JAEA-Research
2009-044

JAEA-Research

地層処分実規模設備整備事業における工学技術に関する研究

－平成 20 年度成果報告－
（共同研究）

Research on Engineering Technology in the Full-scale Demonstration of EBS and Operation Technology for HLW Disposal
- Research Report in 2008 -
(Joint Research)

中司 昇　畑中 耕一郎　佐藤 治夫　杉田 裕
中山 雅　宮原 重憲　朝野 英一　斉藤 雅彦
須山 泰宏　林 秀郎　本田 ゆう子　菱岡 宗介

Noboru NAKATUKA, Koichiro HATANAKA, Haruo SATO, Yutaka SUGITA
Masashi NAKAYAMA, Shigenori MIYAHARA, Hidekazu ASANO, Masahiko SAITO
Yasuhiro SUYAMA, Hidero HAYASHI, Yuko HONDA and Sousuke HISHIOKA

地層処分研究開発部門
幌延深地層研究ユニット

Horonobe Underground Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate

January 2010

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（http://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構　研究技術情報部　研究技術情報課
〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

地層処分実規模設備整備事業における工学技術に関する研究
—平成 20 年度成果報告—
（共同研究）

日本原子力研究開発機構　地層処分研究開発部門　幌延深地層研究ユニット

中司　昇、畑中　耕一郎、佐藤　治夫、杉田　裕、中山　雅、宮原　重憲※、朝野　英一*、
斉藤　雅彦*、須山　泰宏*、林　秀郎*、本田　ゆう子*、菱岡　宗介*

(2009 年 11 月 9 日受理)

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）と原子力環境整備促進・資金管理センター（以下、原環センター）は、「放射性廃棄物の処理、処分等の研究開発に関する協力協定書」（以下「協定書」という）を締結し、高レベル放射性廃棄物地層処分の研究ならびに技術開発を進めている。

現在、原子力機構は、北海道幌延町において幌延深地層研究計画を進めており、地層科学研究および地層処分研究開発を実施している。一方、国は深地層の研究施設等を活用して、国民全般の高レベル放射性廃棄物地層処分への理解促進を目的として、実規模・実物を基本とした（実際の放射性廃棄物は使用しない）地層処分概念とその工学的な実現性や人工バリアの長期挙動までを実感・体感できる地上設備と深地層研究施設等における地下設備の整備事業である「地層処分実規模設備整備事業」を平成 20 年度から公募事業として進めており、平成 20 年度は原環センターが受注した。

原子力機構と原環センターは、上記の協定書に基づき、「地層処分実規模設備整備事業」を共同で実施するために、「地層処分実規模設備整備事業における工学技術に関する研究」について、共同研究契約を締結した。本共同研究は、「地層処分実規模設備整備事業」における設備整備のための工学技術に関する研究（調査、設計、製作、解析等）を共同で実施するものである。なお、本共同研究は深地層研究所（仮称）計画（平成 10 年 10 月、核燃料サイクル開発機構）に含まれる地層処分研究開発のうち、処分システムの設計・施工技術の開発や安全評価手法の信頼性確認のための研究開発の一環として実施する。

また、この共同研究にかかる施設・設備（土地、地下施設および電気設備、給排水設備、換気設備等の付帯設備）の共用に関し、原子力機構幌延深地層研究センターと原環センターにおいて、「施設・設備の共用に係る覚書」（以下「覚書」という）を締結した。

本報告は、上記の共同研究契約および覚書に関わる平成 20 年度の成果についてまとめたものである。具体的成果としては、当該事業の全体計画を策定するとともに、ブロック方式での緩衝材定置試験設備の一部を製作した。また、幌延深地層研究センターの敷地内において、仮設建屋を建設し、実物大の緩衝材ブロックおよびオーバーパックの展示を開始した。

本研究は、日本原子力研究開発機構と（財）原子力環境整備促進・資金管理センターとの共同研究に基づいて実施したものであり、（財）原子力環境整備促進・資金管理センターが実施した、経済産業省資源エネルギー庁受託「地層処分実規模設備整備事業」の研究成果を使用し、取りまとめたものである。

幌延深地層研究センター（駐在）：〒098-3224　北海道天塩郡幌延町北進 432-2

※ 技術開発協力員

* （財）原子力環境整備促進・資金管理センター

Research on Engineering Technology in the Full-scale Demonstration of EBS and Operation Technology for HLW Disposal —Research Report in 2008— (Joint Research)

Noboru NAKATUKA, Koichiro HATANAKA, Haruo SATO, Yutaka SUGITA, Masashi NAKAYAMA, Shigenori MIYAHARA※, Hidekazu ASANO*, Masahiko SAITO*, Yasuhiro SUYAMA*, Hidero HAYASHI*, Yuko HONDA*, and Sousuke HISHIOKA*

Horonobe Underground Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

(Received November 9, 2009)

Japan Atomic Energy Agency (JAEA) and Radioactive Waste Management Funding and Research Center (RWMC) concluded the letter of cooperation agreement on the research and development of radioactive waste disposal in April, 2005, and has carried out the collaboration work described above based on the agreement with RWMC.

JAEA has carried out the Horonobe Underground Research Laboratory (URL) Project which is intended for sedimentary rock in the Horonobe town, Hokkaido, since 2001, and the Horonobe URL Project includes geoscientific research and research and development on geological disposal technology. Therefore, JAEA carried out this collaboration work as part of the Horonobe URL Project.

RWMC carried out an investigation for full-scale demonstration of engineered barrier system and operation technology for high-level radioactive waste disposal, under the contract with the Agency for Natural Resources and Energy, Ministry of Economy, Trade and Industry. The investigation aims to promote public's understanding of the geological disposal. This work includes the full-scale demonstration of operation technology in the horizontal drifts of the Horonobe URL.

This report summarizes the results of engineering technology carried out in this collaboration work.

In fiscal year 2008 (2008/2009), the overall plan of this collaboration work was settled on and a part of the equipments for transportation of engineered barrier was produced. In addition, it was begun the exhibition of full-scale buffer material block (bentonite) and overpack.

Keywords: Horonobe URL Project, RWMC, Geological Disposal Technology, Engineered Barrier System, Demonstration, Public Acceptance

---

This work has been performed in JAEA as a joint research with RWMC, and includes the results which carried out by RWMC under the contract with the Agency for Natural Resources and Energy, Ministry of Economy, Trade and Industry.

※ Collaborating Engineer
* Radioactive Waste Management Funding and Research Center

目次

1 概要 1
1.1 共同研究の背景 1
1.2 目的 1
1.3 全体構想 1
1.4 実施体制 1
2 実施内容 3
2.1 全体計画の立案 3
2.2 外部専門家からの意見収集 5
2.3 スケジュールの設定 5
2.4 地上での設備と試験の検討 5
2.5 地下での設備と試験の検討 14
参考文献 53

Contents

1 Outline 1
1.1 Introduction 1
1.2 Objective 1
1.3 Whole Idea 1
1.4 Roles 1
2 Investigation 3
2.1 Making of overall plan 3
2.2 Advice from outside experts 5
2.3 Schedule of the project 5
2.4 Investigation of demonstration equipments and experiments on surface 5
2.5 Investigation of demonstration equipments and experiments in URL 14
Reference 53

表目次

表 1-1　共同研究分担一覧表 2
表 1-2　地層処分実規模設備整備事業検討委員会の開催実績 2
表 2-1　理念と方策 19
表 2-2　展示企画と展示ゾーンの計画表 21
表 2-3　スケジュール 23
表 2-4　軽量化検討結果 23
表 2-5　再冠水挙動試験設備(地上、地下)の概念から導かれる実規模可視化設備の設計概念フロー 25

図目次

図 2-1　設備の建屋の配置図 27
図 2-2　設備の建屋内部のイメージ 27
図 2-3　設備の建屋の平面 28
図 2-4　設備の建屋の断面 28
図 2-5　仮設の建屋の平面図・断面図 29
図 2-6　来館者の身長・目線とオーバーパック 29
図 2-7　オーバーパック・カットモデル（イメージ） 30
図 2-8　オーバーパック・カットモデル（写真） 30
図 2-9　オーバーパック・単体（イメージ） 31
図 2-10　オーバーパック・単体（写真） 31
図 2-11　緩衝材の展示イメージ（写真） 32
図 2-12　オーバーパック定置装置概念図 33
図 2-13　ブロック方式緩衝材定置試験設備概念図 35
図 2-14　ブロック方式定置技術詳細設計結果 37
図 2-15　ブロック方式定置装置一部製作状況 39
図 2-16　原位置締固め装置の３次元イメージ（側部） 39
図 2-17　ペレット充填方式定置技術試験設備概念設計図 41
図 2-18　PEM 定置装置全体概念図 43
図 2-19　PEM 定置概念フロー 45
図 2-20　可視化設備イメージ 47
図 2-21　注水層の構成概念 47
図 2-22　計測機器の断面配置（案） 48
図 2-23　地上での人工バリア長期挙動試験設備の全体構成のイメージ 48
図 2-24　緩衝材の回収試験設備概念図 49
図 2-25　回収技術試験設備の試験手順概念図 50
図 2-26　オーバーパックの腐食試験概念図 51
図 2-27　地下での再冠水挙動試験設備の概念図 52

1　概要

1.1　共同研究の背景

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）と(財)原子力環境整備促進・資金管理センター（以下、原環センター）は、「放射性廃棄物の処理・処分等の研究開発に関する協力協定」を締結し、高レベル放射性廃棄物地層処分の研究並びに技術開発を進めている。

現在、原子力機構は、北海道幌延町において堆積岩の地質環境を対象として、深地層の研究施設を利用した幌延深地層研究計画を進めており、地層科学研究及び地層処分研究開発を実施している。一方、国は、深地層の研究施設等を活用して、国民全般の高レベル放射性廃棄物地層処分への理解促進を目的として、実規模・実物を基本とした（実際の放射性廃棄物は使用しない）地層処分概念とその工学的な実現性や人工バリアの長期挙動までを実感・体感できる地上設備と深地層研究施設等における地下設備の整備事業である「地層処分実規模設備整備事業」を平成 20 年度から公募事業として進めており、平成 20 年度は原環センターが受注した。

本共同研究は、国民が最終処分の概念や安全性を体感できる設備として、国民の理解の促進に活用することを目的とした地層処分実規模設備整備事業における設備整備のための工学技術に関する研究（調査、設計、製作、解析等）を共同で実施するためのものである。なお、本共同研究は、深地層研究所（仮称）計画[1)]に含まれる地層処分研究開発のうち、処分システムの設計・施工技術の開発や安全評価手法の信頼性確認のための研究開発の一環として行う。

1.2　目的

地層処分の概念や安全性について国民の理解促進に資することを目的とした体感設備を整備し、人工バリアの搬送・定置に係る操業技術や長期挙動等の工学技術に関する研究（調査、設計、製作、解析等を実施する。

1.3　全体構想

国の行う、地層処分実規模設備整備事業では、以下のことを計画している。

- 「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第２次取りまとめ」（以下、第２次取りまとめ）[2~5)]や、原子力発電環境整備機構（原環機構、以下、NUMO）の公募資料等に示された、我が国の高レベル放射性廃棄物地層処分の概念（多重バリアシステム)、人工バリア材料や処分場の操業に関わる工学的技術等について、実規模・実物を基本とした設備（実際の放射性廃棄物は使用しない）を整備することにより、地層処分概念とその工学的な実現性、および人工バリア材料の長期挙動等を実感・理解できる設備を設置する。地上と地下における実規模設備を整備し、これらの設備を用いて工学技術と長期挙動を実証し、その状況を実際に見て体感できるようにする。
- 人工バリアシステムやその材料については実材料に基づく実規模相当品を提示し、工学技術の実現性として、操業技術、回収技術等を対象とし活用することによりその状況と成果を提示する。
- 数年間に渡り地上から地下へと展開し、順次整備を進める。

1.4　実施体制

表 1-1 に平成 20 年度の共同研究における原子力機構と原環センターの研究分担を示す。また、外部意見収集のために「地層処分実規模設備整備事業検討委員会」（委員 7 名）を設け、2.1 で

述べる全体計画に対して様々な観点からの意見を収集した。検討委員会の開催実績を表 1-2 に示す。

表 1-1　共同研究分担一覧表

研究項目	原子力機構	原環センター
＜地上での実証設備の整備＞		
○海外事例の調査		◎
○操業技術実証設備		
・実証計画立案	◎	◎
・実証設備概念設計・詳細設計	○	◎
・製作、設置		◎
○人工バリア長期挙動実証設備		
・実証計画立案	◎	◎
・実証設備概念設計	○	◎
・挙動解析	◎	◎
＜地下での実証設備の整備＞		
○海外事例の調査		◎
○実証坑道		
・幌延地下施設建設計画の調査	◎	○
・実証坑道整備方法検討	◎	○
○操業技術実証設備		
・実証計画立案	◎	◎
・実証設備概念設計	○	◎
○回収技術実証設備		
・実証計画立案	◎	◎
・実証設備概念設計	○	◎
○人工バリア長期挙動実証設備		
・実証計画立案	◎	◎
・実証設備概念設計	○	◎
○報告書の作成	○	◎

表 1-2　地層処分実規模設備整備事業検討委員会の開催実績

期日	場所	内容
平成 21 年 1 月 21 日	航空会館　801 会議室	第一回委員会 ・主査の選任 ・全体計画のレビュー

2　実施内容

2.1　全体計画の立案

全体計画の立案では、海外の事例の調査を行い、それを参考に、「2.4 地上での設備と試験」および「2.5　地下での設備と試験」としての展示方法、試験方法、試験設備等について検討し、最終的に全体計画として設備と試験を整備する対象を絞り込んだ。なお、本検討結果は、今後行う設備の詳細設計や実施の過程で仕様などの見直しを行う可能性がある。

2.1.1 海外事例の調査

試験設備の全体計画の立案に資するため、DBE（ドイツ）、ANDRA（フランス）、SKB（スウェーデン）等、海外機関での類似した試験設備の整備状況等の事例調査を行った。

各国ごとに、PR 館などでの展示状況、試験設備の実績やその内容、および、人工バリアの長期挙動試験設備などの整備状況を調査した。

(1) 調査目的

全体計画の立案に向けた参考情報とするために、人工バリア搬送・定置技術および処分技術の展示方法、人工バリアの長期挙動試験などについて情報収集を実施した。

(2) 調査対象

主な調査対象を下記に示す。

- フランスの調査結果
- ドイツの調査結果
- スウェーデンの調査結果
- ESDRED（EC 国際共同プロジェクト）の調査結果

(3) 調査項目

調査項目を下記に示す。

- 処分概念
- 地下研究所の概要
- 人工バリアの展示
- オーバーパックの定置試験
- 緩衝材定置および回収に関する試験
- オーバーパックの腐食試験
- 再冠水試験

2.1.2 地上での設備と試験の計画

「2.4 地上での設備と試験」の検討結果を踏まえて、以下の項目を今後の本事業の実施対象として絞り込み、地上での設備と試験の計画の立案を行った。

- 建屋
- 人工バリア
- ブロック方式緩衝材定置試験
- 人工バリア長期挙動試験

(1) 設備の建屋の計画

人工バリア、各種の試験設備の設置、運転および試験状況の見学等が可能な設備の建屋の設計を行った。また、設備の建屋自体が人に訴求力を持ったものであるべきという考えに基づき、設計を行った。

展示する技術については、地層処分の事業段階に留意した上で「実証」を位置づけ、設備

の建屋の要件を検討した。具体的には、研究活動をそのまま見せることで、研究の真摯さ・誠実さを伝えるとともに、工学的実現性を示す設備の建屋について検討した。また、現段階までの進捗を提示し、トレース可能とすることで透明性を確保するとともに、設備と試験の陳腐化を防止に向けて検討を実施した。

また、隣接する原子力機構の PR 施設「ゆめ地創館」との役割分担を明確にし、相互に補完することで全体としての訴求効果をあげるとともに、後続する地下での設備と試験への展開にも計画的な配慮を含めて、設備の建屋の要件を検討した。具体的には、ゆめ地創館と外観上の統一感を確保するとともに、全体概要の展示を行うゆめ地創館との機能分担について検討を行う一方、説明の首尾一貫性に配慮した。また、包括的な概論説明と最新の実践の状況という位置付けにより展示を区別し、多面的・多角的な理解を推進できる設計・整備計画を検討した。設備の建屋の配置を図 2-1 に示す。また、設備の建屋内部のイメージを図 2-2 に示す。

1) 事業の目的・理念と試験の方策

本事業の理念の理解、具体的な実証試験の方策の整理と策定および設備の建屋の要件のうち、事業の目的・理念と試験の方策について検討した結果を表 2-1 に示す。

2) 展示企画と展示ゾーンの計画

本事業の理念の理解、具体的な実証試験の方策の整理と策定および設備の建屋の要件のうち、展示企画と展示ゾーンの計画について検討した結果を表 2-2 に示す。

3) 各展示コンセプト・展示内容

本事業の理念の理解、具体的な実証試験の方策の整理と策定および設備の建屋の要件のうち、各展示コンセプト・展示内容について検討した。

(2) 人工バリアの計画

「2.4 地上での設備と試験の検討」のうち、「2.4.2 人工バリアの検討」での検討結果を踏まえて、処分概念に基づく人工バリアシステムの実規模・実物の展示物の製作を行った。ガラス固化体、キャニスター、オーバーパック、緩衝材のバリア構成を理解出来るように組み合わせた。

(3) 定置試験や人工バリア長期挙動試験の計画

「2.4 地上での設備と試験の検討」のうち、「2.4.3 (2) 緩衝材定置試験」での検討結果を踏まえて、定置試験としては、ブロック方式緩衝材定置試験、原位置締め固め方式緩衝材試験、ペレット方式緩衝材定置試験、PEM [注1)]方式定置試験の 4 方式の定置試験の中からブロック方式緩衝材定置試験を選定した。ブロック方式緩衝材定置試験を選定した理由は、緩衝材の形状と定置概念の技術的な比較を行った場合、他の緩衝材定置技術と比較して、実規模、緩衝材の高密度製作および定置技術に実績が有るためである。さらに、竪置き方式と横置き方式の 2 方式を比較した場合、竪置き方式は技術的信頼性が高く、かつ、人工バリアの基本概念として、竪置きのブロック方式緩衝材定置が第２次取りまとめ [2, 4)]において、レファレンスケースとして提示されており、技術的に見通しが示されているためである。

また、人工バリアの定置試験において、ブロック方式緩衝材定置試験を選定した理由は、処分孔に人工バリアを構築する場合、オーバーパック 1 体の定置は処分孔に 1 回定置作業をすることに対して、ブロック方式緩衝材の定置は厚さ約 350mm のブロック方式緩衝材を処分孔内に繰り返し定置して積み重ねて人工バリアシステムを構築する必要があり、人工バリアシステムを具体的に完成させるために重要な技術であることによる。

