泥水ライニングを活用した岩盤負担型のCAES空気貯槽の概念検討

西本 吉伸[1*]・尾留川 剛[1]・依田 昌宏[2]

[1]電源開発株式会社　技術開発部茅ヶ崎研究所（〒253-0041 茅ヶ崎市茅ヶ崎一丁目9-88）
[2]株式会社JPビジネスサービス　社会環境部（〒135-8451 東京都江東区深川二丁目2-18）
*E-mail: yos_nishi@jpower.co.jp

圧縮空気貯蔵発電（以下CAES）は，電力系統安定化に資する蓄電技術の一つであり，在来技術の組み合わせによる信頼性の高いシステムである．規模の比較的大きいCAESの開発においては，地下空間の活用が考えられる．過去において水封式及び気密ライニング方式の空気貯槽が検討された実績があるが，地質的な制約やコスト面での課題があった．

その課題解決のために，高濃度の泥水を用いた泥水ライニングシステムを考案した．この構造は内圧を完全に岩盤に負担させるものであり，比較的地質条件を選ばないという特徴を有する．本レポートではその概要を紹介し，設置条件等に関する基礎的な検討結果を報告する．

Key Words : *CAES, mud water lining, installation depth,, rock burden ratio*

1.　はじめに

太陽光や風力発電のような，出力変動の激しい再生可能エネルギーの積極導入においては，蓄電技術の適用が有効と言われている．蓄電技術の一つに圧縮空気貯蔵発電システム（以下「CAES」）がある．CAESについては，ガスタービン発電を併用したCAES-G/T海外で実用化されて，国内でも実証研究がなされてきたが，近年の技術革新により，ガスタービンを用いない新しいCAESシステム（以下「A-CAES」）が開発されてきた．

A-CAESの概念を図−1に示す．A-CAESはCAES-G/Tと異なり，起動停止時間が短く，負荷変動に対する応答性が高い．また汎用的な機器設備で構成されるため，信頼性が高く化学的劣化が生じないという利点がある．

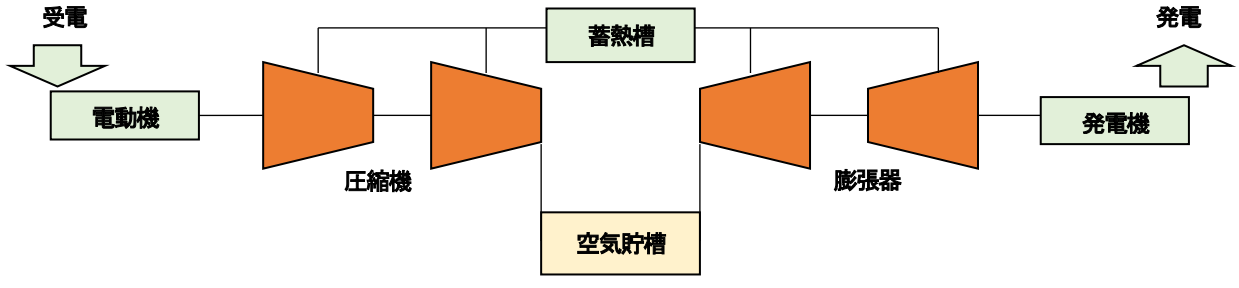
しかし，実用規模のA-CAESを構築するには，大容量かつ高耐圧の空気貯槽が必要となる．そのような空気貯槽を地下空間に経済的に構築する方法として，岩盤負担型のライニングシステムを考案し，その適用性について検討を行ったので以下に報告する．

2.　新しい構造の概念

(1)　既往研究による貯蔵技術と課題

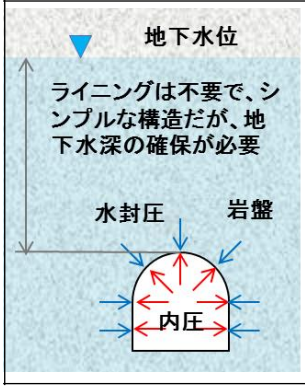
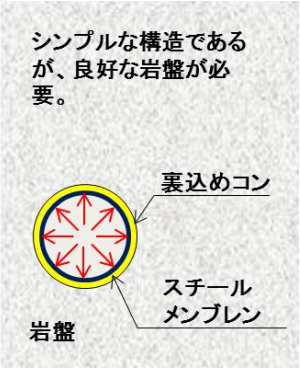
高圧気体を地下に貯蔵する既往技術として，表−1に示すようにいくつかの実績がある．それぞれ優れた特徴があるものの制約条件もある．

