

(72) 都市型の水没圧気タンクによる水質浄化と

電力貯蔵の兼用施設構想と経済性の概念

東海大学工学部 正会員 林 正夫

Feasibility Study of Common Use of Compressed Air Energy Storage
for Gas Turbine System with Sewage Treatment -Technology and Economy-

Masao HAYASHI, Tokai University

Abstract

Apart from the conventional CAES in Salt dome and hard rock cavern, urban CAES has been proposed by the author that is based on the principle of submerged support and is relatively inherent safe in the deep soft rock.

This proposal is related to the CAES-GT combined with deep shaft aeration supplied from stored compressed air by the economic power in deep night and gasification of residual sludge by ultra deep oxidation reactor in the bottom of CAES tank.

Stability of CAES tank is based on the conventional reverse circulation muddy water excavation of deep shaft using the shaft boring machine with multi shaft and steel casing with back fill concrete. CAES tank reserves 40,000m³ x 48 bar air in deep night and reserves peak sewage in the same volume in midday. Preliminary evaluation of economy of this common system is discussed .

はじめに
地球の水質環境の向上は世界の課題であり省エネルギー・省資源・土地節約型の経済的な技術を構想した。我が国の下水道の普及率は37%、西欧90%の現実(図1)と我が国の電力設備の負荷率がピーク需要の伸びの結果、年とともに低下する資源多消費の現実(図2)を改善できる都市型のCAES、具体的には地下700mまで直径7mないし12mの鋼管立て坑を水没状態で建造しCAESタンク40,000m³とし、地表部150m深さまでは下水処理の深層曝気槽として利用し、CAESタンクの底部には残留汚泥の液相酸化の高温・高圧のガス化炉を設けると曝気・汚泥処理・電力貯蔵(図3、図4)の立体格納となる。この立て坑型の下水処理と都市型の深夜電力貯蔵のCAES-GTの一体化システムは、岩盤力学的に硬岩なら通常の有人の掘削工法、中硬岩・軟岩なら水没工法とくに堆積軟岩である泥岩に着目すると、在来技術であるリバス工法で強度と透水性に応じ粘り加重泥水で坑壁を保護しながら、シャフトボーリング機による3本の平行軸で

相反回転の大口径掘削はかなり可能である。加重泥水環境でメンブレン袋にコンクリートを圧入・固化後、加重泥水を淡水化すれば覆工部に比重差に応じたプレストレス導入も期待できよう。

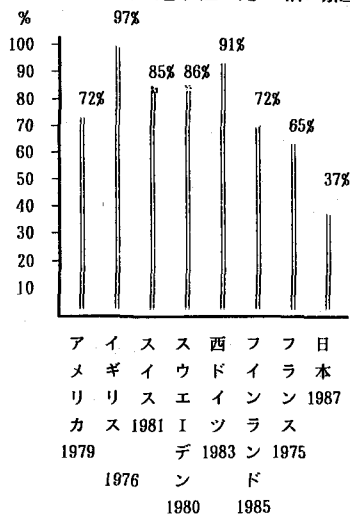


図 1 各国の下水道の普及率
(小宮山重四郎)

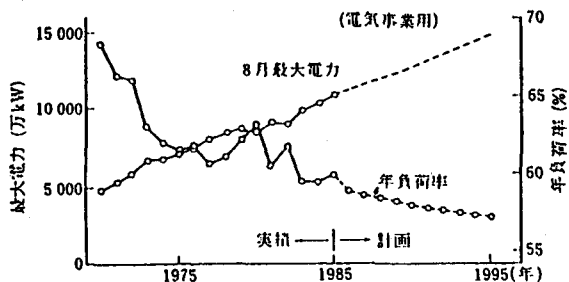


図 2 我が国の最大電力の伸びと
発電設備の年負荷率の低下
(電気事業連合会)

1. 下水処理と圧気電力貯蔵の兼用システムの特長

このシステムは1991年9月に土木学会第1回学術振興基金の対象となった筆者の技術構想の作品で、従来の下水処理、従来のCAESと本提案の"Water Cleaning-Pencil CAES"は幾つかの差異がある。

