

# CAES空気貯槽に適用する泥水ライニングの 簡易小型貯槽模型実験について

久野 彰大<sup>1\*</sup>・高畠 正治<sup>1</sup>・藤田 岳<sup>1</sup>・西本 吉伸<sup>2</sup>・瀧上 安信<sup>3</sup>

<sup>1</sup>電源開発株式会社 技術開発部茅ヶ崎研究所（〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎1-9-88）

<sup>2</sup>開発電子技術株式会社（〒113-8606 東京都文京区白山一丁目37-6）

<sup>3</sup>株式会社開発設計コンサルタント 設備保全技術部（〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎1-9-88）

\*E-mail: akihiro\_hisano@jpower.co.jp

圧縮空気エネルギー貯蔵発電に適用する地下式空気貯槽の新たな構造として、泥水ライニングを考案した。本構造の成立のためには、ライニング背面の岩盤等に泥水が漏洩しないこと（逸泥防止機能）、泥水がライニングに泥水圧による外圧を空間的に一様に、かつ時間的に安定して作用させることができる機能（外圧保持機能）を有すること等を確認する必要がある。

昨年度室内実験にて本技術成立のための基本的な要件である逸泥防止機能を確認した。本稿では、本技術の実現に向けた次なるステップとして、異径の亚克力円筒を重ねてライニングと岩盤に見立て、泥水ライニングを簡易的に模擬した小型貯槽模型による室内実験の方法と結果について報告する。

**Key Words :** CAES, under ground, mud slurry, model experiment

## 1. はじめに

低炭素・脱炭素社会の実現に向けて、再生可能エネルギーの導入が進められているが、風力発電や太陽光発電のような変動電源については気象条件により出力が変動する。その出力変動対策として、電力貯蔵技術との組み合わせが有効と考えられる。圧縮空気エネルギー貯蔵（以下、「CAES」という。）は電力貯蔵技術の一つであり、図-1に示すように揚水に次いで比較的大容量・長時間の電力貯蔵に適しているといわれている。気密性に優れる岩塩層の無い国内においては、圧縮空気貯槽の構築コストを抑え、発電設備を含めたCAESの経済性を向上することが課題である。

以上を踏まえ、筆者らはCAESに適用する地下式空気貯槽の新たな構造として泥水ライニング構造を考案し、その基本的な成立性を確認するため、以下のとおり室内実験を行った。

## 2. 泥水ライニングの構造概念

泥水ライニング構造は、図-2に示すように岩盤とRCライニングの隙間に裏込め材として泥水を充填し、泥水を人為的に加圧してRCライニングにプレストレスを作

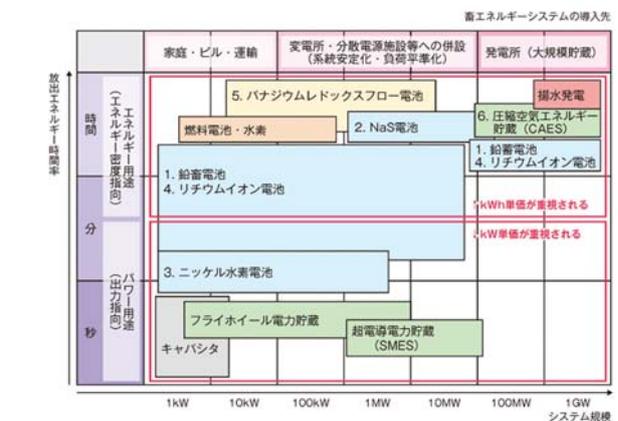


図-1 各電力貯蔵技術の位置付け<sup>1)</sup>

用させる構造である。圧縮空気による内圧に対して、泥水による外圧が常に大きくなるように制御し気密性を確保するとともに、RCライニングに発生する応力を圧縮側に保つことで設計条件を緩和し、経済的な空気貯槽となることをねらいとしている。