水封式岩盤貯蔵技術においては，内圧に抵抗できるだけの地下水圧の存在が前提であるため，高圧の空気を貯蔵する際は，相応の深度への設置が必要となる．



図−1 A-CAES の概念

表-1　既存の高圧気体貯蔵の検討例

水封式岩盤貯槽 LPG地下備蓄等　商用技術	気密シートライニング構造 実証試験	鋼製ライニング方式 実証試験	重泥水方式 概念検討
			

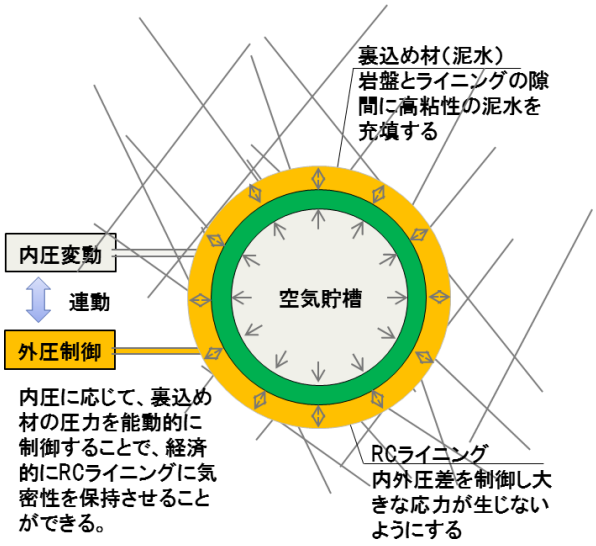


図-2 泥水ライニング構造の概要

ゴムシートとRC覆工板から構成される気密シートライニング構造は，岩盤負担を前提とした合理的構造であるが，多重構造で施工が複雑となり，コスト面の課題が残る．

鋼製ライニング方式は，気密シートライニング構造をシンプルにしたもので，緩衝材（ゴム材），鋼板，裏込めコンクリートで構成され，耐圧性は岩盤が担うものであるが，軟質岩盤での適用性については不明である．

その他，実証研究には至っていないものの，重泥水を用いて，耐圧性気密性を確保しようとする構造も提案されており，水封方式に比べて浅い深度への空気貯槽の設置が可能となっているが，重泥水の比重が水の2倍程度としても，相応の深度が必要となる．

(2)　泥水ライニング構造の概念

従来構造の制約条件を少しでも緩和する構造として，泥水を裏込め材として用いたライニング構造（以下「泥水ライニング構造」）を検討した．

基本構造の概念は図-2のとおりであり，従来検討の重泥水方式に類似しているが，重泥水を利用せず通常の泥水を人工的に加圧して使用するものである．

この構造の特徴は，耐圧性を岩盤に負担させる構造であること，気密性は通常のコンクリートによるライニングに期待することである．また裏込め材として，大深度ボーリング等で用いられる泥水を活用することで，主要な構成材料は一般的なものを用いている点である．

(3)　特　徴

内圧作用時に，裏込め泥水を人工的に加圧することにより，RCライニングに生じる応力を削減し，RCライニング自体に気密性を保持させる．加圧された裏込め泥水は，岩盤側に圧力を伝達し，間接的に内圧は岩盤に負担させる．

ただし，泥水が岩盤の割れ目に浸透し，加圧により逸泥が生じると，加圧が困難になるため，泥水をRCライニング背面に留めておく必要があるが，高粘性の泥水を選定することにより，割れ目への逸泥を抑制し，外圧の保持を実現させようとするものである．

(4)　実用化に向けた課題

本構造を実用化においては，耐圧性及び気密性の確保の点で，いくつかの技術的な検討課題がある．

耐圧性の視点では岩盤負担の構造であるため，内圧をどこまで岩盤に負担をさせることが可能かという評価が必要であり，経済性の向上という視点では，どこまで設置深度を浅くできるかということがポイントとなる．

