

幌延深地層研究計画第2段階(平成17～21年度)を 対象とした工学技術の適用性検討に関する計画案

The Study Plan on Applicability to Actual Geological Environment
Conditions of the Engineering Technology for Geological Disposal of
High Level Nuclear-waste through the Second Phases
in Horonobe Underground Research Project

青柳 茂男 油井 三和 棚井 憲治 川上 進
藤田 朝雄 谷口 直樹 柴田 雅博 小西 一寛
西村 繭果 菊池 広人* 松本 一浩* 松井 裕哉
中山 雅

Shigeo AOYAGI, Mikazu YUI, Kenji TANAI, Susumu KAWAKAMI
Tomoo FUJITA, Naoki TANIGUCHI, Masahiro SHIBATA, Kazuhiro KONISHI
Mayuka NISHIMURA, Hirohito KIKUCHI*, Kazuhiro MATSUMOTO*, Hiroya MATSUI
and Masashi NAKAYAMA

地層処分研究開発部門
ニアフィールドグループ

Near-Field Research Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

本レポートは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/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4

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

電話029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 日本原子力研究開発機構内

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 +81-29-282-5901

幌延深地層研究計画第2段階（平成17～21年度）を対象とした 工学技術の適用性検討に関する計画案

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門

地層処分基盤研究開発ユニット

青柳 茂男[※]、油井 三和、棚井 憲治、川上 進[※]、
藤田 朝雄、谷口 直樹、柴田 雅博、小西 一寛[※]、
西村 繭果[※]、菊池 広人^{*}、松本 一浩^{*}、松井 裕哉⁺、中山 雅⁺

（2006年3月27日受理）

日本原子力研究開発機構（原子力機構）では、北海道の天塩郡幌延町において、堆積岩を対象とした幌延深地層研究計画を進めている。幌延深地層研究計画は、平成17年度より、地下施設の建設に伴い、地上からの調査研究段階（第1段階）から坑道掘削時の調査研究段階（第2段階）へと移行していく。一方、原子力機構では、これまで工学技術の基盤技術開発として、「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-」で示した一連の工学技術をベースとしつつ、幌延地区の地上からの調査段階で得られた地質環境条件を対象として、工学技術の具体的な地質環境への適用性検討を行ってきた。

今後は、工学技術の基盤技術開発として、幌延深地層研究計画の進捗に併せて、第2段階を通じた工学技術の具体的な地質環境への適用性検討を進め、それらの成果を体系的に整理し、提示していく必要があると考える。よって、本報告書では、現時点の幌延の地下施設の建設工程および「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」に基づき、幌延深地層研究計画の第2段階のうち、平成17年度から平成21年度までの5年間に焦点をあてた工学技術の適用性検討に関する研究計画を、個別研究課題毎に整理し立案した（平成17年度は本計画に基づき実施している）。

なお本計画は、今後、幌延の地下施設の施工状況や最新の動向を踏まえて随時変更する可能性があるとともに、より詳細化していく必要がある。

核燃料サイクル工学研究所（駐在）： 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

＋ 幌延深地層研究ユニット

※ 技術開発協力員

＊ 検査開発（株）

**The Study Plan on Applicability to Actual Geological Environment
Conditions of the Engineering Technology for Geological Disposal of
High Level Nuclear-waste through the Second Phases
in Horonobe Underground Research Project**

Shigeo AOYAGI[※], Mikazu YUI, Kenji TANAI, Susumu KAWAKAMI[※],
Tomoo FUJITA, Naoki TANIGUCHI, Masahiro SHIBATA, Kazuhiro KONISHI[※],
Mayuka NISHIMURA[※], Hirohito KIKUCHI^{*}, Kazuhiro MATSUMOTO^{*},
Hiroya MATSUI⁺ and Masashi NAKAYAMA⁺

Geological Isolation Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 27, 2006)

Japan Atomic Energy Agency (JAEA) plans to advance the applicability studies to actual geological environment conditions of the engineering technology for geological disposal through the construction phases (the second phases) in Horonobe underground research laboratory (URL) project and arranges them systematically.

In this report, the study plan on the applicability to geological environment conditions of Horonobe of the engineering technology for geological disposal is arranged every individual research item and drawn up with focus mainly placed on coming five years from 2005 to 2009 in the second phase of Horonobe URL project, according to the current “The plan for the in-situ experiments in Phase II in/around Horonobe URL”.

In addition, in the future this plan may be changed at any time according to the construction situation of Horonobe URL and the latest trend, and it is necessary to go into details.

Keywords: Applicability to Actual Geological Environment Conditions of the Engineering
Technology, The Second Phases of Horonobe Underground Research Project

+ Horonobe Underground Research Unit

※ Cooperative Staff

* Inspection Development Company Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 幌延深地層研究計画の第 2 段階と関連した工学技術の適用性検討に関する研究計画	4
2.1 幌延深地層研究計画の第 2 段階と関連した 工学技術に関する研究開発の全体目標	4
2.2 幌延深地層研究計画の第 2 段階と関連した 工学技術に関する各個別テーマの研究の進め方	7
2.3 平成 21 年度までの工学技術に関する個別研究計画	12
3. おわりに	28
参考文献	30
付録 1 幌延深地層研究計画 第 2 段階における研究計画案	31

CONTENTS

1. INTRODUCTION	1
2. The Study Plans on Applicability to Actual Geological Environment Conditions of the Engineering Technology for Geological Disposal through the Second Phase in Horonobe Underground Research Project.....	4
2.1 The Whole Targets for Research and Development of the Engineering Technology for Geological Disposal through the Second Phases in Horonobe Underground Research Project	4
2.2 The Study Approach of the Each Individual Item in Engineering Technology for Geological Disposal through the Second Phases in Horonobe Underground Research Project	7
2.3 The Each Individual Study Plan on the Engineering Technology for Geological Disposal with a Focus on Five Years until 2009	12
3. CONCLUSIONS	28
REFERENCE	30
APPENDIX 1	31

表 目 次

表 2-1	工学技術に関する研究開発項目の分類	4
表 2-2	幌延深地層研究計画にて予定されている工学技術に関する原位置試験項目	5
表 2-3	工学技術の個別研究項目の分類と原位置試験との対応一覧	6
表 2-4	個別研究計画の表の見方	13
表 2-5	「低アルカリ性セメント」計画表	14
表 2-6	「グラウト」計画表	15
表 2-7	「建設技術」計画表	16
表 2-8	「品質管理」計画表	17
表 2-9	「岩盤の長期健全性」計画表	18
表 2-10	「オーバーパック」計画表	20
表 2-11	「緩衝材」計画表	21
表 2-12	「操業技術」計画表	22
表 2-13	「シーリング・閉鎖技術」計画表	23
表 2-14	「緩衝材の長期力学的変形挙動」計画表	24
表 2-15	「緩衝材の長期変質挙動」計画表	25
表 2-16	「熱－水－応力－化学連成評価技術」計画表	26
表 2-17	「ガス移行挙動」計画表	27
付録表 A-1	実施設計時の地下施設レイアウトにおける建設工程	57-58
付録表 A-2	調査試験・建設全体工程案	59-60

図 目 次

図 1-1	処分孔縦置き方式における処分場の全体設計フロー（松井ほか，2005）	3
付録図 A-1	実施設計時の地下施設レイアウト・掘削の概要（松永ほか，2005）	47
付録図 A-2	調査試験レイアウト案（全体）	48
付録図 A-3	調査試験の年度展開（平成 25 年度までを想定）	49
付録図 A-4	地下施設建設予定地点での予想地質柱状図及び建設中の変位計測断面位置 （内空変位：日常管理計測，岩盤内変位：ステップ管理計測）	50
付録図 A-5	水平坑道における変形挙動計測断面位置 （内空変位：日常管理計測，岩盤内変位：ステップ管理計測）	51
付録図 A-6	立坑部から実施する調査試験項目	52
付録図 A-7	立坑周辺岩盤を対象とした掘削影響試験レイアウト案	53
付録図 A-8	立坑／水平坑道周辺部の調査レイアウト案	54
付録図 A-9	水平坑道部で実施する調査試験レイアウト案	55

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構が平成 11 年 11 月に公表した「わが国における高レベル放射性破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」という）」（核燃料サイクル開発機構，1999）¹⁾においては，人工バリア設計および地下施設設計の地質条件として，わが国における幅広い地質環境の中から硬岩系岩盤および軟岩系岩盤それぞれについて物性値のデータセットを設定し，その条件のもとで工学技術の技術的信頼性を提示した。

「第 2 次取りまとめ」以降，日本原子力研究開発機構（以下，「原子力機構」という）では，これまでに整備してきた地層処分に関連する様々な技術や手法を，実際の地質環境へ適用することを通じてその信頼性を確認していくことを目標として，基盤技術の個別要素に関する研究開発を進めている。その一環として，北海道天塩郡幌延町において進めている堆積岩を対象とした幌延深地層研究計画（例えば，核燃料サイクル開発機構，2002）²⁾を利用して，「第 2 次取りまとめ」をベースとした工学技術の具体的な地質環境への適用性検討を段階的に進めており，平成 17 年度には，幌延深地層研究計画の地上からの調査段階で得られた地質環境を対象として，人工バリアや地下施設の試設計を実施している（核燃料サイクル開発機構，2005a³⁾；松井ほか，2005⁴⁾）。なお，本書で示す「工学技術」とは，「建設・操業・閉鎖に関わる工学技術」，「段階的な地質環境情報に応じた設計手法」，「設計に必要なデータ（長期挙動評価の基盤データ）」，「現象理解に基づくモデル（人工バリア・岩盤の長期挙動の理解）」を統括したものであり，人工バリアや地下施設，すなわちニアフィールドの設計（図 1-1：処分孔縦置き方式を対象とした処分場＜人工バリア，地下施設＞の設計フロー）に必要な技術全般を指す。

幌延深地層研究計画は，平成 6 年の原子力長計（「原子力の研究，開発及び利用に関する長期計画」）においてその位置づけ，重要性が示されている「深地層の研究施設計画」の一つであり，岐阜県瑞浪市で実施中の「超深地層研究所計画」と対をなすものである。なお，幌延の地質環境の特徴は，堆積岩および塩水系地下水環境下であり，瑞浪の地質環境の特徴は，結晶質岩および淡水系地下水環境下である。

幌延深地層研究計画は，約 20 年のプロジェクトとなっており，以下に示す段階毎に調査研究を進めることとなっている。なお，幌延深地層研究計画は，平成 17 年度後半より，地下施設の建設が開始されており，今後，坑道掘削時の調査研究段階へと移行していく。

第 1 段階：地上からの調査研究段階

第 2 段階：坑道掘削時の調査研究段階

第 3 段階：地下施設での調査研究段階

第 1 段階においては，地上からの調査（空中・地上物理探査，地質調査，ボーリング調査）等を実施し，調査対象となる地質環境のモデル化を行うとともに，第 2 段階以降に実施する地下施設建設に伴う地質環境の影響を予測した（核燃料サイクル開発機構，2005b）⁵⁾。

第 2 段階では，坑道掘削中の地質調査，水理調査，地球化学調査及び岩盤力学的調査を実施し，データを取得するとともに，地上からの調査研究段階での予測結果と比較することにより，第 1 段階で実施した調査・モデル化・予測の妥当性を確認する。

また，第 3 段階では，坑道周辺部の地質環境特性の詳細調査を実施するとともに，地層処分研究開発のための原位置試験を実施する。

一方で，工学技術に関して国が行う基盤技術開発は，今後，実施主体や規制機関から，

- ✓ 客観性のある工学技術に関する基盤情報の体系的提示 → 工学技術に関する個別要素技術開発と体系化

- ✓ 地下施設での工学技術の適用性確認
- ✓ 長期的な視点に立った工学技術開発（幅広い地質環境に対する柔軟性）
- ✓ 幅広い地質環境や国内外の最新の動向を踏まえた技術オプション等への取組み
- ✓ 工学技術に関する評価基盤（モデル、データベース等）の信頼性・客観性の向上
- ✓ 地下施設を活用した工学技術に関する規制研究

というようなニーズがあることを想定して、

- ✓ 個別要素技術（e.g. 設計/施工方法、モデル、データベース、測定手法・設定手法）の構築・公開・更新と体系化
- ✓ 地下施設（掘削段階中心）における適用性確認
- ✓ 幅広い地質環境や国内外の最新動向を踏まえた処分概念の高度化や柔軟性の向上

の 3 つを全体目標として、「事業や規制に先行した技術基盤の継続的強化」、「客観性を持った技術の信頼性、実現性提示」、「国民の理解と事業や規制の円滑な推進」を進めていくものと考えられる。

以上を踏まえると、国が行う基盤技術開発の一環として、原子力機構では今後、「資源エネルギー庁委託事業（以下、“エネ庁事業”という）」との連携を図りつつ、幌延深地層研究計画の第 2 段階を利用した工学技術の具体的な地質環境への適用性検討を進め、それらの成果を体系的に整理し提示していく必要があると考える。よって本書では、松井（2005）^⑥で示されている、幌延深地層研究施設の建設工程および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に基づき、幌延深地層研究計画の第 2 段階のうち、平成 17 年度から平成 21 年度までの 5 年間に焦点をあてた工学技術の適用性検討に関する研究計画を立案し、第 2 章にてまとめることとする。なお、第 2 章の構成は、以下のとおりである。

- 2.1 幌延深地層研究計画の第 2 段階と関連した工学技術に関する研究開発の全体目標
- 2.2 幌延深地層研究計画の第 2 段階と関連した工学技術に関する各個別テーマの研究の進め方
- 2.3 平成 21 年度までの工学技術に関する個別研究計画

また、付録として、松井（2005）^⑥で示されている「幌延深地層研究計画地下施設を利用した第 2 段階における調査試験計画案」を原文のまま引用し掲載する。

なお、本計画は、今後、幌延深地層研究施設の施工状況や最新の動向を踏まえ随時変更する可能性があるとともに、より詳細化していく必要がある。

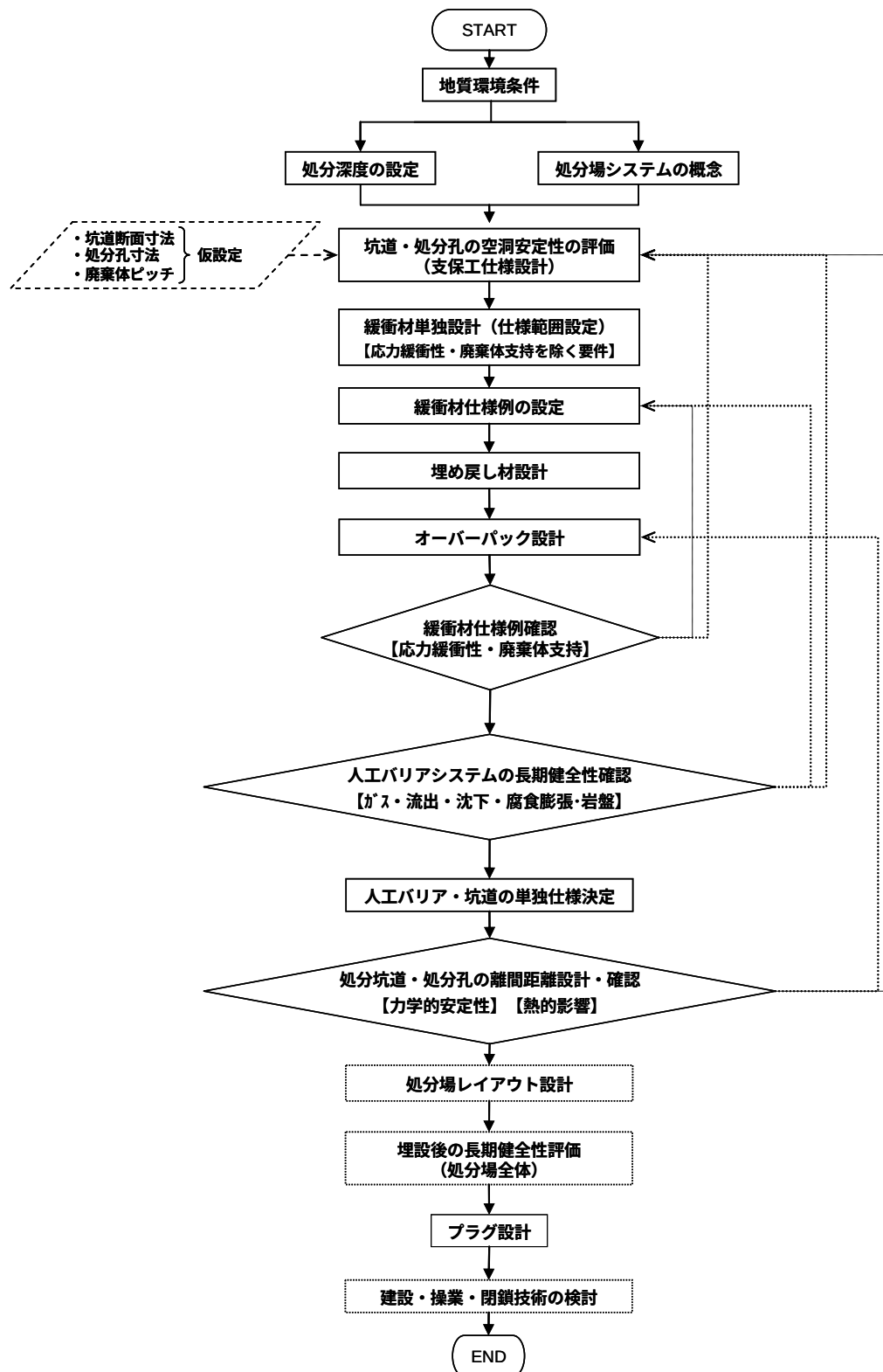


図 1-1 処分孔縦置き方式における処分場の全体設計フロー（松井ほか，2005）

2. 幌延深地層研究計画の第2段階と関連した工学技術の適用性検討に関する研究計画

2.1 幌延深地層研究計画の第2段階と関連した工学技術に関する研究開発の全体目標

原子力機構では、第2次取りまとめで示した工学技術の具体的な地質環境への適用性検討として、幌延の地下施設（Underground Research Laboratory、以下「URL」という）を利用した研究開発を進めている。第1段階（地上からの調査段階）では、試錐調査で得られた地質環境の特徴に対する工学技術の適用性検討と試設計を実施した（核燃料サイクル開発機構、2005a）³⁾。

幌延深地層研究計画の第2段階では、

- ①幌延 URL の建設に伴う調査研究
- ②幌延 URL における原位置試験（第3段階）の準備

の二点を目標として工学技術に関する研究開発を進めていくことになる。また、

- ③幌延深地層研究計画の第2段階および第3段階での直接的な検証は予定していないものの、幌延の URL 付近に分布する岩盤の特徴（例えば、堆積岩、海水環境下）を対象とした研究開発

も並行して進める予定である。なお、H17 年度末現在の幌延の地下施設の建設工程では、3 本の立坑が深度 500m 程度まで達し、第1段目（深度 400m 付近）のループ坑道が展開されるのは H25 年度頃になる予定である（松井、2005）⁶⁾。

一方、工学技術に関する研究開発全体の今後の研究計画は、表 2-1 に示すように、「幌延深地層研究計画の第2段階にて地下施設の掘削に伴い得られる様々な情報や地下施設自体を利用する調査研究（①を目標とするもの全て）」、「地下施設の建設工事には直接関係ないものの、幌延の地質環境条件（地質構造、水理、地球化学、岩盤力学的な環境条件）を対象として実施する室内試験や解析的検討（①ではないが②、③に該当するもの）」、「幌延の地質環境条件を対象とせず、URL での検証も実施しない研究（①、②、③のいずれにも該当しないもの）」の3つに分け、それぞれを A、B、C として分類する。

表 2-1 工学技術に関する研究開発項目の分類

全体目標	分類
幌延深地層研究計画の第2段階にて地下施設の掘削に伴い得られる様々な情報や地下施設自体を利用する調査研究（①を目標とするもの全て）	A
地下施設の建設工事には直接関係ないものの、幌延の地質環境条件（地質構造、水理、地球化学、岩盤力学的な環境条件）を対象として実施する室内試験や解析的検討（①ではないが②、③に該当するもの）	B
幌延の地質環境条件を対象とせず、地下研究施設での検証も実施しない研究（①、②、③のいずれにも該当しないもの）	C

