

熱水岩盤貯蔵発電システムの提案

CONCEPTUAL PROPOSAL OF HOT WATER STORAGE SYSTEM USING A ROCK CAVERN AS A POWER STORAGE METHOD

八田敏行*・熊坂博夫**・中川加明一郎***・小野純二****

Toshiyuki Hatta, Hiroo Kumasaka, Kameichirou Nakagawa, Junzi Ono

In this paper, as a power storage method, a concept of a system storing large quantities of high temperature and high-pressure steam in a rock cavern is proposed. This system stores steam generated in the nighttime from nuclear, coal and oil-fired power plants and supplying it to turbines to generate electricity in the daytime. Through examinations for necessary basic functions of facilities using some numerical analyses, the feasibility is demonstrated and the problems to be solved are presented.

Keywords : rock, hot water, storage, power generation

1. はじめに

我が国の電力負荷パターンは季節・日間の変動が大きい。図-1 に示されるように夏場の電力使用量が突出している。また、日間のパターンでは、冬期の昼夜の変化は比較的に少ないが、夏期においては夜間は著しく落ち込み、昼間に突出していることがわかる。このような特徴も一因となり我が国の年負荷率（年間平均電力を年間最大電力で除したものは図-2 に見るように約55%程度と欧米に比べ低い。将来、原子力発電の割合が増加することも想定すると、負荷平準化を図り負荷率を向上させるための電力貯蔵の必要性は大きいと思われる。

図-3 に見られるように電力貯蔵の技術としては、揚水発電に加え、圧縮空気

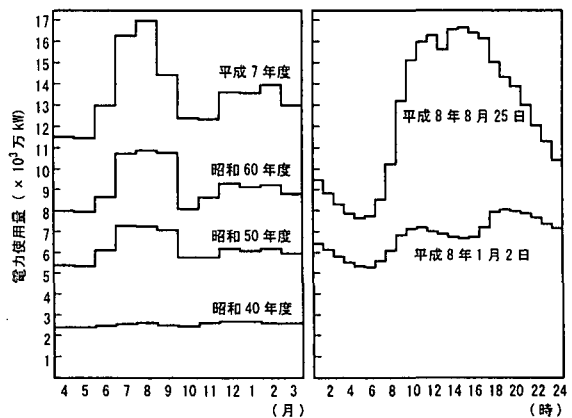


図-1 電力の負荷パターン

(出典：電事連公開資料をもとに作成)

Keywords : 岩盤、熱水、貯蔵、発電

* 正会員 清水建設株式会社 技術研究所 地下技術グループ
** 正会員 博 (工) 同上
*** 正会員 工博 電力中央研究所 我孫子研究所 地圏環境部
**** 三井造船株式会社 技術部

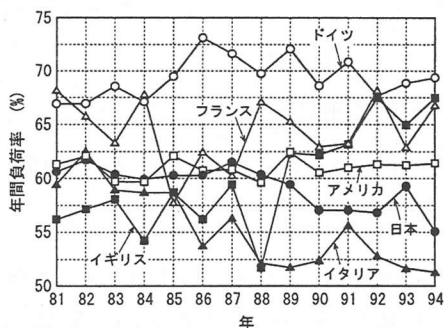


図-2 我が国の年負荷率
(出典：文献1をもとに作成)

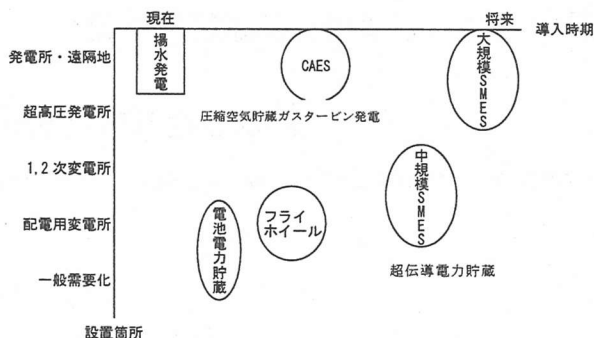


図-3 電力貯蔵の技術²⁾

貯蔵ガスタービン発電システムなども実用化されつつあるが、電力貯蔵のニーズは大きく今後一層電力貯蔵技術の開発は重要になるものと期待される。

蒸気を熱水の形で压力容器に貯え、高負荷時に備える技術は古くからあり、原子力や石炭火力の大容量の蒸気を貯蔵しピーク負荷時に発電するシステムの有用性も以前より提案されている。しかし、高温・高压の大量の蒸気をどのように貯蔵するかについては課題であると指摘されている³⁾。

