

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

西本 吉伸^{1*}・高島 正治²・久野彰大²・瀧上安信³・宮本久司⁴

¹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)

²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)

³開発設計コンサルタント株式会社 設備保全技術部 (〒253-0041 茅ヶ崎市茅ヶ崎一丁目9-88)

⁴株式会社 テルナイト (〒101-0051 東京都千代田区神田神保町三丁目 2-3)

*E-mail: nishimoto-yoshinobu@kec.co.jp

CAES高圧空気貯槽の新形式として泥水ライニング方式を検討中である。岩盤とライニングの隙間に内圧相当の泥水圧を作用させ、ライニングにプレストレスを作用させる構造である。本構造の成立のためには、高圧の泥水が岩盤中に漏れせず、泥水圧が保持できることが必要である。泥水には単に圧力伝達媒体としてだけでなく、目詰まり性能（自己閉塞性）も要求される。

このため室内試験により泥水の自己閉塞性について検討を行った。最大3MPaの泥水圧の条件で、人工的に模擬した岩盤の隙間に対して強制圧入を行い、目詰まりの発生状況及び圧力保持について確認したので、試験方法とその結果を報告する。

Key Words : CAES, mud slurry, clogging, critical pressure

1. はじめに

低炭素化社会実現のために再生可能エネルギーの積極導入は重要なテーマであるが、風力や太陽光発電といった変動型電源の導入においては、蓄電技術の適用が有効と考えられる。圧縮空気貯蔵発電システム（以下「CAES」）は一つの蓄電技術である。大規模蓄電技術として揚水発電、小規模な設備として化学電池が実用化されているが、CAESは一部海外での稼働実績¹⁾²⁾がある

が、国内では研究レベル³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾にあり、今後中規模な蓄電設備としての利用が期待される。

CAESでは、電気エネルギーを圧縮空気として貯蔵し、貯槽の構築コストが大きなウェイトを占める。低コストの高圧空気貯槽の構築が可能となれば、CAESの経済性は向上する。その解決方法の一つの案として、泥水を用いた岩盤負担型のライニングシステムであるMSL（泥水ライニングシステム：Mud Slurry Lining System）を考案した。

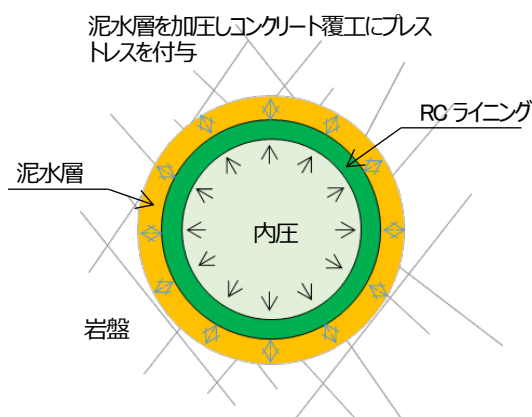


図-1 泥水ライニング構造の概要

2. MSL の構造概念

MSL⁷⁾の概念は図-1のとおりであり、泥水を岩盤とRCライニングの隙間に充填し、人工的に加圧してRCライニングにプレストレスを作用させる構造である。

その特徴は、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を用いている点である。

裏込め泥水を予め人工的に加圧することで、内圧によるRCライニングに生じる引張応力を削減し、RCライニ

ングに気密性を保持させる。内圧は裏込め泥水圧を介して岩盤に負担させる構造である。

泥水が岩盤の割れ目に浸透し逸泥すると高い圧力の保持が困難になるので、高圧の泥水が岩盤に対して適切に目詰まりを生じ、逸泥が生じない特性として自己閉塞機能を有する配合を検討する必要がある。

3. 泥水の自己閉塞機能に関する室内試験

(1) リークアウト試験の概要

泥水の自己閉塞機能の検討のために、高圧泥水を目詰まり特性の確認試験としてリークアウト試験⁹⁾を行った。

実際の岩盤には、割れ目や鉱物間の空隙などの様々な間隙が存在する。そのため試験では岩盤の割れ目を模したスリット供試体と、多孔質な岩盤を模したビーズ供試体の2種類を用いた。これらの供試体に高圧泥水を強制圧入し、泥水の漏出の有無、自己閉塞機能を確認した。