以上のことから、竪置き方式等の所定の処分概念に基づく人工バリアシステムを対象に、

注1) PEM：Pre-fabricated EBS（Engineered Barrier System） Module

ブロック方式緩衝材定置試験設備の詳細設計を行った。

2.1.3 地下での設備と試験の計画

「2.5　地下での設備と試験」の検討結果を踏まえて、以下の項目を今後の実施対象として絞り込み、地下における設備と試験の計画の立案を行った。

- 緩衝材の回収試験
- オーバーパックの腐食試験

2.2　外部専門家からの意見収集

外部の専門家・有識者等から、計画、実施方法、結果の評価等に関する意見、コメント等を収集し、実務に反映した。

2.3　スケジュールの設定

現状で想定される地下施設の建設工程や設備の整備の見通しなどを踏まえ、本計画の実施スケジュールを表 2-3 のように設定した。

2.4　地上での設備と試験の検討

地上での設備と試験では、設備の建屋の設計、人工バリアの概念設計、および定置試験や人工バリア長期挙動試験の概念設計を幅広く行った。

2.4.1 設備の建屋の設計

実証を効果的に行うため、本計画の理念をよく理解し、これを実現するための具体的な方策を整理、策定し、これらに沿った設備の建屋の要件を検討した。具体的には、「高レベル放射性廃棄物地層処分への国民全般の理解を深めること」を目的として、既往事例や類似事例、試験の研究開発動向、海外事例等の調査や分析などから、「いつ」、「どこで」、「誰に」、「何を」、「どのように」と言った設備を用いて行う試験の方策（理念と実施方法）について策定した。さらに、策定した方策に沿って、各設備等の設計方針や設備の建屋の要件を検討した。

(1) 設備の建屋の設計

設備の建屋を平成 21 年度当初より建設に着手することが可能なように、設備の建屋に対する、建設地調査、造成計画、設備の建屋詳細設計を行い、建築確認申請書類を作成し、提出した。設備の建屋の概要を以下に示す。また、概略図を図 2-3 および図 2-4 に示す。

- 地名地番：北海道天塩郡幌延町北進 432-2
  （日本原子力研究開発機構　幌延深地層研究センター　敷地内）
- 階数：地上 2 階、地下 1 階
- 構造：鉄骨造（一部、鉄筋コンクリート造）
- 敷地面積：約 26,500 m^2
- 延べ面積：約 530 m^2
- 建築面積：約 440 m^2
- 建築物高：約 8.2 m

(2) 仮設の建屋の設計

平成 21 年度の建屋建設に先立って、仮設の建屋にて一部展示を公開するため平成 20 年度に建設地調査、造成計画、建屋詳細設計等を実施した。仮設の建屋の概要を以下に示す。また、平面図・断面図を図 2-5 に示す。なお、仮設の建屋は平成 21 年 3 月に設置した。

・ 地名地番：北海道天塩郡幌延町北進 432-2
（日本原子力研究開発機構　幌延深地層研究センター　敷地内）
・ 階数：地上 1 階
・ 構造：プレハブ造
・ 敷地面積：約 26,500 m²
・ 延べ面積：約 40 m²
・ 建築面積：約 40 m²
・ 建築物高：約 3.9 m

2.4.2 人工バリアの検討

海外調査の結果に基づいて、人工バリアの構成要素であるオーバーパックと緩衝材の実規模・実物の展示方法の検討を幅広く行った。

(1) オーバーパック

オーバーパックは、実規模・実物を基本として検討した。オーバーパックの概念設計については、平成 19 年度地層処分技術調査等委託費（高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム工学要素技術高度化開発）－遠隔操作技術高度化－[6]の成果等を参考にした。

1) オーバーパックの展示方法

オーバーパックについては、ガラス固化体（模造品）や緩衝材と組み合わせて人工バリアシステムとして展示するオーバーパックと単体で展示するオーバーパックの 2 体を準備する。人工バリアシステムとして展示するオーバーパックは、内部のガラス固化体の収納状況が来館者に見えるようにカットモデルとした。

カット面については、190mm ある炭素鋼の厚み、および、ガラス固化体の収納状況を来館者へ見せるためのものであり、カット面の位置は想定する来館者に基づき設定する必要がある。図 2-6 に年齢等に応じた来館者の目線・身長とオーバーパックの大きさを比較したものを示す。これから、低学年の子供に対しても、カット面が見えるような位置にすることとした。

2) オーバーパックの設計

オーバーパックはオーバーパック・単体とオーバーパック・カットモデルの 2 体を製作した。オーバーパックの仕様を以下に示す。

①蓋形状：落とし蓋形式
②材質：炭素鋼（鍛造品）
③寸法：外形φ820 × 内径φ440 × t190 mm
④重量：約 5.7 ton
⑤溶接：TIG 溶接

a. オーバーパック・カットモデル

オーバーパック・カットモデルの外観図を図 2-7 に、また、その写真を図 2-8 に示す。

カット面は、上部中心から垂直の面と底面より 800mm 高さより 30° の角度の面の 2 つの面とした。垂直のカット面では、オーバーパック胴体と上蓋の 190mm の溶接部断面が見えるようにした。

b. オーバーパック・単体

オーバーパック・単体の外観図を図 2-9 に、また、その写真を図 2-10 に示す。上蓋は、溶接しないこととし、展示では蓋を取り外して溶接開先面が見えるようにした。

(2) 緩衝材

緩衝材はブロック方式緩衝材の実規模・実物を基本として検討した。ブロック方式緩衝材の

概念設計については、平成 19 年度地層処分技術調査等委託費（高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム工学要素技術高度化開発）－遠隔操作技術高度化－[6]の成果等を参考にした。

1) 緩衝材の展示方法

緩衝材は人工バリアの構成が来館者に分かるように、オーバーパック・カットモデルと組み合わせて展示する。そのため、設備の建屋では、緩衝材とオーバーパックを展示する形状を複数検討し、それぞれの展示形状の特徴をまとめた。また、仮設の建屋では、図 2-11 に示すように、緩衝材を 2～3 段積み上げた形状とし、オーバーパック・カットモデルを中央に配置し、人工バリアの構成が分かるように展示した。

2) 緩衝材の設計

緩衝材は 1/8 分割ブロック方式緩衝材を 8 個組み合わせてリング状にしたものを真空パットで 1 リングずつ、千鳥に積み重ねて定置する。オーバーパックの上下は円形ブロック方式緩衝材を定置する。ブロック方式緩衝材の仕様を以下に示す。

①ベントナイト：クニミネ工業（株）製のクニゲル V1
②ケイ砂：瓢屋製 7 号ケイ砂
③混合比：ベントナイト：ケイ砂＝7：3（重量比）
④成型密度：乾燥密度として 1.8 Mg / m^3 以上
⑤形状・寸法：ブロックの形状・寸法については以下を参照(φ：直径、t：厚さ)

a. 1/8 分割ブロック方式緩衝材

①ブロック形状：1/8 分割ブロック
②ブロック寸法

- 設計寸法：外形φ2,260×内径φ860 × t 260、t 300、t 350 mm の 3 種類
- 製作寸法：外形約φ2,275 × 内径約φ870 × t 寸法は上記設計寸法に対して- 0, + 5 mm

③ブロック重量：t 260 mm＝222 kg / 個×8 個＝1,776 kg
t 300 mm＝256 kg / 個×8 個＝2,048 kg
t 350 mm＝299 kg / 個×8 個＝2,392 kg

b. 円形ブロック方式緩衝材

①ブロック形状：円形ブロック
②ブロック寸法：$\phi 860^{-0,+5}$ × t 260、t 300、t 350 mm の 3 種類
③ブロック重量：t 260 mm＝301 kg / 個
t 300 mm＝347 kg / 個
t 350 mm＝405 kg / 個

2.4.3 定置試験や人工バリア長期挙動試験の検討

海外調査の結果に基づいて、設備の建屋で行う試験として、定置試験および人工バリア長期挙動試験の概念設計を幅広く行った。定置試験はオーバーパック定置試験と緩衝材定置試験に分けて検討した。

(1) オーバーパック定置試験

地上のオーバーパック定置試験設備としては、竪置き定置方式の概念設計を実施するとともに、試験・評価項目を抽出した。

地上での設備と試験による工程としては、処分孔への搬送と定置の一連のプロセスに限定されるものと想定される。オーバーパック定置設備の概念設計としては、以下を実施する。

①オーバーパックを搬送、把持・昇降可能な装置の仕様検討、強度評価
②把持、昇降用アクチュエータの仕様検討と選定。
③走行駆動に関する仕様検討。なお、走行方式に関しては、レール走行方式とする。
④装置概念図の作成、空間余裕度の評価。

1) 試験の目的

オーバーパック定置試験では、地層処分概念とその工学的実現性の実証に向け、第２次取りまとめ [4]における処分概念に基づく人工バリアシステムを対象に、平成 12 年度高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査－遠隔操作技術高度化調査－[7]、および、平成 17 年度地層処分技術調査等－遠隔操作技術高度化調査－[8]の成果等を参考とし、地層処分を実現するための工学技術（オーバーパック定置技術）の信頼性（安心感）を国民に伝え、実規模オーバーパックを遠隔搬送し、所定の位置（処分孔）に定置することが可能であること実証することを目的とする。

2) 試験装置の概要

オーバーパック定置試験設備は、レール上を走行する形式とし、走行駆動用インバータモータと吊り上げ用インバータモータを保有する。装置内部にオーバーパックを保持しており、遠隔制御によりレール上を走行し、処分孔の真上で停止して、オーバーパックを処分孔内へ垂直に定置し、またレール上を元へ戻る。本検討では、装置設計を実施した。当初は外形寸法、重量を実機に近付けるため、遮へい体重量を考慮した車両フレーム設計としていたが装置重量が 48ton（オーバーパックを含めると 54ton）と重くなるため、軽量化についても検討した。

検討結果の概要を以下に示す。なお、本検討による装置重量は概算重量であり、１割程度の割増しを見込んだ安全側の検討としている。

- 表 2-4 に示す検討ケースを図 2-12 に示す。
- 重量低減効果としては、フレームの断面剛性を実機遮へい重量を考慮しないものに見直すことによるものが大きい。
- Case-2 と Case-3 を比較すると、X 軸方向位置決めフレームを省略しても、重量低減効果はそれほど大きくない。これは、フレームに搭載するモーター等の重量が同じであるため、下部フレームおよび Y 軸方向位置決めフレームの断面サイズを上げる必要があるためである。
- Case-3 とすれば、原案から 2 割程度の重量低減が可能であるが、個別協議の結果、X 軸方向位置決めフレームの省略までは実施しない Case-2 にて設計を進めている。

3) 試験項目

a. オーバーパックの把持、定置試験

①必要把持力
②外力に対する把持性能
③定置位置検出方法
④遠隔制御

b. 走行性能確認試験

①レール走行性
②走行位置検出方法
③遠隔制御

(2) 緩衝材定置試験

地上の緩衝材定置試験としては、緩衝材だけを取り扱ったブロック方式緩衝材定置試験、

原位置締め固め方式緩衝材試験、およびペレット方式緩衝材充てん試験の 3 項目と、オーバーパックと緩衝材を一体化した PEM を定置する PEM 方式定置試験について幅広く検討した。なお、ブロック方式緩衝材定置試験において、ブロック定置後に生じるオーバーパックと緩衝材、緩衝材と岩盤の間の隙間を緩衝材で埋めるための緩衝材隙間充てん試験についてもあわせて検討した。

1) 試験の目的

緩衝材定置試験では、地層処分概念とその工学的実現性の実証に向け、第 2 次取りまとめ [4]における処分概念に基づく人工バリアシステムを対象に、平成 12 年度～平成 13 年度高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査－遠隔操作技術高度化調査－[7、9]、および、平成 14 年度～平成 18 年度地層処分技術調査等－遠隔操作技術高度化調査－[8、10~13]の成果等を参考とし、地層処分を実現するための工学技術（緩衝材定置技術）の信頼性（安心感）を国民に伝え、実規模緩衝材を遠隔搬送し、所定の位置に定置することが可能であること立証することを目的とする。

2) ブロック方式緩衝材定置試験

ブロック方式緩衝材定置試験はブロック定置試験と緩衝材隙間充てん試験よりなる。

ブロック方式緩衝材定置試験としては、平成 12 年度～平成 13 年度高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査－遠隔操作技術高度化調査－[7、9]、および、平成 14 年度～平成 18 年度地層処分技術調査等－遠隔操作技術高度化調査－[8、10~13]を参考に、竪置きブロック方式緩衝材定置装置の概念設計および詳細設計を実施するとともに、試験・評価項目を抽出した。

緩衝材隙間充てん試験としては、竪置きブロック方式緩衝材の人工バリア構築の過程において、オーバーパック定置後に生じるオーバーパックとブロック方式緩衝材内壁との隙間および、ブロック方式緩衝材定置後に生じるブロック方式緩衝材と処分孔との隙間にベントナイトペレット方式緩衝材を充てんする試験により、隙間充てんの有効性の確認と設計データを取得するために、試験装置の概念設計を実施するとともに試験・評価項目を抽出した。

a. 試験装置の概要

緩衝材定置試験設備の概念を図 2-13 に示す。ブロック方式緩衝材定置試験設備は、レール上を走行する形式としブロック方式緩衝材定置試験設備は、定置装置のけん引および制御を行う「坑道内走行装置」、ブロック方式緩衝材を処分孔に定置する「緩衝材定置装置」、処分孔 1 体分のブロック方式緩衝材を搭載する「緩衝材搭載装置」で構成する。

ブロック方式緩衝材定置試験設備の概念設計は、本定置技術の主要機能である「緩衝材定置試験装置」について実施した。概念設計にあたっては、設備の建屋の仕様を考慮し、直線部のみの走行であることから、車輪数を減らして装置全長を短くした。さらに自走が可能なように駆動機構を装備した設計とした。詳細設計では、製作工程が多年度にわたることを考慮し、各年度内などの一定期間で効率的な設備製作が行えるよう、設備を構成する機器をモジュール化した設計とした（図 2-14 参照）。本年度は定置試験設備の一部である真空把持装置を製作した。製作状況を図 2-15 に示す。

緩衝材隙間充てん装置は、竪置きブロック方式緩衝材の人工バリア構築の過程において、オーバーパック定置後に生じるオーバーパックとブロック方式緩衝材内壁との隙間と、ブロック方式緩衝材定置後に生じる緩衝材と処分孔との隙間に、ベントナイトペレットを空気圧送方式（ラウンドブロー）にて充てんするものである。

b. 試験項目

【ブロック緩衝材定置試験】

①ブロック方式緩衝材の搬送
②ブロック方式緩衝材を緩衝材移送台車に搭載
③ブロック方式緩衝材定置試験装置を処分孔上に移動
④ブロック方式緩衝材定置試験装置の水平出し
⑤ブロック方式緩衝材移送台車を処分孔位置に移動
⑥真空把持装置でブロック方式緩衝材を把持
⑦ブロック方式緩衝材移送台車の移動
⑧ブロック方式緩衝材位置出し
⑨ブロック方式緩衝材定置
⑩①～⑦段目まで定置作業繰り返し
⑪オーバーパック定置（本設備の所掌外）
⑫⑧～⑬段目まで定置作業繰り返し

【緩衝材隙間充てん試験】
①充てん密度（目標密度 1.3 Mg / m^{3}以上）
②充てんに要する時間（施工時間）

3) 原位置締め固め方式緩衝材試験

原位置締め固め方式緩衝材試験としては、平成 13 年度高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査－遠隔操作技術高度化調査－[9]で締固め機械（重錘落下方式のプロトタイプ機）の検討、概念設計、プロトタイプ機の試作がなされ、実規模の模擬処分ピット（直径 2,360mm）での試験が実施されている。その結果として、適切なエネルギーの打撃（重錘落下）により、所定の密度（乾燥密度として 1.6 Mg/m^3 以上）の緩衝材を構築可能であること、内型枠を用いて施工することによりオーバーパックの定置空間を確保できること、などが確認されている。また、振動による周辺岩盤への影響をより正確に把握すること、内型枠のより確実な設置方法（固定方法）などが検討事項として示されている。

本検討では、竪置き原位置締め固め方式緩衝材試験装置の概念設計を実施するとともに、試験・評価項目を抽出した。

a. 試験装置の概要

原位置締め固め方式緩衝材試験設備は、締固め装置のコアとなる締め固め方法および内型枠について、既往の研究事例などを踏まえて検討を行った上で、装置全体の概念設計を実施した。締め固め装置については、今回の検討においては、これまでの検討実績を踏まえ、衝撃式・振動式を候補として考える方針とし、その他の静的圧縮、吹き付け方式、自由落下については補助的な方法として位置づけることとした。内型枠については、再利用型と使い捨て型があるが、これまでの研究開発における実績を考慮して、再利用型の内型枠を用いることを基本方針とする。

試験設備は、全面部締固め機械と側面部締固め機械が搭載されている。いずれの機械も、締固め部、（壁面への）固定部、昇降部から構成される。

締固め部には、打撃装置（油圧ハンマー＝油圧ブレーカ）が、全面部締固め機械には 3 台、側面部締固め機械には 2 台取り付けられている。油圧ハンマーを取り付けたフレームは、油圧シリンダにより上下させるとともに、油圧ハンマーを緩衝材に押しつけることができる機構となっている。締固め部と固定部の間には旋回ベアリングがあり、締固め部が回転できる構造となっている。締固め部の回転は、固定部のモーターにより行う。締固め部には、ならし板が取り付けられており、これを回転させて材料の敷き均しを行う。固定部では、グリップ装置が外周に配置され、これにより装置

は処分孔の壁面に固定される。材料の供給はバケットで受け取り、これを処分孔まで移動し、昇降させて行う。締め固め装置のイメージ図を図 2-16 に示す。

b. **試験項目**

①移動､位置決め
②締固め部分の固定
③材料供給(底部)
④敷き均し(底部)
⑤底部締固め､出来型の計測
⑥締固め機械の入れ替え
⑦内型枠の設置
⑧材料供給(側部)
⑧敷き均し(側部)
⑨側部締固め､出来型の計測
⑩内型枠の脱型
⑪オーバーパックの定置
⑫オーバーパック上部空間の埋戻し

4) **ペレット方式緩衝材充てん試験**

ペレット方式緩衝材充てん試験としては、粉粒状のベントナイト（ペレット）を処分坑道あるいは処分孔に充てんする定置概念で、緩衝材の定置精度に制約が少ない点、定置時の作業工程が少ない点等の利点がある。

平成 16 年度地層処分技術調査等－遠隔操作技術高度化調査－[12]では、ペレット方式緩衝材充てん方式について施工模擬試験を実施しており、特に横置き方式では模擬坑道を用いた充てん試験設備により、①スクリューコンベア方式による充てんの可能性、②充てん時の作業環境、③緩衝材としての品質（乾燥密度やその不均質性等）等についての評価を実施している。

本検討では、これらの結果を踏まえて、横置きペレット方式緩衝材充てん試験装置の概念設計を実施するとともに、試験・評価項目を抽出した。

a. **試験装置の概要**

ペレット方式緩衝材充てん装置は、横置き方式において、スクリューコンベア等のペレット搬送装置からなる。

ペレット方式緩衝材充てん試験設備の概念設計は、本定置試験設備の主要機能である、「ペレット方式緩衝材充てん装置」について実施した。あらかじめオーバーパックを定置した模擬処分坑道内に、アジテータ台車、コンベア台車を用いてペレット型緩衝材を充填する。概念設計検討結果を図 2-17 に示す。

b. **試験項目**

①負荷運転時の走行性および制動性
②ペレット方式緩衝材の充てん量の制御性
③ペレット方式緩衝材の充てん性

5) **PEM 方式定置試験**

PEM 方式定置装置試験としては、大型で重量物である PEM を坑道中で移動させ所定の位置に定置するための定置技術要素について試験により有効性を確認するとともに、実機装置に必要となる設計データを取得することを目指している。