幌延深地層研究計画における工学技術に関する原位置試験の概念は、栗原ほか（2004）⁷⁾で検討されている。松井（2005）⁶⁾では、栗原ほか（2004）⁷⁾で示した原位置試験概念を基に、幌延 URL の実施設計の知見（レイアウト、建設工程）に対応する、「第2、3段階の調査試験計画案」を提示している。

現在は、これら二つの技術資料を基に、幌延の地下施設を利用した工学技術に関する研究開発が進められている。現在、幌延深地層研究計画にて予定されている工学技術に関する原位置試験項目とその実施段階について、上記2つの文献⁶⁾⁷⁾を基に表2-2にまとめる。ただし、上記2つの文献⁶⁾⁷⁾で示している原位置試験計画は、試験の仕様、開始時期、試験場所、試験期間も含めて、幌延 URL の建設過程や諸般の事情に伴い変更される場合がある。

表 2-2 幌延深地層研究計画にて予定されている工学技術に関する原位置試験項目

原位置試験項目	実施段階	分類	研究項目 (表 2-3) との対応
a. 熱-水-応力-化学連成 (T-H-M-C) 試験※	第 3 段階	B	(1)②2), (2)②2), ⑤に対応
b. 緩衝材／岩盤クリープ試験	第 3 段階	B	(1)②2) (2)②1), ④に対応
c. ガス移行挙動試験	第 2～3 段階	B	(2)⑥に対応
d. オーバーパック腐食試験	第 3 段階	B	(1)②1), (2)②2)に対応
e. セメント影響試験	第 3 段階	B	(1)②2), ③2), ③3), (2)②2), ④に対応
f. 低アルカリ性コンクリート施工性確認試験	第 2～3 段階	A	(1)③2)に対応
g. 定置精度確認試験	第 3 段階	B	(1)④2), 4)に対応
h. 坑道閉鎖試験	第 3 段階	B	(1)④3)に対応

※以下、T-H-M-C 試験という。

表 2-2 に示される試験項目のうち、「低アルカリ性コンクリート施工性確認試験」と「ガス移行挙動試験」が、第 2 段階から試験を開始する予定になっている(松井, 2005)⁶⁾が、「ガス移行挙動試験」は緩衝材の飽和時間を稼ぐために、浅い深度における試験専用坑道にて早期に試験を開始するものであり、地下施設建設工事に直接関係するのは、「低アルカリ性コンクリート施工性確認試験」のみである。なお原位置試験には、表 2-2 に示した工学技術に関するものだけではなく、深地層の科学的研究や安全評価手法の高度化に分類される原位置試験もある(付録 1 参照)が、それらについては 2.3 節の「個別研究計画」の中で整理しており、ここでは省略した。

一方で、工学技術に関する個別研究項目を、全体の目標(表 2-1)に併せて分類すると表 2-3 のようになる。表 2-3 で示す個別研究項目は、原子力環境整備促進・資金管理センター(2005)⁸⁾の、“高レベル放射性廃棄物地層処分に係る研究開発全体マップ”における処分技術分野の研究項目の分類に基づき一部改訂したものであり、表 2-3 では、各個別研究項目の幌延 URL における原位置試験との関係(表 2-2)もあわせて示している。

具体的には、各個別項目は、以下のように分類される。

- ✓ 「(1) 全体」は工学技術に関する研究開発全体で取り組む課題
- ✓ 「(1) ③ 2) 低アルカリ性セメント」, 「(1) ③ 3) グラウト」, 「(1) ④ 1) 建設技術」, 「(1) ④ 4) 品質管理」, 「(2) ④ 岩盤」が、地下施設の建設に伴って得られる様々な情報や地下施設自体を利用する調査研究であり、分類 A となる。
- ✓ 「(1) ④ 5) 回収技術」, 「(2) ① ガラス固化体」, 「(2) ③ セメント・コンクリート」, 「(2) ⑦

人工バリアせん断応答挙動」は、幌延の地質環境条件を対象とせず、幌延深地層研究計画での検証も実施しない研究であり、分類 C となる。

- ✓ 上記以外は、地下施設の建設工事には直接関係ないものの、幌延の地質環境条件（岩や水や水理条件）を対象として実施する室内試験や解析的検討、もしくは将来の原位置試験（第 2 段階）に向けた準備であり、分類 B となる。

なお、表 2-3 の個別項目は、表 2-2 で示した原位置試験項目を全て包含しているため、2.2 節以降に示す個別研究計画は、表 2-3 の個別項目毎に作成する。すなわち、以降に示す計画は、幌延の地下施設における原位置試験計画ではなく、幌延深地層研究計画を対象とした工学技術に関する研究計画である。

表 2-3 工学技術の個別研究項目の分類と原位置試験との対応一覧

個別項目	原位置試験 (表 2-2 の試験項目) との対応	分類 (表 2-1)
(1) 工学技術		
①全体	全体計画, 個別項目の統括, 基盤技術の体系的整備, 処分概念・設計オプションの検討	
②人工バリア		
1) オーバーパック	d	B
2) 緩衝材	a, b, e	B
③支保・グラウト・シーリング		
1) シーリング	h	B
2) 低アルカリセメント	f	A
3) グラウト	e	A
④建設・操業・閉鎖技術		
1) 建設技術	全て (試験坑道等の設計)	A
2) 操業技術	g	B
3) 閉鎖技術	h	B
4) 品質管理	全て (特に b)	A
5) 回収技術	×	C
(2) 長期健全性		
①ガラス固化体	×	C
②緩衝材		
1) 緩衝材の長期力学的変形挙動	b	B
2) 緩衝材の長期変質挙動	a, d, e	B
3) 緩衝材流出・侵入挙動	×	B
③セメント・コンクリート	×	C
④岩盤	b, e	A
⑤熱－水－応力－化学連成評価技術	a	B
⑥ガス移行挙動	c	B
⑦人工バリアせん断応答挙動	×	C

2.2 幌延深地層研究計画の第2段階と関連した工学技術に関する各個別テーマの研究の進め方

表 2-3 に示した個別研究項目について、幌延深地層研究計画の第2段階における研究の方向性を概略的に示す。ただし、分類 C については、幌延を対象としていないのでここでは除外する。

(1) 全体・その他

地上からの調査段階で示した処分場の設計手法（核燃料サイクル開発機構，2005a）³⁾の見直しを行うとともに、幌延深地層研究計画の第2段階において得られる地質環境情報をもとにその適用性を確認し、評価ツール、データベース、製作・施工技術との関連をも考慮した実用的視点での処分場全体設計手法を提示する。また、幌延の地質環境条件等も踏まえつつ、サイティングに対する柔軟性向上のための先進技術オプションの検討を行い、それらの特徴を概略的に取りまとめる。

(2) 分類 A: 幌延深地層研究計画の第2段階にて地下施設の建設に伴い得られる様々な情報や地下施設自体を利用する調査研究

1) 低アルカリ性セメント

覆工（場所打ちコンクリート）と吹付コンクリートを対象とした低アルカリ性コンクリートの施工性に関して原位置試験計画を立案するとともに、幌延の地下施設の坑道を利用した原位置試験を実施する。それらを通じて、実際の地質環境に適用可能な施工技術を例示するとともに、材料選定・施工時の留意点を抽出する。なお、低アルカリ性セメントを含むセメント・コンクリートの長期健全性は、他分野の成果（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005）⁹⁾や海外の地下研究施設における研究成果等を踏まえて検討を進める。

2) グラウト

建設・操業中の止水のためのグラウト技術を、処分システムの成立性も考慮した形で整理し提示するとともに、幌延・瑞浪の地下施設を対象として、可能な範囲で具体的な地質環境への適用事例を提示する。具体的には、グラウト適用環境が生じた際に、セメント影響試験として、グラウト注入箇所における pH、Eh のモニタリングや岩盤への影響評価（コア採取）を進めるとともに、例えば、低 pH セメントなどの施工実績の少ないグラウト材料に関する施工試験を実施する。

3) 建設技術

一般に、大規模地下空洞の建設においては、その規模の大きさゆえに、対象となる地質環境を明確に把握することが困難である。そのため、掘削に伴い得られる様々なデータを基に、地上からの調査段階で実施した事前設計にフィードバックし、状況に応じて設計の変更（情報化施工）が行われる。実際の地層処分施設も、数 km 四方の面積で展開されるため、施工に際しては適切な情報化施工を計画しておくことが重要と考えられる。

幌延深地層研究計画の第1段階では、地上からの調査結果を利用して、アクセス立坑周辺岩盤を対象とした設計用物性値の設定、および単一坑道を対象とした空洞安定性評価手法の詳細化を実施した（松井ほか，2005）³⁾。よって、第2段階では、以下に示すように、地下施設の建設に伴う計測・調査などにより得られた情報を用いて、第1段階で実施したアクセス立坑や単一坑道を対象とした設計手法の適用性確認に向けた検討を進めるとともに、地下深部の坑道群を対象としたより詳細な設計用物性値の設定および設計手法の構築に向けた検討も進めていく。

- ① 幌延深地層研究計画の第2段階を利用して、第1段階で設定した立坑周辺岩盤に関する設計用物性値の設定手法や一連の地下施設の設計手法の適用性を評価し、その結果に基づいて処分場設計上の留意点を抽出する。
- ② 情報化施工については、新たに幌延の地下施設の建設工事を対象とした情報化施工計画を立案するとともに、それらの幌延深地層研究計画の第2段階（主にアクセス立坑）における実際の建設工事への適用事例を提示する。
- ③ 処分事業の精密調査段階を念頭におき、幌延深地層研究計画の第2段階で得られた地質環境情報に基づき、地下深部の坑道群を対象とした詳細な設計用物性値の設定例を提示する。
- ④ 地上からの調査段階では取り組んでいない「地下深部の坑道群」、すなわち「多連設坑道」を対象とした設計手法については、第2次取りまとめをベースとし、さらに詳細化を図る。

また、幌延の地下施設の建設工事や調査研究における実績を基に、地下施設の施工技術を整理するとともに、性能評価や定置技術の観点から地下施設の設計・施工への要求事項を抽出する。重要な課題としては、掘削影響領域（以下、「EDZ」という）を抑制するための方法の提示、支保工材料・グラウト・防水シート・ロックボルトなどといった工学的対策工として用いる人工材料の環境への影響（地下水の汚染、岩盤の攪乱など）や長期シーリング性能への影響を踏まえた施工技術の整理、材料選定時の留意点の抽出などがあげられる。また、防災対策（火災・メタンガス）、排水処理の事例提示もこの項目を通じて実施する。

さらに、第3段階の原位置試験環境（坑道仕様）の設計や、双設坑道安定性評価試験の計画立案のための準備を進める。

4) 品質管理

幌延深地層研究計画の第2段階で地下施設の建設に伴い得られる地質環境データに基づき、人工バリアや処分施設の長期安全性の観点から設計、建設、施工段階における品質管理に関わる項目を整理し、幌延を例題とした品質管理計画を提示する。品質管理は、①透明性、②追跡性、③科学的防御性に配慮したドキュメント構造を各段階で構築し、これに基づき整理するものとする。

また、幌延深地層研究計画の第3段階で実施を計画している定置精度確認試験に関して、緩衝材における隙間充填性能に関するデータやエネ庁事業等の国内外における人工バリアの定置技術に関する知見を参考として、原位置試験計画を作成する。なお、定置精度確認試験に関しては、エネ庁事業等における操業技術開発と連携した地下坑道での確認試験も視野に入れて検討する。

5) 岩盤の長期健全性

長期予測の信頼性向上を目的とし、幌延深地層研究計画の第2段階で坑道掘削時に得られる計測データを用いて、岩盤の長期挙動予測モデルの地下深部空洞周辺岩盤の実挙動に対する再現性、および幌延深地層研究計画の地上からの調査段階で設定したモデル定数の設定方法に関する検証を進める。

また、第3段階で実施する緩衝材／岩盤クリープ試験に向けて、地下施設内から実施する長試験錐孔により原位置試験予定地点近傍で採取された岩石サンプルを用いて、評価に必要な力学物性を拡充するとともに、ニアフィールドの複合挙動を考慮した解析手法を整備する。

さらに、性能評価や地質環境調査の分野と協力し、第2段階で予定されている掘削影響試験などを通じて、EDZの性状調査とその長期的な挙動の把握、EDZの自己修復（強度、透水性）特性の調査、安全評価に関するEDZに関するモデルの詳細化を進める。

一方、岩盤の変質挙動については、普通セメントを支保工やグラウト材として適用した場合の、ニアフィールド岩盤の長期劣化挙動について検討を進める。具体的には、これまでの成果（電気

事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005）⁹⁾を基に，幌延，瑞浪の地下施設を利用したグラウトや支保工材に関するセメント影響試験や，NAGRA（グリムゼル岩盤試験場）との LCS（Long-term Cement Studies）共同研究を利用して，その影響程度に関する評価を進める。

(3) 分類 B：地下施設の建設工事には直接関係ないものの，幌延の地質環境条件（岩や地下水化学条件や水理条件）を対象として実施する室内試験や解析的検討

1) オーバーパック

幌延深地層研究計画の第 2 段階で得られる地質環境条件の情報に基づいて，オーバーパックの置かれる環境条件を設定し，この環境条件におけるオーバーパック候補材料の腐食挙動を実験的に検討する。オーバーパック候補材料として，炭素鋼，チタン（チタン合金を含む），純銅を対象とする。各候補材料において，寿命評価やオーバーパック設計に必要な，以下の項目について腐食の生起・進展挙動などの検討を行う。

- ・炭素鋼：腐食形態，腐食速度，腐食局在化，応力腐食割れ
- ・チタン，チタン合金：すきま腐食，水素脆化
- ・銅：腐食形態，腐食速度，腐食局在化，応力腐食割れ

実験で得られたデータに基づき，各候補材料の幌延の地質環境条件に対する適用性を評価するとともに，腐食寿命を評価する。

さらに，オーバーパック候補材料のうち基本材料である炭素鋼について，幌延の地下水条件での腐食モニタリング手法を検討し，原位置試験計画を具体化する。

2) 緩衝材

想定される様々なサイト環境条件に対する処分場や緩衝材の設計および性能評価を実施するのに必要となる評価ツールやデータベースを整備するため，塩水環境下（幌延を対象）における緩衝材の隙間充填性能や止水性に関してエネ庁事業と連携しつつ，緩衝材設計や材料選定に係わる基盤情報を提示する。また，地山の強度が低い堆積岩系岩盤においては，空洞安定性確保のために，セメント系材料による支保工を設置する可能性があることから，既存の研究成果（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005）⁹⁾を踏まえ，セメント影響（普通セメントおよび低アルカリ性セメント）に着目した緩衝材の基本特性データ（透水特性，膨潤特性，力学特性など）を拡充するとともに，評価手法を提示する。さらに，幌延深地層研究計画の第 2 段階で得られる地質環境条件の情報に基づき，第 3 段階で実施予定の各原位置試験に係る緩衝材基本特性データを整備する。

3) 操業技術

エネ庁事業の遠隔操作技術高度化調査の「遠隔溶接・検査の開発」，「ハンドリング・定置の開発」と連携し，幅広い操業環境に対する技術の選定や技術メニューの提示を目的とした操業技術における個別要素技術の適用性確認を進める。具体的には，最新の操業技術を踏まえ，開発された技術の実際の地下施設への適用性検討のため，幌延深地層研究計画の第 3 段階を利用した操業技術における個別技術の実証試験計画の立案を進める。

4) シーリング・閉鎖技術

閉鎖技術の実際の地質環境における適用性を確認するために，幌延を一例とした堆積岩系における閉鎖性能確認項目を抽出するとともに，原位置実規模試験計画を立案する。これまでに，結

晶質岩系において閉鎖技術に関わる施工性・性能の確認を行ってきた。これを踏まえ、幌延深地層研究計画の第2段階を通じて、堆積岩特有の地質特性を対象とした長期安定性、EDZの拡がり等に関わる知見およびベルギー等の諸外国の堆積岩地下研究施設における閉鎖性能試験の考え方、経験を整理するとともに、それらの成果を考慮して、幌延の原位置試験計画を立案する。

5) 緩衝材の長期力学的変形挙動

人工バリアの長期健全性評価の信頼性向上のため、オーバーパックスの腐食膨張、オーバーパックスの沈下、岩盤のクリープ挙動といった、緩衝材の長期健全性に相互影響を及ぼす挙動についての力学的連成挙動評価手法の構築を進める。

また、幌延深地層研究計画における原位置試験では、岩盤クリープとオーバーパックスの腐食膨張を模擬した試験を検討しており、試験方法や規模などの試験計画作成においても上記連成手法を用いてシミュレーション解析を実施して具体的な検討を進める。

6) 緩衝材の長期変質挙動

セメント系材料に起因する高アルカリによる緩衝材の変質については、既存の成果（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005）⁹⁾を反映し、HLWシステムにおける緩衝材の安全機能への影響評価を実施する。また、既存の緩衝材変質予測評価手法を用いて、幌延深地層研究計画の第3段階で予定されているセメント影響試験について、予測解析等を実施し、第3段階における原位置試験実施の可否を含めた検討を行う。

オーバーパックス材料との相互作用による緩衝材の変質については、第3段階で実施が計画されている、オーバーパックス腐食試験および人工バリア試験において、緩衝材変質の観点から試験システムの仕様やデータ取得項目について検討を行う。

7) 熱-水-応力-化学連成評価技術

熱-水-応力-化学連成挙動解析コードの開発においては、幌延深地層研究計画の第2段階で得られる地質環境データを用いて連成挙動解析コードを用いた数値実験を実施し、適用事例の拡充を図るとともに解析コードの信頼性を向上させる。また、第3段階において実施予定の原位置での人工バリア試験に向けた検討として、第2段階で得られる地質環境データを用いて人工バリア試験を想定した予備解析を実施し、解析結果から得られる熱や水などの挙動に基づいて、試験期間や試験規模を考慮した原位置人工バリア仕様の設定を行い、試験計画を策定するとともに、予備解析による熱や水などの時間的・空間的な挙動に基づいて連成挙動データを取得するための計測計画に反映する。さらに、人工バリア試験などにおいて、人工バリアやその周辺における熱、水、応力、化学挙動をモニタリングするセンサーなどの計測技術に関して、室内試験や工学規模試験などによる計測技術の適用性・長期耐久性などの実験的検討を行い、上記の予備解析結果も踏まえて原位置試験に対する計測計画を作成する。

8) ガス移行挙動

評価手法の適用性の確認を目的として、幌延深地層研究計画の第2段階で得られる地質環境条件を踏まえた基礎データの拡充を継続しつつガス移行パラメータ設定方法の検討を行う。また、これらの室内試験結果と解析結果との比較検討を通じて、ガス移行挙動評価手法の改良・高度化を進める。

幌延深地層研究計画の第2段階を通じて、ガス移行挙動試験基本計画の策定と試験準備、ならびにガス移行挙動試験を開始する。具体的には、①室内試験結果との比較検討を通じたガス移行

モデルの改良及び高度化，②幌延ボーリングコアを用いたガス移行パラメータの取得，③ガス移行モデル及び幌延の地質環境情報ならびに②の結果をもとにしたガス移行挙動試験に関する予備解析の実施，④予備解析等の結果を踏まえた原位置試験基本計画の策定，⑤人工バリアの構築である。このうち，「第3段階の準備」としては，上記①，③，④及び⑤が該当し，「幌延の地質環境を対象とした検討（岩石・水の使用）」には，上記②が対応する。以下には「第3段階（原位置試験）の準備」，「幌延の地質環境を対象とした検討」に区分した形で，これらの具体的な実施内容を示す。

(a) 「第3段階の準備」

・ガス移行モデルの改良・高度化

改良型 TOUGH2 および GAMBIT-GWS モデル（Hock ほか，2004）¹⁰⁾を対象として，これまで行ってきたガス移行試験結果などを用いて，その再現性等について検討を行うとともに，課題などを整理したうえで改良を進める。また，原位置試験を踏まえモデルのアップスケーリングや多次元化などの観点でも検討を行う。