時間と空間を共用するシステム運用の概念(表1)と経済効果の要素(表2)を今後専門家達と研究を期待してい

図3には 下水処理と圧気電力貯蔵の兼用プラントの基本システムを示す。実用技術に近いので第1世代と呼ぶ。

まず直径7mの鋼管を深さ700mまで地中に挿入し、その下部660m分を圧気空間Cとしその上部に重コンクリートを打設し重力部gを形成し、立て坑の頂部には円筒部の外から最初沈殿池S_i最終沈殿池S_f、その内側にデープシャフトdの上昇管d_uと下降管d_dさらに内に送水管wを設けることにより機能的立体格納をはかる。

送水管wのなかには、さらに送気管aと汚泥酸化管oを設ける。この鋼管を3本設けると所要の処理を果たす。

下水処理	10万L/d (増設 CAES) -- 25万人分 / 3本
	25万L/d (既設 標準)
発電	3.5万kw = 12本 / 3本 (圧気貯蔵 460m)

- S_i : 最初沈殿池
- S_f : 最終沈殿池
- d : ディープシャフト
- dh : 頭部
- du : 上昇管
- dd : 下降管
- w : 送水管
- a : 送気管
- o : 汚泥酸化管
- g : 重力部
- C : 圧気貯蔵部
- W : 下水貯蔵部

深夜は圧気を貯蔵
(下水を圧気で押し上げる)

昼間は下水を貯蔵
(圧気を下水で置換)

表1 下水処理と圧縮空気による電力貯蔵の兼用システム (地下の空間を共有し時間も共用する概念)

		圧気タンクの共用*	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
下水処理	下水	流入													
		最初沈殿池													
		圧気タンクに貯留(嫌気) *													
		圧気タンクから深層曝気管へ *													
		深層曝気管で24時間 曝気処理 *													
下水処理	汚泥	最終沈殿池													
		最初沈殿池													
		圧気タンクで沈殿させ *													
		残留汚泥(活性)を深層曝気管へ *													
		残留汚泥(有機)酸化管へ *													
圧縮空気による電力貯蔵	圧縮空気貯蔵	深夜に圧気を貯蔵 *													
		圧気の排熱で下水を加熱 *													
		圧気タンク内で下水を加熱 *													
		昼間に圧気をガスタービンへ *													
	圧縮機の排熱	下水を加熱 *													
		蓄熱 *													
	下水	深層曝気に24時間供給 *													
		下水場内の既設プラントでの曝気に24時間供給 *													
	下水	下水場内の既設プラントでの曝気に24時間供給 *													
		下水場内の既設プラントでの曝気に24時間供給 *													
	発電	昼間にガスタービンに供給 *													

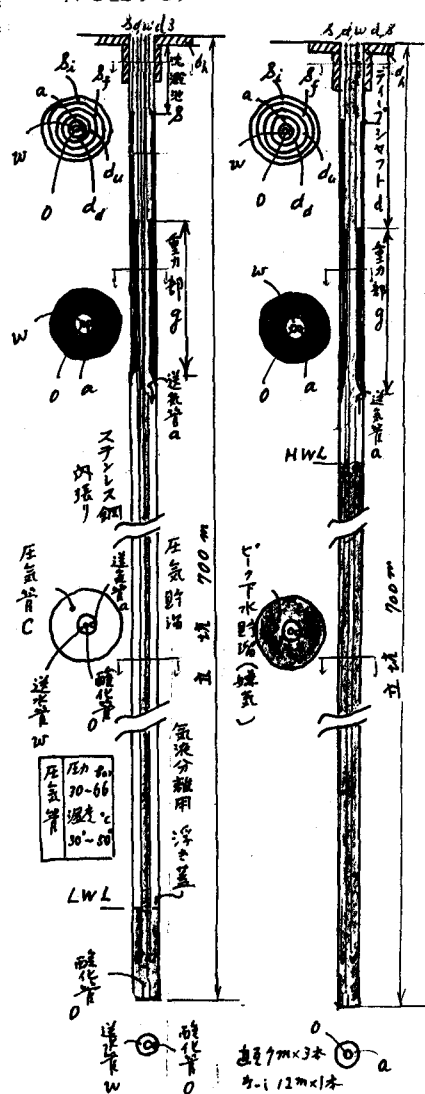


図3 下水処理と圧気貯蔵兼用システム (第1世代; 直管)

