

---

**研究展望**  
**Review**

# 研究展望

## 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の構想研究 ——都市型 CAES-GT の実現性の予測——

### FEASIBILITY STUDY OF PEAK-MIDDLE HYBRID POWER SYSTEM OF ADVANCED CAES-GT ——FEASIBILITY EVALUATION OF URBAN CAES——

林 正夫\*

By Masao HAYASHI

#### 1. 要 旨

21世紀に向けて、地球上で人口は都市に集まる傾向が続き、都市の電気、ガス、下水、飲料水、などはピーク需要と深夜の需要の格差が大きくなる傾向にある。いきおい、21世紀に向けて電力設備の負荷率が年々低下し、発電コストを押し上げる要因になっている。ここでは次の提案を行う。

(1) 新しい発電方式として、従来の揚水発電所のようなピーク発電の機能と、従来のLNG複合発電所のような日間の起動停止を行うミドル発電の機能を1つのサイトで行うことが可能となり、発電設備費が安く、資源節約型のピーク・ミドル兼用の発電プラントの技術的および経済的可能性を報告する。

(2) この発電プラントは、硬岩や鉱山の廃坑での地中タンクあるいは海中の圧気タンクならば、現在の土木技術で可能であり、経済性も高くなるであろう。なお、大都市でしばしば見受けられる堆積した軟岩でも圧気タンクができるように、地山強度比が0.25程度の岩盤条件でも10万m<sup>3</sup>級の圧気タンクが岩盤力学的に可能となる。水没無人掘削・水没無人覆工を前提とする曲線レール・スライドカッタ工法の概念を次報で提案する。

(3) 経済性に関しては、21世紀初頭にこれらの技術構想が実現すれば、発電コストに関しては、ピークとミドルの組合せ発電によって、LNG燃料の将来の国際価格の変動にほとんど左右されないで、サイトの条件によって差はあるが、10~15%程度のコストダウンの可

能性があると予測される。

(4) 技術波及としては2つあり、1つは都市型の分散された圧縮空気貯蔵-ガスタービン発電所ができるようになること、その圧気タンクを水圧補償式のタンクにすることによって、集中豪雨時の都市の地下河川の機能、下水の曝気用の空気の供給、その他の付加価値が生まれる可能性がある。2つ目は、曲線レール・スライドカッタ水没方式による地下タンクができることになれば、大深度地下利用の対象となる治水・利水・下水・防災・輸送・駐車場・エネルギー貯蔵等の地下構造物を、地盤沈下がなく、プレストレスが掘削しつつ覆工に与えられるような合理性の高い耐震的な地下構造形式となる可能性があると思われる。

#### 2. ピーク・ミドル兼用発電のための圧縮空気貯蔵-ガスタービン発電プラントの技術構想

##### (1) 目 的

21世紀に向けて、高度化した都市化が進み、電気文明を享受する動向にある。わが国では特に、都市の昼間の電気が不足し、深夜と土・日曜ならびに1月と5月の連休などは余り気味になる。したがって、電力設備はピークに対応した分散型で待機の姿勢のものが多くなる。そして、ピークとその周辺の時間のミドルの発電設備の負荷率は年々低下の傾向にある。

この報告は、発電原価を下げ省資源のため、従来はピークは揚水発電、ミドルはLNG複合発電と、別々に山の中と海岸で行っている現在の発電方式を根本から見直し、火力発電所において、ミドル発電とともにそのサイトの地下で深夜電力を圧気として貯蔵し、ピーク発電を

\* 正会員 工博 東海大学教授 工学部土木工学科、(兼)電力中央研究所顧問 (〒259-12 平塚市北金目1117)

Keywords: CAES, rock mechanics, power generation, energy storage, peak generation

も兼用的に行い、安い電力を生みだそうとする研究である。

(2) メリット

a) 電力設備の負荷率の向上：ピーク電力（1日に7時間から8時間）の伸びは都市機能の充実につれて顕著になる（図-1）。そのピーク発電の設備を安くするため高効率のミドル発電用ガスタービンと兼用した CAES-GT を実現したい。

b) ベース発電所の負荷調整の軽減：深夜と休日には電力需要が少なく、ベース発電所（原子力、石炭、LNG）も出力調整、さらに周波数自動調整などを要することが多くなる。今回の提案は、ベース発電所の深夜の電力と休日の電力等を、ミドル発電用の火力サイトに、遊休状態の送電路を利用して送電して、地下タンクに電気を圧縮空気として貯蔵しておく、そして、そこでピーク発電を行う提案である。そして、日間調整だけでなく週間調整をも指向する。

c) LNG 火力の燃料の節約：LNG 火力の増勢は 1990 年から 2000 年にかけて続く。LNG はクリーンな

エネルギーとしての期待が大きく、海外からの安定供給体制が敷かれている。そして、LNG は原子力に次いで、わが国のエネルギー供給の大宗を占める動向にある（図-2～図-5）。

LNG 複合発電は熱効率が高く実用されガスタービン発電と蒸気タービン発電を組み合わせる方式である。そのガスタービン発電の陰の力として、ほぼ同量の機内動力を占めている圧縮機動力分に着目する。今回の提案はその大きな圧縮機動力分を、深夜の原子力等に代替しようという提案である。複合発電はガスタービンが 60%、蒸気タービンが 40% の出力を発生する。ガスタービン 60% の半分すなわち全体の 30% の燃料はコンプレッサ用なので、その分が原子力燃料に振り替わり得る概念である。実際には、今後の増設計画分について、しかも貯蔵発電の時間だけに対する節約になる。

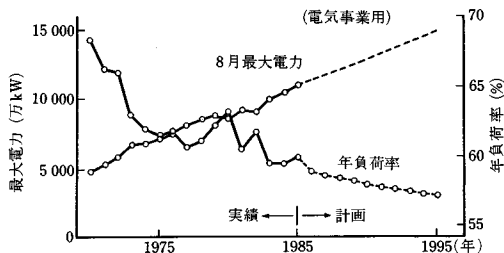


図-1 最大電力の伸びと年負荷率の低下の動向 (電気事業連合会)

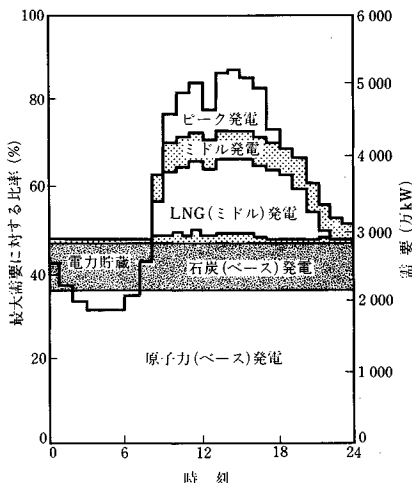


図-3 将来の低い需要時の負荷曲線 (模式図)

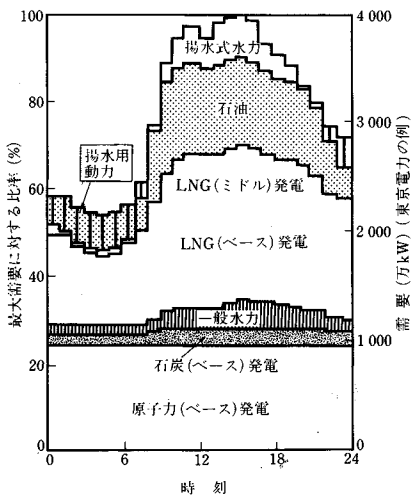


図-2 最大需要時の負荷曲線の例 (東京電力(株), 1987年8月21日)

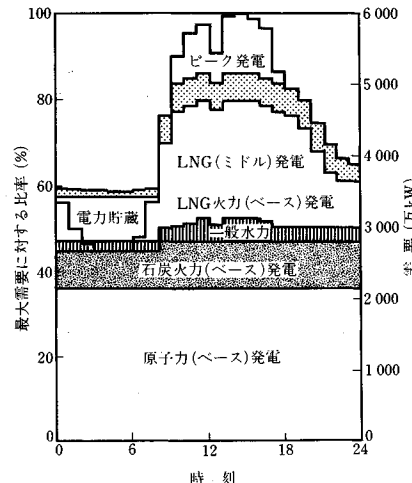


図-4 将来の最大需要時の負荷曲線 (模式図)

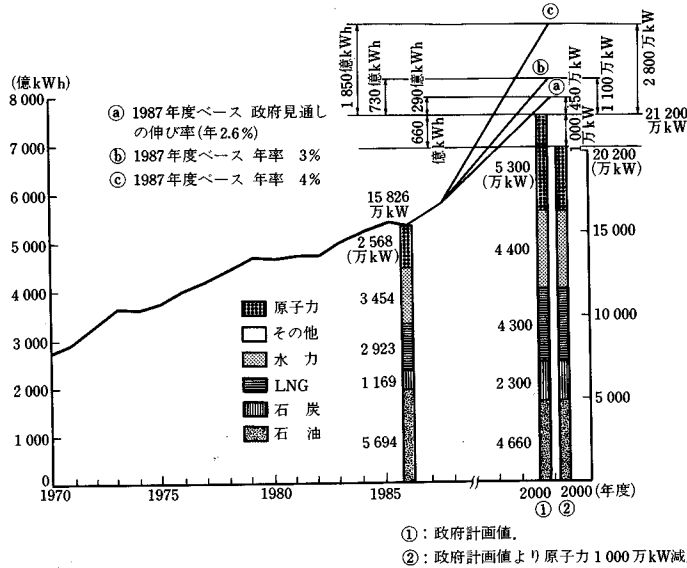


図-5 電力需給の見通し (日本エネルギー経済研究所, 1988.7)

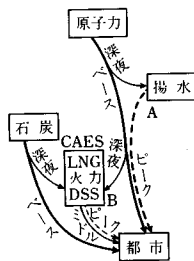


図-6 都市近郊型のLNG火力でのCAES (提案)

d) 都市近郊に分散した電力貯蔵-ピーク発電：

① 送電，変電，配電のトータルのコストを抑えるためには，電力貯蔵は都市に近いほどメリットが大きい<sup>20)</sup> (図-6)。その送変電クレジットについては，図-6において，仮に，AとBのそれぞれの発電所から大都市の需要地までの距離に50kmの差がある場合ならば，送変電設備の年経費として約0.3万円/kWの差が発生するとされている。この値は，送電規模，位置その他により差があるが平均的な目安として役立つ。もし，大都市の中に立地できれば，コストの高い配電のクレジットもさらに加わり，年経費の差は約1.0万円/kWになる場合もあるとされている。

② 送配電損失：発電所から送電路への総投入電力量に対し，日本全体でみると送電損失率は2.8%程度あり，配電路への総投入電力量に対し配電損失率は4.7%程度である。発電所から送電路への総投入電力量に対しての上記の送電と配電の合計の損失率は6.0%程度である。この報告では，発電コストだけを論じたが，今後

