

軟岩地盤での圧縮空気貯槽建設コストのパラメトリックスタディ

PARAMETRIC STUDY OF COMPRESSED AIR STORAGE TANK CONSTRUCTION COST FOR SOFT ROCK

川崎 了*・岡本敏郎**・田中幸久***

Satoru KAWASAKI, Toshiro OKAMOTO and Yukihiisa TANAKA

The feasibility of a compressed air energy storage system (CAES) depends on whether it is economic to construct compressed air storage tanks in deep underground. CRIEPI is proposing a new system called ACC-CAES whose thermal efficiency and availability factor are higher than those of conventional CAES system. If compressed air storage facilities can be constructed in deep soft rock ground widely distributed over metropolitan districts, there will be more sites for the ACC-CAES system. This paper shows the investigating results concerning the storage tank construction cost and the economical efficiency of the conventional CAES system and the ACC-CAES system.

1. はじめに

将来の電力貯蔵技術として有望視されている圧縮空気貯蔵（CAES）ガスタービン発電システムは、送電や燃料確保の面から電力の主な需要地である大都市近郊に建設するのが有利である。また、地上空間の有効利用や経済性を考えると、圧縮空気貯槽を地下に埋設することが望ましい。これまでに当所は、他の電力貯蔵技術と比較することにより本システムの利点と経済性について明らかにし¹⁾、最近では新たに改良型複合発電（ACC）とCAESの連携を考えたACC-CAESシステム^{2)・3)}を提案して効率と運用に関する検討を進めている。

一方、大都市近郊の地盤深部には、軟岩が広く分布する場合が少なくないため、軟岩地盤に圧縮空気貯槽を建設する時のコスト評価を実施する必要がある。既報告⁴⁾では、コスト評価の対象を貯槽部に限定し、特に泥水掘削・鋼管シャフト方式⁵⁾に関して、貯槽埋設深度および貯蔵方式が建設コストに及ぼす影響について報告した。本報告では、従来のCAESとACC-CAESの両システムを対象とし、運転時間および貯蔵方式をパラメトリックに変えた貯槽建設コストの算出を行うとともに、揚水発電の発電コストと経済性比較を実施した結果を述べる。

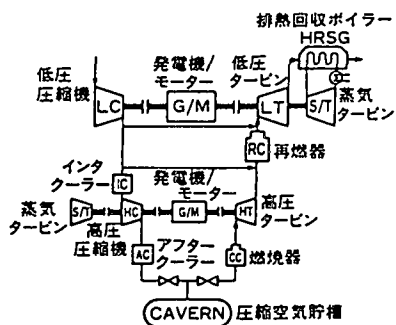
2. ACC-CAESシステムの概要

従来のCAESシステムとACC-CAESシステムの相違を図-1に示す。これまでのCAESでは、ガスタービンの排熱を再生器による燃焼前の圧縮空気の加温にしか利用していなかった。しかし、ACC-CAESでは、より効率的な利用としてガスタービンの排熱により蒸気タービンを稼働させ、効率を向上させている。また、運転パターンとして、ミドル発電時にはACC発電ができるように2軸構成とすることにより経済性を高めている。従来のCAES

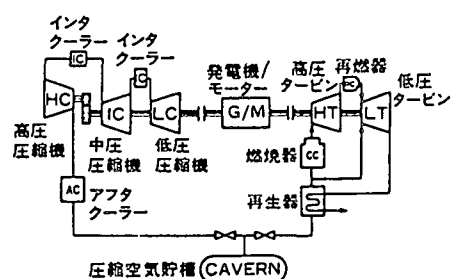
* 正会員 (財)電力中央研究所我孫子研究所耐震部土質グループ

** 正会員 工博 (財)電力中央研究所企画部

*** 正会員 工博 (財)電力中央研究所我孫子研究所耐震部土質グループ



(a) 700MW級ACC-CAESのシステム



(b) 400MW級CAESのシステム

図-1 ACC-CAESおよび従来のCAESのシステム

についても、ミドル発電用にガスタービン発電をすることも考えられるが、効率が低いことから得策ではない。ACC-CAESの場合には、発電出力が700MWと大容量の発電が可能となるのも大きな魅力である。