また，泥水ライニング構造の適用においては，加圧された泥水が，如何に逸泥せずに空洞周辺に滞留できるかという重要な課題もある．

本検討においては，内圧を岩盤に完全に負担させた場合に，どこまで設置深度を浅くできるのかという力学的視点において検討をした結果を示す．

(5) 空気貯槽規模の想定

実用化の検討において，どの程度の容量が必要となるのか，規模感を確認する必要がある．蓄電システムの規模については，再生可能エネルギーの導入促進寄与という視点で，メガソーラやウインドファーム等の規模を考慮し，出力は10MW～100MW，蓄電時間は1～8時間程度と想定した．

圧縮空気発電機器の基本性能に基づく，1MWhの発電に必要な空気体積は，大気圧換算で約14,100m^{3}であり，出力規模及び蓄電時間に応じた空洞容積を算定すると概ね**図-3**のようになる．

3. 設置深度に関する検討

(1) 検討概要

泥水ライニング構造では，内圧が泥水により間接的に周辺地山に伝達されることから，泥水圧が周辺地山にどのような影響を及ぼすかについて，力学的視点から影響を把握することとした．本検討においては，泥水圧の載荷による空洞周辺の岩盤の損傷域，地表に致るすべり線に対する安全率評価，及び地表部への変位の影響について検討を行った．なお，比較のために，泥水圧が一定で，内圧のみが変化した条件においても検討を行った．

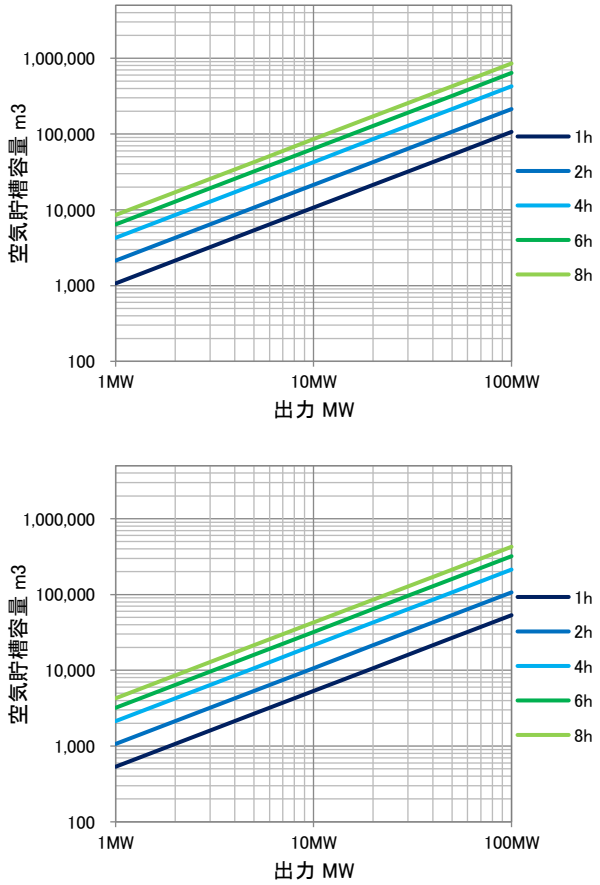


図-3 蓄電容量と空気貯槽の規模

(2) 検討方法

地盤内に泥水ライニング構造をモデル化し，鉛直 2 次元 FEM 弾性解析により，空洞の設置深度，内圧及び泥水外圧を変えて検討を行った．初期地圧は自重解析により与えた．解析モデルは**図-4** のとおりであり，空洞内径を 10m，RC ライニング及び泥水を充填する裏込め材の厚さは 50cm とした．

解析条件を**表-2**に示す．γtは単位体積重量，Eはヤング係数，νは静ポアソン比，Cは粘着力，ϕは内部摩擦角である．泥水については液体であるが，弾性解析において簡便にモデル化するために，疑似的に低剛性材料により表現した．引張応力発生部や損傷領域等における応力差配分は考慮していない．

解析ケースについては表-3に示すとおりであり，空洞中心と地表の深度を30m，50m，70m，100mの4段階設定し，それぞれの深度において内圧及び泥水圧条件により設定した．

表-2 解析条件

	γt kN/m^3	E GPa	ν	C MPa	ϕ deg
地盤材料	2.0	2	0.35	0.2	40
RCライニング	2.5	25	0.2	-	-
泥水部	1.0	0.01	0.49	-	-