本論文は、近年我が国において圧縮空気貯蔵の分野で確立されつつある岩盤内への高压気体貯蔵技術に加え、岩盤の持つ断熱性を利用することによる高温・高压の蒸気的大量貯蔵方法を蒸気発電における貯蔵技術として利用する熱水岩盤貯蔵発電システムとして提案するものである。本論文においては、本システムの基本的な考え方と概念検討結果およびそこから抽出された実現へ向けた課題等について示す。

2. システムの概念

熱水岩盤貯蔵発電システムは、既存の原子力や石炭、石油火力発電所などにおいて、夜間運転時に発生する蒸気の一部を地下岩盤空洞内に建設した貯槽に貯蔵し、需要の大きい昼間に専用の蒸気タービンを用いて、通常の主タービンと並列運転することによって負荷平準化、負荷率向上、ピーク対応などを目的とした電力貯蔵システムである。この概念を図-4に示す。

蒸気の貯蔵運転においては、高温・高压のボイラから発生した蒸気を貯槽内に注入し、すでに存在する低温・低圧の熱水および地上からの注水（60℃程度）と直接熱交換する。この注水は蓄熱蒸気のエンタルピーが放出蒸気より高いことより、エネルギーの収支バランスを図るため必要となる。高温・高压の熱水を貯槽内に注入すると、飽和熱水中に新たなエネルギーが注入されることから、熱水は即座に沸騰が始めるが、同時に圧力が上昇し貯槽内は安定化するよう気液平衡を維持する。蒸気の放出運転においては、高温・高压の蒸気を蒸気溜まりから減圧調整しながら、貯槽から排出する。放出運転時は、蒸気を放出することによって徐々に圧力が低下すると同時に温

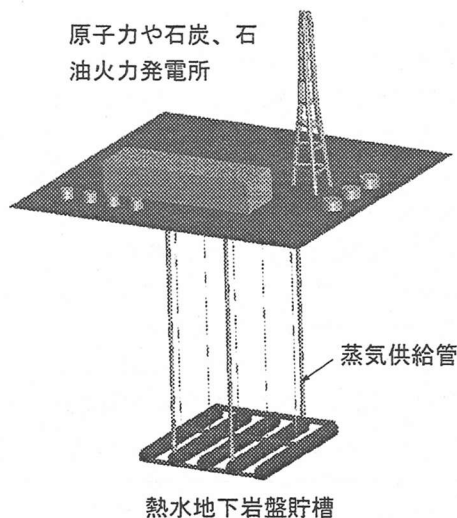


図-4 熱水貯蔵発電システム概念図

度も低下する。このシステムは、揚水発電や圧縮空気貯蔵発電などが一度発電された電気を位置エネルギーや圧縮空気のような別な形で貯蔵する事に比べ、発電所で電気に変えられる前の蒸気をそのまま熱エネルギーの形で貯蔵しようとする点が異なる。

揚水発電などと異なり、このシステムでは発電所で発生した蒸気を貯蔵するため、発電所構内または隣接する敷地などに建設する必要がある。既存の発電所に付設する主な施設は、発電機としてはピークに発電を行うピークタービンと蒸気を貯蔵する地下の貯蔵施設である。地下の貯蔵施設は、高温・高圧の熱水を大量に貯蔵する必要がある。このような貯槽を鋼成の圧力容器として建設すると建設コストが非常に大きくなり経済的に成立することが難しいと考えられる。今回の提案は、岩盤の持つ耐圧性や断熱性を利用し断熱材などを使用せず岩盤内の空洞を貯槽として使用しようとするものである。

このような高圧気体貯蔵を行うために地盤は良好な岩盤が対象となる。わが国において、原子力や火力発電所の相当数は良好な岩盤地帯に位置していることより、このシステムの立地できる適用可能性は十分にある。

また、このような蒸気の利用において発電機技術面からは大きな課題がないと考えられる。このため、本システムの成立性の検討においては、大容量の高温・高圧の蒸気貯蔵技術の成立性とそのシステムの経済的な成立性の2点が重要である。