表2 下水処理と圧気電力貯蔵の兼用システムの経済効果の諸因子

項目		経済効果の因子	
下水処理	水処理	資本費の節約	デープシャフトがCAES管に頂部に内蔵でき 地中空間を共用できる
	汚泥処理	燃料費の節約	ピーク下水が深夜の負荷の少ない時間帯でCAESタンクに貯留されるので水処理施設がピークカットされ 設備節約
			ピーク下水が深夜までCAESタンクに貯留され加熱される 標準活性汚泥法にくらべ デープシャフトで電力費節約
			しかも その電力費が深夜電力の安いコストに振りかわる。
電力貯蔵	都市分散の蓄電が可能	資本費の節約	超深層融氷融雪化管がCAES管の底部に内蔵でき地中空間を共用できる
		燃料費の節約	寒冷地でも無加熱で融氷融雪 超深層融氷融雪化管からの放熱量で貯留下水を加熱でき省エネ効果
	空地・環境コスト	増設・新設が容易	発電所・変電所を新設する土地は長期的リード タイムを要するが既存の下水場の地下に主として増設・新設するので、本拠は公共・公益事業の協力によって計画的に実現できる。環境的にも、従来の下水場に比べ、臭気の除去が閉塞空間なので容易である。騒音は建屋で防音設計で対処できる。
	夜間電力大量利用	下水事業のピーク電力需要をカット	日本の年間総電力量の0.7%は下水場でピーク時間帯に利用されており、地球環境の改善の要請が強まるので今後さらにピーク電力を圧迫する傾向にある。その大部分はこのシステムによって深夜電力利用物に逐次変換が可能である。下水場の周辺地域のピーク電力供給を助ける出力が概算CAESタンクから 十分に期待できる。
都市の地下利用	土地節約	公共事業費の有効利用	公共事業費のなかで、土地取得の予算が節約でき、実質工事促進できる。