・ガス移行挙動試験に関する予備解析

改良型 TOUGH2 および GAMBIT-GWS モデルを用いた予備解析を実施する（平成20年度から平成21年度）

・原位置試験基本計画の策定

ガス移行挙動試験に関する予備解析等を踏まえ，平成20年に第1次基本計画を策定し，平成21年の早い段階で最終計画を作成する。その際，SKBのLASGITプロジェクトやスイスのグリムゼル岩盤試験場での原位置試験（原子力環境整備促進・資金管理センター，2004）¹¹⁾など，海外の事例を参考としつつ実施する。

・人工バリアの構築

ガス移行挙動試験エリアの整備及び人工バリアの構築を開始する（平成21年後半～）。

(b) 「幌延の地質環境条件を対象とした検討」

これまでの緩衝材に関する室内試験に加え，新たに幌延におけるボーリングコアを用いた室内試験を実施し，ガス移行挙動試験対象深度近傍における岩盤の透気特性の把握，ならびに解析上必要となるパラメータの取得を行う。

9) 緩衝材の流出・侵入挙動

緩衝材の流出・侵入挙動に関しては，基本的に亀裂性岩盤（主に結晶質岩）について懸念される事象として取り扱われていることから，堆積岩である幌延深地層研究計画における原位置試験については計画されていない。このため，栗原ほか（2004）⁷⁾では，幌延の地質環境における今後の調査によって緩衝材の流出が起こりうる亀裂が存在する場合には，ボーリング孔に緩衝材の充填を行うなどし，一定期間後のオーバーコアリングにより，侵入挙動を観察するなどの検討方法が提案されている。

地層処分基盤研究施設における緩衝材流出挙動試験設備（BENTFLOW）で実施された侵入試験からは，幌延の試錐調査によって得られたHDB-6孔における実際の地下水（海水系地下水）を用いた場合に，緩衝材の模擬亀裂中への侵入が顕著ではないことが確認されている。この試験結果より，緩衝材の侵入現象は，降水系地下水条件において懸念される事象であることが示唆されるとともに，幌延の地下水条件において侵入現象がさほど問題とならないことが示された。したがって，幌延において侵入現象で対象となるような亀裂が存在している場合には，室内試験より得られた結果の検証という観点で，栗原ほか（2004）⁷⁾で提案されているような緩衝材の充填による観察を行う意義は大きい。これらを踏まえ，幌延深地層研究計画における今後の地質環境

調査の進捗に応じ、緩衝材の流出・侵入挙動に関する試験については適宜検討を行うものとする。

2.3 平成 21 年度までの工学技術に関する個別研究計画

2.2 節で示した幌延深地層研究計画に関連する個別研究項目の研究方針と松井（2005）^⑥で示されている幌延の地下施設の建設工程、レイアウト、第 2, 3 段階の調査研究計画に基づき、平成 17 年度～平成 21 年度の 5 年間を対象とした工学技術に関する個別研究計画の概要について、以下、表形式（表 2-5～表 2-17）でまとめる。また、本計画のベースとなる「幌延深地層研究計画地下施設の第 2 段階における調査試験計画案」は、松井（2005）^⑥より抜粋し、付録 1 に示すこととする。

本表に示す個別計画は、幌延の地下施設における原位置試験計画ではなく、幌延深地層研究計画を対象とした工学技術に関する研究計画である。よって、以下の表では、表 2-3 に示す工学技術に関する個別研究項目について、幌延深地層研究計画での実施項目と関連づけて詳細化することを目的として個別計画をまとめた。幌延深地層研究計画との関連については、「①施設の建設に伴う試験（第 2 段階で実施）」、「②将来の原位置試験に向けた準備」、「③幌延深地層研究計画とは直接関連しないものの、幌延地区の地質環境を対象とした検討」の 3 つに分けて整理した。なお、平成 21 年度末の時点では、幌延の地下施設は予定通り建設工事が進んでも、全ての地下施設の完成には至らず、調査試験も地上からある中間深度までを対象とした一部の調査試験のみが実施されている段階であることが想定される。（付録 1 の表 A-1 を参照）表 2-4 にて、表の見方について補足する。

表 2-4 個別研究計画の表の見方

項 目		
方 針	平成 21 年度までの、幌延深地層研究計画に関連する研究細目の方向性を記載。	
必要性	上記方針で示した研究項目の必要性を記載。	
ア ク シ ョ ン	<u>1. 関連する幌延深地層研究計画</u> →「2.平成 21 年度までの調査研究計画」で示す研究計画と関連する幌延深地層研究計画を記載。原位置試験に限らず、建設に伴う日常管理など、幌延の地下施設を利用した調査・研究・計画立案は全て網羅して記載する。 なお、付録 1 に示す工程表をもとに、平成 21 年度までと 22 年以降に分け、「A) B) C) D) …」と続きのアルファベットで箇条書きとする。なお、アルファベットは、研究項目ごとに閉じた形でナンバリングすることとする。 ・ <u>平成 21 年度までの調査試験</u> ・ <u>平成 22 年度以降の調査試験</u> <u>2. 平成 21 年度までの調査研究計画</u> 工学技術に関する研究として実施する研究計画（主文）は、ここで、①②③の項目に割り当て、箇条書きで(1)(2)(3)…という通し番号を付けて記載する。そして、文末に「1. 関連する幌延深地層研究計画」で記述した関連する幌延深地層研究項目のアルファベットを括弧書きで示す（例えば A, B, F）。工学技術に関する研究と幌延深地層研究計画との関わりが明確になる。なお、太字は平成 21 年度までの調査研究を踏まえて提示できる成果を示す。 ① <u>施設の建設に伴う調査研究</u> ② <u>原位置試験に向けた準備</u> ③ <u>幌延の地質環境条件を対象とした検討</u>	
連 携 計 画	他機関や他分野等との連携計画を記載。	
備 考	幌延深地層研究計画とは直接関係ないものの、ここで一緒に整理しておくべき研究計画や、新たな原位置試験の提案や原位置試験の詳細化の際に留意すべき事項などについて記載。	

(1) 分類 A

1) 低アルカリ性セメント

表 2-5 「低アルカリ性セメント」計画表

項 目	工学技術—低アルカリ性セメント
方 針	幌延の地下施設の水平坑道の一部を利用し HFSC (Highly Fly-Ash contained Silica-fume Cement) を中心とした低アルカリ性セメントを用いた吹付コンクリートを施工して、中間深度までの施工性を確認し、中間深度までの吹付けコンクリートの施工事例および留意点を提示する。
必要性	地下施設での工学技術の適用性確認
ア ク シ ョ ン	1. 関連する幌延深地層研究計画 ・ 平成 21 年度までの調査試験 A) 幌延 URL の建設工事の実施設計・施工計画 B) 平成 21 年度末までの建設実績・日常管理計測データ(140m, 280m 水平坑道を対象) C) 平成 19 年度実施予定の 140m, 平成 21 年度実施予定の 280m 水平坑道において低アルカリ性コンクリートの施工性確認試験 ・ 平成 22 年度以降の調査試験 D) 平成 25 年度末までの建設実績・日常管理計測データ(換気立坑最深部 500m を対象) E) 換気立坑最深部 500m で平成 24 年度に実施予定の低アルカリ性コンクリート施工性確認試験 (140m, 280m 水平坑道計測を含む) 2. 平成 21 年度までの調査研究計画 ① 施設の建設に伴う調査研究 (1) 平成 18 年 6 月稼動予定の幌延の地下施設用コンクリートプラントを用いて低アルカリ性コンクリート材料の供給・試験練りを行い、供給可能性を最終確認する(A)。 (2) 140m, 280m 水平坑道での施工試験の位置・長さを選定し、隣接坑道と比較可能な現場施工性および強度性に関する施工試験の確認・測定項目および計測システムを決定 (A, B)。(隣接坑道では高炉セメントで計画されており、比較可能について事前検討が必要) (3) 吹付コンクリートの施工試験を実施して、吹付時の状況・pH・品質等を計測し、中間深度までの HFSC を中心とした吹付コンクリートの施工性を評価し留意点を抽出 (C) (4) 換気立坑最深部 500m で HFSC を中心とした場所打ちコンクリートの覆工施工試験に適用 (D, E)。(ただし実施は平成 24 年度を予定) ② 原位置試験に向けた準備 「幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメントの適用性に関する研究」の実施 ・ 地上で吹付コンクリートの模擬施工試験を行い原位置吹付試験での使用セメントを選定 ・ HFSC を中心とした吹付コンクリートの施工試験の計画作成 ・ 円盤浸漬液の pH 測定を継続し pH 低下データを取得 ・ 海水暴露試験による鉄筋腐食データを取得し、鉄筋コンクリートの耐久性を評価 ③ 幌延の地質環境条件を対象とした検討 特になし
連 携 計 画	✓ HFSC を中心とした低アルカリ性セメントの特性比較試験をエネ庁事業と共同研究する。 ✓ 低アルカリ性セメントに関する情報をエネ庁事業等と交換する。 ✓ HFSC を含むセメント・コンクリートの長期健全性は他分野(TRU)の成果を反映する。
備 考	✓ 実構造物である固体コンクリートを対象とした pH 低下挙動は、別途解析的に評価する。 ✓ ここで開発する低アルカリ性コンクリートは、平成 22 年度以降に実施予定の 280m 水平(試験)坑道でのガス移行試験の吹付け材、平成 26 年度以降に実施予定の 400m 水平坑道での坑道閉鎖試験のプラグ材、400m 人工バリア試験用の試験坑道区間の支保工材などへ、適用する可能性がある。

2) グラウト

表 2-6 「グラウト」計画表

項 目	工学技術－グラウト
方 針	建設・操業中の止水を目的としたグラウト技術に関する技術メニューを、処分システムの成立性を考慮して提示するとともに、地上からの調査段階を対象とした具体的な地質環境への適用事例を提示する。
必要性	地下施設での工学技術の適用性確認
ア ク シ ョ ン	1. 関連する幌延深地層研究計画 ・平成 21 年度までの調査試験 A) 立坑内での地質観察，湧水量測定（平成 21 年以前） ・平成 22 年度以降の調査試験 B) 立坑内での地質観察，湧水量測定（平成 22 年以降） C) セメント影響試験 2. 平成 21 年度までの試験研究計画 ① 施設の建設に伴う調査研究 なし ② 原位置試験に向けた準備（新規提案） (1) 試験坑道などを利用し，これまでの実績が少ない数種類のグラウト材料（例えば，水ガラス系，低アルカリ性セメントなど）に関して，性能や施工性に関する実績の蓄積を目的とした施工試験に向けた材料開発および原位置試験計画の立案を進める。 (2) 海外の地下研（NAGRA：グリムゼル岩盤試験場）に倣い，地下水への影響として，地下施設建設時に実施したグラウト（普通セメント，低アルカリ性セメント）箇所周辺の任意の点での pH，Eh に関する長期モニタリングを行うとともに，地下施設閉鎖直前にグラウト箇所の岩石サンプルを採取し，グラウト未実施箇所の岩石の特性と比較し，その影響の程度を評価するための準備を進める。 (3) 既存のグラウト技術を整理する。また，性能評価や，長期健全性確保（化学）の観点から，グラウト材料選定時の留意点を抽出する。 (4) 普通セメントの人工バリア，周辺岩盤への長期変質に関する室内試験に関する知見の収集 (5) 低アルカリ性セメント（HFSC など）のグラウト材料としての適用性検討（A，B，C） ③ 幌延の地質環境条件の特徴を対象とした検討 なし
連 携 計 画	✓ セメントなどグラウト材料の人工バリア，周辺岩盤への長期変質に関する試験については，性能評価や他分野との連携が必要。 ✓ セメント材料のバリアへの影響，自己劣化に関しては普通セメント，低アルカリ性セメント含めて，開発中のエネ庁事業と連携して開発していく必要がある。 ✓ 既存のグラウト技術の整理は，エネ庁事業などと情報交換を図りつつ進める。
備 考	✓ グラウトに関する原位置試験は，湧水等の状況によって，施工できない場合もある。 ✓ グラウトに関しては，瑞浪超深地層研究所との連携により検討を進める。

3) 建設技術

表 2-7 「建設技術」計画表

項 目	工学技術－建設技術
方 針	1. 【設計】幌延深地層研究計画の第 1 段階で設定した地質環境条件の設定や施設設計手法についての第 2 段階の中間深度までの検証事例、留意点の提示 2. 【施工】幌延深地層研究計画の第 2 段階の中間深度までの施工実績を対象とした実際の地質環境に対する具体的な建設技術の例示・留意点の抽出
必要性	地下施設での工学技術の適用性確認
アクション	1. 関連する幌延深地層研究計画 ・平成 21 年度までの調査試験 A) 平成 21 年度末までの URL の建設実績・日常管理計測データ・岩石の力学試験データ（換気立坑：～GL400m，東立坑：～GL280m，140m 坑道を対象とする） B) 幌延 URL 建設工事の実施設設計・施工計画 C) 立坑周辺岩盤中の EDZ の調査及び立坑掘削影響試験（東立坑 140m 近辺，280m 近辺の掘削時の調査のみ） ・平成 22 年度以降の調査試験 D) 平成 25 年度末までの建設実績・閉鎖までの日常管理計測データ・岩石の力学試験データ E) 立坑周辺岩盤中の EDZ の調査及び立坑掘削影響試験 F) 水平坑道掘削影響試験 G) 立坑/水平坑道周辺領域の地質環境詳細調査 H) 双設坑道安定性評価試験 2. 平成 21 年度までの調査研究計画 ① 施設の建設に伴う調査研究 (1) 情報化施工に関する手法を提示し、掘削に伴う施設設計（支保パターンなど）・設計用物性値の見直し点を幌延 URL の中間深度までの掘削事例をもとに立坑を中心に整理（A，B） (2) 性能評価の観点から建設技術に要求される要件（EDZ，水みち，掘削対策工等に関する材料選定）等の整理 (3) (3)幌延の地下施設の建設に用いる施工技術（立坑中心）を(2)を考慮して整理するとともに，操業技術の観点を考慮した施設建設（立坑中心）における品質管理項目等の整理（A，B） (4) 掘削工法の違いによる EDZ の性状比較のための準備（C～G）（本格的な調査は H22 年度以降） ② 原位置試験に向けた準備 (5) 地下深部の坑道群（多連設坑道）に関する詳細設計手法および設計用物性値の設定方法の提示，および連設坑道の設計手法に関連する原位置試験計画準備（H） (6) 処分孔縦置き方式におけるピットの掘削計画作成準備（操業技術の適用性確認） ③ 幌延の地質環境条件を対象とした検討 なし
連携計画	✓ 多連接坑道の設計方法：エネ庁事業などと共同研究 ✓ 操業技術からの建設技術への要求（ピットの掘削精度など）：エネ庁事業などと連携 ✓ 安全性能の観点からの建設技術への要求事項の整理：性能評価分野との連携
備考	必要に応じて，処分坑道横置き方式に関する原位置試験に向けた準備を進める

4) 品質管理

表 2-8 「品質管理」計画表

項 目	工学技術－品質管理	
方 針	1. 幌延深地層研究計画の第 2 段階（中間深度）で地下施設の建設に伴い得られる地質環境データに基づき、人工バリアや処分施設の長期安全性の観点から設計、建設、施工段階における品質管理に関わる項目を整理し、幌延を例題とした品質管理計画を提示するとともに、一部ドキュメントの体系化を行う。 2. 定置精度確認試験に向けた検討として、緩衝材に対する隙間充填性能に関するデータや既存の人工バリアの定置技術に関する知見などに基づき、試験での検討項目を整理する。なお、定置精度確認試験に関しては、エネ庁事業等における操業技術開発と連携した地下坑道での確認試験も視野に入れて検討する。	
必 要 性	地下施設での工学技術の適用性確認	
ア ク シ ョ ン	1. 関連する幌延深地層研究計画 ・ 平成 21 年度までの調査試験 A) 幌延における建設、施工に関わる全ての調査・試験が関連 ・ 平成 22 年度以降の調査試験 B) 定置精度確認試験 2. 平成 21 年度までの試験研究計画 ① 施設の建設に伴う調査研究 (1) 建設、施工段階における品質管理に関わる項目を整理し、幌延を例題とした品質管理計画を提示するため、第 2 段階（中間深度）で得られる地質環境データに基づき、設計、建設、施工技術の手法や測定項目などに関わる情報を整理するとともに、処分場の長期安全性の観点から何を品質管理すべきなのか、そのためにはどんな情報を整理しておく必要があるのかを明確化する。(A) ② 原位置試験に向けた準備 (2) 緩衝材に対する隙間充填性に関するデータやエネ庁事業等の国内外における人工バリアの定置技術に関する知見などに基づき、定置精度確認試験での検討項目を整理する。(B) ③ 幌延の地質環境条件を対象とした検討 なし	
連 携	✓ 原子力機構で実施する建設・施工段階における品質管理計画を検討するためには、人工バリアの遠隔ハンドリング・定置技術等の建設・操業技術について検討を実施しているエネ庁事業との連携による情報交換が必要である。 ✓ 人工バリアの定置精度に関わる原位置試験計画の作成において、エネ庁事業等の定置技術などに関する知見が必要である。	
備 考	定置精度確認試験については、今後の検討によって、定置後から解体までにある程度の期間を置くことが考えられる。	

5) 岩盤の長期健全性

表 2-9 「岩盤の長期健全性」計画表

項 目	長期健全性－岩盤	
方 針	1. 長期予測の信頼性向上を目的とし、幌延深地層研究計画の第2段階における中間深度までの調査を利用し原位置挙動への適用性の観点から高度化した岩盤の長期力学挙動評価手法の提示 2. 幌延の地質環境条件を対象とした、ニアフィールドの安全性能に影響を及ぼす岩盤の力学挙動に関する評価手法・評価事例の提示、および設計上の留意点の抽出	
必 要 性	1. 地下施設での工学技術の適用性確認 2. EDZ の調査・詳細なモデル化	
ア ク シ ョ ン	1. 関連する幌延深地層研究計画 ・ 平成 21 年度までの調査試験 A) 平成 21 年度末までの建設実績・日常管理計測データ、岩石の力学試験データ（換気立坑：～GL400m，東立坑：～GL280m，140m 坑道を対象とする） B) 立坑周辺岩盤中の EDZ の調査及び立坑掘削影響試験（東立坑 140m 近辺，280m 近辺の掘削時の調査のみ） ・ 平成 22 年度以降の調査試験 C) 平成 25 年度末(建設実績・閉鎖)までの日常管理計測データ，岩石力学試験データ D) 立坑周辺岩盤中の EDZ の調査及び立坑掘削影響試験 E) 水平坑道掘削影響試験 F) 坑道周辺岩盤の長期安定性評価試験 G) 立坑/水平坑道周辺領域の地質環境詳細調査 H) 岩盤・緩衝材クリープ試験 I) セメント影響試験 2. 平成 21 年度までの試験研究計画 ① 施設の建設に伴う調査研究 (1) コンプライアンス可変型構成方程式を対象とした原位置岩盤（稚内層硬質頁岩）の力学挙動の再現性に関する検証方法・検証例の提示と、幌延深地層研究計画の地上からの調査段階で設定したモデル定数の設定方法に関する検証（A，C）→以後データ蓄積 (2) EDZ の性状把握，EDZ の経時的な性状の変化（強度・透水性回復の可能性）に関する原位置調査の準備・一部データ取得（B，D～G）→原位置試験は H22 以降に実施予定。 (3) 幌延深地層研究計画の第2段階における中間深度までの調査を踏まえた岩盤の長期健全性の観点からの設計上の留意点の抽出 ② 原位置試験に向けた準備 (4) 岩盤および岩盤／緩衝材のクリープ挙動，セメント影響試験に関する原位置試験計画準備，岩盤の長期挙動に関する解析手法の整備（OP 腐食膨張，緩衝材の膨潤のモデル化）（H） (5) セメント影響試験の準備（I） ・ グラウト（普通セメント）による岩盤の劣化挙動調査のため，グラウト箇所周辺の地下水化学特性のモニタリングならびに閉鎖直前に岩石コアを採取し健全部の特性と比較する ・ 支保工（普通セメント）による岩盤の劣化挙動調査のため，140m 坑道などで，支保工裏の地下水化学特性のモニタリングならびに閉鎖直前に岩石を採取し健全部の特性と比較する ③ 幌延の地質環境条件を対象とした検討 (6) 強度回復，熱影響に関する室内試験（現象解明・室内試験方法の確立）（岩石使用）	

