

**Key Issues:** 発電による便益  
**気候区分:** 温帯湿潤気候 (Cf)

**主題:** 大規模揚水発電所における系統運用への貢献  
**効果:** ピーク供給力、電力貯蔵、瞬動予備力  
調相機能、試送電電源

**プロジェクト名:** 東京電力所管の揚水発電所  
**国:** 日本、関東地方 (アジア)  
**GP実施機関:** 東京電力株式会社  
**GP実施期間:** 1965 ~

**キーワード:** 揚水発電所、電力系統運用、ピーク発電

**要旨:**

Pumped storage type power plants have been developed in Japan since 1930. Tokyo Electric Power Co., Inc. has 9 pumped storage power stations with approximately 10,000 MW in total, including one under construction. They have contributed to huge power network operation including Tokyo metropolitan area, functioning as peak load power sources.



## 1. プロジェクトの概要

揚水発電は、標高の異なる2箇所の調整池を水路で接続し、ポンプ水車を設置して、深夜あるいは週末等の電力需要が少ない時に、供給余力を利用して、下部調整池の貯留水を上部調整池に揚水し、昼間の需要ピーク時または緊急時に、この水を落下させ発電を行うものである。東京電力株式会社では、現在建設中のものも含め、合計9つの揚水発電所を所有・運転し、昼間のピーク電力を供給している。

表 - 1 に東京電力株式会社の揚水発電所一覧を、図 - 1 に揚水発電所位置図を示す。



図 - 1 東京電力所管揚水発電所位置図

表 - 1 東京電力所管揚水発電所一覧

発電所名	出力 (MW)	運開年	揚水形式
矢木沢	240	1965	混合揚水
安曇	623	1969	混合揚水
水殿	245	1969	混合揚水
新高瀨川	1,280	1981	混合揚水
玉原	1,200	1982	純揚水
今市	1,050	1988	純揚水
塩原	900	1994	純揚水
葛野川	1,600	1999	純揚水
神流川	2,700	建設中	純揚水

表 - 2 各揚水発電所の主要構造物諸元

発電所名	上部ダム、調整池				下部ダム、調整池			
	ダム型式	堤高 (m)	堤体積 (万 m <sup>3</sup> )	貯水池総容量 (万 m <sup>3</sup> )	ダム型式	堤高 (m)	堤体積 (万 m <sup>3</sup> )	貯水池総容量 (万 m <sup>3</sup> )
矢木沢	コンクリートアーチ	131	57	204	---	---	---	---
安曇	コンクリートアーチ	155.5	66	12,300	---	---	---	---
水殿	コンクリートアーチ	95.5	30	1,510	コンクリートアーチ	60	7	1,070
新高瀨川	ロックフィル	176	1,159	7,620	ロックフィル	125	738	3,250
玉原	ロックフィル	116	544	1,480	---	---	---	---
今市	ロックフィル	97.5	252	707	コンクリート重力	75.5	19	910
塩原	ロックフィル	90.5	211	1,190	コンクリート重力	104	59	1,050
葛野川	ロックフィル	87	406	1,120	コンクリート重力	105.2	62	1,150
神流川	ロックフィル	136	722	1,836	コンクリート重力	120	73	1,910

## 2. プロジェクト地域の概要

### 2.1 東電供給エリアの電力需給

東京電力株式会社のサービスエリアは、首都圏東京を含む関東地区約 39,500km<sup>2</sup> であり、約 4,250 万人へ電力を供給している。2001 年度の販売電力量は約 2,755 億 kWh、最大電力は 6,430 万 kW である。販売電力量はイタリア 1 国分を上回り、この 10 年間で約 1.5 倍に増大している。

日本は世界の 1 次エネルギーの約 6% を消費する世界第 3 位のエネルギー消費大国でありながら、エネルギー資源の約 80% を海外からの輸入に頼るエネルギー資源小国である。東京電力では、今後の世界的なエネルギー需要を踏まえたグローバルな視点から、電気を長期に渡り安定して供給するために、燃料の安定調達、経済性、環境への影響などを総合的に考えて、需要カーブに応じた最も効率の良いエネルギー資源の組み合わせを目指している。

