

電力貯蔵技術の経済性比較

キーワード：電力貯蔵技術，揚水発電，圧縮空気貯蔵システム，貯蔵効率，建設費

内山 洋司 清野 圭子

〔要旨〕

本研究は、電力貯蔵技術の貯蔵効率の考え方と経済性についての簡易比較法を紹介したものである。対象技術は揚水、蓄電池、圧縮空気、フライホイール、超電導で、それぞれの技術について効率計算と、米国における建設費の推定値を基に発電コストを算定している。また、経済性から見た各種貯蔵技術の特徴も述べている。

- はじめに
- 電力貯蔵技術
- 経済性
- 貯蔵効率
- 建設費
- 発電コスト
- 圧縮空気貯蔵の経済性
- おわりに

1. はじめに

我が国の電気事業は電力需要の低迷，燃料価格の不確実さ，あるいは他産業とのエネルギー間競争など今まで経験しなかった諸問題に直面し，電力供給技術の導入評価は一層難しくなりつつある。現在，電力供給は火力と原子力を主体に行われているが，原子力発電はベース負荷電源としてそのウェートを次第に増しつつある。こういった中でこれからの火力電源は原子力を補完する技術として位置付けられ，環境面および運用面で技術の高度化が必要となると同時に発電容量も 500 MW かそれ以下になる可能性がある。このことは新既建設する火力技術の経済性を悪くすることになる。その対策としてプラントのモジュール生産（建設費の低減，工期短縮）や老朽火力の経済的運用（寿命

延伸，発電出力・効率の改善，燃料転換）などの方法があるが，貯蔵技術の導入はそれを代替するものとして意義が大きい。特に電力供給が火力から原子力へ移行するにつれ，需給調整能力の低下が懸念されており，その確保と省エネルギー化を図るためには，揚水発電に代る効率の良い電力貯蔵技術の開発が急がれる。電力貯蔵技術には，実用化している揚水発電の他に，蓄電池，圧縮空気，フライホイール，超電導などがある。こういった新技術が将来導入されるためには，貯蔵技術の経済解析法の理解と各技術についてその経済評価が必要となる。本研究は各種貯蔵技術についてその経済性の比較検討を目的に，経済試算の方法とその概略の推定結果を示したものである。

2. 電力貯蔵技術

電力貯蔵技術のうち揚水発電は実用技術として既に各国で広く普及している。我が国では、1985年現在、34地点に93基、1,436万KWの設備容量（全発電設備の9.3%）を有している。これに対し、米国では1984年時点で、やはり34地点に建設しており、総容量は1,300万KWで全発電設備の2.1%である。揚水発電は、他の貯蔵技術と比べプラント機器が単純で経済性に優れた技術ではあるが、最近はこの国でも立地制約と許認可問題によりその建設が難しくなっている。在来型技術の代替として、米国では地下揚水が、日本では海水揚水のパイロットプラント（30MW）の建設が計画されている。

揚水発電に替わる他の大型貯蔵方式には、圧縮空気貯蔵（CAES: compressed air energy storage）と超電導貯蔵（SMES: superconducting magnetic energy storage）がある。SMESは、負荷応答性が良く貯蔵効率も高いなど技術特性に優れているが、開発課題も多く、導入には強固な岩盤がある地形を必要とするなど立地上の制約もある。しかし最近、目を浴びている酸化物超電導材料が実用化すれば、従来の金属超電導材料を使ったシステムに比べ、建設費を大幅に低減できる可能性がある。CAESは、深夜の安い電力を利用して空気を圧縮機によって圧力エネルギーとして蓄え、それを昼間のピーク時にガスタービンに利用するシステムである。既に西ドイツ・フントルフにて290MWの商用プラントが稼働しており、米国ではアラバマ電力で100MW電気出力の実用プラントを建設する計画がある。この2つのシステムは、地中の岩塩層を利用しそこに圧縮空気を蓄

えるもので、土木工事が比較的容易で費用が安くできるという利点を持っている。

小容量の貯蔵技術には、フライホイール、蒸気貯蔵、蓄電池がある。こういった技術は、立地上の制約が少なく、分散配置も可能であるが、貯蔵時間は短い。フライホイールと蓄電池は、負荷追従特性が優れており、負荷平準化対策以外に、電力系統の信頼性向上や運用面での燃料費節約に貢献できる貯蔵技術である。フライホイールと蒸気貯蔵は、未だ電力用に商用化してはいないが、蓄電池は、既に西ドイツのベルリン電灯電力会社で17MWの実用プラントが運転中で、米国ではニュージャージー州のヒルスボローに2MWのプロトタイプ試験設備（BEST）が1981年末から稼働中で試験データの収集が行われている。