表 2-9 「岩盤の長期健全性」計画表（続き）

項 目	長期健全性－岩盤（続き）	
連 携 計 画	✓ 岩盤の長期挙動に対する熱影響試験：エネ庁事業との共同研究 ✓ EDZ の調査・モデル化・対策：性能評価や地質環境分野との連携	
備 考	✓ 岩盤の変質挙動に関しては、既存の研究成果（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005） ⁹⁾ やグリムゼル岩盤試験場における共同研究成果や Mt.Terri プロジェクトの成果を反映する。 ✓ （新規提案）原位置試験項目として，試験坑道の終点を使った「岩盤の自己修復特性の調査（可撓性支保工で故意に変形させる）」，「掘削後早期に，仮設支保工を外しながら閉鎖し，数年間埋め戻し材の特性をモニタリングしながら最終的に再掘削して変形状況や EDZ の性状調査」に関しても，今後詳細化の上，提案する。	

(2) 分類 B

1) オーバーパック

表 2-10 「オーバーパック」計画表

項 目	工学技術—人工バリアー—オーバーパック	
方 針	1. オーバーパック候補材料の幌延の地質環境条件に対する適用性と腐食寿命の評価 2. 幌延の地下水条件での腐食モニタリング手法の提示	
必 要 性	1. 地下研究施設での工学技術の適用性確認 2. 幌延の地質環境条件におけるオーバーパック設計	
ア ク シ ョ ン	1. 関連する幌延深地層研究計画 ・ 平成 21 年度までの調査試験 A) 周辺岩盤中の地下水水質分布調査 ・ 平成 22 年度以降の調査試験 B) 周辺岩盤中の地下水水質分布調査 C) オーバーパック腐食試験 2. 平成 21 年度までの調査研究計画 ① 施設の建設に伴う調査研究 なし ② 原位置試験に向けた準備 (1) 腐食モニタリングおよび環境条件のモニタリング手法の検討：室内試験規模で腐食電位、腐食速度、緩衝材中の Eh、空隙水中のイオン濃度などについて、既存のモニタリング技術の適用性を確認し、原位置試験において適用可能な方法を提示する。(C) ③ 幌延の地質環境条件を対象とした検討 (2) 幌延地下水条件における腐食試験：炭素鋼、チタン、銅を対象として、腐食形態（局部腐食の可能性）、腐食速度、腐食局在化、応力腐食割れ（水素脆化を含む）感受性の評価などを行う。また、腐食挙動に及ぼすセメント材料の影響を確認する。上記の腐食モニタリング（腐食電位、腐食速度など）、環境条件（Eh、イオン濃度など）のモニタリング試験も行う。(A, B) (3) 幌延地下水条件におけるオーバーパック候補材料の適用性評価：(1)の結果に基づいて炭素鋼、チタン、銅の適用性を評価する。(A, B) (4) 幌延地下水条件におけるオーバーパック候補材料の寿命評価（腐食量評価）：(1)の結果に基づいて 1000 年間の腐食深さ、または期待される寿命を評価する。(A, B)	
連 携 画	✓ 腐食試験では、一部溶接材を用いた実験を行う。必要に応じてエネ庁事業との連携を検討する。 ✓ 幌延の地下水水質、セメント材料開発・セメント影響に関する他分野との連携が必要。 ✓ 緩衝材中の水分分布、間隙水特性、オーバーパック表面～緩衝材の温度の把握が必要であり、THMC（表 2-16）との連携が必要。 ✓ 放射線影響、遮蔽厚さの検討にはエネ庁事業との連携またはエネ庁事業の研究成果の反映が必要。	
備 考		

2) 緩衝材

表 2-11 「緩衝材」計画表

項 目	工学技術－人工バリアー緩衝材	
方 針	1. 塩水環境下における緩衝材の隙間充填性能に関して、幌延の地質環境条件を対象とした緩衝材設計や材料選定に係わる基盤情報を提示 2. 緩衝材設計や材料選定の具体化や最適化などに資するため、セメント影響および塩水+セメント影響に着目した緩衝材基本特性データの整備および評価手法の提示 3. 幌延の地質環境条件を考慮した各原位置試験に係わる緩衝材基本特性データの整備	
必 要 性	1. 人工バリア設計手法の適用性確認 2. 地下施設での工学技術の適用性確認 3. 種々のサイト環境条件に対する緩衝材データベースの整備	
ア ク シ ョ ン	1. 関連する幌延深地層研究計画 ・ 平成 21 年度までの調査試験 A) 周辺岩盤中の地下水水質分布調査 ・ 平成 22 年度以降の調査試験 B) 周辺岩盤中の地下水水質分布調査 C) T-H-M-C 試験 D) 緩衝材/岩盤クリープ試験 E) セメント影響試験 2. 平成 21 年度までの試験研究計画 ① 施設の建設に伴う調査研究 なし ② 原位置試験に向けた準備 (1) T-H-M-C 試験に係るデータを拡充し、緩衝材設計用データセットの一例を提示 (C) (2) 緩衝材/岩盤クリープ試験に係るデータを拡充し、緩衝材設計用データセットの一例を提示 (D) (3) セメント影響試験に係わるデータを拡充し、緩衝材設計用データセットの一例を提示 (E) ③ 幌延の地質環境条件を対象とした検討 (4) 塩水環境下における隙間充填性能に関する室内試験を実施し、緩衝材設計や材料選定に係わる基盤情報を整備する。(A, B) (5) 塩水環境下におけるセメント（普通セメントや HFSC 等）影響に着目した室内試験を実施し、評価手法に必要なデータを整備する。(A, B) (6) 各原位置試験に係わる緩衝材の基本特性室内試験を実施し、解析手法に必要なデータを整備する。(A, B)	
連 携 画	✓ 種々の施工方法（ブロック定置方式、ペレット充填方式など）を考慮した塩水環境条件下での隙間充填性能に係るデータの拡充：エネ庁事業等との連携によって、設計要件のひとつである自己シール性に関する基盤情報（基準化など）を整備 ✓ 塩水環境条件下におけるセメント－緩衝材の相互作用に関するデータ整備：他分野との連携（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005）⁹⁾ ✓ 緩衝材基本特性データの整備：エネ庁事業，大学，（製作・施工技術に関しては，エネ庁事業）との連携を図りつつ，体系的に取りまとめデータベースを構築	
備 考		

3) 操業技術

表 2-12 「操業技術」計画表

項 目	工学技術－操業技術	
方 針	多様な地質環境への処分場概念の柔軟性からくる人工バリア定置技術のオプションの検討を行うと共に、エネ庁事業等により開発された最新の操業技術情報を収集し、幌延原位置試験段階における操業技術の個別要素技術に関する実証試験の立案準備を進める。	
必 要 性	・ 地下研究施設での工学技術の適用性確認	
ア ク シ ョ ン	1. 関連する幌延深地層研究計画 ・ 平成 21 年度までの調査試験 なし ・ 平成 22 年度以降の調査試験 A) 操業個別要素技術確認試験（新規提案） 2. 平成 21 年度までの試験研究計画 ① 施設の建設に伴う調査研究 なし ② 原位置試験に向けた準備（新規提案） (1) 人工バリア定置概念オプションの検討 多様な地質環境へ処分場概念として柔軟に対応できる人工バリア定置概念オプションの検討を行う。エネ庁事業などで実施する「遠隔操作技術高度化調査」における人工バリア定置技術に関する情報の収集を行う。(A) (2) 操業個別要素技術確認試験 エネ庁事業などで実施する「遠隔操作技術高度化調査」で実施する室内試験、実規模試験に係る技術情報の収集を行う。(A) ③ 幌延の地質環境を対象とした検討 なし	
連 携 画	操業技術の実証に向けて、JAEA やエネ庁事業等による人工バリアシステム性能、緩衝材の定置方式の概念に関する知見、エネ庁事業等による操業技術開発の観点から連携を図る。	
備 考	本件は、上記(2) ③ 4)「品質管理（表 2-8）」において実施する定置精度確認試験との連携をとり、全体的な合理化も視野に入れていく。	

4) シーリング・閉鎖技術

表 2-13 「シーリング・閉鎖技術」計画表

項 目	工学技術ーシーリング・閉鎖技術	
方 針	幌延深地層研究計画の第 2 段階の中間深度までのズリに係る情報収集およびズリを用いた室内試験を実施し、埋め戻し材への適用性を検討するとともに、閉鎖技術の実証試験の立案準備を進める。	
必 要 性	・ 地下研究施設での工学技術の適用性確認	
ア ク シ ョ ン	1. 該当する幌延深地層研究計画 ・ 平成 21 年度までの調査試験 なし ・ 平成 22 年度以降の調査試験 A) 坑道閉鎖試験 2. 平成 21 年度までの試験研究計画 ① 施設の建設に伴う調査研究 なし ② 原位置試験に向けた準備（新規提案） (1) 坑道閉鎖試験計画の準備、閉鎖概念の整備など（A） (2) プラグ(止水・強度)に関する原位置試験計画の策定 ③ 幌延の地質環境を対象とした検討 下記に示す試験計画の策定と一部試験開始 (3) 掘削ズリの埋め戻し材への適用性の検討（A） 1) シーリング機能：材料選定、性能保証 ・ ベントナイトへの化学的影響（ベントナイトと混合する場合）：ズリの成分分析など ・ 埋め戻し材としての膨潤特性：ベントナイトと混合しての膨潤室内試験など ・ 埋め戻し材としての締固特性：ズリ山における現場締固試験（最適含水比、乾燥密度）、透水試験など 2) 実用性 ・ ズリの大きさ、硬さ、加工の必要性（深度毎、掘削工法毎の比較）：ズリの写真撮影（①施設の建設に伴う調査研究として実施）、ズリの成分分析など ・ 施工計画：施工方法、締め固め方法、品質管理基準、吹付施工への適用性など 3) 設計上の留意点の抽出	
連 携 画	掘削ズリを利用した材料特性評価、閉鎖概念の構築についてはエネ庁事業と連携	
備 考	堆積岩に関する閉鎖要件の検討に関しては、別途検討を実施する。	

5) 緩衝材の長期力学的変形挙動

表 2-14 「緩衝材の長期力学的変形挙動」計画表

項 目	長期健全性－緩衝材の長期力学的変形挙動	
方 針	緩衝材と岩盤の長期力学挙動に関する連成解析手法を構築し，原位置試験計画案の検討を行う	
必 要 性	地下施設での緩衝材の力学的変形挙動評価手法の適用性確認	
ア ク シ ョ ン	1. 関連する幌延深地層研究計画 ・ 平成 21 年度までの調査試験 A) 周辺岩盤中の地下水水質分布調査 ・ 平成 22 年度以降の調査試験 B) 周辺岩盤中の地下水水質分布調査 C) 緩衝材／岩盤クリープ試験 2. 平成 21 年度までの調査研究計画 ① 施設の建設に伴う調査研究 なし ② 原位置試験に向けた準備 (1) 緩衝材の力学的変形挙動に関する原位置試験計画作成準備 (C) 緩衝材と岩盤の長期力学挙動に関する連成解析手法を構築し，原位置試験計画作成に向けて，掘削段階で得られる設計用の岩盤物性値を使ったシミュレーション解析を行う。 ③ 幌延の地質環境条件を対象とした検討 (2) 幌延の地下水が海水系地下水であることを考慮し，幌延地下水または人工海水を用いた緩衝材の力学特性取得と構成モデルのパラメータ設定を行う (A, B)。	
連 携 計 画	✓ 緩衝材と岩盤の力学連成モデルの開発について，エネ庁事業や他分野等との連携を検討中	
備 考	✓ 「長期健全性－岩盤（表 2-9）」などで採取・設定した，岩盤の力学物性値を使用。 ✓ 緩衝材の膨潤に時間を要するため，早い段階からの試験開始が望まれる。	

6) 緩衝材の長期変質挙動

表 2-15 「緩衝材の長期変質挙動」計画表

項 目	緩衝材の長期変質挙動	
方 針	セメント系材料の緩衝材に対する影響について、評価モデルの開発やデータベース開発を行うとともに、実際の地質環境条件及び比較的大きなスケールで試験することにより、室内試験を基に開発を行ってきたセメント系材料の影響評価モデルの確証を行うためのデータを取得する。	
必 要 性	評価モデルの実環境での確証試験 (ただし、原位置試験期間がモデル確証の観点から十分であり期待されるデータが得られるか否か等について、第 2 段階の期間において詳細な評価を行い、本試験の要否を含めて再検討を行う。)	
ア ク シ ョ ン	1. 関連する幌延深地層研究計画 ・ 平成 21 年度までの調査試験 なし ・ 平成 22 年度以降の調査試験 A) セメント影響試験 B) オーバーパック腐食試験 C) T-H-M-C 試験 2. 平成 21 年度までの試験研究計画 ① 施設の建設に伴う調査研究 なし ② 原位置試験段階の準備 (1) 緩衝材の変質に関する鉱物の溶解・沈殿速度や熱力学データの整備を行うとともに、変質予測評価モデルの高度化を行い、原位置試験の検討のための予測解析等の実施により、本試験の実施の要否も含めた研究計画の検討を行い、実施する場合には、施工方法等を含め、詳細な試験計画の策定を行う。(A) (2) 緩衝材とオーバーパック材料である鉄およびその腐食生成物との相互作用に関する室内試験を実施するとともに関連する知見を集約することで、緩衝材の変質劣化挙動の予測手法を開発し、オーバーパック腐食試験や人工バリア試験における緩衝材劣化挙動の予測を行い、試験計画に反映するとともに、第 3 段階における試験において可能であればモデルの確証を行う。(B, C) ③ 幌延の地質環境を対象とした検討 未定	
連 携 計 画	セメント材料の影響による緩衝材変質に関するデータ整備やモデル高度化研究については、TRU 廃棄物処分研究の成果を適宜反映し研究を進める。鉄およびその腐食生成物の影響による緩衝材変質については、オーバーパック材料の腐食に関する研究(表 2-10)、エネ庁事業等とも連携し研究開発を進める。	
備 考	上記 B)オーバーパック腐食試験、および C)人工バリア試験については、従来、計画されていた試験であるが、緩衝材とオーバーパック材料との相互作用による緩衝材の長期変質挙動の観点での成果を得ることを考慮して、試験条件、データ取得項目等について検討を行うこととする。	

7) 熱－水－応力－化学連成評価技術

表 2-16 「熱－水－応力－化学 (T-H-M-C) 連成評価技術」計画表

項 目	熱－水－応力－化学 (T-H-M-C) 連成評価技術
方 針	1. 熱・水・応力・化学連成挙動解析コードの開発において、幌延深地層研究計画の第 2 段階 (中間深度) で得られる地質環境データを用いた数値実験を実施し、適用事例の拡充、解析コードの信頼性向上を図る。 2. 人工バリア試験に向けた検討として、第 2 段階 (中間深度) で得られる地質環境データを用いて連成挙動解析コードによる予備解析を行い、解析結果を試験期間や試験規模を考慮した人工バリア仕様の設定、および計測計画の策定に資する。また、人工バリアやその周辺における熱や水などの挙動を計測する技術について、適用性・長期耐久性の実験的検討を行い、計測計画の策定に資する。
必 要 性	地下施設での工学技術の適用性確認
ア ク シ ョ ン	1. 該当する幌延深地層研究計画 ・ 平成 21 年度までの調査試験 A) 立抗周辺岩盤中の水圧・水質、岩盤物性、EDZ 等に関わる調査・試験 B) 水平坑道掘削影響試験／不飽和・REDOX 試験 ・ 平成 22 年度以降の調査試験 C) 上記 A), B) に関連する 22 年以降の計測・試験 D) T-H-M-C 試験 2. 平成 21 年度までの試験研究計画 ① 施設の建設に伴う調査研究 (1) 幌延深地層研究計画の第 2 段階 (中間深度) で得られる地質環境データを用いて T-H-M-C 連成解析コードによる数値実験を実施し、適用事例の拡充と解析コードの信頼性向上を図る。(A, B, C) ② 原位置試験に向けた準備 (2) 試験期間、試験規模を考慮した人工バリア仕様を設定するために、幌延深地層研究計画の第 2 段階 (中間深度) で得られる地質環境データを用いた予備解析を実施し、熱や水などの挙動を把握する。(A, B, C, D) (3) 人工バリア試験での熱、水、応力、化学挙動を把握するために、それらを計測する技術の選定に資するために、計測技術の適用性、長期耐久性に関して連成試験設備 (COUPLE) を用いた実験的検討を行う。(D) ③ 幌延の地質環境条件を対象とした検討 (4) 連成試験設備 (COUPLE) を用いて、幌延の地下水 (海水系) や岩体 (堆積岩系) を用いた試験、または模擬した環境で試験を行い、連成挙動データを取得し、上記 計測技術の適用性を確認する。(A, C, D)
連 携 画	✓ 計測技術の検討に関しては、エネ庁事業で検討しているセンサー技術との連携が必要であり、エネ庁事業との共同研究による COUPLE を用いたセンサー適用性確認試験 (光ファイバー) を検討中である。 ✓ 解析コードの開発および人工バリア試験に向けた予備解析では、第 2 段階で得られる地質環境データを用いることから、地質環境調査との情報共有が必要である。 ✓ エネ庁事業での塩濃縮・析出に関する研究において、幌延地下水を模擬した環境条件における試験を計画しており、得られる成果は連成挙動解析コードの検証や現象の理解に資することが可能であることから、情報を共有することを検討している。 ✓ 人工バリア試験では、実規模の人工バリアが設置されることから、エネ庁事業で実施されている操業技術に関する情報の収集が必要である。
備 考	

8) ガス移行挙動

表 2-17 「ガス移行挙動」計画表

項 目	ガス移行挙動	
方 針	1. 具体的な地質環境条件を踏まえた基礎データの拡充及びガス移行パラメータ設定方法の提示，ならびにガス移行挙動評価手法の提示。 2. ガス移行原位置試験基本計画の策定と試験準備	
必 要 性	長期健全性評価の信頼性の確保及び具体的な地質環境条件における評価手法の適用性の確認	
ア ク シ ョ ン	1. 関連する幌延深地層研究計画 ・ 平成 21 年度までの調査試験 なし ・ 平成 22 年度以降の調査試験 A) ガス移行挙動試験 2. 平成 21 年度までの調査研究計画 ① 施設の建設に伴う調査研究 なし ② 原位置試験に向けた準備 (1) 改良型 TOUGH2 及び GAMBIT-GWS モデルによる試験結果のシミュレーションを通じたガス移行評価手法の検証・提示（A） (2) 上記のモデルを用いた予備解析及び幌延での地質環境情報をもとに原位置試験基本計画を作成（A） (3) (2)の計画に基づいた原位置試験用人工バリアの構築等（A） ③ 幌延の地質環境条件を対象とした検討 (4) 幌延ボーリングコア，幌延の地下水を用いた室内試験によるデータの整備及びパラメータ設定方法の整理 (5) 緩衝材（レファレンス仕様），幌延の地下水を用いた室内試験によるデータの整備及びパラメータ設定方法の整理	
連 携 計 画	✓ 幌延原位置試験計画の立案：エネ庁事業と連携 ✓ GAMBIT-GWS モデルの検討：エネ庁事業と連携 ✓ 多様な条件を踏まえた基礎データの拡充：エネ庁事業との連携，TRU 研究への成果の提供 ✓ 安全評価上での取扱いの判断に必要となるシナリオ情報等の提示：安全評価への成果の反映	
備 考		

3. おわりに

原子力機構では、今後、工学技術の基盤技術開発として、幌延深地層研究計画の第2段階を通じた工学技術の具体的な地質環境への適用性検討を進め、それらの成果を体系的に整理し提示していくことになる。そのため本書では、工学技術に関する研究開発課題を、幌延深地層研究計画の第2段階における目標から、3つに分類（A, B, C）した。そして、その分類に各研究項目を割り当て、第2段階を通じた研究の進め方を示すとともに、平成21年度までに焦点を当てたより具体的な個別研究計画（研究課題の抽出）を、幌延の深地層研究計画で予定されている調査試験項目と関連付けて、表形式で整理した。