東京電力管内における 1 日の電力需要の変化は、夏期について見ると(図 - 2)、まず朝 6 時頃から需要は急激に立ち上がり、昼休みにいったん落ち込むが、午後 1 時には回復し、同 2 時頃ピークとなり、そのまま夕方まで高い需要が続き、やがて午後 6 時頃から急激に減少し始め、深夜を経て午前 4 時頃、最低となり翌日に連続する。このような需要に対して、経済的かつ運用性に優れた供給を行うには、表 - 2 に示すように、ピーク、ミドル、ベース各需要部分の特性に適した電源を組み合わせる必要がある。

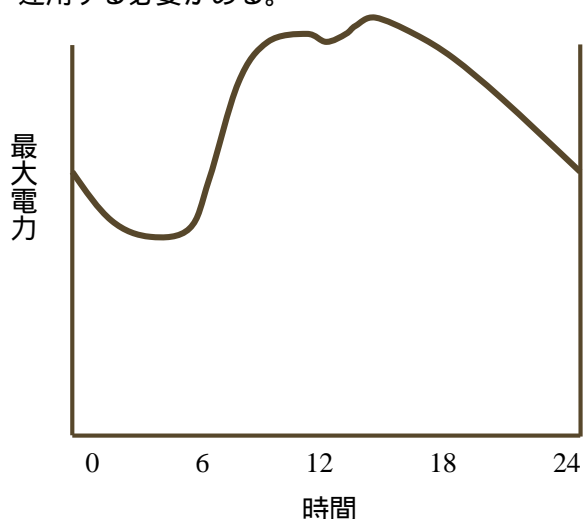


図 - 2 東京電力管内 1 日の電力需要変化

表 - 2 各種電源特性一覧

需要	需要の特性	供給力の特性		対応する電源
		運用特性	経済特性	
ピーク需要	変動が激しい。 発電時間が短い。	負荷調整能力があること。 負荷即応と頻繁な起動停止が可能なこと。	可変費は多少高くとも固定費が安いこと。 (注1)	揚水式水力・貯水池式調整池式水力 ガスタービン
ミドル需要	1 日サイクルで大きく変動する。 発電時間は比較的長い。	日間起動停止またはこれに準じた運用が可能なこと。	可変費、固定費とも比較的安いこと。	石油火力 LNG 火力
ベース需要	変動はほとんどない。 1 日中発電。	1 日中連続運転が可能なこと。	固定費は多少高くとも可変費が安いこと。	石炭火力 自流式水力 原子力

(注1) 可変費は主として燃料費  
固定費は主として建設費の金利および償却費

## 2.2 東電における揚水開発の歴史

第二次大戦後、日本経済の復興・自立に伴って、電力需要は急速に増加を続けたが、これに対しは、主として火力発電が充当され、あわせて調整能力に優れた貯水池式、調整池式水力がピーク供給力として開発された。火力発電は当時、高温高压機器の開発により熱効率を向上させつつあり、また年率 10%を越す勢いで増加しつつあった需要に対し、大容量で建設工期が短く拡充電源として最適であった。こうして火力開発が進み、1960 年代初期には供給力における火力の占める割合が水力を上回り、いわゆる火主水従時代となった。

水力はピーク供給力として引き続き期待されたが、経済的な地点の開発に伴い新規地点が減少したため、調整池式水力発電に揚水発電を付加して、日間調整の大規模ピーク発電を行う混合揚水式発電所が注目されることとなった。矢木沢（群馬県、利根川、240MW、1967 年運開）、安曇（長野県、信濃川、623MW、1970 年運開）や新高瀬川発電所（長野県、信濃川、1,280MW、1969 年運開）等がある。

1970 年代後半になると、冷房空調需要の増加等により、夏期ピーク需要が先鋭化し、揚水発電の必要性はますます強まりつつあったが、しかし、河川自流を有効利用できる混合揚水式地点は開発が進み、適地が減少したため、純揚水式発電所が開発されるようになった。純揚水式発電とは、上部調整池には河川の流入がほとんどなく、下部調整池から揚水した水だけによって発電する方式で、落差の確保のみに着目されるから、水系条件に関係なく、地点選定幅を拡大できるものである。