図2.1は、各種貯蔵技術の可能立地点を電力需要地を中心にして示したものである。立地制約のある揚水、超電導、圧縮空気貯蔵などの大

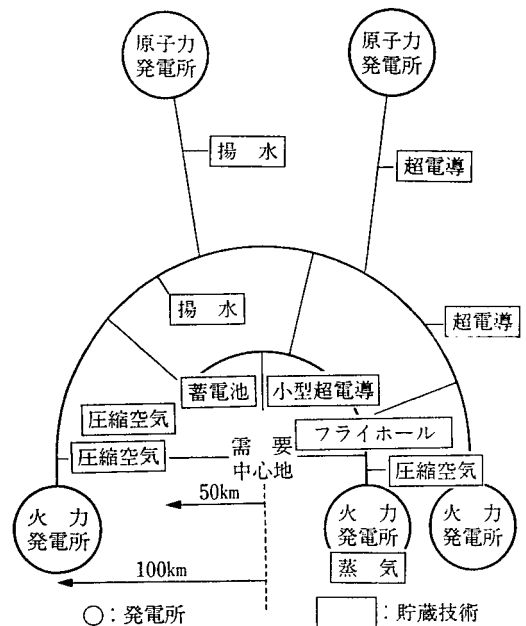


図 2.1 電力貯蔵技術の立地場所

型技術はその建設立地点が需要地から離れているのに対し、フライホイールや蓄電池といった小型技術は需要地に建設できる。一般に、前者は建設単価が安いが発電コストが高く運転面で瞬動性が悪いという欠点があるのに対し、後者は建設単価は高いが発電コストの削減や瞬動性に優れるなどの利点がある。

3. 経済性

電力貯蔵技術の導入は、電力系統に接続して電気事業が運用する場合と、需要家側に分散配置することで需要家の判断で制御する場合とがある。いずれの場合もピーク負荷の平準化によるコスト削減が主な狙いであるが、電力系統へ接続する場合は運用面や電源計画においても大きな貢献がある。表 3.1 は電気事業が電力系統に貯蔵技術を導入することで、得られる経済効果を示したものである。

本来、貯蔵技術の経済性は、表のような要因を詳細に分析し、立地条件を含めて電源構成から評価すべきものと考えられるが、その作業にはデータ入手などでかなりの難しさが伴う。こ

こでは貯蔵技術について詳細な経済解析を行う前の作業として、異なる貯蔵技術の経済性に関する特徴を理解することを目的に、貯蔵効率と建設費を分析し発電コストの試算を行い比較検討している。

3.1. 貯蔵効率

電力貯蔵技術の貯蔵効率は、通常ピーク時に放出する単位エネルギー量 (1kwh) に対し、それを蓄えるに必要なオフ・ピーク時の投入エネルギー量で割ることで計算できる。しかし圧縮空気貯蔵システムの場合、ガスタービンで発電するには貯蔵した圧縮空気の他に燃料を投入する必要がある。発電に投入する燃料は一次エネルギーであるため、他の貯蔵技術と効率比較をする場合その計算が複雑になる。図 3.1 は貯蔵に必要なエネルギー投入を CAES と揚水発電で表わしたものである。図に示す CAES を考えたとき、貯蔵に投入される電気エネルギーだけで効率を計算するとその値は 128% ($=1/0.78$) と 100% を越してしまう。CAES と他の貯蔵技術と比較するための効率計算には以下に述べる 3 種類の方法がある。

表 3.1 電力貯蔵技術の経済性

		設 備 面	運 用 面
発 電	負 荷 平 準 化	ピーク電源の削減 ベース電源の設備増 予備力の低減	燃料費の節約 利用率向上による熱効率の上昇 起動回数減少による起動損失の低減 と補修点検作業の軽減
	計 画	立地制約が小さい 建設期間の短縮 不確実な将来の電源計画への柔軟性 一時的、ローカルな負荷増への対応	燃料の貯蔵量、購入量に柔軟性
系 統 信 頼 性		調整設備 (電圧・周波数) の削減 動揺設備の削減 停電時の非常用電源を削除 短絡時の補償設備の削減	助燃費の削減 調整設備等の燃料費削減
送 配 電 そ の 他		設備の削減 建設の繰り延べ	環境保全を改善

