

新エネルギー源と海水揚水発電所との連系運用

宮地 巖・依田 正之

Combined Operation of Non-Conventional Energy Sources with Sea-Water Pumping-Up Station

Iwao MIYACHI and Masayuki YODA

Because of their uncertainty in expected output capacity and time duration, the so-called non-conventional energy sources are considered to be insufficient as yet for the purpose of alternating the petroleum in the domain of electric power supply industry. The authors have been developing the possibility of realizing a large scale sea-water pumping-up power station, in which the ocean will be serving as an upper reservoir, and trying to promote the exceptional contribution of those sources through the intervening energy storage by pumped-up sea-water facilitating the smooth operation of electric power systems. This paper describes shortly the present status of non-conventional energy sources together with the detailed configuration of proposed sea-water pumping-up station. The suitable combination of joint operation and the desirable level of technical development of those installations are finally discussed.

1. まえがき

わが国の電力供給形態は昭和30年代後半に水主火従から火主水従に転換したが、これに伴って大容量石油火力がそれまでの石炭火力に代わって主流となり、その後20年間にわたって全盛期を迎えたわけである。しかし産油国による石油価格の高騰政策と、長期的にみた資源の枯渇に対処して、各種の新エネルギー源が見直されるようになり、原子力からバイオマスにいたるまですべての資源が広く技術開発の目標となった。さらに法的にも「石油代替エネルギーの開発と導入」や「エネルギーの使用の合理化」を推進する形が定着し、サンシャイン計画やムーンライト計画にみる大形プロジェクトの展開をみるにいたった。しかし実際には従来から主要発電資源を石炭に依存している世界の大多数の国国では、石油事情の激変は日本ほど致命的な問題ではなかったようである。この間登場してきた各種新エネルギー源の中には、資金と労力をかけても近い将来には実用化を期待することができないものもあり、またその供給規模と継続時間において必ずしも適当ではないものも含まれている。さらにこれらを産業用電力として利用する立場からみると、極めて限られた種類の新エネルギー源しかその対象となり得ないことがわかる。

本論文では新エネルギーを電力供給源として評価する一方、これらを有効利用する場合通常必要とするエネル

ギー貯蔵放出形態として、海洋を上池とする海水揚水発電方式の提案を行ない、これらを組合わせた連系運用にもとづくより広範囲で実現可能なエネルギーシステムの構成について論述している。

2. 新エネルギー源

2.1 沿革・展望

「日本における電力の新技術展望」と題して筆者の1人が約10年前に作表したものの一部を、現時点に沿うよう書改めたものが表1である。これらの項目中には前回の想定通りの技術開発に成功した例もあるが、原子力開発目標などは約1/2しか達成されていない実情である。一方電気学会においては、エネルギーに関する特集論文を編集するとか、年次大会においてシンポジウムを開催するなどして技術開発の現状を逐次公開しているが、それらの課題をとりまとめたものが表2および表3である。

2.2 石油代替資源

責任ある新エネルギー開発機構の代表者あるいは電力事業の指導者らの最近の論説を参照し、かつ開発途上にある技術の現状に立脚して、個々の発電用代替エネルギー源がわが国においてどの程度の水準にあるかを項目別に考察して次に示す。

(1) 原子力 昭和56年6月現在で炉台数22基、認可出力15.5GWでなお建設が進んでいる。しかし軽水炉原子力

発電所は立地の立遅れから、昭和60年度の目標を当初の60GWから30GWに見直し65年度に53GWと見積っているが、常に石油代替エネルギーの主役であることには間違いない。実験炉、実証炉を経て商業ベースの新型転換炉、高速増殖炉への足堅めを着実に進めている段階である。

(2) 石炭 20年前との状況の違いは、ボイラ容量の増大、海外炭専焼、環境規制の強化の3点にある。流動床ガス化や噴流床ガス化への努力とともに、100MW級ガスタービンを開発してこれと直結する計画もある。南アフリカでは必要なガソリンの40%を石炭液化で賄う程度に活用しているという。ともかくも長期安定輸入確保が絶対