3. 熱水岩盤貯蔵発電システム概念の基本検討

3.1 検討条件の設定とその影響の考察

(a) 対象発電設備およびその規模

対象発電設備としては、原子力、石炭、石油火力発電所などが考えられる。原子力発電を対象としたマーケットは非常に大きい可能性があることに加え、システムが複雑でなく蓄熱蒸気の温度も 250℃程度であり、検討対象としては最適であるが、現在の原子力発電を囲む環境を考慮し、今回は、1000MW 級の石油火力を対象としたスタディを行った。日間の電源構成を図-5 に示す。この図に示されるように、石油火力が需要調整の大きな役割を果たしている。今回の検討は、稼働率の低い石油火力発電所の夜間に発生した蒸気を需要のピークの昼間にシフトすることにより稼働率を向上させることを目的とした。

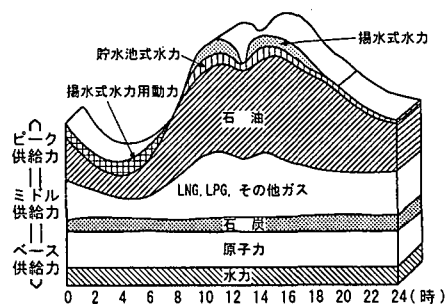


図-5 日間の電源構成⁴⁾

(b) 蓄熱蒸気

石油火力の場合、主蒸気は 24.7MPa, 538℃であるが、蓄熱蒸気は中圧ラインから供給することとした。この圧力、温度は 4.9MPa, 566℃である。

(c) 発電貯蔵時間

蓄熱運転、放出運転の時間は各々12時間とした。

(d) 貯蔵開始時および払い出し終了時の貯槽の圧力、温度

貯蔵終了時の貯槽が最も高圧である圧力を初圧、放熱終了時の貯槽の圧力が最も低い圧力を終圧と定義する。発電容量を一定にした場合、初圧と終圧の差が大きいほど貯槽の幾何容積は小さくなるが、ピークタービンの発電効率は、高圧で一定であるほど高くなるため、初圧と終圧の差が大きくなると、貯蔵発電

効率は低くなる。逆にこの差が小さいと、貯蔵発電効率は高くなるが貯槽の幾何容積が大きくなる。初圧は、大きい方が発電効率、貯槽容量の面で有利であるが、岩盤空洞の耐えられる圧力以下である必要がある。この最適なポイントは、出力を初めとする多くの因子に影響される。本検討においては、初圧は 4.5MPa、終圧は 2.5MPa 程度に設定した。

(e) 貯槽幾何容積の余裕

熱水槽容積が最大で蒸気溜まり容積が最小である場合が、貯槽の幾何容積は最も小さくなり経済的であるが、熱水の幾何容積に比べ蒸気の容積は小さく、全体の幾何容積に与える影響は少ない。

3.2 地上施設の検討

運転モードには、通常の運転、蒸気を貯蔵する蓄熱運転、貯蔵した蒸気により発電を行う放熱運転の 3 つのモードがある。蓄熱運転、放熱運転のプロセスを図-6 に示す。

蓄熱運転のモードでは、夜間発生蒸気は、主タービンへ若干の蒸気が通気されるが、その大半は地下の貯槽へ噴射される。貯槽はあらかじめ、低圧、低温の熱水が貯槽の底部に貯まっておりその中に主蒸気が噴射され、同時に地上のホットウエルタンクから注水されることにより熱交換され、貯槽全体の圧力と水位が徐々に上昇する。

放熱運転のモードでは、昼間の電力ピーク時に、地下貯槽に貯蔵された高温・高圧の熱水を減圧制御弁を通してピークタービンへ蒸気を供給し発電を行う。本検討では、このときタービンへ供給される蒸気は飽和蒸気であるためタービン低段での湿り度を極小化するため独立過熱器によって加熱することとした。

地下貯蔵には、蓄熱放熱運転に応じて圧力が変動する変圧型と一定圧力を保持する定圧型が考えられる。本検討においては定圧方式においては地下貯槽内へのポンプの設置が困難であるため、貯槽の上部蒸気溜まりより蒸気を放出する変圧型の方が技術開発要素が少なく有利であると判断した。発電のための主な構成機器は下記のとおりである。

・ピークタービン

昼間地下貯槽より抽気した蒸気により発電するためのピークタービンの設置が必要となる。ピークタービンからの復水は地上のホットウエルタンクに貯留されて夜間運転時の給水として使用される。