本検討では、横置き PEM 方式定置試験装置の概念設計を実施するとともに、試験・評価

項目を抽出した。

a．**試験装置の概要**

PEM 方式定置装置は、定置装置本体および PEM を空気圧で利用して浮上させる装置、坑道内を移動させる装置、坑道壁面を利用して PEM を把持する装置などからなる。概念検討図を図 2-18 に、定置概念フローを図 2-19 に示す。

b．**試験項目**

①エアパレットを用いた搬送装置の最適性
③エアジャッキを用いた定置技術の確証等
④搬送・定置技術の最適化
⑤搬送・定置ワンスルー

(3) 人工バリア長期挙動試験

人工バリア長期挙動試験では、人工バリアの構成要素である緩衝材の再冠水挙動の評価を対象に、緩衝材の再冠水挙動を目視により実感・体感出来るように再冠水挙動を再現した可視化設備と再冠水挙動試験の概念設計を幅広く行い、試験結果を図化等によりわかりやすく表現するための検討を行った。

1) 試験の目的

地上での設備と試験における人工バリア長期挙動試験設備の検討に際しては、安全機能の観点から人工バリアに期待されている「閉じ込め性」（自己シール性)、「物質移行遅延」（止水性）機能を実証する試験の目的と実態を、目視・実感できる試験設備や仕組みの概念設計を行った。可視化設備では特に、人工バリアに期待されている「閉じ込め性」、「物質移行遅延」機能を可視化対象としてとらえ、ベントナイト（緩衝材）への地下水浸潤プロセスとその特性を、目視にて体感できる試験設備とすることとした。また、再冠水挙動試験設備では、ベントナイト緩衝材の湿潤プロセスに着目し、想定される冠水条件を再現することにより、地下施設で推定される実挙動を実験的に確認することを目的に実施するものとする。

2) 人工バリア可視化試験

人工バリア可視化試験としては、緩衝材が示す挙動を科学的な観点から正確に再現することを目指し、実時間による熱・水・応力・化学の連成を体感可能な試験設備の概念設計を幅広く実施するとともに、試験・評価項目を抽出した。

表 2-5 に実規模可視化設備の概念設計にいたるフローを示す。これは、地上および地下での試験設備の位置付けに基づき、地下における試験設備の概念設計を起点とし、地上における試験設備の概念設計を受けて、より感覚的な理解のための設備へとブレイクダウンしていく過程を示したものであり、そこに『部分的な実規模可視化』という発想を、縮小モデルという形でオプションとして加えたものである。

a．**試験装置の概要**

縦横断面併用モデルを用いた部分的実規模による地下水浸潤状況の可視化設備について、模擬廃棄体、目視壁、注水設備、外殻構造物、ブロック方式緩衝材の各構成要素の基本設計を行った。

人工バリア可視化試験設備のイメージ図を図 2-20 に示す。部分的に実規模による再冠水浸潤過程の可視化設備とすることから、緩衝材は、実物大のブロックを、水平部分と垂直部分について、各 1 個を用いる。水平部分は、2 段目、垂直部分は 3 段目の緩衝材ブロックを可視化対象とする。

b. **試験項目**

①試験の進行状況の可視化　　⇒グラフィック化による可視化
②地下水の浸潤状況の可視化　　⇒実規模レベルの可視化試験
③ミクロ挙動の可視化　　⇒MD 法によるシミュレーション

3) **再冠水挙動試験**

地上の再冠水挙動試験設備としては、先行事例やこれまでの試験に基づく再冠水挙動に関する知見を参照しつつ、試験設備の概念設計を幅広く実施し、試験体製作から運営までの計画を検討した。

再冠水挙動試験設備として、緩衝材が示す挙動を科学的な観点から正確に再現することを目指し、実時間による熱・水・応力・化学の連成を体感可能な試験設備の概念設計を実施するとともに、試験・評価項目を抽出した。

a. **試験装置の概要**

試験設備は、実規模・実物での構成を基本とする。設備はコンクリート製の模擬処分孔により外周を覆う構造となるため、緩衝材への浸潤プロセスや再冠水挙動を目視により直接確認することはできない。このような視覚的な体感、実感に関しては、並行して実施する可視化設備による試験に委ねることとし、当該試験設備での実際の再冠水挙動については、計測データの評価結果をモニターに提示する方法等による体感、理解をはかる計画とした。

試験装置の構成要素として、以下のような観点から試験装置の検討を行った。

- 模擬処分孔：緩衝材の再冠水に伴う膨潤圧に耐えうる構造である。
- 人工バリア（緩衝材）：ブロック方式定置技術試験設備における定置概念に準ずるものとする。緩衝材の構築には 1/8 分割ブロック方式緩衝材を適用し、緩衝材ブロック間および緩衝材と処分孔壁面の隙間には隙間充填を施すものとする。
- オーバーパック（ヒーティングシステム）：実際のオーバーパックと重量および発熱量に関する整合を図る。
- 注水システム：境界条件を明確にする観点から、水の急激なブロック間の選択的移行を防ぎ、静水圧にて緩衝材外側面に均一に水が回るような構造および注水手順（注水量の管理）となる（図 2-21 参照）。
- 計測システムおよび計測機器：試験設備の計測システムには、計測データの精度に加え、長期に渡る試験期間中、継続的にデータを取得する必要性より、機器およびシステム双方が長期間安定である（図 2-22 参照）。

図 2-23 に可視化設備と併設した、地上での人工バリア長期挙動試験設備の全体構成のイメージを示す。

b. **試験項目**

地上における試験を通じて取得されたデータに基づき、緩衝材への地下水の浸潤、再冠水挙動に関する評価を実施するための方策について検討を実施した。

人工バリアシステム中に埋設された各種計測機器からのデータの分析・評価の項目としては、以下のようなものが考えられる。

① 温度分布の取得
② 再冠水状況（飽和度（含水比）の分布、浸潤線の評価）
③ 緩衝材の膨潤挙動
④ 緩衝材界面での浸潤挙動（応力分布）
⑤ モデル化・解析手法による緩衝材の挙動評価（熱・水・応力（・化学）連成解析等）

2.5　地下での設備と試験の検討

地下での設備と試験では、実証坑道の調査、および定置試験や人工バリア長期挙動試験の概念設計を行った。

2.5.1 実証坑道の調査

地下での設備と試験に関する検討に資するために、原子力機構の幌延深地層研究センターの坑道に関して以下の公開資料を調査した。

- 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第 1 段階）研究成果報告書　分冊「深地層の科学的研究」[14)]
- わが国における高レベル放射性廃棄物処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－　総論レポート[2)]
- 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第 1 段階）研究成果報告書　分冊「地層処分研究開発」[15)]
- 幌延深地層研究計画　地下施設を利用した第 2、第 3 段階における調査試験計画案[16)]

2.5.2 定置試験や人工バリア長期挙動試験の検討

海外調査の結果および「2.4 地上での設備と試験の検討」のうち、「2.4.3 定置試験や人工バリア長期挙動試験の検討」での検討結果を踏まえて、地上における定置試験および人工バリア長期挙動試験から地下における定置試験および人工バリア長期挙動試験を絞り込んだ。定置試験としては、オーバーパック定置試験とブロック方式緩衝材定置試験、緩衝材隙間充てん試験、緩衝材の回収試験の 4 項目の概念設計を行った。人工バリア長期挙動試験としては、オーバーパックの腐食試験および再冠水挙動試験の 2 項目の概念設計を行った。

定置試験はオーバーパック定置試験と緩衝材定置試験に大別される。また、人工バリア長期挙動試験はオーバーパックの腐食試験と緩衝材の再冠水挙動試験について検討した。

(1) オーバーパック定置試験

地下の竪置き方式オーバーパック定置試験としては、概念設計を実施するとともに、試験・評価項目を抽出した。

地下での設備と試験による工程としては、オーバーパックの地上から地下への搬送、地下におけるオーバーパックの定置装置への積み替え、処分孔への搬送と定置、の一連のプロセスが想定される。竪置きのオーバーパック定置設備の概念設計としては、以下を実施した。

①オーバーパックを搬送、把持・昇降可能な装置の仕様検討、強度評価
②把持、昇降用アクチュエータの仕様検討と選定。
③走行駆動に関する仕様検討。なお、走行方式に関しては、レール走行方式とする。
④装置概念図の作成、空間余裕度の評価。

1) 試験の目的

本試験では、地上でのオーバーパック定置試験の結果を受けて、地層処分を実現するための工学技術（オーバーパック定置技術）の信頼性（安心感）を国民に伝え、地下環境において、実規模オーバーパックを遠隔搬送し、所定の位置（処分孔）に定置することが可能であること立証することを目的とする。

2) 試験装置の概要

2.4.3 (1) 2) を参照。

3) 試験項目

①垂直搬送・積み替え試験
②走行試験
③オーバーパック定置装置の試験
④遠隔制御に関する確認試験

(2) 緩衝材定置試験

地下の緩衝材定置試験は、緩衝材だけを取り扱ったブロック方式緩衝材定置試験、ブロック方式緩衝材定置試験において生じるオーバーパックと緩衝材、緩衝材と岩盤の間の隙間を緩衝材で埋めるための緩衝材隙間充てん試験、および、一度定置した人工バリアを回収するための重要な技術である緩衝材の回収試験に分けて検討を行った。

1) 試験の目的

本試験では、地上での緩衝材定置試験の結果を受けて、地層処分を実現するための工学技術（緩衝材定置技術）の信頼性（安心感）を国民に伝え、実規模緩衝材を遠隔搬送し、所定の位置（処分孔）に定置することが可能であること立証することを目的とする。

2) ブロック方式緩衝材定置試験

ブロック方式緩衝材定置試験としては、2.4.3 (2) 2) を参照。

3) 緩衝材隙間充てん試験

緩衝材隙間充てん試験としては、2.4.3 (2) 2) を参照。

4) 緩衝材の回収試験

緩衝材の回収試験は、操業技術と密接に関連しており、操業中に人工バリアを上手く定置できなかった場合や定置後に欠陥や不具合が見つかった場合に、人工バリアを回収する試験である。その回収技術の成立性に対し重要な要素技術である緩衝材除去技術を取り上げ、塩水による緩衝材の分解効果を利用した塩水噴射による緩衝材の分解・除去等の施工性の実証と、分解・除去装置、機器、および施工システム等の実証を目指し、概念設計を実施するとともに、試験・評価項目を抽出した。

a. 試験装置の概要

緩衝材（ベントナイト）を塩水により効率的に分解するために、回収装置は塩水の圧力噴射機能と塩水のリユースシステムを有している。回収したベントナイト懸濁液はベントナイトと塩水に分離される。塩水は、塩分濃度を再調整してリユースする。緩衝材の回収試験設備概念図を図 2-24 に、緩衝材の回収試験手順を図 2-25 に示す。なお、オーバーパックの回収時は、オーバーパック定置装置の逆動線により行うものとする。なお、リユースシステムは、既存の技術を応用して用いることが可能である。また、オーバーパックの転倒防止機能を有していることも必要である。

b. 試験項目

①塩水の最適噴射圧
②ベントナイト緩衝材の分解時間
③回収したベントナイト懸濁水の塩分濃度

(3) オーバーパックの腐食試験

地下のオーバーパック腐食挙動試験としては、モデルの適用性の検証データを含め室内試験データの裏づけに加えて、室内試験では確認できなかった事象の確認（原位置、実規模レベルでしか確認できない事象に着目）を実施し、試験内容をパネルや実試験体などを用いて端的に見学者に伝えることが適切であると考える。地層処分概念とその工学的実現性および長期挙動の実証を目的に、第２次取りまとめ [4]の処分孔竪置き方式の処分概念に基づくオーバーパック

（炭素鋼）の腐食挙動について、概念設計を実施するとともに、試験・評価項目を抽出した。オーバーパックの設計要件としては、閉じ込め性の他、耐圧性、放射線遮へい性等がある。閉じ込め期間は最低 1,000 年間とされており、長期耐食性が必要となる。想定される地層処分環境下でのオーバーパック候補材料の長期耐食性は室内試験を中心にした腐食試験やモデリング等により､その見通しが示されつつある。

1) 試験の目的

本設計では、実際の深地層環境下でのオーバーパックの長期耐食性を実証するための試験設備および試験項目の検討を実施した。

2) 試験装置の概要

実規模原位置試験により地層処分研究に対する信頼性向上やオーバーパックの腐食モデルの妥当性を検証できるデータを取得できる。一方、小規模サイズの試験体については、原位置試験の実施により、実酸化還元雰囲気や実地下水環境下での腐食速度/腐食形態データ等を取得し、室内試験結果や室内試験結果より導出された予測結果と比較することで、室内試験結果の解釈や妥当性を検証することができる。また、環境については、試験対の加熱の有無および緩衝材の有無が考えられる。モニタリング対象としては、腐食モニタリングと環境モニタリングが考えられる。

オーバーパックの腐食試験概略図を図 2-26 に示す。

3) 試験項目

・酸化還元電位（Eh）の経時変化（試験期間中）：白金電極の自然浸漬電位
・緩衝材間隙水 pH の経時変化（試験期間中）
・試験体の腐食電位（Ecorr.）分布の経時変化（試験期間中）
・試験体の外観変化（試験前後）：特に、溶接部近傍の腐食状況
・試験体の腐食深さ分布（試験後）：特に溶接部近傍の腐食深さ分布
・試験体の表面皮膜分析（試験後）：XRD、XPS、LRS、FT-IR など

(4) 再冠水挙動試験

地下の再冠水挙動試験としては、人工バリアの構成要素である緩衝材の再冠水挙動の評価を対象に、実地下環境での緩衝材の再冠水挙動試験の概念設計を実施するとともに、試験・評価項目を抽出した。

1) 試験の目的

地下の再冠水挙動試験設備では、実際の地下環境に緩衝材を定置して緩衝材の熱・水・応力・化学の連成挙動を評価することを目的としている。そのために湿潤プロセスに着目することにより、再冠水挙動を実験的に確認するものとする。

2) 試験装置の概要

試験設備は、地下坑道の岩盤内に処分孔を模擬したピットを掘削し、ブロック方式緩衝材を定置して、緩衝材への浸潤プロセスや再冠水挙動の計測データの測定を行い、評価できるものを検討した。その際には、周辺環境の計測も行うことを検討した。概念図を図 2-27 に示す。

試験装置の構成要素として、以下のような観点から試験装置の検討を行った。

- 処分孔：模擬廃棄体を含むオーバーパックとその周囲に設置される緩衝材を収納できる規模である。
- 人工バリア（緩衝材）：ブロック方式定置技術試験設備における定置概念に準ずるものを基本とする。緩衝材の構築には 1/8 分割ブロック方式緩衝材を適用し、緩衝材ブ

ロック間および緩衝材と処分孔壁面の隙間には隙間充填を施すものとする。

緩衝材の膨潤に伴い、それを防止する反力材の設計を行う必要がある。地下の岩盤状態を考慮して、アンカー方式またはサポート方式とするかを検討する。

- オーバーパック（ヒーティングシステム）：実際のオーバーパックと重量および発熱量に関する整合を図る。
- 注水システム：再冠水挙動試験における注水方式は、評価項目や処分環境の考え方等によって、自然地下水浸潤に期待する静水圧注水や、加圧による強制注水が考えられる。これにより、注水システムの構成が異なるものとなる。

  坑道の埋戻しについては、埋戻しを行う場合と行わない場合がある。それぞれの場合に対し、地下水について静水圧注水と強制注水が考えられる。地下における現実的な地質環境での試験を行うことを前提とすれば、坑道を埋戻し、静水圧注水を行った状態での試験が望ましい。しかしながら、地下での試験には時間的な制約があること、また、試験途中で計測機器の不具合が発生した場合や、試験条件を変更する必要がある場合が考えられることから、坑道の埋戻しを行わないこととする。強制注水が必要かどうかの判断は、坑道の湧水状況と処分孔周辺岩盤のボーリング調査結果に基づくものとするが、試験中の強制的に地下水を注水することにより、緩衝材の飽和を促進させることも考えておく必要がある。これより、自然の地下水による緩衝材の浸潤を第一とし、オプションとして強制注水を考えることとする。自然の地下水による緩衝材の浸潤については、処分孔を模擬したピットの壁面岩盤と緩衝材との間隙に砂（豊浦標準砂が望ましい）を充填する。
- 計測システムおよび計測機器：試験設備の計測システムには、計測データの精度に加え、長期に渡る試験期間中、継続的にデータを取得する必要性より、機器およびシステム双方が長期間安定である（図 2-22 参照）。

3) 試験項目

実地下環境における試験を通じて取得された計測データに基づき、緩衝材の熱・水・応力・化学の連成挙動を評価するための試験項目を検討した。

This is a blank page.