分類Aは、幌延の地下施設の建設工事と密接に関連するもので、「低アルカリ性セメント」、「グラウト」、「建設技術」、「品質管理」、「岩盤の長期健全性」の5つの項目が該当する。これらの研究項目と幌延深地層研究計画の関係を具体的に整理すると、例えば、低アルカリ性セメントは、施工性の検証の観点から、建設工事の支保工材料として実際に用いられる予定であり、グラウト材料に関しては、地下水や岩盤へのセメント影響を調べるため、建設工事でセメント系のグラウト材料を用いた場合を対象として、グラウト箇所における地下水化学特性のモニタリングや岩石のオーバーコアリングの実施を提案した（なお、グラウトは、地下の環境次第では、工事に用いられない場合もある）。また、岩盤の長期健全性に関する研究では、建設で得られる日常管理データなどが必要になり、「建設技術」や「品質管理」については、地下施設の建設工事の実績すべてが対象となる。すなわち、これらの項目は、第2段階から地下施設を用いた研究開発が始まる項目であり、本書で示した計画に沿いつつ、今後、建設工事の進捗と調整を図りながら、より早期から計画を詳細化して、アクションに移していく必要がある項目である。

分類Bは、「オーバーパック」、「緩衝材」、「操業技術」、「シーリング・閉鎖技術」、「緩衝材の長期力学的変形挙動」、「緩衝材の長期変質挙動」、「熱・水・応力・化学（T-H-M-C）連成評価技術」、「ガス移行挙動」、「緩衝材の侵入流出挙動」が挙げられる。これらは、第2段階において直接的に地下施設を利用した調査試験は予定していないものの、幌延という実際の地質環境条件（堆積岩、海水系、多孔質）を対象としたものであり、第2段階で新たに得られる地質環境情報（岩石、地下水サンプルの使用を含む）を必要とする研究、もしくは第3段階で実施する原位置試験のための準備が該当する。これらの研究項目に関連する原位置試験は、建設工事終了後の第3段階からの試験開始（平成25年度以降）を予定しているため、原位置試験計画の詳細化は急務ではないが、最適な試験環境や試験仕様、さらにはモニタリング期間の確保のための原位置試験の詳細化は、施設の建設工事と調整を図りながら、早期のうちから検討を進めたほうが望ましい課題である。なお、「ガス移行挙動試験」については、モニタリング期間の確保の観点から、第2段階の途中から原位置試験を開始する予定であり、他の研究項目よりも早期な詳細化が必要となる。

分類Cは、幌延深地層研究計画での調査研究を予定していない研究である。

表形式でまとめた「平成21年度までに焦点を当てた個別研究計画」では、幌延深地層研究計画との関連を明確にするため、「①施設の建設に伴う調査研究」、「②将来の原位置試験に向けた準備」、「③幌延地区の地質環境（岩石コア、地下水の使用を含む）を対象とした検討」の3つに分けて実施項目を整理した。これらにより、各個別項目（分類Cは除く）で計画している研究細目と幌延深地層研究計画で実施すべき事項を明確に関連付けることができ、工学技術の基盤整備に関する研究側と幌延深地層研究計画の施設建設・地質調査側との共通認識を図ることができたと考える。

なお、幌延のような堆積岩においては、岩盤の強度が小さいことから、空洞の安定性確保のた

めに支保工の使用は避けられなく、場合によっては、止水のためのグラウトも必要となる。従来の地下構造物では、支保工やグラウトの材料の一つとしてセメント材料が用いられるが、セメント材料（高アルカリ環境下）の影響は、地下水組成および緩衝材や岩盤の長期的な変質に繋がる可能性があるため、地層処分ではニアフィールドの長期健全性の観点から、セメント材料の適用性について検討する必要がある。本書では、前提的に、これらに関する研究計画について「セメント影響」という項目は設けずに、低アルカリ性セメントの開発・施工性については「低アルカリ性セメント（表 2-5）」に、グラウト材料の施工性については「グラウト（表 2-6）」に、支保工やグラウトによる地下水組成の変化や岩盤の長期挙動への影響については「岩盤の長期健全性（表 2-9）」に、緩衝材の基本特性への影響については「緩衝材（表 2-11）」に、緩衝材の長期挙動への影響については「緩衝材の長期変質挙動（表 2-15）」にというように、各個別計画の中で記載した。

一方で、幌延の地下施設の建設工事は、平成 18 年度以降に本格的に開始される予定であり、まだ建設工事が本格的に始まっていない現段階では、建設工事の施工状況や数年後の動向など研究計画を立案するにあたり明確に予測できない部分が多い。また、幌延深地層研究計画は、およそ 20 年にわたる長期的なプロジェクトであるため、研究担当者も何代かにわたり引き継がれていく。以上を踏まえて、現段階においては、詳細な研究計画の立案は不要であり、要点を抑えつつ自由度のある計画の立案が最適と考え、本書では、幌延の深地層研究計画において最低限実施すべき具体的な研究細目を抽出し、幌延深地層研究計画と関連付けて概略的にまとめることとした。

よって、今後は、本計画をベースとして、定期的に工学技術に関する個別研究の進捗を整理するとともに、地下施設の建設工事の進捗や高レベル放射性廃棄物の地層処分にに関する最新の動向を踏まえつつ、適宜、個別の研究計画ならびに原位置試験計画を詳細化していくことが必要である。

参考文献

- 1) 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”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN1400 99-022 (1999).
- 2) 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発—平成13年度報告—”，JNC TN 1400 2002-003 (2002).
- 3) 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ—分冊2 工学技術の開発”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN1400 2005-015 (2005a).
- 4) 松井裕哉，棚井憲治，川上進，佐藤稔紀，西村繭果，青柳茂男，藤田朝雄，谷口直樹，菊池広人，松本一浩，油井三和：“設計技術（地下施設設計，人工バリア設計，閉鎖設計）の実際の地質環境条件への適用性評価”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN5400 2005-004 (2005).
- 5) 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ—分冊1 深地層の科学的研究”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN1400 2005-014 (2005b).
- 6) 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”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN5400 2005-014 (2005).
- 7) 栗原雄二，油井三和，棚井憲治，川上進，杉田裕，谷口直樹，平井卓，小川豊和，三原守弘，松井裕哉，藤島敦，盛口洋，宮野前俊一，本間信之：“幌延深地層研究計画における処分技術に係わる原位置試験概念の検討（研究報告）”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN8400 2004-002 (2002).
- 8) 原子力環境整備促進・資金管理センター：“高レベル放射性廃棄物地層処分に関する研究開発全体マップの整備”，原子力環境整備促進・資金管理センター，RWMC-TRJ-04005-1 (2002).
- 9) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構：“TRU 廃棄物地層処分技術検討書—第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—”，JNC TN1400 99-022，FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005).
- 10) Hoch, A. R., Cliffe, K. A., Swift, B. T. and Rodwell, W. R.: "Modelling gas migration in compacted bentonite", GAMBIT Club phase 3 final report, POSIVA 2004-02 (2004).
- 11) 原子力環境整備促進・資金管理センター：“地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査 人工バリア・天然バリアガス移行挙動評価”，原子力環境整備促進・資金管理センター (2004).

付録1 幌延深地層研究計画

第2段階における研究計画案

「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」, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN5400 2005-014 (2005)」より転載

1. はじめに	33
2. 幌延深地層研究計画 第2段階における工学技術に関連する研究計画案の概要	33
2.1 概要	33
2.2 深地層の科学的研究	34
(1) 立坑から実施する調査試験	34
(2) 水平坑道から実施する立坑周辺岩盤を対象とした掘削影響試験	39
(3) 立坑／水平坑道周辺部の調査	41
(4) 水平坑道で実施する調査試験	43
2.3 処分技術の信頼性向上	45
(1) 水平坑道で実施する調査試験	45
3. 幌延深地層研究における調査試験・建設全体工程案	46

This is a blank page.

付録1 幌延深地層研究計画 第2段階における研究計画案

1 はじめに

幌延深地層研究計画の第2, 第3段階における全体研究計画については, 技術資料「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」(松井, 2005)¹⁾, 「幌延深地層研究計画における処分技術に係わる原位置試験概念の検討」(栗原ほか, 2004)²⁾にてまとめられている。ここでは, 松井(2005)¹⁾の中から, 2章で示した工学技術の研究計画に関連する, 第2段階の調査試験計画の概要を抽出し再掲する。本計画は, 施工状況や数年後の情勢を踏まえ随時変更される可能性があるとともに, 今後より詳細化していく必要がある。

図 A-1 に, 幌延の地下研究施設の実施設設計時のレイアウト, 掘削の概要を示す。

2 幌延深地層研究計画 第2段階における工学技術に関連する研究計画案の概要

2.1 概要

幌延深地層研究計画の第2段階では, 以下の原位置試験を計画している。

- 深地層の科学的研究
 - ✓ 立坑内での地質観察、湧水量測定
 - ✓ 立坑周辺岩盤中の水圧・水質および変形挙動計測
 - ✓ 立坑周辺岩盤中の EDZ の調査及び立坑掘削影響試験
 - ✓ 覆工応力・支保工応力測定
 - ✓ 立坑／坑道周辺部の地質環境詳細調査
 - ✓ 水平坑道掘削影響試験／不飽和・REDOX 試験
- 処分技術の信頼性向上
 - ✓ 低アルカリ性コンクリート施工性確認試験
 - ✓ ガス移行挙動試験

実施設計の地下施設レイアウト(図 A-1)における第2段階の調査試験の全体レイアウト案を図 A-2 に, 年度毎の調査試験の展開を図 A-3 にそれぞれ示す。また, 地下施設の実施設設計で設定した, 地下施設建設予定地点での予想地質柱状図および建設中の変位計測断面位置を図 A-4 に, 水平坑道における変形挙動計測断面位置を掲載する。

なお, 第3段階においては, 現在のところ, 以下に示す試験が予定されている。

- 深地層の科学的研究
 - ・ 双設坑道安定性評価試験
 - ・ 坑道周辺岩盤の長期安定性評価試験
 - ・ 断層／割れ目帯及びその周辺の地質環境特性調査
 - ・ 地震時の地質環境変動に関する観測
- 処分技術の信頼性向上
 - ・ 熱-水-応力-化学(T-H-M-C)連成試験/定置精度確認試験
 - ・ オーバーパック腐食試験
 - ・ セメント影響試験

- ・ 岩盤・緩衝材クリープ試験
- ・ 坑道閉鎖試験
- 安全評価手法の高度化
 - ・ 人工バリア中／天然バリア中／断層及びその周辺部を対象としたトレーサー試験

2.2 深地層の科学的研究

(1) 立坑から実施する調査試験

第1段階で実施した地質環境（地質・地質構造、水理、地球化学、岩盤力学）への影響予測解析結果の妥当性を確認するためのデータ取得を目的とした調査を実施する。調査は、立坑部が対象となるため、工程に及ぼす影響を考慮し、ルーチンワークとして掘削サイクルに組入れやすいもの、立坑内より最大 50m 程度の短いボーリング孔を用い短時間で機器の設置や調査が終了するもので構成する。

①地質観察

a)目的

第1段階で構築した地質・地質構造モデルの妥当性評価及び坑道スケールにおける地質学的な観点からの不均質性評価のためのデータ取得

b)実施位置

各立坑の側壁及び切羽面

c)測定時期/頻度

1 掘削毎（地下施設の実施設設計では、1 掘削サイクルごとに 2 時間の地質観察の時間が考慮されている）

d)位置及び測定時期/頻度の設定根拠

立坑部は覆工や掘削により坑道壁面・切羽を後から観察することが不可能であるため。

e)実施内容

切羽及び坑壁のスケッチ、写真撮影、サンプリングなど

f)期待される成果

地質構造の 3 次元的な不均質性の把握

g)留意事項

岩石の色が暗緑色であり、坑道内の暗い場所では細かい観察が困難になる可能性が考えられるため、第1段階の予測結果の妥当性確認のためのデータ取得という観点から観察項目を絞る必要がある。

②立坑への湧水量測定

a)目的

第1段階で実施した地下施設建設に伴う地下水流動影響予測結果及び構築した水理地質構造モデルの妥当性の検討

b)実施内容

140m, 280m, 400m, 500m 坑道深度に集水リングを設け、立坑壁面からの区間湧水量を経時的に計測する（実施設設計上は全立坑においてほぼ 50m ピッチで集水リングを設け湧水量計測を実施する予定）。

c)実施位置

140m, 280m, 400m, 500m 坑道レベル立坑部（実施設計上は全立坑においてほぼ 50m ピッチで集水リングを設け湧水量計測を実施する予定）。

d)測定時期/頻度

連続観測

e)位置及び測定時期/頻度の設定根拠

後述するボーリング孔を利用した調査と同一地点で行うことにより、単なる妥当性確認のためのデータの取得のみではなく、坑道周辺部で生じる水理学的掘削影響（水压低下によるガス発生、湧水による地下水流入に伴う不飽和の発生や応力変化による透水性の変化など）の発生メカニズムまで検討することが可能となる

f)期待される成果

地下水流動影響予測結果の精度の検討、坑道周辺部で生じる水理学的掘削影響の発生メカニズムの検討

g)留意事項

坑壁近傍では、溶存ガスがバブル化することにより見かけの透水係数がさらに小さくなり、結果として湧水量はその影響を受ける可能性がある。また、透水係数が元々小さいため、湧水量として測定できるレベルの地下水が流れるかは不明である。薬液注入やグラウトを伴う補助工法が導入されるような掘削区間では基本的に実施する意味がないため、測定地点の変更もしくは中止が必要

③周辺岩盤中の地下水の圧力分布調査

a)目的

第 1 段階で実施した地下施設建設に伴う地下水流動影響予測結果及び構築した水理地質構造モデルの妥当性の検討並びに坑道スケールにおける水理学的な観点からの不均質性評価のためのデータ取得

b)実施内容

立坑近傍の水理環境変化をこれまでに把握されているユニット（力学概念モデルにおける各ゾーン）ごとに、140m 坑道、280m 坑道および 400m 坑道より鉛直ボーリング孔を坑道底盤からの距離を替えて 2～3 孔掘削し、湧水量測定と同様なピッチ（約 50m 間隔）でマルチパッカーシステムによる水压観測を実施することとする。

また、当初計画していた立坑からの水平ボーリング孔は、最初に水理的・地球化学的影響範囲が水平面内でどの程度広がるかを把握できる最小限数量（3 孔/1 深度）とする。

c)実施位置

湧水量測定と同一箇所

d)測定時期/頻度

連続観測

e)位置及び測定時期/頻度の設定根拠

前述の湧水量調査と合わせ、掘削影響の発生メカニズムまで検討することが可能となることと、第 3 段階の調査試験エリアを含む範囲の地質環境に関する初期条件データを把握する必要があること（モニタリングを念頭に置く）

f)期待される成果

地下水流動影響予測結果の妥当性の検討、坑道壁面近傍におけるガスの有無及びそれが湧

水量に及ぼす影響（＋岩盤が有する水理学的不均質性の評価）

g)留意事項

立坑・水平坑道から掘削するボーリング孔長が相対的に長い（50～100m 程度）ために、その間の立坑及び水平坑道部掘削と切羽停止期間が掘削サイクルに与える影響を考慮する必要がある。立坑部は一度設置するとメンテナンスには多大な時間と費用を要するため、その点を考慮した測定機器を使用する必要がある。薬液注入やグラウトを伴う補助工法が導入されるような掘削区間では基本的に実施する意味がないため、測定地点の変更もしくは中止が必要

④周辺岩盤中の地下水の水質分布調査

a)目的

第1段階で実施した地下施設建設に伴う地下水の化学的影響予測結果及び構築した水理地質構造モデルの妥当性の検討

b)実施内容

③の計測装置より、地下水の採水・分析を実施する。

c)実施位置

湧水量測定、水圧観測と同一深度

d)測定時期/頻度

設置直後は短いスパンで、定常的な状態になったら数ヶ月に1度の頻度

e)位置及び測定時期/頻度の設定根拠

前述の湧水量調査、水圧観測と合わせ、現象の発生メカニズムまで検討することが可能となることと、地球化学的な不均質性（鉱物組成や地下水組成等）のスケールに関する情報がないこと及び第3段階の調査試験エリアを含む範囲の地質環境の初期条件データを取得する必要があること

f)期待される成果

地下水の化学的影響予測結果の妥当性の検討、岩盤が有する化学的不均質性の評価、坑道壁面近傍におけるガスの有無及びそれが地下水の化学組成に及ぼす影響

g)留意事項

立坑・水平坑道から掘削するボーリング孔長が相対的に長い（50～100m 程度）ために、その間の切羽停止期間が掘削サイクルに与える影響を考慮する必要がある。立坑部は一度設置するとメンテナンスには多大な時間と費用を要するため、その点を考慮した測定機器を使用する必要がある。薬液注入やグラウトを伴う補助工法が導入されるような掘削区間では基本的に実施する意味がないため、測定地点の変更もしくは中止が必要

⑤立坑周辺岩盤中の掘削影響領域の物性に関する調査

a)目的

第1段階で実施した地下施設建設に伴う周辺岩盤への影響、予測結果及び構築した岩盤力学モデルの妥当性の検討

b)実施内容

立坑より、立坑径の1～2倍程度の長さのボーリング孔を水平方向（4方向程度）に掘削、弾性波探査（PS 検層等）、孔内載荷試験、透水試験などを実施する。弾性波探査は坑壁から連続的に、孔内載荷試験・透水試験は、坑道壁面からの距離を変え4～5箇所程度実施する。

c)実施位置

地下施設実施設計における水平坑道深度（立坑部の 140m, 280m, 400m, 500m レベル）

d)測定時期/頻度

調査用ボーリング孔掘削後すみやかに実施（掘削時に発生した EDZ の物性の取得）。第 2 段階終了後も数年おきに同位置で同じ計測を実施し、EDZ の範囲の変化やその物性の長期的変化を把握する。

e)位置及び測定時期/頻度の設定根拠

岩盤力学モデルの妥当性確認のための 3 次元的なデータが得られるとともに、坑道周辺部の水理状態変化の情報（湧水量測定や地下水の水圧/水質観測位置）と合わせ空洞周辺岩盤中の水-応力連成挙動評価に寄与するデータを提供する。掘削影響領域の長期的変化を把握するため、第 3 段階終了時まで同じ調査を繰り返すことから、地下施設工事終了後にもアクセス可能な地点である必要がある。

f)期待される成果

力学的な掘削影響予測解析結果の精度の検討（力学的物性の変化＋立坑径の違いが変形挙動に及ぼす影響）、岩盤が有する力学的不均質性の評価、掘削に伴う物性変化の程度と範囲及びそれらの深度変化（立坑周辺部の EDZ が安全評価に影響を及ぼす可能性があるか否かのバックグラウンドデータ）

g)留意事項

全坑道展開後に測定地点へのアクセスルートが確保できた場合は、同じ調査用ボーリング孔で立坑部周辺に発生した EDZ の長期的な変化を見るための試験を実施できるため、立坑掘削作業での孔口部の損傷を避ける措置が必要。

⑥立坑周辺岩盤の変形挙動計測**a)目的**

第 1 段階で実施した地下施設建設に伴う周辺岩盤への影響予測結果及び構築した岩盤力学モデルの妥当性の検討、地表～地下深部までの連結経路となる可能性がある立坑周辺の EDZ の範囲とその物性の深度変化の把握

b)実施内容

立坑部から、水平方向（3～4 方向が望ましい）に立坑径の 2～3 倍の長さのボーリング孔を掘削し、多点式地中変位計により坑壁からの深度が異なる地点での変形計測を行う

c)実施位置

実施設計で設定したステップ管理計測（一般部）断面位置（図 A-4）

d)測定時期/頻度

連続観測

e)位置及び測定時期/頻度の設定根拠

前述の湧水量調査、水圧観測等と合わせ、現象の発生メカニズム（特に水-応力連成挙動）まで検討することが可能となることと、第 3 段階の調査試験エリアを含む範囲の地質環境の初期条件データを取得する必要があること

f)期待される成果

力学的な掘削影響予測解析結果の妥当性の検討、岩盤が有する力学的不均質性の評価

g)留意事項

立坑部は一度設置するとメンテナンスには多大な時間と費用を要するため、その点を考慮

した測定機器を使用する必要がある。補助工法が導入されるような掘削区間では基本的に実施する意味がないため、測定地点の変更もしくは中止が必要

⑦支保工応力測定

a)目的

第1段階で実施した地下施設実施設計（実施設計レイアウト分まで）の妥当性の評価

b)実施内容

1 深度あたり 4～8 箇所程度でのコンクリート覆工内の応力計測及び覆工背面の地圧計測

c)実施位置

地下施設実施設計において設定された位置

d)測定時期/頻度

連続観測（基本的には切羽離れの影響がなくなるまで）

e)位置及び測定時期/頻度の設定根拠

前述の湧水量調査、水圧観測等と合わせ、現象の発生メカニズム（特に水 - 応力連成挙動）まで検討することが可能となることと、経験上多数の測定点が必要なこと

f)期待される成果

覆工内応力及び覆工背面に作用する地圧を直接計測することによる、第1段階の地下施設実施設計の妥当性の評価

g)留意事項

覆工応力計及び背面地圧計は、これまでの経験上適切に動作するものが少ないことから、多点での計測が必要。なお、本計測は実施設計の妥当性を検討するデータを得ることが主目的なため、補助工法が導入されるような掘削区間でも実施する。