は都市近郊立地の①，②のメリットも加味して再評価することになる。

e) CO<sub>2</sub>による地球の温室化問題への寄与：地球規模のCO<sub>2</sub>の抑制対策は，21世紀に向けての人類の課題である。火力用の石炭・石炭ガス・石油・LNG等の中で，LNGはCO<sub>2</sub>の発生が最も少なく，石炭に比べ約60%である。そのLNGの消費を前述のようにさらに30%も減らせる原子力への燃料転換効果も考え合わせると，石炭に比べ60%×(100-30)%=42%にCO<sub>2</sub>を減少させるメリットをCAES-GTは秘めている。

f) 負荷への動的応答：電気品質を維持し，さらには電力系統の崩壊を防ぐには，時々刻々に変化する負荷に応じ，発電出力をより俊敏に変化させねばならない。1分間での出力調整能力の上限出力に対する百分率をRamp Rate<sup>17)</sup>とっている。そのRamp Rateはボイラ火力では1~3%と低いが，揚水発電は20~30%，ガスタービンはCAES化すれば33%以上に向上する。揚水のように需要地から遠くでのRamp Rateの向上もさることながら，それ以上に都市近郊のCAES-GTのそれは優れているといえる。蛇足ながらRamp Rateに話を限れば，二次電池は100%であり最も優れているが，系統全体からみればその調整力は微弱であり，大きな調整のあるCAES-GTが分散して配置できれば，その価値は大きいものがある。

9) 大型・中型規模の電力貯蔵

開発中の各種の電力貯蔵技術の出力規模を比較すると図-7のようであり，CAES-GTは大規模ないし中規模のシステムといえる。その場合の技術の成熟度は，揚水

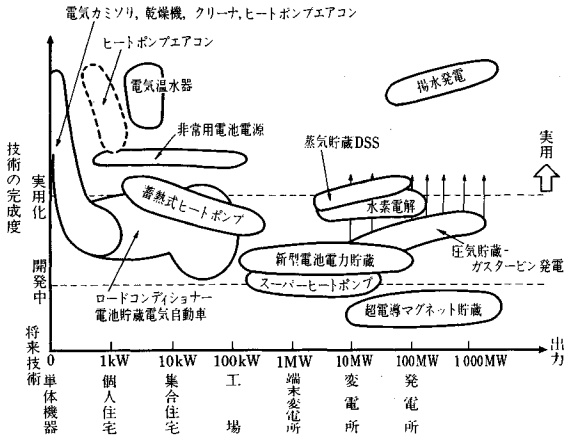


図-7 各種の電力貯蔵技術の実用度と出力規模

表-1 CAESの開発に関する外国の状況

国名	略称	摘要
西ドイツ	Huntorf (完成)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 世界初の実用プラント (1978年運開)</li> <li>• 場所：プレーメン近郊</li> <li>• 出力：29万kW (50Hz)</li> <li>• 貯蔵施設：15万m<sup>3</sup>×2 (岩塩層空洞タイプ)</li> <li>• 貯蔵圧力：75気圧 (max.)</li> </ul>
アメリカ	PEPCO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1977年よりCAESとUPH (地下貯水式揚水発電) の2ケースについてスタディ実施。1981年最終報告提出。</li> <li>• 場所：ワシントンD.C.の北方約30km</li> <li>• 出力：23万kW×4ユニット</li> <li>• 貯蔵施設：約62万m<sup>3</sup> (岩塩層空洞タイプ)</li> <li>• 貯蔵圧力：約70気圧</li> </ul>
	Middle South	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1977年よりスタディ実施。1982年最終報告提出。</li> <li>• 予定場所：ミシシッピ州ジャクソンの南西約40km</li> <li>• 出力：22万kW</li> <li>• 貯蔵施設：52.5万m<sup>3</sup>×2 (岩塩層空洞タイプ)</li> <li>• 貯蔵圧力：70気圧 (max.)</li> </ul>
	PSI	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1977年よりスタディ実施。1982年最終報告提出。</li> <li>• イリノイ、インディアナ両州での帯水層タイプの候補地調査および予備設計を実施。</li> </ul>
	Pittsfield	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1982年より、イリノイ州ピッツフィールドにてフィールドテスト実施。(帯水層タイプ)</li> </ul>
	Alabama	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1988年に設計に着手。McIntoshの岩塩ドームを利用し、1週間の電力負荷の調整を行う10万kW級のCAES発電所をつくる。</li> </ul>
ルクセンブルグ	SEO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 模型実験やフィールドテストを含め、種々のスタディ実施中。</li> <li>• 予定場所：Viandenの北西約30km</li> <li>• 出力：30万kW</li> <li>• 貯蔵施設：10万m<sup>3</sup> (岩盤空洞タイプ：円形トンネル)</li> <li>• 貯蔵圧力：50気圧</li> </ul>
イタリア	(テストプラント)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1984年現在、Sestaの近郊にて、出力2.5万kWの試験プラント試運転中。(帯水層タイプ)</li> </ul>
フランス		<ul style="list-style-type: none"> <li>• フルターニュの南海岸地区を対象地点として、出力25万kWの岩盤空洞タイプについての地質工学的問題を中心としたスタディを実施。</li> </ul>
ソ連		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 出力105万kWの計画を行っている。Donbass地方の岩塩層に3つの圧気タンクをつくる。</li> </ul>

に次いでおり、蒸気貯蔵、水素電解、新型電池電力貯蔵、超電導コイル等よりは、実用性は高い。

h) 都市のインフラストラクチャーとしての付加価値<sup>19), 20), 24)</sup>：発電だけでなく、このシステムは河川水、湖沼水、海水等を圧縮空気の動きと連動して大きく動かすことを着眼としており、水質浄化、水害防止、下水処

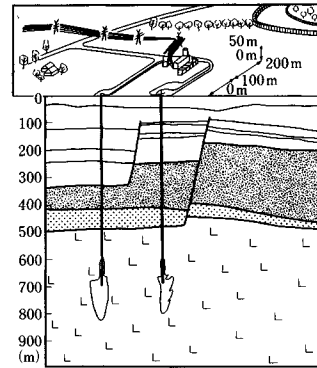


図-8 Huntorf 発電所 (岩塩層)

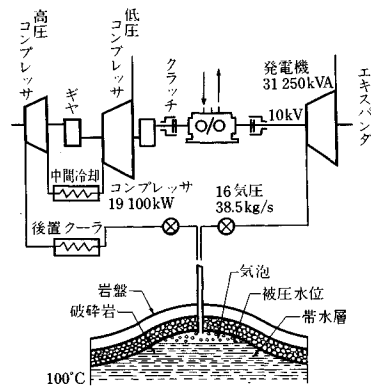


図-9 Sesta (イタリア Pisa) における帯水層タンク (1200万m<sup>3</sup>のうち20%を利用)

理その他に付加価値を発生する。

(3) 従来の CAES と提案の CAES との違い

CAES は Compressed Air Energy Storage の略号である。表-1のように、1978年に西ドイツの Huntorf 発電所において、岩塩層に乾式の圧気タンクをつくり発電を始めたのが世界で最初である<sup>1)</sup>。その電気出力は29万kWでありかなり大きいですが、熱効率が10%台とかなり低い。その理由は、地下からの圧縮空気をガスタービンに送るときに、現在の技術ならば当然付けるはずの再生熱交換器が付いていないことが影響している。したがって、現在では1週に3回ほど電力系統の周波数の自動調整用に運転されているが、大電力の日間運用には燃量がかかるので使わないでいる。地下タンクは図-8のようので70気圧の圧縮空気をためることができるが、空洞容量が30万m<sup>3</sup>もあるのに、2-3時間の発電しかできない。

その後、1987年から Donbass 地方において、岩塩層に圧気タンク (乾式、変圧式) を同じようにつくることにし、105万kWのピーク発電所を建設し始めた<sup>3)</sup>。アメリカでも EPRI により長年 Schainker<sup>2)</sup> を中心に研究





c) 都市での分散型の CAES-GT プラントは、電力の系統の安定からみても、優れた価値がある。送・変電コストの負担も軽減できる。しかし、都市の地下は、世界的にみても堆積した軟岩ないし風化した軟岩が多いので、そこで深部 600 m の地中に 10~20 万 m<sup>3</sup> の圧気タンクが建造できる可能性を研究した点が欧米と異なる。その内容は次回に述べる。

従来のやり方であるシールド工法ではコストがかかりすぎる。圧気ケーソンではせいぜい深さ 40 m 前後までである。筆者の提案は、水没状態で掘削し、覆工をしてから、その水没空間を圧気空間に代える水没地中空工法 (Submerged Geo Spacing) である。具体的には全断面工法と 2 重曲率の連続地中壁をつくる曲線レール・スライドカット工法に分かれる。曲線レール・スライドカット工法は覆工コンクリートに周辺軟岩からの土圧が自然にかかり、プレストレスされ、遮水性と耐震性の高い地盤沈下のない地中空間が生まれる可能性がある。

(4) CAES-GT 用のガスタービンシステム

a) 従来のガスタービンシステム (複合発電) : 従来のガスタービンは大型のものでもピーク用のものは熱効率が 30% 台と低い。それはコンプレッサ動力に発電力にはほぼ等しい燃料を消費しているからである。それを省エネルギー化したのが現在の複合発電方式であり、それはガスタービン排熱をボイラで蒸気をつくるサイクルに導きさらに蒸気発電も行い、トータルの熱効率を 50% 近くまで向上させる努力が払われている (図-13)。

b) ピーク発電のための Huntorf の CAES-GT システム : Huntorf の CAES-GT システムは、再熱器と中間冷却器は付いているが、排熱回収に効く再生熱交換器