泥水ライニング構造が空気貯槽として成立するためには、次の事項を満足する必要がある。

- ①亀裂や間隙等（以下、「亀裂等」という。）を有する岩盤に対して泥水が逸泥し続けることなく亀裂等を閉塞し、外圧を作用させることができること。
- ②空気貯槽に対して、空間的に一様にかつ時間的に安

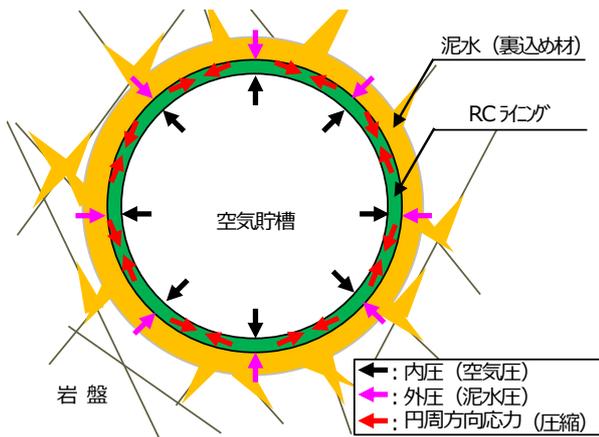


図-2 泥水ライニングの構造概念

定して外圧を作用させ続けることができること。

③圧縮空気による内圧に対して泥水による外圧が大きければ、内圧を保持し続けることができること。

筆者らは、①を自己閉塞機能、②を外圧保持機能、③を内圧保持機能と称し、これまで①の自己閉塞機能について室内実験により確認した<sup>2)</sup>。そこで、泥水ライニングの成立性確認に向けた次なるステップとして、泥水ライニングを簡易に模擬した小型空気貯槽模型を用いて、②の外圧保持機能の確認を行った。

### 3. 簡易小型貯槽模型実験による外圧保持機能確認

#### (1) 概要

泥水による外圧保持機能を確認するため、簡易小型貯槽模型実験による外圧保持機能確認を行った。模型は異径の亚克力円筒を重ねることで空気貯槽のうちライニング及び岩盤を簡易に模擬したものであり、岩盤模擬部には簡易に亀裂を模擬したスリットを設けた。ライニング模擬部と岩盤模擬部との隙間に泥水を圧入し、ライニング模擬部外側および岩盤模擬部内側に設置した圧力計の値に基づき、外圧保持機能の有無を確認した。

#### (2) 泥水材料及び配合

泥水材料はベントナイト及び粘土を主体に、①自己閉塞機能を付与するための逸泥防止材を組み合わせで作成した。泥水材料の機能、及び泥水の配合は表-1及び表-2

表-2 泥水の配合※

配合	ベントナイト	粘土	増粘剤	潤滑剤	逸泥防止材 A	逸泥防止材 B	逸泥防止材 C	逸泥防止材 D	逸泥防止材 E
M1	10%	5%	0.05%	0.5%	4%	4%	4%	4%	2%
M1-1.2	8.33%	4.17%	0.04%	0.42%	3.33%	3.33%	3.33%	3.33%	1.67%
M1-1.4	7.14%	3.57%	0.04%	0.34%	2.86%	2.86%	2.86%	2.86%	1.43%
M1-1.6	6.25%	3.13%	0.03%	0.31%	2.5%	2.5%	2.5%	2.5%	1.25%

に示すとおりである。泥水の配合はM1を基本とし、泥水希釈の影響を検討するためにM1-1.2, M1-1.4, M1-1.6の配合を加えた計4配合とした。なお、10メスシリンダーを用いた1か月間の沈降試験の結果、M1に対し水の比率を2倍(M1-2.0に相当)にした配合では逸泥防止材の材料分離抵抗性が確保できないことを確認している。