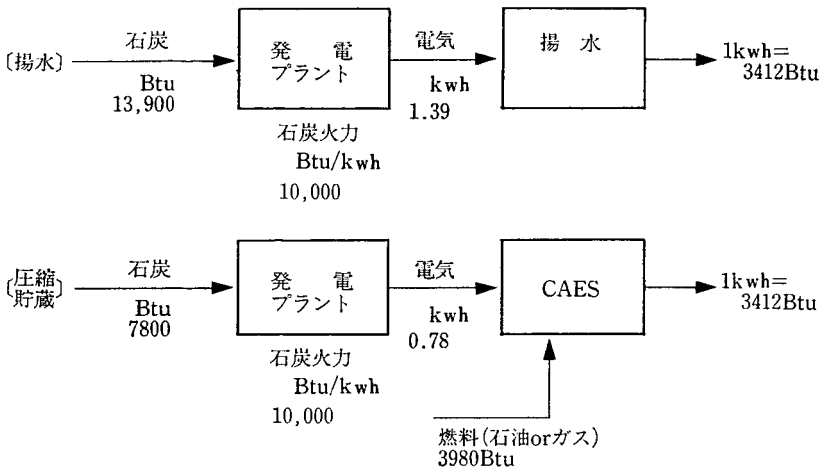


図 3.1 揚水と CAES の貯蔵効率

(1) 変換効率 (E_c): 貯蔵技術の生産エネルギー量を貯蔵技術へ直接投入されるエネルギー量で評価したもの。図 3.1 の貯蔵技術について E_c を求めると次のようになる。

[揚水] $E_c = 1 / 1.39 = 72\%$
 [CAES] $E_c = 1 / (0.78 + 3,980 / 3,412) = 52\%$

変換効率は貯蔵技術に投入する電力 (二次エネルギー) と燃料 (一次エネルギー) を区別しないで計算したものであり、図 3.1 に示す発電プラントの種類に関係なく同じ値になる。

(2) 総合効率 (E_a): 貯蔵技術の生産エネルギー量を発電プラントと貯蔵技術に投入される一次エネルギーで評価したもの。

[揚水] $E_a = 3,412 / 13,900 = 25\%$
 $[= \eta_c \cdot E_c]$
 [CAES] $E_a = 3,412 / (7,800 + 3,980) = 29\%$
 $[= \eta_c \cdot \eta_g / (\eta_c + \eta_g / E_c - 1)]$

ここで η_c は発電プラントの熱効率、 η_g はガスタービンの熱効率である。もし発電プラントに原子力 ($\eta_c = 0.33$) を使うとすると、総合効率は 24% (揚水)、28% (CAES)

となる。総合効率は貯蔵技術で発電する出力エネルギーを供給技術に投入するすべての入力エネルギーで評価する正味のエネルギー効率に相当することから、異なる貯蔵技術の効率を比較するには良い値である。しかし総合効率は発電プラントの効率に依存し、かつ一般に報告されている貯蔵技術の効率値と異なるため親しみにくさがある。

(3) 有効効率 (E_e): 発電プラントで 1 KWH 生産するのに必要な投入一次エネルギーは、貯蔵技術で 1 KWH 生産するのに必要な投入一次エネルギーのどの程度の割合であるかを評価したものである。

[揚水] $E_e = 10,000 / 13,900 = 72\%$
 $[= E_a / \eta_c = E_c]$
 [CAES] $E_e = 10,000 / (7,800 + 3,980) = 85\% [E_a / \eta_c]$

有効効率は総合効率を発電プラントの効率から評価したもので、CAES と他の貯蔵技術の効率比較には適している。有効効率は石炭火力で評価するより効率の悪い原子力で評価する方が大きくなる。CAES の有効効率を原子力で

計算したとき、その値は 88% となる。

表 3.2 は異なる貯蔵技術について、上で述べた三種類の効率の値を計算し示したものである。表の値から CAES を除く全ての貯蔵技術は変換効率と有効効率とが等しいことがわかる。

表 3.2 貯蔵効率の比較 単位：%

システム		変換効率 <i>E_c</i>	総合効率 <i>E_a</i>	有効効率 <i>E_e</i>
揚水(在来型)		72	25	72
蓄電池	鉛	75	26	75
	新型	65	22	65
圧縮空気	MAXI(100 MW)	52	29	85
	MINI(15~50 MW)	50	28	82
地下揚水		72	25	72
フライホイール		70	24	70
超電導		91	31	91