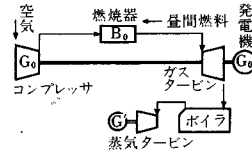


図-13 従来のガスタービン発電と蒸気タービン発電の複合発電システム

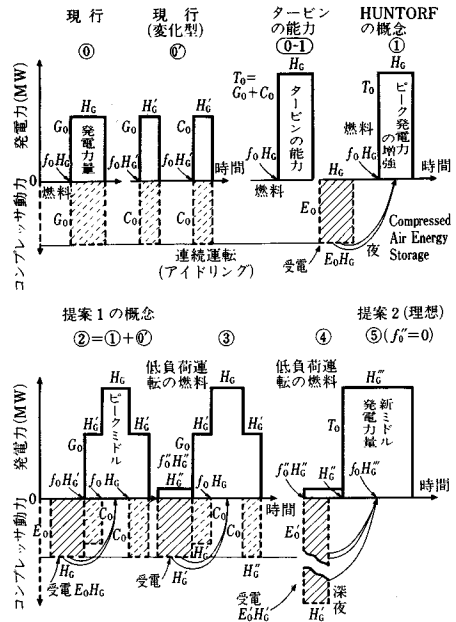


図-14 ガスタービンシステムにおけるコンプレッサ動力の位置付け

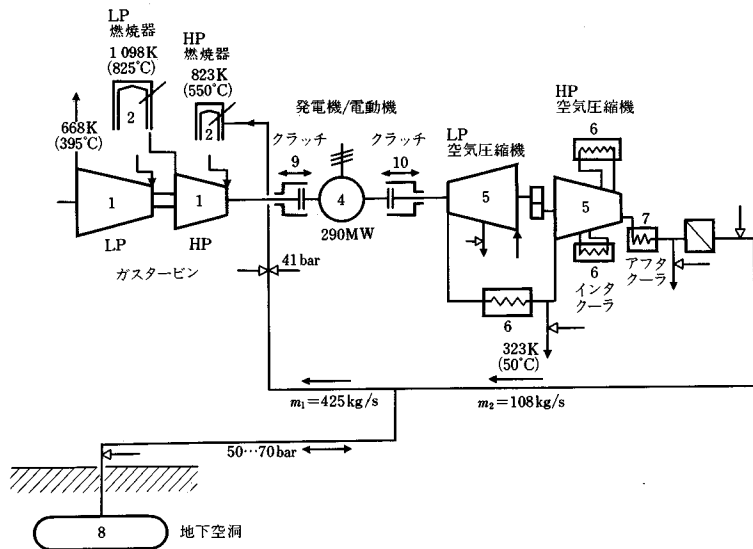


図-15 Huntorf 発電所での CAES-GT プラントシステム



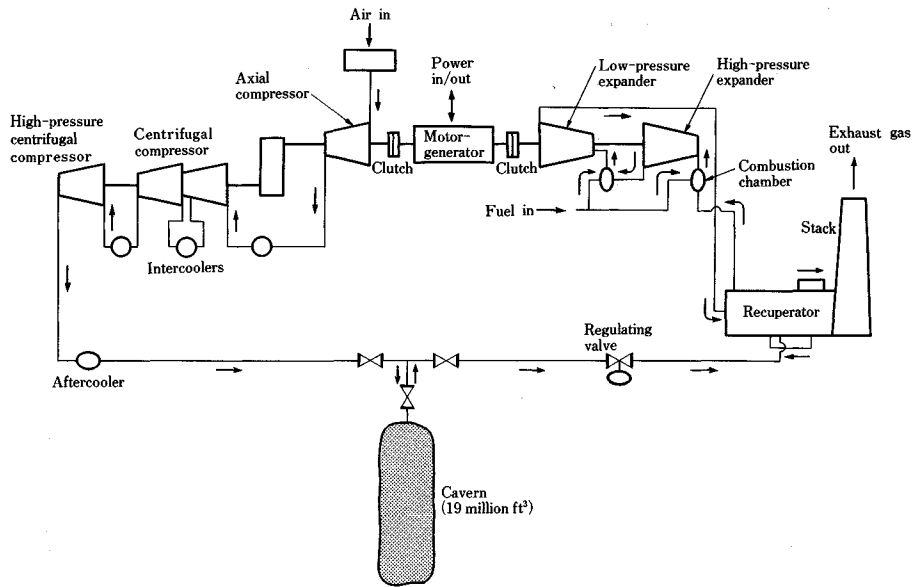


図-16 Alabama 電力における CAES-GT システム (110 MW×26 h)

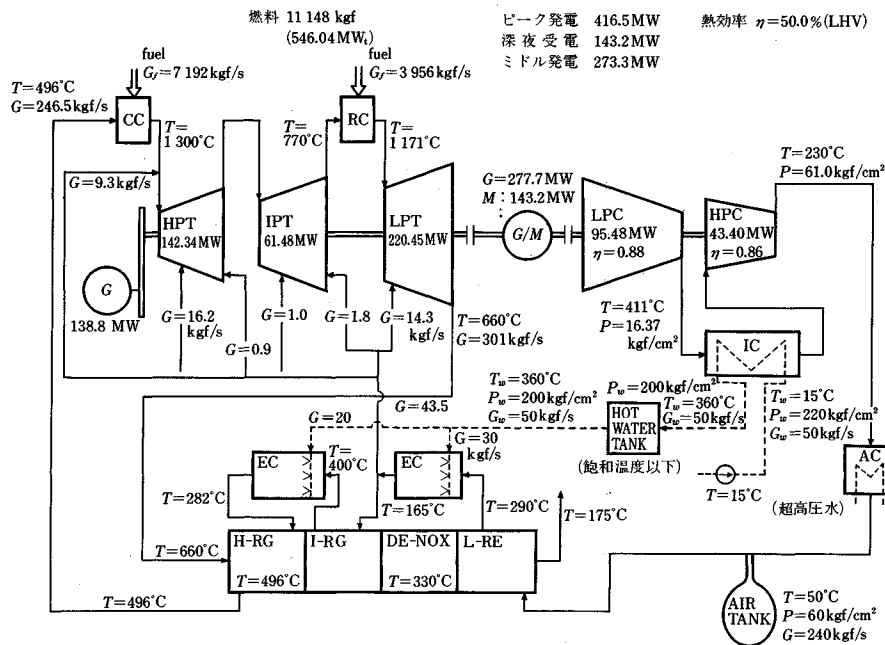


図-17 再生・再熱・中間冷却・熱水貯蔵ガスタービンシステム (ピーク・ミドル兼用)

は付いていない (図-15)。したがって、もし圧気貯蔵を經由しない通常のミドル発電を行ったと仮定すれば、熱効率は 10.6% と計算されるので、ピーク発電だけにしか使わないシステムにならざるを得ない。

c) アメリカの Alabama 電力の CAES-GT システム：1988 年に発表された報文によると、図-16 のように

再生熱交換器、中間冷却器、再熱器が付いている。しかし、ミドル発電である複合発電の熱効率には至らないので、ピーク専用として計画されているようである。

d) ピーク・ミドル兼用発電用の CAES-GT システムの提案：この方式は、著者が 1985 年以来構想を図-14 の②、③、④、⑤として練っていたもので、共同して

研究を続けてきた高効率ガスタービンの専門家である三菱重工の高砂研究所顧問の竹矢一雄博士との討議の過程で同氏によりガスタービンシステムが生まれたものである。

そのシステムは、高効率を狙い図-17のように蒸気噴射および高圧温水蓄熱タンクが付けられている。ミドル発電としてのトータル熱効率はLHVで50%をこす。図-17には予備設計段階のシステムを示し、図-18には改良設計段階(ノークラッチ方式)のそれを示す<sup>27)</sup>。

LHVで50%をこす熱効率が1300°Cのタービン入口温度で可能になれば、LNG複合発電のそれが同じ1300°Cクラスで52%前後と期待されているので、ほぼ同格になる。

CAES-GTシステムは、LNG複合発電では不可欠となる蒸気ボイラと温排水対策設備等が要らない。ガスタービンに向け地下タンクから圧気を供給するときにコンプレッサ系統を休止すると、増出力効果(図-14)が発生し、ピーク発電力が発生できることが特長である。

さて、いわば揚水発電所とLNG複合発電所の両機能を1つで賄えるガスタービンシステムが、どのような技術開発テーマによって可能になっていくのかを、以下で明らかにしておこう。

① 信頼性の高い高圧・高温ガスタービンの開発：複

合発電用のガスタービンは10~15気圧であるがCAES用のそれは地下の圧気タンクを小さくするのが経済性に最も効くので、高圧にするのがよい。現在、すでにドイツでは70気圧のCAESガスタービンが日間の起動・停止に10年間の使用実績がある。高温についてはすでに1150°C級が各電力で実用されており、近い将来として1995年には1300°C級のガスタービンが東京電力により運転される。その後は1400~1500°C級のガスタービンが東北電力と三菱重工により研究が開始された。

② 複合発電と比べ遜色のない熱効率のCAES-GTシステムに必要な蒸気噴射システムと加圧温水タンクの開発：蒸気噴射システムはガスタービン発電におけるNO<sub>x</sub>対策として実用化が進み、それが出力増と熱効率向上にも寄与することが確かめられている。また深夜のコンプレッサ運転時の廃ガスの熱を高圧の温水タンクにためることは、使用水量もタンク容量も高圧系なので少なくすむ効果的な蓄熱方式である。またそれを地下タンクにすれば断熱効果も大きい。これらも10年間の目標で着手すれば開発可能と判断できる。また、CAES-GT運転は、コンプレッサ系列とタービン系列をクラッチにより切り換えるのが普通であるが、連続的な切換えの方が機械の損耗が少なく、熱効率も向上すると期待される。そこでアイドル運転を含めたノークラッチシステムを図-18のように入れることも重要で

SPECIFICATIONS OF SUPER-CAES (DERIVED FROM AGTJ-100A)

Performance	Turbines OUTPUT	Compressors INPUT	Generator OUTPUT	Motor INPUT	Thermal Efficiency
Operation Mode	MW	MW	MW	MW	% (LHV)
Peak-Load	504	-100	404	—	—
Rated-Load	420	-150	270	—	50.0
Off-Load	80	-200	—	-120	—

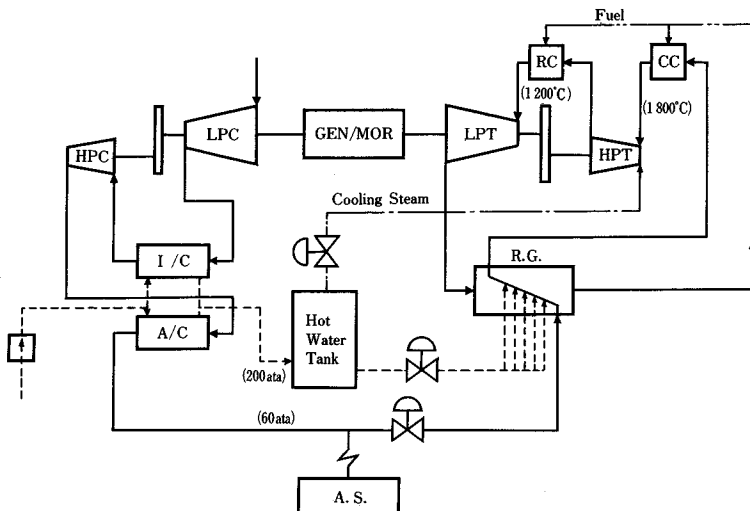


図-18 ノークラッチ方式のCAES-GTシステム<sup>27)</sup>

ある<sup>27)</sup>。

(5) 各種発電方式の熱効率の比較

ベース発電は原子力と石炭火力、ミドル発電はLNGボイラ火力と複合発電、ピーク発電はCAES（在来のHuntorfの概念）、ピークとミドルの兼用CAES等のそれぞれの熱効率を図-19に比較してある。

今回のCAES-GTシステムの位置付けは前述の蒸気噴射、加圧温水タンクその他の技術を克服すればミドルとして約50%の熱効率(LHV)で、将来のコンバインドサイクルの約52~53%と比べやや劣る。しかしピーク発電もそのガスタービンでやるので、資本費が著しく安くなる。

(6) 電力貯蔵におけるエネルギー変換率

エネルギー変換に関し、種々の定義を述べておく。

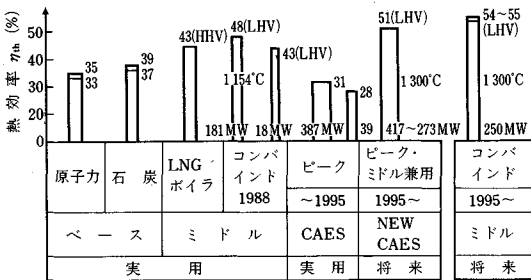


図-19 ベース・ミドル・ピークの発電の熱効率

a) 電力貯蔵は揚水発電、蓄電池、超電導電力貯蔵などでは、受電力量に対し発電力量の比率 Y を求め、電力貯蔵効率と定義している。

$$Y = \frac{\text{発電力量}}{\text{受電力量}} \dots \dots \dots (1)$$

この値は、揚水発電では0.68~0.72、新型の二次電池では0.65~0.75、将来の超電導電力貯蔵では0.90以上を目標として概念設計がなされている<sup>19)</sup>。

b) 熱力学の第I法則に立った熱エネルギーの電気エネルギーへの変換率 Y<sub>I</sub> は、次式により定義できる。

$$Y_I = \frac{\text{発電力量}}{\text{受電源資の熱入力}} = \frac{\text{発電力量}}{\text{受電力量} / \text{受電源資の熱効率 } \eta} = \eta \cdot Y \dots \dots (2)$$