揚水発電の開発規模については、前述した東京電力管内の需要形状を考慮したシステム解析を行い、全系統の発電コストが最小となるよう、その開発規模と全系統に占める割合を決めているが、その値は東京電力管内で約 10~15%と計算される（図 - 3）。需要の伸びに伴い、この最適揚水開発比率に合わせ、玉原（群馬県、1,200MW、落差 518m、1982 年運開）、今市（栃木県、1,050MW、落差 524m）、塩原（栃木県、900MW、落差 338m）、葛野川（山梨県、1,600MW、落差 714m）、建設中のもので神流川（群馬県、2,700MW、落差 653m）が順次計画・建設されてきたのである。

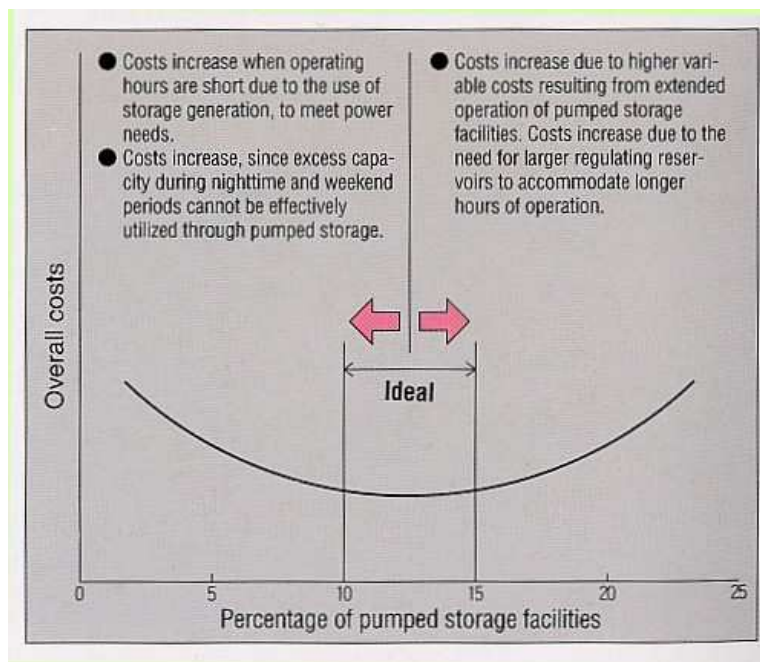


図 3 最適揚水設備比率



### 3. 便益

#### 3.1 揚水発電所の機能

揚水発電所が電力系統の中で果たす役割はきわめて多様であり、ピーク供給力、電力貯蔵、瞬動予備力、調相、系統復旧時の試送電電源、等の機能を上げることができる。

##### (1) ピーク供給力

需要のピーク部分は発電時間が短いので、発電経費のうち、可変費は多少高くとも、固定費の安い電源が望ましい。揚水式水力は1 kW当たりの建設費が小さく、またダム、水路等の耐用年数の長い構造物で構成されているため、固定費は最も安い。一方、可変費の大半を占める燃料費については、揚水式水力は、水路内の水の往復による損失、ポンプ水車や発電電動機等の損失のため、揚水源資に使用された燃料の約30%は無効となるが、原子力のように燃料費の安い電力を動力とすれば、石炭火力の燃料費以下である。石油火力が源資となる場合には最も割高となる。そこで、各種電源について、年間発電時間と発電原価（固定費と可変費）との関係を示すと図-4のようになり、発電時間が長いベース負荷領域では原子力、中間負荷領域では各種火力が経済的であるが、発電時間の短いピーク負荷領域では何とんでも揚水式水力が最も経済的である。

また、需要のピーク部分は、負荷変動が激しいので、負荷調整能力に優れ、頻繁な起動停止が可能な電源を充てる必要があるが、このような運用特性は、出力調整速度が大きく、数分で起動停止可能な揚水式水力でしか確保できない。