表1 日本における電力の新技术展望

宮地・依田

項 目		1971 (昭46) 発 展 期	1980 (昭55) プロジェクト推進期	1990 (昭65) 1990 全国原子力発電予想 53GW (1990)	2000 (昭75) プロジェクト展開期
電 力	原 子 力	1000MW級低濃縮ウラン原子力発電	使用済燃料の輸送再処理 ウラン濃縮設備	全国原子力発電予想 53GW (1990)	トリウムサイクルの確立 1000MW級高速増殖炉 核融合原子力発電
	火 力	50MW級地熱発電 1000MW級火力発電 高性能海水淡水化装置 脱硫・脱硝 中間負荷火力発電 1000kW太陽熱発電 発電所の集中制御・自動化 ガス地下貯蔵	2流体火力発電 大容量MHD発電 100MW級ガスタービン発電 電力用燃料電池 海底石油貯蔵		高効率太陽電池
	水 力	潮力発電 (波力・潮汐) 500m級超高落差揚水発電	海水揚水発電 沖合・海底発電所 海洋温度差発電		気象エネルギー変換発電
送 電	架 空	500kV級交流送電 碍子アーム鉄塔	1000kV級UHV交流送電 ±500kV級直流送電 完全耐雷線路	超電導送電	超電導送電 高周波管路送電
	ケ ー ブ ル	500kVパイプ形OFケーブル 超高圧CVケーブル 極低温電力ケーブル	500kV地中ケーブル 超電導電力ケーブル		
	管 路	管路気中送電 500kV臨海直接昇圧施設			
配 電	1 次	耐雷保護線路 20/30kV 架空/ケーブル配電	配電系の遠方監視制御	電源負荷ローカルシステム 海上都市配電	
	2 次	400V屋内配電 低圧負荷集中制御	自動検針システム		
変 電 所	変 電 所	完全ガス絶縁変電所 サイリスタ交直流変換所	主幹系統用大容量変換変電所	大容量エネルギー貯蔵所	
	機 器	電界解析形大容量変圧器 パuffer形ガスしゃ断器 新形電力ヒューズ	電力用直流しゃ断器		
系 統 運 用		系統安定化装置 (SSC-CSC-SDR) 系統運用完全自動化 保護継電器の自動監視 系統信頼度評価	系統信頼度確保 広域大停電防止装置 多端子直流系統運用		
負 荷 需 要		農林水産環境調節 電気利用による農業近代化 省エネルギー形家電機器	電気自動車 磁気浮上リニアモータ列車 省エネルギー形電力需要開拓		都市集中冷暖房

表2 エネルギーに関する電気学会特集論文課題

小：小特集， 特：特集 宮地・依田

年月	区分	課題	細目
54・8	小	サンシャイン計画と地熱	地熱流体，バイナリーサイクル，満川，大岳
55・5	特	新エネルギーの開発	長期需給，核エネルギー（転換炉，高速増殖炉，融合炉），化石エネルギー（LNG，石炭，オイルシエール），自然エネルギー（太陽，地熱，風力，海洋，バイオマス）
55・9	小	核融合実験装置の電源	トラス電源，加熱電源，圧縮電源，閉込め電源
56・5	特	電気機器における省資源・省エネルギー	材料，静止機器，回転機，ケーブル，照明・冷暖房・家庭用機器，法規
56・6	小	エネルギー貯蔵技術	新形電池，蓄熱，フライホイール，超電導コイル，水素

表3 エネルギーに関する電気関係学会シンポジウム課題

全：電気学会全国大会， 連：電気四学会連合大会 宮地・依田

年度	区分	課題	細目
47	全	パワーエレクトロニクス	素子，保護機器，自動化機器，電動応用
	連	核融合発電	減速，プラント，プラズマ，ブランケット，マグネット
48	全	燃料電池	ターゲット計画，水素-酸素，ヒドラジン
	連	揚水発電	高落差，大容量
49	全	クリーンエネルギー	サンシャイン計画，太陽，熱電子，火山，水素
	連	新エネルギー開発	MHD，高速増殖炉，燃料電池，ラジオアイソトープ，海洋
50	全	エネルギーシステム	地域開発，トータルシステム，需給予測
	連	エネルギー輸送	交流電力，直流電力
51	全	エネルギー開発材料	核分裂，太陽，海洋，水素，核融合
	連	電気エネルギーの貯蔵	電氣的，機械的，化学的，蓄電池
52	全	海洋物理	風波，潮汐
		極限技術	真空，超電導，高温，低温度差，大電流制御
	連	エネルギー効率向上	長期ビジョン，電力，高速実験炉，石炭ガス化，廃熱利用，MHD
		太陽エネルギー	太陽熱，太陽光，バイオマス，光化学，光合成
53	全	省エネルギー展望	電力，都市ガス，製造，製鉄，鉄道
	連	新エネルギー源開発	地熱，転換炉，高速増殖炉，石炭ガス化・液化，太陽，核融合
54	全	核融合エネルギー制御	トカマク装置，パルス技術，炉開発
	連	脱石油発電技術	展望，原子力，石炭火力，高効率化，開発動向
55	全	省資源・省エネルギー-電気絶縁	縮小化，高耐力化，低損失化
	連	代替エネルギー開発	太陽，地熱，石炭ガス化・液化，水素
56	全	省エネルギー-機器の磁氣的諸問題-鉄損	発生，低減，解析，構造，測定
	連	代替エネルギー源の開発の現状と課題	風，太陽，石炭液化・ガス化，増殖炉