深夜電力の受電源資は、一般には原子力、石炭、あるいは場合によってはLNG火力発電所等で送電端熱効率 η として発生された電気エネルギーである。ここでは仮に η=0.35 とおいて Y との積として Y<sub>I</sub> を式(2)によって求めると図-20のようになる。参考として、CAES-GT の場合を示すと、式(2)の分母は、ガスタービンの燃料の熱入力を加算することになり、次式で表わされる。

$$Y_I = \frac{\text{発電力量}}{(\text{受電力量} / \text{受電源資の熱効率}) + (\text{ガスタービンの燃料の熱入力})}$$

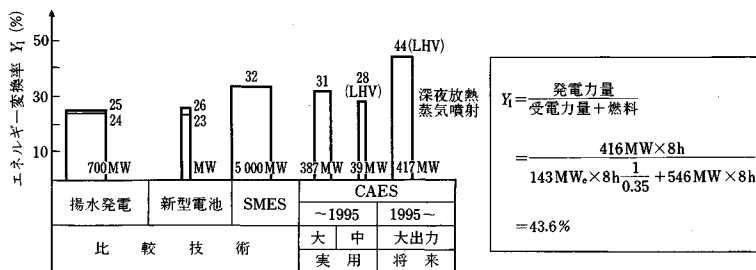


図-20 エネルギー変換率 Y<sub>I</sub> (熱力学の第I法則に則り、熱エネルギーとして受電入力を評価した場合のエネルギー変換率)

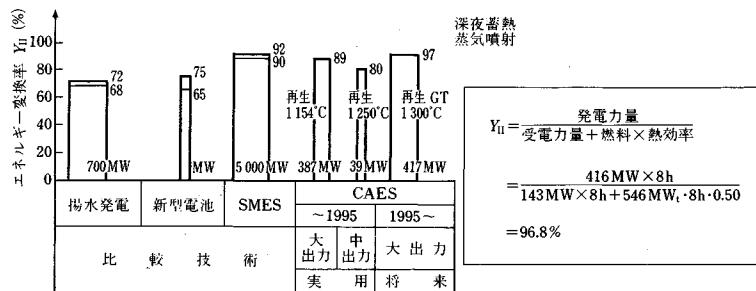


図-21 エネルギー変換率 Y<sub>II</sub> (熱力学の第II法則に則り、実効エネルギーとして熱入力を評価した場合のエネルギー変換率)

c) CAES の場合のエネルギー変換率<sup>7)</sup>: CAES-GT の場合のエネルギーの変換率は、電気エネルギーとして分子、分母の関係を評価するのが合理的である。なぜなら、電気エネルギーという実効エネルギーの入力と出力として評価するので、熱力学の第Ⅱ法則に立脚していることになる。

$$Y_{II} = \frac{\text{発電力量}}{\text{受電力量} + (\text{ガスタービンの燃料入力} \times \text{ガスタービンのミドル発電としての熱効率 } \eta_m)}$$

その値は図-21 のようになり、CAES-GT の場合、システムによって種々の違いが出るが、大略 90 % 前後の値となり、従来の電力貯蔵である揚水発電の 68~72 %、新型電池の 65~75 % に比べ優れており、超電導電力貯蔵 SMES の 90 % 目標に比べほぼ匹敵すると評価できる。

ここではまだ検討していないが、地下タンクに蓄圧している半日間の圧気の温度降下がある場合には、その分だけ燃料を加味しなくてはならないが、地中深部は約 40~50°C と想定しており、圧気の貯留温度と同じ程度であるので、損失は無視している。今後、詳細検討において再評価することにする。

従来、CAES の貯蔵効率は圧縮空気としての変換効率なので、せいぜい 60~70 % に過ぎないという誤解ないし偏見があったのではないかと、筆者は思っている。この点に関し筆者は次のように考えている。「貯蔵された圧縮空気には、力学的エネルギーだけでなく、燃焼用の含有酸素も高密度化されて貯蔵されており、その化学エネルギーが燃料と混ぜられ、燃焼され、ガスタービンへの化学的および力学エネルギーとして電気に変換されていく能力がある。」蛇足ながら、巷間「圧縮空気発電」、[CAES] などとよばれているが、以上の意味から、正しくは燃焼のイメージを含め「圧縮空気貯蔵-ガスタービン発電」、[CAES-GT] と称するのが良いと思う。

(7) SMES と CAES-GT の電力変換システムの差異

a) SMES は超電導の新技術を用いる設計であり、そのエネルギー変換率  $Y_{II}$  は 90 % 以上を目標とされている。CAES の  $Y_{II}$  が 80~97 % となり両者はほぼ同等である。しかし、発電コストは、SMES の方は資源消費も多く、まだ評価できないほど高額になる。

b) 今回提案した CAES-GT は、ピーク用の SMES の機能とミドル用の複合発電の

機能を 1 つのサイトで賄ってしまうので SMES、揚水発電より省資源で、安くなる可能性が十分にある。またガスタービン設備をピークとミドルで分担しミドル用の複合発電コストも明らかに低下できる。

c) 防災用の自立電源として、緊急時には燃料があれば CAES-GT は自立的に機能するが、SMES や揚水発電、蓄電池などは、電力貯蔵の専用システムである。

d) 電力貯蔵密度に関して、CAES-GT は、表-3 で計算しておいたように 0.03~0.10 m<sup>3</sup>/kWh の値となり、一方 SMES の場合は、日本での概念設計<sup>9)</sup>によると、電力量 500 万 kWh を貯蔵するのに、コイルの半径 180~200 m の場合の格納施設は、3 段分の高さ 50 m に対し容積 60 万 m<sup>3</sup> を必要としており、貯蔵密度は 0.12 m<sup>3</sup>/kWh に相当する。したがって、貯蔵施設の容積効率においても CAES-GT の方が優れている。

e) 都市型の CAES-GT のためには、深部軟岩での圧気タンクの建造技術の開発を必要とする。その工法は筆者が次号で提案するように水没掘削・水没覆工の無人工法となろう。そして掘削土圧がプレストレスとして覆工を押し、コンクリート製の圧力容器が形成できると期待できる。この工法は SMES に必要なプレストレス圧力容器にも共通の技術開発になると期待できる。

(8) 圧縮空気タンクの必要な容積

表-3 圧縮空気タンクの必要な容積

機種略号	既往研究		実用機 (1990~)		近い将来 (1995~)			
	Huntorf	Middle South Service	MF 111 1250°C	MW 701 1150°C	AGT -297 1300°C	AGT -240 1300°C	AGT-STEAM -416 1300°C	
コンプレッサ	運転時間 (h)	56 (h/週)	8 (h)	10.7 (h)	8 (h)	4 (h)	7 (h)	
	動力 (MW)	58	110	22.4	195.6	125	100	143
	受電電力量 (MWh)	464	6160	179.2	2086	1000	400	1001
発電機	発電力 (MW)	290	220	38.7	387	297	240	416
	発電時間 (h)	3.5	40	6	8	8	7	7
電力変換率	$\frac{1015}{464} = 2.19$	1.429	1.29	1.48	2.38	4.26	2.91	
圧縮空気	圧気流量 (kg/s)	416	300	37.4	347	240	250	240
	圧気の密度 (kg/m <sup>3</sup> )	$\frac{(66-46) \times 10^4}{29.27 \times 323} = 69.8 \sim 48.7$	$\frac{(69-42) \times 10^4}{29.27 \times 323} = 73.0 \sim 44.4$	62 ata 50°C 65.5	62 ata 50°C 65.5	60 ata 50°C 63.0	60 ata 50°C 63.0	60 ata 50°C 63.0
コンクリート	圧気タンク容積 V (m <sup>3</sup> )	$1.1 \times 416 \times 3600 \times 8 / 48.7 = 208806$	1498378	18100	224500	120700	62900	105600
	比容積 V (m <sup>3</sup> /kWh)	(320000) 0.21 (0.31)	(1600000) 0.17 (0.18)	0.078	0.074	0.051	0.037	0.036
比容積 V (m <sup>3</sup> /kWh)	0.5 0.4 0.3 0.2 0.1							

圧気タンクの必要な容積は、定圧タンクの場合（60～62気圧の場合）を例にとると選択するガスタービンシステムによって違いが出るが、筆者が調べた技術資料によれば表一3のように要約できる。既往研究のほかに、筆者が三菱重工の協力を受けて、実用機（1990～）と近い将来（1995～）を概念的に予察したシステムも示してある。この表から、CAES-GT 運転により 1 kWh の電力量を発生するのに必要な定圧タンクの比容積は、ガスタービン技術の向上によって顕著に減少する可能性がわかる。言葉を換えれば、①ガスタービンの熱効率の向上によって燃料が節約されるとともに、②地下の圧気タンクの容積が小さくて済み土木工事が節約できる。③さらにピーク発電だけでなくミドル発電の可能性が生まれ、設備利用率が向上し、発電コストの低下が約束される一連のシナリオが生まれる。したがって、CAES-GT 向きのガスタービンシステムの開発はきわめて重要な研究開発目標になることを指摘しておきたい。

(9) 経済性の予測

a) 経済性評価のシナリオ

① 比較すべき技術：ミドル発電としては LNG 複合発電、ピーク発電としては揚水発電、新型電池およびガスタービン発電等とし、それらの発電コストと今回のピーク・ミドル兼用の CAES-GT システムの発電コストを比較する（図一22の①、②、③～⑪）。

② 固定費：プラントの固定費は次式によって算出される。

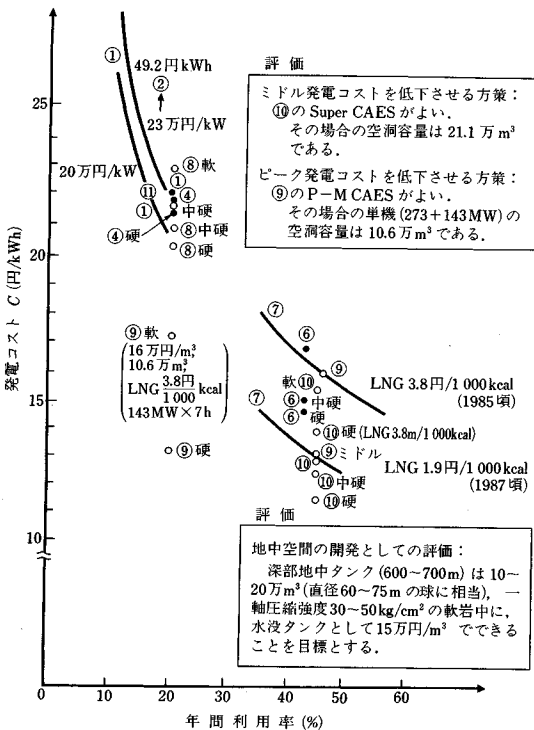
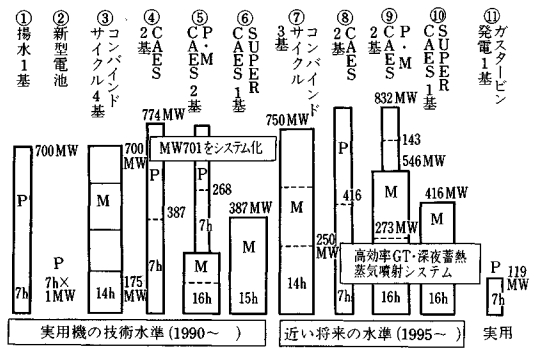
$$\text{固定費} = \frac{\text{建設費} \times \text{年経費率}}{\text{定格発電力} \times \text{年間の発電時間}}$$

$$= \frac{\text{建設単価 (万円/kW)} \times \text{年経費率}}{\text{年間の利用率} \times 8760 \text{ 時間}}$$