・独立過熱器

貯槽から放出される蒸気を再度加熱することによって加熱蒸気とし、効率を向上させることとした。このため、蒸気加熱器を設置することとした。この加熱方法として、高温排ガス温度を有するガスタービン発電と併用することが効率の面からはもっとも好ましいが、今回の検討を複雑化するためガスタービンとの複合の検討は除外した。

・地下への配管

地下に設置された岩盤内空洞にボイラ発生蒸気を注水と同時に噴射し混合、貯蔵するための配管設備である。また、蓄熱蒸気を取りだす蒸気の放出管としても使用される。本システム成立のための特徴的設備で

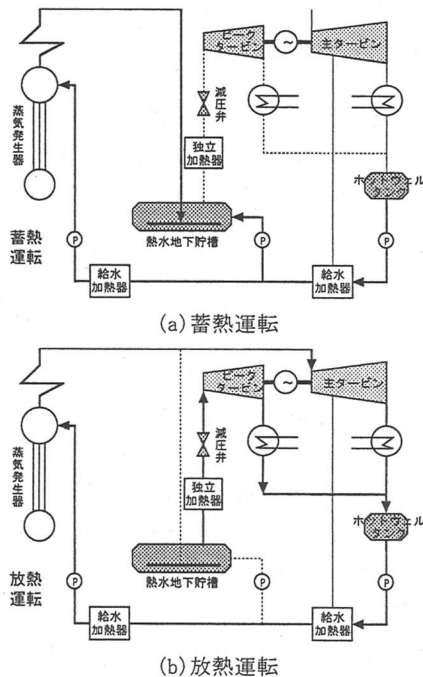


図-6 運転プロセス

今後の技術的検討、開発を要する。

3・3 地下貯蔵施設の検討

地下の良好な岩盤内の空洞に建設される貯槽は、高温・高圧の熱水を大量に貯蔵する必要がある。貯槽に注入される蒸気の圧力・温度は、対象となる発電施設によって異なる。また、貯槽内の熱水の圧力・温度は運転状況に応じ変化する。

ここにおいて地下岩盤空洞が貯槽として成立する可能性を検討するために想定としている貯槽内の熱水の温度圧力は 200～300℃、20～50 気圧程度である。

地下岩盤内に建設される空洞が、熱水貯蔵の貯槽として成立するためには、岩盤空洞が安定することと、貯蔵した蒸気や熱水が外部に漏洩しないことと貯蔵した熱のロスが小さいことがあげられる。

貯槽の基本コンセプトは、以下のとおりとした。

- ・貯槽の気密保持は水封またはライニング方式による
- ・貯槽内圧は岩盤により支持する
- ・貯槽の保温については、断熱材などを使用せず、岩盤自体の持つ低い熱伝導特性を利用する

(a) 気密液密構造の検討

貯槽の気密・液密性を保持する構造としては、岩盤内空洞をスチール材などでライニングするライニング方式と周辺の地下水に期待する水封方式とがある。

ライニング方式は、国によって北海道上砂川に建設された圧縮空気貯蔵ガスタービン発電パイロットプラントにおいては 8MPa の高圧空気が貯蔵されその技術の有用性が実証された⁵⁾。この他、天然ガスの貯蔵を目的として、ヨーロッパでパイロットプラントが建設中であり、わが国においても精力的に検討が進められている⁶⁾。また、水封方式においては、原油や LPG の備蓄で多くの実績があるが、電力中央研究所は岐阜県神岡においてこれより高圧である 2MPa の高圧空気の貯蔵を実証した⁷⁾。

ライニング方式を熱水貯蔵に適用した場合の主な課題としては、以下のような点が考えられる。

- ・貯蔵温度が高いため、ライニング材に対する影響（熱応力）が克服できるか
- ・設置深度が貯蔵圧力に比べて小さいため、貯槽周辺の地下水が沸騰し、蒸気となり地上へ噴出する可能性がある

水封方式を熱水貯蔵に適用する場合の主な課題としては、以下のような点が考えられる。

- ・貯蔵温度が高く、貯蔵圧力がより高圧である
- ・想定している圧力変動幅は、備蓄などの貯蔵に比べ圧縮空気貯蔵のように大きくなる。このため、周辺の地下水が貯槽内に侵入するが、このための熱水の温度低下や発電機器に及ぼす影響などの検討が必要となる