⑧支保工変形測定（鋼製支保工を入れる場合のみ）

a)目的

第1段階で実施した地下施設実施設計の妥当性の評価

b)実施内容

鋼製支保工の変形計測（ひずみゲージ等による）

c)実施位置

鋼製支保が必要となる箇所のみ（地下施設実施設計において設置時間も含め建設工程に考慮されている）

d)測定時期/頻度

連続観測（基本的には切羽離れの影響がなくなるまで）

e)位置及び測定時期/頻度の設定根拠

ひずみゲージを直接貼る計測は鋼製支保以外の箇所では不可能なため

f)期待される成果

鋼製支保工の変形及び作用応力を計測することによる地下施設実施設計の妥当性の評価

g)留意事項

覆工応力、背面土圧と同様に多点での計測が必要。

主として立坑部で実施する以上の調査試験レイアウト概念図を図 A-6 に示す。

(2)水平坑道から実施する立坑周辺岩盤を対象とした掘削影響試験

堆積軟岩では、掘削に伴い坑道周辺岩盤中には水～応力連成現象が発生する可能性がある。立坑が機械掘削されることを考慮すると、掘削影響の発生メカニズムは、水～応力連成現象で発生することが想定される。このため、立坑掘削中に生じる同現象のメカニズムの把握が、2.2 (1) ⑤ で把握した掘削影響領域の範囲や物性変化の評価および同知見の一般化に重要である。この計測は、立坑部の掘削中に実施する必要があることと、地下施設の建設工程への影響を最小限にとどめる観点から、以前東濃鉱山で実施した第2立坑の方法と同様の方法を取る。以下に具体的な実施内容を示す。

①周辺岩盤中の応力分布及び応力変化の計測

a)目的

第1段階で実施した地下施設建設に伴う周辺岩盤への影響評価、予測結果及び構築した岩盤力学モデルの妥当性の検討および掘削影響発生メカニズムの解明

b)実施内容

立坑坑道軸に平行な方向に、坑道壁面からの距離を変えて（立坑径とほぼ同程度(0～6m程度)の範囲で4本程度）ボーリング孔を掘削し、深度の異なる数カ所にひずみ計を埋設し、切羽進行に伴う周辺岩盤の変形挙動のモニタリングを行う。

c)実施位置

140m 坑道から 280m 坑道まで（力学的概念モデルの ZONE1 の領域に対応）、280m 坑道から 400m 坑道（力学的概念モデルの ZONE2 の領域に対応）、400m 坑道～500m 坑道まで（力学的概念モデルの ZONE3 に対応）それぞれ掘削し、その範囲内で測定を行う。

d)測定時期/頻度

立坑軸方向のひずみ計設置深度は基本的に 50m ピッチとする。

e)位置及び測定時期/頻度の設定根拠

掘削影響予測の妥当性確認のためのデータを3次元的に取得するとともに、立坑部より実施する調査結果（坑道周辺部の地下水の水圧/水質データ、変形計測データ及び掘削影響領域内の力学的・水理学的特性）と合わせ水—応力連成挙動評価に寄与するデータを提供する。

f)期待される成果

力学的な掘削影響予測解析結果の精度の検討（+立坑径の違いが変形挙動に及ぼす影響）、岩盤が有する力学的不均質性の評価

g)留意事項

掘削サイクルへの影響を最小限とするボーリング掘削数及び試験方法を採用する（応力測定であれば円錐孔底法）

②周辺岩盤の力学物性変化

a)目的

第1段階で実施した地下施設建設に伴う周辺岩盤への影響評価、予測結果及び構築した岩盤力学モデルの妥当性の検討および物性変化と掘削影響発生メカニズムとの関連評価

b)実施内容

・広範囲の調査

後述する(3) ①の地質構造詳細調査で利用したボーリング孔を用い、400m 坑道掘削後に地

質構造詳細調査と同様の仕様でトモグラフィー調査を実施する。

・狭範囲の調査

140m, 280m 坑道より、立坑坑道軸に平行な方向にボーリング孔を掘削して深度の異なる数カ所で孔内載荷試験を実施するとともに、切羽が測定位置通過後に再度同地点での載荷試験を行う。

c)実施位置

立坑軸方向に平行なボーリング孔は、140m 坑道から 280m 坑道まで（力学的概念モデルの ZONE1 の領域に対応）、280m 坑道から 400m 坑道まで（力学的概念モデルの ZONE2 の領域に対応）、400m 坑道から 500m 坑道まで（力学的概念モデルの ZONE3 に対応）それぞれ掘削する。

d)測定時期/頻度

孔内載荷試験の深度は、基本的に 50m ピッチとする。測定は、立坑切羽が測定断面を通過する前後で実施する。

e)位置及び測定時期/頻度の設定根拠

岩盤力学モデルの妥当性確認のためのデータを 3 次元的に取得するとともに、水-応力連成挙動評価に寄与するデータを提供する。

f)期待される成果

力学的な掘削影響予測解析結果の妥当性確認（力学的物性の変化＋立坑径の違いが変形挙動に及ぼす影響）、岩盤が有する力学的不均質性の評価、掘削に伴う物性変化の程度と範囲の深度変化

g)留意事項

水平坑道から掘削・調査するため、掘削サイクルへの影響は最小限と考えるが、できる限り水理学的な計測を実施している地点近傍で実施することが望ましい（立坑周辺岩盤が連成的な挙動をする可能性があるため）

③周辺岩盤中の透水性変化

a)目的

第 1 段階で実施した地下施設建設に伴う周辺岩盤への影響評価、予測結果及び構築した水理地質モデルの妥当性の検討および物性変化と掘削影響発生メカニズムとの関連評価

b)実施内容

140m, 280m および 400m 水平坑道より、立坑坑道軸に平行な方向にボーリング孔を掘削して深度の異なる数カ所で透水試験を実施するとともに、切羽が測定位置通過後に再度同地点での透水試験を行う。同時に地下水のサンプリング/分析も行う。

c)実施位置

立坑軸方向に平行なボーリング孔は、140m 坑道から 280m 坑道まで（声問層中）、400m 坑道から 500m 坑道までそれぞれ掘削する。

d)測定時期/頻度

透水試験の深度は、基本的に 50m ピッチとする。

e)位置及び測定時期/頻度の設定根拠

水理地質モデルの妥当性確認のためのデータを 3 次元的に取得するとともに、水-応力連成挙動評価に寄与するデータを提供する。

f)期待される成果

力学的な掘削影響予測解析結果の精度の検討（力学的・水理学的物性の変化＋立坑径の違いが変形挙動に及ぼす影響）、岩盤が有する水理学的不均質性の評価、掘削に伴う物性変化の程度と範囲の深度変化

g)留意事項

水平坑道レベルから掘削・調査するため、掘削サイクルへの影響は最小限と考えるが、できる限り、水理学的な計測を実施している地点近傍で実施することが望ましい（連成的な挙動をする可能性があるため）

上記の立坑周辺岩盤を対象とした掘削影響試験の調査試験レイアウト案を図 A-7 に示す。このレイアウト案は、研究所設置地区およびその周辺の岩盤力学的概念モデル（核燃料サイクル機構，2005）³ を考慮し，3 つの岩石・岩盤物性の異なるゾーン毎にデータ取得・評価が可能な配置としている。

(3)立坑／水平坑道周辺部の調査

第 3 段階の調査試験実施場所の選定および計画策定に反映するために，第 3 段階における調査試験研究の中心となる 280m 及び 400m 坑道とその周辺を対象とした詳細な地質環境の調査と，第 1 段階で構築した地質環境モデル（場のモデル）の妥当性評価に必要となるデータ取得を目的とした調査を行う。

3 次的にボーリング孔を配置すること，ボーリング孔長が長いこと及び調査数量が多いことから，建設工程に影響の大きい立坑内からの掘削ではなく，水平坑道展開後からボーリング孔を掘削し実施する。(1)立坑から実施する調査の③，④において 140m 坑道，280m 坑道レベルから掘削されている水平ボーリング孔に加え，それらの上下からボーリング孔を掘削し調査を行うことでより 3 次元的な地質環境特性の把握を試みる。なお，追加のボーリング孔掘削および調査は，換気立坑，東立坑掘削が終了する頃（平成 22 年度後半）から実施することとする。

①立坑／水平坑道周辺領域の地質環境詳細調査

a)目的

第 1 段階で実施した地質環境モデルの妥当性評価及び第 3 段階調査試験研究のための地質環境モデルの不均質性に関する評価

①-1 地質・地質構造に関する調査

b)実施内容

・280m 坑道より浅い領域を対象とした調査

140m 坑道部（最も浅い連絡坑道）より 280m 坑道の外側領域へボーリング孔を掘削し，コア観察，物理検層（BBS or EMI）を実施する。

・280m 坑道～400m 坑道までを対象とした調査

280m 坑道掘削後，同坑道から 400m 坑道を囲むようにボーリング孔を掘削し，コア観察，物理検層（BBS or EMI）や孔間トモグラフィー調査（比抵抗，弾性波，水理）を実施する。また，さらに，400m 坑道掘削後，ループ坑道等を利用したトモグラフィー調査（比抵抗，弾性波）を実施する。

c)実施位置

ボーリング孔掘削は、140m 坑道及び 280m 坑道から実施する。調査対象範囲は、140m 坑道～280m 坑道及び 280m 坑道～400m 坑道

d)測定時期/頻度

280m,400m 坑道掘削前

e)位置及び測定時期/頻度の設定根拠

地質環境の 3 次元構造（不均質性・不確実性を含む）を把握する情報を提供するとともに、第 3 段階における調査試験位置（特にトレーサ試験）に不可欠な情報を提供する。さらに水平断面内の調査スケールの違いによる、不均質性評価の精度比較が可能となる。

f)期待される成果

3 次元地質環境モデルの精度の検討（不均質性・不確実性を含む）、岩盤が有する力学的不均質性の評価（鉛直断面方向、水平方向）

g)留意事項

第 3 段階における各原位置試験計画の詳細化ならびに初期値取得の観点から、両調査とも最低限 280m 坑道及び 400m 坑道掘削前に終了する必要がある。

①-2 水理・地球化学・岩盤力学に関する調査

b)実施内容：

・ 280m 坑道より浅い領域を対象とした調査

140m 水平坑道部より斜孔を追加掘削し、力学・水理・地球化学に関する調査を行う。ベースとなる調査（コア観察・物理検層）の他、力学については、応力測定（応力解放法）・孔内载荷試験を数カ所を実施し、それが終了後多連式パッカーシステムを用いた水圧観測・採水/分析を実施する。

・ 280m 坑道～400m 坑道までを対象とした調査

280m 水平坑道部より斜孔を追加掘削し、力学・水理・地球化学に関する調査を行う。ベースとなる調査（コア観察・物理検層）の他、力学については、応力測定（応力解放法）・孔内载荷試験を数カ所を実施し、それが終了後多連式パッカーシステムを用いた水圧観測・採水/分析を実施する。

c)実施位置

ボーリング孔掘削は、140m 坑道及び 280m 坑道より実施する。力学的調査は、立坑掘削の影響がないと考えられる立坑径の 3 倍以上離れた領域において数カ所実施する。水圧観測等についてはやはり立坑掘削による影響範囲外において 1 孔あたり数箇所程度の水圧観測及びサンプリングを実施する。

d)測定時期/頻度

140m, 280m 水平坑道及び換気立坑・東立坑掘削終了後

e)位置及び測定時期/頻度の設定根拠

地質環境の 3 次元構造（不均質性・不確実性を含む）を把握する情報を提供するとともに、第 3 段階における調査試験位置選定（特に孔間トレーサー試験）に不可欠な情報を提供する。

f)期待される成果

3 次元地質環境モデルの精度の検討、地質環境の不均質性の評価

g)留意事項

(2)②の調査やトレーサー試験前の孔間水理試験にも使用する観点から、保孔はしない形で

保持するが、泥水が近傍の地質環境に及ぼす影響（特に地下水の化学的性質）についての検討が必要である。また、事前に不均質性を同定するためのパラメータ（比抵抗、弾性波 etc.）を吟味する必要がある。

上記の立坑／水平坑道周辺領域の地質環境詳細調査の調査試験レイアウト概念図を図 A-8 に示す。

(4)水平坑道で実施する調査試験

水平坑道部では、第 3 段階の試験期間では不十分な長期観測を伴う試験及び坑道掘削前の初期値と坑道掘削直後からの変化を把握しておく必要がある試験を実施する。後者の観点からの試験では、坑道掘削により周辺岩盤中に生じる地質環境の変化の発生メカニズムやその範囲を評価する手法を構築することが可能となる。なお、水平坑道部は、立坑部に比べると相対的に建設工程に及ぼす影響が少ないことから、より詳細な試験が可能である。以下に調査試験項目を示す。

① 水平坑道掘削影響試験

a)目的

堆積軟岩中に発生する掘削直後の EDZ の発生メカニズムの把握，EDZ の範囲とその物性値の取得

b)実施内容

東濃鉱山で実施した坑道掘削影響試験とほぼ同等の調査項目にて実施する。具体的には、周囲坑道から掘削した観測用坑道から調査用ボーリング孔を掘削し、力学的・水理学的物性の初期状態を把握するとともにモニタリング用の計測装置を設置する。その後、試験坑道（発破掘削と機械掘削区間を設ける）を掘削し、試験坑道掘削中の周辺岩盤中の挙動変化及び坑道掘削後の力学的・水理学的調査を行う。ただし、計測用の装置については、想定される水-応力連成挙動が把握可能な装置（釜石原位置試験で使用した Pac-ex 等）を用いることとする。

c)実施位置

400m 坑道から掘削する試験坑道（変形挙動のみの計測は図 A-5 に示す形で実施予定）

d)測定時期/頻度

試験用坑道掘削前・中・後に計測を実施。

e)位置及び測定時期/頻度の設定根拠

第 3 段階での主要な研究領域となる硬質頁岩を対象とした掘削影響の範囲や程度に関するデータを得るため。

f)期待される成果

単一の水平坑道掘削に伴う掘削影響の範囲や程度及びその不均質性の把握，掘削影響の発生メカニズムの評価（＋その工法依存性）に関する知見が得られる

g)留意事項

試験用坑道掘削は、事前に観測用坑道を掘削して調査用ボーリング孔を配置し、掘削前調査を実施した後に開始する必要がある。

②不飽和・REDOX 調査試験**a)目的**

岩盤の低透水性や圧力解放に伴うガスの発生等により想定される不飽和現象の発生メカニズムやその範囲、それに伴い発生する地下水化学組成変化領域の範囲を把握する。

b)実施内容

調査用ボーリング孔を掘削し、多連式パッカーシステムを設置後、初期状態のデータを取得するとともに、試験坑道掘削中・掘削後の地下水圧の連続観測・採水/分析、坑道内の湧水量を計測する。また、不飽和の発生が見られる場合には、坑道壁面からボーリング孔を掘削し、採取したコアの鉱物組成等についての詳細な分析を行うとともに、東濃地科学センターにて開発した原位置不飽和計測装置を用いて、坑道壁面からの不飽和進展状況を把握する。

c)実施位置

①と同一箇所とし、不飽和領域の外側までの範囲で坑道壁面からの距離を変えた測定を実施する。

d)測定時期/頻度

水圧は連続観測。採水・分析は、測定装置設置直後は、1回/数時間～1日程度とし、定常状態に近付いたら1回/数週間～数カ月程度とする。

e)位置及び測定時期/頻度の設定根拠

掘削影響試験と同位置・同時期に実施することにより、①の試験坑道掘削前及び掘削中の地質環境変化データが取得され、複合的な検討が可能となるため。

f)期待される成果

これまでデータのほとんどない難透水性岩盤における不飽和領域の進展状況（発生するかどうかも含む）と岩盤物性に与える影響、その発生メカニズムに関する知見が得られる。また、掘削影響試験の結果と合わせて評価することにより、坑道周辺岩盤の地質環境を表すモデル及び坑道周辺の地質環境変化を予測する手法が構築される。

g)留意点

不飽和領域発生メカニズムの把握のためには、事前に調査用ボーリング孔と計測システムを配置する必要があることから、試験用坑道掘削は周辺坑道掘削終了後に掘削前調査を実施後に開始する必要がある。

2.3 処分技術の信頼性向上

(1)水平坑道で実施する調査試験

処分技術の信頼性向上に関わる原位置試験は、長期間に渡るモニタリングを要するものがほとんどである。このため、立坑部のように、掘削停止期間がほとんどなく掘削作業が行われ日々周辺の地質環境が変化する領域での試験の実施は困難である。また、低アルカリコンクリートの施工性確認試験のようなものは、坑道支保の一部として第2段階で実施することが合理的と考えられる。

①低アルカリ性コンクリート施工性確認試験

a)目的

坑道支保工としての基本的施工性の確認及び適用範囲の把握、プラグ、グラウト等閉鎖工としての施工性の確認、鉄筋腐食等施工後の品質確認。

b)実施内容

地下施設の覆工各部において、低アルカリ性コンクリートを用いた施工を行うとともに、覆工等に作用する応力の測定や長期安定性を把握するための覆工部のサンプリングを行う。

c)実施位置

換気立坑最深部及び140m、280m坑道。

d)測定時期/頻度

覆工の応力・変形挙動は連続観測。サンプリング/分析は適宜実施する。

e)位置及び測定時期/頻度の設定根拠

施工性確認と長期安定性の確認が必要となる反面、周辺の地質環境に与える影響が不明確である。また、養生時間が通常のコンクリートに比べ長いため、立坑部及び水平坑道の広い範囲に覆工として使用することは工程に直接影響を及ぼす。従って、他の試験とはできるだけ切り離れたエリアで実施する必要がある。

f)期待される成果

低アルカリ性コンクリートの施工性及び長期安定性に関するデータが得られ、実処分場での適用性に関する検討が実施できる。

g)留意事項

低アルカリ性コンクリートが岩盤や地下水に与える影響は今のところ不明。また本試験のために HFSC 用のプラント設備といった大がかりなものを設ける必要があるか否かは不明。

②ガス移行挙動試験

a)目的

システム全体の機能の実証、オーバーパック腐食に伴い発生すると考えられるガスの移行評価モデルの妥当性評価。

b)実施内容

試験用坑道掘削後、ピットの掘削を行い、ガス(ヘリウム等の化学的に不活性なガス)と水を供給できる装置と緩衝材をピット内に設置する。その後試験対象エリアを埋め戻し材で埋め戻し、設置した装置からガス等を供給し、坑道及びピット周辺岩盤、緩衝材及び埋め戻し材中のガス等の移動状況を連続観測する。

c)実施位置

280m 坑道から掘削した試験用坑道内。

d)測定時期/頻度

模擬人工バリアシステム等及び計測機器等設置後，連続観測。

e)位置及び測定時期/頻度の設定根拠

緩衝材を強制飽和させるための期間を必要とすることから，可能な限り早期に試験を開始する必要があるため。

f)期待される成果

信頼性のある評価ツール及びデータベースの整備に反映されるデータが得られる。

g)留意事項

原位置地下水中にも溶存ガス（主としてメタン）が存在するために，移行させているガスとの区別ができるか，またはその影響を考慮しうる評価手法が必要。試験環境として少なくとも模擬ピットは裸孔で保持できる場所が望ましい。