ここで、年経費率には原価償却、金利、人件費、修繕費、税金等が含まれ、電力設備の長年の経営実績と今後の動向を勘案し、火力は 18%，水力は 13%，圧気タンクは 10%，電池貯蔵は 18% と仮定した。

複合火力発電の建設費には土地・港湾・燃料タンク等を含めるが、土地・港湾については立地条件によってかなりの差が出るので、建設単価にすると 18 万円/kW から 25 万円/kW の幅が出る。ここでは中間をとり、20.35 万円/kW と仮定した。揚水発電に関しては 17～20 万円/kW であるが、21 世紀に向け上昇傾向にあるので、ここでは 20 万円/kW と仮定した。図一23には建設費の比較を示す。

③ 燃料費：LNG の燃料価格は 1987 年頃の 1.9 円/1000 kcal を標準と考え、その 2 倍および 1/2 の場合も比較検討した。ちなみに、熱効率 45% ならば、次式のように単位燃料費は 3.74 円/kW<sub>e</sub>h に相当する。



図一22 各種発電方式の発電コストの比較

$$\text{単位燃料費} = \frac{1.90 \text{ 円}}{1000 \text{ kcal}} \times \frac{860 \text{ kcal}}{\text{kW}_t\text{h}} \times \frac{1 \text{ kW}_t\text{h}}{0.45 \text{ kW}_e\text{h}}$$

$$= 3.74 \text{ 円/kW}_e\text{h}$$

年間の燃料費は、  
年間の燃料費 = (年間の発電量 kW<sub>e</sub>h) × (単位燃料費 円/kW<sub>e</sub>h)  
ここで、燃料熱入力 kW<sub>t</sub>h で、電気出力が kW<sub>e</sub>h である。

④ 受電費：受電費はベース発電力となっている原子力・石炭・LNG などの発電所での深夜の焚き増し燃料コストを考えるのが一般である。ここでは原子力の燃料コスト 1.66 円/kW<sub>e</sub>h を基準とし、その 2 倍および 1/2 の場合等をも比較検討に用いた。

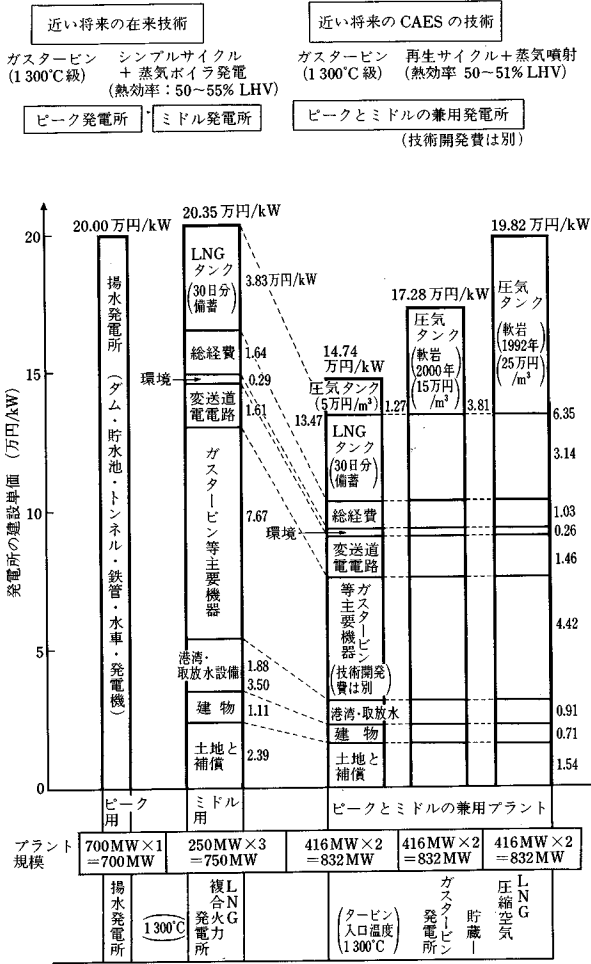


図-23 在来技術のピーク・ミドル兼用のCAESの場合の建設単価の比較

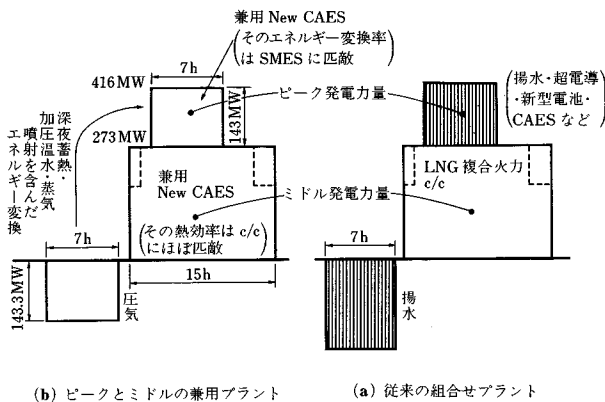


図-24 ピークとミドルの発電電力量の定義と電力貯蔵-発電プラントの設計概念の差異

⑤ LNG 複合発電の熱効率と CAES-GT の熱効率: LNG 複合発電の熱効率は、発電用プラントでは最も熱効率が高い。CAES-GT は、ここで提案しているように、再熱・再生・中間冷却・深夜蓄熱・蒸気噴射を併用する高压ガスタービンでは、LHV で約 50% の熱効率である。一方、複合発電の熱効率は、タービン入口温度 1300°C を CAES-GT のそれと同じタービン入口温度にすると、約 2~4% 高い熱効率が期待できる。

このような格差を考えに入れて、図-25~図-29 の経済性の比較を行った。

⑥ 発電モード: この研究の主目的は、種々の発電方式 (図-22) との比較においてピーク・ミドル兼用発電の CAES-GT ⑨ の発電モード (図-24 の場合) を評価することである。比較評価のために、図-22 の①~⑩のいろいろな発電方式の場合を計算した。

⑦ 発電コスト: 年間の固定費と燃料費の和が、図-25 の年間の支出額である。これを年間の発生電力量で除することによって、発電コスト (円/kWh) が算出される。

⑧ 発電システムの技術水準: CAES-GT は、わが国ではまずは硬岩サイトでの廃坑を利用した小型実証テストが必要である。そのテストには、1990 年から始めるとしても少なくとも 3 か年にかかる。一方、CAES-GT において、ミドル発電にも使える再生・再熱・中間冷却・深夜蓄熱・蒸気噴射の高効率ガスタービンの実証までには、少なくとも 5~10 年にかかる。そのためには、官民合同の計画的な研究体制が不可欠である。その結果、1995~2000 年の技術水準は、ガスタービン入口温度 1300°C 級と想定し、他の発電システムの技術水準もこれに準じて評価した。

CAES-GT の運転信頼性について疑問をもつ向きに対しては、大型の高压ガスタービンの実績に関し、西ドイツ Huntorf において 70 気圧の 29 万 kW のガスタービンを毎日のように起動・停止を繰り返して 10 年間の商用運転を行ってきたことを述べれば十分であろう。高温のガスタービンに関しては、2000 年に向けて、日本の電力は 1400~1500°C を、アメリカの GE も 1500°C をめざして研究を開始していることに期待がもてる。新しい技術は、必要に応じて、強い意欲によって生まれていくものであろう。フランスには "Vouloir est Pouvoir" という格言があるそうである。



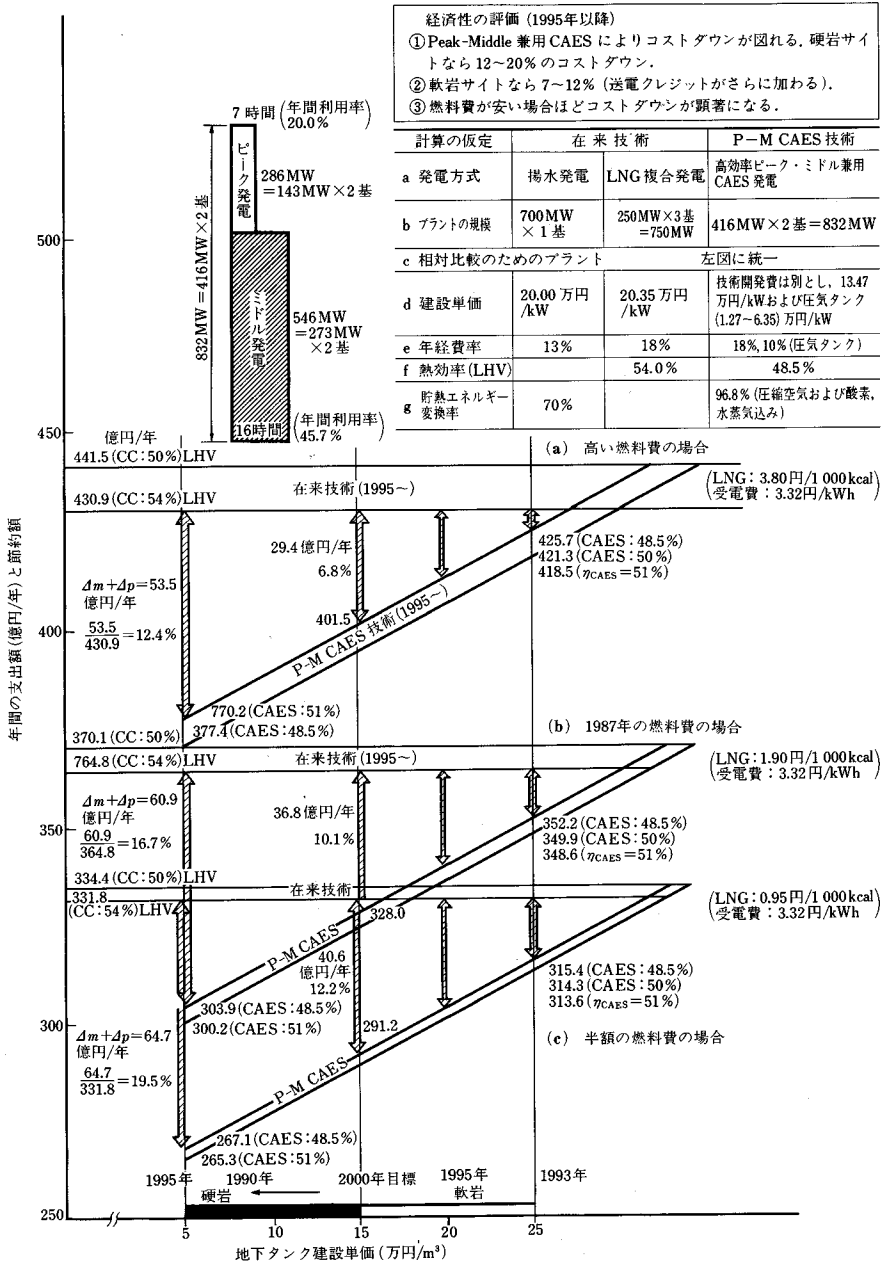


図-26 ピーク発電とミドル発電の兼用が可能となる CAES 発電プラント (再生・再熱・中間冷却・深夜蓄熱・蒸気噴射・地下タンク) の経済性の試算 (在来技術としてはピークは揚水発電, ミドルは近い将来の LNG 複合火力と想定した場合)

た。

ミドル発電の定格 273 MW のモジュールプラントが CAES-GT 運転により 416 MW のピーク出力になるので、ピーク発電所としての建設単価は地上プラント分としては 13.47 万円/kW に相当し、ミドル発電プラントとしては複合発電とほぼ同等である。当然、その中には土地、建物、……LNG タンクのトータルの設備が含ま