表 2-1　理念と方策

「時間」と「技術」　事業の理念と実証の方策　～実証展示企画　コンセプト（案）～

■　事業の目的

- 「地層処分概念」と「工学技術」を国民に正しく伝えることを目的とする
- 隣接ＰＲ施設「ゆめ地創館」との連携を考慮するとともに、その目的を実現するために、実規模・実物による実証試験を行う

■　理念（メインコンセプト）

万年オーダーの時間に挑む技術

- 万年オーダーの時間とそれに挑む技術を端的に伝えるとともに見学者の評価を運営に反映する
  - ・安定した深地層において適用される、工学技術の意味とその技術の着実な進歩をストレートに来館者へ伝える
  - ・時間コンセプトを各展示へ展開する
  - ・人工バリア：３つのバリアの組み合わせによりなりたつ工学技術としてすでに実証段階にあることを来館者に伝える

■　展示方針

- 技術志向の表現とする。技術の内容を大切にし、技術を可能な限り忠実に表現する
- 相手に直感的な理解を促す表現を採用する

⇩

- 時間コンセプトを各展示へ展開する
- 実証試験期間の活動の断面を連続してみせる
- 前提となる地層処分概念をわかりやすいストーリーとして展開する

■　各展示コンセプト

■　万年オーダーの時間

- 地層処分概念（第２次取りまとめ）とはなにか

万年オーダーの安全性を確保するために安定した深地層に構築される多重バリアに求められる機能とはどのようなものか（人工バリアという考え方）

- 万年オーダーのバリア機能の確保に向けたチャレンジ

万年オーダーのバリア機能実現への工学技術開発（人工バリア材料選定・製作・構築の技術
机上の理論を具現化

■　千年オーダーのバリアに挑む
～オーバーパックの材料と製作技術～

- オーバーパック（材料）の性質 19cm の意味
- 地下水の浸入を防ぎ、千年オーダーで放射性核種を封入する材料・製造技術とそれらの開発

■　万年オーダーのバリアに挑む
～緩衝材の材料と製作技術～

- 緩衝材（ベントナイト）の性質　70cm の意味　→不思議な性質
- 安定した深地層において、地下水の浸入を遅らせ、万年オーダーで放射性核種移行を抑制する材料とその製作技術・開発

■　見えない進行を見る　オーバーパック・緩衝材の長期挙動

- 長期挙動とはどういうものか
- 長い時間を考える　長い時間を見つめる
  （オーバーパック）地下水による腐食挙動と耐食性
  （緩衝材）　低透水性による放射性核種移行の抑制
  再冠水による緩衝材の変化

■　働く機械・実証　オーバーパック・緩衝材の構築技術

- 机上の理論を実証する
  どのようにして頑健な人工バリアを作るか
- 正確に置く・効率的に置く・遠隔で置く
- カラフルな装置により手順をわかりやすく表現する

■　机上から実証へ、地上から地下へ

- 実証から学ぶこと
- 机上との違い、地下での実証との違いは何か？
- 実証試験の履歴を表現する
- 展示内容に関する評価のフィードバックのしくみをつくる

■　展示内容

■　はじめに

- 日常の時間との違いの説明

万年オーダーの時間を長さで示すことで、時間の持つ意味を伝える「ゆめ地創館」のテーマである地下と違う切り口「時間」により新味のあるコンセプトを提供し関心を求める。
⇒地層処分概念と工学技術についての説明を行う

■　オーバーパックの材料と製作技術

- 材料の選定：炭素鋼・ガラスの特徴の説明
  →「どのようにして地下水浸入を防ぎ、放射性核種をとらえて放さないのか」（耐食性、耐圧性、放射線遮蔽、耐熱性の説明）
- 封入性の確保に向けた製作技術（遠隔溶接技術）の開発

⇒オーバーパックの大きさ・重さ・特性等の理解に向けた実規模・実物展示

■　緩衝材の材料と製作技術

- 材料の選定：粘土（ベントナイト）の多様な性質（硬く締固められた粘土の使用）
  →低透水性により放射性核種移行を抑制する仕組みの説明
  →オーバーパックを保護する仕組みの説明
- 高密度の確保にむけた製作技術の開発

⇒緩衝材の大きさ、重さ、特性などの理解に向けた実規模・実物展示

■　オーバーパック・緩衝材の長期挙動

- 地下水との関係
- 腐食に耐え、環境変化に追従する
- 長期挙動を予測する

⇒各材料の長期挙動の視覚的な展示（実証）

■　オーバーパック・緩衝材の構築技術

- 地下環境で遠隔により重量物を正確に定置する技術
  →どこが技術の核心なのか
- 遠隔により精度よく定置するための構築技術（遠隔搬送・定置技術）の開発

⇒オーバーパックと緩衝材の遠隔定置装置による実証（手順の理解）

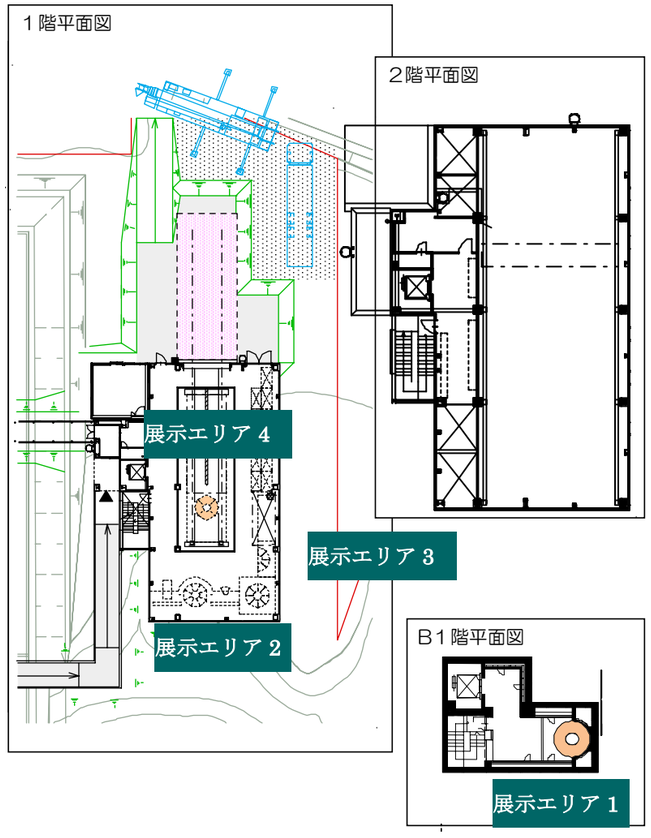
■　活動の現在を生きたまま伝える

- これまでの展開と今後の実証予定
- 他分野技術の融合
- 他のとりくみ（施設の紹介）
- アンケート等によるフィードバックを定期的に行う

表 2-2　展示企画と展示ゾーンの計画表

展示企画と展示ゾーンの計画

全体理念
「地層処分概念」と「工学技術」を国民に正しく伝えることを目的とする
その目的を実現するために実規模・実物による実証試験を行う
技術思考の表現・技術内容を大切にし、技術を可能な限り忠実に表現
相手に直感的な理解を促す表現を採用



■■展示エリア１：はじめに～万年オーダーの時間
■第２次とりまとめ⇒パネル
頑健な人工バリア⇒パネル
■千年バリアと万年バリア⇒オブジェ
10 万年の時間を長さであらわすオブジェの作成
80 年（人の時間）＋1000 年＋10 万年
■実証実験の意義⇒パネル
机上の理論から実証へ、そして地下へ
装置類の全体説明（操業のプロセス説明）⇒映像
■開館以降の展示館の履歴（ヒストリー）⇒テンポラリーに提示

オブジェのイメージ（長さは時間に比例させる）

展示エリア２：千年バリア、万年バリアの材料と製作技術
■オーバーパック展示
千年バリア：19cm の炭素鋼
⇒パネル＋実物＋カットモデル＋無垢のサンプル＋CG
CG：製作（溶接の状況）場面の映像⇒液晶大型ディスプレイ
（緩衝材と兼用）
■緩衝材展示
万年バリア：緩衝材（ベントナイト）⇒パネル＋実物＋サンプル＋CG
CG：製作場面の映像⇒液晶大型ディスプレイ（緩衝材と兼用）

■■展示エリア３：千年バリア、万年バリアの長期挙動実証設備
■緩衝材の長期挙動
ベントナイトの冠水⇒サンプルモデル＋CG 映像
（見えない変化と分子レベルのダイナミックな動き）
実証実験装置の説明⇒実物＋パネル
実証実験の説明⇒実物＋パネル
■オーバーパックの長期挙動
鉄は錆びないのか？
日常と地中の世界の違い（常識の通用しない世界）
酸化還元電位とは（Eh）
炭素鋼が望ましいわけ

■■展示エリア４-１（１階：操業ゾーン）
：千年バリア、万年バリアの構築技術ー操業技術実証設備（縦置き）

■オーバーパック定置設備
装置の説明⇒パネル・映像（AV 装置は兼用）
遠隔搬送・定置技術の実証試験の実施
カメラによる映像の配信
実験プログラムの明示
■ブロック定置設備
装置の説明⇒パネル・映像（AV 装置は兼用）
遠隔搬送・定置技術の実証試験の実施
カメラによる映像の配信
実験プログラムの明示
■隙間充填設備
装置の説明⇒パネル・映像（AV 装置は兼用）
遠隔充てん技術の実証試験の実施
カメラによる映像の配信
実験プログラムの明示
■その他設備の紹介
原位置締固め方式操業設備⇒パネル
ペレット方式操業技術実証設備⇒パネル
PEM 方式操業技術実証設備⇒パネル
回収技術実証設備⇒パネル

■■展示エリア 4-2（B1 階）
定置の実証⇒実物

表 2-3　スケジュール

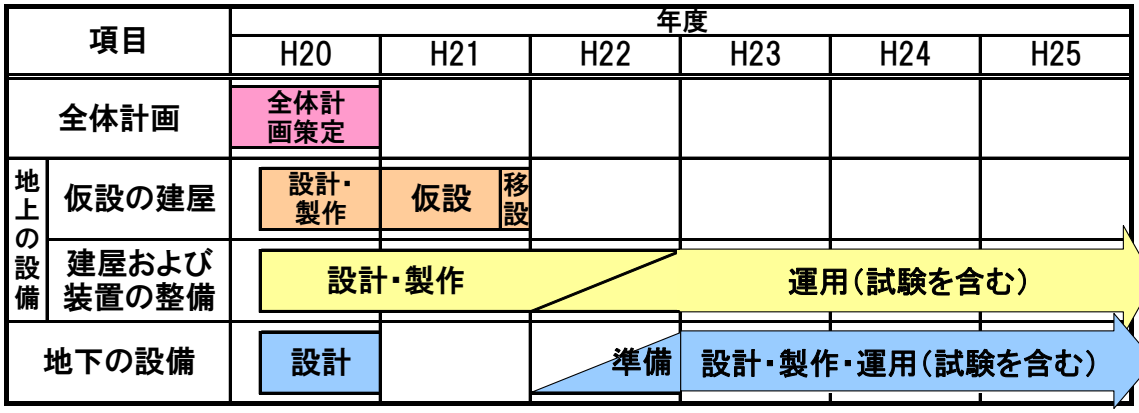


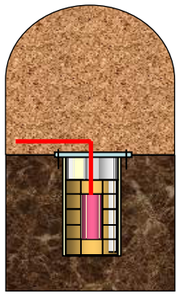
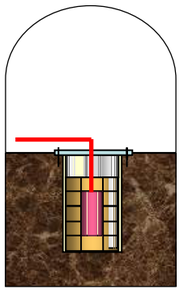
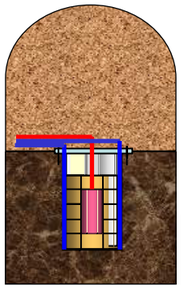
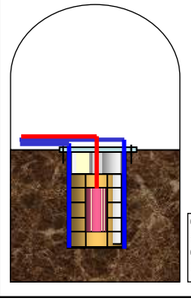
表 2-4　軽量化検討結果

	フレーム断面剛性実機遮へい重量考慮	曲線部走行考慮	X 軸方向位置決めフレーム	概算重量
原案	あり	あり	あり	48 ton
Case-1	なし	あり	あり	42 ton(△13%)
Case-2	なし	なし	あり	41 ton(△15%)
Case-3	なし	なし	なし	39 ton(△19%)

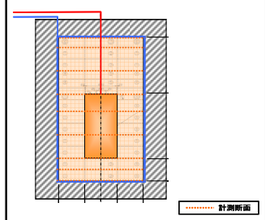
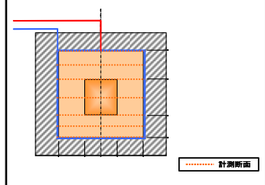
This is a blank page.

表 2-5　再冠水挙動試験設備（地上、地下）の概念から導かれる実規模可視化設備の設計概念フロー

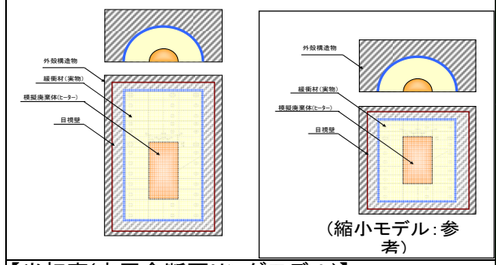
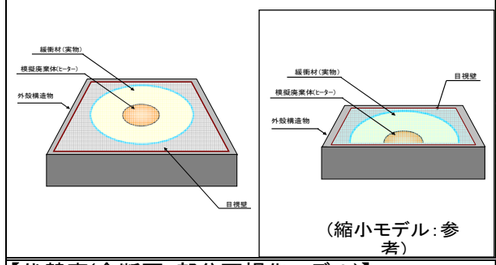
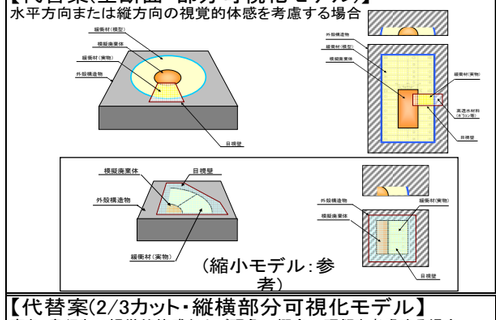
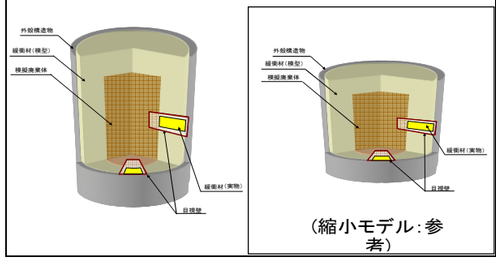
地下における再冠水挙動確認試験

	試験設備概略図		実現象として再現する項目
自然冠水		①	・自然状態での緩衝材への地下水浸潤状況 ・自然状態での緩衝材の熱−水−応力−化学の連成現象（この状態が実際の処分環境に近いと思われる。） 【計測するデータ】 熱：ヒーター表面温度，緩衝材内部温度，埋戻し材の温度，岩盤温度 水：緩衝材の含水比，埋戻し材の含水比 応力：緩衝材の間隙圧・サクション圧，埋戻し材の間隙圧 化学：試験前後の岩盤内地下水の分析
		②	・自然状態での緩衝材への地下水浸潤状況 ・自然状態での緩衝材の熱−水−応力−化学の連成現象（応力は正確には再現されない。） 【計測するデータ】 熱：ヒーター表面温度，緩衝材内部温度，岩盤温度 水：緩衝材の含水比 応力：緩衝材の間隙圧・サクション圧 化学：試験前後の岩盤内地下水の分析
THMC促進		③	・強制注入状態での緩衝材への地下水浸潤過程 ・強制注入状態での緩衝材の熱−水−応力−化学の連成現象（地下水以外の水を用いる場合は化学は正確には再現されない。） 【計測するデータ】 熱：ヒーター表面温度，緩衝材内部温度，岩盤温度 水：緩衝材の含水比，埋戻し材の含水比 応力：緩衝材の間隙圧・サクション圧，埋戻し材の間隙圧 化学：試験前後の岩盤内地下水の分析
		④	・強制注入状態での緩衝材への地下水浸潤過程 ・強制注入状態での緩衝材の熱−水−応力−化学の連成現象（地下水以外の水を用いる場合は化学は正確には再現されない。また応力は正確には再現されない。） 【計測するデータ】 熱：ヒーター表面温度，緩衝材内部温度，岩盤温度 水：緩衝材の含水比 応力：緩衝材の間隙圧・サクション圧 化学：試験前後の岩盤内地下水の分析

地上における再冠水挙動確認試験

試験設備概略図			地下試験を再現する項目
【実規模モデル】 	A	冠水時に相当する水圧を載荷する	・計測するデータ ・O/P発熱量 ・注水圧、注水量 ・人工バリアの性状 ・人工バリアの形状 ・センサー配置・数量
	B	静水圧を載荷する。	
	C	冠水時に相当する水圧＋促進圧を載荷する。	
	D	静水圧＋促進圧を載荷する。	
【縮小モデル】 	a	冠水時に相当する水圧を載荷する	・計測するデータ ・O/P発熱量 ・注水圧、注水量 ・人工バリアの性状
	b	静水圧を載荷する。	
	c	冠水時に相当する水圧＋促進圧を載荷する。	
	d	静水圧＋促進圧を載荷する。	

可視化設備概念

試験設備概略図		地上試験を再現する項目
【当初案(縦全断面モデル)】 縦方向の視覚的体感と、地上試験との設備的整合を考慮する場合 	U	《O/P発熱》 ・人工バリアの性状 ・設備の高さ形状 ・注水圧 ・単位面積あたり注水量 ・O/P発熱量
	V	《O/P非発熱》 ・人工バリアの性状 ・設備の高さ形状 ・注水圧 ・単位面積あたり注水量
【当初案(水平全断面リングモデル)】 水平方向の視覚的体感と、地上試験との設備的整合を考慮する場合 	W	《O/P発熱》 ・人工バリアの性状 ・設備の奥行形状 ・注水圧 ・単位面積あたり注水量 ・O/P発熱量
	X	《O/P非発熱》 ・人工バリアの性状 ・設備の奥行形状 ・注水圧 ・単位面積あたり注水量
【代替案(全断面・部分可視化モデル)】 水平方向または縦方向の視覚的体感を考慮する場合 	Y	《代替案(全断面・部分可視化モデル(水平または縦))》 ・人工バリアの性状 ・設備の奥行または高さ形状 ・注水圧 ・単位面積あたり注水量
【代替案(2/3カット・縦横部分可視化モデル】 高さ、奥行きの視覚的体感および現象の概念の理解を考慮する場合 	Z	《代替案(2/3カット・縦横部分可視化モデル)》 ・人工バリアの性状 ・設備の奥行および高さ形状 ・注水圧 ・単位面積あたり注水量