表-1 泥水材料の機能

泥水材料	機能
ベントナイト・粘土	泥水の基本材料
逸泥防止材	岩盤亀裂等の閉塞
増粘剤	逸泥防止材の材料分離抵抗性付与
潤滑剤	ポンプ圧送時の圧損低減

#### (3) 逸泥防止材及び逸泥防止メカニズム

逸泥防止材は、表-3に示すとおり粒形の異なる粒度調整砂(粒状逸泥防止材)およびロックウール(繊維状逸泥防止材)から構成される。逸泥防止メカニズムは図-3に示すように、初期は逸泥しつつも大きな粒状逸泥防止材から順に亀裂等の表面に凝集して亀裂等を閉塞し、泥水の逸泥を防止するというものである。

表-3 逸泥防止材

粒状				繊維状
逸泥防止材A	逸泥防止材B	逸泥防止材C	逸泥防止材D	逸泥防止材E
d50 <sup>※</sup> ≒ 4mm	d50≒ 1.5mm	d50≒ 0.5mm	d50≒ 0.1mm	10 $\mu$ m

※表中の「d50」は中央粒径の意。

#### (4) 実験方法

##### a) 実験装置

実験装置は図-4に示すように、簡易小型空気貯槽模型(以下、「貯槽模型」という。), 圧力載荷装置と接続された泥水容器、及び貯槽模型と泥水容器を接続する耐圧ホースから構成される。貯槽模型は異径の亚克力円筒を三重に重ねたもので、一番内側から順にRCライニング模擬部、岩盤模擬部となっており、泥水充填部の体

※表中の%は、水(1g/cm<sup>3</sup>)に対する外割の重量比を示す。

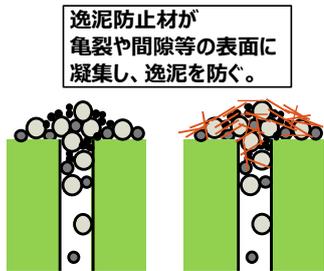


図-3 逸泥防止メカニズムのイメージ

積は約80である。なお、一番外側の円筒は実験時の安全対策として設けたものであり、模型としての役割は有していない。圧力载荷装置は定圧载荷が可能なものであり、水压を介して泥水を加圧することができる。

b) 岩盤模擬部のスリット

岩盤模擬部には、表-4に示すように岩盤の亀裂等を簡易に模擬したスリットを3形状、各断面の周方向に4つずつの計12箇所設けた。スリット幅は既往の結果<sup>3)</sup>を基に安全側の設定として4mmとした。