的に必要である。

(3) LNG 世界の埋蔵量は石油の74%，石炭の18%といわれ可採年数は47年あるという。しかし世界商品として火力燃料のみならず都市ガスにも利用され，今後とも値上げ攻勢が本格化することは必至とみられている。電気事業者の短期需給見通しではLNGが主流として約70%の依存度になるという。

(4) 地熱 水力並みの建設費40万円/kW に対し葛根田の例では12.25円/kWh^{かつこんだ}と発電コストが低く，中，長期の開発に期待がかけられている。わが国には全世界の地熱エネルギーの約10%にあたる20GWの開発可能量が存在するといわれ，すでに6地点，168MWが運転中である。今後は4,000m級の深部ボーリング探査により250MW級の発電を指向しており，さらに80～150℃の熱水を利用した低沸点流体によるバイナリーサイクル発電の基礎研究が進められている。

(5) 太陽 太陽エネルギーは将来とも食糧生産エネルギーとして不可欠の地位を保つものである。地表面での日射量は霧，雲等の天候に左右されて不安定ではあるが，晴天時には確実なエネルギー源となり，1,000kW太陽熱発電所では春分南中時2時間後の法線直達日射量を0.75kW/m²として定格出力を設計している。平均日射量の最大は5月の410cal/cm²・day（平均1kW/m²×1日5時間分相当），最小は12月の150cal/cm²・dayといわれているようにエネルギー密度が低く，必要量を確保するためには広大な用地がいる。例えば700MW×4基の石油火力は10⁶m²，1,000kW×2基の太陽熱発電所は10⁵m²を必要としている。米国では10MWのパイロットプラントが建設中である。他方太陽光発電は高電圧の電気を必要とする小規模分散形電源としては好適で，低価格化に努力が払われている。

(6) 海洋 海洋は太陽熱エネルギーの貯蔵場所であって，その変形としての海流，波力，潮汐力，温度差，濃度差等の利用が検討されている。しかし多額の建設費を必要とし，唯一の実用プラントとしてブルターニュのランス潮力発電所がある。海に囲まれたわが国の環境や開発途上国にとっては有効なエネルギー源となる可能性を含んでいる。最近波力のほかに温度差発電のテストプラントが活動しているが，その延長として商用100MW潜水円筒形発電プラントの概

表4 新エネルギー等による発電方式の総合評価

エネルギー専門部会(中部電力)

評価要素	エネルギー供給の安定性										技術開発見通し				環境影響				環境保全技術の開発見通し				電力運用に対する適合性				地域振興への貢献				中部圏の電力供給への適用に関する総合評価			
	供給の安定性		供給量の継続性		電力供給に對し量的に貢献する度合		開発の現状		開発の将来性		環境影響		開発の現状		開発の将来性		電力運用に対する適合性		地域振興への貢献		中部圏の電力供給への適用に関する総合評価													
	国産	輸入の安定性	短期	長期	近い将来(2000年まで)	得(2000年以降)	商業ベース運転	実験プラントの建設運転	システム的試験研究	基礎研究・調査	少	中	多	実用化	運転	基礎研究・調査	システム的試験研究	実験プラントの建設運転	プラントの建設運転	高	中	低	大	中	小	大	中	小	近い将来・適用の可能性有	得	適用の可能性小			
	大長期供給契約等	中先進国等	略	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無			
太陽	太陽熱	●																																
	太陽光	●																																
	冷暖房システム																																	
地熱	天然蒸気・熱併給	●																																
	低沸点流体	●																																
	火山・高温岩体	●																																
	波力	●																																
海洋	潮流	●																																
	海洋温度差	●																																
風力	M	●																																
	H	●																																
燃料電池	D	●																																
	電池	●																																
石炭	石炭ガス化	●																																
	石炭液化	●																																
高効率複合発電	L	●																																
	N	●																																
核	高速度増殖炉	●																																
	核融合	●																																