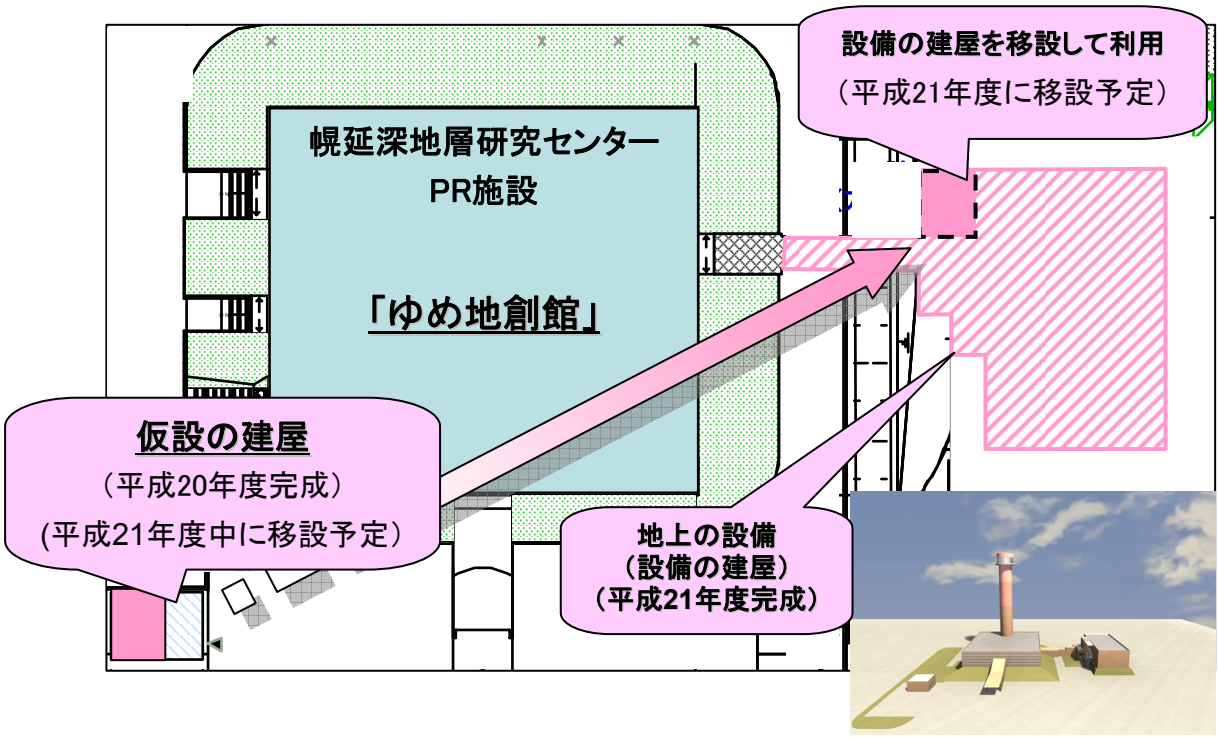


図 2-1　設備の建屋の配置図

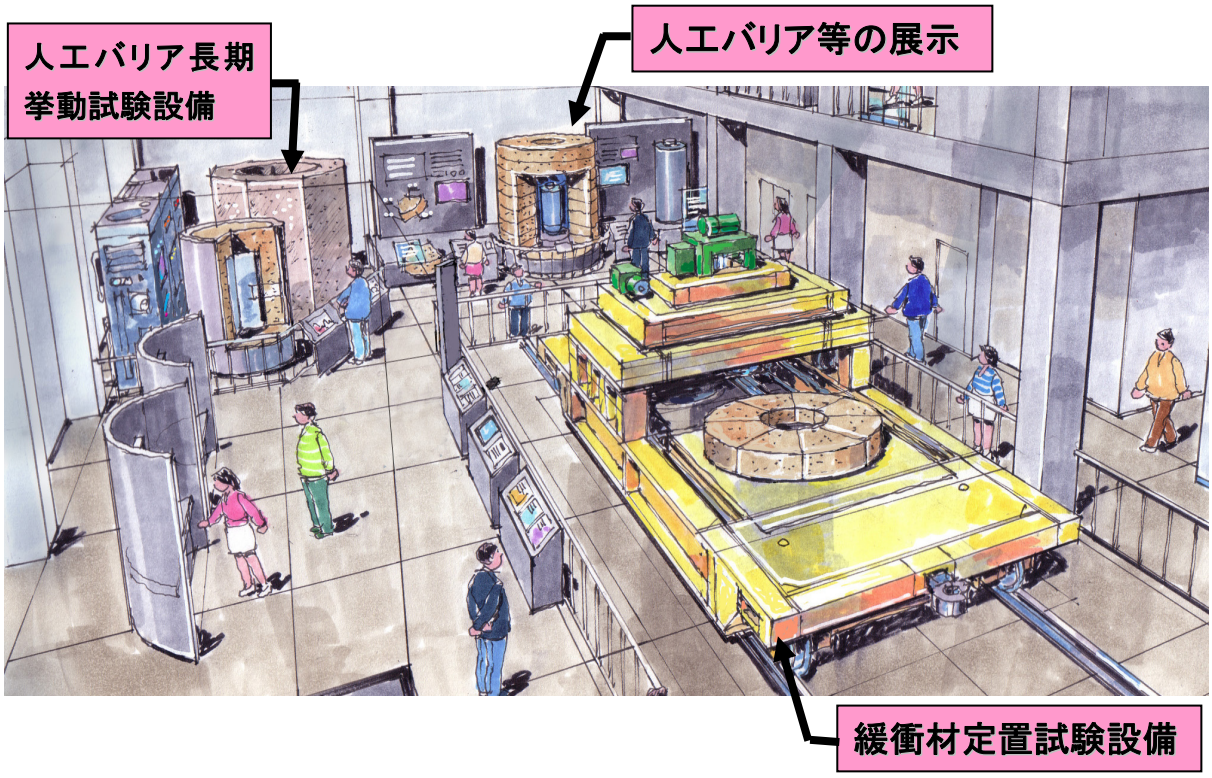


図 2-2　設備の建屋内部のイメージ

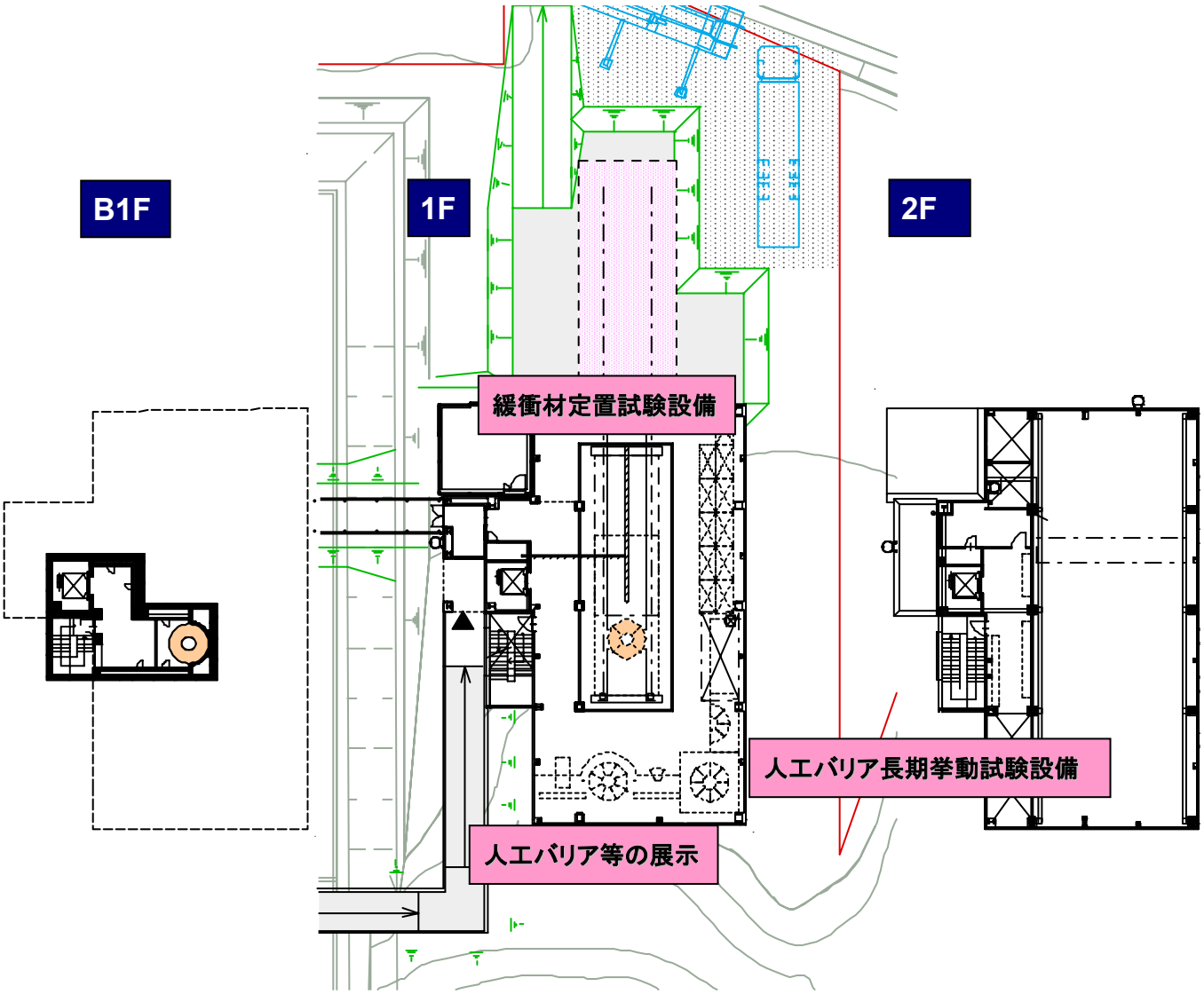


図 2-3　設備の建屋の平面

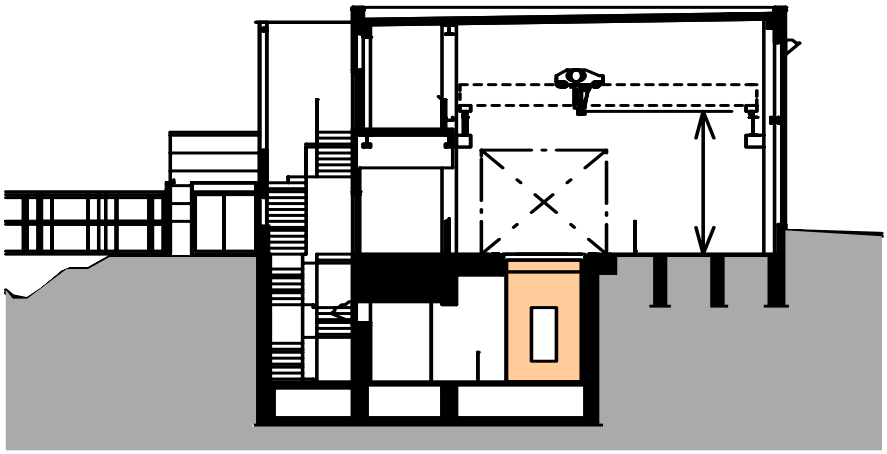


図 2-4　設備の建屋の断面

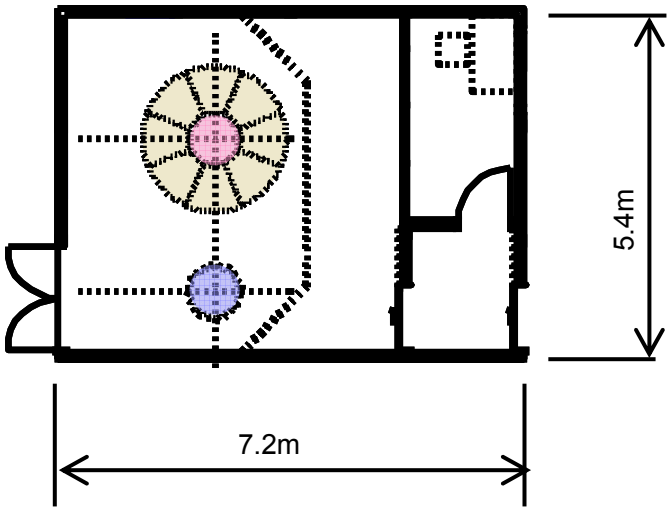


図 2-5　仮設の建屋の平面図・断面図

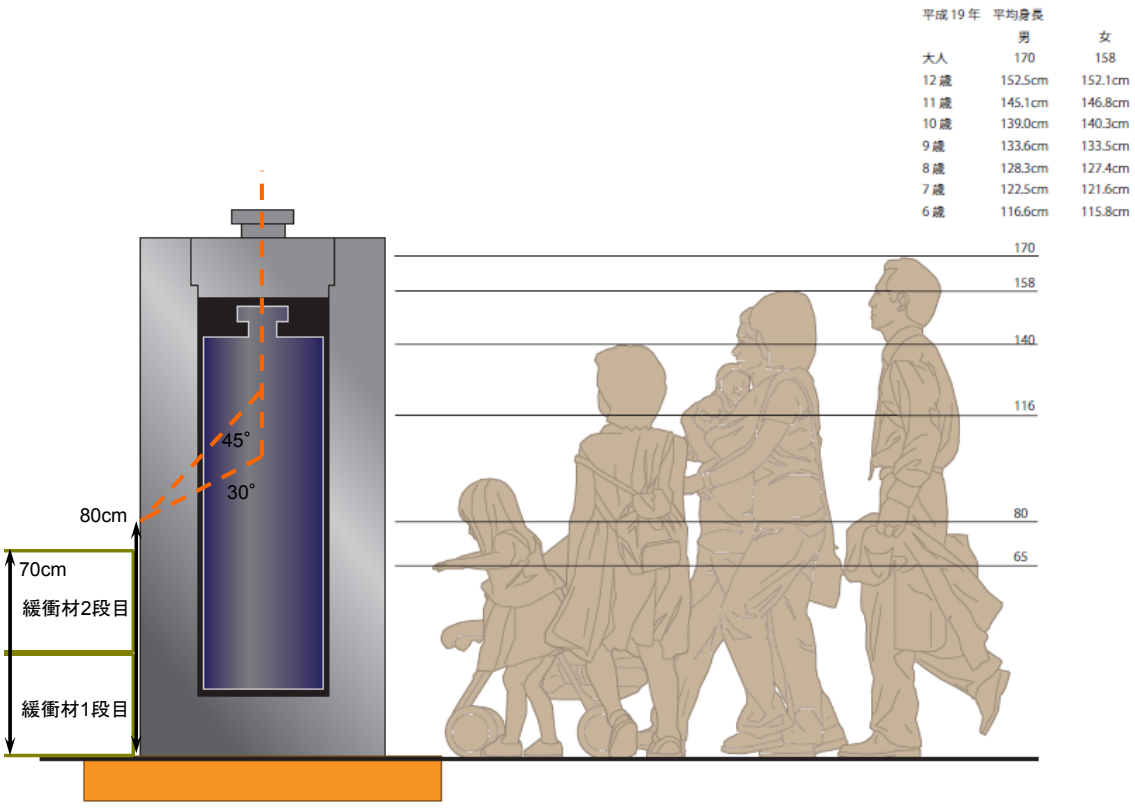


図 2-6　来館者の身長・目線とオーバーパック

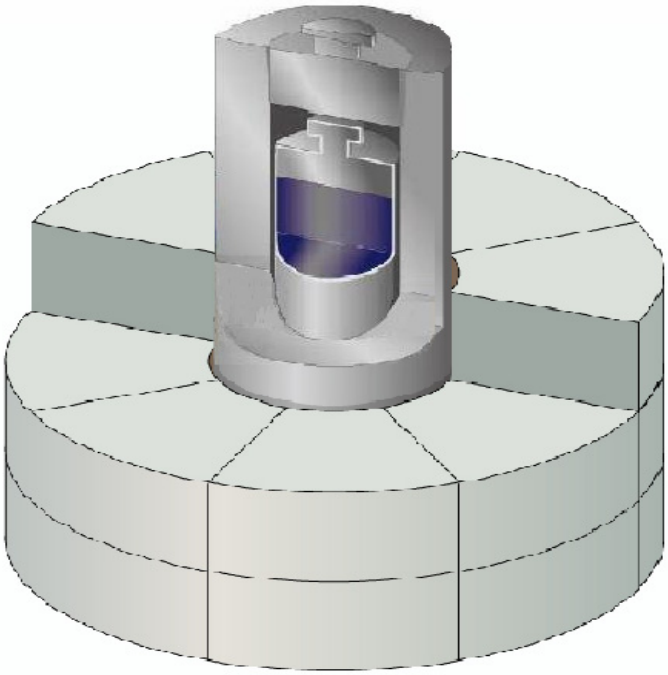


図 2-7　オーバーパック・カットモデル（イメージ）

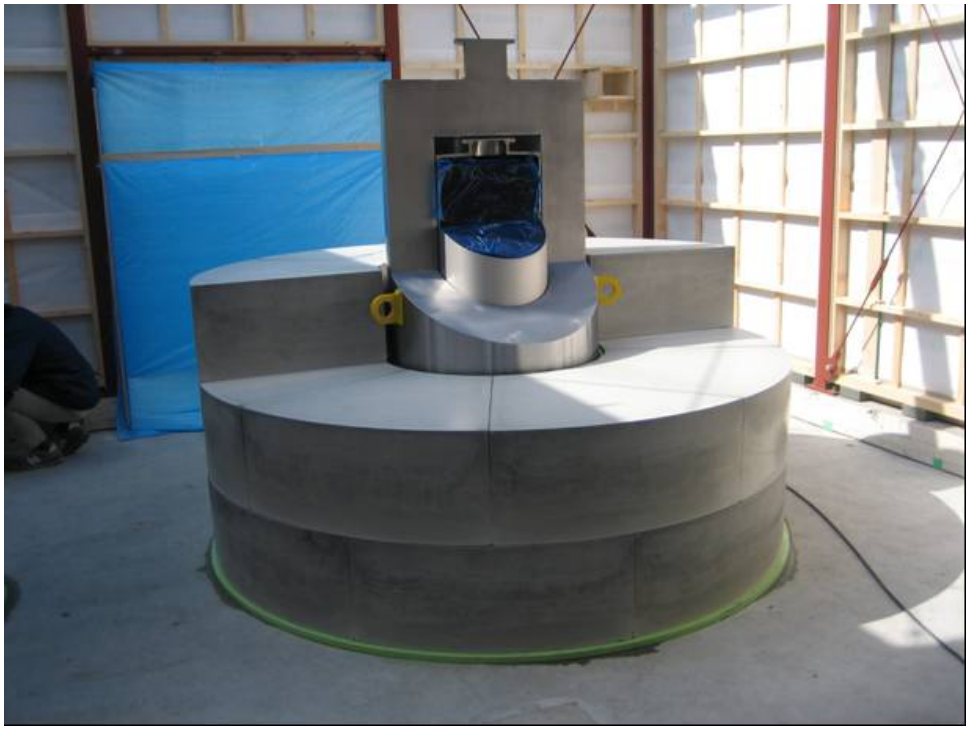


図 2-8　オーバーパック・カットモデル（写真）

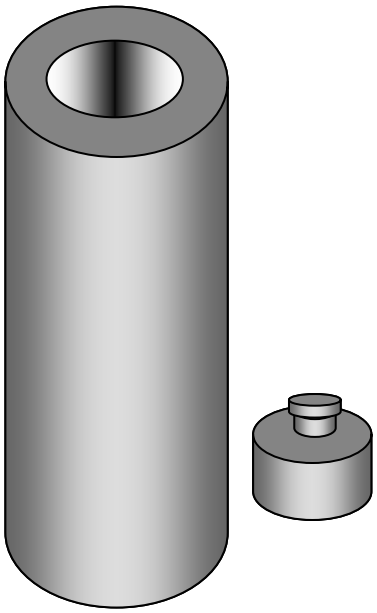
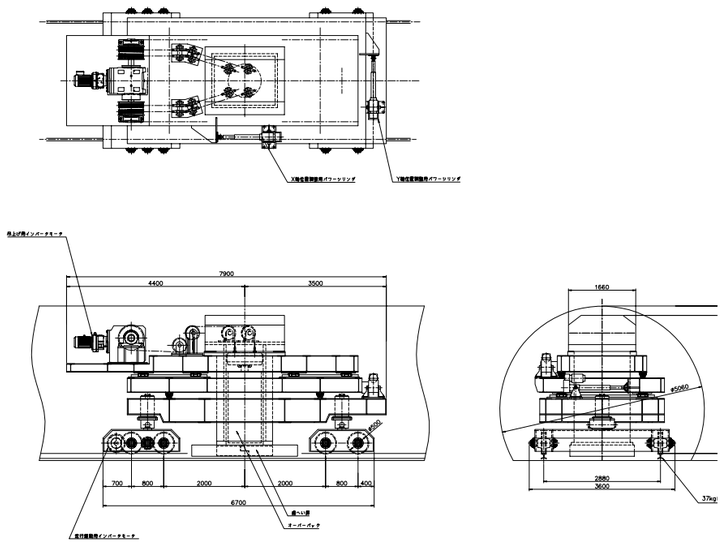