c) 計測項目

計測項目は表-5に示すとおりであり、圧力計は図-5に示すように、1断面につきRCライニング模擬部外側及び

岩盤模擬部内側にそれぞれ4箇所ずつ、残る2断面も同様にして8個/断面×3断面の計24箇所に加え、入力部の1箇所を加えた総計25箇所ですべて計測した。

d) 载荷パターン

载荷パターンは図-6に示すように単調载荷と繰返载荷の2種類とした。最大試験圧力は1MPaとした。

(5) 実験結果

a) 実験ケース及び結果概要

表-4 スリット形状

平行スリット (長手方向)	平行スリット (円周方向)	十字スリット

表-5 計測項目

計測項目	方法
圧力	フラッシュダイヤフラム型圧力計
泥水供給量	体積変化計

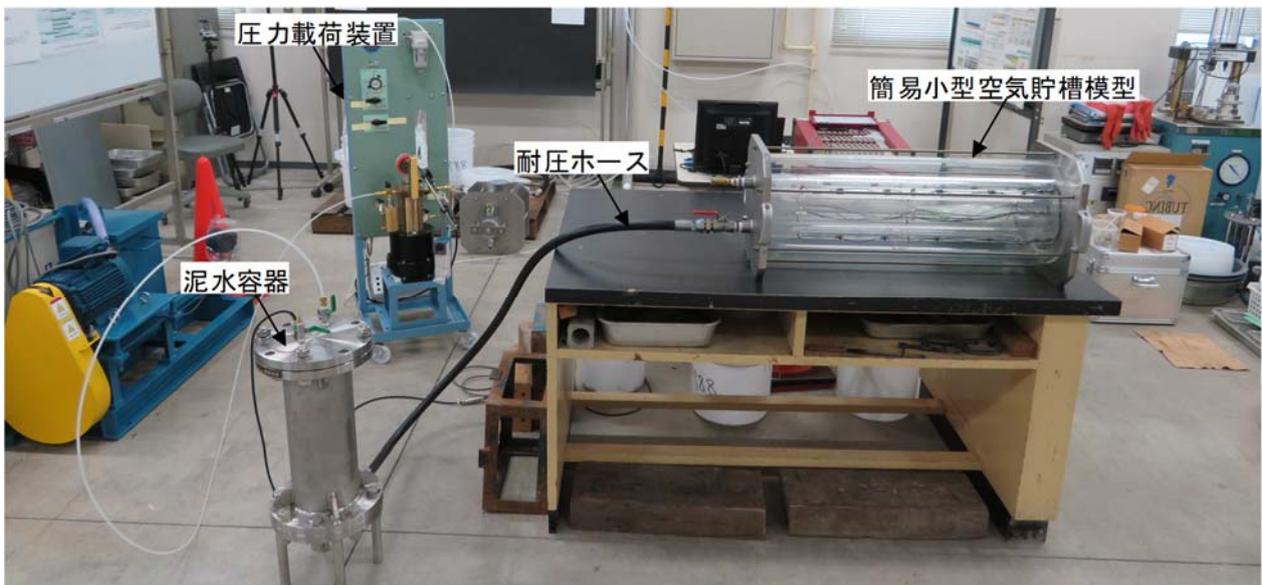
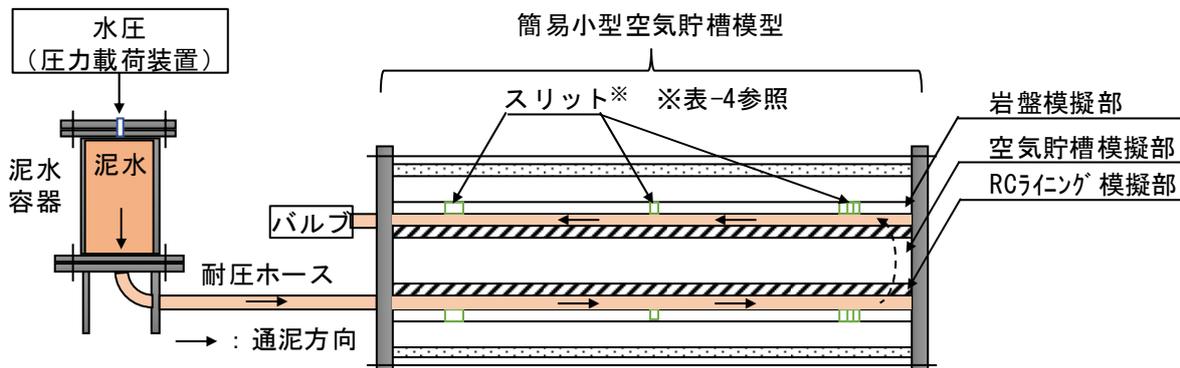