(2) 泥水の配合

a) 材料

泥水の材料は自己閉塞性の保持を基本に、施工性等も考慮し設定した。配合は大深度ボーリングや、シールドトンネルのボイド注入材に用いられている配合を参考とし、粘土（カオリナイト、ベントナイト）、目詰まり材料（プラグ材、ロックウール）、増粘剤、潤滑材から構成した。それぞれの役割は表-1に示すとおりである。

表-1 泥水における構成材の機能

名称	機能
粘土材	泥水の基本材料
目詰まり材料	岩盤の間隙を閉塞させる
増粘剤	目詰まり材の不分離性を維持する
潤滑剤	配管等の圧送損失を低下させる

b) 配合

検討に用いた配合を表-2に示す。本検討においては以下の3点について検討を行った。

検討1：プラグ材の粒度の影響

検討2：泥水希釈の影響

検討3：ロックウールの効果

以上の検討を行うために表-2に示す配合を設定した。目詰まり材のうちプラグ材については、粒度の異なる4種類のプラグ材の混合比を変えて配合を設定した。

設定したプラグ材の粒径加積曲線を図-2に示す。

(3) 試験方法

a) 試験装置

試験装置の概要を図-3に示す。装置は泥水容器、供試体容器、及び加圧装置で構成される。

泥水容器は、供試体容器に圧入する泥水を貯蔵する容器である。供試体容器は、泥水容器の下に設置しスリット供試体もしくはビーズ供試体を設置する。加圧装置は、水圧を発生させ圧力制御が可能なものであり、泥水容器まで水圧を供給し泥水を加圧するものである。

泥水は高粘性であるため配管やバルブを介して供給すると、圧力損失が非常に大きいので、泥水容器と供試体容器は直結させる構造とした。

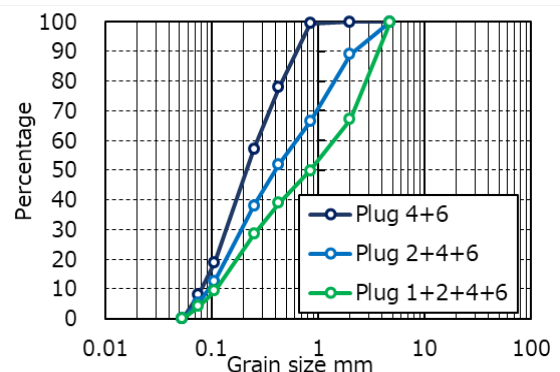


図-2 プラグ材の粒径加積曲線

表-2 検討に用いた泥水の配合

検討項目	配合名称	ベントナイト	カオリン粘土	ロックウール	プラグ #1	プラグ #2	プラグ #4	プラグ #6	増粘剤	潤滑剤
プラグ材の粒度の影響	M1-1.0	10.00%	5.00%	2.00%	-	-	4.00%	4.00%	0.05%	0.50%
	M2-1.0	10.00%	5.00%	2.00%	-	4.00%	4.00%	4.00%	0.05%	0.50%
	M3-1.0	10.00%	5.00%	2.00%	2.00%	2.00%	2.00%	2.00%	0.05%	0.50%
泥水希釈の影響	M3-1.2	8.33%	4.17%	1.67%	1.67%	1.67%	1.67%	1.67%	0.04%	0.42%
	M3-1.4	7.14%	3.57%	1.43%	1.43%	1.43%	1.43%	1.43%	0.04%	0.36%
	M3-1.6	6.25%	3.13%	1.25%	1.25%	1.25%	1.25%	1.25%	0.03%	0.31%
	M3-1.0A	10.00%	5.00%	-	2.00%	2.00%	2.00%	2.00%	0.05%	0.50%
ロックウールの効果	M3-1.2A	8.33%	4.17%	-	1.67%	1.67%	1.67%	1.67%	0.04%	0.42%
	M3-1.4A	7.14%	3.57%	-	1.43%	1.43%	1.43%	1.43%	0.04%	0.36%
	M3-1.6A	6.25%	3.13%	-	1.25%	1.25%	1.25%	1.25%	0.03%	0.31%