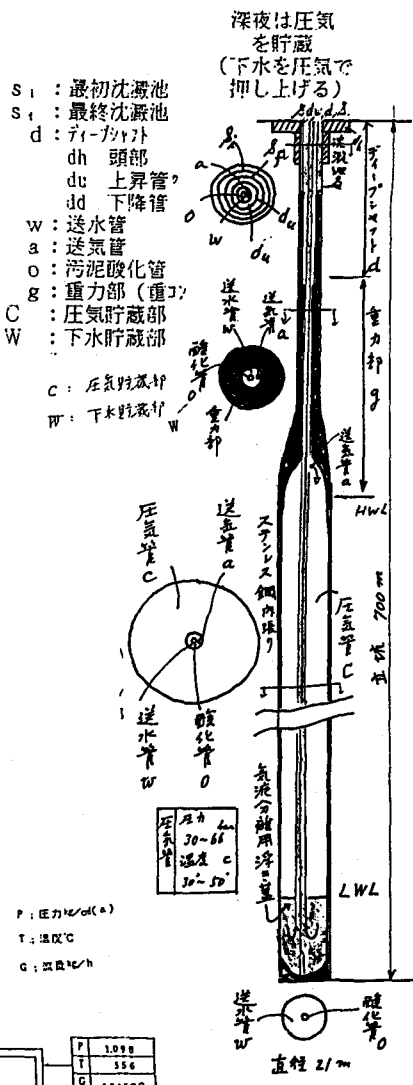


図4 下水処理と圧気貯蔵の兼用システム 構想
・第2世代；拡張方式

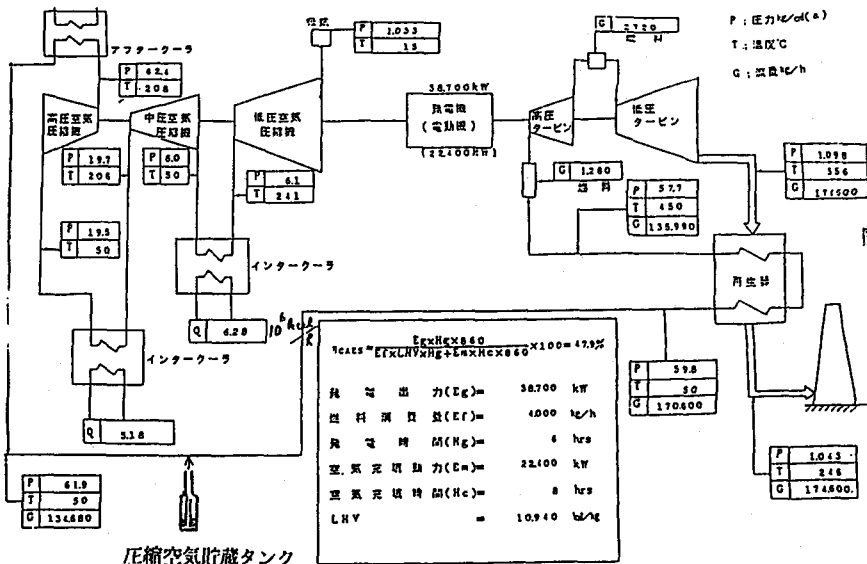


図5 圧縮空気貯蔵・ガスタービン発電システム概念 (35000kW級、60気圧級)

図4には、岩盤力学的あるいは地中空間開発工学的には第2世代と目される地中深部での拡張空間の利用をイメージとして示す。筆者はかねてから、水没拡張ドーム空間は、全断面工法か外周壁先行工法あるいは、中間的に逐次補強の工法等を提案し、水没拡張掘削機の開発は可能と考えてきた。次はコンクリート・ファイバーコンクリート等を加重泥水下で高品質化することに関心が次第に移ってきている。実験的には、加重泥水の粘度等を調整しながらメンブレン型枠で覆工コンクリートを打設する可能性を確かめつつある。そのメンブレンを袋とし、その内になまコンクリートを圧入し、袋の外の加重泥水の周圧が作用した状態で固化させれば、超深度で高強度のコンクリートが期待できると期待している。固化後、加重泥水を淡水化しその間の差圧だけプレストレスを覆工コンクリートに与えることも期待している。この第2世代の研究が実ればCAESの貯蔵容量が非線形的に拡大し経済効果はさらに大きくなる。図5にはMHIの商用機MF111をベースとしたCAES用ガスタービン発電システムを示す。

2. 下水処理と圧気電力貯蔵の兼用システム構成の設備

- 1) 下水場にCAESとディープシャフトと汚泥液相酸化管を立体化して増設する。増設10万m³/dのディープシャフト(150m)の必要容量は実績より10万m³/d×(BOD140mg/ℓ)÷((F/M比1.0/d)×(MLSS 2500 mg/ℓ))=5600 m³とし、残留汚泥処理は酸化管で行う(今後、開発)。ここに、F/MとはFood/MicroorganismでMLSSとはMixed Liquor Suspended Solidである。
- 2) CASEタンクは地質に応じた水没工法(主としてリバース工法、鉄管裏込めの第1世代工法)とし、7m口径管を3本設け、深さ300mから660m、平均気圧48barにおける貯蔵容量は4.2万m³とする。今回のCASEタンク(4万m³級)の建設単価は地質によって異なり、未だ確定しにくいので表4のように感度解析の形式で40~50万円/m³として評価した。ちなみに地下発電所空洞(10万m³級)は4万円/m³程度、シールドトンネル(20万m³級)は23万円/m³程度、軟岩CASEタンクの概念設計(7万m³級)では30万円/m³程度である。今回のCASE用タンクの年経費率は12%とした。
- 3) ディープシャフトと沈澱池は全体として16億円を見込み、年経費率を10%とした。汚泥酸化管は7億円を見込み年経費率は10%を見込んだ。
- 4) CASE用発電システムは6.1億円、18%を見込んだ。LNG燃料4t/hの単価は3.68円/kwhに相当する。CASEタンクの気圧の変動幅による熱落差は9.6%である。深夜のコンプレサ用電力の受電コストは6.5円/kwh、昼間のピーク発電卸売価格は16円/kwhと見込んだ。ちなみに揚水発電所を新設すれば、送電費を無視しても25円/kwh程度かかる。現在の下水処理の電力コストは平均21.7円/kwh×1.0kwh/m³を見込みCASEによる曝気その他に関する電力費の比較は表3に示す。