図-4 実験装置の概要

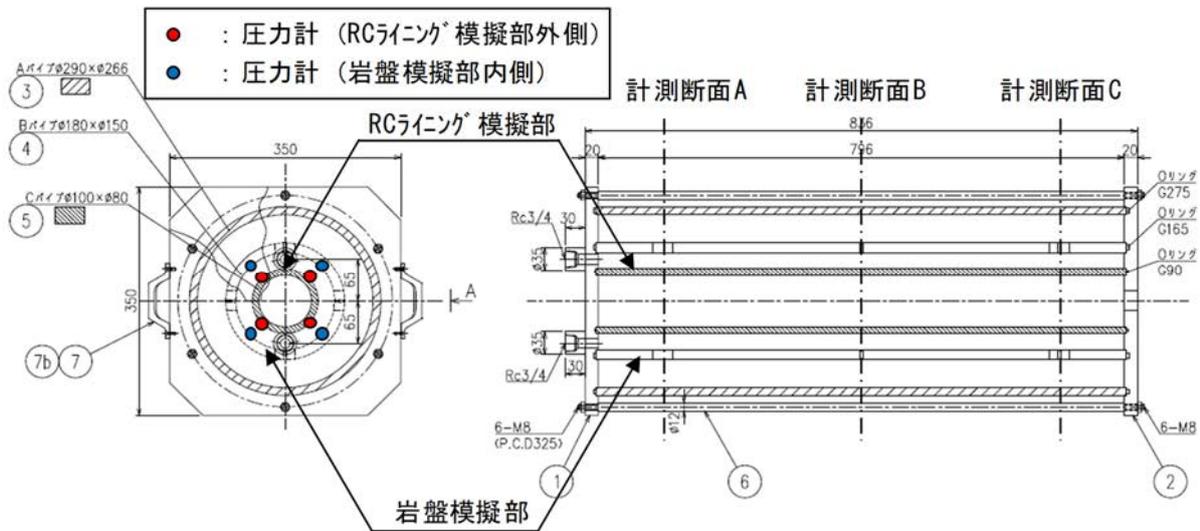


図-5 圧力計の設置位置

表-6 実験ケース

実験条件			結果概要	
ケース名	配合	荷重パターン	外圧保持機能の有無	泥水供給量
CASE1-1	M1	単調	○ (有り)	11.7L
CASE1-2	M1-1.2	単調	○	11.7L
CASE1-3	M1-1.4	単調	○	11.7L
CASE1-4	M1-1.6	単調	○	12.2L
CASE2-1	M1	繰返	○	11.7L
CASE2-2	M1-1.6	繰返	○	12.3L

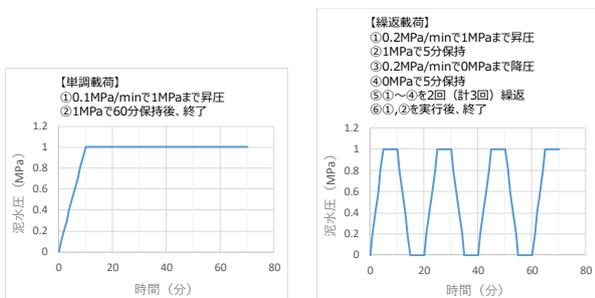


図-6 荷重パターン (左図：単調荷重, 右図：繰返荷重)

実験は、表-6に示すとおり計6ケース実施した。表中には、結果概要として外圧保持機能の有無を合わせて示した。今回の実験ケースでは、基本配合であるM1から最も水の配合比率が多いM1-1.6の泥水について、外圧保持機能を有することを確認することができた。ただし、今回の実験条件では湧水等地下水の影響（流入）を考慮していないため、現地適用にあたっては現地の地下水の状況に合わせて最適な配合を検討する必要がある。

#### b) 圧力分布の一樣性及び安定性確認

外圧保持機能の有無は、圧力値の経時変化に基づき確認した。一例として、CASE1-2及びCASE2-2の圧力値の経時変化を図-7及び図-8に示す。両図中の入力部を除く各グラフ中には、RCライニング模擬部の圧力値を赤線、岩盤模擬部の圧力値を黒線として記載した。

図-7に示すように、RCライニング模擬部及び岩盤模擬部には、入力圧の上昇に伴い一斉に圧力が作用していることがわかる。圧力分布の大きさを詳細に確認するため、試験圧力1MPaを60分間保持した時の各圧力計の平均圧力値を表-7に示すが、各断面及び周方向に対して、平均圧力値の差は計測精度以下の大きさで有意な差はなく、泥水による外圧はRCライニング模擬部全体に一樣に作用して

いると判断した。なお、単調荷重した他の試験ケースも同様の結果が得られた。

また、圧力値が一時的に減少する現象が確認されたが、次第に元の圧力レベルまで復元したことから、泥水による外圧が急減した際に内圧を自動調整するシステムを導入することで、時間的に安定してRCライニング模擬部に外圧を作用させ続けることができると判断した。