3.2. 建設費

一般に火力や原子力の発電技術はその定格出力で等しい電力を何時までも供給できるが、水力や電力貯蔵技術は容量に制約があるため、いつまでも定格出力で供給することはできない。電力貯蔵技術が発電技術と大きく異なる点は、建設費が発電設備と貯蔵設備とから成っている

ことである。そして、前者は KW に比例しているのに対し、後者は貯蔵容量すなわち KWH に比例して変ることである。それによって一日のピーク時間帯に発電する時間が異なったものになる。貯蔵設備費相当の KWH に比例する費用とは発電の定格出力を一定としたときその値がほぼ貯蔵容量に比例するものである。

その費用は貯蔵技術の種類で異なり、運動エネルギー、磁気エネルギー、あるいは化学エネルギーとして蓄える技術であるフライホイール、超電導、および蓄電池は設備が複雑になるため比較的大きい。それに対し揚水や CAES のようにダムや地下空洞のような自然を利用した貯蔵システムは土木作業が主となるため貯蔵設備の費用は安くなる。また後者は大容量化するのも比較的楽であり、設備大型化による経済的なスケール効果がある。もちろん負荷変動に対する応答性は前者の方が勝っている。

表 3.3 は貯蔵技術の建設費の公表データを示したものである。表の建設費は直接費と間接費との和で、土地代、危険費、建中利子を含んでいない値である。表で CAES の建設費は米国とフランスの場合は地中の岩塩層に空洞を掘っ

表 3.3 貯蔵技術の建設費

技 術	米 国 (1984 年価格)*1				フランス (1985 年価格)*2		日 本 〔万円/KW〕
	電気出力 〔MW〕	建設期間 〔年〕	発電プラント 〔\$/KW〕	貯蔵設備 〔\$/KWH〕	発電プラント 〔\$/KW〕	貯蔵設備 〔\$/KWH〕	
揚水(在来型)	1,000	10	600	10	1,200~2,000	2~100	15~20
鉛蓄電池	1	1	200	156	500~2,000	500~1,000	150~200
新型蓄電池	1	1	190	132	—	—	170~220
圧縮空気 (MAXI)	220	4.5	560	2	~1,200	1,000~2,000	16~22
圧縮空気 (MINI)	25	2.5	445	5	~2,000	30~200	—
地下揚水	2,000	14	600	30	—	—	—
海水揚水	150	—	—	—	—	—	75(パイロット)
フライホイール	1	1	140	600	—	—	—
超電導 (15 年後)	1,000	6	140	160	—	—	25~30

*1 R. B. Schainker and M. Nakhmkin, "Mini-compressed air energy storage (CAES): design, performance and economics", American Power Conference, Apr. 1985.

*2 EDF 研究開発局広報誌 12 号 (1986 年 10 月)

てそこに圧縮空気を貯蔵するときの値で、日本の値は軟質岩盤のときの推定値である。

表から蓄電池とフライホイールは発電規模が小容量で、揚水、CAES および超電導は大容量であることがわかる。また揚水と CAES は貯蔵設備の KWH 当りの建設費が他の技術に比べ小さく貯蔵容量を増やし易いことがわかる。超電導が大容量であるのは大型化しないと全体の建設単価が下がらないためである。表の値を1日の発電能力に対しプロットしてみるとその関係が良くわかる。図 3.2 は揚水、蓄電池、CAES、フライホイール、超電導について、発電能力すなわち定格出力における貯蔵容量が変わる設備を建設するときの建設費の変化を示したものである。建設費からみた経済性では、発電能力に対し、揚水と CAES、それに超電導と蓄電池とが良く似た傾向になっていることがわかる。

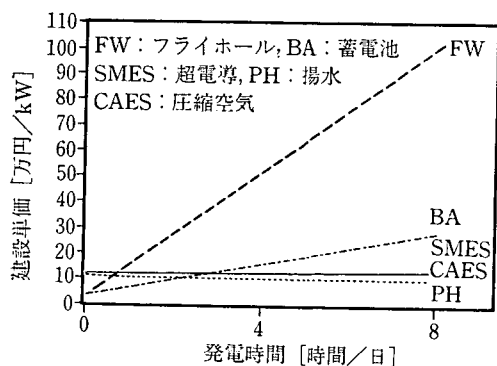


図 3.2 発電時間と建設費

3.3. 発電コスト

発電コストは、発電に要する費用をその技術が生産する発電電力量で割ることにより算出できる。発電電力量が発電端であれば発電端発電コストといい、送電端であれば送電端発電コストというが一般に発電コストというとき後者の値を指す。またプラントの運開初年度における費