経済的な点からは、小規模貯蔵においては、水封方式は水封圧を確保するため設置深度が大きくなることより設置深度を小さくできるライニング方式に比べ建設コストが大きくなる。反対に大規模貯蔵においては、素掘りの空洞をそのまま貯槽として使用できる水封方式のほうが、空洞内をライニングする必要のあるライニング方式に比べ貯層の建設単価が小さく有利である。今回の対象としている、原子力や石炭、石油火力などに適用する場合は、その規模が大きいためライニング方式より水封方式の方が経済的に有利であると考えられる。

これまで実績のある水封方式と比べ対象とする貯蔵圧力温度は、より高圧、高温であるが、水封の原理と同様であり、熱水貯蔵への適用は十分可能である。

水封方式およびライニング方式の特徴を表－1に示す。

表－１ 水封方式およびライニング方式の特徴

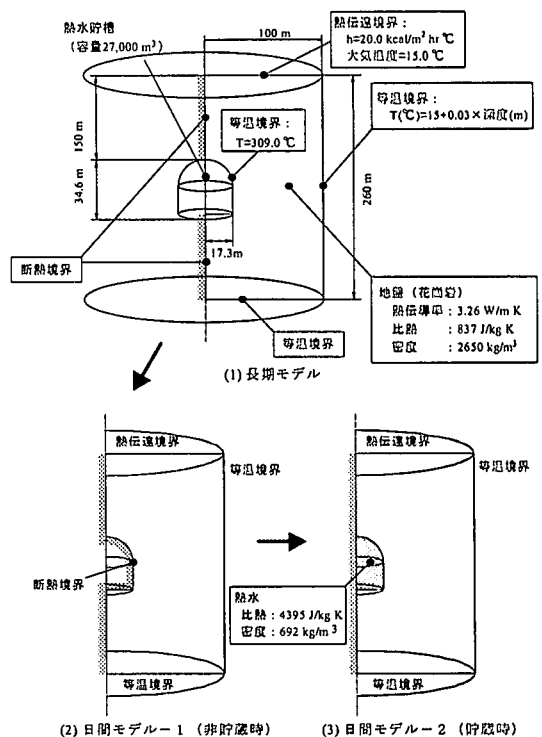
貯蔵方式	水封方式	ライニング方式
概念図		
貯槽構築方法	岩盤を掘削し、吹付けコンクリート・ロックボルトなどで補強し貯槽とする	岩盤を掘削し、コンクリートなどの覆工または素掘りの状態でライニング材を構築して貯槽とする
気密性保持方法	地下水圧により気密性保持	ライニング材（スチール、ゴム、プラスチックなど）で気密性保持
設置深度および立地	地下水圧で漏洩を防止するため、設置深度は深い立地の制約は比較的小さい	一般に設置深度は浅い立地の制約は比較的小さい
実績	石油・LPG貯蔵で国内外に実績があるが、高圧の実績はない	圧縮空気貯蔵実証施設

(b) 貯槽の保温性に関する検討

熱水貯蔵における貯槽から地盤への放熱による熱損失量は貯蔵開始直後が最も大きく、運転を繰り返すに従って低下していくことになる。熱損失は定性的には以下のような経過で変化すると考えられる。

- ・ 日間の貯蔵／払い出しのサイクルに伴い、貯蔵時には地盤へ放熱し、非貯蔵時には貯槽が地盤から吸熱することが繰り返される
- ・ 上記の運転を長期繰り返すことにより、貯槽周辺の地盤温度が上昇し、貯槽との温度差（温度勾配）が低下することにより、時間あたりの放熱量は低下する

上記の現象を厳密に予測するためには、貯蔵／払い出し運転に伴う貯槽内温度の時間変化をモデル化した解析を行う必要があるが、本検討においては、熱水貯蔵の成立可能性を検討するため熱損失の影響度を概略的に把握することを目的とし、貯槽内温度を簡略的に一定温度と仮定した解析により貯槽周辺岩盤の温度変化を予測し（長期モデル）、この解析で得られた結果を条件として1日の蓄熱・放熱サイクルにおける貯槽内の熱水の温度低下を予測する解析を行った（日間モデル）。



図－７ 解析モデルの概念図と解析条件

解析モデルの概念図と解析条件を図-7に示す。解析には、有限要素法による軸対称2次元熱伝導解析を用いた。長期モデルでは、貯槽内温度を一定と仮定することにより、貯槽部の境界条件は等温度とした。日間モデルでは、長期モデルの解析で求められる岩盤温度分布を初期条件に設定し、払い出し時（非貯蔵時）については貯槽壁面部を断熱境界とした。日間モデルの貯蔵時の解析では、貯槽内の熱水を仮想的に固体の熱伝導要素としてモデル化し、熱水の温度（309℃）を初期条件として与えた。貯槽内の熱水の対流、貯槽壁面での熱伝達係数は考慮しなかった。

