

ゼオライト土嚢等処理の実規模モックアップ実施状況 について

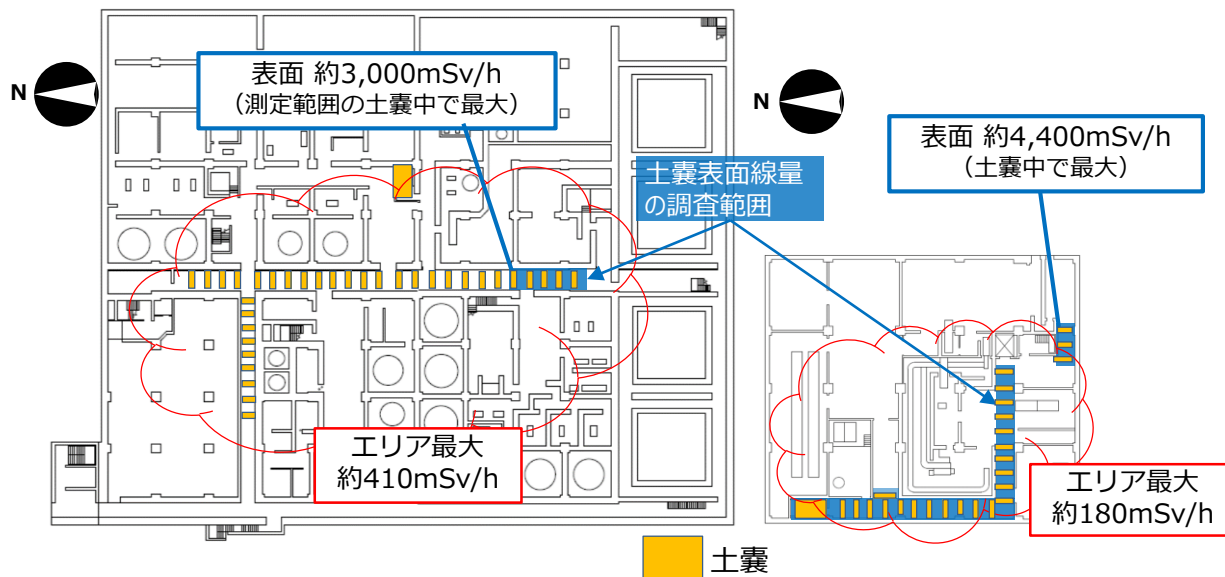
2023年9月27日

TEPCO

東京電力ホールディングス株式会社

1. ゼオライト土嚢等の現状

- PMBおよびHTIはゼオライト土嚢・活性炭土嚢（以下、ゼオライト土嚢等）を最下階に敷設した後、建屋滞留水の受け入れを実施しており、現在は高線量化している。
 - これまでの調査により判明した最下階の状況は以下の通り。
 - PMB, HTIの最下階の敷設状況をROVで目視確認済（下図参照）
 - 土嚢袋は概ね原形を保っているが、劣化傾向があり、一部の袋に破損がみられる状況
 - 確認された土嚢表面の線量はPMBで最大約3,000[mSv/h], HTIで最大約4,400[mSv/h]
 - 空間線量は、水深1.5[m]程度の水面で、PMBは最大約410[mSv/h], HTIは最大約180[mSv/h]
 - ゼオライト土嚢は主に廊下に敷設され、セシウムを主として吸着しているため表面線量が非常に高い状況。活性炭土嚢は主に階段に敷設されており、多核種を吸着。
- ➡ 水の遮へい効果が期待できる**水中回収**を軸として、検討を進めている。



ゼオライト土嚢等の推定敷設量

建屋	種類	推定敷設量
PMB	ゼオライト	約 16 t
	活性炭	約 8 t
HTI	ゼオライト	約 10 t
	活性炭	約 7.5 t

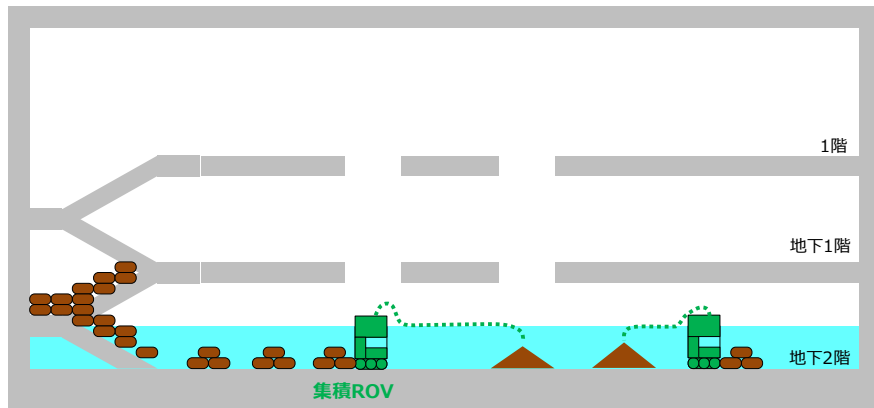
PMBにおける土嚢と環境線量

HTIにおける土嚢と環境線量

- PMB, HTIの地下2階における高線量化したゼオライト土囊・活性炭土囊は、リスク低減のために回収を計画。回収は、水の遮へい効果が期待できる**水中回収**を軸に検討を進めている。
- PMB・HTIの最下階のゼオライト土囊等は回収作業を“**集積作業**”と“**容器封入作業**”の2ステップに分け、作業の効率化を図る計画。
- なお、土囊袋は劣化傾向が確認されており、袋のまま移動できないことから、中身のゼオライト等を滞留水とともにポンプで移送する方式を基本とする。

ステップ① 集積作業

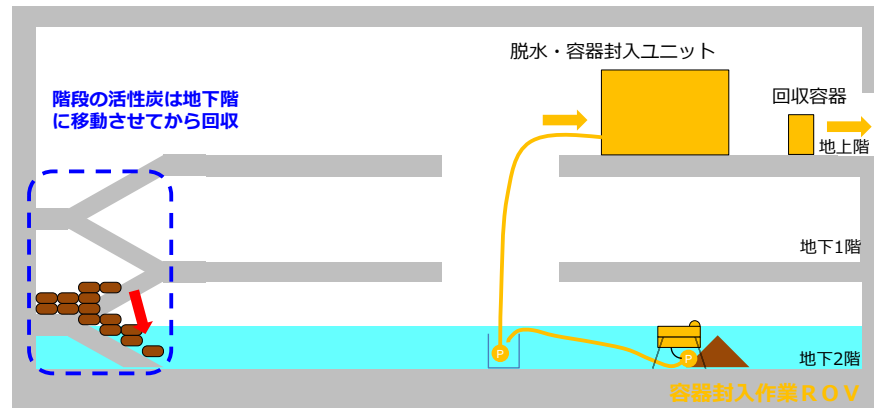
- ✓ ゼオライト土囊等について、作業の効率化による工期の短縮（完了時期の前倒し）を目的に、容器封入作業の前に集積作業を計画。
- ✓ 集積作業用ROVを地下階に投入し、ゼオライトを吸引し、集積場所に移送する。



今回モックアップ試験での確認ステップ

ステップ② 容器封入作業

- ✓ 集積されたゼオライトを容器封入作業用ROVで地上階に移送し、建屋内で脱塩、脱水を行ったうえ、金属製の保管容器に封入する。その後は33.5m盤の一時保管施設まで運搬する計画。
- ✓ 階段に敷設されている活性炭土囊はROVを用いて、地下階に移動させた後、上記と同様に回収する。

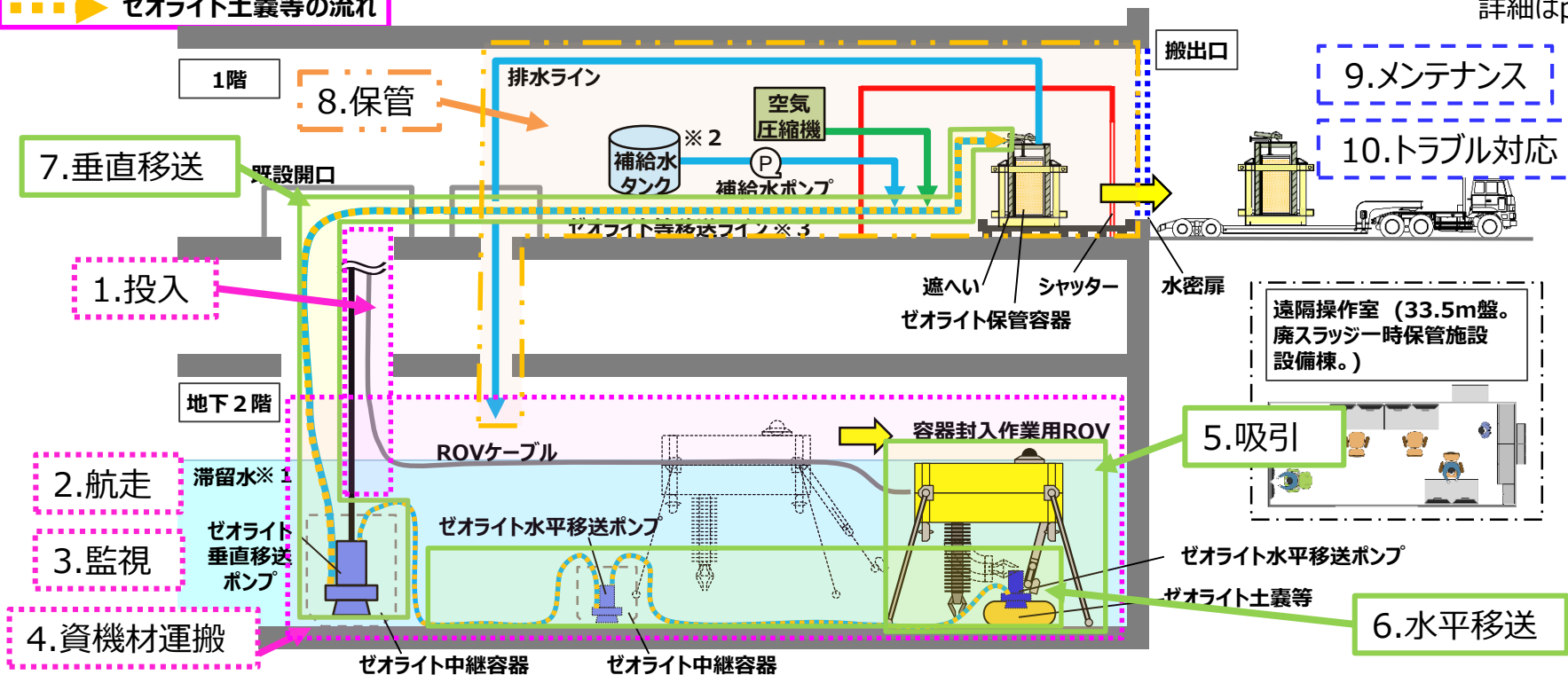


3. 容器封入作業の概要

- PMB, HTIの最下階に敷設しているゼオライト土囊・活性炭土囊（以下、ゼオライト土囊等）について、地下階に容器封入作業用ROVを投入し、ゼオライト水平移送ポンプ及びゼオライト垂直移送ポンプでゼオライト等を地上階のゼオライト保管容器に回収し、33.5m盤の一時保管施設まで搬出する。
- ゼオライト保管容器内部にはフィルタが装備されており、補給水及び空気圧縮機を用いゼオライト等の脱塩（建屋滞留水に含まれる塩分の除去）、脱水を実施する。また、ゼオライト等の移送作業後、ゼオライト等移送ラインはフラッシングを実施する。