主として水平坑道部で実施する上記の調査試験のレイアウト案を図 A-9 に示す。

3 幌延深地層研究における調査試験・建設全体工提案

松井（2005）¹⁾から，表 A-1 に幌延深地層研究における調査試験・建設全体工程案を，表 A-2 に抽出して掲載する。

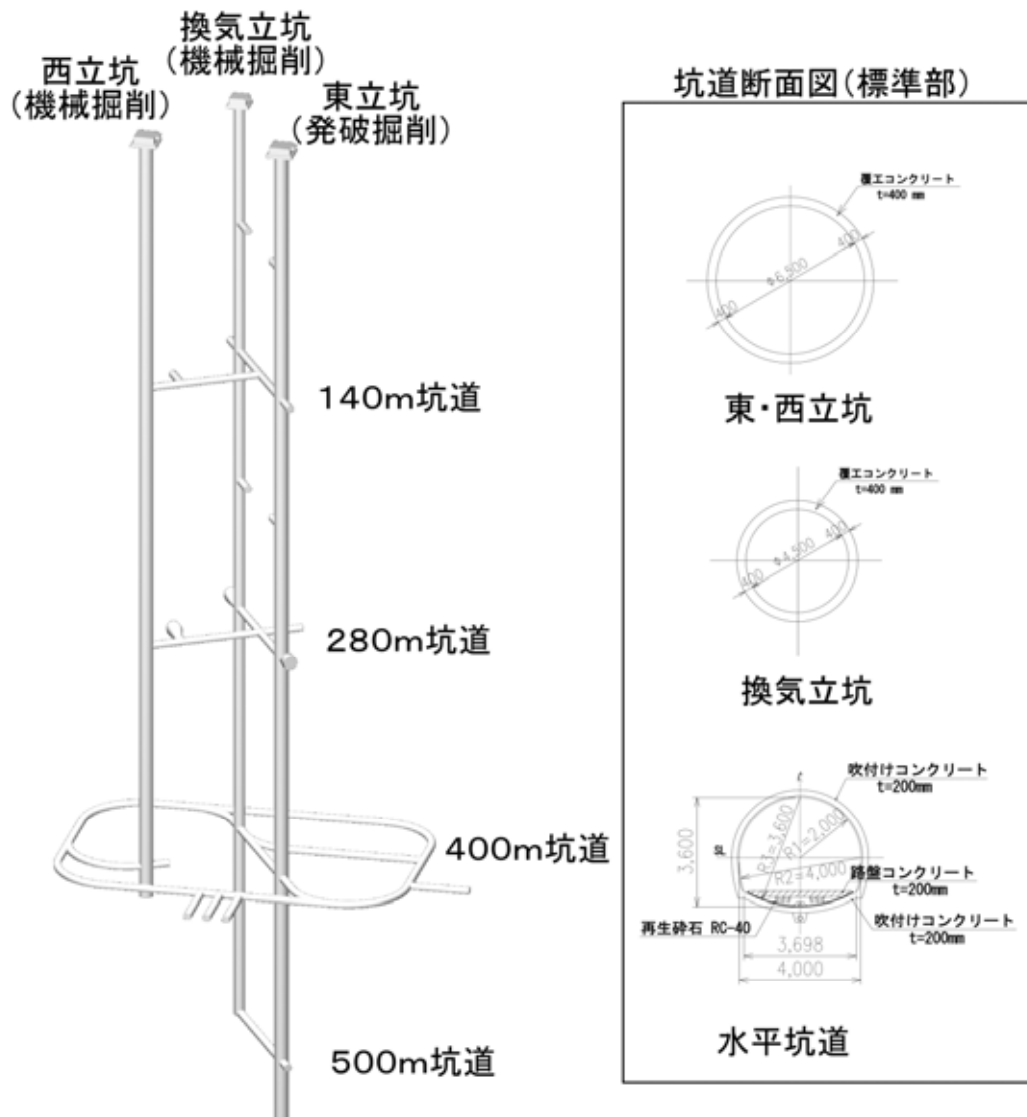


図 A-1 実施設計時の地下施設レイアウト・掘削の概要（松永ほか，2005 より）⁴⁾

H25年度時点

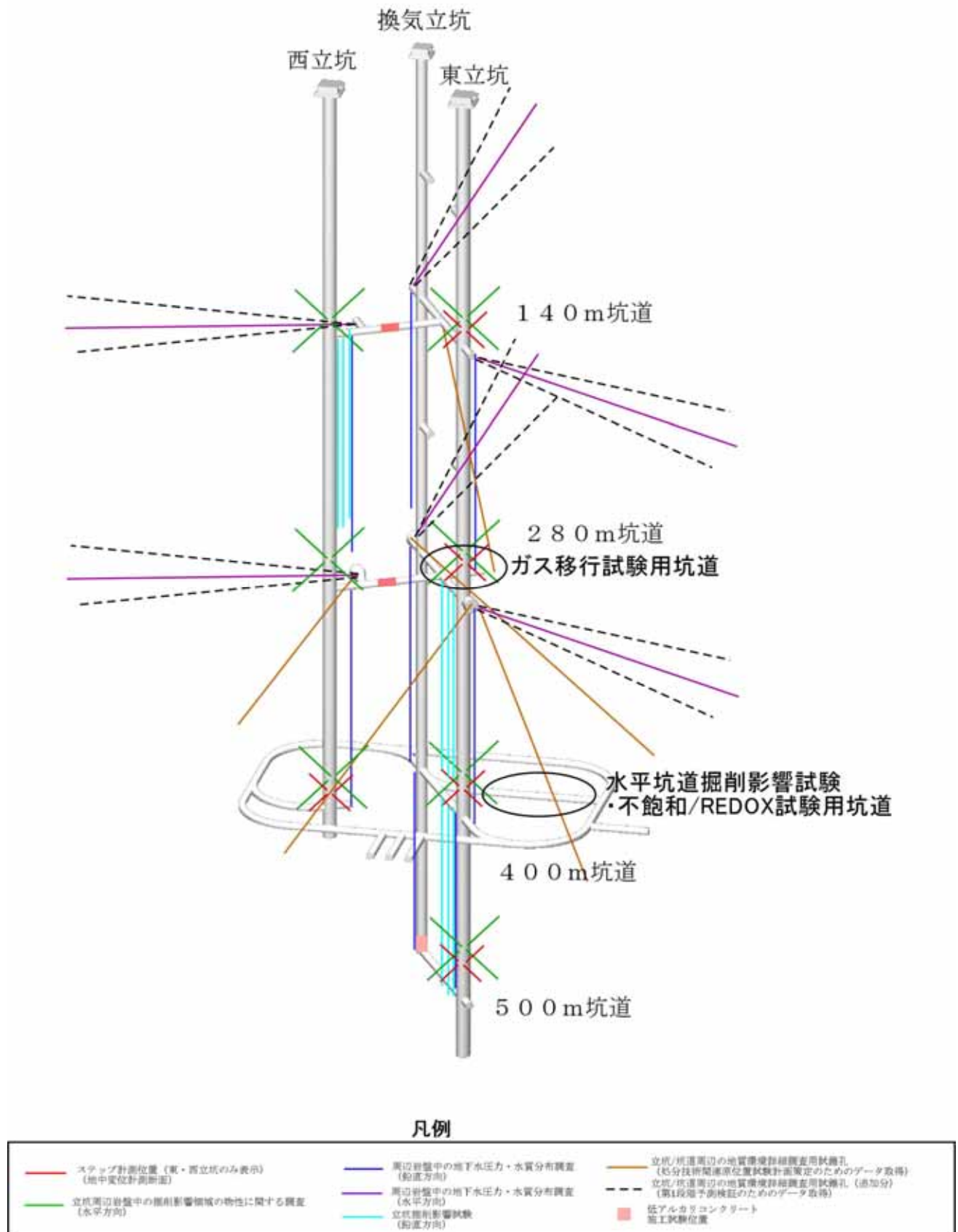


図 A-2 調査試験レイアウト案 (全体)

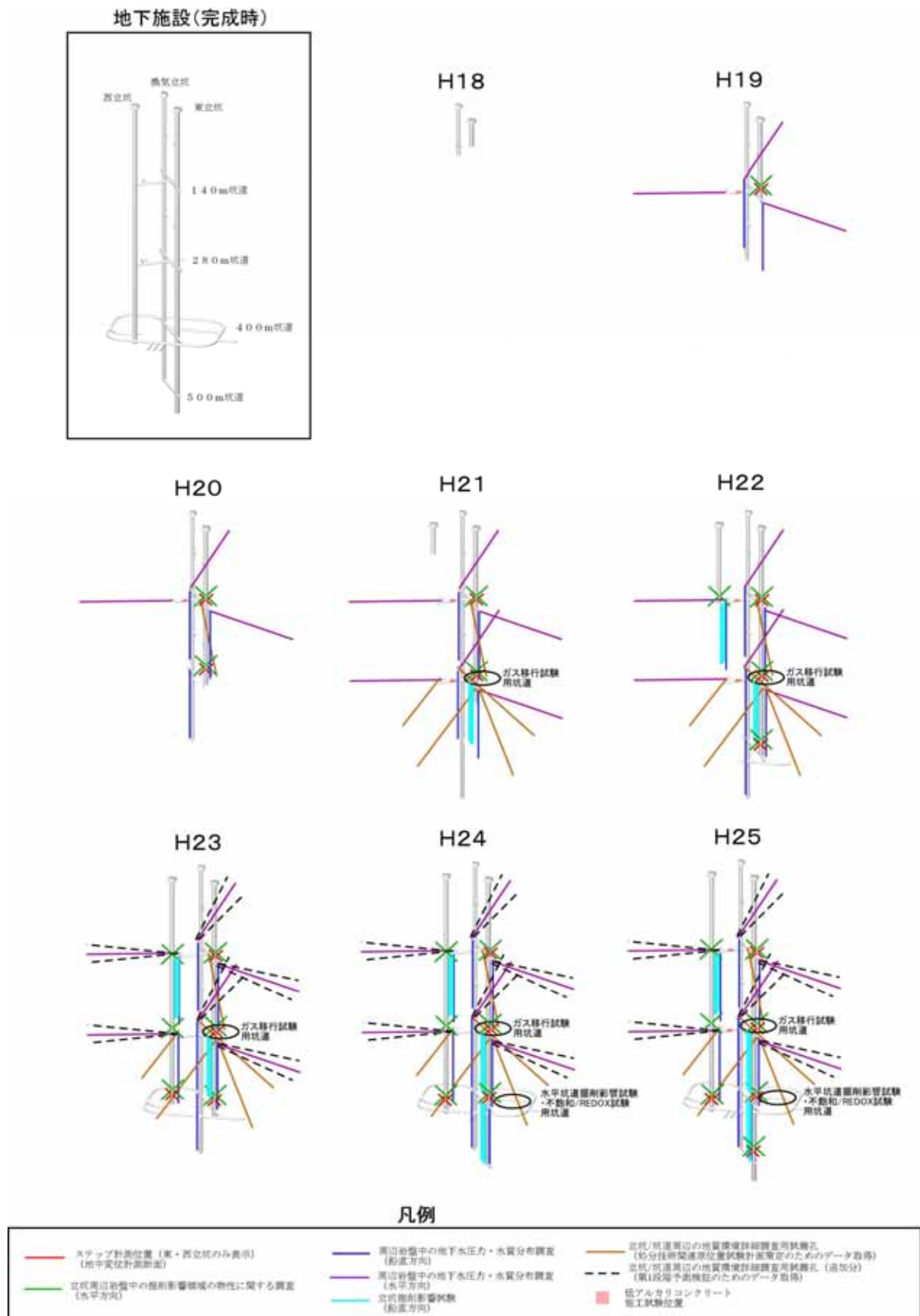


図 A-3 調査試験の年度展開 (H25 年度までを想定)

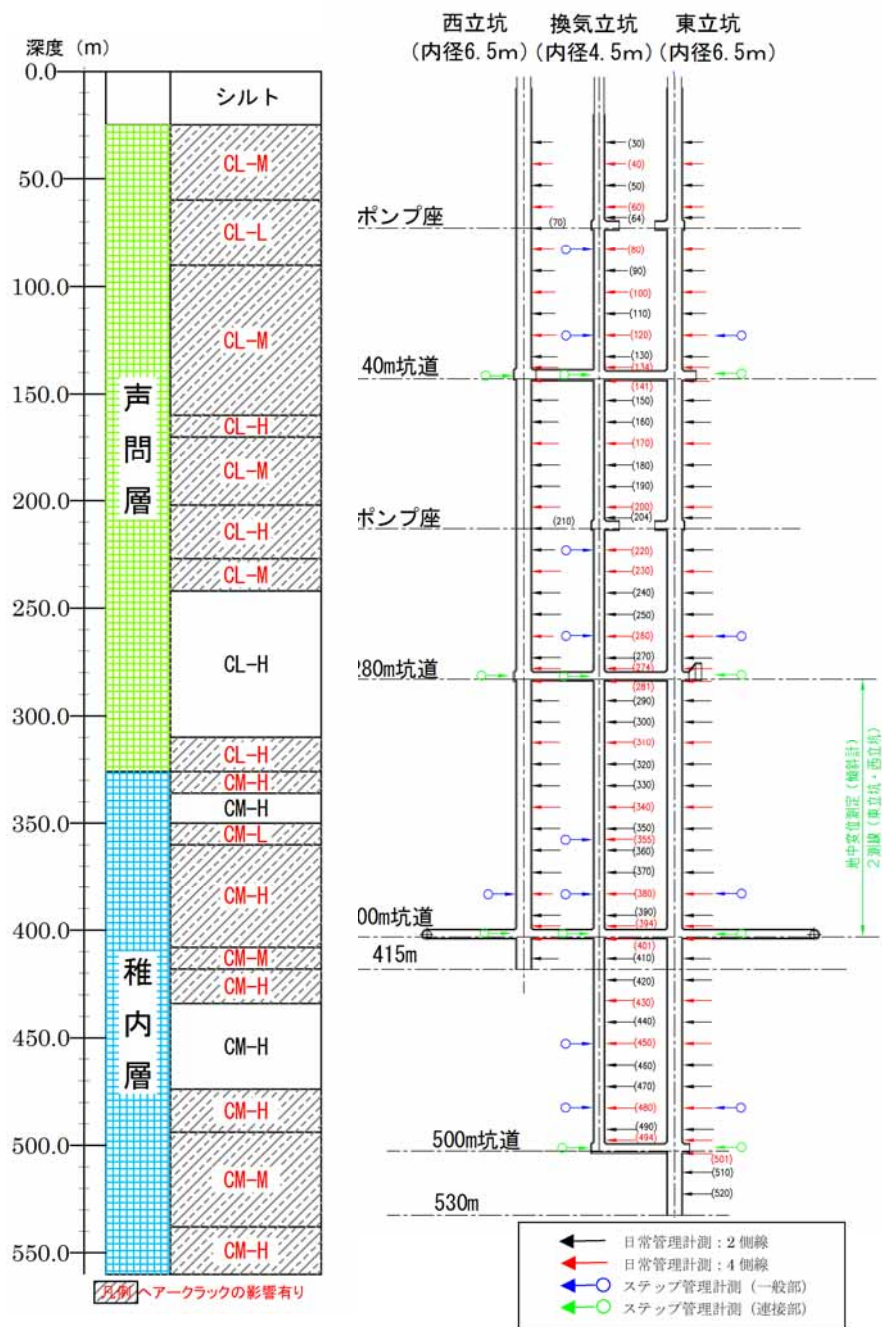


図 A-4 地下施設建設予定地点での予想地質柱状図及び建設中の変位計測断面位置
(内空変位: 日常管理計測、岩盤内変位: ステップ管理計測)

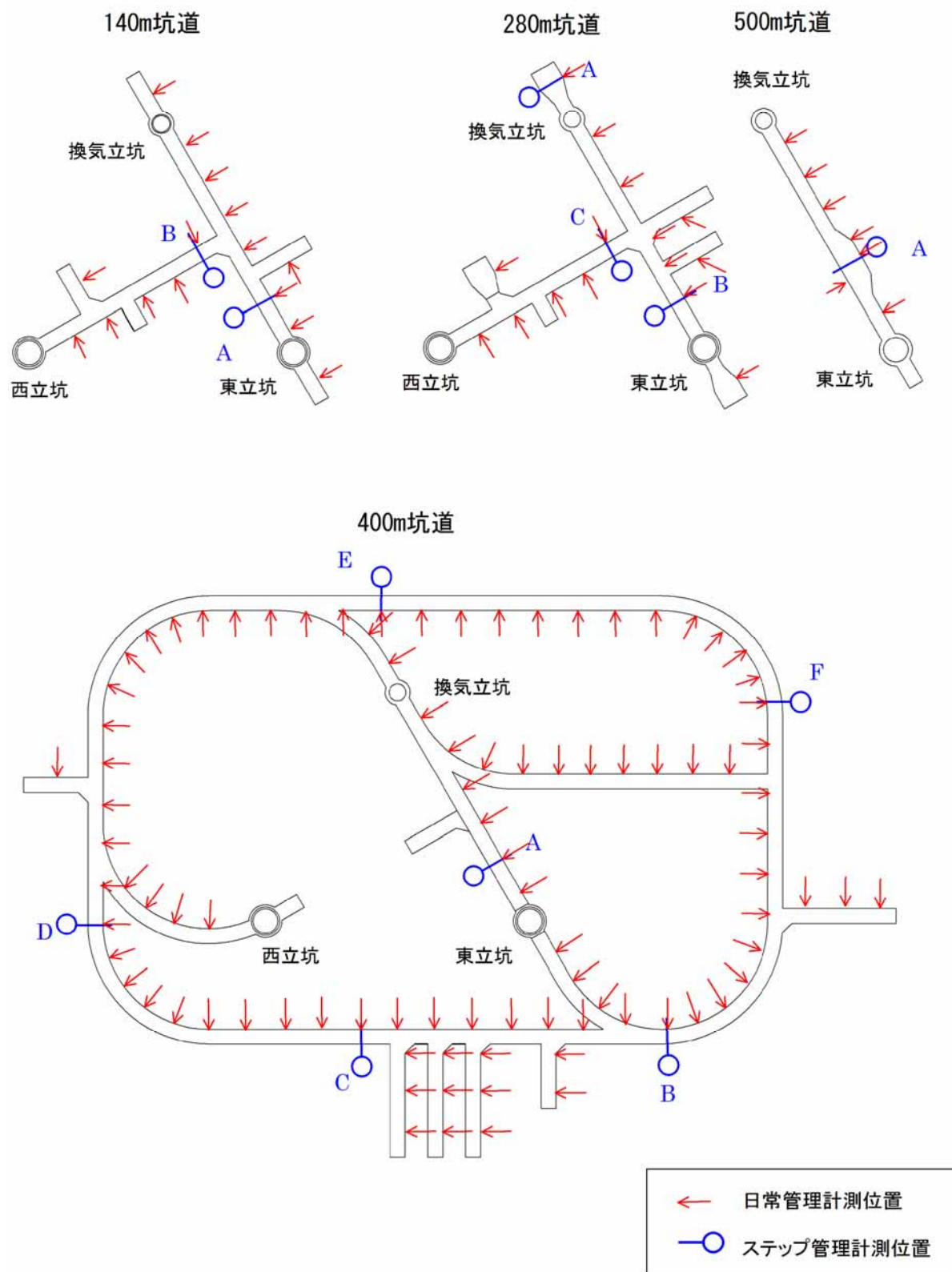


図 A-5 水平坑道における変形挙動計測断面位置
(内空変位：日常管理計測，岩盤内変位：ステップ管理計測)