解析より貯槽の熱損失について以下の結果が得られた。

- ・ 図-8に示すように、貯蔵時の1サイクル（12時間）あたりの温度低下は、貯蔵開始直後は10℃であるが、10日後では4℃、1月後では1.5℃以下となる。

この他、以下のような結果も得られた。

- ・ 貯槽周辺の岩盤の温度は時間経過とともに上昇するが、影響範囲は数年経過した後でも貯槽の壁面から20～30mの範囲である。
- ・ 貯槽の設置深度は、岩盤温度の変化領域の大きさ、および、放熱による熱水温度低下にほとんど影響がない。

以上より、本解析の設定条件においては、熱水貯蔵施設から地盤への放熱による貯蔵熱量のロス是非常に小さいという結果が得られる。今後、運転条件（貯蔵温度、運転サイクル）、地盤の熱物性、地下水の状況、地下水の対流の影響などの要因の影響について検討を行う必要があるが、地下岩盤内に建設される熱水の貯槽は、断熱材などの施工をすることなく熱ロスの小さい貯蔵施設として運用が可能であると考えられる。

(c) 空洞の安定

貯蔵時の空洞の安定性については、岩盤を花崗岩と想定し、貯槽としてサイロ型を考え、球状としての定常熱応力の理論解⁸⁾を用いて概略検討を行った。検討に用いた基本条件は以下の通りである。

- ・ 貯蔵条件
 - 貯蔵圧力 初圧：4.5MPa 終圧：2.5MPa
 - 貯蔵最大温度：255℃
- ・ 初期地圧
 - 設置深度を450mと設定したことより10.8MPa
 - 地温：28℃
- ・ 貯槽形状と寸法
 - 球状 直径：22m
- ・ 岩盤物性
 - 弾性係数(E)：10GPa
 - ポアソン比(ν)：0.2
 - 線膨張係数(α)： 1.0×10^{-5}
 - 強度特性はMohr-Coulombの破壊基準を用いる
 - 内部摩擦角(ϕ)：55° 粘着力(c)：4MPa 一軸圧縮強度(q_u)：25.4MPa

球状の空洞内に熱源がある場合の定常熱応力の理論解を用いて、貯槽周辺の円周方向の熱応力 σ_θ^h は次式で与えられる。

$$\sigma_\theta^h = -\frac{\alpha E}{1-\nu} \Delta t = -28.5 [\text{MPa}] \quad (1)$$

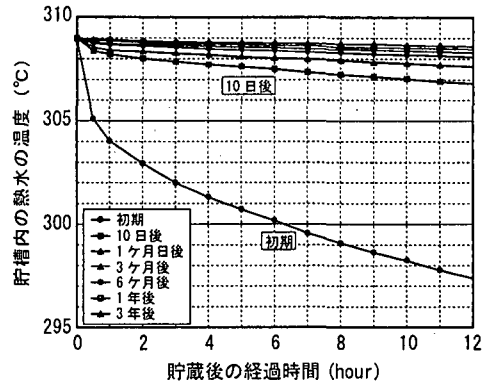


図-8 1日あたりの貯槽の温度低下

ここに Δt は貯蔵に伴う温度増分である。

また、掘削に伴う円周方向応力 σ_{θ}^i は初期地圧 P_0 より次式で与えられる。

$$\sigma_{\theta}^i = \frac{3}{2} P_0 = -16.2 [\text{MPa}] \quad (2)$$

よって、貯蔵時の最大の円周方向圧縮応力は式(1), (2)より以下になる。

$$\sigma_{\theta}^r = \sigma_{\theta}^h + \sigma_{\theta}^i = -44.7 [\text{MPa}] \quad (3)$$

ただし、貯蔵内圧による円周方向応力の低減はここでは考慮していない。

岩盤の破壊条件を Mohr-Coulomb で与えていることより(3)で与えられる最大圧縮応力に対して、貯蔵時の周辺岩盤が破壊しない応力状態を保つための必要な最小内圧 $P_{i,\min}$ は以下の通りである。

$$P_{i,\min} = \sigma_r = \frac{\{\sigma_{\theta}^r - q_v\}}{\kappa} = -1.9 [\text{MPa}] \quad (4)$$