表-3 解析ケース

	内圧	泥水圧（外圧）
内圧一定 外圧変化	2MPa	1MPa
		2MPa
		3MPa
内圧一定 外圧変化	2MPa	2MPa
	3MPa	
	4MPa	

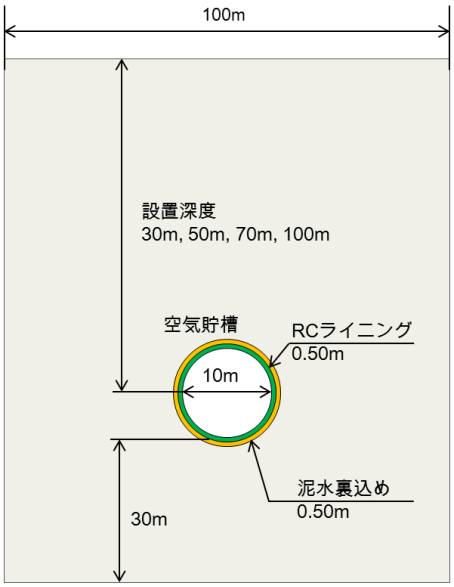


図-4 解析モデルの概念

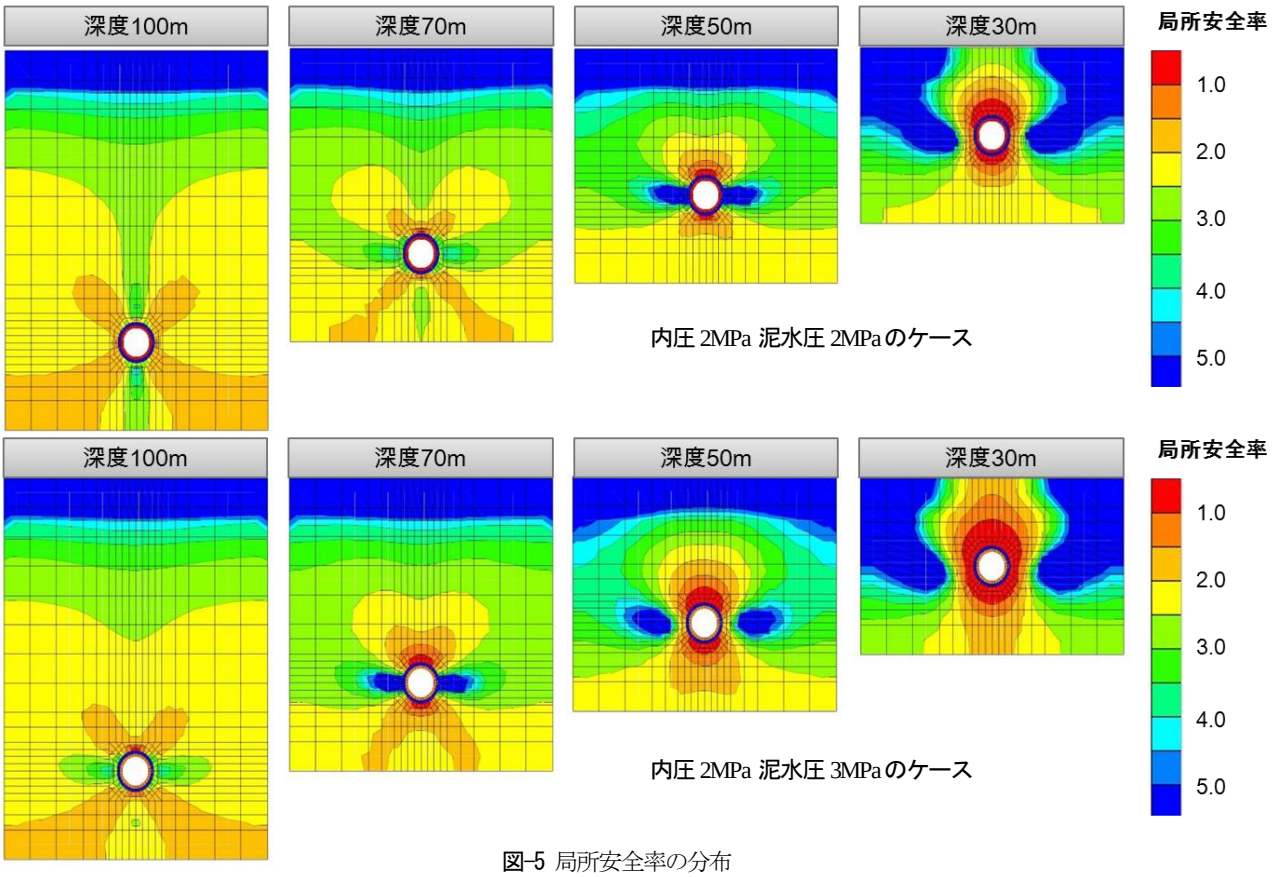


図-5 局所安全率の分布

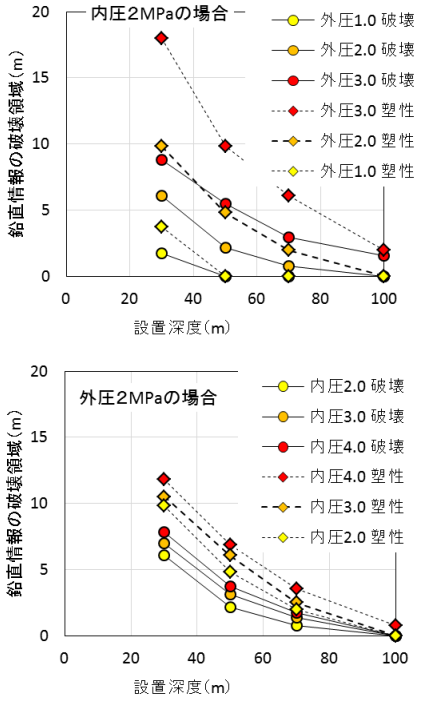


図-6 損傷域の進展範囲

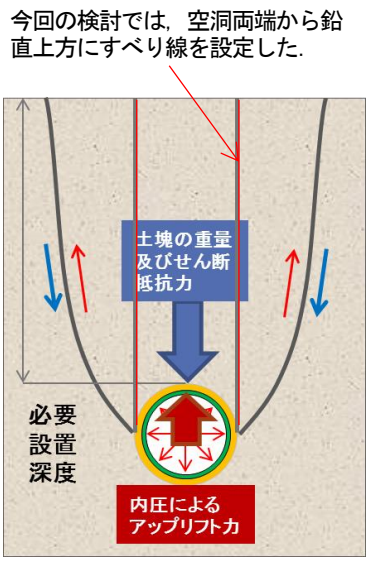


図-7 すべり安全率の算定

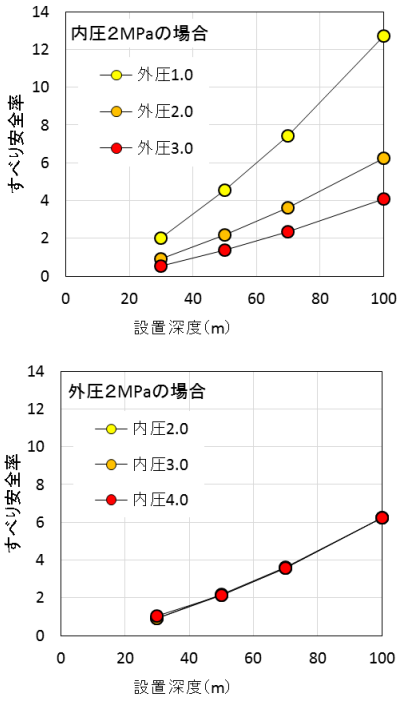


図-8 すべり安全率

(3) 検討結果

1) 空洞周辺の損傷領域

大きな泥水圧の作用により，空洞周辺には，引張応力やせん断応力が発生するが，これらの応力により空洞周辺には損傷領域が進展する．本検討では，損傷領域を破壊領域と塑性領域に区分し，以下の定義とした．

・破壊領域：引張応力発生範囲，またはせん断応力による局所安全率が1.0以下の範囲
・塑性領域：せん断応力による局所安全率が1.5以下の範囲

局所安全係数の分布図の一部を**図-5**に示す．また結果をグラフにまとめたものを**図-6**に示す．これらによると，設置深度の浅いものほど，また泥水圧が高いほど，損傷領域の進展が広いことが確認できる．

掘削等による損傷領域が1～2m程度とすれば，内圧作用時にその程度の範囲に損傷範囲が収まれば設置可能とすれば，泥水圧2MPa程度では70m弱の深度，泥水圧3MPa程度では，100m程度の深度が必要と言える．