ゼオライト土囊等の流れ

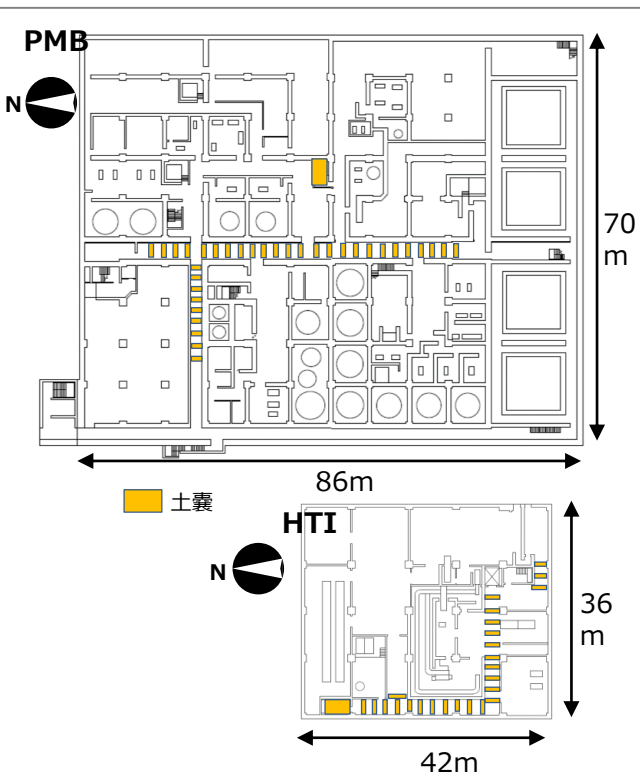
詳細はp.6~9



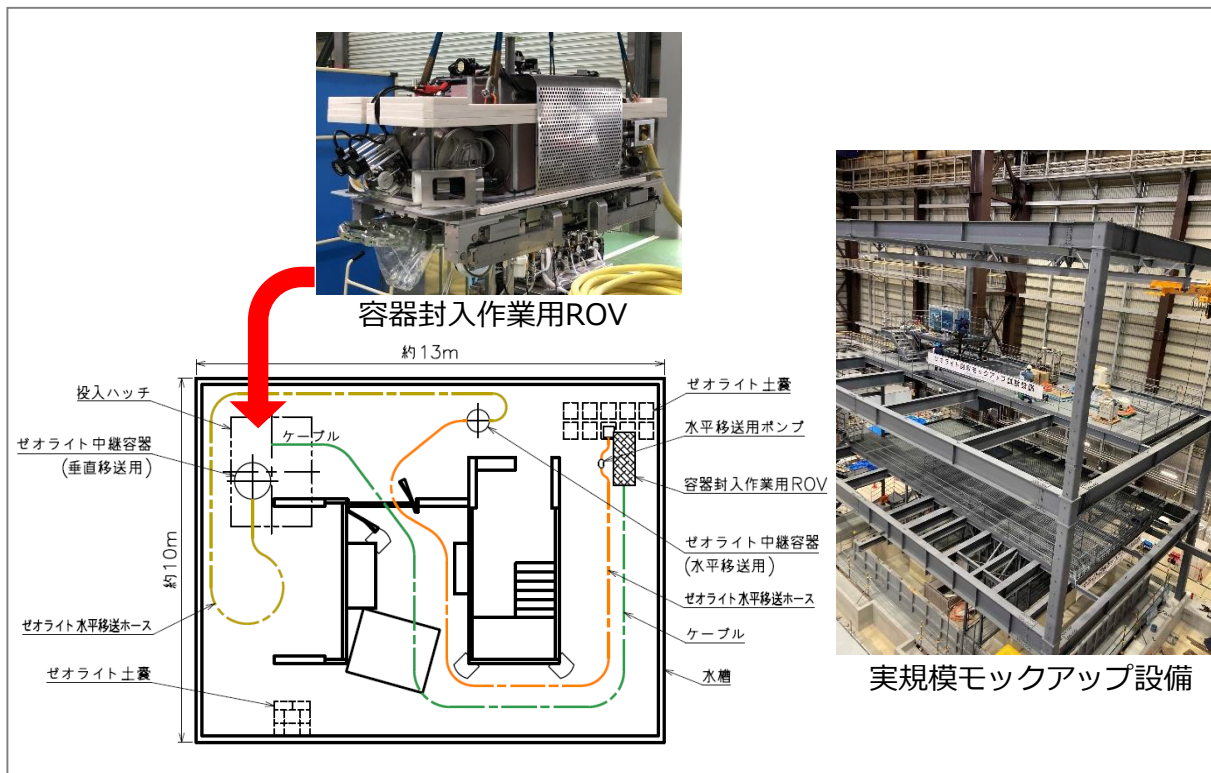
- ※ 1 建屋水位は、建屋最下階（地下2階）における作業性を踏まえ、水位1.5[m]程度に維持する計画。そのため作業中の建屋は基本的に建屋滞留水の受入、移送を停止し、他方の建屋において建屋滞留水の受入、移送を実施する。
- ※ 2 補給水タンク水として、RO処理水（ $^{137}\text{Cs}: 10^1$ [Bq/L]オーダー）もしくはろ過水の使用を計画する。
- ※ 3 ゼオライト等を移送するポンプにはストレーナがついており、異物が詰まった場合等に備え、逆洗が可能な設備構成とする。

4. 実規模モックアップ概要

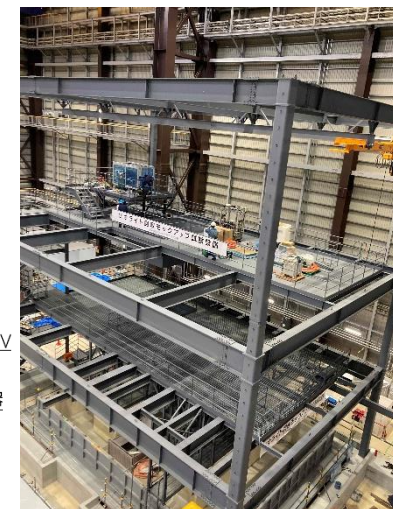
- ゼオライト土嚢等処理設備（容器封入作業）に関するROVのモックアップについて、日本原子力研究開発機構(JAEA)楢葉遠隔技術開発センターにて実施する。なお、集積作業に関するROVのモックアップも当該施設で実施している。
 - 上階(地下1階, 地上1階)を模擬した架台を設置(高さは実スケール)
 - 現場調査で確認された干渉物, 劣化した土嚢袋等を再現し, 現場環境を模擬。
- 実規模モックアップで確認された課題や修正点については, フィードバックを実施した上で, 現場作業の安全性と確実性を高めるため, 引き続きモックアップを実施する。