ここに、 κ は $(1+\sin\phi)/(1-\sin\phi)$ である。

以上より、貯蔵時の周辺岩盤が熱応力により破壊せず弾性状態を保つための必要な最小内圧 $P_{i,\min}$ は 1.9MPa となり、最小貯蔵内圧 2.5MPa よりも小さく、貯蔵時の空洞周辺岩盤の安定性は確保されていることがわかる。なお、ここで実施した安定性に関する検討は空洞の安定性が基本的に確保可能かどうかを概略把握するために行なった結果である。岩盤の安定性に関しては、熱水貯蔵開始時が最も厳しい状態となると考えられる。このため、高温下の岩盤の物性や貯蔵空洞規模および運用条件などを具体的に検討することにより行なうことが可能となる。

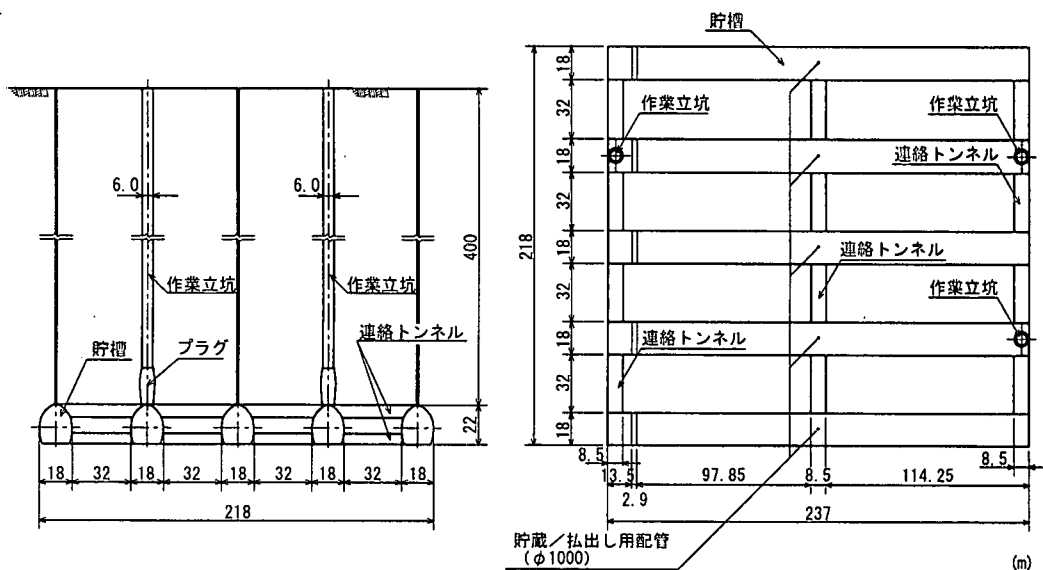
(d) 地下貯槽の概念計画

地下貯槽の主な諸元は下記の通りである。

貯槽設置深度：450m、貯槽容積：37 万 m^3 、立坑：450m $\times$ 2

貯槽は、高さ 22m、巾 18m、長さ 237m のトンネル型を 5 本の配置とした。今後、蓄熱、放熱時の熱交換などを考慮した貯槽形状の検討が必要である。

概念計画を図－9 に示す。



図－9 地下貯槽の概念計画

3.4 経済性などに関するまとめと考察

主な検討の結果は、以下のとおりである。

- ・ 100 万 kW 級石油火力発電所において、夜間 12 時間にわたり定格蒸気出力の約 50%分を熱水として貯蔵した時、昼間 12 時間に放出される蒸気量は蓄熱時の復水器側からの注水量が加わってピークタービンへの通気量は 100 万 kW 定格通気量の約 67%となる。その蒸気量でピークタービンにより発電を行うことで昼間の出力は本来の定格出力 100 万 kW の 1.5 倍の 150 万 kW 程度までパワーアップできる。但し昼間のピークタービン発電の際には、発電に供する放出蒸気条件の一部を改善する独立過熱器を設置してタービン低圧段などへの影響を防止している。
- ・ 熱水貯蔵発電施設の建設コストは、発電機器に関するものが 154 億円、地下貯蔵施設に関するものが 166 億円の合計 320 億円となった。
- ・ ピーク時の出力 1 万 kW 当たりの建設コストは、約 6.4 万円/kW となる。