図-8及び表-8に示すように、運用時の荷重パターンを簡易に想定した繰返荷重でも単調荷重の時と同様に、内圧を自動調整するシステムの導入を前提とすれば、空間的に一樣にかつ時間的に安定してRCライニング模擬部に外圧を作用させ続けることができると判断した。

以上より今回の実験条件において、泥水ライニング構造は、内圧を外圧に応じて自動調整する仕組みを導入しさえすれば、RCライニングに空間的に一樣にかつ時間的に安定して外圧を作用させ続けることができると、すなわち外圧保持機能を有することを確認することができた。

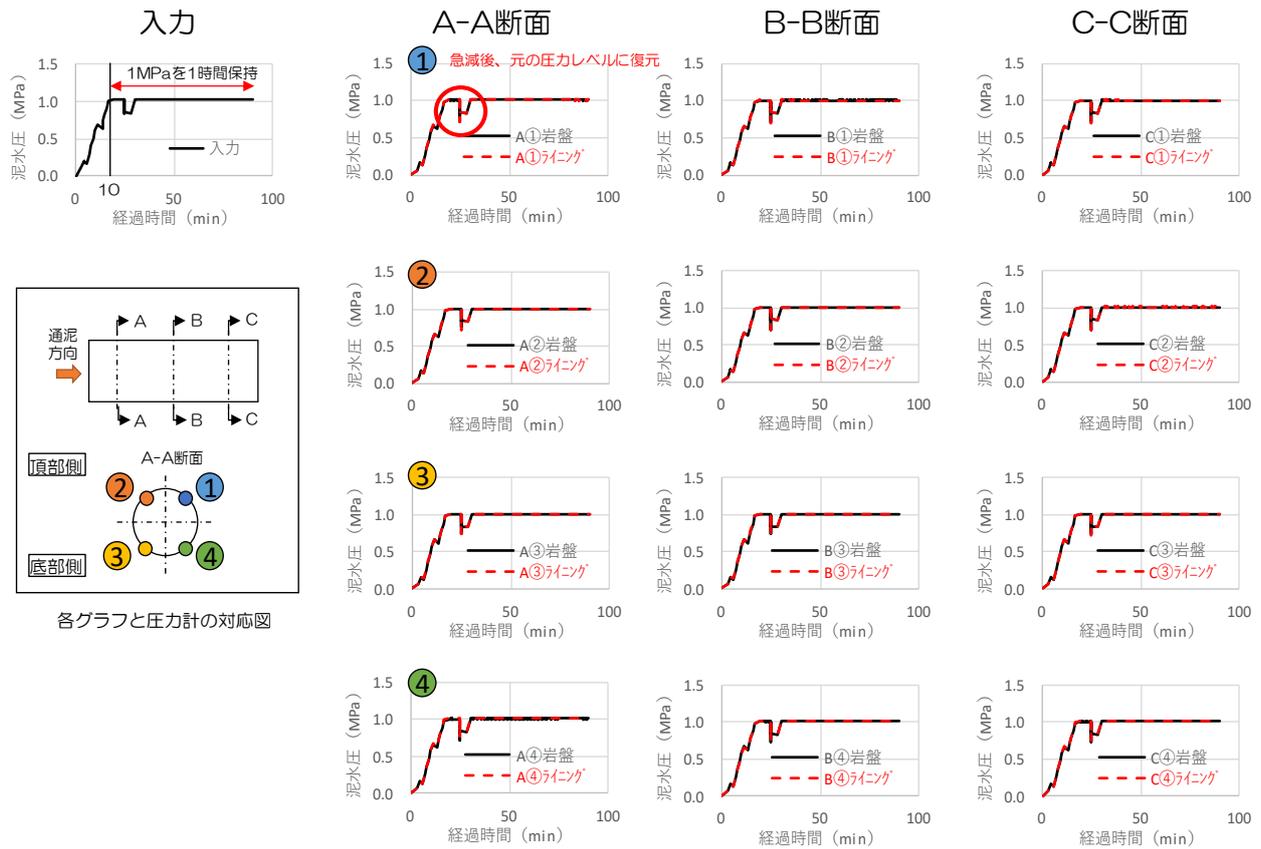


図-7 CASE1-2 RCライニング模擬部及び岩盤模擬部の圧力値の経時変化

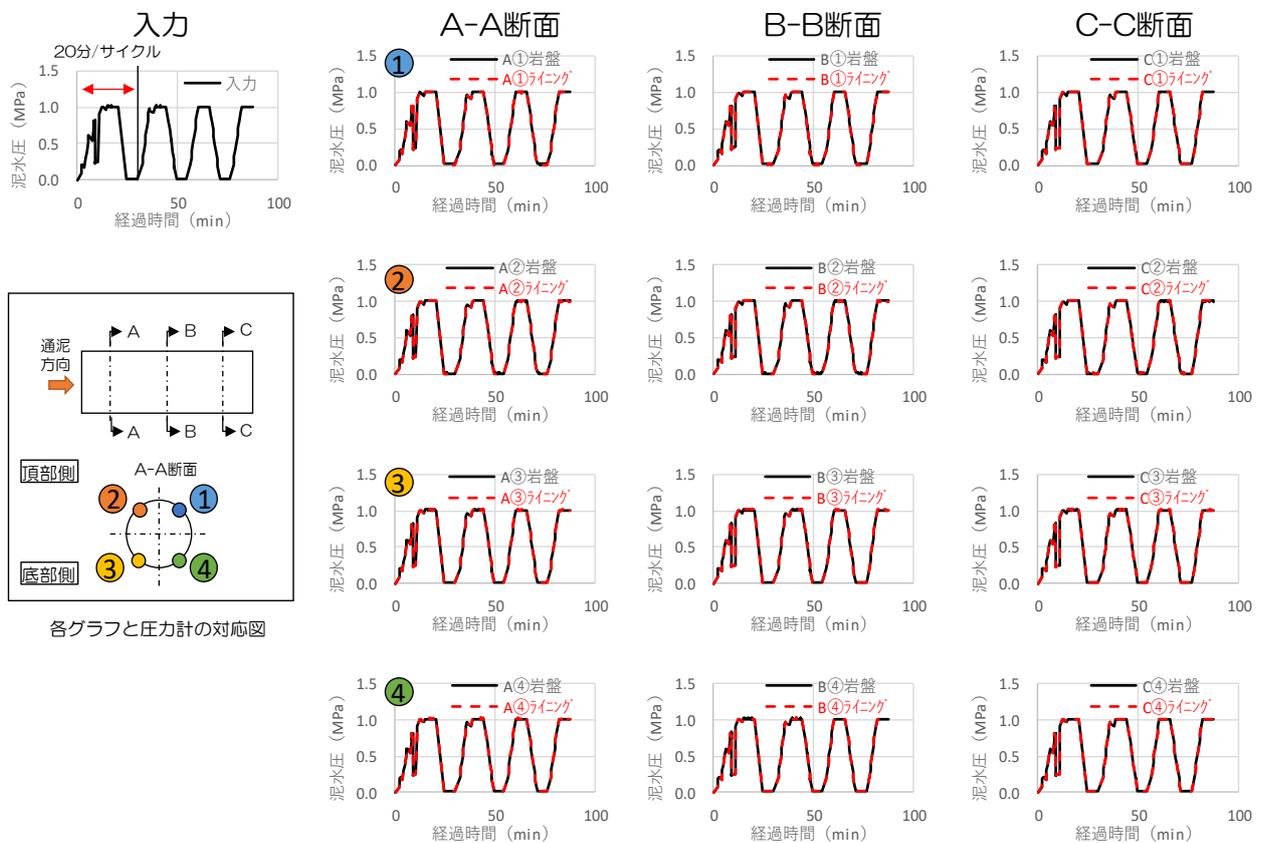


図-8 CASE2-2 RCライニング模擬部及び岩盤模擬部の圧力値の経時変化

表-7 CASE1-2 各断面及び長手方向の平均圧力値及び最大圧力差

	RC ライニング 模擬部						岩盤模擬部					
	A-A 断面		B-B 断面		C-C 断面		A-A 断面		B-B 断面		C-C 断面	
P <sub>AVE</sub> (MPa)	①	1.010	①	1.004	①	1.006	①	1.010	①	1.007	①	1.005
	②	1.006	②	1.004	②	1.011	②	1.007	②	1.008	②	1.009
	③	1.007	③	1.010	③	1.005	③	1.005	③	1.004	③	1.004
	④	1.009	④	1.009	④	1.007	④	1.003	④	1.005	④	1.004
ΔP1	4kPa		6kPa		6kPa		7kPa		4kPa		5kPa	
ΔP2-①	6kPa											
ΔP2-②	7kPa											
ΔP2-③	6kPa											
ΔP2-④	6kPa											