れている。ただし、取放水設備・蒸気発電系列は含まれていないが、再生熱交換器・中間冷却器・高圧蓄熱水槽等の費用は含まれている。

圧気タンクコストは表-3 の右端のシステムに相当するので、タンク容量  $V=105\,600\text{ m}^3$  の場合とし、廃坑利用で 5 万円/ $\text{m}^3$  以下、硬岩サイトで TBM 等在来工法により 5~10 万円/ $\text{m}^3$ 、廃坑の硬質軟岩 ( $q_u$  が 150



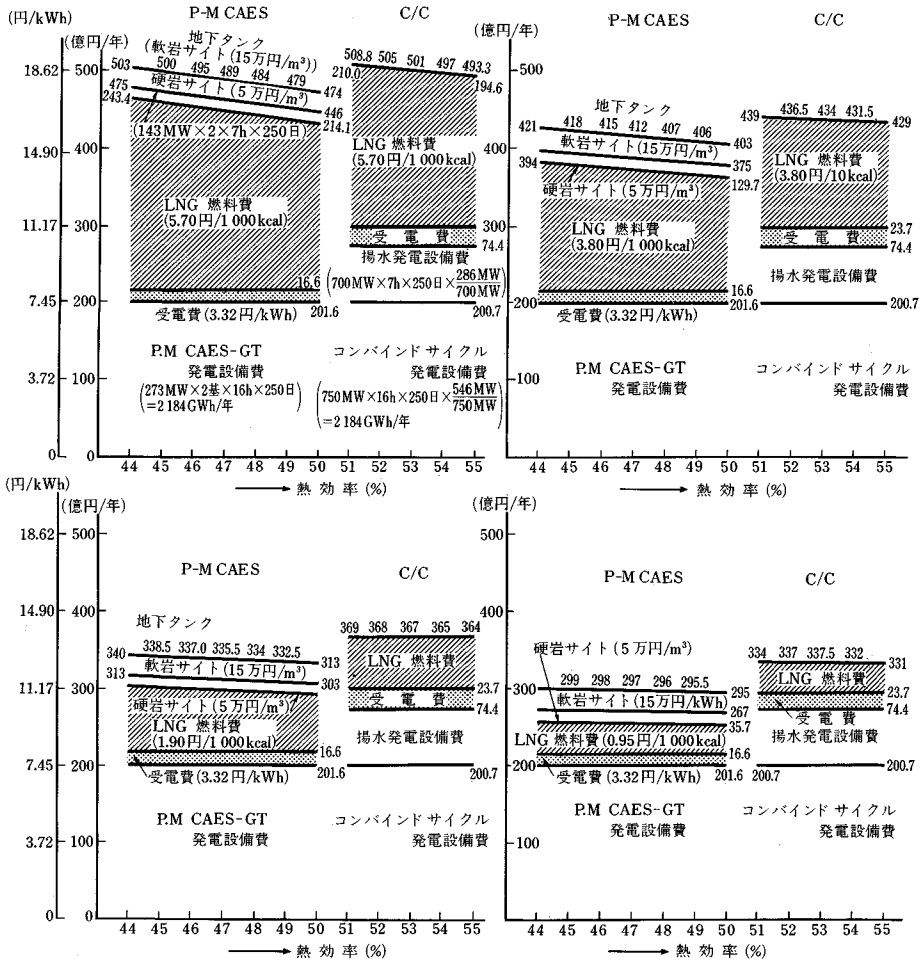


図-27 ピークとミドルの組合せ発電のためのコストの比較 (熱効率をパラメーター) (ピーク 500.5 GWh/年+ミドル 2 184.0 GWh/年=2 684.5 GWh/年)

kg/cm<sup>2</sup>程度)を拡幅し利用する水没・無人・全断面工法の場合 15 万円/m<sup>3</sup> 前後, さらに将来は都市の軟岩 ( $q_u$  が 30~50 kg/cm<sup>2</sup> 程度) での水没・無人・連続地中壁工法の場合, 2000 年頃に技術が成熟すれば 20 万円/m<sup>3</sup> と想定した。これらのうち水没・無人工法については次号でその構想を述べる。

(2) ピーク・ミドルの発電モードの比較

i) 在来技術：従来の Daily Start and Stop の LNG 複合発電においても, 形式的にはピーク・ミドルの兼用発電は可能である。しかしそれはミドル定格運転のモジュールのほか, 年間利用率の低いピーク増分用のモジュールプラントを別に設けるか, あるいは, 定格出力を下降させた年間利用率の低い図-22 の運用⑦のいずれかの方式によって可能となる。

ii) ピーク・ミドル兼用の CAES-GT: 深夜電力によって増分出力分の電力貯蔵を深夜に行っておき, それ

をピーク時に放出することによってピーク増分出力を発揮する。ガスタービンシステムは, 年間利用率が深夜と昼間のピークとミドルの両方の発電時間にまたがり, 高い値となる。資本節約型の図-22 の⑧の方式は今までにない新しい概念である。

(3) 熱効率と燃料費の比較

i) 在来技術：LNG 複合発電の近い将来 1995 年~の熱効率は, LHV において 51.5~53.0% と想定した (図-25)。さらに高い熱効率の場合として 54.0% の場合も図-26 と図-29 によって評価した。燃料費は図-25 と図-29 において (a), (b), (c) と 3 段階と比較した。

ii) CAES-GT: CAES-GT の熱効率はシステムを固定し LHV で 50.0% とした。しかし, 念のためさらに低い熱効率の場合を想定し, 図-27 によって評価した。燃料費は図-25 において (a), (b), (c) と 3 段階

を比較した。

(4) 受電費の比較：受電費は変動を考え図一25では3.32~0.95円/kWhとして評価した。しかし、受電費はかなり固定できる原子力の場合を考えておくことも意味があるので、3.32円/kWhとした場合も図一26のように検討した。

(5) ピーク・ミドル兼用 CAES-GT の発電コストの経済性の考察

i) 在来技術：図一25において、在来技術の年間支出額を右の棒グラフで示してある。その発電力は、ピーク・ミドルの機械で①と⑦の発電モードを発生させて⑨のCAES-GTのそれと同じにしてある。

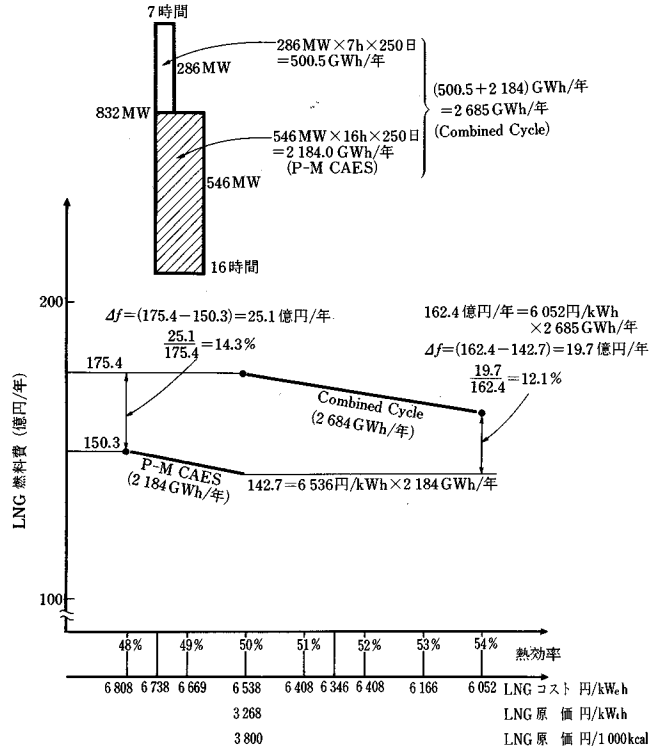
ii) ピーク・ミドル兼用の CAES-GT：図一25の (a), (b), (c) のそれぞれの燃料費の場合について、下から上にかけて、ガスタービンプラントの固定費、LNGの燃料費、地下タンクコスト、深夜受電コストの順に示してある。これらの図の横軸は地下タンクの建設単価である。

iii) 考察：以上の比較によって次のような重要な考察が生まれる。既存技術における同一のピーク・ミドル組合せ発電のモードと比較して、CAES-GTによれば、年間に発電のコストダウン  $\Delta m + \Delta p$  が発生し、その比率は (a) では10~15%，(b) では12~18%，(c) では13~20%になる。

さらに具体的に述べると、硬岩サイトではLNGの燃料情勢により差は出るが、10~20%のコストダウンが図れる可能性がある。硬質軟岩サイト（地下タンクコスト15万円/m<sup>3</sup>）では7~10%，軟岩サイト（地下タンクコストは成熟段階で20万円/m<sup>3</sup>）では5~7%程度のコストダウンが予測される。

ただし、この値には都市型 CAES-GT としての送電路の短縮、および都市の公共的社會資本としての付加価値等の重要なファクターがまだ入っていない。それらを加味すれば、軟岩サイトの場合のコストダウンはさらに大きくなると期待できる。

そこで、都市型 CAES のメリットに言及する。それは送変電クレジットと送電力損失のクレジットが主である。送変電クレジットは前述のように0.3万円/kW・年、286 MWとしてこのピーク送電分として受電端でクレジットが発生するとすれば、0.3万円 (kW/年) × 28.6万kW = 8.56億円/年が ( $\Delta m + \Delta p$ ) に加算できる。すなわち、図一25の軟岩サイト (20万円/m<sup>3</sup>として) での (a), (b), (c) の値は42億円、41億円、40億円となり、コストダウン率はそれぞれ10%，11%，13%程



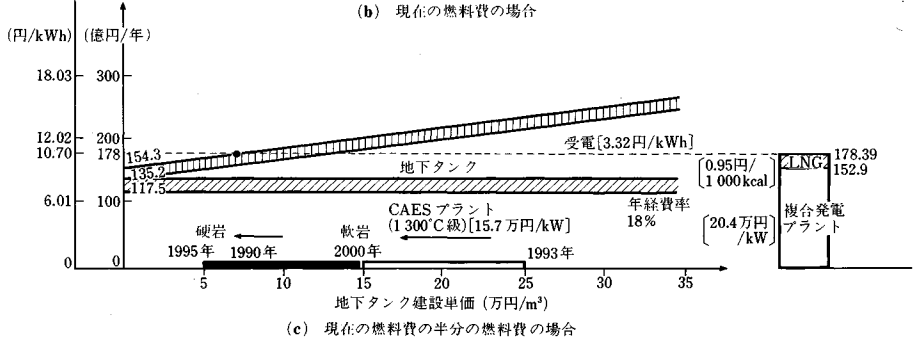
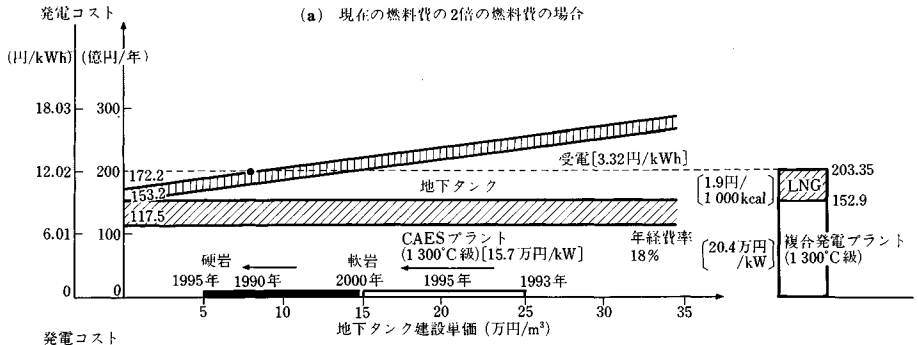
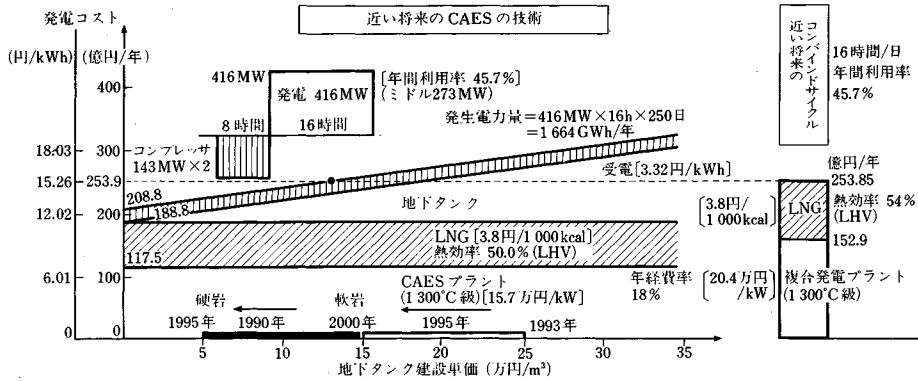
図一28 P-M CAES による LNG 燃料の節約額