表3 年間電力費(億円/年)

A 標準方式	増設 既設	21.7円/kwh × 1.0 kwh/m ³ × 100,000m ³ × 300d	6.5
		21.7円/kwh × 1.0 kwh/m ³ × 250,000m ³ × 300d	16.3
		計	22.8
B CASE	増設(ディープシャフト) 既設(標準)	6.5円/kwh × 0.8 kwh/m ³ × 100,000m ³ × 300d	1.7
		(6.5+3.7) 円/kwh × 1.0 kwh/m ³ × 250,000 m ³ × 300d	7.7
		計	9.4

CASE燃料の単価 (3円/kcal) × (860 kcal/kwh) × (1/Y kwh/h) = 3.68円/kwh Y=0.70

年間の残余電力量のピーク電力としての市場価格は (制度上は今後検討)

(35000kw×12.4h-100000m³×0.8 kwh/m³-250000m³×1.0 kwh/m³) × 300d × 16円/kwh
=(434000-80000-250000)kwh × 300d × 16円/kwh
=104000kwh × 300d × 16円/kwh = 4.99億円(卸売電力)
= 35000kwh × 3.0h × 300d × 16円/kwh

- 5) 汚泥処理の燃料費等のエネルギー解析は今後の研究課題としたい。
- 6) 下水処理の負担金徴集は66円/m³とした。

3. 経済性評価システムの概念の模索

何分新しい構想なので、今後次第に正しい評価システムにちかづくための批判を受けるのに役立てる叩き台として現在の標準活性汚泥法との比較のキーポイントを表4のように示してみた。下水処理事業の現在のコストはプラントの規接その他により大幅に異なるが、ここでは22万円/m³、年間経費1.2%と想定し、土地代は0.6m³/m³×10万円/m³とし、年金利7%を見込んだ。新システムは土地代が1/3に節約できると見込んだ。

表4 現在方式Aと新方式Bの経済性の比較

新方式で増設10万トン分と既設25万トン分の総合運用による
下水事業の年間経費の節約の可能性：億円/年

	現在方式Aと新方式Bの比較	A標準方式で10万t増設し既設25万tにも供給	B新方式で10万t増設し既設25万tにも供給	B-A コストダウン	記 事
	(CASE用パイプ 建設単価)		40万/㎡ 45 50	40万/㎡ 45 50	
年間経費 億円/年	固定費と経費				
	増設分の建設 ディ・シャフト 汚泥炭化管 CASE用電力機器	-26.4	-24.0 -27.0 -30.0 -1.6 -1.6 -1.6 -0.7 -0.7 -0.7 -11.0 -11.0 -11.0	-10.9 -13.9 -16.9	新方式の設備そのものはコストアップ
	土地代金利	-4.2	-1.4	2.8	土地は節約できる
	動力費 (電気代；増設分、既設分 (燃料代) (受電代) 地域供給(卸売)年間額	-6.5, -16.3	-1.7, -7.7 (-4.6) (-5.2) 5.0	4.8, 8.6 5.0	電気代は59%を節約できる ピーク時に電力を地域に供給
	徴収(増設分)	19.8	19.9	0.0	
計	合 計	-33.6	-23.3 -26.3 -29.3	コストダウン 10.3 7.3 4.3 =31% =22% =13%	下水処理を深夜電力利用に変え ピーク電力を卸売し、コストダウン