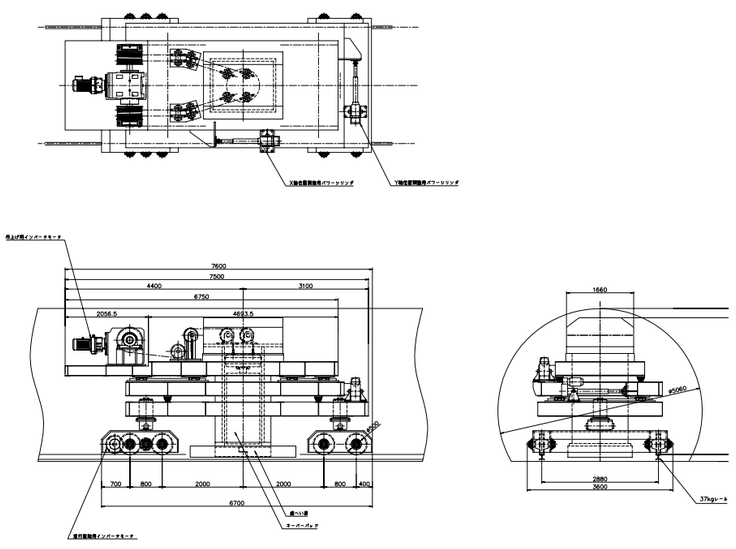
図 2-9　オーバーパック・単体（イメージ）

図 2-10　オーバーパック・単体（写真）

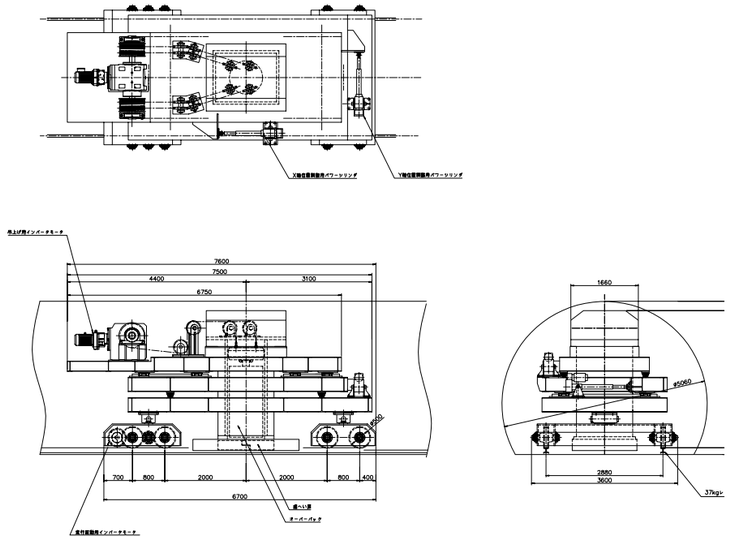
図 2-11　緩衝材の展示イメージ（写真）



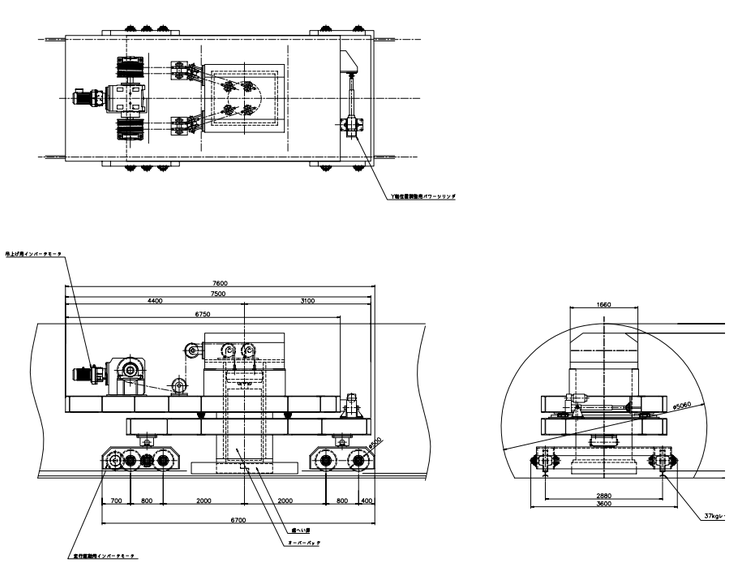
原案



軽量化 Case-1



軽量化 Case-2



軽量化 Case-3

図 2-12　オーバーパック定置装置概念図

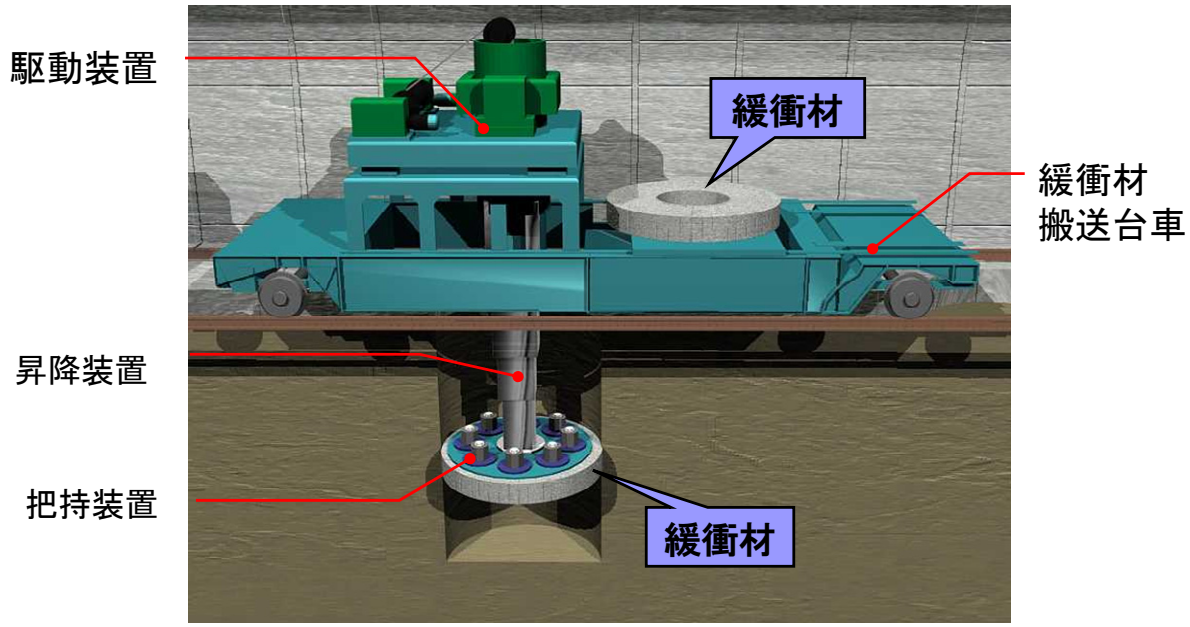
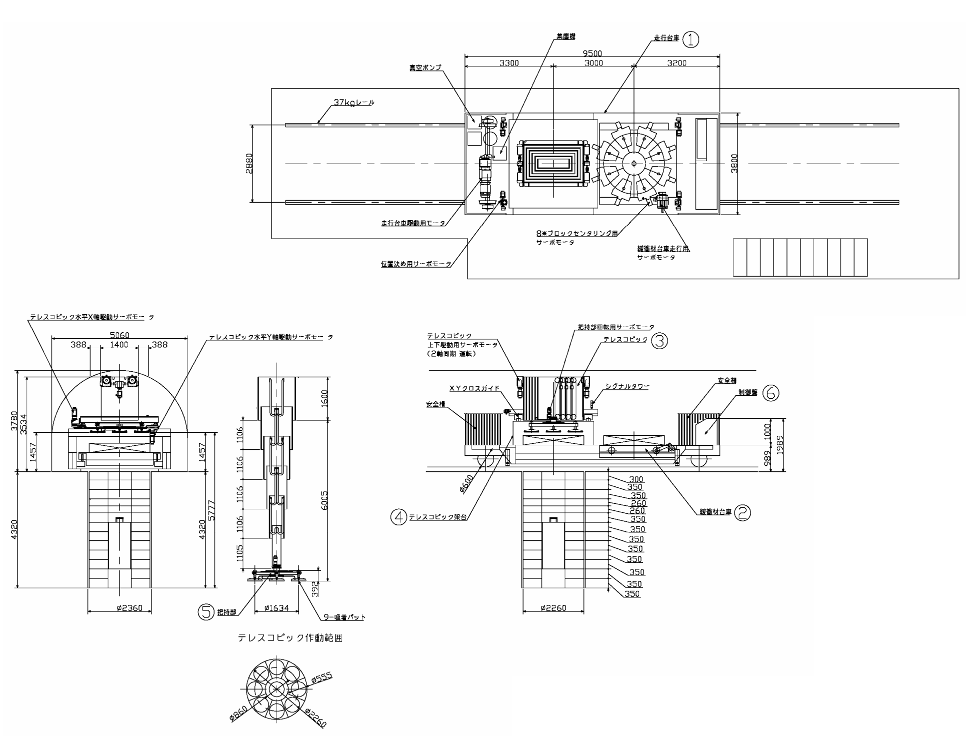
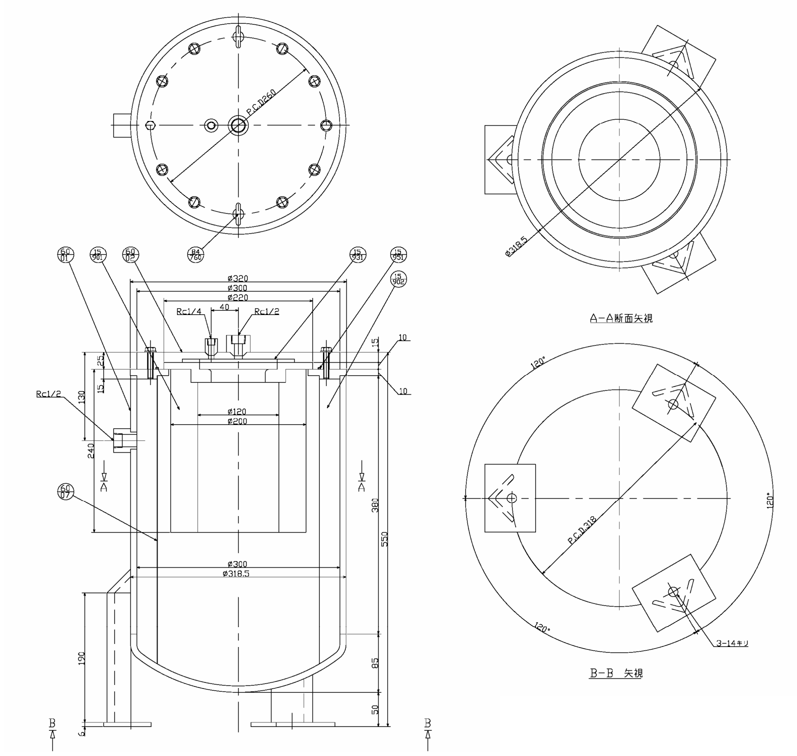


図 2-13　ブロック方式緩衝材定置試験設備概念図

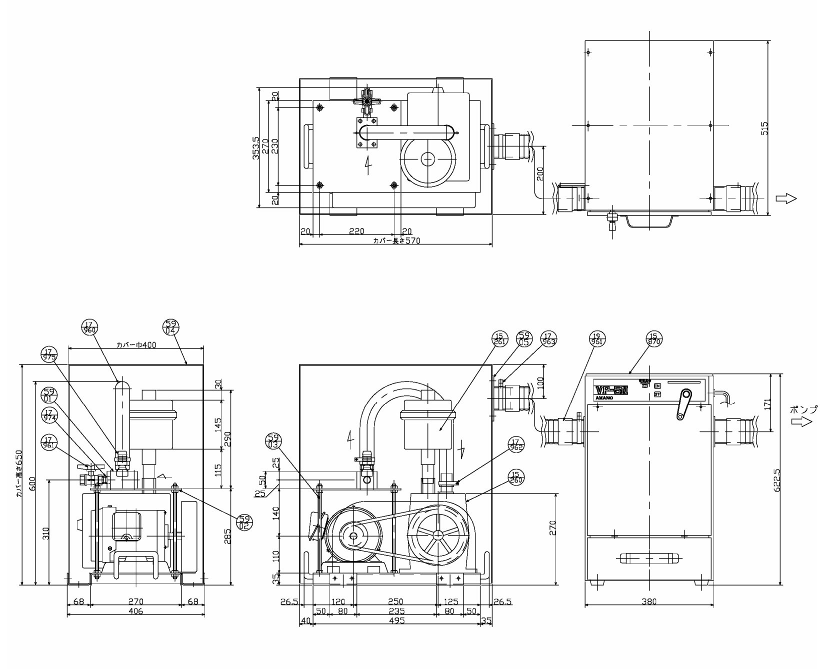
This is a blank page.



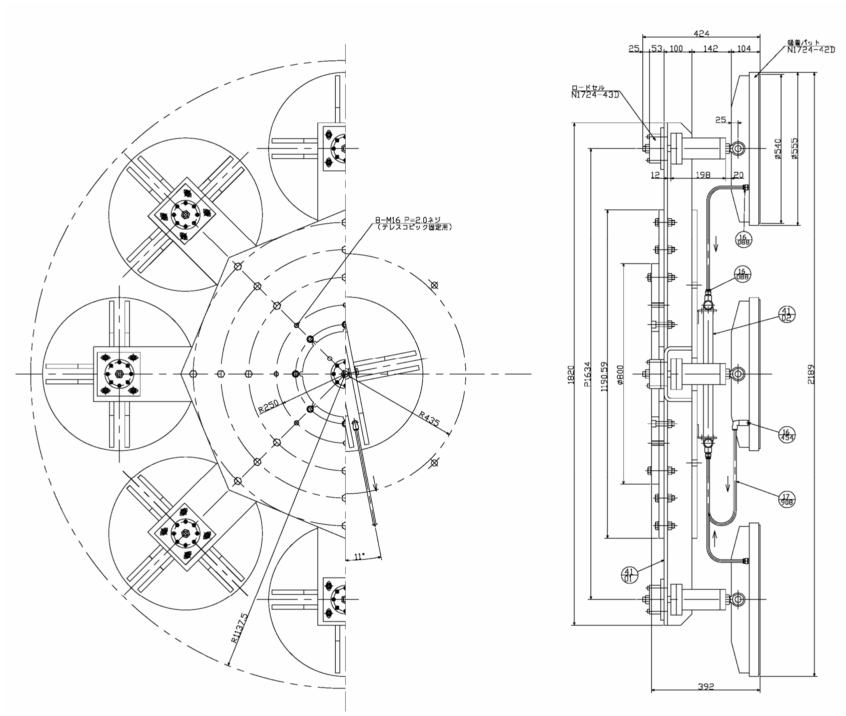
全体外形図



真空フィルター組立図



真空ポンプユニット詳細図



把持部組立図

図 2-14　ブロック方式定置技術詳細設計結果

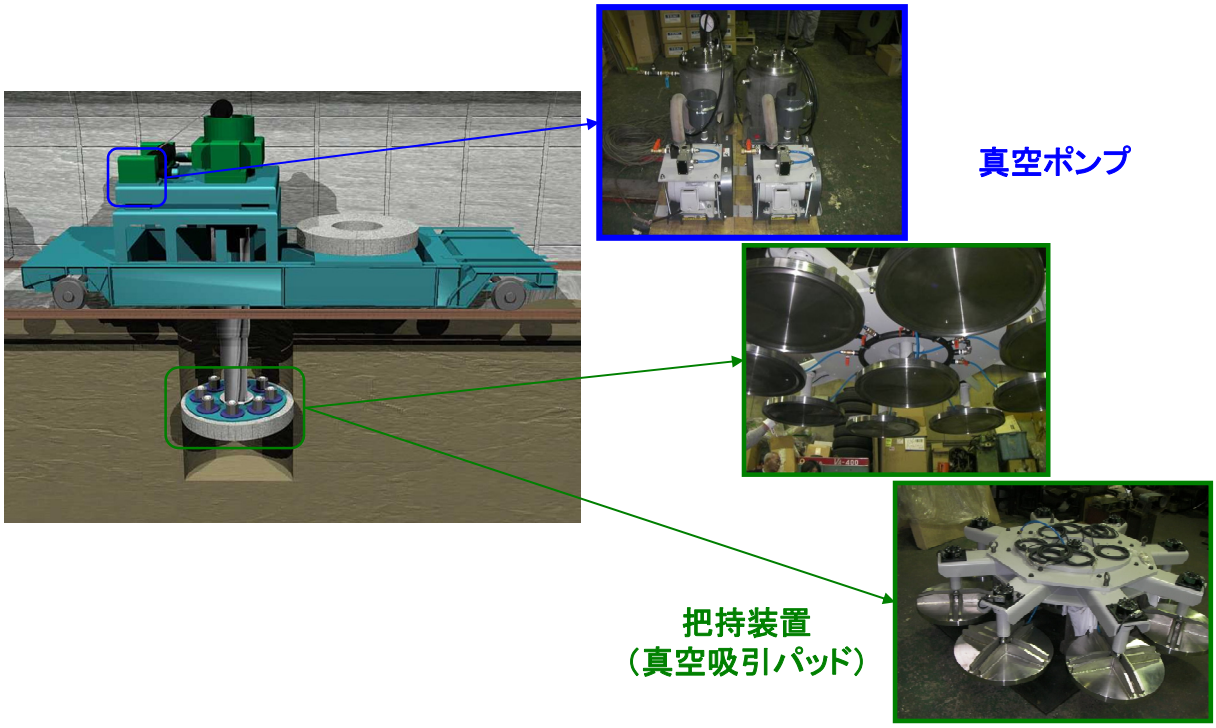


図 2-15　ブロック方式定置装置一部製作状況

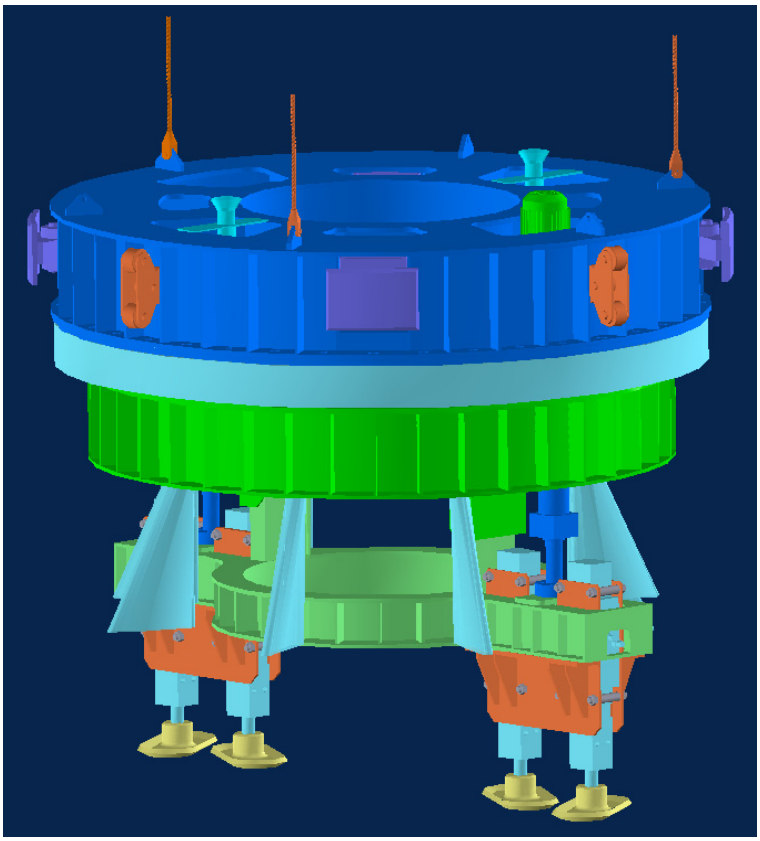


図 2-16　原位置締固め装置の３次元イメージ（側部）

This is a blank page.