用と電力量を基に計算した値を初年度発電コストといい、耐用年間で各年の費用を現在価値換算し1年間の値に均等化して求めた値を均等化発電コストという。初年度発電コストは異種技術の経済性を比較する場合、若干正確さを欠くが計算が容易であるため良く用いられる方法である。それに対し均等化発電コストは技術のライフサイクルでの経済性を表わし技術の経済性比較には有効であるが、割引率やエスカレーションの設定に難しさがある。ここでは経済性の概略検討を行う立場から初年度発電コストでもって各貯蔵技術を比較検討することにする。

発電に必要な年間費用は、固定費と可変費との和で表わされる。固定費は金利、償却、固定資産税などの和でその算定には建設費に年経費率をかける簡易法が良く使われている。可変費は運転保守の変動分と燃料費の和であり稼働時間によって値が変わる。電力貯蔵技術の燃料費は夜間にエネルギーを貯蔵するのに消費する電気代であるが、CAES の場合は昼間のピーク時の発電に使うガスタービン用の燃料も含まれる。固定費と可変費の和である年間費用を式で表わすと次のようになる。

$$TC = FC + VC$$

TC : 年間総費用 [円]

FC : 固定費 [円] = $(PC_g + PC_s \cdot SH) \cdot$

$$G \cdot FCR$$

PC_g : 発電プラント建設単価 [円/KW],

PC_s : 貯蔵設備の建設単価 [円/KWH],

SH : 1日の発電能力 [時間],

G : 発電容量 [KW], FCR : 年経費率

VC : 可変費 [円] = $(EP \cdot Ec \cdot \{1 - (Ec/\eta_g)\} + FC/\eta_g) \cdot G \cdot OH$

EP : 貯蔵源資 [円/KWH], Ec : 変換効率, η_g : ガスタービン効率, FC : 燃料

価格[円/KWH]

上式を使って各貯蔵技術の発電コストを1日の発電時間を4時間と8時間とで求め比較すると表3.4のようになる。ここで建設費は表3.3の値に日米間の購買力平価(203¥/\$:1984)とGNPデフレーター(1.033:1986/1984)とをかけた1986年価格に換算したものである。燃料はLNGとし、1986年の平均価格2.13円/1,000Kcalを用いている。夜間のエネルギー貯蔵に使う電気は原子力発電で供給されるものとし、その源資は燃料サイクルコスト費2.46円/KWHとした。

図3.3と図3.4は設備利用率に対しての経済性を1日の発電能力が4時間と8時間とで比較したものである。図の年間費用[万円/KW]は

発電コストに年間発電電力量をかけたもので、それは設備利用率に対し直線で表わすことができる。1日の発電能力を4時間(年設備利用率で11.4%に相当)とするシステムでは、揚水、圧縮空気、超電導それに蓄電池が在来のガスタービン発電より経済的であることがわかる。しかし発電能力を2倍の8時間(利用率で22.8%)にすると、経済的になる技術は揚水と圧縮空気だけとなり、この2つは大型において経済的であることがわかる。また圧縮空気は経済的には在来型の揚水発電に最も近い技術で、その代替技術として将来期待できるものである。

3.4. 圧縮空気貯蔵の経済性

揚水発電の代替技術としての期待がある圧縮空気貯蔵システムには地中に空洞を掘りそこに

表 3.4 貯蔵技術の発電コスト

技 術 名	建設単価 [万円/KW]		発電コスト [円/KWH]	
	(4時間)	(8時間)	(4時間)	(8時間)
揚水(在来)	13.4	14.3	21.3	10.7
蓄電池	17.3	30.4	34.5	25.8
新型蓄電池	15.1	26.1	31.0	23.4
圧縮空気(MAXI)	11.9	12.1	25.3	11.2
圧縮空気(MINI)	9.8	10.2	21.7	11.0
地下揚水	15.1	17.6	23.6	12.9
フライホール	53.3	103.6	88.8	84.6
超電導	16.4	29.8	28.9	25.1
ガスタービン(在来)	17.0	17.0	37.3	22.1

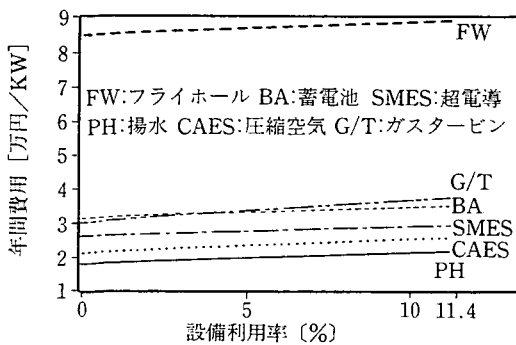


図 3.3 設備利用率と年間費用 (発電時間が4時間/日の場合)

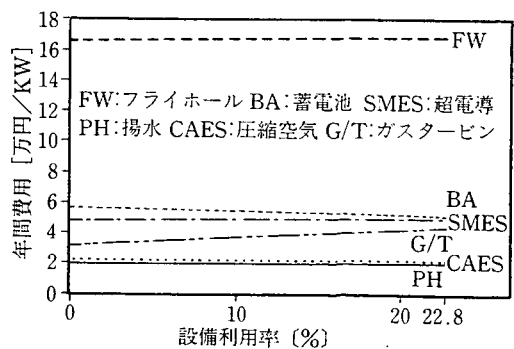


図 3.4 設備利用率と年間費用 (発電時間が8時間/日の場合)

圧縮空気を貯蔵するものと海底に貯気槽を設置し水圧を利用して蓄える方法がある。現在西独などで商用化、あるいは米国で建設計画中のプラントはすべて前者の地中システムである。図 3.5 は地中に圧縮空気を蓄えるシステムを示したものであるが、それには 3 種類の異なる方式がある。岩塩に空洞を掘る方式は塩と水との潮解性と凝固性とを利用し、土木作業が比較的容易であるが、残念なことに我が国にはそのサイトがない。背斜滞水層の利用は空洞を掘る必要がなく最も経済的ではあるが、電力需要地近傍に最適地点を探すのが難しい。

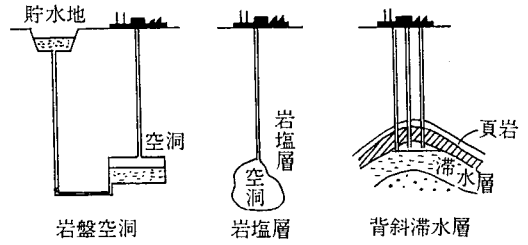


図 3.5 地中における圧縮空気貯蔵方式

表 3.5 は各方式の建設費を、定格出力が異なる 4 種類の発電システムについて示したものである。表には KW と KWH とに比例する費用をそれぞれに示している。それによると KW 費用は方式の違いでそれほど大きな差が見られ

ないのに対し、KWH 費用は大きな違いがある。特に岩盤に空洞を掘るときに建設費は他式に比べ値が大きくなっている。

図 3.6 から図 3.9 までは、表 3.5 の建設費を基に前節と同様、日米間の購買力平価と GNP デフレーターを用いて 1986 年の円に換算し、それから年間費用を設備利用率に対し計算し表わしたものである。図の結果によると、岩塩層はほとんど全ての発電出力において経済的であることがわかる。発電出力が大きいほど経済的と

表 3.5 各方式の建設費(*3)

1984 年価格

タイプ	25 MW		50 MW		100 MW		220 MW	
	発電 [\$/KW]	貯蔵 [\$/KWH]	発電 [\$/KW]	貯蔵 [\$/KWH]	発電 [\$/KW]	貯蔵 [\$/KWH]	発電 [\$/KW]	貯蔵 [\$/KWH]
岩盤空洞	776	39	537	31	440	31	558	6
岩塩空洞	601	6	445	5	421	5	550	2
滞水層	611	0.3	474	0.3	462	0.3	570	0.2

*3 R. B. Schainker and M. Land, "Compressed air energy storage can improve utility load factors", Modern Power Systems, Feb. 1986.