以上のような経済特性、運用特性を活用するため、揚水式水力は従来からピーク供給力としての位置づけで開発運用されてきている。

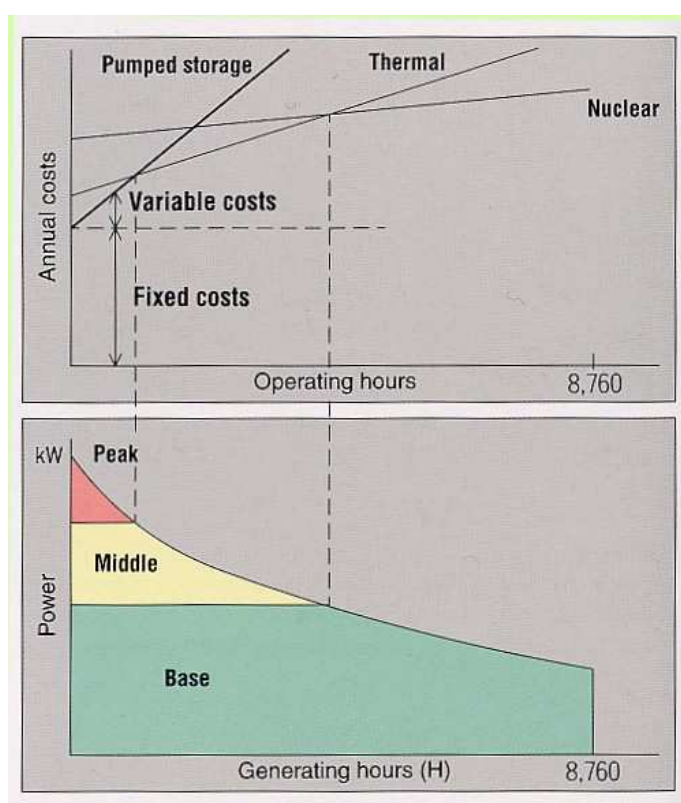


図 4 年間発電時間と発電原価の関係

##### (2) 電力貯蔵

電力需要は、日間で変動するとともに、週間、季節間でも変動するが、深夜や週末の軽負荷時に発生する原子力、石炭火力等可変費の安いベース電源の供給余力を揚水動力として活用すれば、上部調整池に安い電力を貯蔵しておくことができる。貯蔵された電力は、週日重負荷時に使用され、燃料費の比較的高い電源、例えば石油火力等の発電を節約することにより、供給コストを全体として低減することができる。

### (3)瞬動予備力

電力の安定供給を確保するためには、需要の予想外の増加や電源の計画外停止、出力減等の不測事態の発生にも即応できるように、適正な供給予備力を保有しておく必要がある。

供給予備力となる電源は、運転される機械が少ないので、可変費は多少高くとも、固定費は安いものが適する。また、供給予備力には、たとえば電源脱落事故時の際にただちに応動して出力を急上昇させ、脱落電源にかわって供給力を確保できるような瞬動性が必要である。

これら条件は、ピーク供給力としての必要特性と共通するもので、揚水式水力はこれら特性を具備しており、瞬動予備力として最適である。

### (4)調相機能・周波数制御機能

長距離架空送電線、地中送電線の増大に伴って、系統の並列静電容量が増加し、軽負荷時には受電端電圧の上昇、重負荷時には逆に電圧低下が発生するため、通常、変電所に分路リアクトルや電力用コンデンサを設置してこれら現象を抑制しているが、揚水発電所は発電電動機を無負荷で回転させ磁界電流を調整することによって無効電力を供給または吸収して系統の電圧を調整することができるので同期調相機として用いられる。

また、最近では可変速揚水機も開発され、夜間の系統周波数制御（AFC; Automatic Frequency Control）に揚水発電所が一役買っている。通常、AFC は火力発電所の燃料焼き増しを行うことにより実施しているが、深夜とか休日の軽負荷時には、原子力発電の比率が高まるとともに、休止さざるを得ない火力発電所が増え、運転中の火力発電所だけで AFC を行うことは困難になる。従って、夜間・休日に水を汲み上げる揚水発電所が AFC 運転を行うことで、AFC 容量を確保し、かつ、火力発電所の燃料焼き減らしによる経済的運用が可能となる。

### (5)試送電電源

きわめて大規模な事故等により、系統全体が停電するような異常事態が発生した場合には、何ヶ所かの発電所が自力で起動し、送電線により他の発電所に電力を送りこれを起動させ、次々に復旧させることが必要となる。

揚水発電所は、近傍の自流式水力発電所で所内電源を確保できること、起動時間が 3～5 分程度と短く、出力増加速度も大きいことから、このような試送電電源として最適であり、万一の場合に備えられている。

## 3.2 需要に対応した揚水発電所の計画と建設

揚水発電の開発計画については、東京電力管内の需要形状を考慮した系統システム解析を行い、全系統の発電コストが最小となるよう、その開発規模と全系統に占める割合を決めている。その全系統電源構成に占める揚水発電の最適比率は東京電力管内で約 10～15%と計算される。需要の伸びに伴い、この最適揚水開発比率に合わせ、玉原（群馬県、1,200MW、落差 518m、1982 年運開）、今市（栃木県、1,050MW、落差 524m）、塩原（栃木県、900MW、落差 338m）、葛野川（山梨県、1,600MW、落差 714m）、建設中のもので神流川（群馬県、2,700MW、落差 653m）が順次計画・建設されてきたのである。

一方、揚水発電所を経済的に効率よく建設するために、地点選定においては以下の 4 点を考慮しながら地点選定、建設及び技術開発を進めてきた。

### (1) ダムの貯水効率が高いこと

揚水発電所には上部ダム、下部ダムの2つのダムが必要である。ダム建設にあたっては、小さなダムで大きな貯水池が得られるような地形、ダムや水圧に対する地耐力にすぐれた地質などが求められる。

### (2) 電力アクセスが良いこと

送電線や変電所の建設などの送電経費や送電時の電力ロスを極力少なくするために、できるだけ需要地に近く、かつ揚水時の電源（揚水資源）である火力・原子力発電所との電力アクセスの良い場所が、揚水発電所の建設には適している。

### (3) 大規模な地下空洞の建設が可能であること

上部ダムと下部ダムを最短ルートで結ぶことが最も経済的となるため、発電所の多くは地下に建設される。発電所を経済的に建設するためには、大規模な地下空洞の建設が可能な堅硬岩盤が広く分布していることが必要である。また近年は発電機の単機出力能力を向上させることで、地下空洞の規模を従来よりも抑えることができるようになった。図 5 にポンプ水車単機最大出力の水位を示す。

### (4) 短い水路で大きな落差が得られること

揚水発電所の出力は、使用水量と有効落差によって決定される。従って、上下の調整池の間を短い水路で結ぶことが出来、かつ大きな落差が得られるならば、効率的な発電所になる。

そのために、ポンプ水車の最高落差の向上が図られている（図 6）。

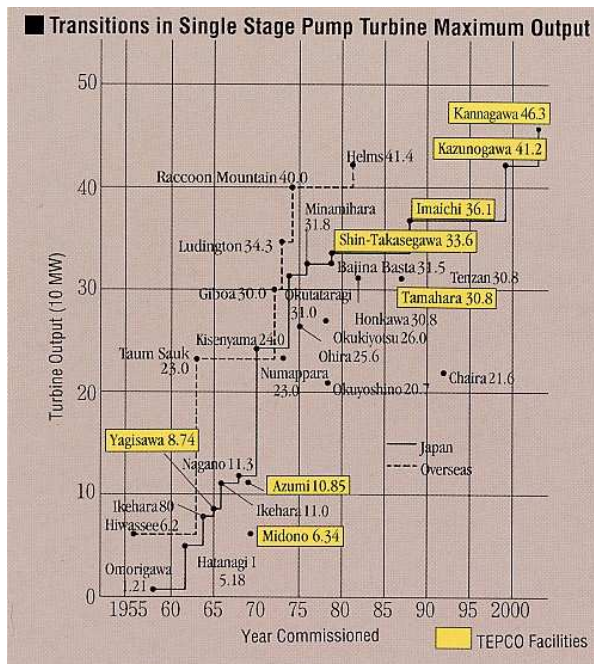


図 - 5 ポンプ水車単機最大出力推移

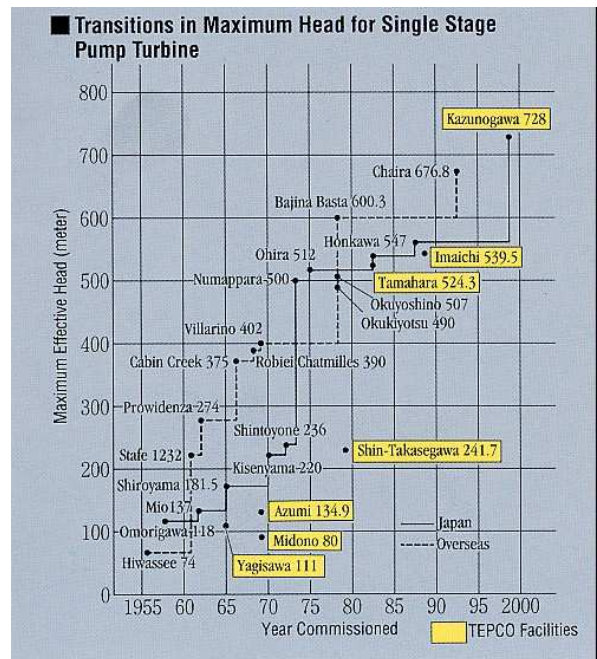


図 - 6 ポンプ水車単機最高落差推移

#### 4. 便益の効果

図 - 7 に昨年 2001 年 7 月 24 日に東京電力管内で過去最大電力を記録した際の、揚水発電所の稼働状況を示したものである。また、図 8 にピーク時の各種電源の発電分担を載せる。このように、夏期に生じる最大電力に対し、揚水発電所はピーク供給力としてフル稼働している。また、表 3 には東京電力での 2001 年時点での揚水動力原価に対する石油火力焼き増し原価を示す。昼間の石油火力焼き増し原価に較べ安い原価で、揚水を運転することにより、電力貯蔵効果を楽しみ系統全体の発電コストを抑制しているのである。

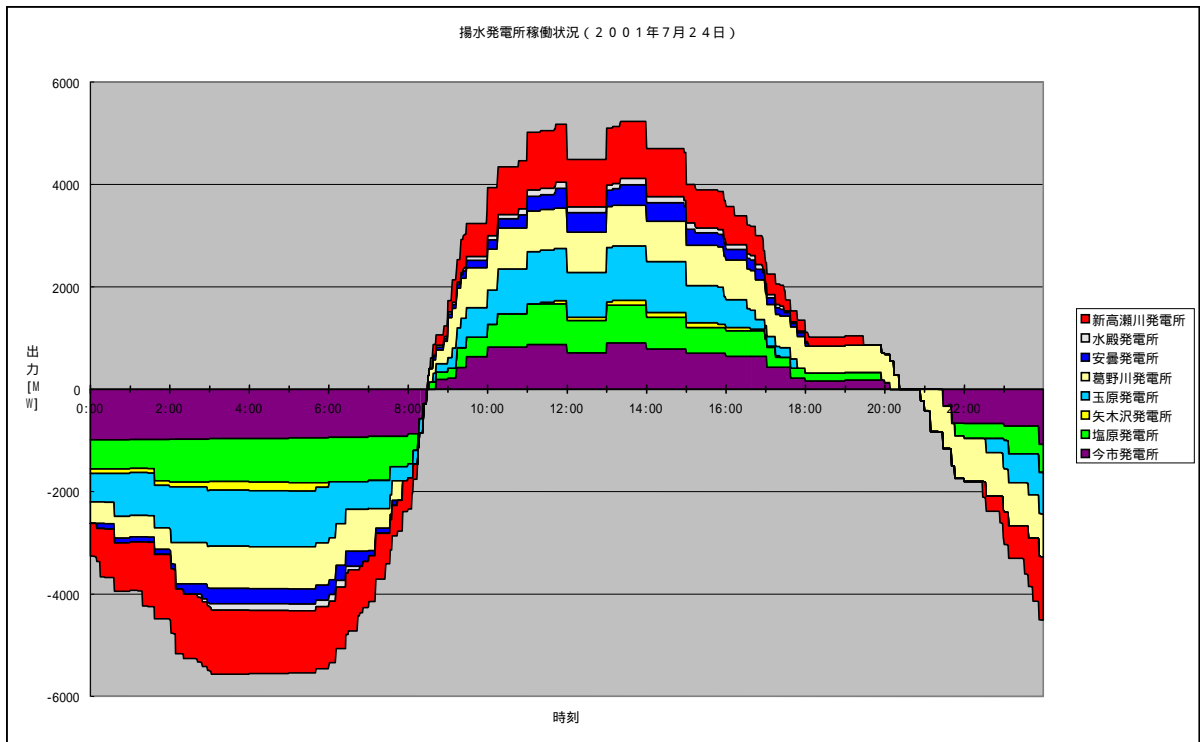


図 7 一日の運用の例 (2001.7.24 最大電力 6,430 万 kW 発生日)

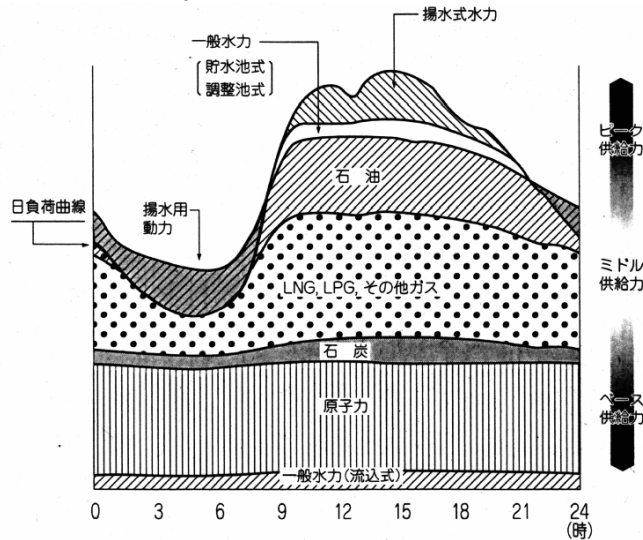


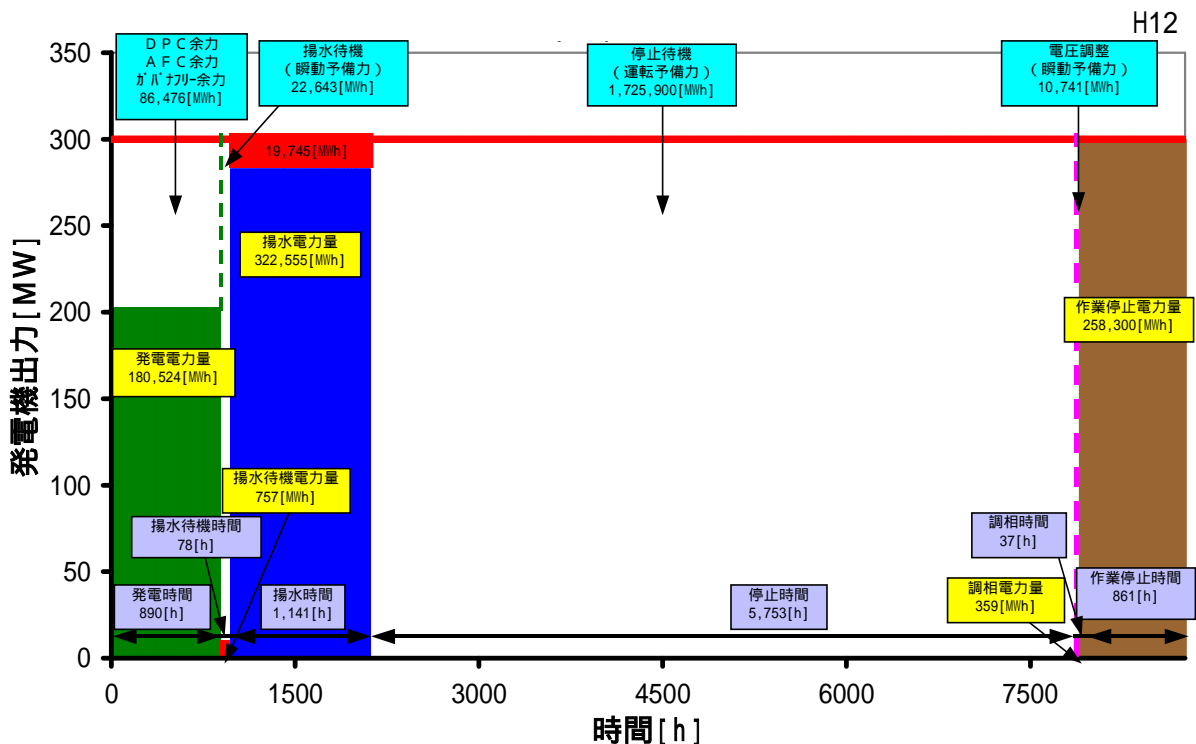
図 8 需要に対する各電源の分担概念図



表 3 揚水動力原価と焼き増し石油火力原価の比較

	発電原価	備考
揚水動力原価	4～5円 / kWh	揚水効率66%
焼き増し石油火力発電原価	6～7円 / kWh	30%利用時燃料単価

図 9 には代表的な揚水発電所の運転実績を例として示したものである。年間 8,760 時間の内、揚水モードが 900～1,000 時間、発電モードで 1,000～1,100 時間運転している。また、調相運転は 37 時間実施している。その他の停止待機時間、単機出力 300MW を 200MW 平均で運転している際の 100MW の余力は、瞬動予備力として系統の安定に貢献しているものである。



概ね、発電モード：1000～1100時間

揚水モード：900～1000時間

図 - 9 各モード別運転時間と回数の実績

## 5. 成功の理由

このように揚水発電所が有益な電源として系統運用に貢献しているのは、日本経済の中心、東京を含む供給エリアにおいて、以下の条件が成立していることによる。

### (1) 電力需要のピーク尖鋭化

東京電力管内での需要日曲線は、前述のように、朝 6 時頃から需要は急激に立ち上がり、昼休みにいったん落ち込むが、午後 1 時には回復し、同 2 時頃ピークを迎える。このピークは工場やオフィスビル、あるいは夏期エアコン需要によるもので、日本経済の進展に伴い先鋭化が進んでいる。現在の負荷率は 55% 程度である。このようなピークの立ち上がりが急激な需要カーブ

を持つことが、揚水発電所が必要となる条件である。

## **(2) 系統の大規模化**

電力の大消費地東京を供給エリアとする一方、立地が困難なことから、電源は東京から離れた遠隔地に建設される傾向にある。従って、長距離架空送電線や地中送電線の増大に伴い、系統の電圧制御の必要性が高い。

## **(3) 安価な揚水原資**

二度にわたる石油危機において、わが国は大幅な石油依存によるエネルギー需給構造の脆弱性を露呈したためその後、石油代替電源の開発に総力をあげることとなり、この結果、原子力発電の供給力に占める割合が急速に高まることとなった。このため、揚水原資は次第に火力から、燃料費の低廉な原子力に移行し、その経済性は向上している。

## **(4) 社会的供給責任**

日本経済の中心である東京を供給エリアとする公益事業として、電力供給に支障をきたすことは許されない。従って、1日数時間のピーク需要に対しても確実に電力を供給しなければならず、コスト的に割高なピーク電源の開発も必要不可欠である。

## **6 . 詳細情報の入手先等**

問い合わせ先

東京電力株式会社