度に見直されることになる。

さらに、ピーク送変電路での電力量損失の前述の2.8%のクレジットのうち、送電距離が半減し、たとえば2.8%の半分が節約されるとすれば、年間のピーク電力量の1.4%が節約されたことに相当する。

以上、要するに、都市型の CAES-GT は、ミドルとピークの発電コストを10%以上も軟岩サイトの場合においても低減できる可能性を秘めている。しかも、国際的な燃料価格の変動に左右されないで、コストダウンが図られる見通しである。これが本研究の結論である。

従来の CAES は、熱効率が低く、ピーク専用であり、年間の利用率が低いので、ガスタービンのコストの負担が大きく、わが国では難しいと思う。また、ミドル発電にも貯蔵圧縮空気を用いるような Alabama の運用を真似ても、その圧気タンクコストが岩塩層でないから高価なものになり、それも夢物語かもしれない。筆者の提案しているピーク・ミドル兼用 CAES は、ピークは CAES 運転、ミドルは通常の運転 (非 CAES) である。当然、圧気タンクコストはピーク用だけで済む。しかし、ガスタービンコストに関しては、ピークとミドルの発電力量に応じたコストの分配が発生するので、ミドル発電分のガスタービンコストの負担が軽くなることに着眼がある。なお、海底タンクのコストは約10~15万円



図一29 長時間 CAES 運転 (Super CAES) の場合の発電コストと複合発電の場合のコストの比較 (年間利用率 45.7% の場合)

/m³と目されるので、適地があれば硬岩なみに成立する。

(6) LNG の節約：LNG 複合発電に比べ、ピーク・ミドル兼用の CAES-GT は、その熱効率が 2～4% 低いとしても、ピークとミドルの全量を LNG 複合発電で賄うと仮定した燃料消費量に比べ、原子力の燃料への転換の結果、図一27、図一28 のように 12.1～14.3% の節約になる。

(7) 長時間 CAES (Super CAES) の経済性の考察：ピーク発電分だけの圧気貯蔵でなく、たとえば 1 日に 16 時間の CAES 運転をするための圧気貯蔵を行いたる場合は、発電コストは現在方式の LNG 複合発電よりも安くなる可能性がある。Alabama 電力の計画は一部分この運用を含んでいる。今回のガスタービンシステムを例にとれば、このための圧気貯蔵タンクは約 20 万 m³ を

こすので、常識的に考えて軟岩サイトでは評価にのらず、この長時間 CAES (Super CAES と仮称) は、硬岩サイトにおいては経済性に優れていると思われる。ただし、深夜の短時間に所要の圧気量を製造するためのコンプレッサを増設する必要がある。このような思考の過程を経て、筆者が試算した結果は図一29 に示すようであり、次のような考察が生まれる。

i) 16 時間の CAES-GT 発電を行う場合は、416 MW 出力の場合、60 気圧 x 21.1 万 m³ の圧気タンクを必要とする。図一29 において、複合発電との Break Even Cost は、原油価格が高いケースである (a) では、圧気タンク建設単価でみると 13 万円/m³、(b) では 9 万円/m³、(c) では 7 万円/m³ である。

ii) この Super CAES が複合発電より安くなるのは、

硬岩サイトであるといえる。日本においては、大規模火力はその燃料設備を含めトータルとしての立地は海岸にあり、日本での Super CAES は硬岩の分布する瀬戸内海沿岸ではきわめて有望であると思われる。官民合同の研究会をつくり、その実現を図りたいものである。

(8) 従来型のピーク専用 CAES の経済性の考察：Huntorf のようなピーク発電だけを目的としたシステムは、揚水発電の代替システムとしてわかりやすい。しかし、年間発電電力量が少なく、地上のガスタービン設備と地下の圧気タンクの設備のすべてを発電コストとして負担する方式なので、わが国の地質条件では一般には成立しにくい。しかし、鉱山の廃坑を利用すれば成立する可能性は残っているので、是非、採炭地の社会問題への対策という位置付けと CAES-GT のコンセンサスづくりも考慮し、官民合同の研究会をつくり、その実現を図りたい。

(9) 各種の発電方式の発電コストの比較 (図-22)：すでに、CAES-GT に関係した経済性の評価は述べた。ここでは、さらに広い視野で、各種の発電方式を総括しておきたい。

① 揚水発電 実用規模を考え、700 MW×7 時間のプラントレベルとし、建設単価は現在は 20 万円/kW、西暦 2000 年頃には地点の地質・環境等の対策費がさらにかさむ傾向を考えに入れ 23 万円/kW の両方とした。①の実線として年間の利用率に応じた発電コストを示し

た。これと比較してみると、ピーク・ミドル兼用発電の場合のピーク発電コスト⑨は、硬岩・軟岩ともに揚水発電に比べ安くなる。

② 新型電池 その実用規模は 1 MW×7 時間と想定し、建設単価は 50 万円/kW とすると、発電コストは 49.2 円/kWh と高価になる。ただしこれには図-6 で述べた送変電・配電のクレジットはまだ算入されていない。

③ LNG 複合発電の実用機 プラントサイズは商用のモジュールを組み合わせた 700 MW と大規模を想定した。建設単価は実績の中庸をとり 20 万円/kW とし、熱効率率は 1150°C 級の実績として 48% (LHV) とした。ミドル発電として年間利用率の変化に応じた発電コストを実線のように描いた。

④ ピーク用の実用機による CAES-GT 実用機として、1150°C 級の三菱重工製 MW 701 をシステム化した場合を算定した。経済性評価としては、さきに述べたように、実用機では、硬岩サイトでもピーク専用では成立しにくい。

⑤ ピーク・ミドル兼用の実用機による CAES-GT 実用機としてはさきと同じく MW 701 とし、CAES としてシステム化し、ピーク 774 MW×7 時間、ミドル 238 MW×16 時間の設計の場合は、圧気タンクが大きくなり過ぎ、技術的にも経済的にも成立しない。

⑥ 長時間 CAES-GT の実用機による成立性

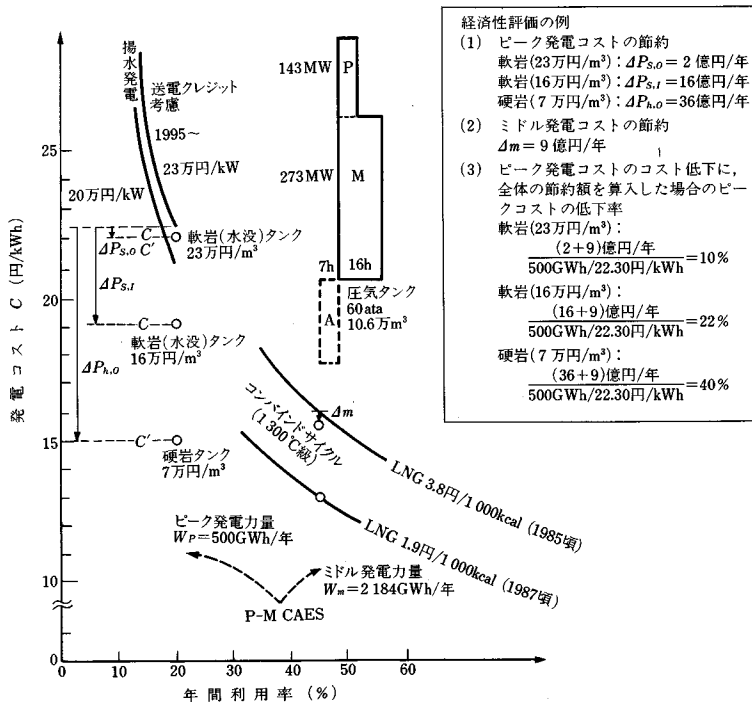


図-30 ピーク・ミドル兼用 CAES プラントの経済性評価 (例)

LNGの価格が高くなると硬岩サイトで成立する。

⑦ 近い将来の1300°C級の商用ガスタービンをを用いたLNG複合発電 熱効率を54% (LHV) とした。LNGの国際価格が3.8円/1000 kcalの場合と、1.9円/1000 kcalの場合をそれぞれ発電コストとして示した。

⑧ 今回提案した高効率ガスタービン(1300°C級)を用いたピーク専用のCAES 硬岩サイトでは成立する可能性がある。

⑨ 今回提案した高効率ガスタービン(1300°C級)を用いたピーク・ミドル兼用のCAES 経済性評価をわかりやすくするため、図-30を用意した。ピーク発生電力量とミドル発生電力量の比率に応じ、ガスタービンの設備費はそれぞれの発電コストに分配される。評価の考え方は、図-30の右上の欄に例示した。

要するに、軟岩サイトでもこの方式を採用すれば経済性が高いことがわかっていただけたらと思う。

⑩ 今回提案した高効率ガスタービン(1300°C級)を用いた長時間CAES-GT (Super CAES) 硬岩、中硬岩では十分に成立する。

⑪ 独立したガスタービン発電(119 MW) 揚水発電にはほぼ匹敵する。しかし、電力貯蔵の機能はない。

⑫ 将来の超電導電力貯蔵 まだ経済性を論ずる段階に来ていない。

#### (10) 都市型 CAES の公共的社會資本としての付加価値

都市近郊にCAES-GTプラントを設け、その圧気タンクが水没式で、水圧補償型の場合を主体として、たとえば表-2のような公共事業としての付加価値が発生することが筆者の重要な提案である。

- ① 水害対策用の地中ダム、(地下河川)
- ② 下水処理場の曝気用空気の供給、および深層曝気
- ③ 海中のリチウム、ウラニウムの採集
- ④ 宇宙産業用の無重力実験
- ⑤ 冷熱利用の冷房・冷凍倉庫と暖房システム
- ⑥ 寒冷地帯における暖房・融雪
- ⑦ 水質の汚濁した河川・湖沼等の水質浄化用の曝気
- ⑧ その他