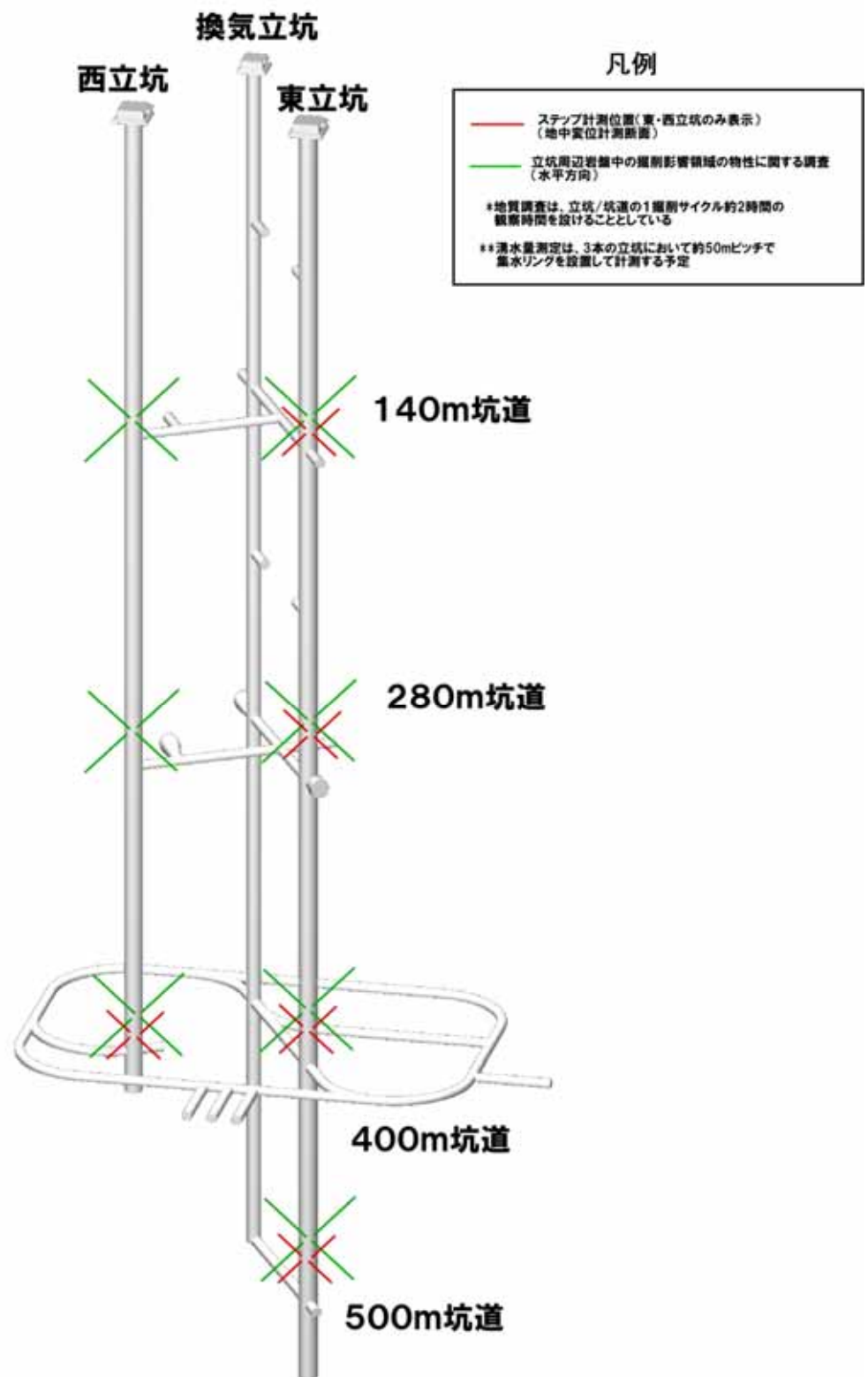


図 A-6 立坑部から実施する調査試験項目

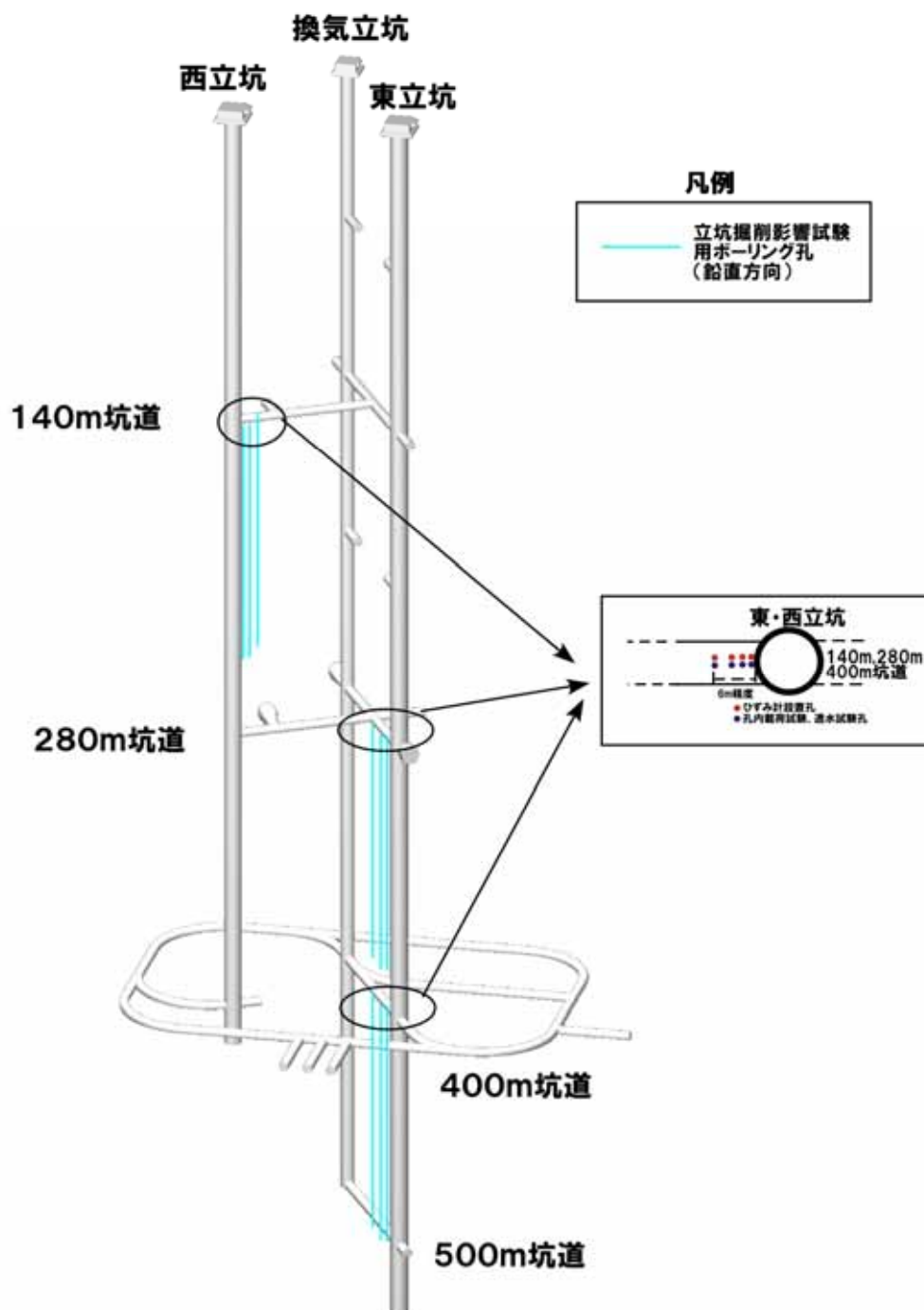


図 A-7 立坑周辺岩盤を対象とした掘削影響試験レイアウト案

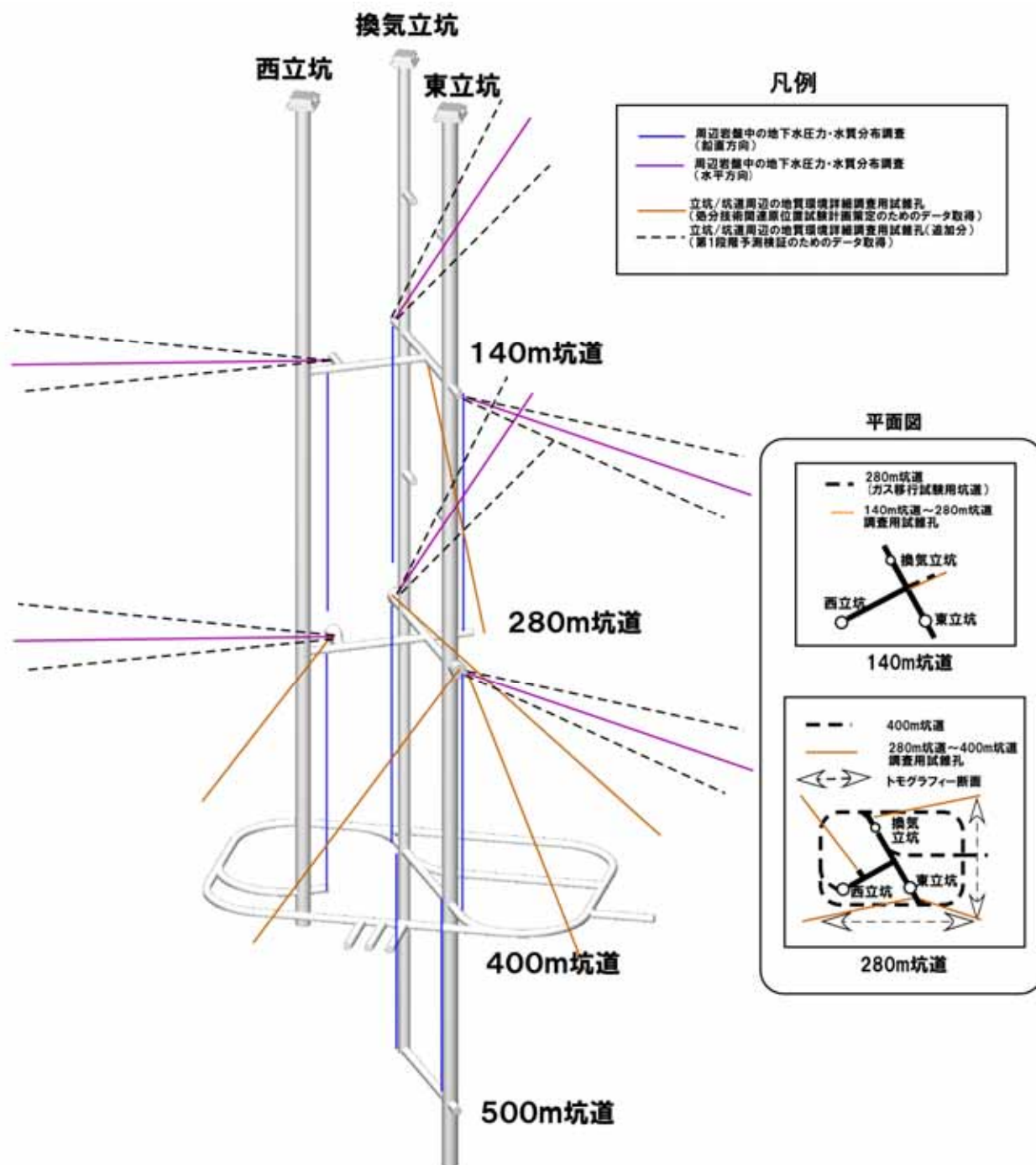


図 A-8 立坑／水平坑道周辺部の調査レイアウト案

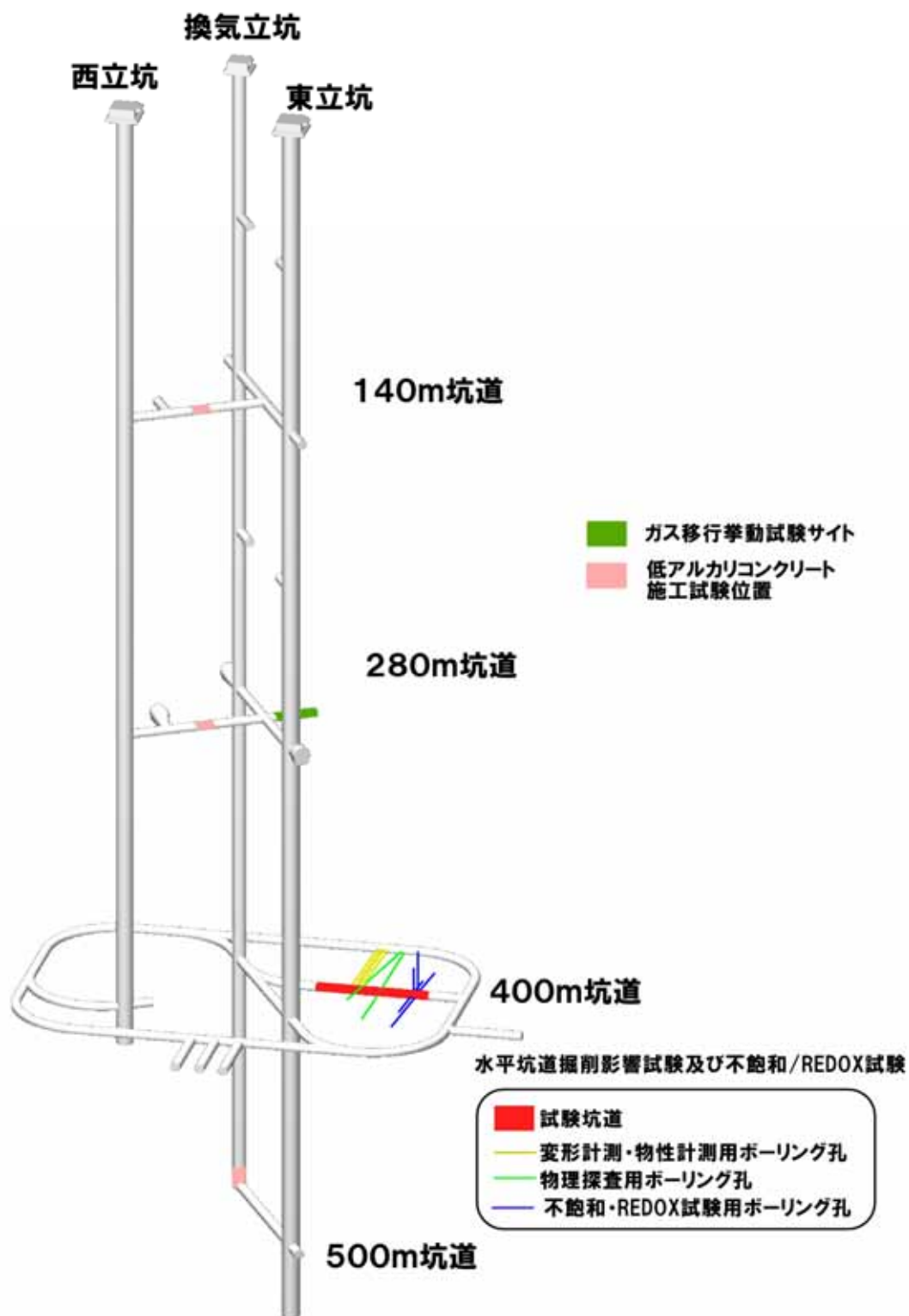
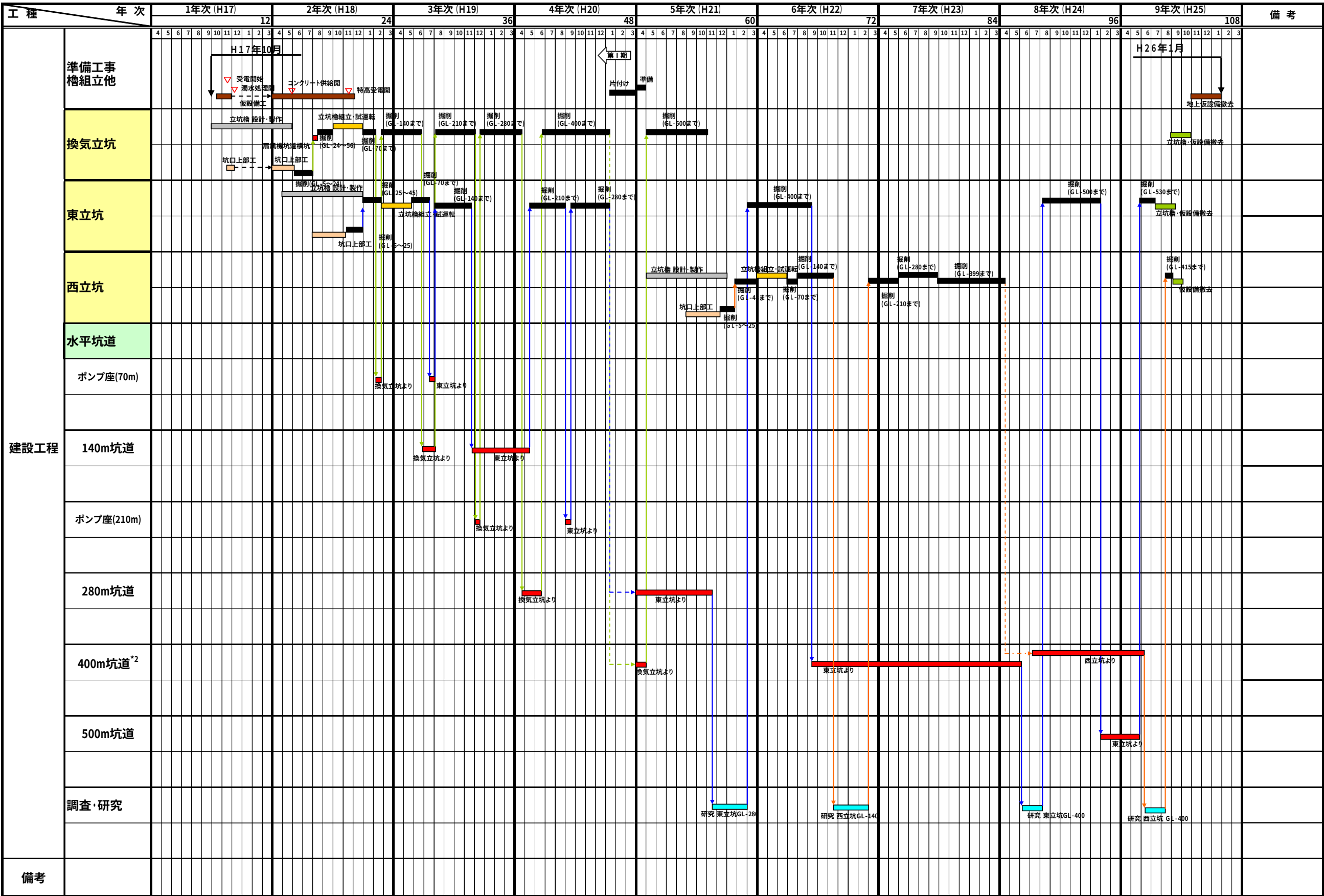


図 A-9 水平坑道部で実施する調査試験レイアウト案

This is a blank page.

表 A-1 実施設計時の地下施設レイアウトにおける建設工程^{*1}



^{*1}: 工事終了を平成25年度と想定
^{*2}: 検討を350〜400mで行い、最終的には350〜400mの範囲で決定する

*1:実施設計レイアウト終了をH25年度と想定
 *2:検討を400mで行い、最終的には350m～400mの範囲で決定する

参考文献（付録1）

- 1) 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”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN5400 2005-014（2005）.
- 2) 栗原雄二，油井三和，棚井憲治，川上進，杉田裕，谷口直樹，平井卓，小川豊和，三原守弘，松井裕哉，藤島敦，盛口洋，宮野前俊一，本間信之：“幌延深地層研究計画における処分技術に係わる原位置試験概念の検討（研究報告）”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN8400 2004-002 (2002).
- 3) 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築 ―平成17年取りまとめ― 分冊1 深地層の科学的研究”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN1400 2005-014（2005b）.
- 4) 松永浩一，田村彰教，村川史朗，西山誠治，青木七郎，布施正人，興三智彦，高橋剛弘：“幌延深地層研究計画 地下施設実施設計 ―設計報告書―”，核燃料サイクル開発機構，JNC TJ5410 2005-002 (2005a).

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
物質の量	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	立方メートル	m ³
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
質量体積 (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
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

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3. 固有の名称とその独自の記号で表される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 ^(a)	rad		m・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	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
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	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	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 ^(d)	°C		K
光度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 質量エネルギー分与, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときにいくつかの用例は表4に示されている。
- (b) 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“1”は明示されない。
- (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
- (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含む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	
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg・s ⁻¹	
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg・s ⁻²	
角度	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	ラジアン毎平方秒	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	
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹	
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹	
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	
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s・A	
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s・A	
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	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹	
モル熱容量				
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s・A	
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³	
放射線強度	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	

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で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 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
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=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe [†] =(1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチルプ	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホ	ph	1 ph=10 ¹¹ x
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位		1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ		1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m