ガスタービン発電機の機種としては、現在最も効率の高いGE社の50Hz向MS9001FA (9FA)などが考えられる。出力の大容量化に伴う開発課題としては、クラッチ、減速機、中間冷却器、後部冷却器などがあるが、ACC-CAESの実用化は技術的に十分可能と考えられる^{2), 3)}。

3. 貯蔵方式とその特徴

泥水掘削・鋼管シャフト方式による圧縮空気の貯蔵方式としては、図-2に示す水置換方式と乾方式の2つのタイプが考えられる。水置換方式では、貯槽内に水を入れ、貯槽底部から地表部の貯水池へ水が通じている。このため、貯槽内水面と貯水池水面との水頭差が貯槽内空気圧と等しくなり、空気圧の変動とともに貯槽内水面が上下する。貯槽最深部に貯槽内水面がある場合には、貯槽内空気圧は地盤内応力すなわち貯槽にかかる外圧とほぼ等しくなり、貯槽にかかる応力は非常に小さい。ただし、従来の検討によれば、貯槽は内径6m、長さ400mの鋼管シャフトであることから、貯槽最上部では貯槽にかかる外圧と貯蔵空気圧である内圧の差が数十 kgf/cm^2 程度大きく、これで貯槽の最大厚さが決定される。以上のようにより水置換方式で地下貯槽容量を確保するためには、例えば40～80 kgf/cm^2 の貯蔵空気圧に対して深度400～800mの大深度地盤中に貯槽が埋設される⁴⁾。

一方、乾方式は貯槽内がすべて圧縮空気のみで満たされるものである。また、水置換方式が貯槽内の圧縮空気すべてを使用可能であるのに対し、乾方式では使用空気圧以下になると圧縮空気は利用できない。例えば、使用空気圧を40～80 kgf/cm^2 とすると、貯槽内に残る40 kgf/cm^2 の空気量が使用できず、その分貯槽容量は大きくなる。また、貯槽に加わる周辺地盤からの外圧と貯槽内空気圧との差により貯槽が設計されるため、地中深く埋設すると貯槽は薄く経済的であるが、掘削費が増大する。これら両者の比重を考える必要があるが、これまでの検討によれば浅い方が経済的であり、貯槽は水置換方式より浅い深度400m以浅の地盤内に埋設される⁴⁾。

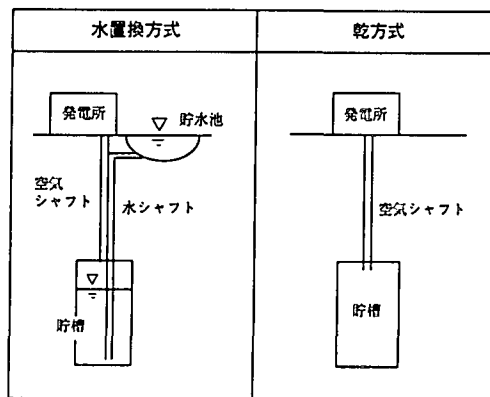


図-2 貯蔵方式の種類

表－１ CAESの検討ケース

ケース番号	発電出力	貯蔵方式		運転時間 (hr)			貯蔵圧力 (kg/cm ²)	貯槽埋設深度 (m)	
		乾方式	水置換方式	8	6	4		0～400	400～800
W48-4-8	400MW		○	○			○		○
W48-4-6					○		○		○
W48-4-4			○			○	○		○
D04-4-8 (従来型)		○		○			○	○	
D04-4-6	700MW	○			○		○	○	
D04-4-4		○				○	○	○	
W48-7-8			○	○			○		○
W48-7-6			○		○		○		○
W48-7-4	700MW (ACC)		○			○	○		○
D04-7-8		○		○			○	○	
D04-7-6		○			○		○	○	
D04-7-4		○				○	○	○	

