶ所・530 万 kW の年間工事量となっている。これは、戦前戦後を通じて最大の開発規模である。

また、他方では、水に対するわが国の要求度が近來とみに緊迫してきた事実をみのがすこともできない。最近全国的にひびくしてきた都市用水と工業用水の補給、開発の進展とともに新しい様相を呈してきた洪水の調節など、全く新しい視点から水問題を取り扱わなければならないようになってきている。しかも、ダム サイトは有限である。水力開発は、単に従来の水力発電単独という立場を離れて総合開発という面にもっともっと力を注がねばならない。水力発電の形を従来の教科書通りに固定化して考え、水本来の存在と利用を忘れ、しかも技術向上の努力を忘れる者だけが水力の斜陽ということばを振り回すのではないか。

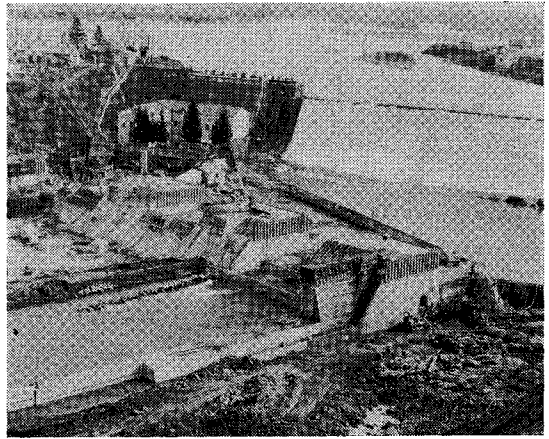
固定観念の排除こそ必要

— 広い土木技術者の進路 —

今まで述べてきた新鋭火力の登場、原子力発電所の本

再建設中の新野花南発電所

(北海道電力(株): 5100 kW, 前方に見えるのが 5100 kW の既設発電所)



格的導入、揚水発電所の再編入なども、みな進歩した技術の突出に支えられたものといえる。われわれ技術者の精進と工夫によって、現状では、閉そく的と見える事態をも突破し得ることは歴史の教えるところである。

例として原子力発電所の建設における土木技術者の役割を考えてみよう。

原子力発電所の計画・建設に際して、土木技術者は立地に関連した諸調査(地盤・地震・水理・気象・海象・社会環境)や建設工事工程管理(工事の前半は土木、建築、後半は機械、電気が中心)に大きな役割をはたすことになる。

この際、原子力発電所特有の新しい土木技術が要求されるが、その主なものとしては、絶対に安全であることを目標とした耐震設計、圧力容器・格納容器の PC コンクリート、冷却水の取水・放水、水温問題、地下・海上または海底発電所の建設、固定廃棄物処分方法の確立などがあげられる。

さらに進んで、原子力発電と組み合わせた海水の淡水化、各種工業と組み合わせた超大型の産業コンビナート、これらを取り巻く無公害都市の形成、原子力を利用した超大型の土木工事(山を削って築港し、大運河を掘って 2 つの大洋をつなぐなどの工事)など、近い将来の事業として、各方面で青写真が引かれている。

以上述べたことによって、1970 年代以後の電力エネルギーの供給が、従来の姿とは変わった形と規模で大きく展開されてゆくことがおわかり頂ければ幸いである。

そして蛇足ながらひとこと付け加えれば、このような時代に生きようとする土木技術者にとって必要なのは、狭い部門にとらわれず、融通無げな対応をもって人間のよりよい生活を実現してゆく向日性であると思うが、いかがなものだろうか。

(1969.12.26・受付)