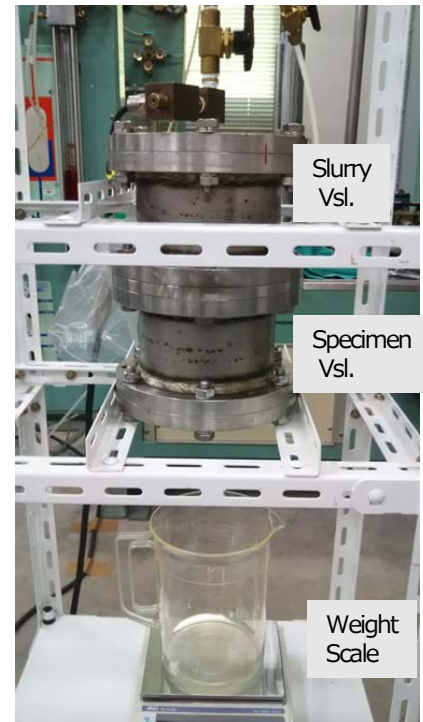
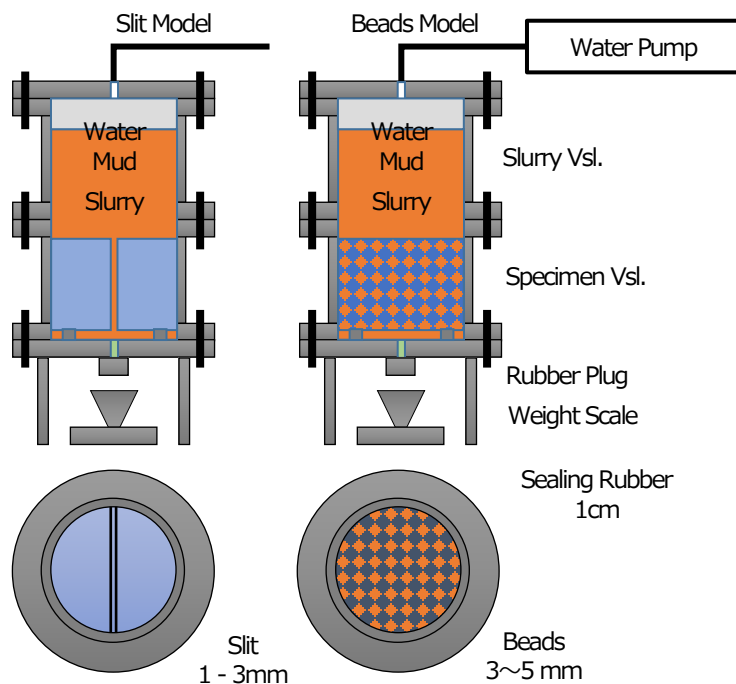