考察

- 現在の標準曝気方式が昼間の高い電力を使って、下水のピーク流量を処理しているに対し下水でのCAESはその時間帯は都合のよいことに、電力需要もピークなので、貯蔵空気を放出して、ガスタービン発電を行う。その結果貯蔵気圧が低下しただけ、下水がCAESタンクに流入し貯溜されピークカットされる。貯溜分は夜まで深くで密閉され圧縮空気の熱量の伝導がすすみ、下水は適切に加温され、パイオ的に活性がたかまる副次効果があり、寒冷地ではこの下水貯溜効果も高い価値を生むであろう。
- 下水の流動のエネルギーはガスタービン用の圧縮空気の流入のためのエネルギーと共用であり、両事業とも動力費が節約できる。両事業とも設備費も節約している。
- 35000kwのCAESを下水場に設け10万tの下水処理を行い、同時に既存の25万tの処理を行う。貯蔵空気の残りの電力量 3.5kw×3時間は地域供給の卸売として、下水事業の経営改善に寄与し、同時に不足ぎみのピーク電力を都市に分散して供給できる。その結果、地盤条件に対応して下水事業は10%から30%のコストダウンが期待できる。電気事業もその分だけピーク発電所の増設を節約できる。
- 岩盤力学的には、第一世代の技術としては直管方式がある。軟岩強度に対応した加重泥水でリバーシブルで掘り、鉄管を水没させ、裏込めコンクリートを打設(必要に応じメンブレン袋にコンクリートを圧入・固化後、加重泥水を淡水化すれば高強度覆工にプレストレスを導入できると考えるので、実験研究に入る予定である。第2世代の技術としては拡幅水没空間を開発したい。

4. 謝辞

下水に関し、日本下水道事業団・三菱化工機株式会社・大阪ガス株式会社・間組技研環境部門等から掘削に関し、電力中研・株式会社利根・ゼネコン各社等から、ガスタービン・新材料等に関し、三菱重工・石川島播磨重工業・川崎重工・川崎製鉄・テルナイト等から技術資料の提供をいただいた。構想につき 合田 健、永田 伸之、中本 至、宗宮 功、茂庭竹生の諸博士はじめ多くの方から示唆を戴いた。この構想内容に誤りがあれば、それは筆者の責任であるが、何分にも新概念の構築なので 御意見を期待します。

参考文献

- 1) 日本下水道協会 下水道統計 1991
- 2) 日本下水道事業団 海に棄く下水処理場 1988
- 3) 井上・藤岡・原田・山崎 ね煤を用いた湿式酸化による廃水再生技術 造水技術16-3、1990
- 4) 前田 礼司 わかりやすい電気料金のしくみ 1991
- 5) 小宮山 重四郎 新下水読本
- 6) 三菱化工機株式会社 ICIディープシャフト
- 7) 林 正夫 圧縮空気貯蔵—ガスタービン発電システム 水没タンク 土木学会誌1987-3
- 8) 林 正夫 ピーク発電とミドル発電を兼用できる 新しい圧縮空気貯蔵 —ガスタービンシステム 都市型CAESの実現の予測 土木学会論文集412/111-12 1989-12
- 9) 林 正夫 水没工法による深部軟岩でのドーム空間建造に関する構想研究 都市型CAESの実現を目指して 土木学会論文集412/111-13 1990-6
- 10) 林 正夫 現用の建設機械を応用した深部軟岩での水没ドーム空間の建造方法 — 都市型の圧縮空気貯蔵ガスタービン発電と下水処理の兼用システムの構想 — 土木学会 岩盤力学に関するシンポジウム 1991-2
- 11) 林 正夫 都市に深呼吸のシステムを 土木学会第1回学術振興基金入選作品 1991-9-18