ピーク時の出力 1 万 kW 当たりの建設コスト約 6.4 万円/kW は、揚水発電や圧縮空気貯蔵ガスタービン発電と比べ十分に成立可能性があると思われる。

石油火力発電所に熱水貯蔵発電システムを付加したことによる稼働率の向上や本システムの発電単価などを評価するためには、運用条件などの設定が必要であるが今回の検討においては実施できなかった。今後、運用条件による経済性の評価や貯蔵効率、全体の効率などについて検討する必要がある。

3.5 主な技術課題

今回の検討において、熱水岩盤貯蔵発電システムが有効である可能性は示されたものの実現に向け、多くの課題が残されている。主な課題としては以下のようなものが考えられる。

(a) 発電プラントにおける課題

・最適なシステム

原子力や石炭・石油火力発電などへの適用について多くのケーススタディを実施し最適なシステムについて検討する必要がある

・システムの基本設計と効率と経済性

システムの基本設計を行い、構成機器などの詳細検討、貯蔵効率、全体効率や経済性について検討する必要がある

・熱水の貯槽内挙動評価

蓄熱・放熱時の貯槽内の蒸気、熱水の温度、圧力、水位などの挙動を予測するためのシミュレーションプログラムの開発とその運転・制御の方法の検討する必要がある

・熱水の水質変化

水封方式を採用した場合、貯槽内への地下水の侵入により水質が変化する可能性がある。この度合いとその影響について検討する必要がある。

(b) 地下貯蔵面からの技術課題

・空洞の安定性評価

高温状態における岩盤の力学特性に及ぼす影響評価とそれに基づく貯槽空洞の安定性評価を行う必要がある

・貯槽の保温性能評価

貯槽からの熱損失の評価が本システムの成立性検討の上で最も重要である。

高温状態における岩盤の熱物性を明らかにするとともに周辺の地下水の挙動やその影響について検討する必要がある。

- ・ 水封方式の有効性の確認

水封方式による高温・高圧の熱水貯蔵の成立可能性について確認する必要がある。

4. おわりに

本検討に示されたように、地下岩盤空洞を利用した熱水貯蔵発電システムは経済的、技術的に十分な成立可能性があると考えられ、原子力発電を初めその適用可能性も大きいと期待される。今後、原子力や石炭・石油火力発電などへの適用について多くのケーススタディを実施し最適なシステムを検討するとともに、地下岩盤空洞における貯蔵可能な圧力、温度などの研究開発を進める必要がある。

地下岩盤空洞はエネルギー貯蔵施設として広く利用されている。地下の利用を促進して行くには、地下岩盤の持つ特性を十分に利用する必要があると考える。これまで原油やLPG貯蔵においては地下岩盤の有する水密・気密性を、また、圧縮空気貯蔵や天然ガス貯蔵においては水密・気密性に加え岩盤の持つ耐圧性を利用した。今後の技術開発の方向として、これまでの技術に加え、地下岩盤の有する断熱性に着目した熱水貯蔵や低温貯蔵に関するプロジェクトが期待される。

地下の有効利用を検討し実現に導くためには、地下岩盤貯蔵が技術的に可能であるかどうかといった検討は当然必要であるが、それ以前に社会的なニーズを把握し、利用分野を見据えた経済性を含めた全体システムの検討が非常に重要であると思われる。

5. 参考文献

- 1) 社団法人海外電力調査会編：海外電気事業統計、1997
- 2) 中川加明一郎：電力エネルギーの貯蔵施設－圧縮空気貯蔵(CAES)、エネルギー・資源 Vol. 22, No. 2, 2001/3、pp. 19-24、エネルギー資源学会
- 3) 石川浩、浜松照秀：原子力、石炭火力の機能を大幅に拡大する大容量蒸気発電、Energy 1981-9
- 4) エネルギー教育研究会編：現代エネルギー・環境論、電力新報社、1997
- 5) 合田佳弘・大西稔昭・石島洋二・吉本義隆・福田和寛：上砂川CAES/GTパイロットプラント地下蓄槽の気密試験結果、第11回岩の力学国内シンポジウム、2002.
- 6) 八田敏行：天然ガス地下貯蔵の現状と課題、(社)日本高圧力技術協会圧力技術の将来展望、2001
- 7) 中川加明一郎・志田原巧・末永弘・八田敏行：無覆工空洞の水封貯蔵機能に関する現場実験、土木学会第8回地下空間シンポジウム(投稿中)
- 8) 竹内洋一郎：熱応力、日清出版、1975.