図-3 試験装置の概要

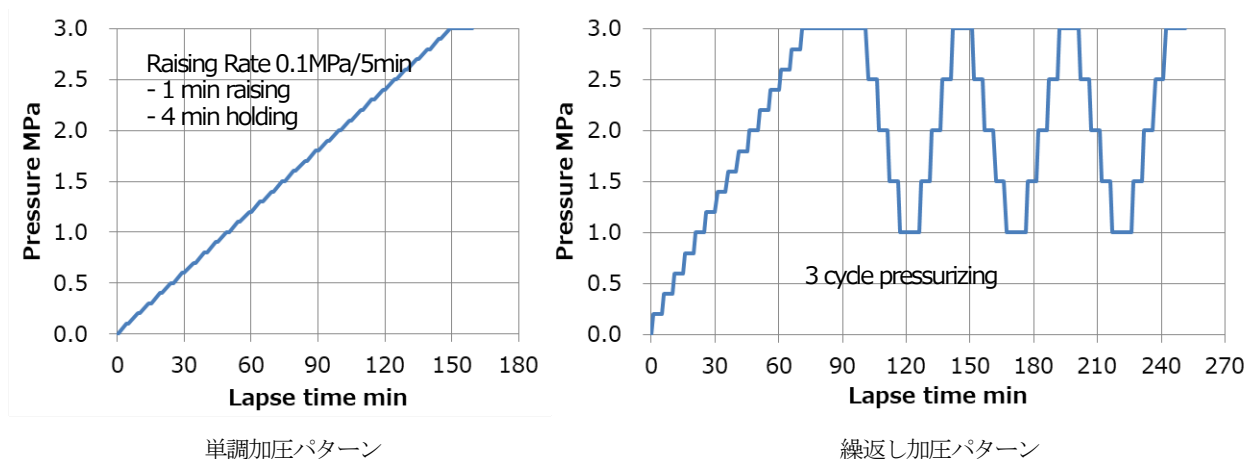


図-4 加圧パターン

b) 供試体

供試体は、スリットモデルとビーズモデルの2種類とした。スリットモデルは、スリット幅を1, 2, 3mmの3段階とした。ビーズモデルではビーズ粒径を3mm, 及び5mmの2段階とした。

c) 加圧パターン

泥水の最大試験圧力は、当面のプラント計画を基本に3MPaとした。加圧パターンは単調増加加圧パターンと、繰返し加圧パターンの2種類とした。

単調加圧パターンは耐圧性を確認する目的で実施し、繰返し加圧パターンは除荷による自己閉塞性能の変化の発生の有無を確認するために実施した。加圧パターンを図-5に示す。加圧時に加圧装置から供給される水の量と試料容器から漏れる泥水の量を測定し、加圧時に泥水

が連続的に漏出したとき、限界圧力として記録し漏出が止まらない状況を確認し試験を終了した。

(4) スランプフロー試験

泥水の自己閉塞性能は、目詰まり材により発揮されるものであるが、実構造物への適用においては、材料の不分離性が必要とされ、時間的・空間的に性状変化が少ないことが望まれる。その点で泥水が適度な粘性を有することを確認することが重要と考えた。当該材料は非常に粘性が高いため、一般的な粘度測定法では測定が不可能であるため、簡便な方法としてスランプフローによる性状把握を行った。結果を図-5に示す。

プラグ材の添加量との関係では、 $M1 > M2 > M3$ となりプラグ材の添加量が増えるとスランプフローは低下する

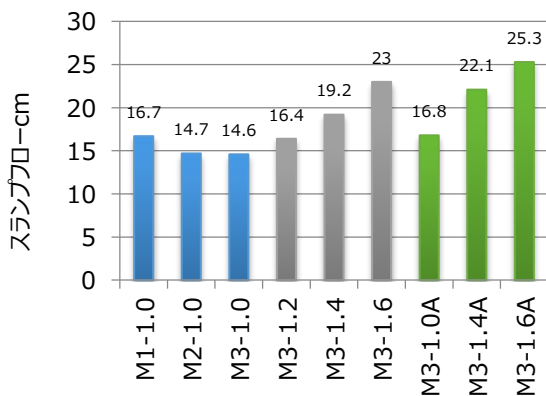


図-5 スランプフロー試験結果

傾向となる。単位水量が減少するためと考えられる。希釈の影響についても、希釈によりスランプフローが大きくなり、これも単位水量の増加によるものと解釈できる。ロックウールの添加を省略すると、スランプフローが大きくなる傾向があり、ロックウールによる粘性増加の影響が確認された。

(5) リークアウト試験結果

a) プラグ材の粒度の影響（単調加圧）

プラグ材の粒径を替えて、3MPaまでの圧力で泥水加圧を行った結果を表-3, 4及び図-6, 7に示す。

細粒のプラグ材を用いたM1配合の場合には1mmのスリットモデルでも、ビーズモデルでも低い圧力でリークが発生した。M2及びM3の粗粒なプラグ材では、3MPaまでの昇圧可能であった。M2及びM3では最大粒径が概ね4.5mmであり、3mmのスリット及び5mmのビーズモデル（最大間隙2.5mm）に対し、最大粒径が上回っているため目詰まりが形成できたと思われる。

b) プラグ材の粒度の影響（繰返し加圧）

表-4に繰返し加圧条件における最大圧力保持結果、及び図-8にM3-1.0の加圧状態を例として示す。繰返し加圧条件においても、単調加圧の結果と同様に最大3MPaまでの圧力保持は可能であった。

浸透量においても概ね同様な結果であり、繰返し加圧による浸透量の変化はほとんど確認できなかった。実験の結果からは除荷による目詰まり状態への影響は生じておらず、目詰まり部分の状態は安定してたとと思われる。

c) スリット幅およびビーズ粒径の影響

図-6, 7からスリットの幅、およびビーズ粒径の差による、目詰まり進展状況を確認することができる。いずれも目詰まりにより最大3MPaまでの圧力は保持するものの、スリット幅が広がるほど、ビーズ径が大きくなるほど泥水の浸透量は多くなることが確認された。

加圧時間が短時間であったため、さらに長期加圧を継続した場合に、浸透量が多少低減すると考えられるが、今後確認すべき事項である。

表-3 プラグ材の粒度と最大圧力（単調加圧）

CASE	SLIT 1mm	SLIT 2mm	SLIT 3mm	BEADS 3mm	BEADS 5mm
M1-1.0	0.03MPa	—	0.02MPa	0 MPa	0 MPa
M2-1.0	>3MPa	>3MPa	0.06MPa	>3MPa	>3MPa
M3-1.0	>3MPa	>3MPa	>3MPa	>3MPa	>3MPa

表-4 プラグ材の粒度と最大圧力（繰返し加圧）

CASE	SLIT 1mm	SLIT 2mm	SLIT 3mm	BEADS 3mm	BEADS 5mm
M1-1.0	0.03MPa	—	0.02MPa	0 MPa	0 MPa
M2-1.0	>3MPa	>3MPa	0.06MPa	>3MPa	>3MPa
M3-1.0	>3MPa	>3MPa	>3MPa	>3MPa	>3MPa

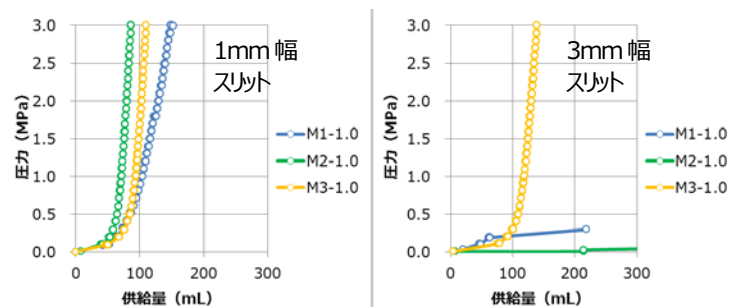


図-6 プラグ材の粒度の影響（スリットモデル）

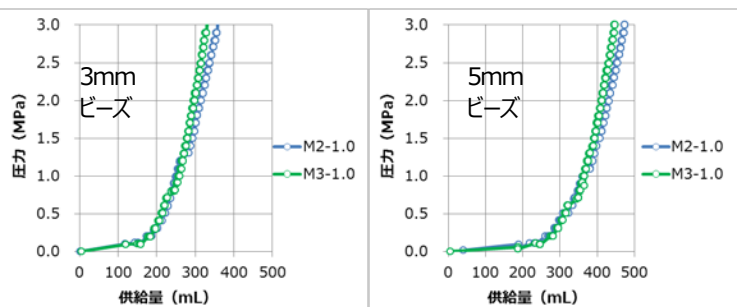


図-7 プラグ材の粒度の影響（ビーズモデル）

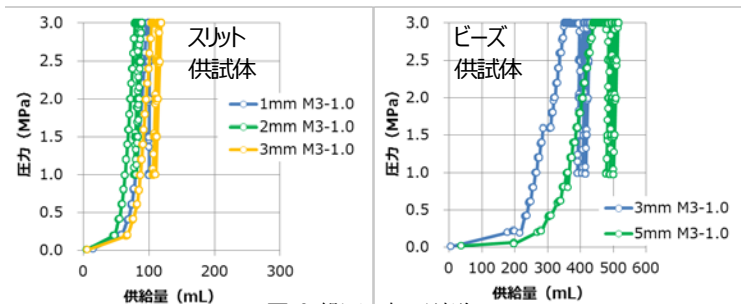


図-8 繰返し加圧試験

d) 泥水希釈の影響

一番粗い目詰まり材料の配合M3において、泥水が地下水と混合し希釈した場合の自己閉塞性能の確認を行った。希釈は1.2倍, 1.4倍, 1.6倍の3ケースについて単調加圧試験により実施した。圧力保持の結果を表-5に示す。またビーズ供試体について圧力と浸透量の関係を図-9に

示す。ビーズ5mmのケースを除いて、3MPaの圧力保持が可能であった。また泥水が希釈された条件ほど、浸透量が大きくなる傾向が確認された。

e) ロックウールの効果

目詰まりメカニズム上において、ロックウールは繊維状の添加物であり目詰まり形成の一翼を担うと考えるが、実際の効果を確認するために実施した。

希釈した泥水の配合において、ロックウールを添加しない場合の目詰まり効果の確認を行った。圧力保持の結果を表-5に示す。またビーズ供試体の場合について圧力と浸透量の関係を図-10に示す。

圧力保持の観点では、5mmビーズにて1.6倍に希釈した条件を除くと、ロックウールの有無に拘わらず3MPaまでの圧力保持が可能であった。

浸透量については、ビーズ径が大きくなるほど、浸透量が多くなる点はロックウールの有無に拘わらず傾向が確認できたが、ロックウールの有無による浸透量の差については、ビーズモデルではロックウール添加により浸透量が減少する傾向が確認された。

表-5 希釈による影響及びロックウールの効果

CASE	SLIT 1mm	SLIT 3 mm	BEADS 3 mm	BEADS 5 mm
M3-1.2	>3MPa	>3MPa	>3MPa	>3MPa
M3-1.4	>3MPa	>3MPa	>3MPa	>3MPa
M3-1.6	>3MPa	>3MPa	>3MPa	LO
M3-1.0A	>3MPa	>3MPa	>3MPa	>3MPa
M3-1.4A	>3MPa	>3MPa	>3MPa	>3MPa
M3-1.6A	>3MPa	>3MPa	>3MPa	LO

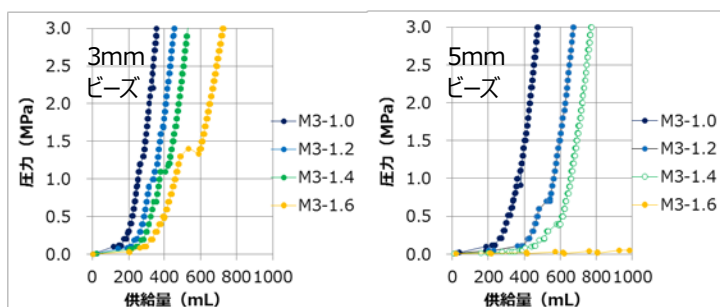


図-9 希釈の影響確認試験

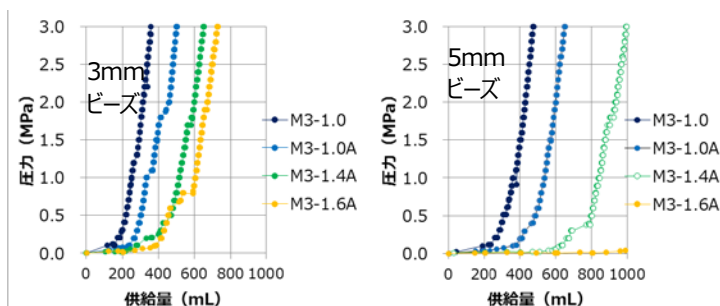


図-10 ロックウールの効果確認試験

4. まとめ

泥水ライニングの実現性を検討するために、ライニングにプレストレスを作用させる泥水の見詰まり特性について室内試験を行った。試験結果から以下を確認することができた。

1) 最大3mmの模擬割れ目、及び5mmのビーズを充填した試料において、目詰まりが生じ、3MPa圧力保持が可能であった。

2) 目詰まりの発生には、プラグ材の粒度が重要であり、想定される開口幅よりも大きな粒子を含む目詰まり材の添加が必要である。

3) 3回の繰返し加圧試験ではあるが、除荷過程において目詰まり状態が損なわれる状況は無く目詰まり部の安定性は確認できた。

4) 目詰まりにより圧力保持は可能であるが、目詰まり部の浸透量はゼロではなく、若干の浸透量は残存する。

5) 泥水を希釈しても概ね自己閉塞性能には影響はないが目詰まりまでの供給量は増加する。

6) ロックウールについてはビーズモデルでは目詰まり促進には寄与していることが確認された。

5. 今後の課題

一連の試験により、泥水の見詰まり特性について確認し、3MPaの圧力を保持する泥水は配合可能と判断されるが、目詰まりが形成部においては相応の透水性がありシャットイン状態では泥水圧の低下が懸念される。今回の実験は短時間の加圧のため長期的にどこまで透水性が低下するのか確認していない。今後、長時間加圧を継続した場合の見詰まり部の透水性の変化について確認が必要である。

実岩盤に適用する場合は規模が大きく、多様な割れ目が存在するため、泥水が均質に行き渡るのか、また多様な割れ目が存在するときの自己閉塞性能が室内試験同様に発揮できるのか検証していく必要がある。

また長距離を圧送し供給する場合の、泥水の性状の変化が無いことを確認する必要もある。

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) 西本吉伸, 高木慎悟, 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.
- 6) 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.
- 7) 西本吉伸, 尾留川剛, 依田昌宏: 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 :第 45 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.155-160, 2018.1.
- 8) 西本 吉伸 ・ 高島 正治 ・ 久野 彰大: 泥水ライニング構造に適用する泥水の自己閉塞機能試験について: 土木学会年次講演会, III-088, pp.175-176, 2018.
- 9) Yoshinobu Nishimoto, Masaharu Takabatake, Akihiro Hisano, Masahiro, Yoda and Hisashi Miyamoto : Underground High-Pressure Storage System Using Mud Slurry Lining : ARMS10, 10th Asian Rock Mechanics Symposium, October, 2018

LABORATORY TEST RESULT ON SELF-CLOGGING PERFORMANCE OF MUD SLURRY APPLIED IN HIGH PRESSURE STORAGE TANK BY MUD SLURRY LINING SYSTEM

Yoshinobu NISHIMOTO, Masaharu TAKABATAKE, Akihiro HISANO, Yasunobu FUCHIGAMI, Hisashi MIYAMOTO

A Mud Slurry Lining System “MSL” is invented as a new concept of CAES high pressure air storage. MSL give the prestress against RC lining with pressurized mud slurry injected the gap between rock and RC lining. Self-clogging function is required, because pressurised mud slurry does not leak into rock, and mud slurry pressure must be maintained.

Authors implemented laboratory test to verify the self-clgging property of mud slurry under the maximum 3MPa pressure using artificial fracture specimen simulated rock mass. And the self-clogging characteristics could be confirmed. This report shows the results.