泥水圧を一定にして，内圧のみを上昇させた場合には，基本的に岩盤に伝達される応力の変化は小さい．

2) すべり安全率

泥水圧作用時に，地表に至るすべり線に沿った安全率を算定した．すべり線の設定は**図-7**に示すように，空洞の外縁から鉛直上方に延びるすべり線を設定した．

損傷領域内では所要のせん断強度が得られないものとし，すべり安全率は，土塊重量と，損傷領域外の岩盤せん断抵抗力のみで算定した．結果を**図-8**に示す．

この結果によると，設置深度の浅いほど，また泥水圧が高いほど，すべり安全率が小さくなることがわかる．また泥水圧を一定として，内圧だけを変化させても，すべり安全率にはほとんど影響がないことを確認した．

一般土工設計等で用いられる1.5程度の安全率を確保するという条件では，設置深度が50m程度あれば十分であるという結果となる．

3) 地表への影響

泥水圧の作用により，地表部に大きな変位を与えるようでは環境影響上に問題となることから，泥水圧の作用による地表部の変位についても検討した．結果を**図-9**に示す．地表変位の許容値は，地上部の土地利用等の条件や各種規制に基づくこととなるが，ここにおいては，泥水圧の変化と地表変位への影響について比較した．

外圧が一定で，内圧のみが変化する場合についても検討を行ったが，前項の検討結果同様，内圧の影響は小さい結果となった．

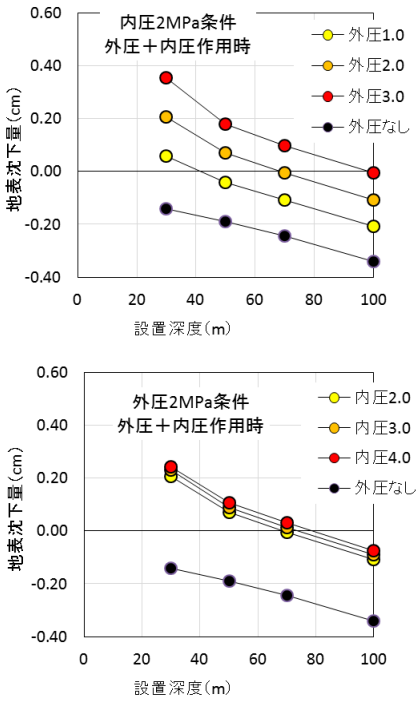


図-9 地表変位量

4. 内外圧の制御に関する考察

泥水ライニング構造は，泥水圧を内圧と独立に制御可能であるため，**図-10**に示すように，泥水圧を内圧に連動させる運用，泥水圧を一定保持する運用，両者の併用方式等の多様な制御が可能である．前章の検討結果を踏まえ各制御方法について考察をする．

内圧に連動位し泥水圧を変動させる方法は，RCライニングの応力変化は生じない．しかし周辺岩盤に大きな繰返し載荷を行うこととなり，岩盤の繰返し応力による特性を考慮する必要がある．

泥水圧を一定保持する場合は，コンクリートが圧縮力に対しては抵抗しやすいという特徴を考慮すると，泥水圧を内圧変動の最大値に合わせて設定することで，RCライニングには引張応力は生じず，また岩盤側の疲労の問題は排除できる．内外圧差が 1MPa とし，空気貯槽内径が 10m，RC ライニング厚を 0.5m とすれば，最大で 11N/mm^2 の圧縮応力となるため，やや強度を有するコンクリートを用いれば適用可能となる．

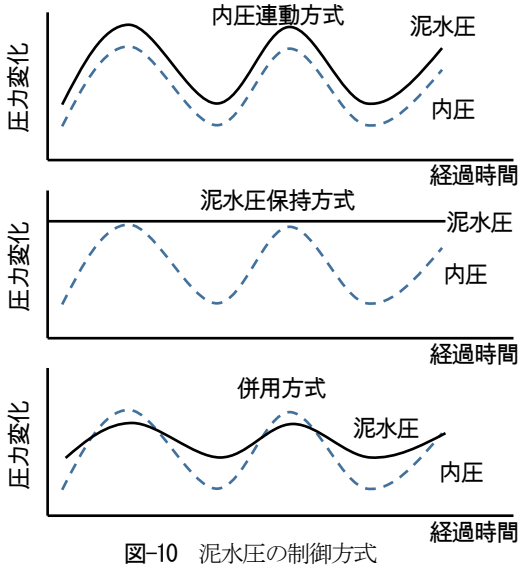


図-10 泥水圧の制御方式

また適量の引張鉄筋を配筋すれば，引張応力も有る程度RCライニングに負担させれば，さらに合理的な設計も可能となる．

さらに両者の特徴を考慮し，多少RCライニングに引張応力が作用させても，極端な圧縮応力がRCライニングに生じないような，中間的な運用方法も考えられる．

5. まとめ

内圧となる泥水圧を完全に岩盤負担させる，泥水ライニング構造の実用化のためには，空洞の設置深度の考え方を明確にする必要がある。これは、すなわち耐圧性を証明する考え方となる．