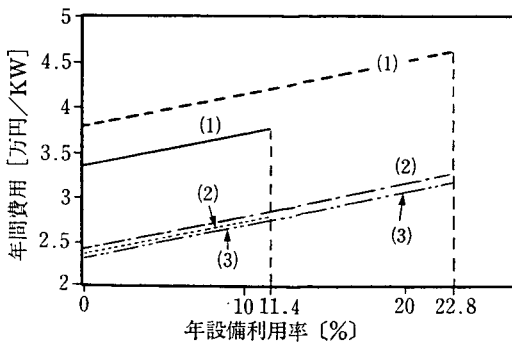


図 3.6 異なる CAES 方式の経済性 (25 MW)
(1): 岩盤 (2): 岩塩 (3): 滞水層

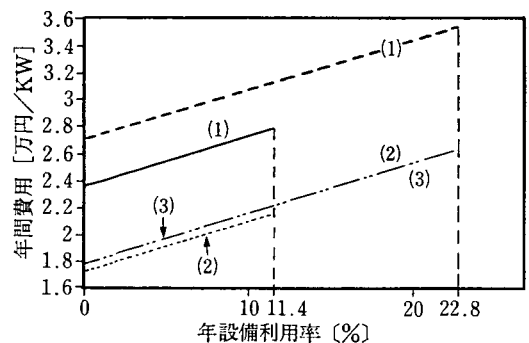


図 3.7 異なる CAES 方式の経済性 (50 MW)
(1): 岩盤 (2): 岩塩 (3): 滞水層

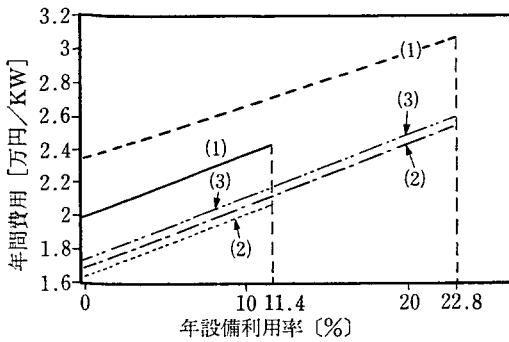


図 3.8 異なる CAES 方式の経済性 (100 MW)
(1):岩盤 (2):岩塩 (3):滞水層

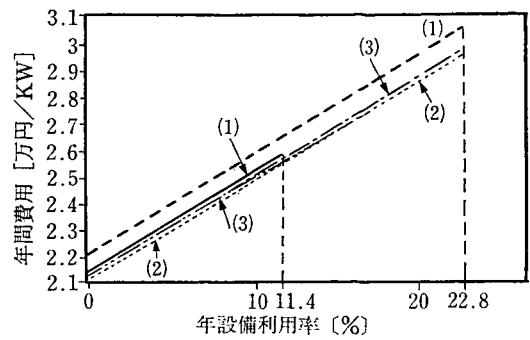


図 3.9 異なる CAES 方式の経済性 (220 MW)
(1):岩盤 (2):岩塩 (3):滞水層

考えられたが、それは 100 MW までで、220 MW になるとガスタービンが 2 基必要となり付帯設備も増え経済性の向上はあまり期待できない。

4. おわりに

本研究は各種貯蔵技術の効率および経済性の分析法を紹介し、米国データを用いて異なる貯蔵技術の発電コストを概算し比較検討したものである。その結果、以下に述べる事が明らかになった。

- ① CAES と他の貯蔵技術の効率を比較するには有効効率を使うのが好ましい。
- ② 建設費には KW と KWH とに比例する費用があり、揚水と CAES は、KWH 費用が小さい、すなわち貯蔵設備容量を大きくしても建設費がそれほど高くない技術である。
- ③ 発電コストでは在来型のガスタービン発電に比べ、揚水と CAES が有利であり将来は超電導も経済的に有利となる可能性がある。

④ CAES は、揚水の代替技術として近い将来期待できる可能性がある。

⑤ CAES には、地中システムでは岩塩層、岩盤、背斜滞水層の方式があり、その中で経済的には岩塩層が最も有利と試算されたが、残念なことに我が国には立地点がない。

今回の経済試算は米国データをもとに行ったもので、各貯蔵技術の経済性についての特徴を効率、建設費および発電コストから示したものであって、評価においては正確さに欠けている。我が国で貯蔵技術の導入を考えるには、各技術についてのサイト候補地を調べ詳細な経済計算を基にその成立性を検討して行かなければならない。また導入に際しては単なる発電コストの試算だけでなく、電源構成面での運用と計画においてもその有効性を調べておく必要がある。

(うちやま ようじ
きよの けいこ
経済部 エネルギー研究室)