※ケース番号は、例えばW48-7-6は左から、W：水置換方式、48：貯槽埋設深度400～800m、7：発電出力700MW、6：運転時間6時間を表す。

表－２ 建設工期およびコストの一覧表

発電出力	貯蔵方式	ケース番号	工期 (年)	掘削費等 (億円)	鋼材費 (億円)	貯水池費 (億円)	合計 (億円)
400MW (従来型)	水置換方式	W48-4-8	4.8	5 6 3	2 8 6	1 4 2	9 9 1
		W48-4-6	4.8	4 0 9	2 0 5	1 0 7	7 2 1
		W48-4-4	4.8	2 8 2	1 4 3	7 7	5 0 2
	乾方式	D04-4-8	4.1	5 9 4	7 1 0	—	1 3 0 4
		D04-4-6	4.4	4 3 2	5 2 6	—	9 5 8
		D04-4-4	3.3	3 2 6	3 6 8	—	6 9 4
700MW (ACC)	水置換方式	W48-7-8	4.8	7 1 7	3 6 8	1 7 9	1 2 6 4
		W48-7-6	4.8	5 6 3	2 8 6	1 4 2	9 9 1
		W48-7-4	3.8	3 8 1	1 8 4	9 4	6 5 9
	乾方式	D04-7-8	4.1	7 9 2	9 4 7	—	1 7 3 9
		D04-7-6	4.1	5 9 4	7 1 0	—	1 3 0 4
		D04-7-4	4.1	3 9 6	4 7 3	—	8 6 9

※ケース番号は、例えばW48-7-6は左から、W：水置換方式、48：貯槽埋設深度400～800m、7：発電出力700MW、6：運転時間6時間を表す。

4. 貯槽建設コストの算出

検討を実施した全ケースを、まとめて表－１に示す。発電出力が400MWについては従来のCAESを、また700MWについてはACC-CAESを対象としている。また、同表中の最上段の各項目が、今回検討対象としたパラメータである。左端のケース番号は、例えばW48-7-6の場合は、左からW：水置換方式（D：乾方式）、48：貯槽埋設深度400～800m、7：発電出力700MW、6：運転時間6時間の略記である。運転時間については8時間を基本とし、比較のために6時間と4時間の2つを加えた。貯槽埋設深度に関しては、既往の検討結果⁴⁾を参考にして、貯蔵方式ごとに最適となる深度、すなわち水置換方式では深度400～800m、一方の乾方式では深度0～400mをそれぞれ選定した。その他の建設コスト計算に必要な前提条件については、文献4)を参照されたい。

表－１の検討ケースにより求めた建設工期および建設コストの一覧を、まとめて表－２に示す。建設工期については、ほぼ2～5年を前提にしていることから、複数の立坑の掘削および建込みを同時に行う多連方式としている。運転時間と総建設コストの関係では、当然のことながら運転時間が大きいほど総建設コストが高くなっている。また、運転時間が大きくなるに連れて、総建設コストの増え方は若干小さくなる傾向にある。この理由は、運転時間の増大に伴う掘削費、鋼材費、貯水池費（水置換方式のみ）の増加割合が小さくなるためである。貯蔵方式に関しては、従来のCAESおよびACC-CAESともに水置換方式の方がコスト的に有利である。次の経済性評価では、従来のCAESおよびACC-CAESともに運転時間が8時間の水置換方式を検討対象とする。

5. 経済性評価

一般に、発電技術の経済性は発電コストの算定が基本となる。発電コストは、固定費と可変費の和で表される。固定費は、建設単価に年経費率を乗じ、年間発電時間で除して求められる。また、可変費については、そのほとんどが燃料費であり、燃料単価を効率で除して求められる。

発電コスト＝固定費（発電プラント＋貯槽）＋燃料費（夜間電気＋LNG燃料）

固定費＝
$$\frac{\text{発電プラント建設費} \times \text{年経費率} \alpha_1 + \text{貯槽建設費} \times \text{年経費率} \alpha_2}{\text{プラント出力} \times \text{年間発電時間} \times (1 - \text{所内率})}$$