本検討において，泥水圧と設置深度の条件に応じた，損傷領域の分布，地表に至るすべり安全率，及び地表部の変位について検討を行い，設置深度に関する適用範囲を概略把握した。また内外圧の運用方法について考察を行った．

以下に検討結果の概要を列挙する。

- 泥水圧が2MPaの場合には，設置深度が50m程度であれば，損傷領域の分布は広くなく，すべり安全率も問題にならない．
- 泥水圧が3MPaの場合には，設置深度が100m程度であれば，損傷領域やすべり安全率について問題は無いと言える．
- 地表変位については，定量評価が難しいが，設置深度が深くなれば影響は小さくなる．
- 圧力制御については，泥水圧を高い値で保持しておく構造が材料特性が把握しやすいRCライニングに繰り返し応力が生じるものの，全体として適用しやすそうな構造と考えられる．

6. 今後の課題

本レポートでは，耐圧性に関連して設置深度についての検討を行ったが，もう一つの大きな課題として，加圧された泥水が裏込め部に逸泥せず滞留できるかどうかという点がある．この点については現在検討中であり，高い泥水圧において逸泥が生じにくい泥水の配合検討，及び対応可能な割れ目の条件について整理する予定である．

この構造物は岩盤性状に依存する構造であるため，力学的視点及び逸泥防止の視点から，適用条件をある程度定量化することも必要である．

参考文献

1) NEDO：ドイツにおける新エネルギー等実態調査，NEDO 海外レポート，2004 年度 No.4，pp.18-19，2004.
2) Power South Energy Coopratibe. : The McIntosh Plant Brochure.
3) 天野喜久男, 沢田隆, 小林順二: 圧縮空気エネルギー貯蔵タービン発電システム ～圧縮空気地下貯蔵施設の設計について～, 電力土木, No. 267, pp. 87-95, 1997.
4) 中川加明目一郎, 志田原巧, 池川洋二郎, 末永弘, 伊藤由紀, 田中伸和, :水封式岩盤内圧縮空気貯槽ガスタービン発電（CAES）にかかわる土木技術課題の検討評価:電力中央研究所総合報告 U45, 2008.
5) Adriano Sciacovelli, Yongliang Li, Haisheng Chen, Yuting Wu, Jihong Wang, Seamus Garvey, Yulong Ding, : Dynamic simulation of Adiabatic Compressed Air Energy Storage (A-CAES) plant with integrated thermal storage – Link between components performance and plant performance : *Applied Energy 185*, pp.16-28, October 2016.
6) 西本吉伸, 髙木慎悟, 鞠谷信三, 黒田重徳：圧縮空気地下貯蔵発電（CAES-G/T）の圧縮空気貯蔵施設に適用する気密材の特性について, : 日本ゴム協会誌, vol73, 5, pp.225-232, 2000.
7) 加藤秀治,小野純二,相場充,茨田高志,渡部拓,奥野哲夫.:鋼製ライニング式岩盤貯槽による天然ガス高圧貯蔵技術開発第３報：実証試験貯槽における気密材の試験結果と評価,圧力技術,vol47,5,pp.294-304 2000.

CONCEPTUAL STUDY OF CAES HIGH PRESSURE AIR RESERVOIR OF ROCK BURDEN TYPE UTILIZING MUD LINING SYSTEM

Yoshinobu NISHIMOTO, Go ORUKAWA, Masahiro YODA

Compressed Air Energy Storage generation plant “CAES” is one of electric storage technologies, and contributes power system stabilization, and is a reliable system with conventional technologies. Subsurface space will be appropriate to install a large scale air storage of CAES. But there were some problems in terms of geological condition and cost in previous pilot projects on CAES in Japan. To solve these problem, the mud lining system “MLS” was devised using high concentrated mud water. Feature of MLS is complete stress burden system against surrounding rock mass and is less geological condition constraints. This report introduses outline of the MLS and shows results of installation condition study.