#### (11) 研究開発手順(案)

この提案は、発電方式、特に揚水発電などのピーク発電と将来の分散型の電力貯蔵との関係、さらに大きく1日14~15時間の電力貯蔵をあずかる新ミドル発電、特にLNG複合発電などにも関係の深い新しい火力発電方式の構想である。

したがってきわめて慎重に手順を踏みつつ、辛抱強く中間評価を重ねる研究・開発体制が必要である。その手順の概略を提案する。

1990~1993年 官民合同によるトータルシステムの

成立性調査 (CAES-GT 向きの高効率のガスタービンシステムと新型空洞建設技術)

1990~1996年 硬岩 CAES-GT の小型実証試験 (廃鉱利用)

1991~1996年 硬質軟岩 ( $q_u$  が 150 kgf/cm<sup>2</sup> 程度) での水没掘削、水没覆工の圧気タンクの実証実験 (石炭廃鉱の立坑を掘削し利用)

1997~2000年 硬岩 CAES-GT の大型実証実験 (実用段階)

1991~2005年 軟質岩盤 ( $q_u$  が 30~50 kgf/cm<sup>2</sup> 程度) での水没掘削、水没覆工の実証実験 (小型、中型、大型)

1991~2000年 高効率の CAES 用ガスタービンの実証実験 (概念設計—要素実験—詳細設計—トータルの実験—改良研究)

### 3. 結 び

(1) この新構想の圧縮空気貯蔵・ガスタービン発電は、21世紀に入って技術が熟成すれば国際的な燃料価格の変動にほとんど左右されないで、揚水発電に比べピーク時の発電コストは20%減、ミドル発電もLNG複合火力に比べ5~10%安くなるよう省資源型のピーク・ミドル兼用のハイブリッドシステムと評価される。その理由は、従来の海岸の火力発電所と山の中の揚水発電所の2つの機能を1つのサイトで賄えることに着眼していることにある。

(2) さらに重要なのは、電力の変換効率(電気を預ったり吐き出したりする効率)がきわめて良いことで、揚水発電の70%に対し燃料を加味して圧縮空気の圧力と含有酸素の化学エネルギーの相乗効果の結果90%以上となり、話題の超電導電力貯蔵の90%に匹敵する。

(3) 筆者はこのシステムを“都市の活気の源”という意味で「元気システム」と名づけてきた。英語では Compressed Air Energy Storage だが、日本では Urban Revolution を加え CAESUR (シーザー) システムとよぼうという気運が出てきている。都市の Revolution とは何なのか。日本ではシステムとしては単なるピーク発電の電力貯蔵の機能をこえて、水圧補償型圧気タンクにすると次のような付加価値を生むことが、次々と発想されたからである。

深さ600mの地底の約10万m<sup>3</sup>の空気タンク(空洞の安定化のため空気が入っていないときは水を呼び込む)は都市での軟岩での地下タンクの建造が可能になることのほか、①都市が集中豪雨や高潮などに見舞われたとき、圧縮空気は地上でのガスタービン発電(約40万

kW×7時間)に消費すれば、自動的に河川水が流入し遊水池に転用することができる。圧縮空気を急いで発電用に消費し、水と入れ替えればいいわけだから、問題はタイミングの調整だけである。また②下水処理場の隣りにつくって、圧縮空気の一部を曝気槽のエアレーションに安く深夜電力により空気のコージェネレーションとして分配することも考えられるし、③圧縮空気を抜いた分の水没空間を高圧下での深層曝気槽に使う活用法も可能性がある。④都市の汚濁した河川水をオゾンで清浄化するにも圧縮空気に放電すれば安く大量のオゾンが発生できるかもしれない。⑤空洞に呼び込む水は、もちろん海水でもさしつかえない。たえず新鮮な海水を呼び込んで、海水に含まれているウランやリチウムをマンガンボールで吸着することも大きな付加価値になる。あるいは、⑥地底まで600 m、直径3 mの送気管を休電日には真空の管にして、宇宙産業の無重力実験に使ってもらうことも荒唐無稽な夢ではない。⑦熱と電気のコージェネレーションとして深夜に発生するコンプレッサの廃熱は、昼間の冷・暖房用の熱源に転換できる。

21世紀の大都市は、日本だけでなく、環太平洋の大都市・欧米の大都市も地底にこのようなエネルギーと資源および環境を大観した多彩な目的をもった“シーザーの洞窟”をいくつも抱えることにならないだろうか。

この新技術の発案と構想化の魅力にとりつかれて、早くも5年の歳月が経った。その想いの底には、筆者が36年間従事してきた水力・火力・原子力などでの岩盤力学・地盤耐震工学・地中空間開発などの知識の泉であった母なる大地と、莫々たる空気と力強い水を結び付けるCivil Engineeringとしてのロマンがあった。

そのロマンをつなぐのがクリーンな天然ガスの燃焼と高度化の一途をたどるガスタービンの技術であった。宇宙開発技術の魁(さきがけ)であるターボジェットエンジンの歴史が、こんなに地中開発技術と身近なことにも驚きがあった。

謝辞：電力中央研究所理事長 成田 浩氏以下の理解のもとに、1985年以来日々新たな構想が生まれた。

その経済性の見通しが高いことがわかったので1988年度からはこの構想を実証のため、長期研究計画に組み込まれた。そして硬岩タンクと軟岩タンクについて、まずボーリングにより圧気テストが1989年度から始められる予算がついた。我孫子研究所にその研究チームが若手研究員たちにより編成できた。

21世紀型の高度なガスタービン技術については、高効率ガスタービン技術研究組合の佐野恵保、および竹矢一雄の両博士に懇切な指導をして頂いた。

経済性評価については、電中研の矢作文彌・内山洋

司・角湯正剛の博士たちに討議してもらい、協力を受けた。また、各電力会社・三菱重工・清水建設・新日鉄をはじめ多くの会社から種々の資料の提供を受けた。

建設技術の新構想は、次回に報告するが、その検討にあたり、メーカーとゼネコンはじめ多くの方々の協力をいただいた。また、官庁・大学からも種々の助言と激励を受けた。

今後、実現までには10年の年月を要するが、地中空間開発と水中空間開発と発電システムをつなぐロマンに満ちた21世紀型のこの新構想が実証できるよう官・民での事前評価・研究開発体制などが芽生えることを期待している。

#### 参考文献

- 1) Haddenhorst, H.G., Lorenzen, H., Meister, F., Schaumberg, G. and Vicanek, J.: Hochdruck-Erdgas-Speicherung Salzkavernen, Erdöl Erdgas Zeitschrift, Sonderdruck aus Heft 5/6, 1974, Seite 154-161/197-204.
- 2) Schainker, R., Nakhmkin, M., Stange, J. and Louis, J.: Turbomachinery Engineering and Optimization for 25 MW Compressed Air Energy Storage Systems, Proc. of ASME International Gas Turbine Conference, June 1984.
- 3) Irwin Stambler: Alabama Electric going a head with 110 MW air energy storage plant, Gas Turbine World, Aug. 1988.
- 4) 西 亮: 圧縮空気貯蔵ピーク発電装置の研究, 日本ガスタービン学会, 秋季大会, 1985.11.
- 5) 竹矢一雄: レヒートガスタービン技術を応用した高性能新発電システム, 日本ガスタービン学会第3回特別講座, 1986年9月.
- 6) 竹矢一雄: “レヒートガスタービン利用”の新発電システム, 日本ガスタービン学会, 15-59, 1987.
- 7) Macchi Ennio and Lozza Giovanni: A Study of Thermodynamic performance of CAES Plants, including Unsteady Effects, 87-GT-23, ASME, 1987, Anaheim Conference.
- 8) 林 正夫: 深部の軟岩中での圧縮空気貯蔵-ガスタービン発電の可能性, (社)システム総合研究所, 第17回「地下空間の開発と利用」, 講演会論文集, 1986年12月.
- 9) 林 正夫: 圧縮空気貯蔵-ガスタービン発電の新しい可能性-電力貯蔵-変換率は超電導率に匹敵・高い付加価値・ピークとミドルの兼用発電-, 火力原子力発電技術協会昭和62年度大会講演集, 1987.10.15.
- 10) 林 徹: 圧縮空気貯蔵システム・土木通信社第56回講習会, 1986.11.
- 11) 関根・西松・佐野・竹矢・亀山・林・堀・加藤・竹下・扇田: (圧縮空気貯蔵-ガスタービン発電, 新方式検討会) “圧縮空気貯蔵-ガスタービン発電の新方式の概念とその経済性の概査”, 電力中央研究所, 研究調査資料, J87902, 1987.10.
- 12) 緒方・駒田・本荘・藤原・本島・西・林: ガスタービン発電用圧縮空気岩盤内, 地下貯蔵空洞のフィージビリティ

- ティ, 電力中央研究所, 調査報告, U87094, 1988. 7.
- 13) 中川・駒田, ほか: 岩盤内圧気貯槽からの漏気防止条件, 土木学会論文集, No. 370/Ⅲ-5, 1986. 6.
  - 14) 林 正夫: 圧縮空気貯蔵—ガスタービン発電の新方式〔構想〕, 第7回岩の力学連合シンポジウム, 土木学会, 1987. 12.
  - 15) 林 正夫: 圧縮空気貯蔵—ガスタービン発電の新技術構想—ピーク・ミドル兼用発電の経済性評価—, 燃料協会誌, 1988. 10.
  - 16) 内山洋司・角湯正剛: 圧縮空気利用システムとその導入効果, エネルギー資源, 9-5, 1988. 9.
  - 17) 清野圭子: ダイナミック・オペレーティング・コスト研究の現状と課題, 電子中央研究所, 調査報告, Y88011, 1988. 10.
  - 18) 林 正夫: 大電力を地下に貯蔵する—圧縮空気貯蔵—ガスタービン発電の新技術構想—, 地下空間利用に関するシンポジウム, 土木学会, 1988年10月.
  - 19) 増田秀美: 超電導電力貯蔵, 燃料協会誌, 67-9, 1988年9月.
  - 20) 茅 陽一: エネルギー新時代—ホロニックパスに向けて, 省エネルギーセンター, 1988.
  - 21) 堀井憲爾, ほか: 海水を利用したエネルギー貯蔵—発電方式の調査研究, 海水エネルギー貯蔵発電研究会, 1981年9月.
  - 22) 内山・角湯・林: 圧縮空気貯蔵・発電システムの経済性評価, 第6回エネルギーシステム, 経済コンファレンス, 1989年1月.
  - 23) 国生・藤原・西・林: 深部軟岩を利用した圧縮空気貯蔵(CAES)空洞の成立性調査, 電力中央研究所, 調査報告, U88045, 1988. 10.
  - 24) 林 正夫: 新構想の圧縮空気貯蔵—ガスタービン発電の経済性の概念—ピーク・ミドルの兼用発電プラントの提案, 電力土木, No. 218, 1989. 1.
  - 25) 林 正夫: 新構想の深部軟岩での地中タンク(水没方式)の工法の概念, 電力土木, No. 219, 1989. 3.
  - 26) 電源開発(株): 圧縮空気貯蔵発電システムに関する調査研究(Ⅱ), NEDO-P-8825, 新エネルギー・産業技術総合開発機構より電発に委託した調査の報告書, 1989年3月.
  - 27) Takeya, K.: Reheat Type Advanced Gas Turbine, Proc. of Japanese-French Expert Meeting on Energy Conservation Technology, Moon Light Project Promotion in Agency of Industrial and Technology, held by MITI, Tokyo, May, 1989.

(1989. 10. 6・受付)

---

投稿論文  
**Paper**