燃料費＝
$$\frac{\text{圧縮機動力} \times \text{年間圧縮時間} \times \text{夜間電力代} + \text{燃料消費} \times \text{年間発電時間} \times \text{LNG燃料価格}}{\text{プラント出力} \times \text{年間発電時間} \times (1 - \text{所内率})}$$

経済性の検討に際しては、ACC-CAESで681.5MWの場合と、従来のCAESで408.3MWの場合について実施した。両CAESシステムの場合のプラント建設費を表－３に、また貯槽建設費を表－４にそれぞれ示す。なお、比較のための揚水発電の発電コストは、以下の算出式により求めた。

表-3 CAESプラント建設費内訳

(単位: 億円)				
	400MW級 CAES (408.3MW)	備 考	700MW級 ACC-CAES (681.5MW)	備 考
土 地	58 (0)	170×170=29000m ² 20万円/㎡	119.3	土 地 1.75万円/㎡
建 物・構築物	85 (83)	建 物 34 構築物 51 0.83万円/㎡ 1.25万円/㎡	147.2	建 物 0.81万円/㎡ 構築物 1.35万円/㎡
ガスタービン	240 (240)	ガスタービン 190 再 生 器 50	807	機器収容 11.8万円/kW
その他機器	95 (83)	電気設備増設 70 (60) 環境設備 25		8.20万円/㎡
総 価 値	50 (49)	機械・電気設備 335億円の15%	182	総価値 2.67万円/kW
プラント費用	528 (459)	12.9 万円/kW	1225.5	18.4万円/kW
LNG基地負担	125 (0)		211*	
合 計	653 (459)	16万円/kW (11.2万円/kW)	1466.5	21.5万円/kW

() は増設、リブレース

* CAES (408.3 MW) より推定: $125 \times \frac{681.5}{408.3} \times \frac{0.632}{0.625} = 211$

表-4 貯槽建設費内訳

条 件	400MW級 CAES		700MW級 ACC-CAES	
	貯蔵方式	鋼管シャフト方式	鋼管シャフト方式	
貯蔵圧力	40~80 kg/cm ²	40~80 kg/cm ²	40~80 kg/cm ²	
貯槽埋設深度	400~800 m	400~800 m	400~800 m	
貯槽容量	14.9万m ³	19.9万m ³	19.9万m ³	
内 訳	掘削費等 (億円)	563	717	
	鋼材費 (億円)	286	368	
	貯水池費 (億円)	142	179	
建 設 費 (億円)	991	1264		
容量単価 (万円/㎡)	66.5	63.5		
容量単価 (万円/kW)	24.3	18.5		

$$\text{固定費} = \frac{\text{発電所建設費} \times \text{年経費率} \alpha_2}{\text{プラント出力} \times \text{年間発電時間}}$$

$$\text{燃料費} = \frac{\text{夜間電気代}}{\text{揚水発電の貯蔵効率}}$$

以上の算出式により計算した結果を図-3に示す。同図からは、ピーク供給分の設備利用率が10~25%と変化しても、ACC-CAESの発電コストはほとんど変化しないこと、また、その値は約19円/kWh (リブレース) および約22円/kWh (新設) であることがわかる。一方、従来のCAESではピーク供給分の設備利用率により、約24~54円/kWh (リブレース)、約28~63円/kWh (新設) と発電コストが大きく変動する。これらの結果より、ACC-CAESの発電コストが従来のCAESに比べて非常に有利であることがわかる。

揚水発電の発電コストについても、設備利用率によって大きく変動し、約14~28円/kWh (20万円/kW)、約16~34円/kWh (25万円/kW)、約19~40円/kWh (30万円/kW) である。ACC-CAESと揚水の発電コストの比較では、設備利用率が15%以下の範囲において、揚水の建設単価に関わらずACC-CAESの方が安くなっている。