P<sub>AVE</sub> : 試験圧 1MPa 時の 60 分平均圧力値 (急減時を除く), ΔP1 : 断面方向最大圧力差, ΔP2 : 長手方向最大圧力差

表-8 CASE2-2 各断面及び長手方向の平均圧力値及び最大圧力差

	RC ライニング 模擬部						岩盤模擬部					
	A-A 断面		B-B 断面		C-C 断面		A-A 断面		B-B 断面		C-C 断面	
P <sub>AVE</sub> (MPa)	①	1.005	①	1.007	①	1.011	①	1.010	①	1.009	①	1.008
	②	1.008	②	1.008	②	1.015	②	1.009	②	1.009	②	1.009
	③	1.010	③	1.011	③	1.010	③	1.008	③	1.008	③	1.008
	④	1.014	④	1.009	④	1.008	④	1.007	④	1.012	④	1.007
ΔP1	10kPa		4kPa		7kPa		3kPa		3kPa		2kPa	
ΔP2-①	7kPa											
ΔP2-②	8kPa											
ΔP2-③	4kPa											
ΔP2-④	8kPa											

#### 4. まとめ

泥水ライニング構造の基本的な成立要件の一つである外圧保持機能に関する室内実験を行い、泥水による外圧はライニング部に空間的に一様にかつ時間的に安定して作用させることができることを確認した。ただし、外圧の一時的減少対策として、内圧の自動調整システムの導入が必要であることも明らかとなった。

今後は、週単位以上の長期間における泥水ライニング構造の外圧保持機能の安定性について室内実験により確認を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) NEDO : 再生可能エネルギー技術白書 第2版, 第9章 系統サポート技術, pp.26, 2014.
- 2) 西本吉伸, 高畠正治, 久野彰大, 澁上安信, 宮本久司 : 泥水ライニングを用いた高圧力貯蔵タンクにおける泥水自己閉塞性能に関する室内試験結果, 第46回岩盤力学に関するシンポジウム, 2019.
- 3) 久野彰大, 高畠正治, 澁上安信 : 泥水ライニング構造に適用する泥水の反重力方向に対する自己閉塞機能試験, 令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会, III-452, 2019.

## SIMPLE MODEL EXPERIMENT ON COMPRESSED AIR STORAGE TANK WITH MUD SLURRY LINING

Akihiro HISANO, Masaharu TAKABATAKE, Gaku FUJITA,  
Yoshinobu NISHIMOTO, Yasunobu FUCHIGAMI

In order to evaluate the feasibility of the mud slurry lining, it is necessary to confirm that external pressure due to the mud slurry is evenly applied to the RC lining. The authors conducted the laboratory test using the simple compressed air storage tank model composed of three cylinders with different diameters, and confirmed that external pressure was evenly applied to the model lining by injecting the mud slurry between the model lining and the model bedrock.