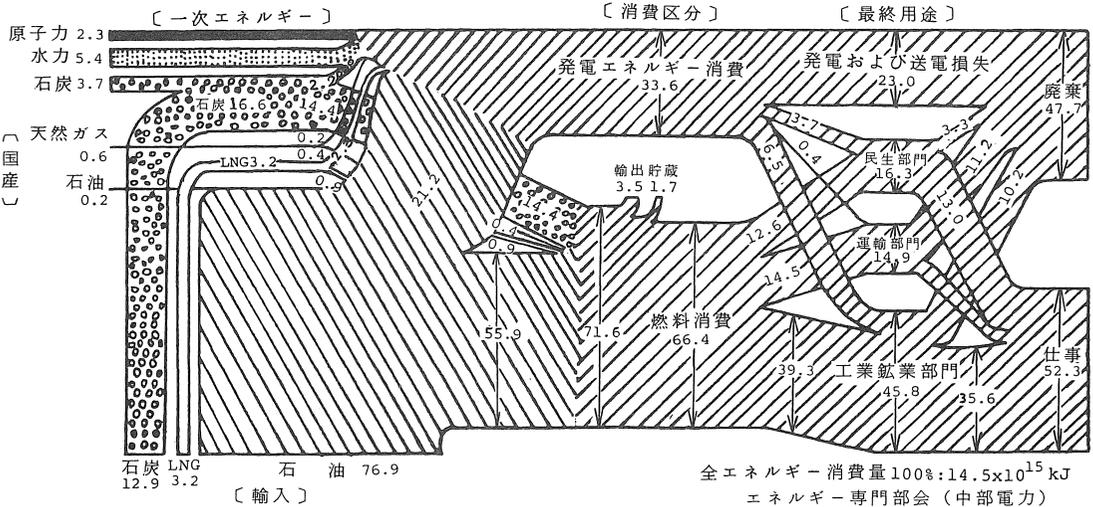


図1 わが国のエネルギーフロー図(昭和52年度)
— 数値は百分率を示す。

念が提案された。

- (7) 水力 新しくはないが見返されているエネルギーである。高落差大容量の揚水発電設備は系統運用上の要請から、大容量原子力や火力の開発と歩調をそろえて今後も建設される気運にあるが、その形態は洪水等の心配のない河川最上流または分水嶺をばさんだ位置での純揚水となる場合が多い。他方常時の河川流量を有効利用する10MW級以下の小水力地点の再開発が推進されている。
- (8) 風力 間接的な太陽エネルギーであって、大容量と

- するためには広大な用地面積を必要とする。従来の1,000kW級の経験では羽根や軸受の故障が多く、主要エネルギー供給源としての期待は薄い、固定可能なエネルギー形態とのハイブリッド化によって活用されるものと考えられている。日本では昭和57年度に100kW、65年度に10MW級の開発を想定している。
- (9) 燃料電池(水素) いろいろな計画が進行中であるが、日本のメーカーでは20~30kW級を、ユーザでは4.5MWプラントを目標に研究開発が進められている。

(10) バイオマス 生物資源のエネルギーであって、一説によれば将来は総エネルギー量の10~20%の分担を保証できるものと予想されている。この分野では発酵技術の応用によるメタンやエタノールの製造が当面の課題である。

(11) MHD 2軸接近法と称して、小出力長時間形および大出力短時間形の開発を別個に推進し、これらの長所をもち寄って大出力長時間形を実現する方向で地道な研究が行われている。

(12) 核融合 夢の未来エネルギー源としてプロジェクト研究の花形のようにいわれているが、実用化年度は紀元2000年をはるかに越えるものとの予測修正がある。JT-60建設のためには建屋ならびにサイト整備費を含めて2,000億円が支出されているという。

以上列記した代替エネルギーのうち現時点で超大容量電力源となりうるものは、低濃縮ウラン軽水炉(BWR, PWR)原子力、高速増殖炉原子力、石炭火力、LNG火力、純揚水水力などであり、いずれもすでに実用の域にあって、今後は単機容量の増大が期待される。中容量単独電力源として地熱、太陽および海洋温度差等があるが、これらは運用技術によってさらに大容量の設備として役立つものである。昭和47年7月発足したサンシャイン計画では、太陽、地熱、石炭、水素を対象として、昭和54年度までに380億円を投入したと報告されている。

2.3 評価

石油代替資源が産業用電力供給源として真に代替しうるものであるかどうかという評価は十分検討に値する課題である。表4は電力技術研究会エネルギー専門部会(中部電力)において、「新エネルギー等による発電方式の開発の方向性(昭和54年6月)」の中で示された総合評価である。表中の●印で示す該当欄は現在でも大綱において変わりはない。電力供給が負荷追従運転を基本的姿勢として、電圧と周波数との定値維持を保証する発電システムでありうるために、供給源の容量、継続時間、予備力等にはそれなりの能力が要求される。特に表中「電力運用に対する適合性」の欄では太陽、地熱、海洋などの評価がよくない。これらの長所を生かし短所を補う意味においても、4で述べる貯蔵サイクルの確立が極めて有意義な方策であると考えられる。なお参考のために資源とエネルギーフローの過去の実績を図1に示し、将来新エネルギー源が貢献できる分野を大まかに推定する資料とした。

3. 海水揚水発電システム

3.1 淡水揚水発電

現在の電力系統において揚水発電が最も効率的な速応性あるエネルギー貯蔵方式であり、系統運用上重要な役割を果たしていることは十分認識されている。最近では単機容量300MW以上、発電所最大出力1,200MW級の12時間連続全負荷運転に堪える淡水揚水設備が逐次建設されている。しかしこれらは殆どすべてが純揚水であるため発電原価が高く、緊急時以外には運転されないのが通例である。年間稼働運転日数が70日と設計されているが、期間中の発電あるいは揚水実績は7%以下もあるといわれている。また平均負荷率も60%と低く、特に自動負荷配分制御運転の場合にはリミット下限の30%を維持する状態であるという。斜流水車を用いると60%落差で22%負荷において効率80%を維持することができるなどの利点もあるが、一般に揚水発電所を実質有効に活用するためには、軽負荷時のキャビテーションなど今後解決すべき問題も多く残されている。そもそも揚水発電は昭和9年にはじめて小口川第三発電所で季節調整に応用された後、長期間にわたって図2に示すような日負荷曲線対応の運転を要請されてきたが、現在では主として緊急負荷対応の任務に変わってきている。

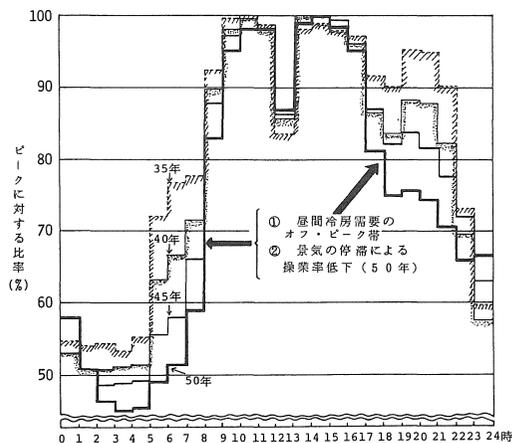


図2 8月第3水曜日の日負荷曲線の変遷

林 政義

3.2 新海水揚水発電構想

昭和41年度電力長期計画にはじめて^{あしたか}新鹿地点(中部電力)の海水揚水発電が計上されている。これは海洋を下池とし陸上のダムに海水を揚水するもので、主として貯水池からの海水の滲透漏水や溢水と動植物への塩害に対する配慮から、現在まだ実現をみるにいたっていない。

これに対し筆者らの構想による新海水揚水発電方式は、最近の技術進歩を踏まえて、海洋を上池とし海底に設けた人工空洞を下池とするものである。このようにすれば海塩水の影響を完全に避けることができるばかりでなく、落差と空洞容積とを任意に選定することができる。逆にこれらを規格化すれば標準設計の機器、発電所を随

表6 海水揚水機器の問題点と対策 依田・宮地

問題点	対策	備考
海水中に溶解している各種成分の影響による腐食	材料の選定	流速に気を付ける 滑らかにする すきまを作らない
	電気防食	電極の取付, 取替法に留意する
	防食塗装	エポキシタールエナメル, エポキシ樹脂, ビニール系塗料等
すきま腐食	シール目張り等	水車は多くの部品から構成されており, すきまは必ずある
応力腐食割れ	熱処理等	18-8 Cr-Ni系ステンレス鋼に生じやすい
土砂摩耗	表面保護	高流速部表面にハードクロムメッキ等を施工する
海洋生物の付着	表面仕上げ塗装 防汚塗装 化学的除去 機械的除去	

3.3.2 施設工事 高落差形は従来技術を用いて建設可能であるが, 全地下掘削式となるため試掘坑調査に約2年, 換気立坑工事に2年, トンネル工事に平均100m/月かかるとしても工期は11~12年の長期にわたる。図4は第1案プロトタイプの特トンネル, 立坑, 下部貯水池の立体配置を示す鳥瞰図である。地下深部の掘削では断層や地盤の特性, 構造物の耐震性能が重要な検討項目となる。最近の研究によれば, 岩盤の地震加速度の100年期待値は0.2~0.3G程度で, 地表面構造物の耐震強度は主としてそれが建造される地盤の性質および岩盤上の厚さに関係して, その基底部に印加される応答地震加速度が想定されるようである。これについては, いわゆる地盤のN値

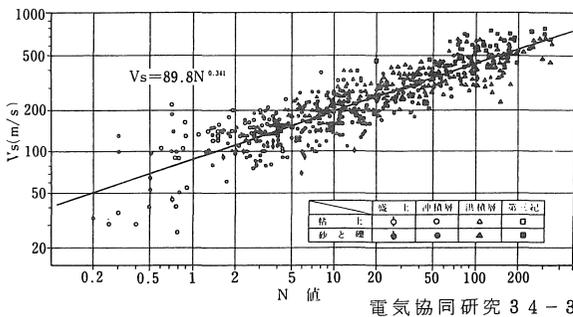
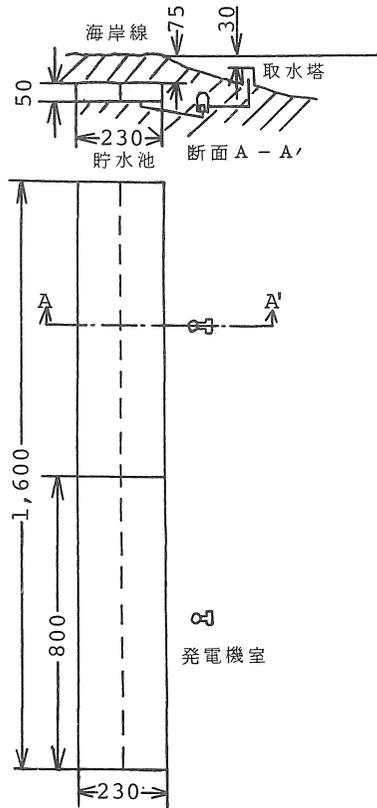


図5 地盤のS波速度VsとN値 (今井, 1975)

と地震波のS波速度との関係を示す図5を参照すれば地盤の固有振動数が求められるので, これが構造物と共振の関係にあるかどうかを検討すればよいことになる。通常N値10以上, S波速度200m/s以上の場合には, 共振に対してかなりの地盤剛性を期待することができる。

低落差形で大容量とするためには過大な流量を必要とし, 現在技術では単機最大が150MW程度となる。したがって実用発電所出力は900MW位が適当であろう。図6は低落差形第1案の貯水池寸法などを示す概念設計図である。この場合貯水池は地表面近くに建設されるので, 構造上耐力壁を必要とし, その仕切柱等のために空洞の利用率は高落差形よりは低い。



宮地・依田

図6 海岸線埋設低落差形海水揚水発電所概念設計図 (300MW, 単位:m)

3.3.3 経済性 現在の大容量揚水発電所の価値は, 不慮の電源脱落に対して系統を安定に維持し, 広域大停電を避けるための有効利用度の点から主として評価されている。燃料を用いて上池貯水が維持されている関係上, 常時はできるだけ運転しないでおくことが経済的である。しかし停止期間中といえども系統からの要請があれば直ちに, 100%確実に指定された電力を一定時間供給す

べき任務をもっている。待機中の出力は0であっても、土木、電気設備に対する所内動力は1,000MW級で360MWh/月と大きく、水車からの漏水も0ではない。最近では系統運用上火力、原子力に対しても中間負荷運転を要求するようになってきているので、揚水発電を必要とするピーク負荷のあり方も変わってくるものと考えられる。揚水用としてどのような電源を用いればより経済的であるかは、従来の燃料取得価格を念頭において、表7の数値比較から定量的検討を展開することができる。

表7 原子力、石油火力、石炭火力運用経済比較表
林 政義

	原 子 力	石 油 火 力	石 炭 火 力
電気出力	1000MW		
稼 動 率	70%		
年間燃料消費量	28.2t (ウラン濃縮度 2.8%)	141万kl (発熱量 9,650kcal/ℓ)	221万t (発熱量 6,200kcal/kg)
燃料取得価格	116億円	950億円	290億円
所要外貨	42百万\$ (92億円)	430百万\$ (950億円)	130百万\$ (290億円)

海水揚水発電所は、従来通りの火力、原子力を電源とする純揚水として運用できることはもちろんである。しかし進んで新エネルギーを電源とし随時揚水することによって地下空洞を拡大し、計画に従って負荷追従形の大容量発電を実施するシステムを構成すれば、相互の短所を補い長所を活用した経済性の高い揚水発電所となるであろう。

4. 海水揚水発電による新エネルギー貯蔵

原子力、石炭、LNGを除くいわゆる新エネルギー源は天然現象に固有な任意性が強く、そのままでは同じく確率的随意性のある電力消費と直結することは容易でない。この意味においてこれらの中間に海水揚水発電を介在させれば、わが国の環境を活かしたエネルギー利用システムを構成することができ、その効果は大きくさらに離島電源としても有望となるであろう。海水揚水発電における新エネルギー貯蔵とは、新エネルギーによりまず電力を発生させてこれを用い、地下空洞の海水を排除してそこに一大空間をつくることであり、無限大の海洋水を受入れる発電の待機姿勢をとることを意味する。

4.1 エネルギーサイクルにおける貯蔵と緩衝

需要電力は図2の負荷曲線のように随時変動するとともに、対策を講じなければ昼、夜間で約3:1の比率となる。1次資源をこのような負荷変動に円滑に対応させる

ためには、従来から発電所の側においても何らかの緩衝対策がとられている。これを系が複雑でややゆるやかな変化に対応する石油火力発電所の例をとって考察してみよう。

(1) 燃料系 輸入石油はコンビナートで重油タンクに発電所需量の約3ヶ月分が貯蔵される。発電所では1日分のデータンクを経てボイラに供給される。

(2) 空気系

必要酸素量は大気中から強圧通風機、空気予熱器を経てボイラに導入される。燃焼ガスは電気集塵器、排煙脱硫・脱硝装置を経て煙突から再び大気中に放出される。

(3) 水・蒸気系 ボイラで加熱、気化された水蒸気は、過熱器を経て高圧タービンに入り、通常再熱器に帰ってから再び中圧、低圧タービンを通過する。その後はコンデンサによって冷却液化するので、必要な加熱器や脱気器を通過した後給水ポンプにより高圧水として再びボイラに圧入され、系自体は閉じたサイクルを構成する。補給用に市水道と市水タンク、純水装置がある。

(4) 海水系 海洋から取水口を経て循環水ポンプで吸上げられた海水は、コンデンサを通過して再び海洋に放出される。この間通常温度上昇7℃程度を見込んで、負荷に応じた流量が調整される。

(5) 機械系 高、中、低圧タービンの出力は共通の主軸を回転して逆トルクと平衡するとともに、回転数の変化によって運動エネルギーの授受を行ない、入出力の変動を吸収する。

(6) 電気系 タービン主軸が発電機界磁極を回転し、固定子に発生した電力は変圧器、しゃ断器、送電線を経て電力系統の中に溶け込んでしまう。電気系は電源、負荷を含めてそれ自身が閉じたサイクルを構成している。

以上の系で、最終的に必要な良質の電気エネルギーを得るためには、いくつかの貯蔵部分と緩衝部分が貢献している。重油タンク、大気、市水道、海洋は前者に属し、データンク、気水混在ボイラ、市水タンク、海水流量、タービン主軸は後者に属する。また通常のように負荷追従運転をする発電機が交流大系統に並入されている場合には、安定度計算上系統を無限大母線として取扱うことが多い。つまり一見複雑に見える多種系統間のエネルギー交換システムでも、それぞれの系は運用上必要な個々の貯蔵と緩衝の機能を備えている。例示した石油火力以外の場合もほぼ同様である。これを「エネルギーサイクルにおける無限大の効用」という形で認識したい。

4.2 定常性新エネルギー源

いわゆる新エネルギー源には一般に「無限大」が存在しない。太陽や地熱は一見無限大に該当するようだが、

エネルギー利用にあたっては中間に大きい障害が介在する。無限時限ではあっても無限大ではない。ここに海洋という無限大を導入し、海水揚水によるエネルギー貯蔵を併用すれば、新エネルギーの利用開発において新しい方向性を展開することになると思う。

地熱資源は2.2(4)で述べたように比較的定常的で有望な中容量のエネルギー源ではあるが、熱エネルギーとしての準位が低く利用形態に工夫を要する。電気出力がそれぞれ1,000kWのフロンタービンおよびイソブタンタービンを用いるバイナリーサイクル試験発電所において、最近広範囲な変動負荷実験ならびに多数回起動停止実験が実施され、いずれも安定な運転に成功している。目標とする250MW級の発電がこのような形で実現すれば、地熱こそ定常性新エネルギー源として最も期待がかけられるものではなかろうか。広く対象を火山や高温岩体にまで展開すれば、資源の偏在という問題を越えて国内一様に利用できるエネルギー源となる。

4.3 間歇性新エネルギー源

これには太陽、風力のような基本的には日周期の準定常のものと、台風、豪雨、洪水のような季節周期の非定常単発性のものがある。特に冬期の降雪は効果的なエネルギー貯蔵形式として古くから水力発電に利用されてきたが、さらに積極的な有効利用法を開拓する必要がある。気象関連のこのようなエネルギー資源にも海水揚水を導入すれば、これらの欠点を補うことができるであろう。実用的には、新エネルギー源はそれぞれのモードに応じて最大出力、最大可能継続時間で運転し、揚水機器がこれを受入れる形で対応することが望ましい。例えば亜熱帯地方の単離島電源として、昼間の太陽熱エネルギーを海水揚水設備に貯蔵し、夕方から夜間にかけて発電して電力需要を満たす計画も可能である。離島相互間に短い海底ケーブルを布設すれば、運用の自由度はさらに増加する。表5の低落差形第1案などはこのような目的に利用できる。最近の太陽熱発電の経験によれば、間歇的な日射量の繰返しがあると集熱器の温度が著しく変動し、使用材料の熱サイクル上検討が必要であることなどが指摘されている。

5. 連系運用

5.1 運用法

以上の考察から、海水揚水貯蔵用としては地熱、太陽熱が最も有望であることがわかる。しかも他の新エネルギー源が利用できないというわけではない。新エネルギーの不確定性を海水揚水という無限大規模に置換し、これを水力のもつ速応性によって任意の電力に変換使用するという運用体系が樹立される。具体的には現用電力網

を介して、この無限大母線に新エネルギー源を任意に投入し、海水揚水発電所はその投入された電気エネルギーに相当する分だけを利用して空洞を拡大する。これに機器容量の協調を考えあわせて、時間、距離を超越した有効な貯蔵利用が可能となる。このようにすれば、原価高のためなるべく運転しないという従来の揚水の考え方を脱却して、時間的、地域的、経済的にも合理性のある常時稼働の運用法に転換することができる。現在の揚水運用では発電モードから揚水モードに、または揚水モードから発電モードに切替えるのにいずれも、フランシスポンプ水車で10分程度、斜流ポンプ水車で15分程度あれば十分である。以上に立脚した合理的連系運用手法の確立は今後の課題である。

5.2 技術開発目標

新エネルギー側と揚水側とをどのような容量配分で組み合わせるかがまず問題である。つぎに揚水モードと発電モードとの時間配分と反復持続性の確立が必要である。当面の目標は2.2で検討したように、地熱が現在の50MWから250MWに、海洋温度差が100MWになることが示されている。太陽や風力は差当たり10MW級を目途としているが、これでも貯蔵の目的には一応利用できる。揚水機器は発電時の規模を考えて、表5では単機300MWまたは150MWとしたが、これらは上記目標が達成された場合には十分協調のとれる容量である。それまでのテストプラントの段階では、やや小容量のもので検討することが適当であるかもしれない。しかし相対的に過小な単機容量のままでは、産業用エネルギーを目指した海水揚水発電には不相当である。表5の発電原価148円/kWhは石油火力をベースとして算定したものであるから高い値になっているが、上記の経過をたどれば経済性を見出す方向に修正できると思う。結論的にいって、新エネルギー源側で100~250MW級以上の単機容量を技術開発目標として設定すれば、海水揚水との連系運用が円滑に行なわれる見込みである。この値は筆者の1人が2年前に提唱していた目標値50MWの2~5倍に相当している。

5.3 拡大運用

新エネルギー源の枠をさらに拡大すれば、台風、豪雨、豪雪などの気象エネルギーやその小集約としての洪水エネルギーにも言及することができる。また河口堰を利用した低落差大流量の水力エネルギーも海水揚水に役立たせることができる。離島電源や僻地電源を補強する場合には、それらの供給すべき現在の負荷曲線と、安定電源が確保された場合の潜在需要とを想定して、運用設備の組み合わせを検討する必要がある。特にこれからは太陽を含む地球環境での気象エネルギー活用の必要性を認識

し、電力気象学の確立を目指して新しい意味での人工降雨法の研究開発を指向するなど、海水揚水発電所を主軸として、新エネルギー源の拡大運用が望ましいと考えている。

6. あとがき

この論文は、まず実用規模での海水揚水発電方式敷案を策定し、これを仲介としてあらゆる形式の新エネルギー源を貯蔵放出する形で効率的に利用することによって、それらの不確定性を定常化しようとする一連の計画の論述である。またこの関係は気象エネルギーの活用的重要性にまで拡大することに言及している。石油代替エネルギーの開発にあたっては、主力エネルギーと補完エネルギーとを明確に分離し、研究費の投入度合にも配慮があって然るべきだという考え方もあるが、一方現在の課題は、1次エネルギー全体と今日の社会を支える技術との関係を見直す「エネルギー開発」にあるともいわれてい

る。また「開発」は理屈ではなく実際に物が動き出したその「経験」であるともいう。さらに大学では既存の技術の延長線上にない新技術の開発を担当せよとの声も高い。このような基本的諸見解を参照しながら、本論文の内容にできるだけ具体性をもたせたつもりである。

謝辞

筆者らが「海水利用エネルギー貯蔵発電方式研究会(昭和56年)」を発足させその報告書を取りまとめるにあたり、参加者各位には多大のご協力を頂いた。また現地調査やシンポジウム等を通じて、専門識者の幅広い意見をとり入れることができた。この機会に厚くお礼申しあげる次第である。特に中部電力総合技術研究所犬飼英吉次長、同大野定利次長、前田建設工業株式会社、東京芝浦電気株式会社には、計画の展開と試算について具体的な資料を準備して頂いた。改めて謝意を表したいと思う。

(受理 昭和57年1月16日)