一方、硬岩を対象にした水封方式によるACC-CAESに関しては、700MW級で発電コストが約16円/kWh (新設) という結果が得られている⁵⁾。今回の検討では、ACC-CAESにより従来のCAESに比べて大幅なコストダウンが図られたが、大都市近郊の軟岩を対象としたACC-CAESが、我が国における次世代の電力貯蔵技術として早期に実現するためには、発電コストに関する一層のコストダウンが必要であり、今後の課題である。また、最近になって、従来よりも低圧力 (30kgf/cm²) で高効率の運転が可能な発電システムが考案されたので、今後はこの種のシステムを対象として圧縮空気貯槽の建設に関する技術的および経済的な評価を行う予定である。

6. まとめ

本検討で得られた主な結論をまとめると、以下の通りである。

(1) 貯槽建設コスト算出

検討ケースごとに、貯槽建設費を項目別に分けて詳細に算出し、従来のCAES (発電出力400MW) および

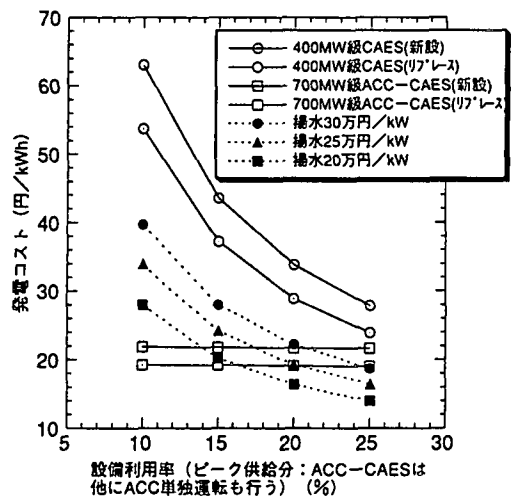


図-3 CAES, ACC-CAES, 揚水の発電コスト

ACC-CAES（発電出力700MW）による貯槽建設コストを明らかにした。

（２）ACC-CAESと従来のCAESの発電コストの比較

ACC-CAESと従来のCAESの発電コストに関する経済性比較を実施した。その結果、設備利用率が10～25%と変化しても、ACC-CAESの発電コストはほとんど変化しないこと、また、その値は約19円/kWh（リブレース）および約22円/kWh（新設）であることがわかった。これらの結果、従来のCAESに比べてACC-CAESの発電コストが非常に有利であることがわかった。

（３）ACC-CAESと揚水の発電コストの比較

ACC-CAESと揚水の発電コストの比較を実施した。設備利用率が15%以下の範囲においては、揚水の建設単価に関わらずACC-CAESの方が揚水よりも安い結果が得られた。

7. 参考文献

- 1) 内山洋司，角湯正剛：圧縮空気貯蔵発電システムの利点と経済性，電力中央研究所報告，Y90002，平成2年5月。
- 2) 森塚秀人，森永雅彦，三巻利夫：ACC併設型CAES発電システムの検討—熱効率解析と運用方式について—，電力中央研究所報告，W93009，平成5年11月。
- 3) 森永雅彦，森塚秀人，三巻利夫：ACC併設型CAES発電システムに関する概念設計，電力中央研究所報告，W93009，平成6年6月。
- 4) 例えば，田中幸久，岡本敏郎，川崎 了，藤原義一：軟岩CAESにおける貯槽埋設深度と建設コストとの関連性，都市地下空間利用における大深度地盤に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp.235～240，平成5年11月。
- 5) 西 好一，川崎 了，藤原義一：軟岩地盤における圧縮空気貯蔵用空洞建設技術（その1）—鋼管シャフト方式および凍結横孔・凍結拡張空洞方式の検討—，電力中央研究所報告，U90049，平成2年12月。
- 6) 日比野敏：水封方式によるACC-CAESの成立性評価，第6回圧縮空気貯蔵（CAES）研究連絡会，pp.1～8，1996年5月。