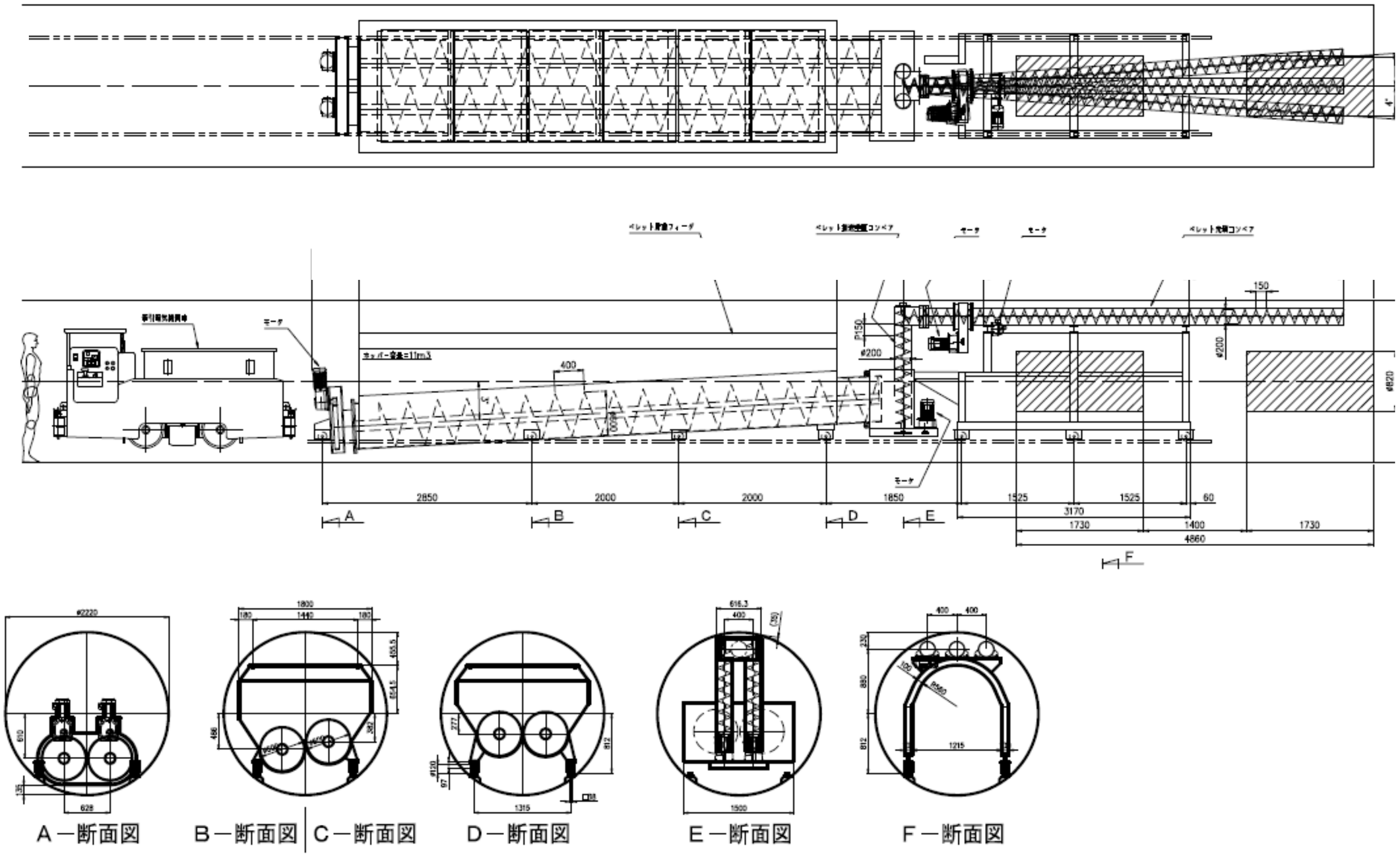


図 2-17　ペレット充填方式定置技術試験設備概念設計図

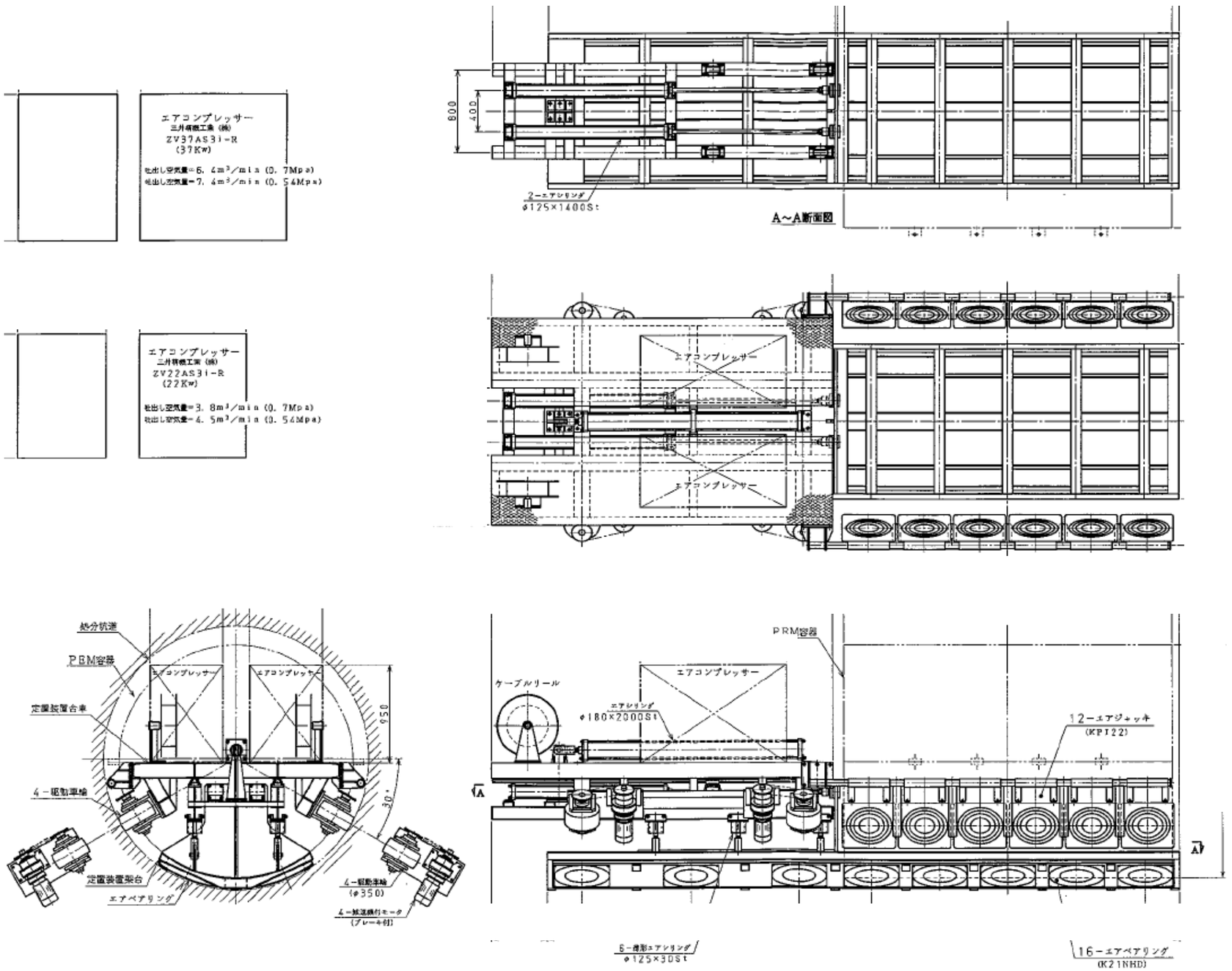


図 2-18　PEM 定置装置全体概念図

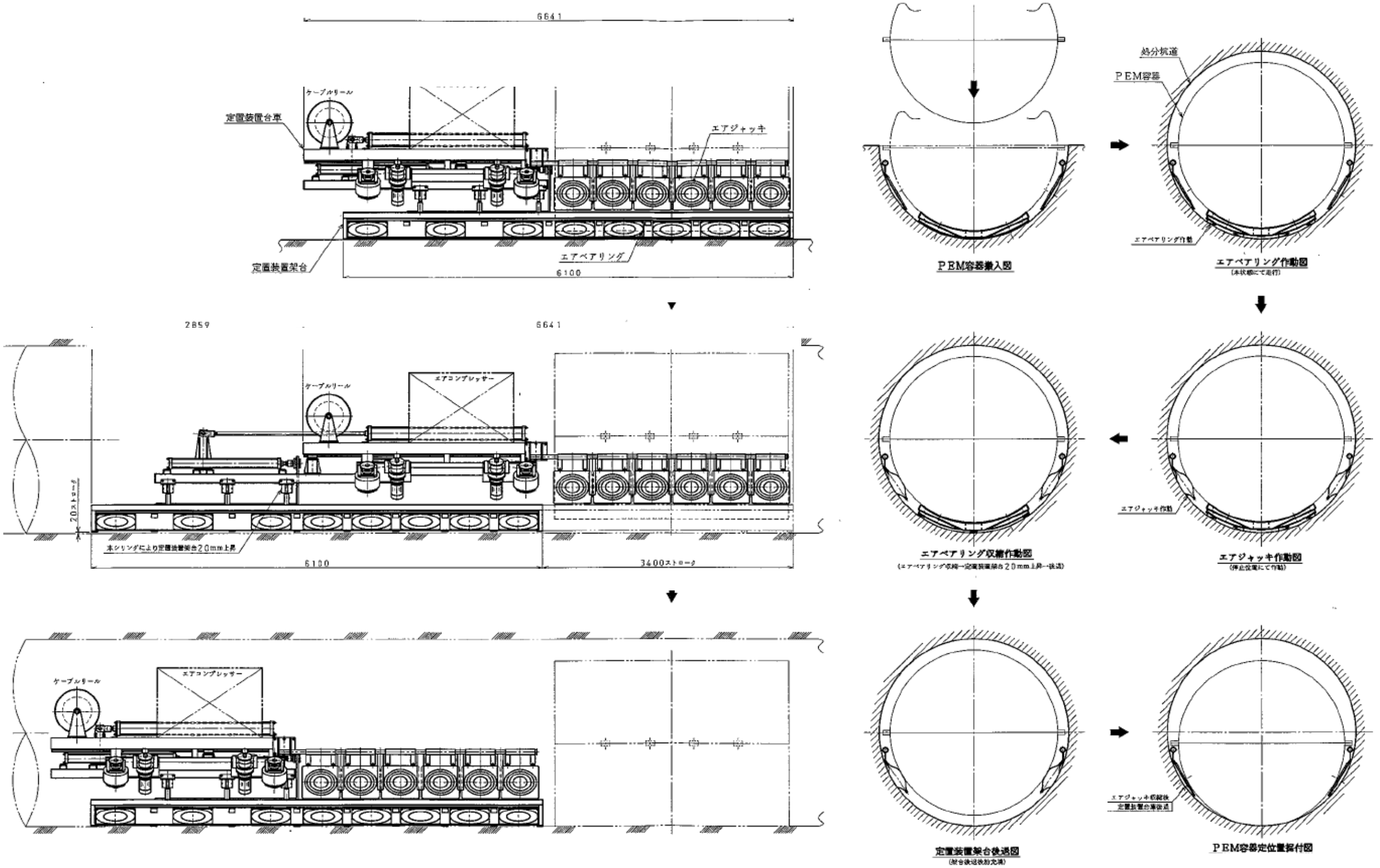


図 2-19　PEM 定置概念フロー

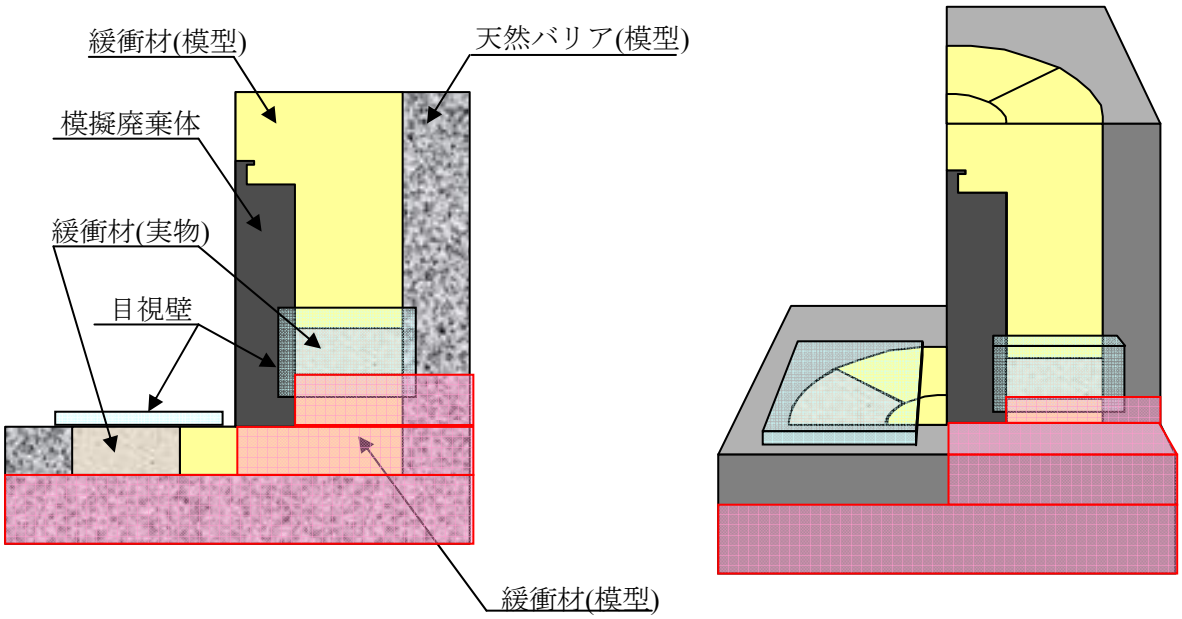


図 2-20　可視化設備イメージ

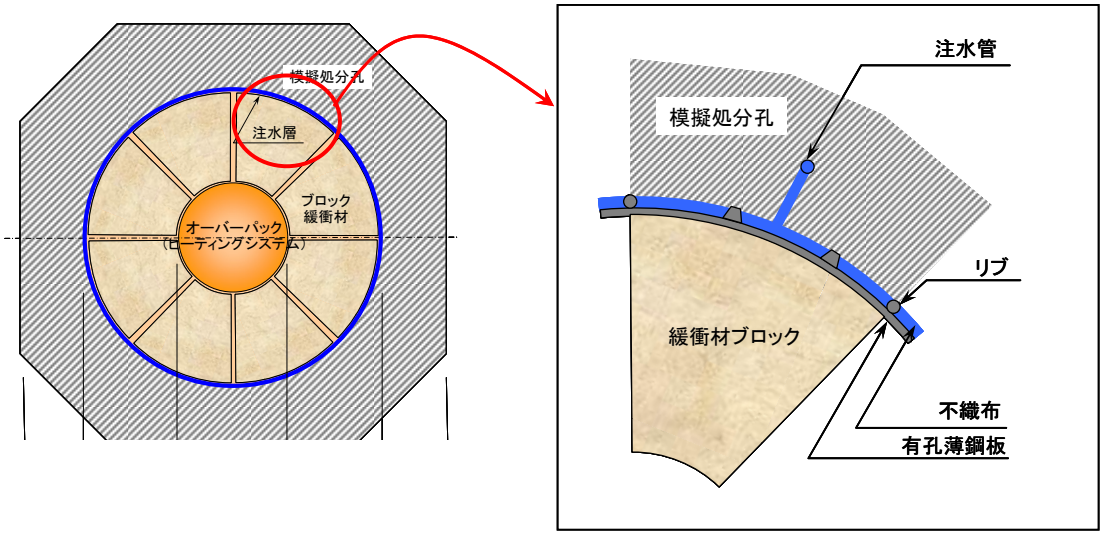


図 2-21　注水層の構成概念

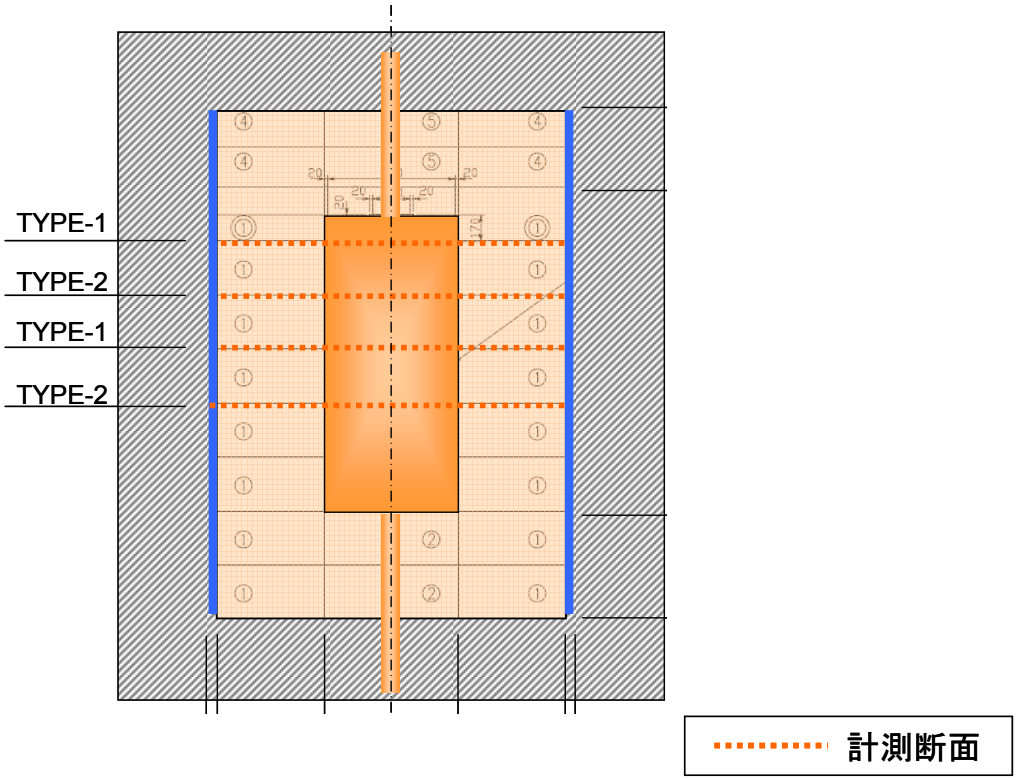


図 2-22 計測機器の断面配置（案）

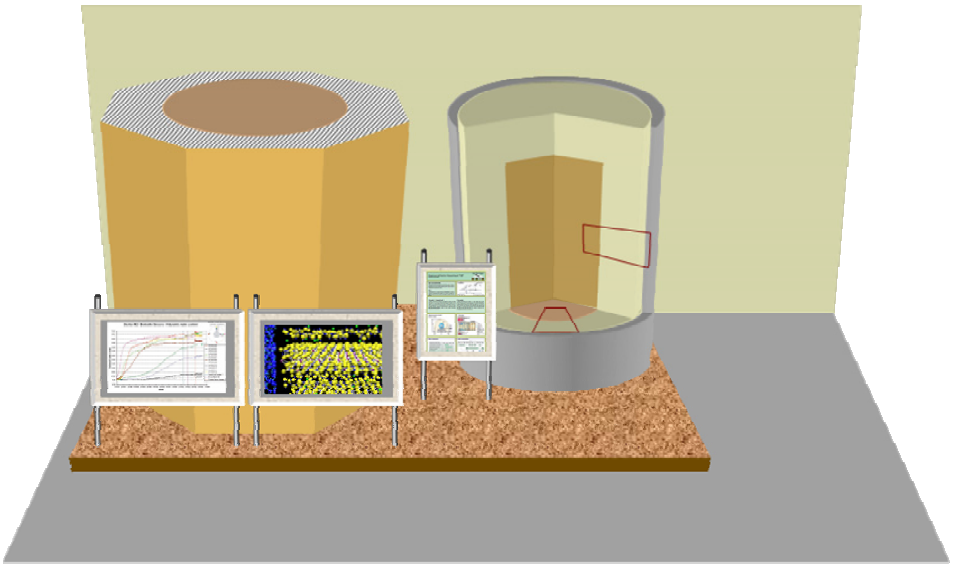


図 2-23　地上での人工バリア長期挙動試験設備の全体構成のイメージ

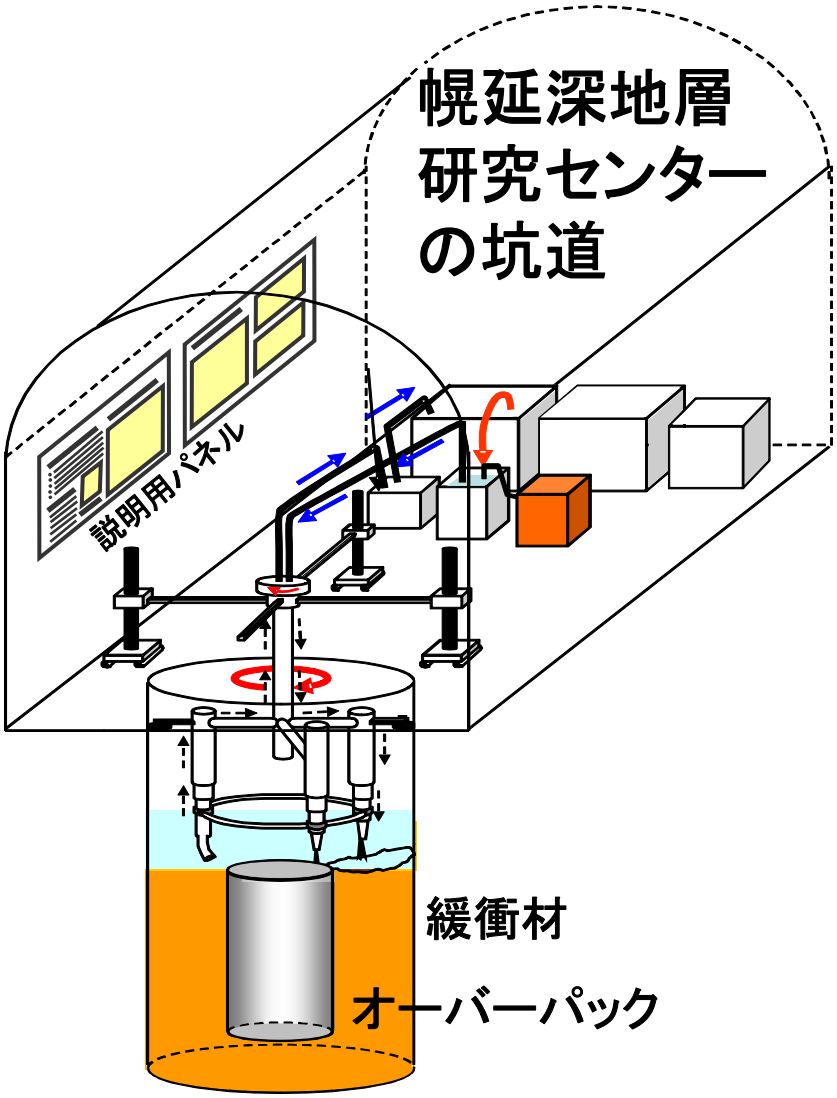


図 2-24　緩衝材の回収試験設備概念図

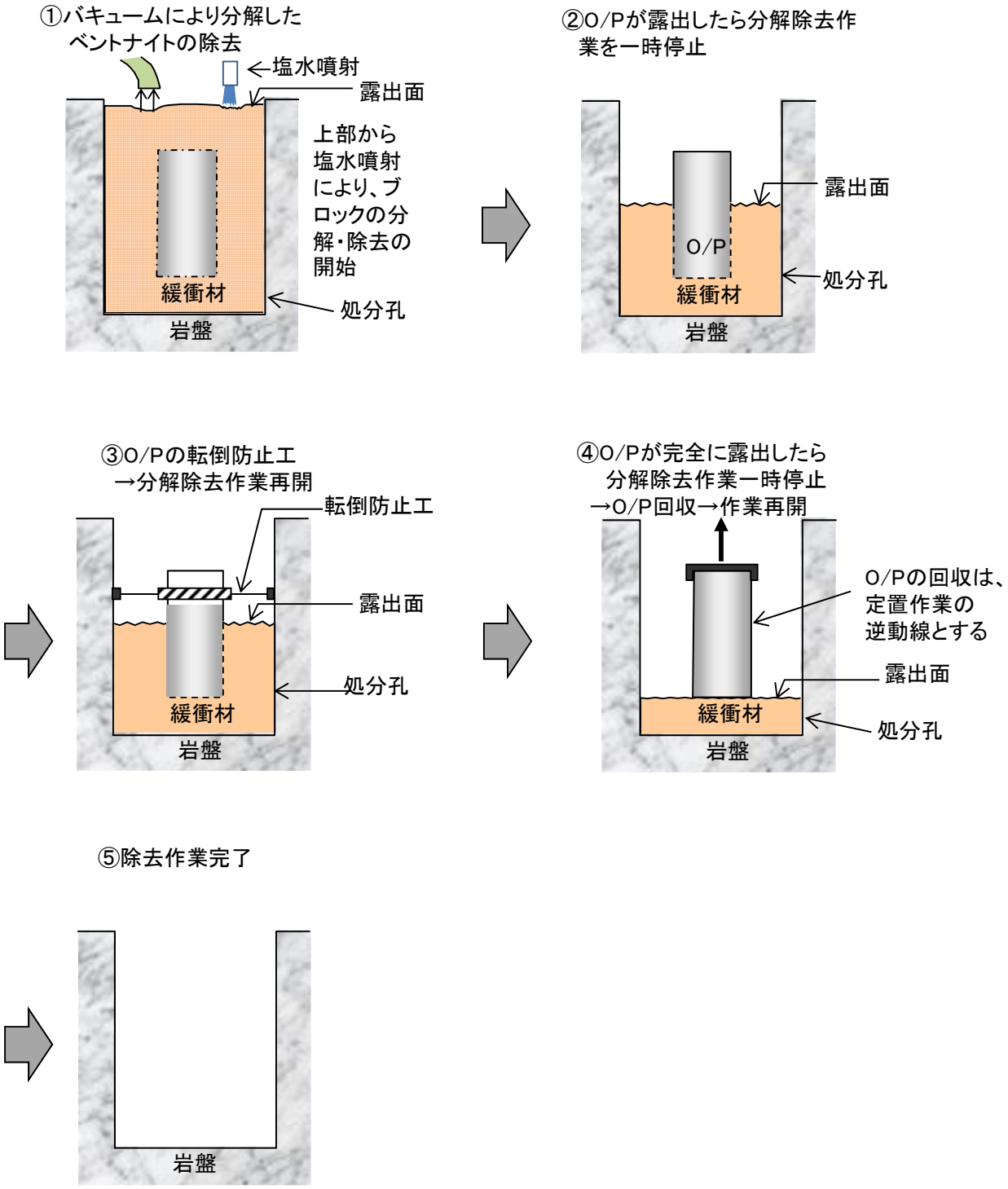


図 2-25　回収技術試験設備の試験手順概念図

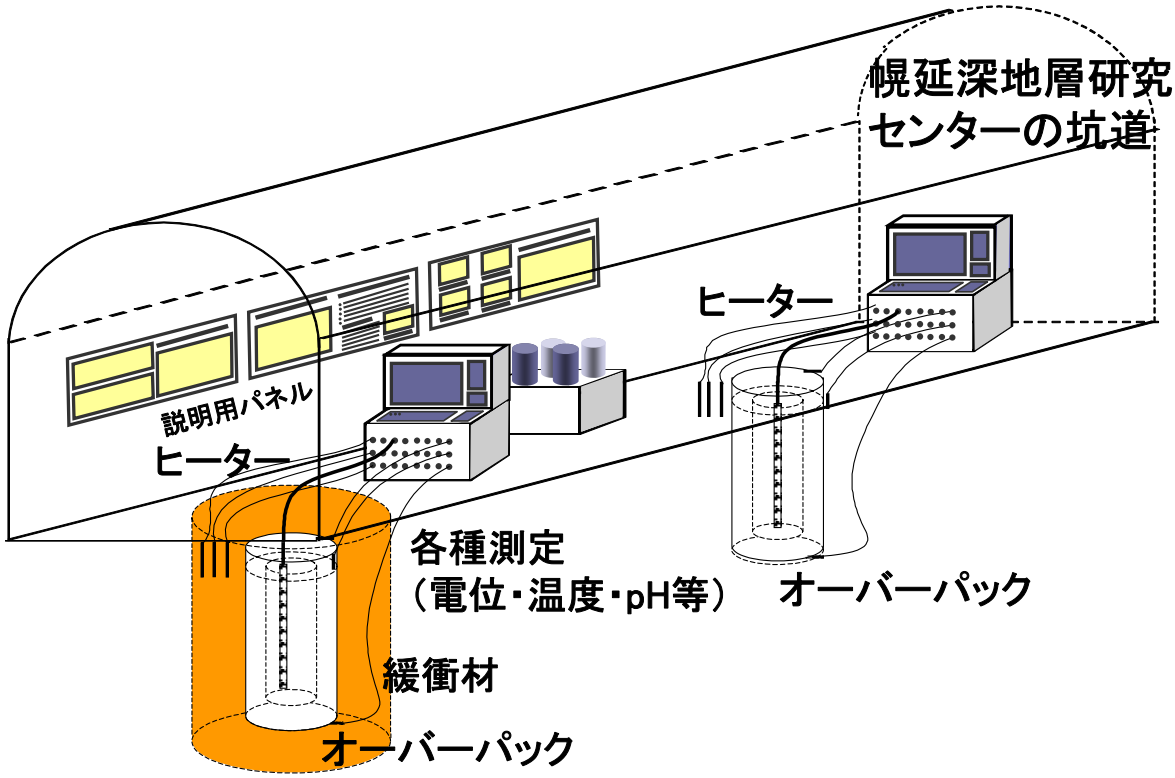


図 2-26　オーバーパックの腐食試験概念図

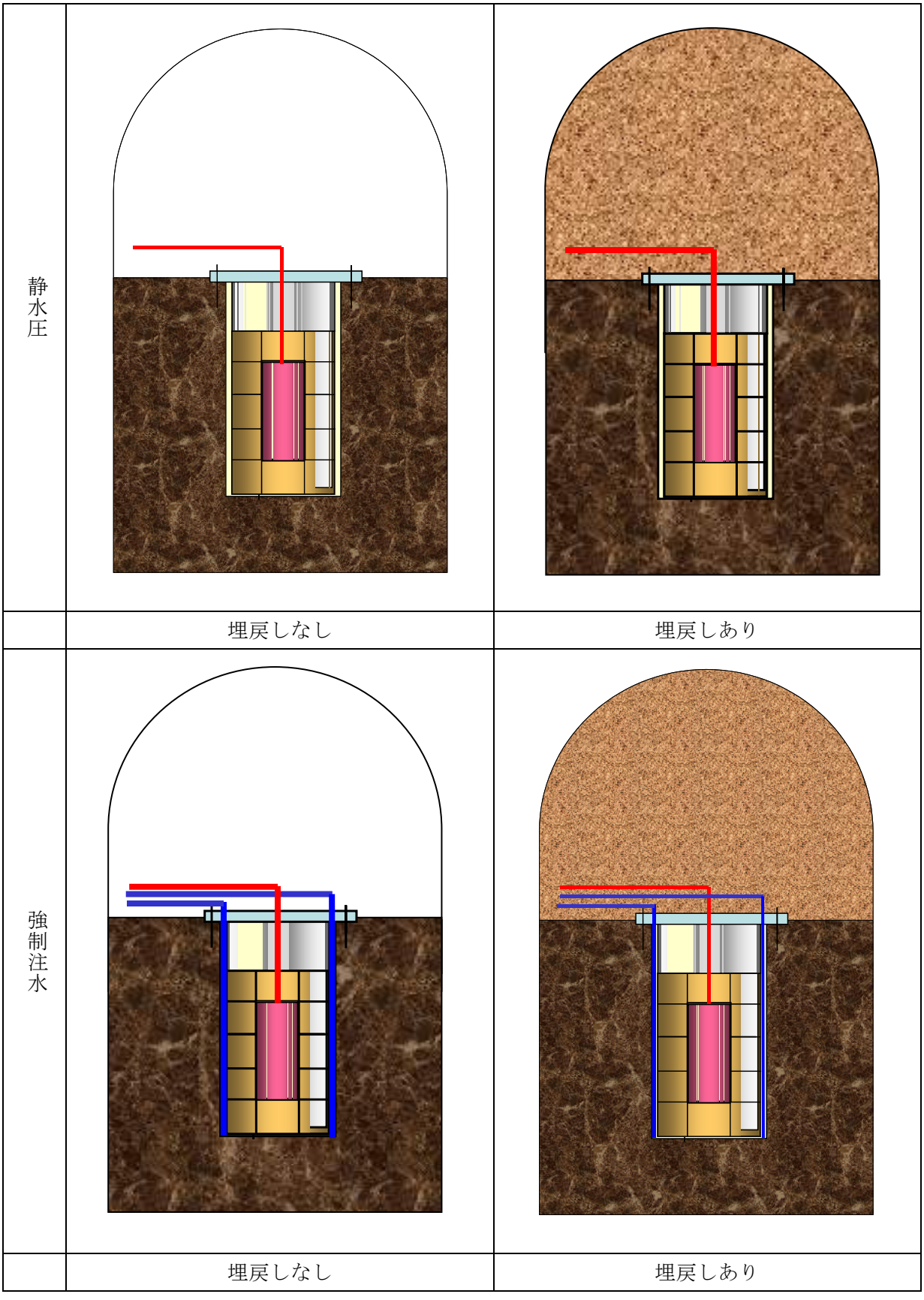


図 2-27　地下での再冠水挙動試験設備の概念図

参考文献

1) .核燃料サイクル開発機構：深地層研究所（仮称）計画，JNC TN1410 98-002(1998).
2) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第２次取りまとめ－総論レポート,JNC TN1400 99-020(1999).
3) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第２次取りまとめ－分冊 1　わが国の地質環境,JNC TN1400 99-021(1999).
4) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第２次取りまとめ－分冊 2　地層処分の工学技術,JNC TN1400 99-022(1999).
5) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第２次取りまとめ－分冊 3　地層処分システムの安全評価,JNC TN1400 99-023(1999).
6) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 19 年度地層処分技術調査等委託費（高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム工学要素技術高度化開発）－遠隔操作技術高度化－(2008).
7) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 12 年度高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査－遠隔操作技術高度化調査－(2001).
8) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 17 年度地層処分技術調査等－遠隔操作技術高度化調査－(2006).
9) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 13 年度高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査－遠隔操作技術高度化調査－(2002).
10) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 14 年度地層処分技術調査等－遠隔操作技術高度化調査－(2003).
11) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 15 年度地層処分技術調査等－遠隔操作技術高度化調査－(2004).
12) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 16 年度地層処分技術調査等－遠隔操作技術高度化調査－(2005).
13) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 18 年度地層処分技術調査等－遠隔操作技術高度化調査－(2007).
14) 太田久仁雄他：:幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第 1 段階）研究成果報告書　分冊「深地層の科学的研究」，JAEA-Research2007-044 (2007).
15) 藤田朝雄他: 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第 1 段階）研究成果報告書　分冊「地層処分研究開発」，JAEA-Research2007-045 (2007).
16) 松井裕哉：幌延深地層研究計画　地下施設を利用した第 2、第 3 段階における調査試験計画案，JNC TN5400 2005-014，(2005).

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度(a)，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率(b)	（数字の） 1	1
比透磁率(b)	（数字の） 1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン(b)	rad	1 (b)	m/m
立体角	ステラジアン(b)	sr(c)	1 (b)	m^2/m^2
周波数	ヘルツ(d)	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		m kg s^{-2}
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	m^{-1} kg s^{-2}
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	m^2 kg s^{-2}
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	m^2 kg s^{-3}