1 F 現場 (実際の土嚢配置)

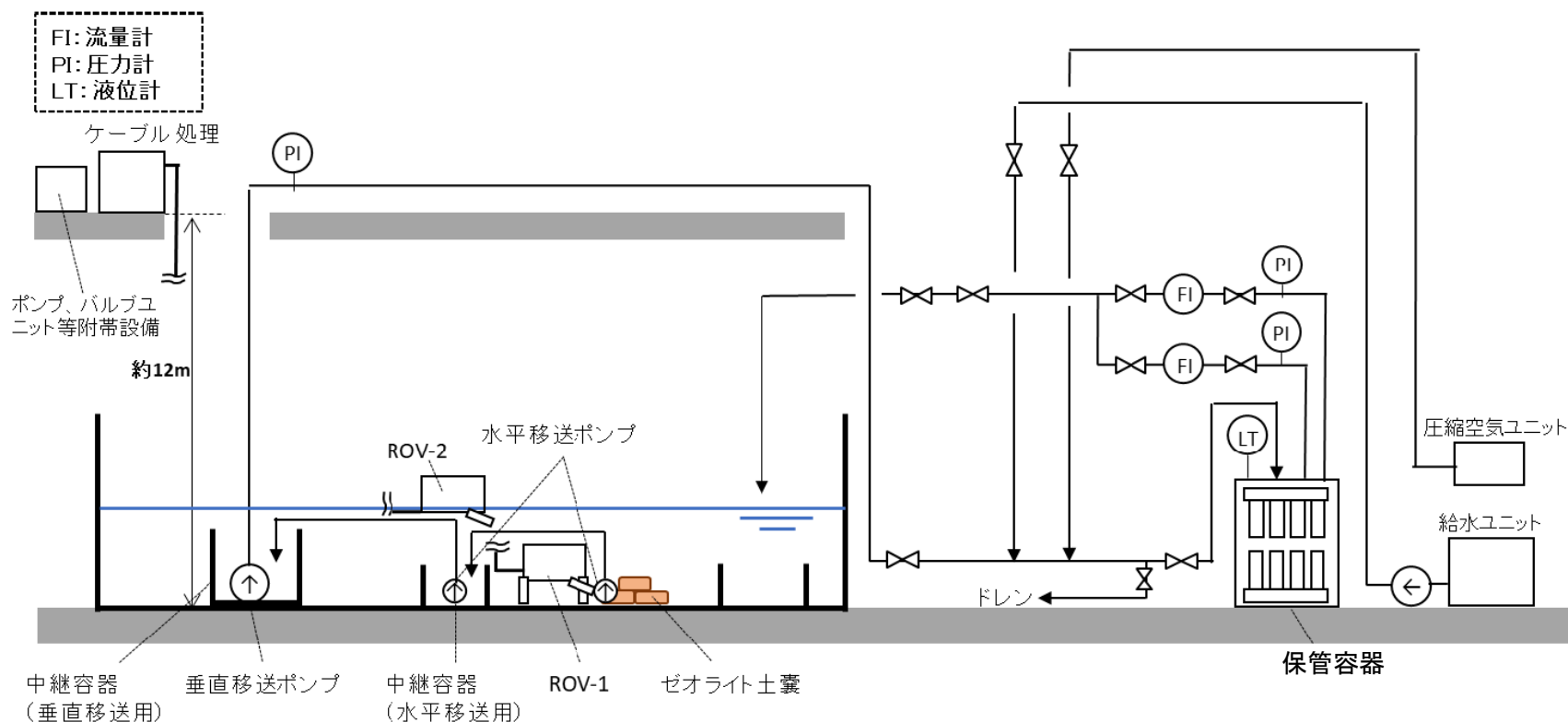


実規模モックアップ



実規模モックアップ設備

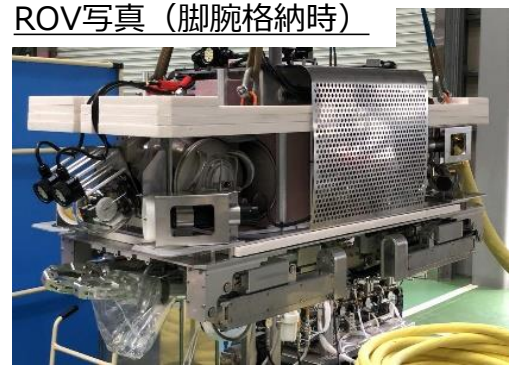
5. 1 実規模モックアップの系統構成



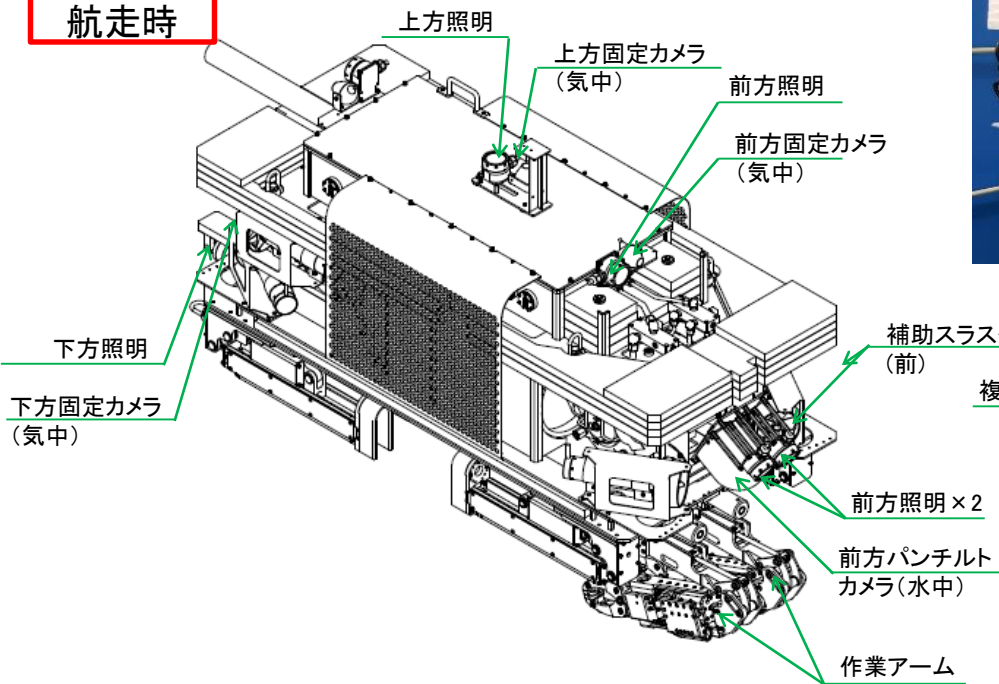
項目	実機との相違点
配管構成	エルボ数, 弁数, 勾配, 経路は実機と異なるほか, 実機よりも配管長が短い, 流量調節弁により系全体の圧力損失や流速・流量を実機とそろえる。エルボ設置, 保管容器の入口部分立上り模擬等, 実機を想定した保守的な構成として, 配管構成に起因する閉塞の発生有無を確認する
保管容器設置高さ	実機: ポンプから最大+12m位置(地上階) M/U試験: ポンプと同レベルとなり, 実機よりも設置高さが低いが, 運転圧が異なっても保管容器のフィルタ差圧は変化しないため, 実機と同じ通水条件となる。
運転圧力	配管構成, 保管容器設置高さが異なるため, 配管や保管容器内の運転圧力は異なるが, 流量・流速をそろえるため試験に影響なし。
系統圧力損失	配管構成が異なり, 圧力損失に相違があるが, 弁による調整により実機と同じ系統圧力損失とする。
系統流量・管内流速	流量調節弁により実機と同じ系統流量・流速とする。

5. 2 実規模モックアップで使用する容器封入作業用ROV(ROV-1) TEPCO

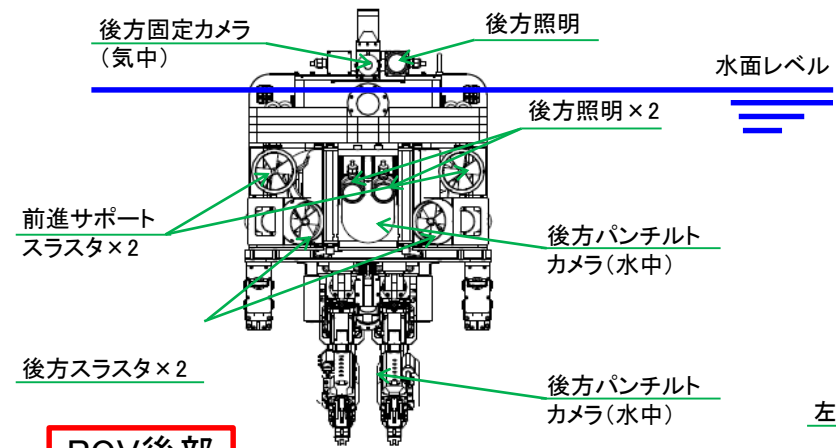
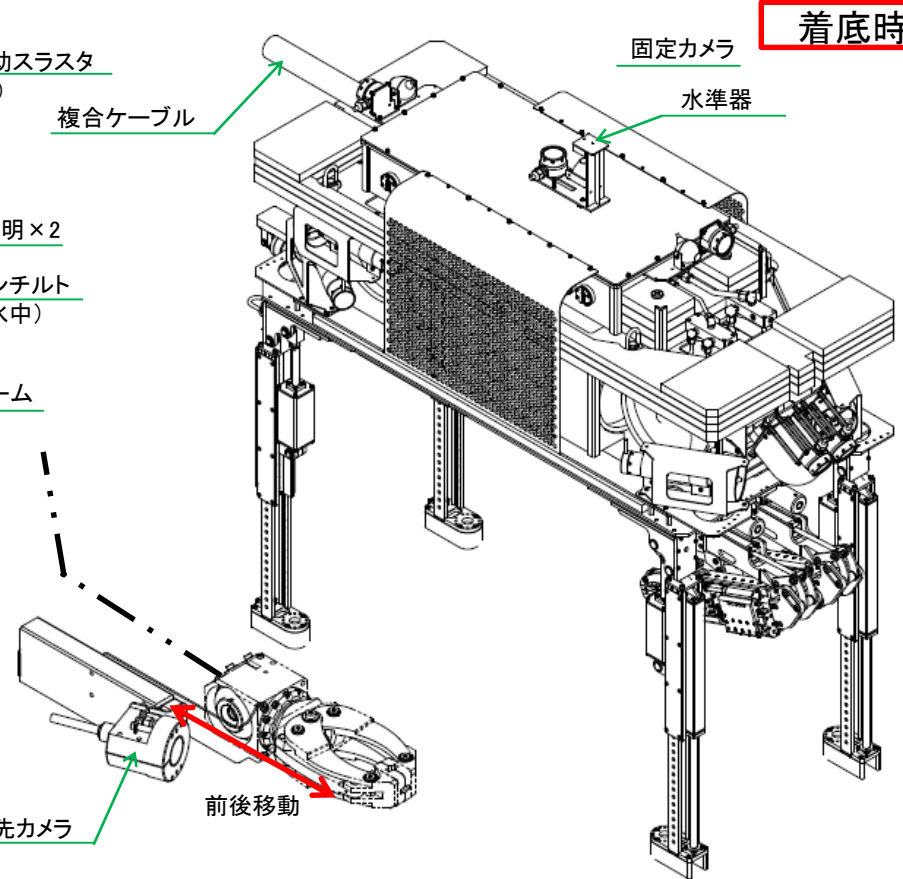
ROV-1基本仕様 航走時外形: L1699×W600×H1060mm重量: 180kg



航走時

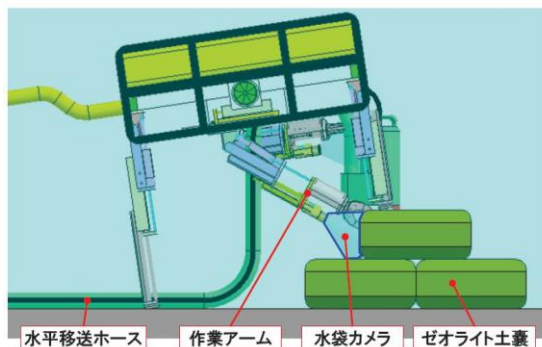


着底時

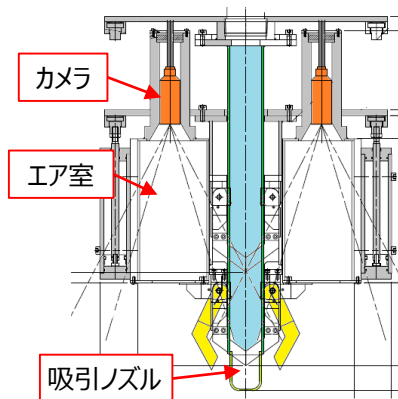


ROV後部

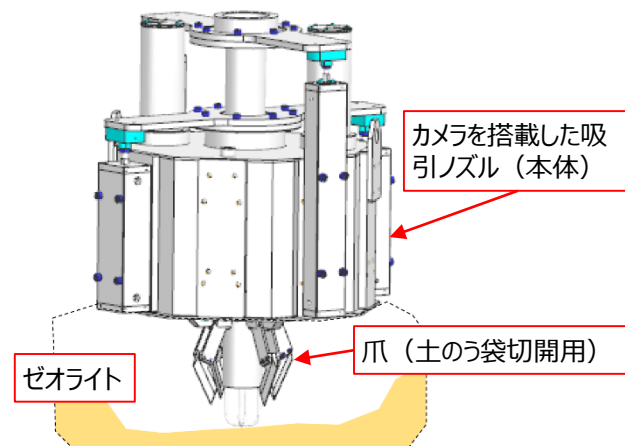
- ゼオライト回収時は水中ポンプにてゼオライトを吸引回収予定であり、濁水中でのゼオライトの状態の確認が必要となるため、下記手法について確認を進めている。
 - ① 袋の中を水で満たし、カメラを袋入口から覗かせて見ることで濁水中の視認性を向上させること（水袋カメラ）を検討中。
 - ② 容器内を空気で満たし、カメラで吸引箇所を視認しながら作業すること（カメラを搭載した吸引ノズル）を検討中。
 - ③ また、ソナー等、カメラ以外の確認方法についても検討を進める。



① 水袋カメラのイメージ



断面図

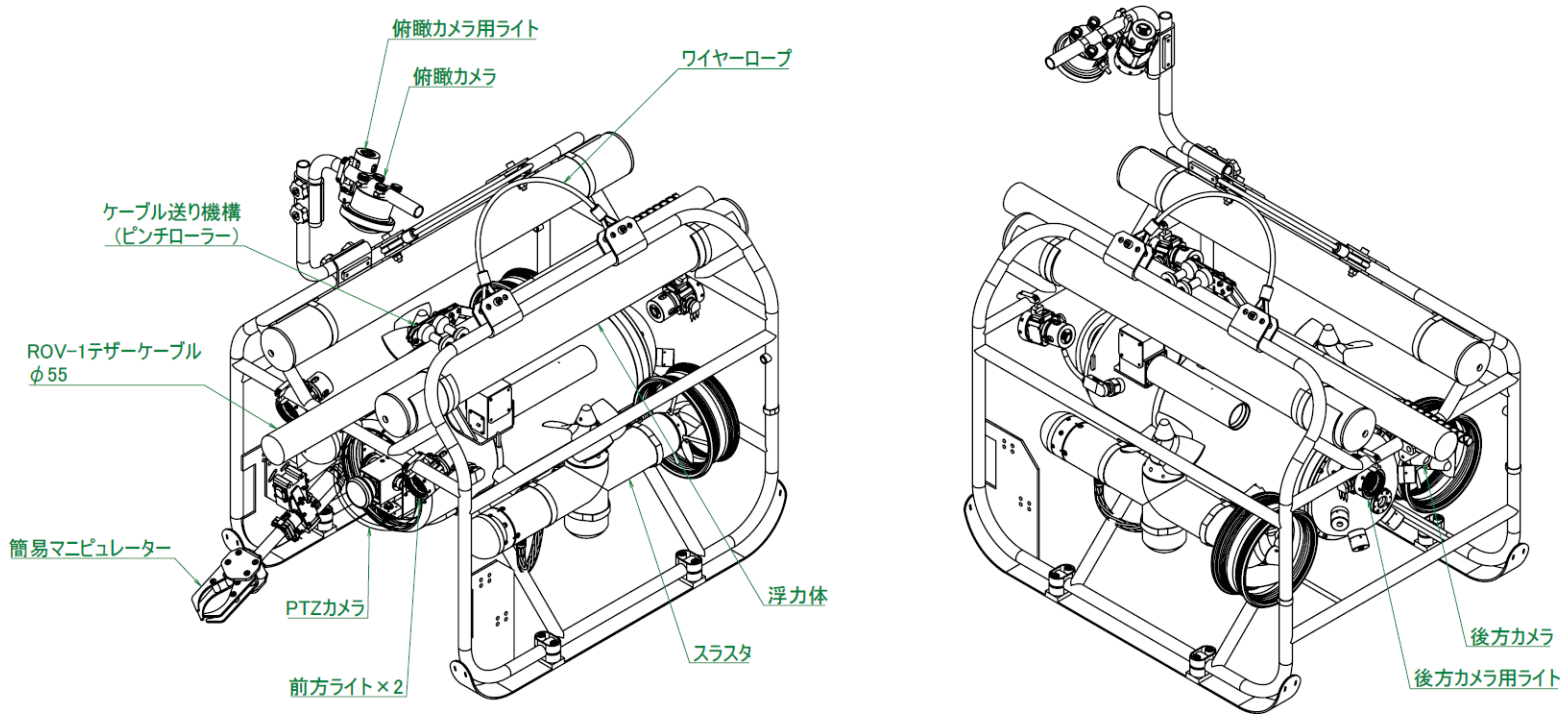


ゼオライト吸引時

② カメラを搭載した吸引ノズルのイメージ※

※ 実規模モックアップ試験にて機能確認を実施中

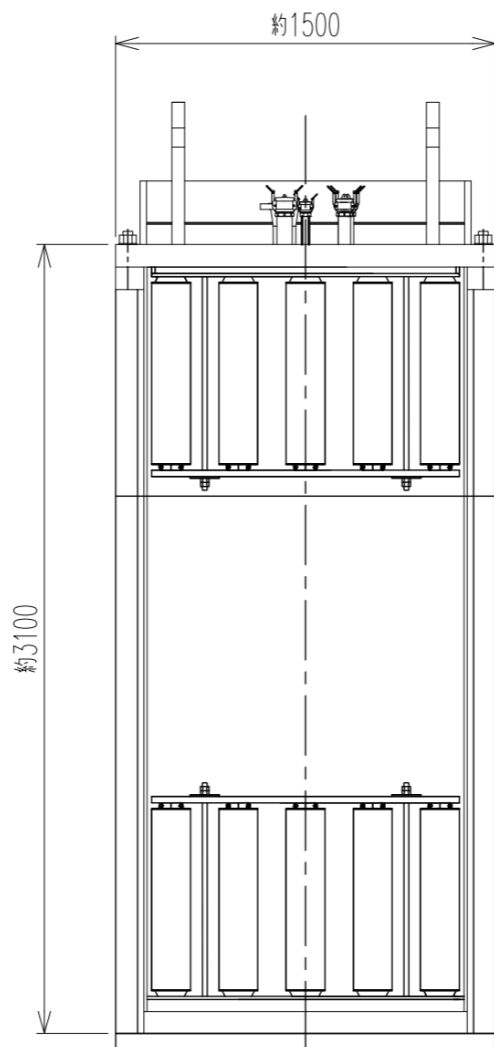
5. 3 実規模モックアップで使用するケーブル整線用ROV (ROV-2) **TEPCO**



各部説明

※実際に投入する機体とは異なる

5. 4 実規模モックアップで使用する保管容器



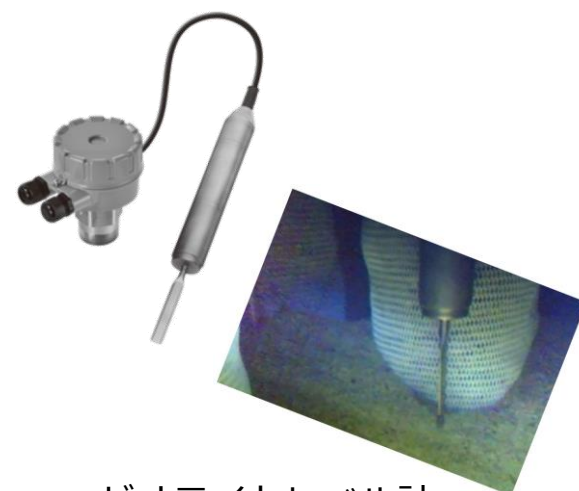
保管容器図面



保管容器写真 (試験用)



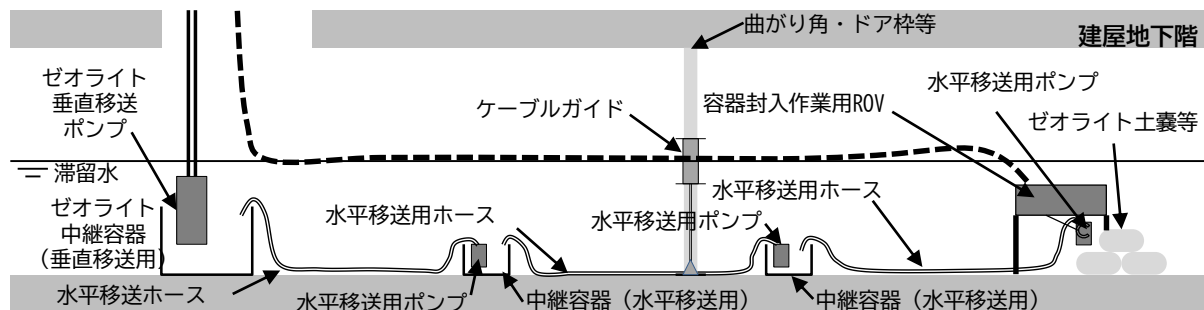
保管容器蓋 (試験用)



ゼオライトレベル計

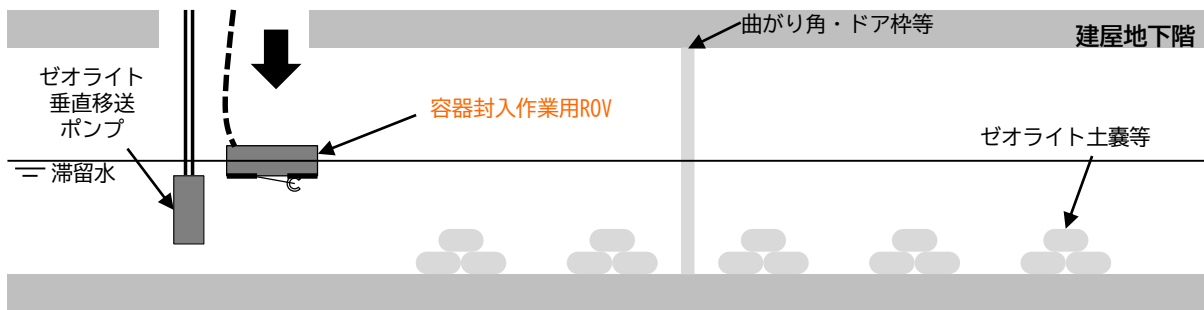
ROV作業 概要

- 地下階でROVを使用してゼオライト土囊等を充填・脱水設備まで移動させる作業は、2種類のROVを使用して実施し、ROVによる遠隔作業で、地下階にポンプ・ホース・中継容器等を敷設して、ゼオライト土囊等をゼオライト中継容器（垂直移送用）に集めて垂直移送ポンプにより地上階に抜き出す。



ROV作業手順

- ① 揚重機にて容器封入作業用ROVを水中に投入。

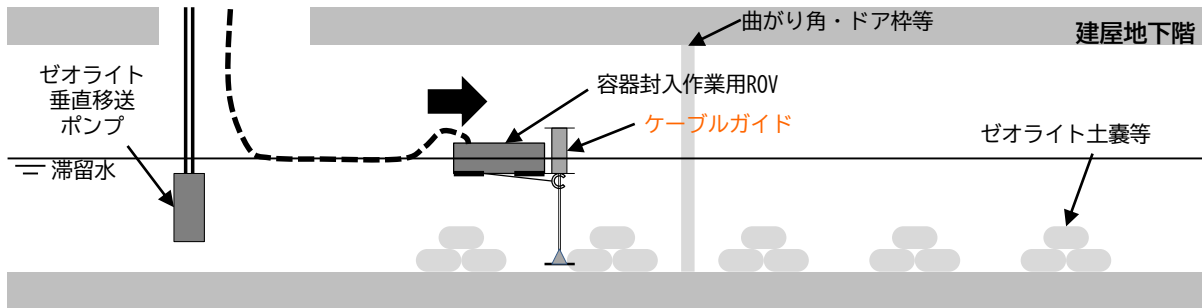


投入

航走

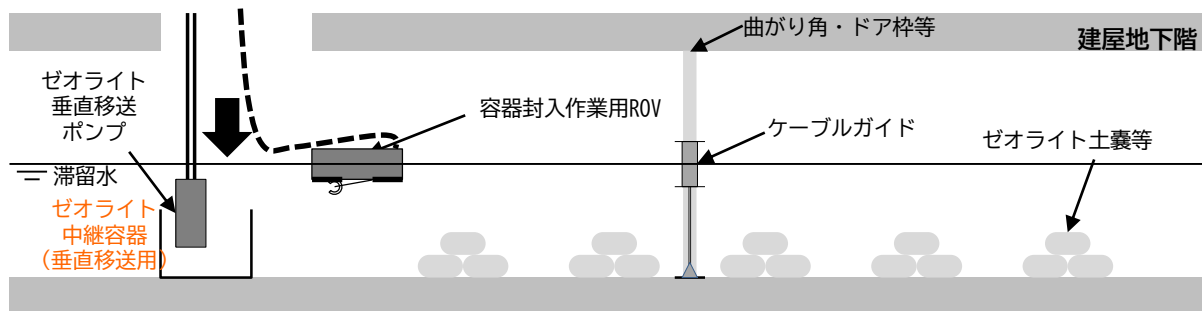
監視

② 揚重機にてケーブルガイドを投入し容器封入作業用ROVにて設置。



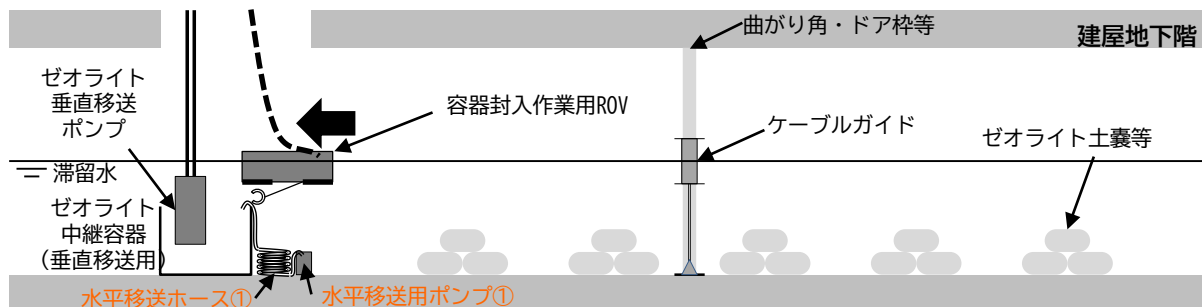
- 監視
- 資機材運搬

③ 揚重機にてゼオライト中継容器(垂直移送用)を設置。



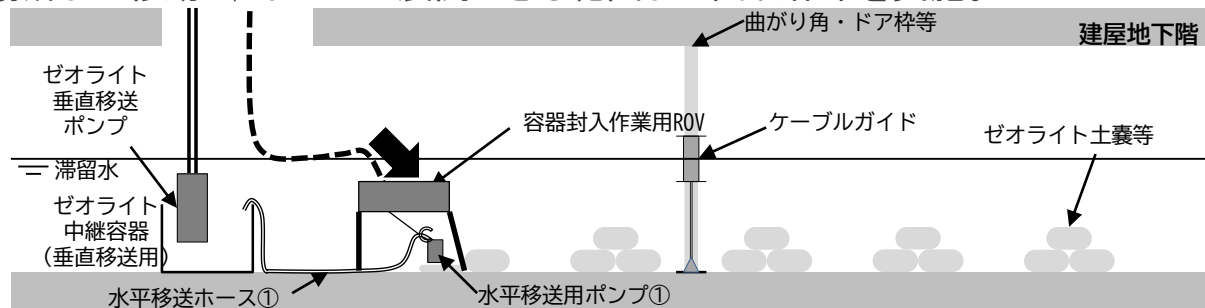
- 監視
- 資機材運搬

④ 揚重機にて水平移送ホース①と水平移送用ポンプ①を水中に投入し、容器封入作業用ROVにて水平移送用ホース①を中継容器(垂直移送用)と水平移送用ポンプ①に接続。



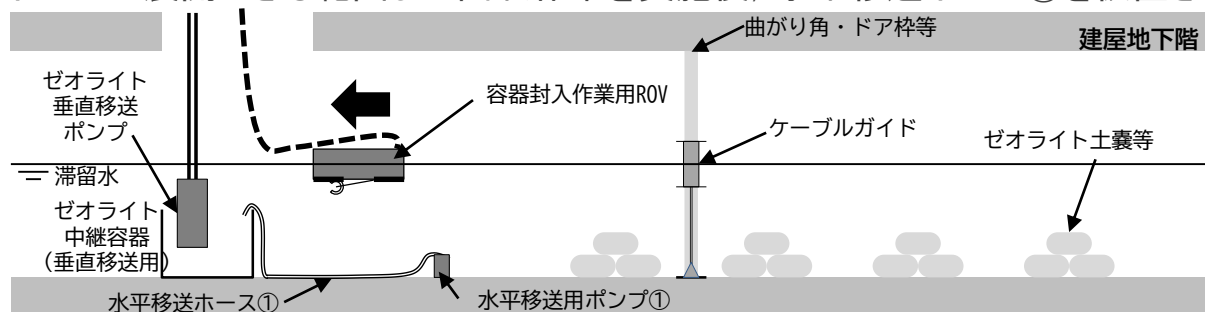
- 監視
- 資機材運搬

⑤ 容器封入作業用ROVにて水平移送用ホース①を展開しながら，水平移送用ポンプ①をゼオライト土囊等のある場所まで移動し，ホースが展開できる範囲まで回収作業を実施。



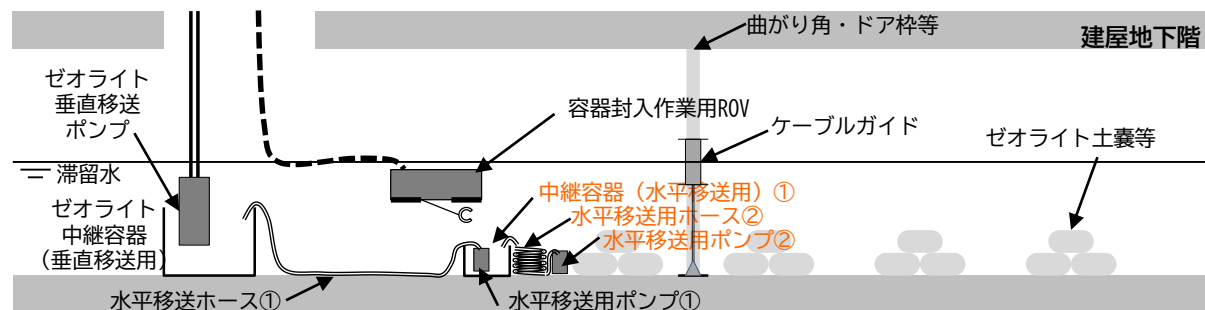
- 監視
- 吸引
- 水平移送
- 垂直移送

⑥ ホースが展開できる範囲まで回収作業を実施後，水平移送ポンプ①を仮置き。



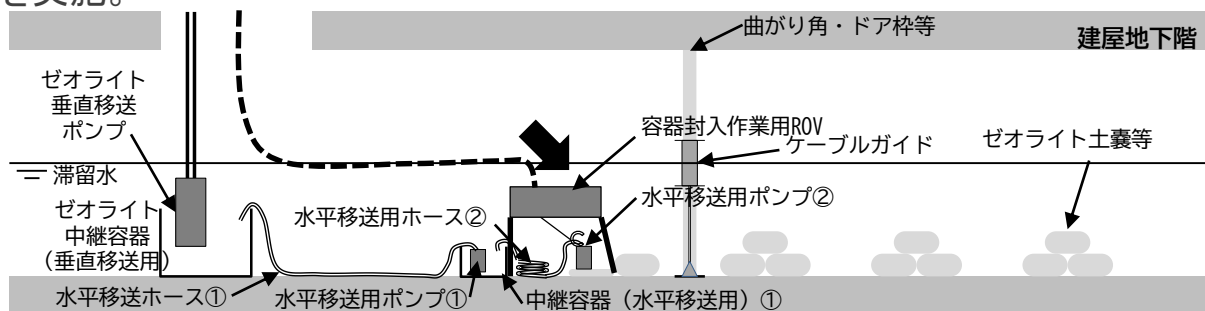
- 監視
- 資機材運搬

⑦ 揚重機にて中継容器(水平移送用)①，水平移送ホース②と水平移送用ポンプ②を水中に投入し容器封入作業用ROVにて水平移送ポンプ①まで移動。水平移送ポンプ①，中継容器(水平移送用)①，水平移送ホース②，水平移送ポンプ②を接続。



- 監視
- 資機材運搬

⑧ 容器封入作業用ROVにて水平移送用ホース②を展開しながら、水平移送用ポンプ②をゼオライト土嚢等のある場所まで移動し、吸引してゼオライト垂直移送ポンプのある場所まで持っていき、ホースが展開できる範囲まで回収作業を実施。



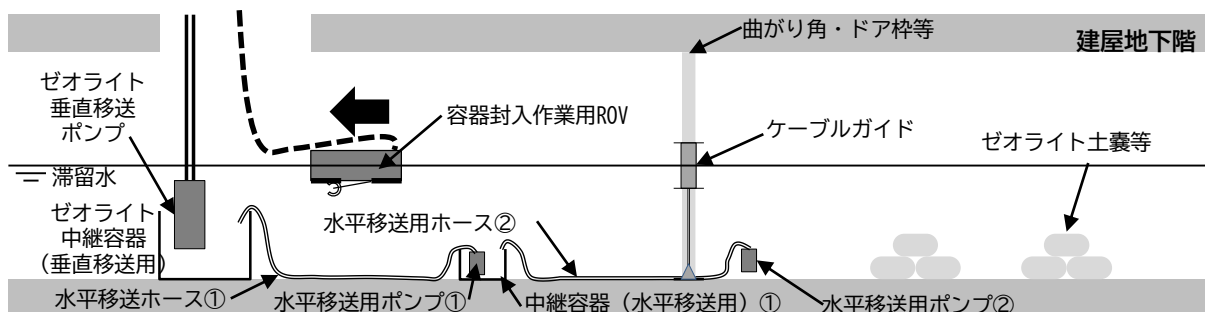
監視

吸引

水平移送

垂直移送

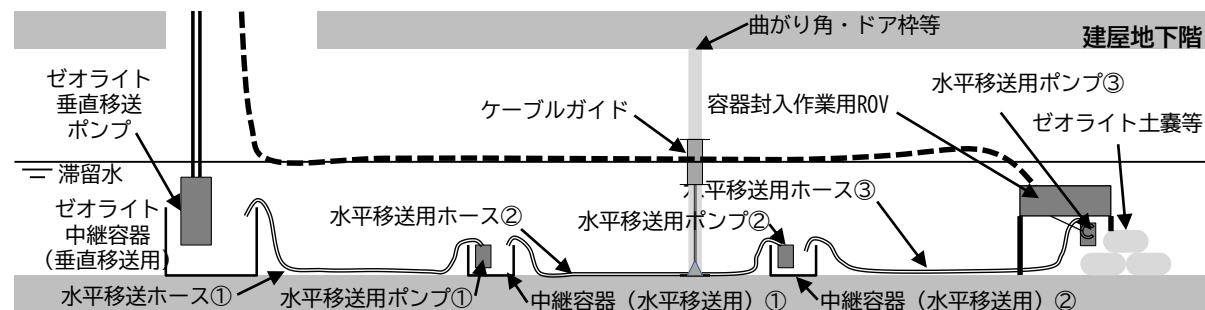
⑨ ホースが展開できる範囲まで回収作業を実施後、水平移送ポンプ②を仮置き。



監視

資機材運搬

⑩ 以降⑦～⑨を繰り返し、回収範囲を広げていく。



航走

監視

資機材運搬

6. モックアップにおける確認項目

- 今回実施する実規模モックアップにおいては、下記に示す性能確認を実施する。
- 今回の実規模モックアップで確認できなかった項目、今回の実規模モックアップで確認された課題の対応策等については、引き続き実施するモックアップ試験の中で確認していく。

項目		実規模モックアップ確認内容
1.	投入	ケーブル投入 ケーブル引き上げ ROVの地下階投入, ROVの引き上げ ケーブルの送り出し回収確認
2.	航走	航走確認 曲がり角 ケーブル等を牽引しての航走機能 角部でのケーブル挙動
	ケーブル遊泳	ケーブル処理時のケーブル挙動 ROVによるケーブルの取り回し
3.	監視	相互監視 濁水中の監視 ROVの相互監視 濁水の発生時にゼオライト土嚢の吸引後の状況を確認
4.	資機材運搬	水中資機材 水中の資機材をROVで把持, 移動, 設置
5.	吸引	切断・吸引 土のう袋を切断, ゼオライト吸引
6.	水平移送	ゼオライトの水平移送, 中継容器にてゼオライトの移送濃度を低減, 地上階への垂直移送
7.	垂直移送	
8.	保管	保管容器 脱水 保管容器内へのゼオライト回収, 満充填時のレベル計検知, ゼオライト脱水
9.	メンテナンス	メンテナンス 水平移送ホース閉塞時や流量低下時を想定し, ROVでホースを揺らす等の対応
10.	トラブル対応	ROV故障 ROVの故障を想定したROVの強制引き戻し, ROVによる救援 (監視用ROVによる作業用ROVのけん引試験)

【参考】 実際の設備と実規模モックアップの差異（1 / 2）

項目	実機との相違点	考え方
ゼオライト土嚢の長期劣化等	相違点なし	実機におけるゼオライト等の土嚢袋については劣化傾向が確認されていることから、健全な土嚢袋に加え、実機同様の放射性劣化を模擬した土嚢袋を試験に用いる。
移送濃度	相違点なし	中継容器（垂直移送用）および垂直移送ポンプは実機同様とし、ゼオライト移送濃度についても実機同様とする。 ゼオライト等を安定した固液比にて移送を継続できることについては、実機を想定した試験構成及び通水条件として、今後試験にて確認する。
配管長	実機：～181 m M/U試験：110 m程度 となり、実機よりも配管長が短い	配管長や配管構成の違いにより実機よりも配管の圧力損失が小さくなるが、系全体の圧力損失は弁による調整により実機を模擬するため、配管長による影響はない。 配管長や配管構成が実機と異なり、配管構成に起因する閉塞の発生有無については同条件での確認とはならないものの、M/U試験では狭い間隔でのエルボ設置、保管容器の入口部分立上り模擬等、保守的な構成とする。
配管構成	エルボ数、弁数、勾配、経路は実機と異なる	
保管容器設置高さ	実機：ポンプから最大 + 12m位置（地上階） M/U試験：ポンプと同レベル となり、実機よりも設置高さが低い	保管容器設置高さが異なることにより、保管容器内の運転圧力が実機よりも高くなる。 保管容器内部のフィルタ性能に影響を与える因子はフィルタ差圧であるが、運転圧が異なっても差圧は変化しないため、実機と同じ通水条件となる。
運転圧力	配管構成、保管容器設置高さが異なるため、配管や保管容器内の運転圧力は異なる	内部流体は非圧縮性流体である水であり、圧力の差異による体積等の変動はなく、流量や流速に影響を与えない。
系統圧力損失	配管構成が異なり、圧力損失に相違がある	配管長、配管構成が異なるが、弁による調整により実機と同じ系統圧力損失とする。
系統流量	相違点なし	流量調節弁により実機と同じ系統流量とする。
管内流速	相違点なし	系統流量、配管口径を実機と同様とするため、管内流速は実機と同じとなる。
保管容器への流れ方向	相違点なし	水平配管から保管容器入口に向けての配管立ち上がり方を模擬することで保管容器入口部分の流れ方向は実機と同じとなる。
配管フラッシング	配管構成が異なるため、通水条件が異なる	フラッシング及び逆洗時における実機を想定した試験構成及び通水条件にて、今後確認する。

【参考】 実際の設備と実規模モックアップの差異（2 / 2）

項目	実機との相違点	考え方
保管容器へのゼオライトの充填	試験では保管容器 1 基のみを充填する（保管容器の交換を実施しない）	保管容器の形状，内部構造，レベル計は実機同等とする（なお，容器への充填時の検知誤差については，今後試験にて確認を行う）。試験にて保管容器 1 基を充填可能であることを確認する。
保管容器でのゼオライトの脱水	相違点なし	保管容器の形状，内部構造は実機同等とし，圧縮空気通気後のゼオライトについて水が滴らない程度（含水率30wt%以下）まで脱水可能なことを確認する。
保管容器でのゼオライトの脱塩	淡水を使用するため，塩分濃度は実機建屋滞留水と異なる	要素試験にて脱塩が可能であることを確認済み。
保管容器の交換	試験では保管容器 1 基を充填する	今後，保管容器の耐圧ホース取り外し機構（自動閉止）の成立性，並びに取り外し時の液体等の飛散状況の検証及び対策検討について確認する。
水中の濁水	濁水の程度に相違あり	ゼオライト土嚢に起因する濁水を模擬し試験を実施予定。その他，活性炭や建屋スラッジの影響についても懸念されるため，今後模擬しモックアップを進める計画。
水中の異物	ゴム手や下着，土嚢袋の破片など浮遊している可能性があり，今回のM/Uでは再現されていない	異物として確実に確認されている土嚢袋から確かめていく。そのほかの異物については今後のモックアップで確認する計画。
ケーブル	ケーブル被覆について相違あり	今回使用するケーブルは本番よりも引っかかりやすいものを使用しており，ケーブルが傷つきやすい箇所は把握できる等，悪さ加減は十分に確かめることができると考えている。実際使用するケーブル被覆は要素試験等で最適なものを選定し，モックアップで確認予定。
ケーブル曲がり回数	相違点なし	実機同様，5回の曲がり模擬し，ケーブル挙動を確認する予定。
ケーブル曲がり角の間隔	相違あり	ROVケーブルについては，水面に浮遊する仕様であり，基本的に水平距離に応じた抵抗は非常に小さく，影響は少ないと考えている。
ケーブル処理装置	完成品ではなく，1/10程度しか収納することができない	今回のモックアップでは，装置が新設計ということもあり，その機能確認を実施する。モックアップの結果を踏まえ，今後のモックアップ試験で実機性能を確認予定。
ROV-1：アーム	容器封入作業用ROV（ROV-1）のアームについて相違あり	ROV-1の水圧駆動式アームについては，軸構成の合理化を進めており，今回のモックアップでは合理化前のアームを使用予定。今後，モックアップにて合理化後のアームを確認予定。
ROV-2：本体	ケーブル整線用ROV（ROV-2）の本体について相違あり	ROV-2については，既製品を改良したROVを用い，ケーブル処理をする機能があるかモックアップにて検証する。モックアップの結果を踏まえ，今後，実物同様のROV-2を引き続きモックアップにて確認予定。

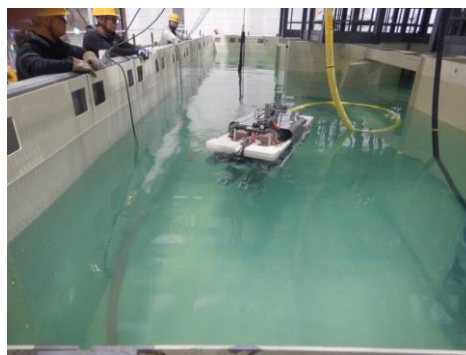
以下 試験結果 (速報)

1. 投入

試験	ROVの地下階投入, ROVの引き上げ ケーブルの送り出し回収確認
結果	ケーブル処理装置を介してROVの投入, 回収確認を実施し, ROVの動作に合わせ, ケーブル送り, 巻き上げ機能を確認した。



ROV投入時



ROV着水時

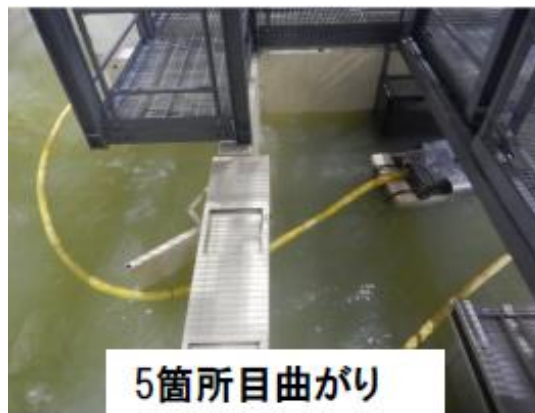
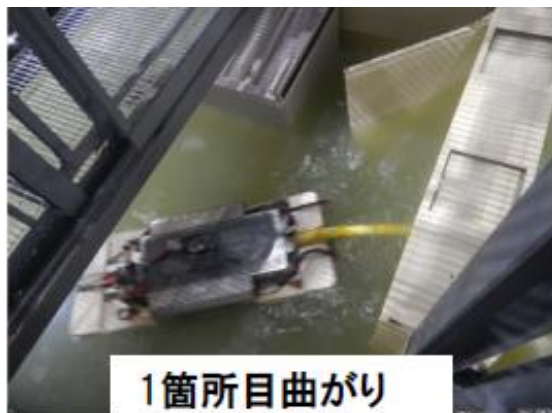
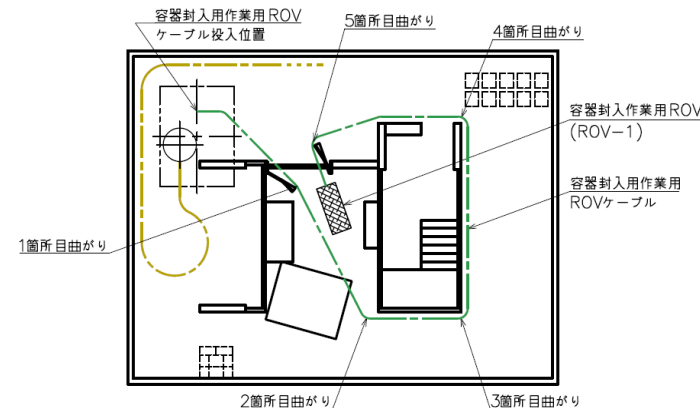


ケーブル収納時

2. 航走

3. 監視

<p>試験</p>	<p>ケーブル等を牽引しての航走機能 角部でのケーブル挙動 ケーブル処理時のケーブル挙動 ROVによるケーブルの取り回し ROVの相互監視</p>
<p>結果</p>	<p>ケーブルガイド無しで5回曲がりの航走し，問題なく5回曲がりが可能であること，ケーブルが角部に引っ掛かることが無いことを確認した。監視用ROVによるケーブル取り回しの機能について確認した。</p>



3. 監視

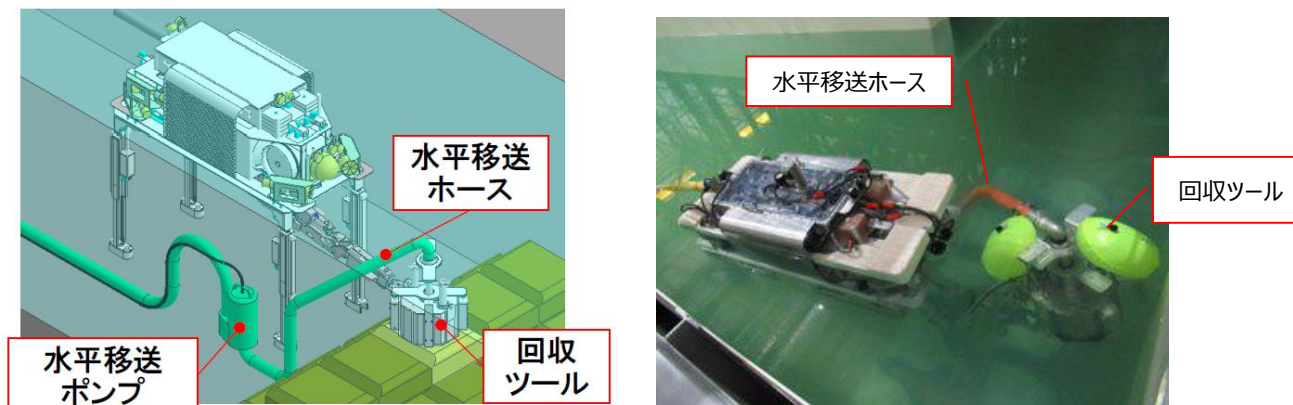
4. 資機材運搬

5. 吸引

6. 水平移送

7. 垂直移送

試験	ゼオライト回収, ROVの相互監視, 水中の資機材をROVで把持, 移動, 設置 濁水の発生時にゼオライト土囊の吸引後の状況を確認 ゼオライトの水平移送, 中継容器にてゼオライトの移送濃度を低減, 地上階への垂直移送
結果	ゼオライト回収ツールの位置合わせ, ゼオライト土囊袋切断, 水平移送ポンプ起動, ゼオライト回収, ROV浮上/航走が可能であることを確認した。ゼオライト移送時に移送ラインに閉塞は確認されなかった。ゼオライト土囊の吸引後の状況を確認した。



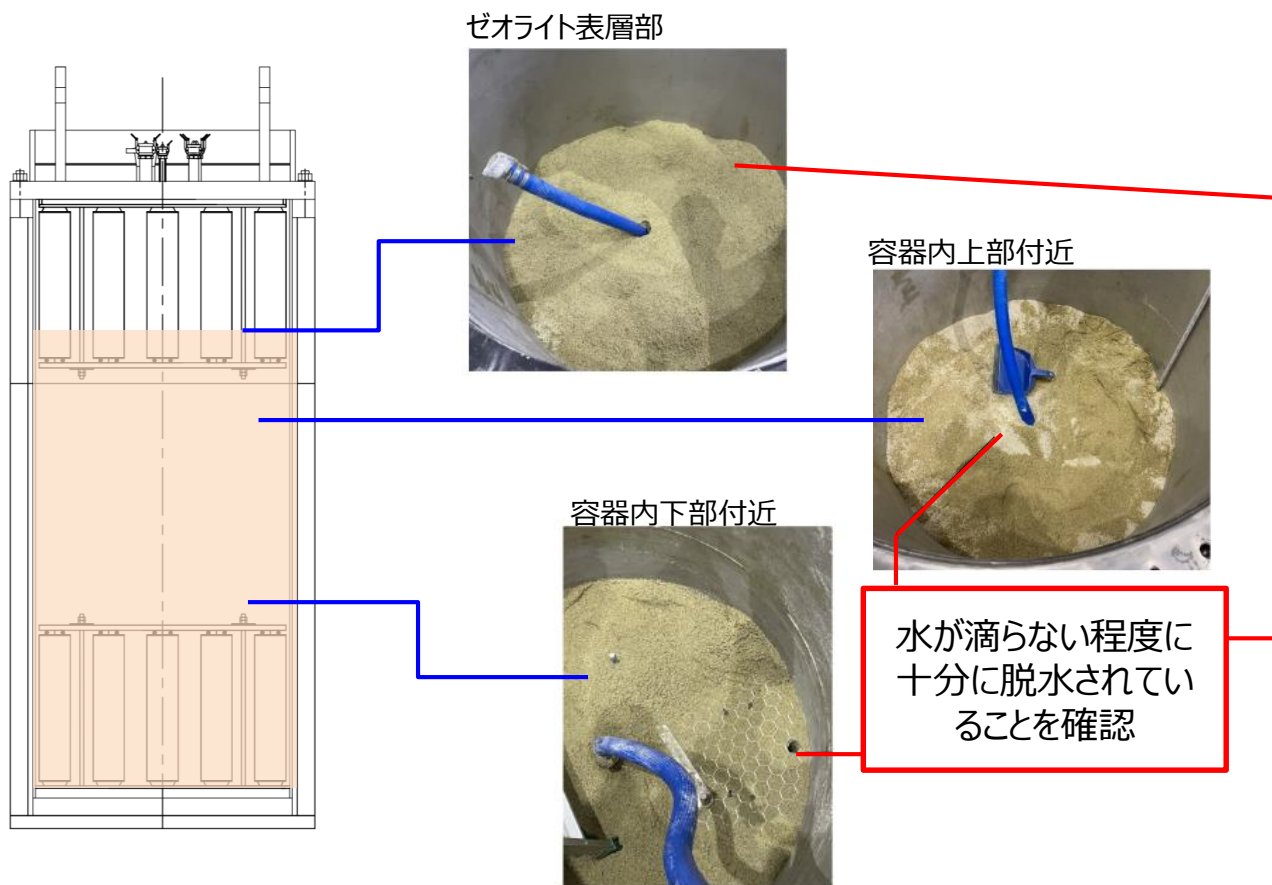
ゼオライト回収時の作業概要(イメージと試験様子)



カメラを搭載した吸引ノズルによる監視状況

8. 保管

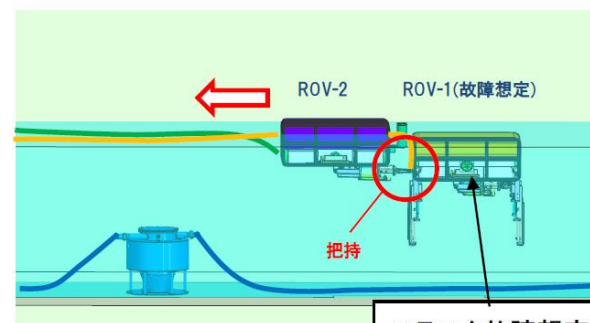
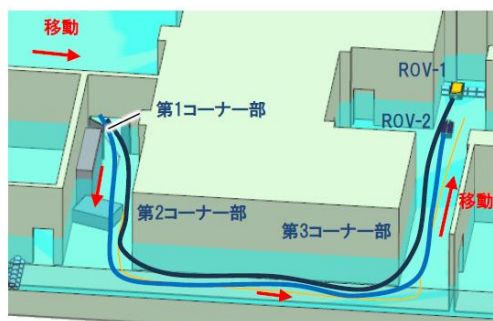
試験	保管容器内のゼオライト脱水
結果	保管容器内のフィルタを通し，脱水を実施し，水が滴らない程度に十分に脱水されていることを確認している。



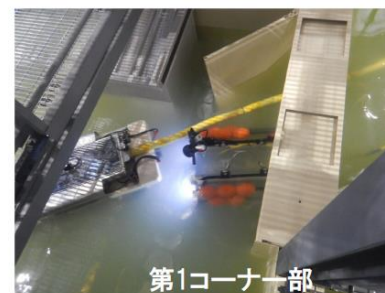
【試験結果 5】 ROVの強制引き戻し, ROVによる救援

10. トラブル対応

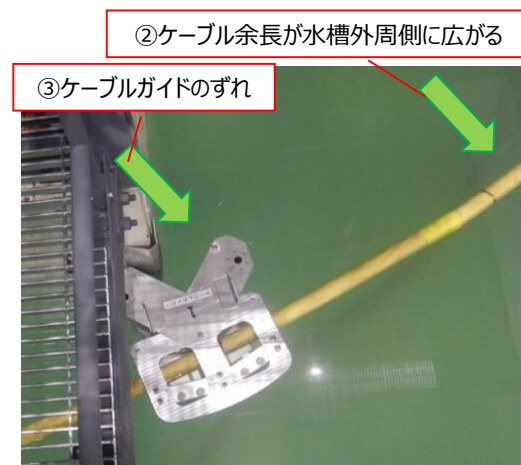
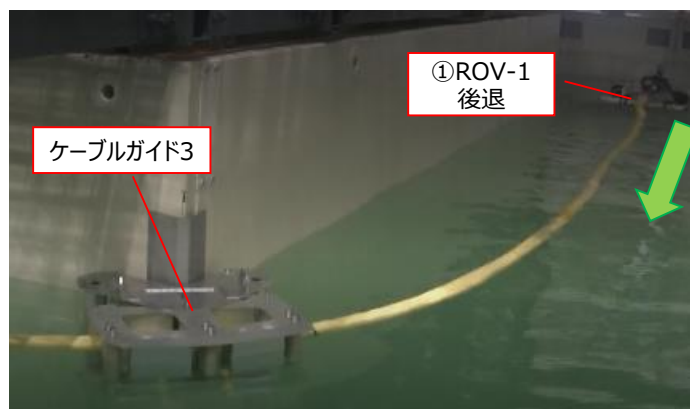
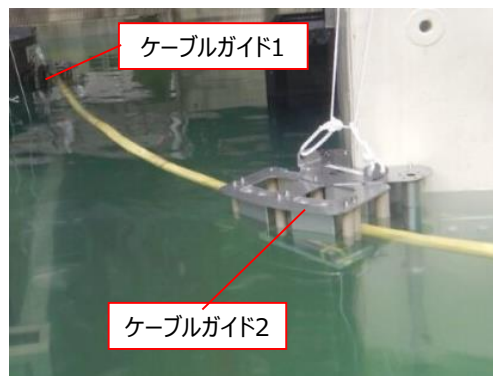
試験	ROVの故障を想定し, 強制引き戻し, 及びROVによる救援
結果	ROVの故障を想定し, ROVのケーブル引き戻しによる強制引き戻しについて確認した。 作業用ROVを水面に浮かべた状態にて監視用ROVのマニピュレータで作業用ROVを把持して牽引回収できることを確認した。



スラスタ故障想定
スラスタ停止
脚部折りたたみ

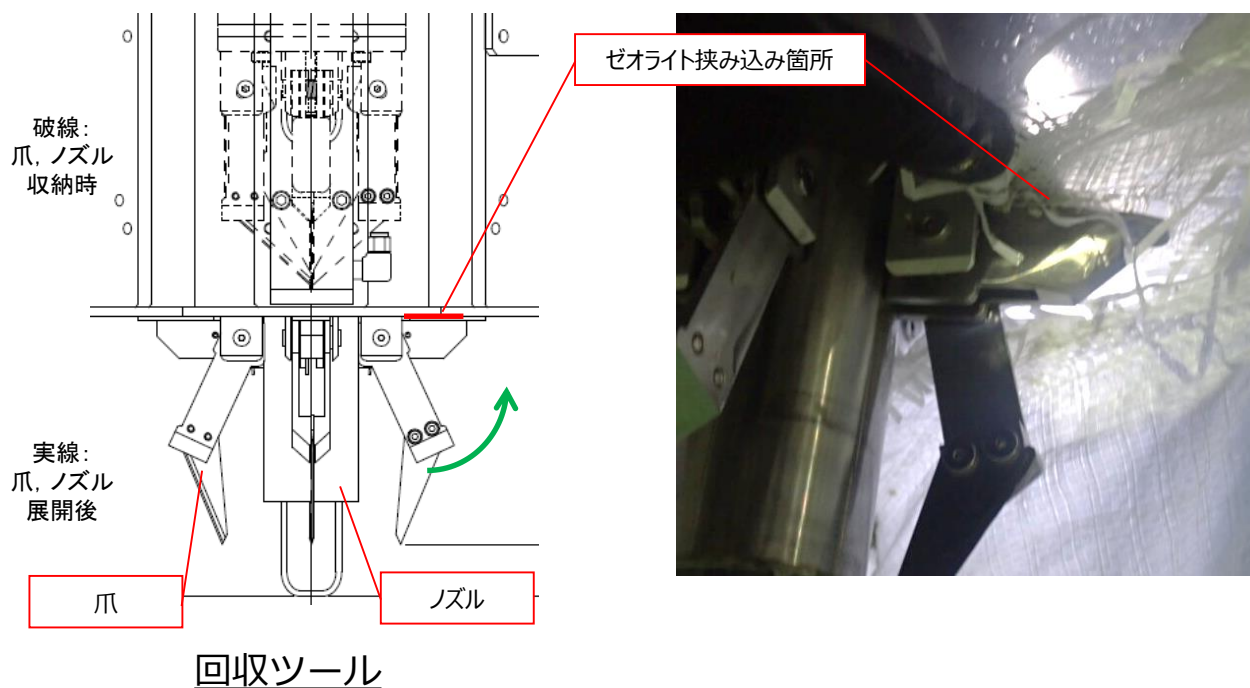


試験	ROV航走
事象	ケーブルガイドにケーブルをかけてROVを後退させたところ、ケーブル余長が外周側に膨らみ、ケーブルガイドが移動した。
原因	ケーブルガイドは固定しておらず、ケーブル余長が想定よりも外周側に広がるため、ケーブルガイドを外側に動かす力が働いた。
対応方針	ROVの動きに合わせてケーブルを巻き上げることで、ガイドを動かす方向の力がかからないようにする。 ケーブルガイドなしの航走を実施し、ケーブルガイドの有用性を再度確認し、ケーブルガイドの要否について再度検討する。 また、2台のROVケーブル間の摩擦で動きにくくなる可能性があるため、適切なケーブル構成を検討する。

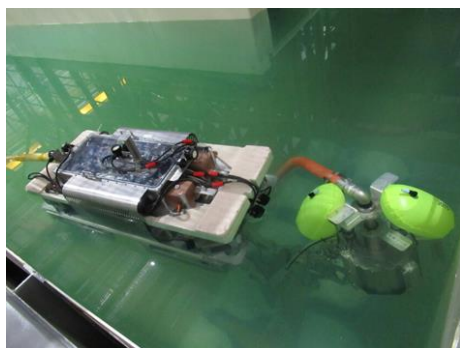


ケーブルガイドを用いたROV航走の概要

試験	回収機能
事象	ゼオライト回収後、回収ツールのノズルを上昇しようとしたところ、上昇しなかった。
原因	回収ツールの爪にゼオライトが噛みこんでおり、ノズルの上昇を妨げたこと。
対応方針	回収ツール構造の見直し



試験	回収機能
事象	<ul style="list-style-type: none"> ・ゼオライト回収時に濁度上昇が発生し、土嚢袋を切断する際に、濁水環境内でカメラでの監視ができなかった。 ・ソナーを用い、前方の壁や干渉物については確認が容易であったが、土嚢袋の判別は困難であった。
原因	<ul style="list-style-type: none"> ・濁水が発生しにくいように、部分的に土嚢袋を切断しゼオライト吸引を進める手法にて検討を進めているものの、土嚢袋切断時のわずかな動きでゼオライトの微粉末が拡散すること。 ・今回選定したソナーについては、土嚢袋など表面が柔らかい対象物は音波の反射が弱い可能性があること。
対応方針	<ul style="list-style-type: none"> ・濁水の低減可否，濁水拡散の低減方法について，引き続き検討を進める。 ・耐放射線性を考慮の上，ソナー等，カメラ以外の確認方法についても検討を進める。



ゼオライト回収作業前



ゼオライト回収作業後（濁度上昇）



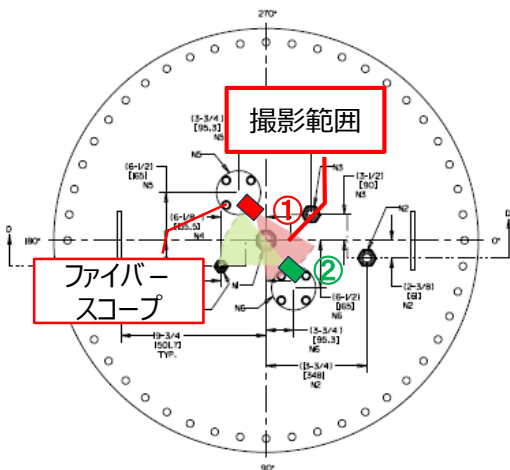
前方に物体があることのみ確認可能

障害物

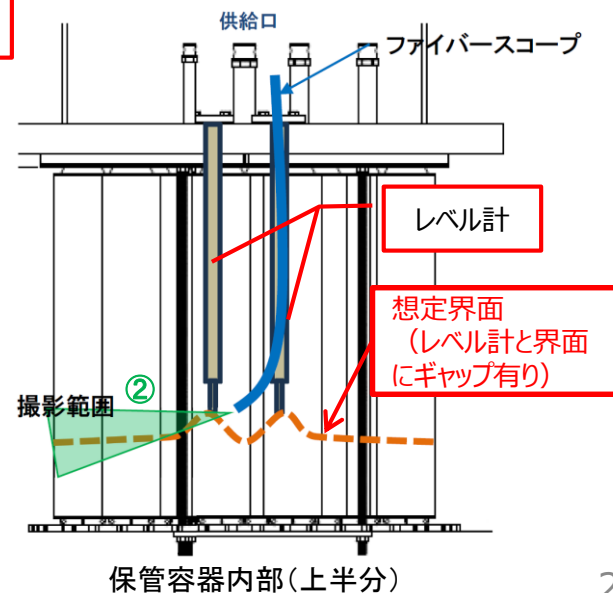
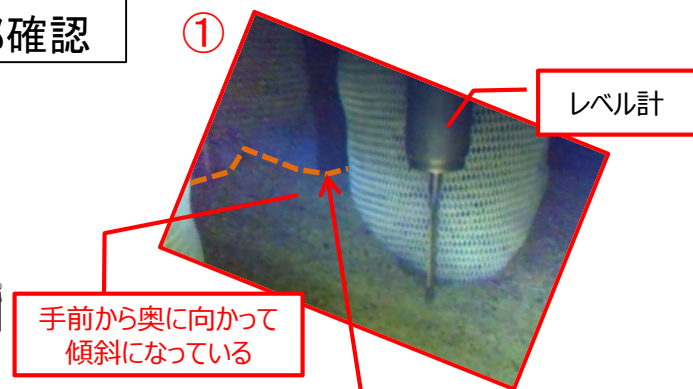
ソナーの確認結果

試験	レベル計検知
事象	ゼオライトを保管容器へ充填する際、レベル計の検知ランプが点滅を繰り返した。検知ランプの点灯が安定したところで移送を終了したが、その後ランプが消灯した。
原因	<ul style="list-style-type: none"> ・ゼオライト界面がレベル計の検知プローブ近傍まで上昇した際、ゼオライトの舞い上がりによる濃度が高くなり、検知ON・OFFが繰り返されたことと推定 ・ゼオライト界面が検知プローブに触れて一度は検知したものの、入口からの水流によりすぐに界面が崩れ、検知プローブとゼオライトが接触していない状態となった状況が繰り返されたことと推定
対応方針	ゼオライトの充填終了間際の界面状態とレベル計の関係を明らかとするため、追加試験の実施を検討中。本事象は界面がレベル計に近づいたときに発生するものと考えられるため、この事象を考慮したレベル計の設置高さとして等々の対策を検討。

ファイバースコープでの内部確認



保管容器上部



保管容器内部（上半分）