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	m^2 kg s^{-3} A^{-1}
静電容量	ファラド	F	C/V	m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m^2 kg s^{-3} A^{-2}
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m^2 kg s^{-2} A^{-1}
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	kg s^{-2} A^{-1}
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m^2 kg s^{-2} A^{-2}
セルシウス温度	セルシウス度(e)	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	m^{-2} cd
放射性核種の放射能(f)	ベクレル(d)	Bq		s^{-1}
吸収線量，比エネルギー分与，カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m^2 s^{-2}
線量当量，周辺線量当量，方向性線量当量，個人線量当量	シーベルト(g)	Sv	J/kg	m^2 s^{-2}
酸素活性	カタール	kat		s^{-1} mol

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m^{-1} kg s^{-1}
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m^2 kg s^{-2}
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s^{-2}
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m^{-1} s^{-1}=s^{-1}
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	m m^{-1} s^{-2}=s^{-2}
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s^{-3}
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m^2 kg s^{-2} K^{-1}
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m^2 s^{-2} K^{-1}
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m^2 s^{-2}
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s^{-3} K^{-1}
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	m^{-1} kg s^{-2}
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s^{-3} A^{-1}
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	m^{-3} sA
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m^{-2} sA
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m^{-2} sA
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s^{-2} A^{-2}
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m^2 kg s^{-2} mol^{-1}
モルエントロピー，モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	kg^{-1} sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m^2 s^{-3}
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m^4 m^{-2} kg s^{-3}=m^2 kg s^{-3}
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2$ sr)	m^2 m^{-2} kg s^{-3}=kg s^{-3}
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	m^{-3} s^{-1} mol

表５．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	$1L=11=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ kg

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	$1\ Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1\ erg=10^{-7}$ J
ダイン	dyn	$1\ dyn=10^{-5}$N
ポアズ	P	$1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$
ストークス	St	$1\ St=1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1\ sb=1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal=1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G=1Mx\ cm^{-2}=10^{-4}T$
エルステッド(c)	Oe	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(c) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R=2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
ガンマ	γ	1γ=1 nT=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています