

人工バリア等の設計検討および 幌延の地質環境を条件とした 原位置試験環境の検討

(研究報告)

2004年 4 月

核燃料サイクル開発機構
東 海 事 業 所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and protection should be addressed to :

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2004

人工バリア等の設計検討および 幌延の地質環境を条件とした原位置試験環境の検討 (研究報告)

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*, 青柳茂男*, 松井裕哉***, 中山 雅***, 藤島 敦****

要 旨

「第 2 次取りまとめ」に示された人工バリア設計手法を幌延の地質環境へ適用するための第一段階として、設計手順の設定など地質環境を特定しない概念的な検討と、これまでに取得された実際のデータに基づく具体的な設計検討を行った。

地質環境を特定しない概念的な検討では以下に示すような成果を得た。

- ①処分場全体の設計手順の見直しを行い、「第 2 次取りまとめ」における人工バリア設計⇒施設設計という直列的な手順に対して、並列的な手順を提案するとともに、手順の中に処分深度の設定と閉鎖設計を加えた。また、「第 2 次取りまとめ」では具体的に示されていなかった人工バリア設計のフローおよび閉鎖設計のフローを設定した。
- ②地質環境が変化すると人工バリアのどの設計要件（安全機能）が影響を受けるか、またその設計要件を確保するために人工バリアのどの仕様で対応するかという、地質環境－設計要件－人工バリア仕様の関係を検討すると共に、人工バリア設計に必要な地質環境に関する設計入力データ項目の抽出を行った。
- ③設計入力データについて、データの信頼性や情報の形態など入力情報としての要件を提示すると共に、その情報を得るための地質調査から入力データに至る過程を示した。

また、実際のデータに基づく具体的な設計例を示すため、幌延深地層研究計画第 3 段階で実施予定の人工バリアに関する原位置試験環境を対象とした検討を行い、以下のような成果を得た。

- ④幌延のこれまでの調査に基づき力学に関する設計入力データの設定を行った。
- ⑤設定した設計入力データに基づき人工バリアに関する原位置試験における試験孔の空洞安定性評価を行い、複数深度について試験孔の支保工条件の検討を行った。この結果、深度条件の違いにより無支保でも空洞の安定性が確保される可能性のある場合と、支保工の設置が必要でありかつ空洞安定性確保のために細心の注意が必要である場合のあることがわかった。

* 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 システム解析グループ

** 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分バリア性能研究グループ

*** 幌延深地層研究センター 深地層研究グループ

**** バックエンド推進部 深地層研究施設計画グループ

**Design Studies on the Engineered Barrier System and
on the in-situ experiments under the conditions of geological environment in Horonobe
(Research Document)**

Yuji KURIHARA*, Mikazu YUI**, Kenji TANAI**, Susumu KAWAKAMI**,
Yutaka SUGITA**, Naoki TANIGUCHI**, Takashi HIRAI**, Toyokazu OGAWA*,
Shigeo AOYAGI*, Hiroya MATSUI***, Masashi NAKAYAMA***, Atsushi FUJISHIMA****

Abstract

Following studies have been done in this papers in order to apply the technologies based on H12 report to the actual geological conditions of Horonobe underground research laboratory.

- ① Reconsidering the process of repository design, the design process charts of a repository were presented. In the H12 report, the design process of the engineering barrier system was followed by the facility design process. In this paper, the both processes were placed in parallel position.
- ② The relation between geological conditions and the performance of engineering barrier systems and the specifications of engineering barrier systems was arranged and the geological information needed for design of engineering barrier were selected.
- ③ The appropriate form of geological information as input-data for design were showed and the procedure for setting input-data was presented.
- ④ Based on the state of geological investigations at Horonobe, mechanical input-data were arranged for the design of the in-situ experiments on engineered barrier system at HORONOBE.
- ⑤ The stability of the hall for the in-situ experiments was studied by numerical analysis and the results indicated that there are difference in stability between the depth of 500m and 570m.

* Repository system analysis group, Waste isolation research division,
Waste management and fuel cycle research center, Tokai works

** Barrier performance group, Waste isolation research division,
Waste management and fuel cycle research center, Tokai works

*** Geotechnical science and engineering group, Horonobe underground research center

**** Underground research laboratory planning group, Nuclear cycle research division

目 次

1 はじめに	1
2 設計手順と入力データの検討	2
2.1 設計手順の検討	2
2.1.1 処分場の全体設計	2
2.1.2 処分深度の設定	4
2.1.3 人工バリアの設計	6
2.1.4 閉鎖設計	16
2.1.5 設計手順のまとめ	19
2.2 地質環境と設計の関係および設計に必要なデータ	21
2.3 設計入力データ	24
2.3.1 入力データとしての要件	24
2.3.2 入力データの設定手順	25
3 深度が原位置試験環境に与える影響評価	29
3.1 岩盤力学に関する入力データの設定	29
3.1.1 岩盤物性	29
3.1.2 初期地圧	34
3.1.3 時間依存性パラメータ	34
3.2 空洞安定性評価とその結果に基づく支保工仕様の検討	36
3.2.1 検討条件の設定	36
3.2.2 空洞安定解析による評価	38
3.2.3 試験孔支保工仕様の検討	45
4 おわりに	46
参考文献	47
付録-1 幌延を対象とした人工バリア設計手法の適用性確認の考え方	付-1(1)
付録-2 幌延におけるデータ取得状況	付-2(1)

表 目 次

表 2.1-1	「第2次取りまとめ」におけるオーバーパックスの設計要件	12
表 2.1-2	「第2次取りまとめ」における緩衝材の設計要件	12
表 2.1-3	埋め戻し材の性能保証項目(案)	16
表 2.1-4	プラグの性能保証項目(案)	16
表 2.2-1	オーバーパックスに関する地質環境と設計の関係	21
表 2.2-2	緩衝材に関する地質環境と設計の関係	22
表 2.2-3	地質環境に関する人工バリア設計入力データ項目	23
表 3.1-1	設計に必要な岩盤物性と調査試験	29
表 3.1-2	設定した地山区分における一軸圧縮強度	32
表 3.1-3	物性値の設定方針	33
表 3.1-4	設計入力用岩盤物性値	33
表 3.1-5	水平方向初期応力比(鉛直応力=1)	34
表 3.1-6	これまでに取得された時間依存性パラメータ	35
表 3.2-1	「第2次取りまとめ」での軟岩系岩盤データセット	37
表 3.2-2	空洞安定性の判断指標の比較	38
表-付1	人工バリア設計手法の適用性確認の考え方	付-1(1)

図 目 次

図 1.1-1	本書の内容と位置づけの概念	1
図 2.1-1	「第2次取りまとめ」における設計の流れ	3
図 2.1-2	見直しによる処分場全体の設計フロー	4
図 2.1-3	事業化技術における建設深度設定の検討フロー	5
図 2.1-4	「第2次取りまとめ」におけるオーバーパックス設計の流れ	8
図 2.1-5	「第2次取りまとめ」における緩衝材設計の流れ	9
図 2.1-6	事業化技術におけるオーバーパックス設計仕様検討フロー	10
図 2.1-7	事業化技術における緩衝材設計仕様検討フロー	11
図 2.1-8	オーバーパックスの設計フロー	13
図 2.1-9	緩衝材の設計フロー	14
図 2.1-10	人工バリアシステムの設計フロー	15
図 2.1-11	埋め戻し材の設計フロー	17
図 2.1-12	強度プラグの設計フロー	18
図 2.1-13	止水プラグの設計フロー	18
図 2.1-14	処分場全体の具体的な設計フロー	20
図 2.3-1	人工バリア設計と地質情報の関連	24

図 2.3-2	地球化学モデルの作成および成果の反映先に至るフロー	26
図 2.3-3	岩盤力学モデルの作成および成果の反映先に至るフロー	27
図 2.3-4	水理地質構造モデルの作成および成果の反映先に至るフロー	28
図 3.1-1	岩盤物性値の設定フロー	30
図 3.1-2	HDB-1,3 孔の地山区分（標高補正後）	31
図 3.1-3	設定した地山区分	31
図 3.1-4	地山区分 9, 13 の n と m	36
図 3.2-1	深度方向の地山強度比の分布	39
図 3.2-2	深度方向の応力とひずみの状態	39
図 3.2-3	坑道方向による応力状態とせん断ひずみの違い	40
図 3.2-4	空洞安定性解析のステップ	41
図 3.2-5	試験孔が無支保の場合の地山の応力とひずみの状態	42
図 3.2-6	試験孔が無支保の場合の試験孔壁面変位	42
図 3.2-7	試験孔に支保工設置した場合の地山の応力とひずみの状態	44
図 3.2-8	試験孔に支保工設置した場合の試験孔壁面変位	44
図 3.2-9	支保工の応力状態（岩盤側境界）	45

1 はじめに

平成 11 年 11 月に提示された「第 2 次取りまとめ」(サイクル機構, 1999)においては, 人工バリアの設計および地下施設の設計の地質条件として, わが国における幅広い地質環境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, その条件の基で設計手法の技術的信頼性を提示した。これに対しては具体的な地質環境に対する設計手法の適用性の確認が課題として指摘されており, 現在地表からの調査が進められている幌延深地層研究計画を事例としてこの課題に取り組んでいる。

本書ではこの課題への取り組みの第一段階として, 幌延の地質環境を条件とした人工バリアの試設計による設計手法の適用性確認に資することを目的として以下の検討を行った。

第 2 章：人工バリア設計の内容や位置づけを明確にするための設計手順の設定, 設計に影響を及ぼす地質環境との関連の整理, 設計入力データ項目の設定, 設計入力データとしての要件, 設計入力データ設定手順の検討

第 3 章：幌延深地層研究計画における調査に基づく力学関連の設計入力データの設定とそれに基づく空洞安定性評価による深度と支保工条件の検討

第 2 章では手順や要件の設定といった地質環境を特定しない概念的な検討を行い, 第 3 章では幌延を事例として実際のデータを用いた具体的な設計検討を実施した。上記を概念図として図 1.1-1 に示す。

なお, 具体的地質環境に対する設計手法の適用性確認全体の考え方や, その中での人工バリア設計の位置付けなどについては付録-1 を参照されたい。

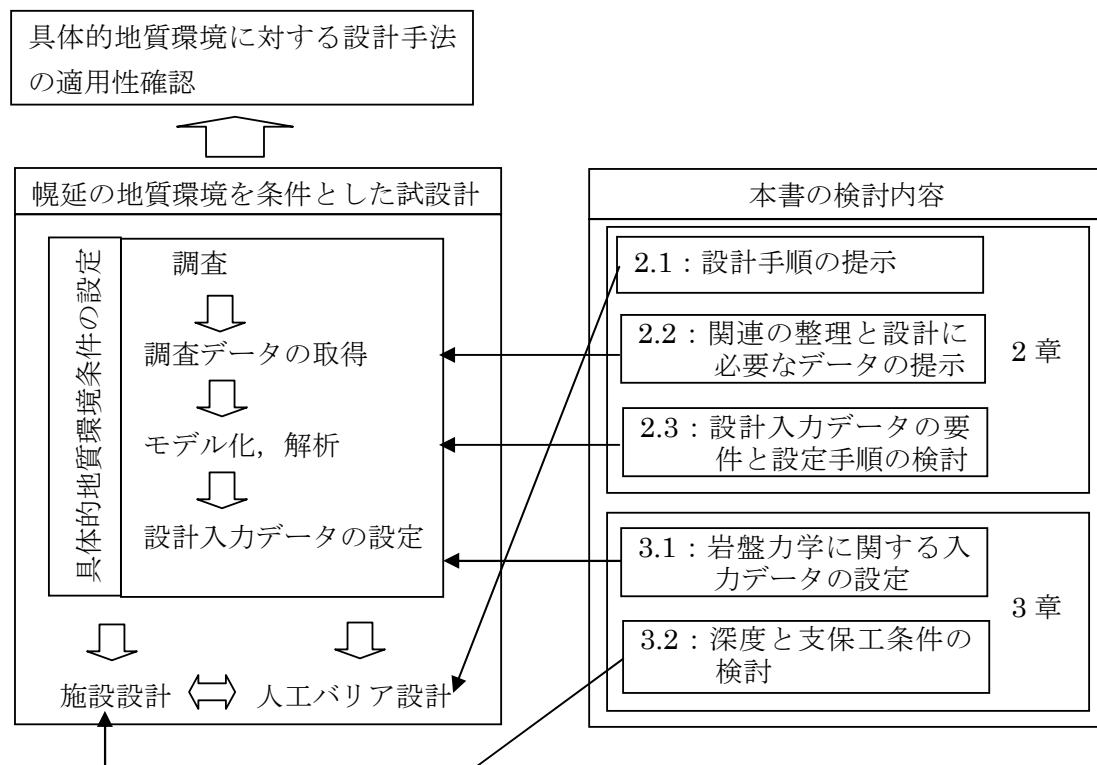


図 1.1-1 本書の内容と位置づけの概念

2 設計手順と入力データの検討

2.1 設計手順の検討

本書における設計は、地表からの調査段階の情報に基づく設計を想定しており、ここでは人工バリアの基本的な仕様であるオーバーパックおよび緩衝材の材質と厚さを設計対象として取り上げた。また、本書は人工バリアの設計を中心としたものであるが、人工バリアの設計と地下施設設計は密接な関連を持つことから、設計手順の検討では処分場全体の設計を対象とした。

2.1.1 処分場の全体設計

「第2次取りまとめ」(サイクル機構, 1999)では処分場全体の設計の基本的な流れの例として図 2.1-1 に示す手順が示されている。ここではこの手順を見直し、以下の点について修正を行った。

- ①**全体手順**: 図 2.1-1 の大きな流れとしては、人工バリアの設計においてオーバーパックおよび緩衝材の仕様例を設定し、それらを基に坑道断面や坑道離間距離などの地下施設設計や建設・操業・閉鎖技術の検討を行った後、安全評価によるシステム性能の確認を行うというものである。しかし、人工バリアの設計に当っては、まず人工バリアの置かれる地質環境条件の設定が必要であり、このためには地下施設設計における処分深度の設定が必要となる。また、地下施設設計における廃棄体埋設密度の設定では施設の力学的安定性と人工バリアの熱的安定性を平行して評価する必要がある。これらのことから、人工バリア設計と地下施設設計は直列的な順序で行うよりも、並列的な関係において実施した方が合理的と考えた。
- ②**処分深度**: 「第2次取りまとめ」(サイクル機構, 1999)では処分深度を設計の前提条件としているが、処分深度は地下施設の成立性にとって非常に重要な検討事項であることから、施設設計の対象とすることが妥当と考えた。平成11年3月に電力中央研究所および電気事業連合会により提示された「高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術」(電力中央研究所ほか, 1999)(以下、事業化技術とする)においても処分深度は地下施設設計の一部として扱われている。
- ③**閉鎖設計**: 「第2次取りまとめ」(サイクル機構, 1999)では建設、操業といった施工技術の一つとして閉鎖技術が示されているが、埋め戻しやプラグの仕様を設定するためには施工技術とは別に設計が必要となることから、閉鎖設計の項目を設定することが妥当である。

以上の検討結果を踏まえ、地表からの調査段階における設計を想定した処分場全体の設計の流れを図 2.1-2 に示す。

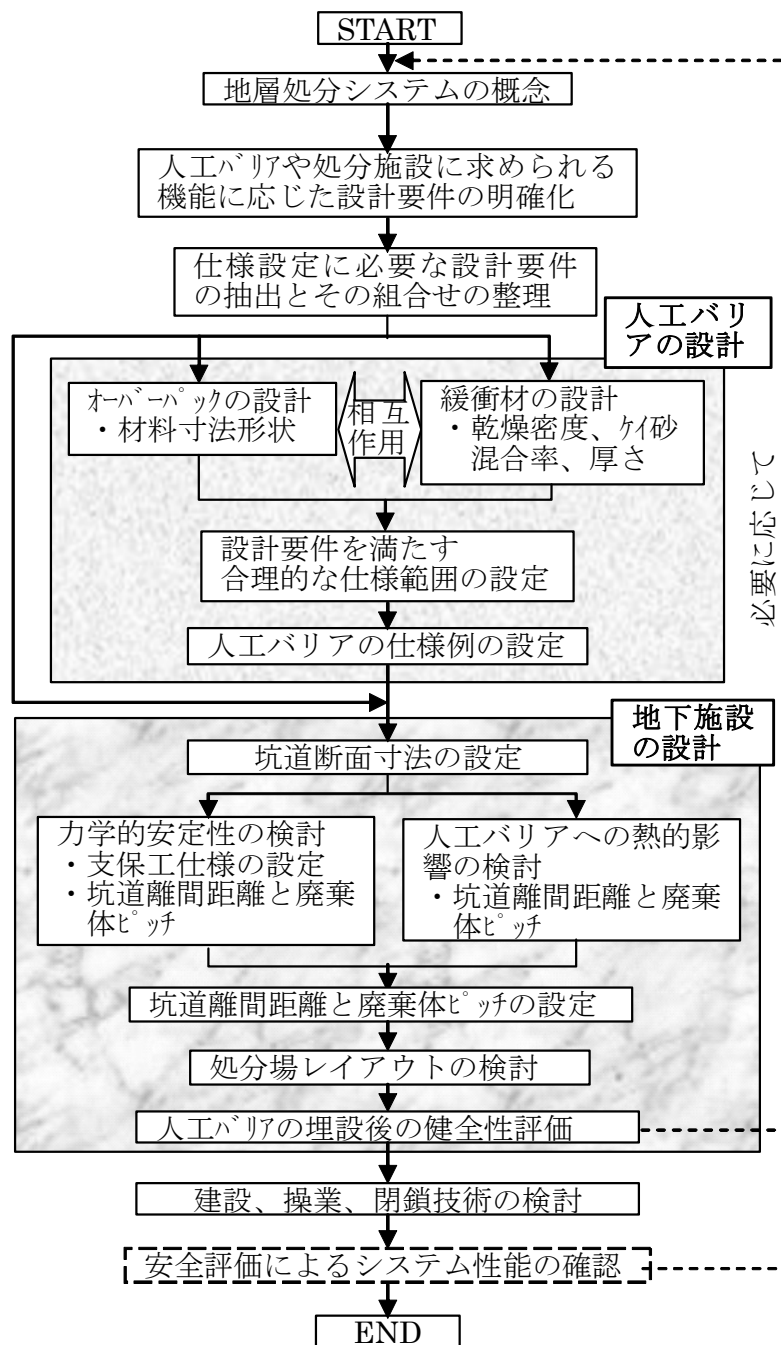


図 2.1-1 「第 2 次取りまとめ」における設計の流れ（サイクル機構, 1999）

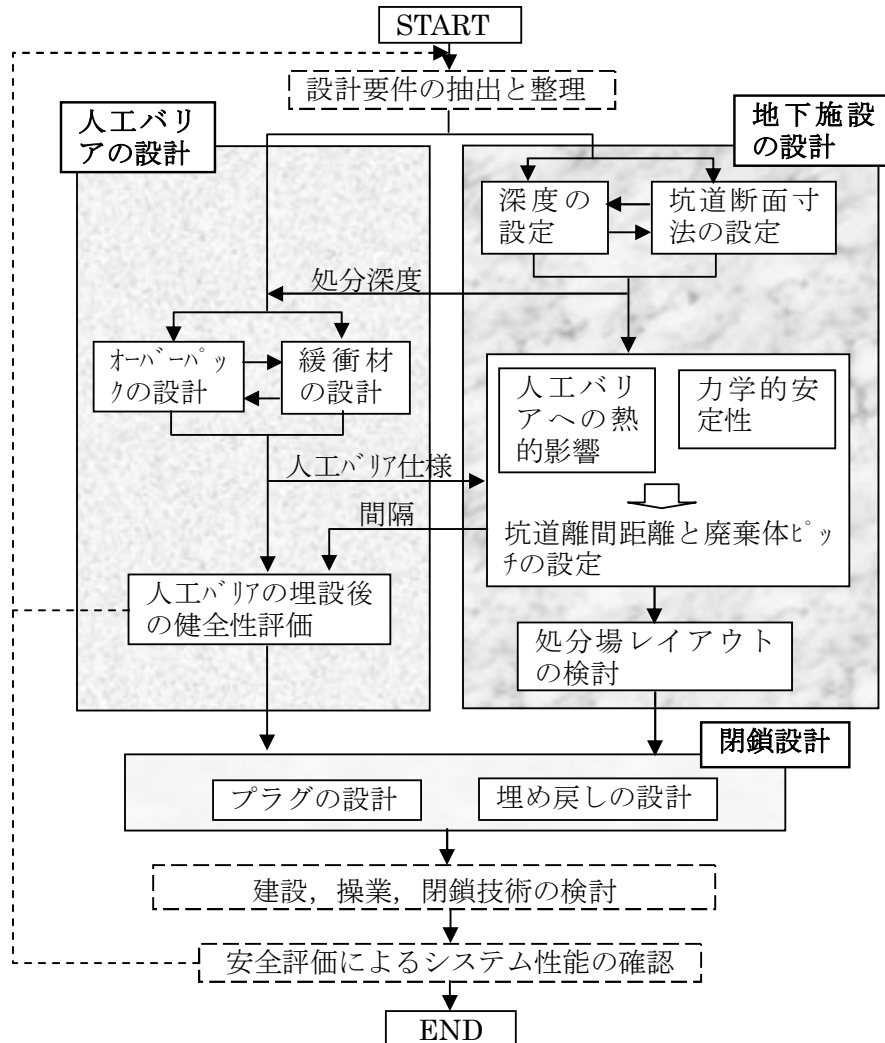


図 2.1-2 見直しによる処分場全体の設計フロー

2.1.2 処分深度の設定

人工バリアの設置環境に影響を及ぼす重要な検討項目であることから、ここでは施設設計手順のうち処分深度をとりあげ、深度の設定に必要な多くの検討事項のうち、設計の範疇で実施すべき事項を設定した。

処分深度の設定について、「第2次取りまとめ」(サイクル機構, 1999)では前提条件としながらも以下の検討項目を挙げている。

①地層処分の長期安全性

- ・天然現象：隆起・沈降・浸食などにより廃棄体が地表に露出しないこと
- ・将来の地下利用：将来の地下利用に対して十分な余裕をもっていること
- ・地層処分システムにおける天然バリア機能：天然バリアとして見込む地層の広がり
長期にわたって確保されること

②地質環境の特性

- ・地下水の地球化学特性：地下水が還元性を有していること
- ・地下水流動特性：－

③建設・調査技術の現状

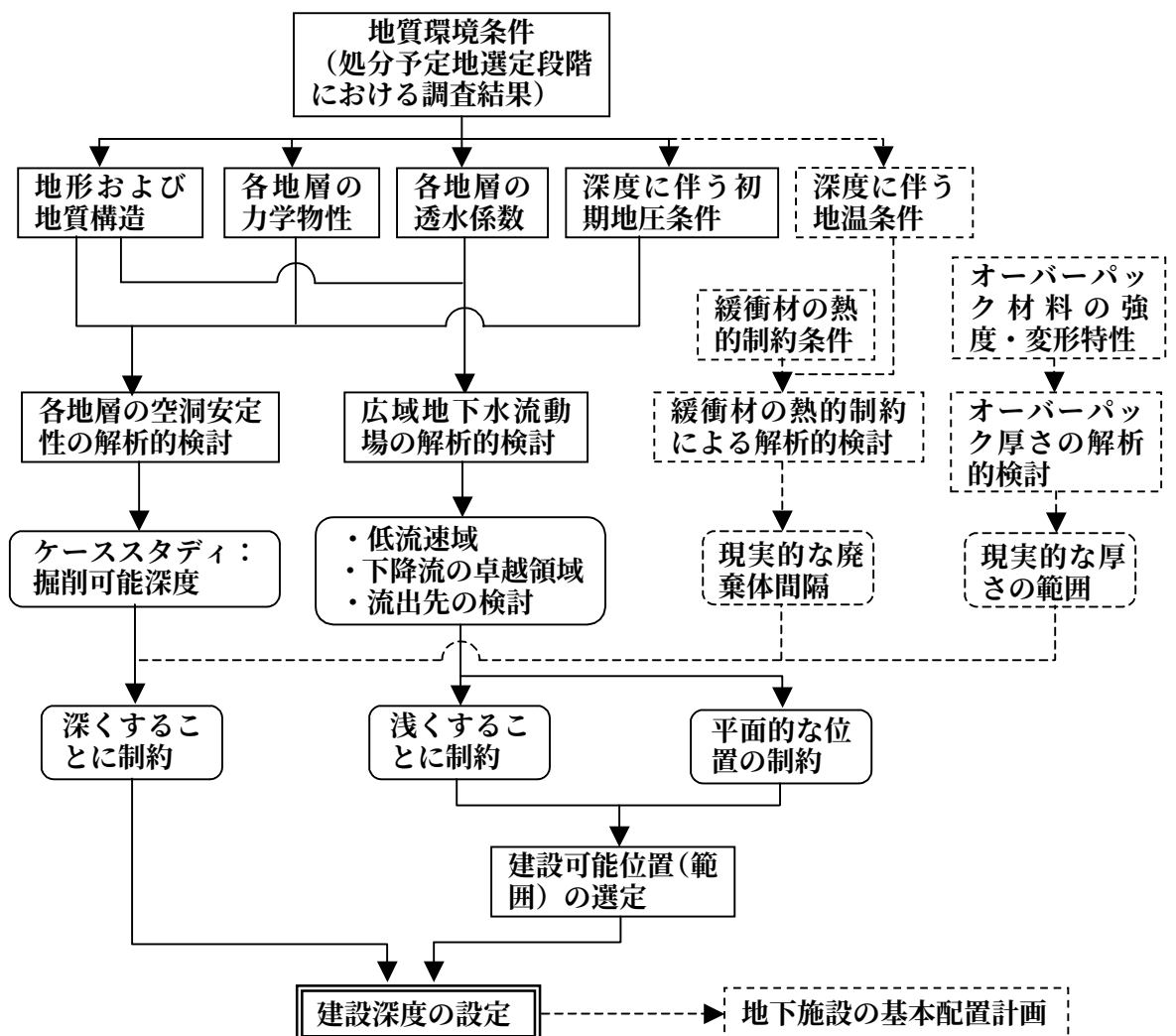
- ・坑道内作業環境温度：作業環境を維持できること
- ・ボーリング孔を用いた現状の調査技術：－

④設計において把握される深度の範囲

- ・空洞の力学的安定性：坑道の力学的安定性の制約から処分深度の範囲が制約される
- ・人工バリアへの熱的影響：深度により初期地温が変わるため熱的制約を満足する廃棄体占有面積が影響される

⑤経済性

事業化技術（電力中央研究所ほか，1999）では，建設深度設定の検討フローとして，図 2.1-3 を提示している。



注）破線は別途検討

図 2.1-3 事業化技術における建設深度設定の検討フロー
(電力中央研究所ほか，1999)

以上に示したように、処分深度の設定に当っては、多岐にわたる検討が必要である。しかし、これらのすべてを地下施設設計の範疇で検討するよりは、一部を設計の範疇で検討し、一部は設計の検討対象とはせず検討結果を情報として得ることが妥当と考えた。事業化技術（電力中央研究所ほか、1999）では、図 2.1-3 に示すように、力学的検討と水理学的検討以外を別途検討するとしている。特に軟岩を対象とした大深度構造物の設計では、空洞の力学的安定性が非常に重要な位置付けを持つものと考えられることから、地下施設設計では空洞の力学的安定性評価を設計対象とし、それ以外の事項については他の検討から得られる入力情報として位置づけることとした。

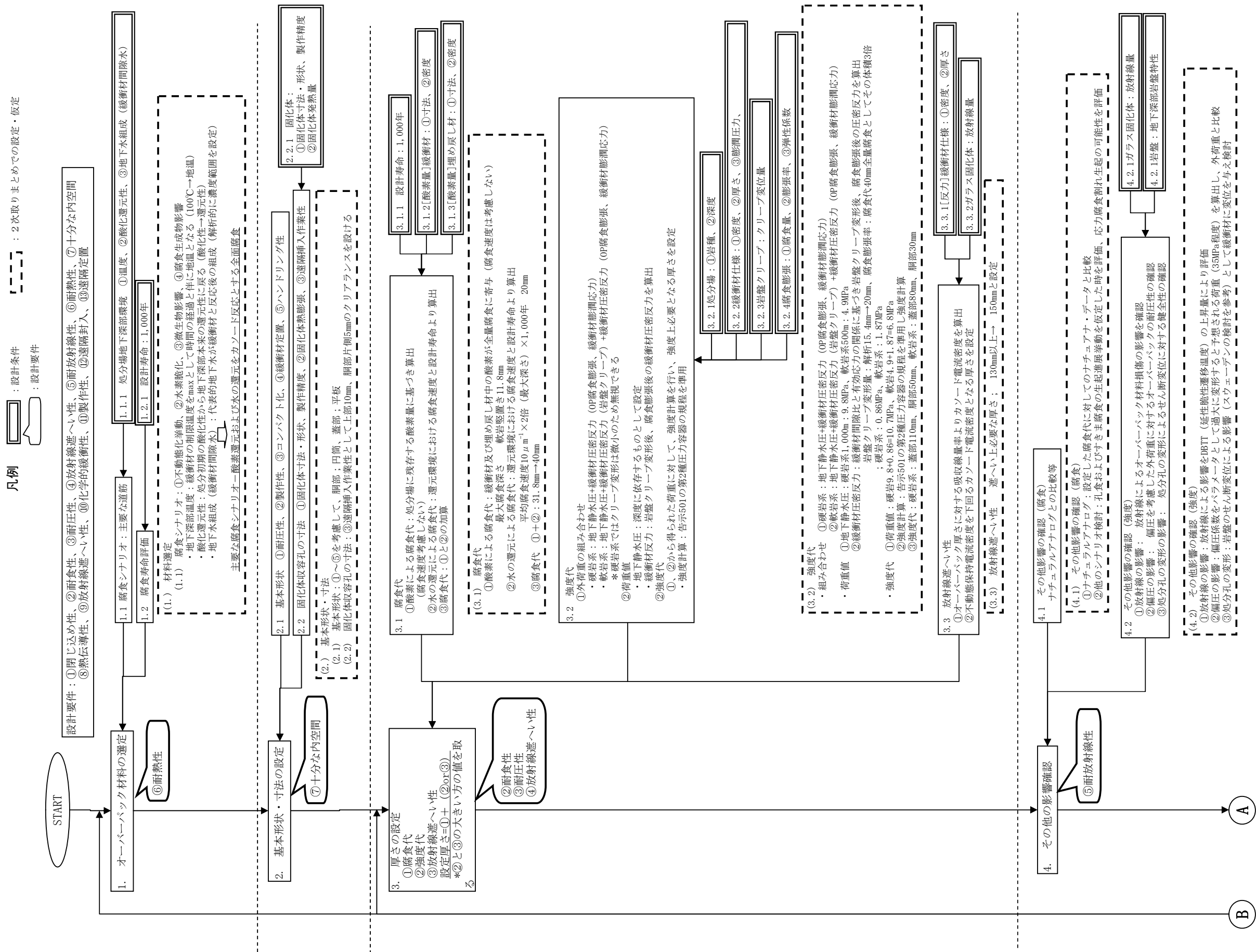
2.1.3 人工バリアの設計

「第 2 次取りまとめ」（サイクル機構、1999）では、オーバーパックと緩衝材の設計手順に関するフロー図の具体的な提示はないが、設計に関する記述を図示するとほぼ図 2.1-4 および図 2.1-5 のようになり、オーバーパックの設計では炭素鋼が主体になっている。一方、事業化技術（電力中央研究所ほか、1999）では図 2.1-6、図 2.1-7 のようなオーバーパックおよび緩衝材の設計検討フローが提示されており、そこではオーバーパックおよび緩衝材それぞれについて、①単独の検討、②人工バリアシステムとしての検討、③性能評価等の観点からの検討という段階的な手順と、各段階での要件項目が示されている。

これらの成果および図 2.1-2 に示した設計全体の流れを踏まえて、人工バリア設計のフローを設定した。さらに、設定にあたっては以下を方針とした。

- ・ 設計の構成としては、①オーバーパックの設計、②緩衝材の設計、③人工バリアシステムの設計の 3 つとし、流れとしては①と②は並行して進め、その後③を実施する。
- ・ 「第 2 次取りまとめ」（サイクル機構、1999）のオーバーパック設計では炭素鋼が中心となっているが、ここではオーバーパック材料の選定手順を考慮する。
- ・ 人工バリアシステムの設計として長期健全性の評価を行う。評価結果は必要に応じて①、②へフィードバックする。

以上の方針に基づいた人工バリアの設計フローを図 2.1-8、図 2.1-9、図 2.1-10 に示す。これらの図では仕様検討に必要となる室内実験データを重視し、また図が煩雑になるのを避けるためフィードバックのルートは省略している。考慮する設計要件は表 2.1-1、表 2.1-2 に示す「第 2 次取りまとめ」（サイクル機構、1999）における設計要件に基づいた。また、緩衝材に関して表に示した設計要件について、その長期的変遷挙動は、「第 2 次取りまとめ」（サイクル機構、1999）において評価されているものの設計要件とはなっていない。しかし、人工バリアの成立性にとって長期健全性は重要な要件と考えられることから、ここでは設計要件として設定した。



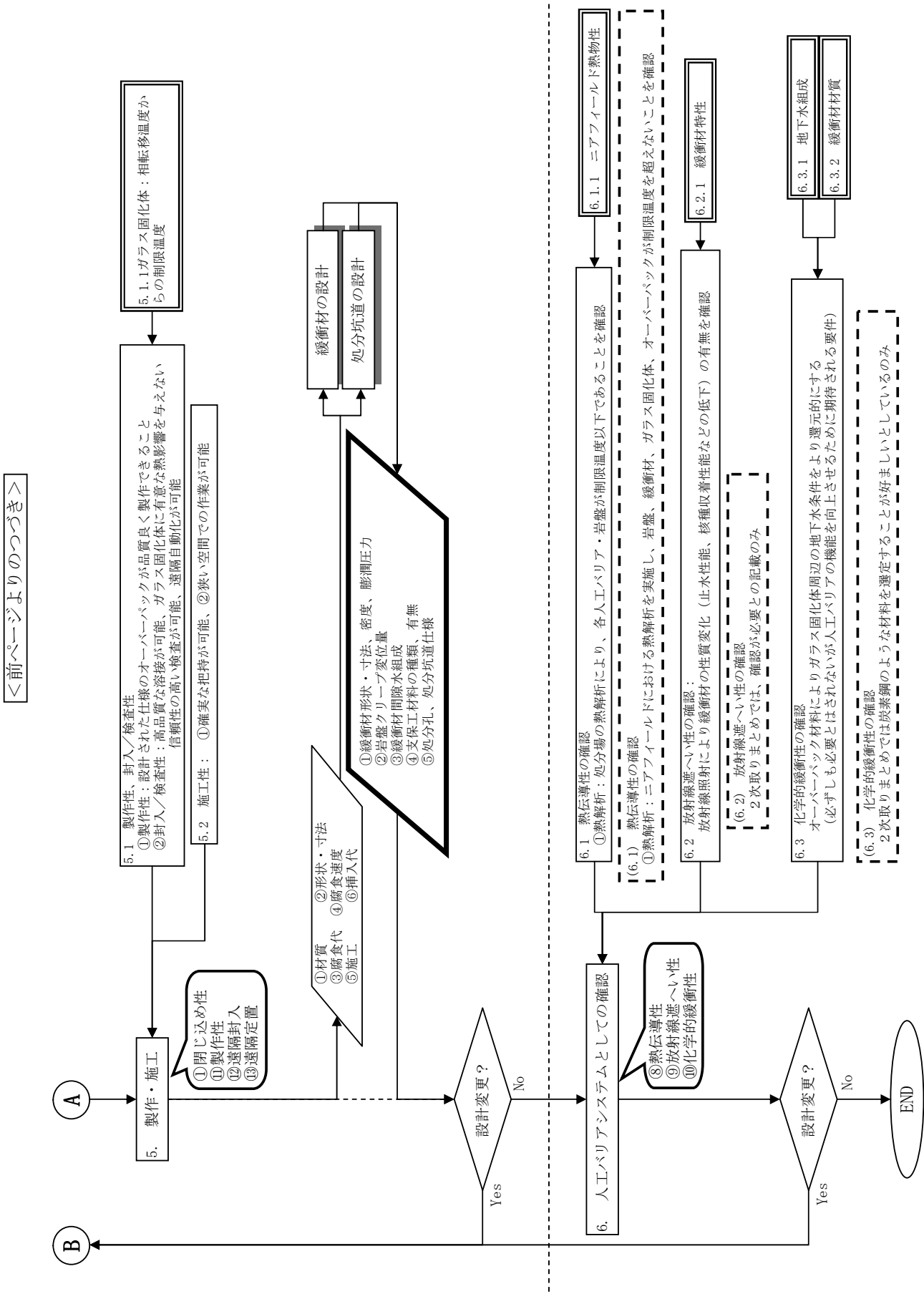


図2.1-4 「第2次取りまとめ」におけるオーバーバック設計の流れ

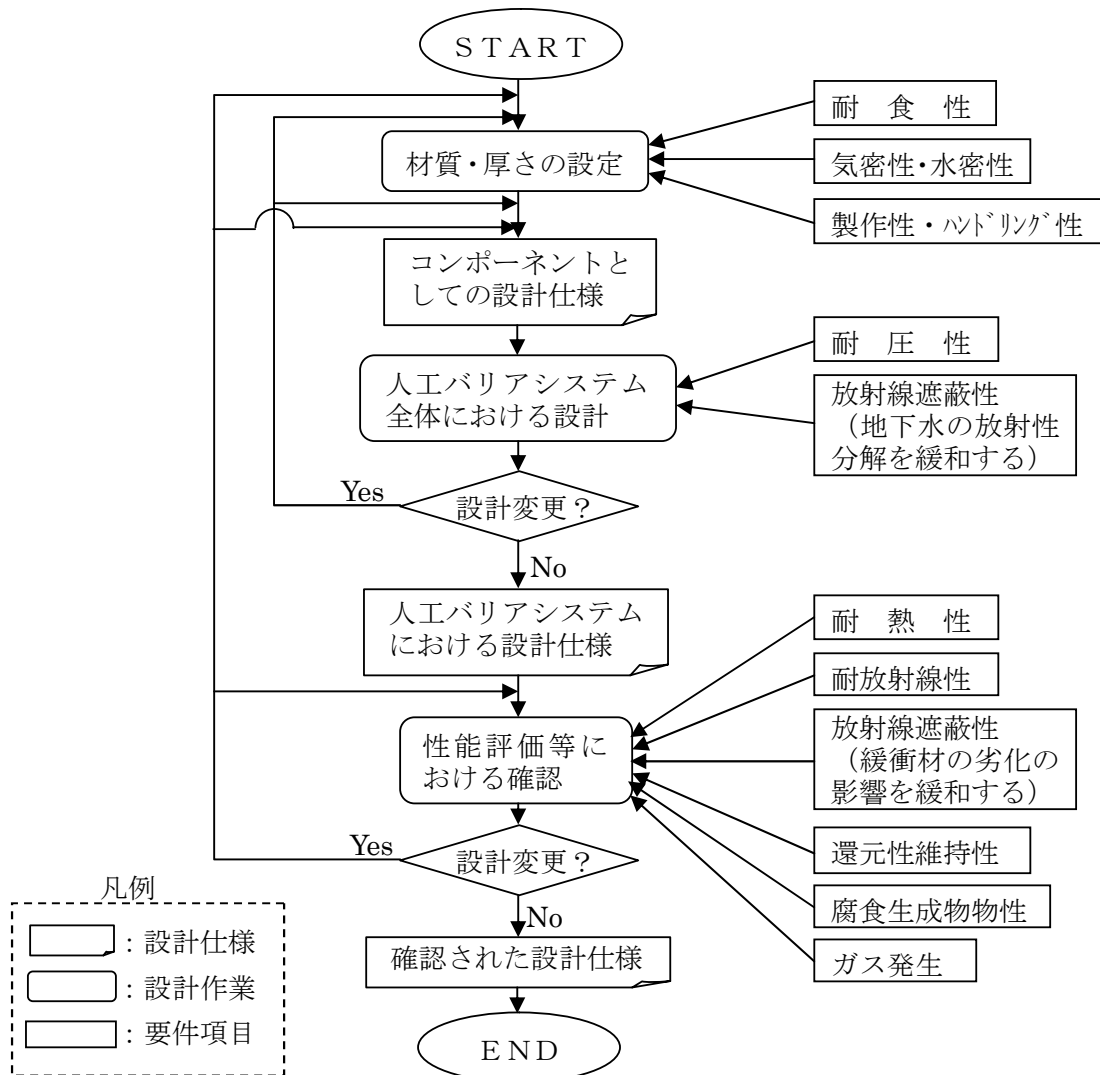


図 2.1-6 事業化技術におけるオーバーパック設計仕様検討フロー
(電力中央研究所ほか, 1999)

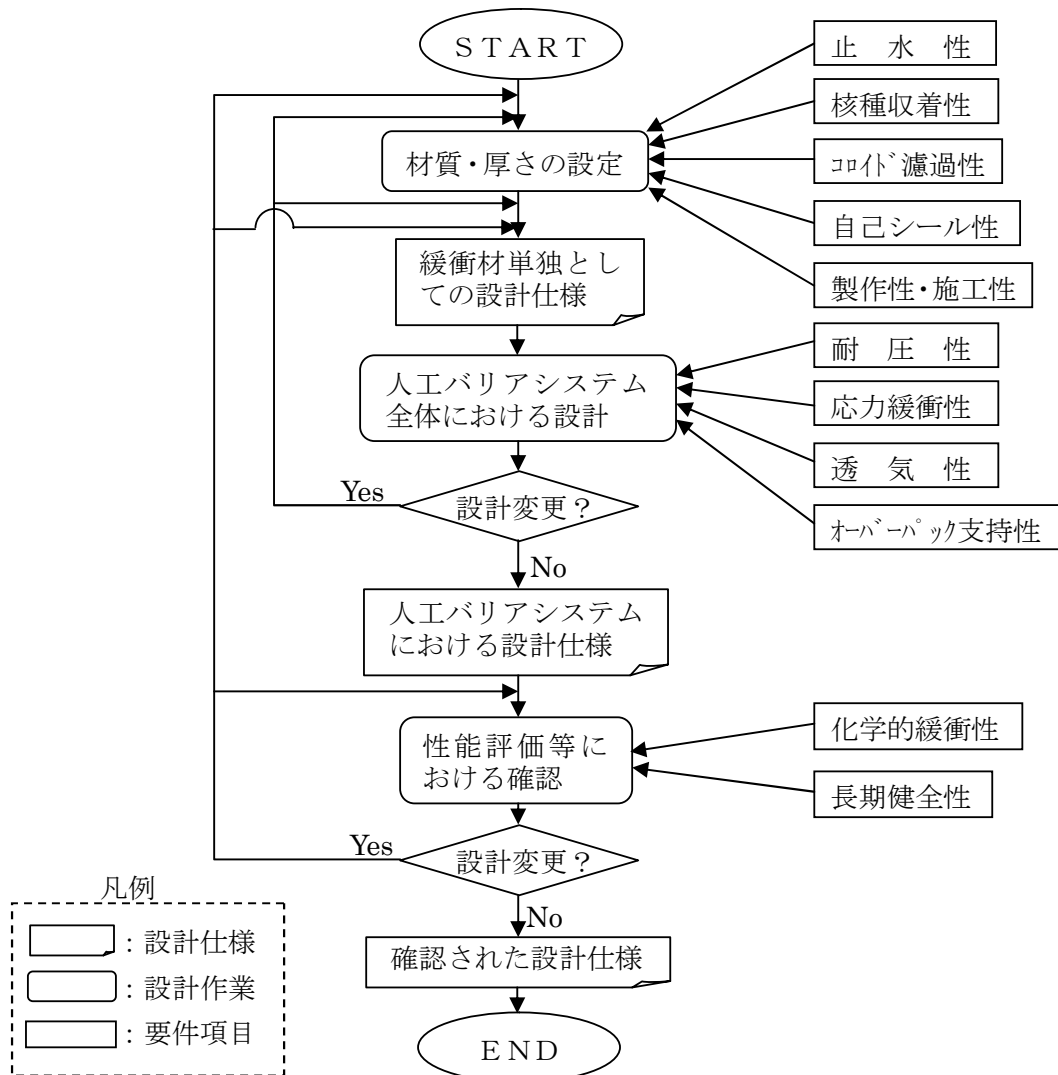


図 2.1-7 事業化技術における緩衝材設計仕様検討フロー
(電力中央研究所ほか, 1999)

表 2.1-1 「第2次取りまとめ」におけるオーバーパックの設計要件（サイクル機構，1999）

基本的な要件	機能・役割	設計上考慮すべき項目（設計要件）	内 容
安全確保のための要件	放射性核種の閉じ込め ガラス固化体に地下水を所定の期間接触させないこと	閉じ込め性を有すること	操業時に放射性物質の外部環境への漏出を防ぐこと／廃棄体埋設後、地下水の浸入を防ぐこと
		耐食性を有すること	廃棄体埋設後、所定の期間、腐食によって閉じ込め性が損なわれないこと
		耐圧性を有すること	埋設後作用する機械的荷重に対して構造健全性を維持し、閉じ込め性が損なわれないこと
		放射線遮蔽性を有すること	ガラス固化体からの放射線による水の放射線分解にともなって生成される酸化性化学種により、腐食が促進されないこと
		耐放射線性を有すること	ガラス固化体からの放射線によって、耐圧性が有意な影響を受けないこと
		耐熱性を有すること	ガラス固化体からの発熱に対し、閉じ込め性、耐食性および耐圧性が有意な影響を受けないこと
人工バリアが成立するための要件	所定の期間、他の人工バリアに有意な影響を与えないこと	十分な内空間を有すること	オーバーパックの変形やガラス固化体の熱膨張により、ガラス固化体が機械的に破損しないこと
		良好な熱伝導性を有すること	ガラス固化体の発熱を外部に伝え、ガラス固化体の安定な形態を損なうような熱による変質を生じさせないこと
		放射線遮蔽性を有すること	ガラス固化体からの放射線によって、緩衝材の材料特性が変化しないこと
		化学的緩衝性を有すること	周囲の地下水を腐食生成物によって、還元性環境に緩和すること
	製作・施工が技術的に可能であること	製作性を有すること	既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術に基づいた構造であること
		遠隔封入性を有すること	ガラス固化体の遠隔操作による封入が、既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術により、ガラス固化体の安定な形態を損なうことなく可能な構造であること
		遠隔定置性を有すること	廃棄体の遠隔操作による定置が、既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術により、ガラス固化体の安定な形態を損なうことなく可能な構造であること

表 2.1-2 「第2次取りまとめ」における緩衝材の設計要件（サイクル機構，1999）

基本的な要件	機能・役割	設計上考慮すべき項目（設計要件）	内 容
安全確保のための要件	放射性核種の移行抑制	地下水の移動の抑制	緩衝材中の地下水の動きを遅くすることにより、緩衝材中の物質移行を遅くするとともに、ガラス固化体の溶解速度や核種の溶出を抑制すること
		溶解した核種の収着	ガラス固化体から溶解した放射性核種を収着することによって放射性核種の移動を抑制すること
		コロイドの移動の防止	コロイド・フィルトレーション機能を有すること 放射性核種がコロイドとして移動することを防げること
		地下水環境の変動の緩和	化学的緩衝性を有すること 地下水の pH や還元性等を化学的に緩衝することにより地下水の化学的条件をこのまじいものにする
人工バリアが成立するための要件	製作・施工が可能であること	自己シール性を有すること	水を含んだ際の膨潤性により、定置時の周辺岩盤との隙間や緩衝材内に生じた隙間を充填できること
		施工可能な特性を有すること	既存の技術によって所要の密度が得られるような締固め特性を有すること
		施工可能な強度を有すること	ブロック方式による施工を想定した場合、据付時のハンドリングに必要な力学的強度を有すること
	所要期間人工バリアの機能に有意な影響を与えないこと	変形能を有すること	廃棄体埋設後、オーバーパックの機能が維持される期間、緩衝材が変形能を有することにより、オーバーパックの腐食膨張と岩盤のクリープ変形を力学的に緩和できること
		力学的に安定に支持できる強度を有すること	廃棄体埋設後、オーバーパックの機能が維持される期間、オーバーパックを力学的に安定に支持でき、地震に対しても健全性を維持できる力学的特性を有すること
		良好な熱伝導性を有すること	良好な熱伝導性を有することにより、ガラス固化体の発熱を外部に伝え、ガラス固化体の安定な形態を損なうような熱による変質を生じさせないこと 人工バリアの性能にかかわる熱移動、水分移動、核種移行、応力緩和などに関する性質に有意な影響を及ぼすような緩衝材の熱的な変質が生じないこと

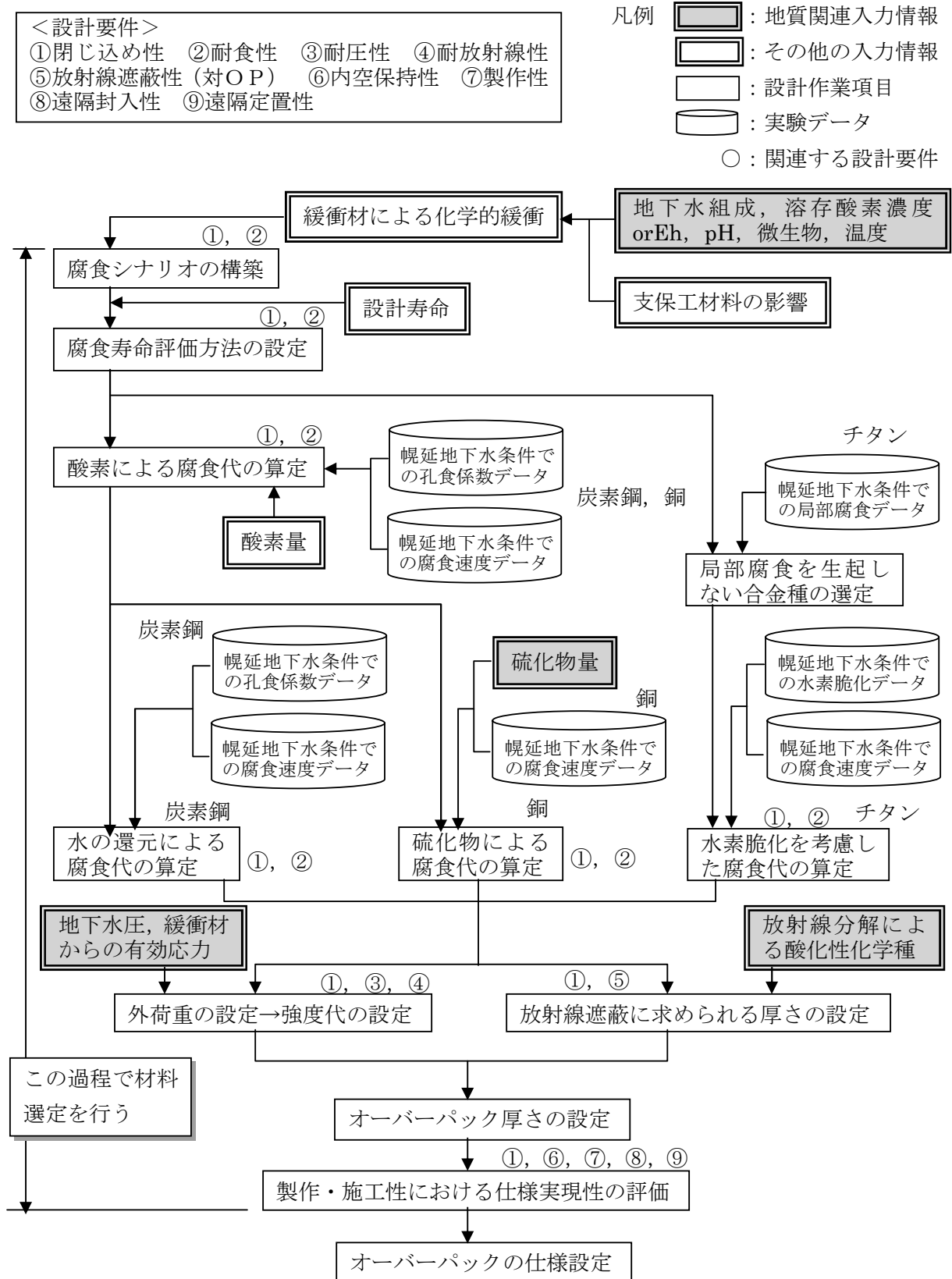


図 2.1-8 オーバーパックの設計フロー

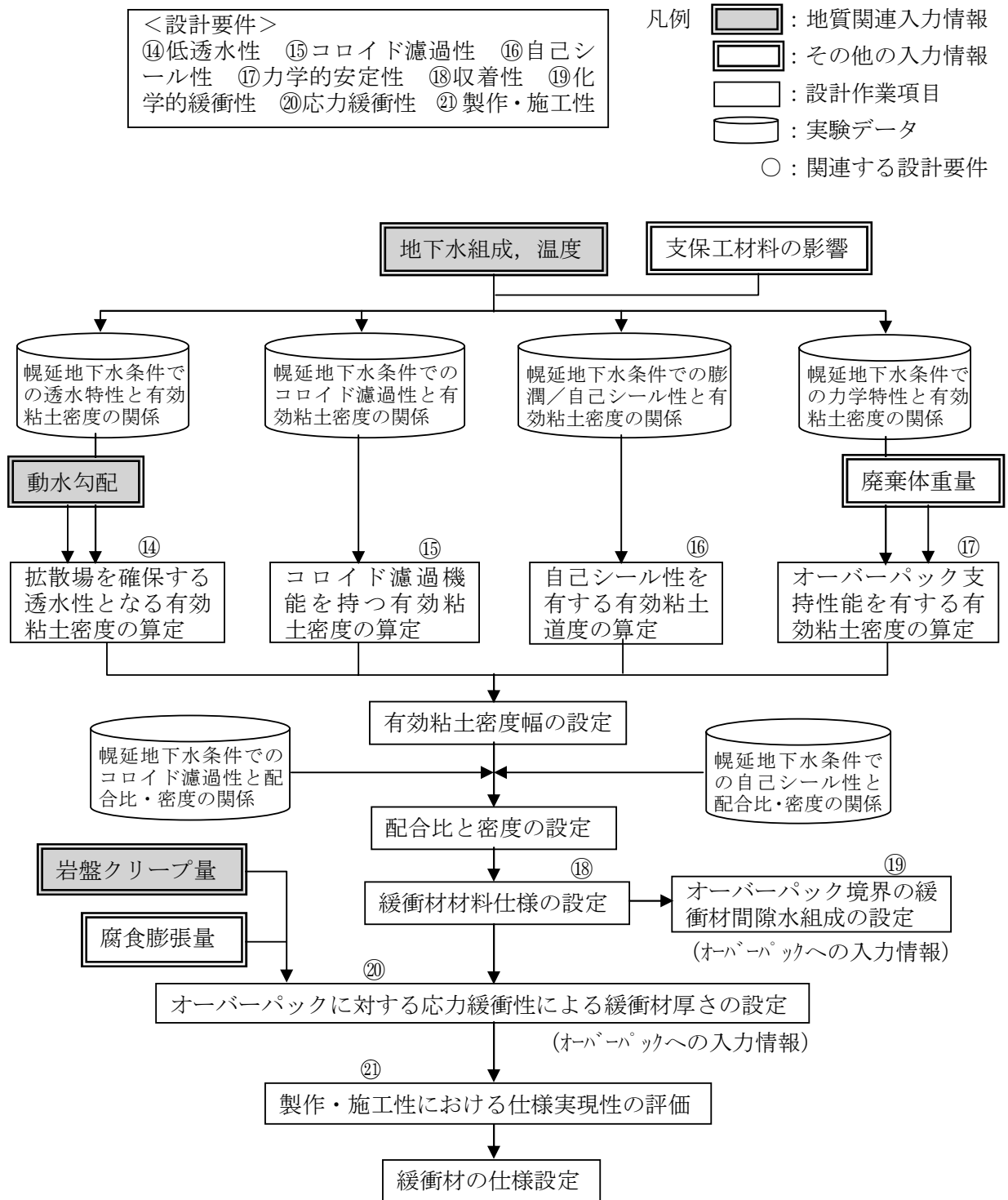


図 2.1-9 緩衝材の設計フロー

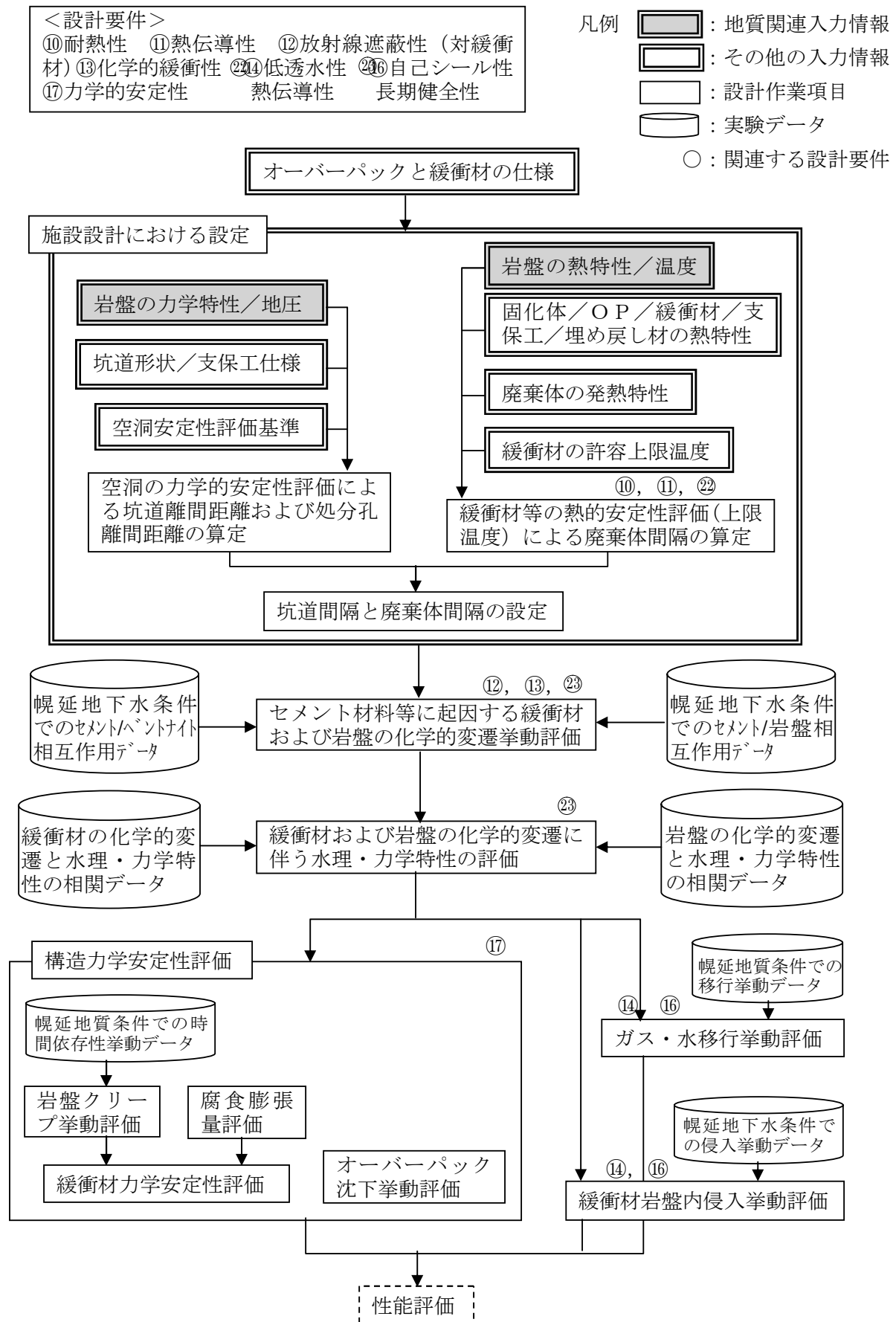


図 2.1-10 人工バリアシステムの設計フロー

2.1.4 閉鎖設計

埋め戻しやプラグなどの閉鎖に対して「第2次取りまとめ」（サイクル機構，1999）では明確な要件は提示していないが，地下坑道に沿った移行ルートの可能性に対しては止水性など人工バリアと類似の要件が求められる。埋め戻しやプラグに対する要求性能は，杉田ら（2003）によって，表 2.1-3 および表 2.1-4 に示すような性能保証項目として提示されている。

表 2.1-3 埋め戻し材の性能保証項目(案)（杉田ほか，2003）

処分場における時間軸	何を性能保証するか（性能保証項目）		
	役割	基準のポイント	
飽和後	核種移行のクリティカルパスにならない	処分坑道の変形による緩み域の増加を抑えるため，必要な剛性を持つこと。	支保工の設置が想定される場合も考慮して，埋め戻し材に十分な膨潤性能を持たせること。
			充填された密度を長期にわたり維持し，地下水の流れで流出しないこと。
		坑道内の透水性を要求レベル以下に抑えること。	
	人工バリアの性能発揮に悪影響を与えない	緩衝材の膨潤圧に対して著しく変形せず，膨出を抑えること，または変形評価が可能なこと（堅置き）。	
		緩衝材を劣化させる要因とならないこと。	

表 2.1-4 プラグの性能保証項目(案)（杉田ほか，2003）

処分場における時間軸	何を性能保証するか（性能保証項目）	
	役割	基準のポイント
埋め戻し中	埋め戻し材，緩衝材の膨出を押さえる（強度プラグ）	埋め戻し材，緩衝材の膨潤圧により機能を喪失しないこと。
埋め戻し後	人工バリアの性能発揮に悪影響を与えない（強度プラグ）	プラグ材料が悪い影響を与えないこと，もしくはその影響が評価されていること。
	坑道に沿った地下水の移動を遮断する（止水プラグ）	プラグ部分の透水性を低くすること。
		支保工，掘削影響領域を含めたプラグ周囲の低透水性を確保すること。連続性を遮断すること。

ここではこの成果を踏まえ，埋め戻し材，強度プラグ，止水プラグそれぞれに対する基本的な要求機能と想定材料を以下のように考えて，設計フローを設定した。

- ・埋め戻し材：閉鎖後の止水性能（ベントナイト混合材料）
- ・強度プラグ：閉鎖前の力学的強度（コンクリート）
- ・止水プラグ：閉鎖後の止水性能（ベントナイト混合材料）

それぞれの設計フローを図 2.1-11，図 2.1-12，図 2.1-13 に示す。

埋め戻しの設計では，締固め施工性を考慮するとともに，支保工材料の影響を含めた地下水組成を条件とした材料特性データに基づく材料配合が必要と考えた。また，これら材料特性の閉鎖後の変遷挙動評価が必要であることから，化学的変質評価および流出評価など物理的変遷挙動評価を行うこととした。

強度プラグの設計では、コンクリート材料を想定していることから、まず pH の影響評価に基づく材料選定（普通コンクリートまたは低アルカリ性コンクリート）を行う。力学的安定性評価により坑道拡幅が必要となった場合は、支保工撤去が必要となることから、撤去時の空洞安定性評価を行う必要がある。強度プラグの設置場所については、地表調査段階の設計であることを考慮して、プラグ配置の考え方のみを提示することとした。

止水プラグの設計では、埋め戻し材と同様、支保工材料の影響を含めた地下水組成を条件とした材料特性データに基づく材料配合が必要となる。また、止水プラグは坑道周辺に生じた掘削影響による高透水性ゾーンの分断を図る必要から、プラグ設置部分の支保工撤去および周辺地山の切り込みを行うものと想定した。よって、この状態における空洞安定性評価が必要と考えた。止水プラグは強度プラグと異なり閉鎖後の長期にわたる機能維持が求められることから、埋め戻しと同様、物理・化学的変遷挙動評価を行うこととした。

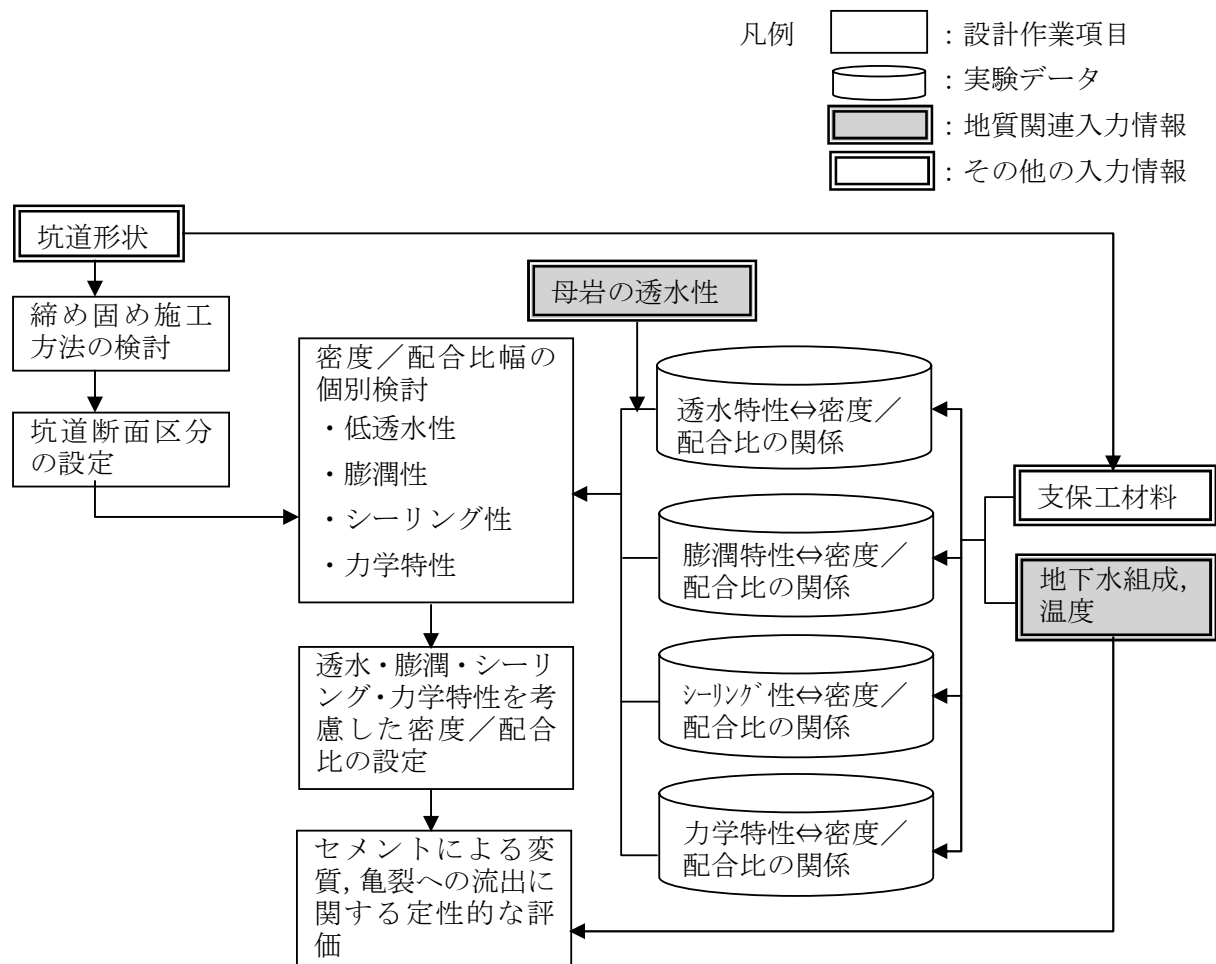


図 2.1-11 埋め戻し材の設計フロー

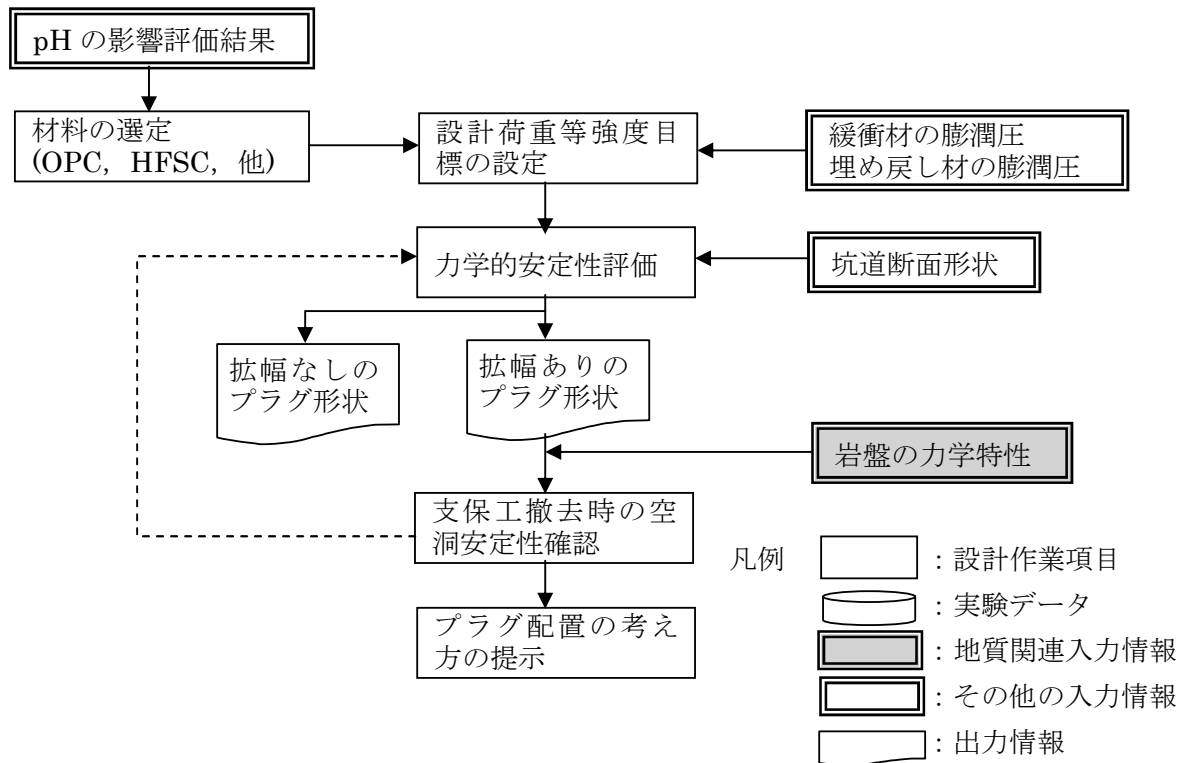


図 2.1-12 強度プラグの設計フロー

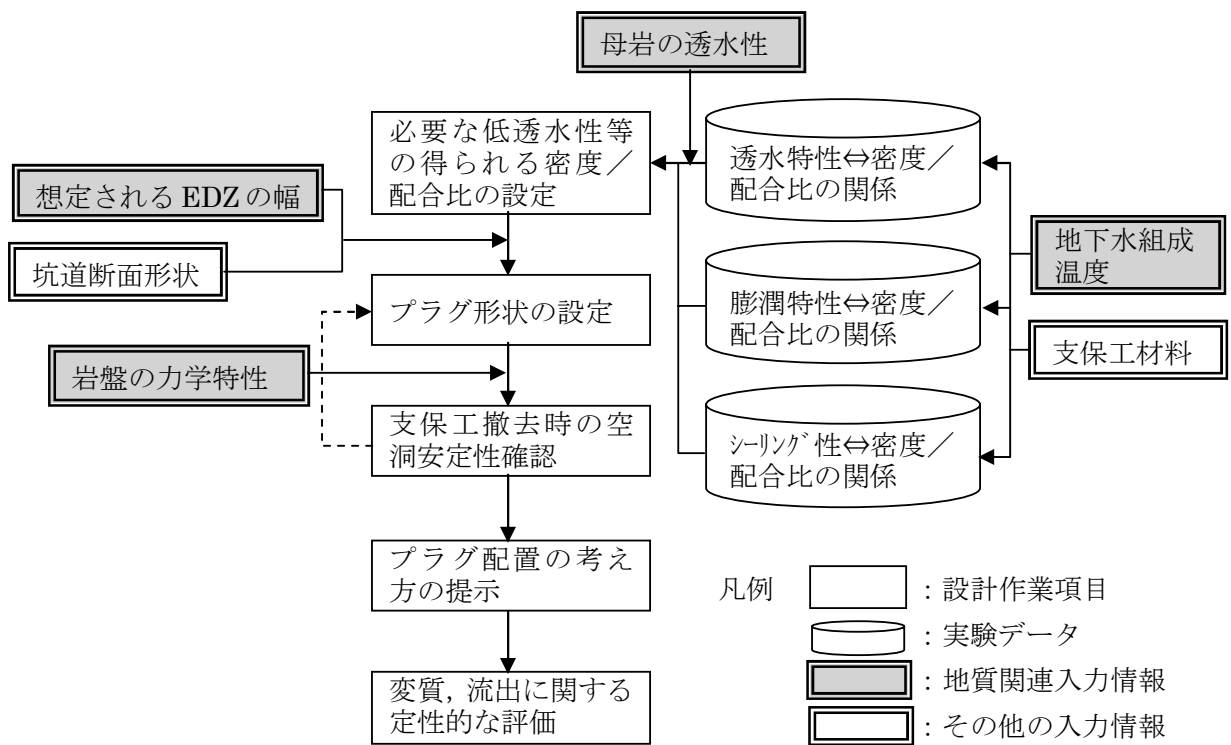


図 2.1-13 止水プラグの設計フロー

2.1.5 設計手順のまとめ

設計手順の検討では、地表からの調査段階における設計を想定し、処分場全体の設計のフローを設定するとともに、処分深度に関して設計の範疇で検討すべき事項の設定、人工バリア設計フローの設定および閉鎖設計フローの設定を行った。

全体設計の流れでは、人工バリア設計と地下施設設計を並列に位置づけるとともに、処分深度設定および閉鎖設計をフローの中に提示した。処分深度の設定では、設計の範疇で検討すべき事項を空洞安定性評価のみとした。人工バリア設計では、オーバーバック、緩衝材および両者を合わせた人工バリアシステムについて、それぞれの設計フローを提示し、その中で設計に必要なとなる入力情報を明らかにした。閉鎖設計においても、埋め戻し材、強度プラグおよび止水プラグについての設計フローを提示するとともに、その中で設計に必要なとなる入力情報を明らかにした。

これらの検討により、地表からの調査段階における人工バリア設計と閉鎖設計の概要や位置付けがより明確なものとなった。

なお、処分場全体の設計の流れは以下のように述べることができる。設計では最初に地下施設設計で空洞安定性の評価による深度の設定を行い、この深度における地下水化学条件、力学条件、水理条件を人工バリア設計入力データとして設定する。次に、この入力データを条件としてオーバーバックと緩衝材の設計が行われる。地下施設設計では抗道断面の仮定の基に深度が設定され、次いで熱解析と空洞安定解析で廃棄体の埋設密度が設定されることにより処分場全体の平面規模が求まる。この平面規模を設定深度における地質構造モデルに配置することで処分場レイアウトが設定される。これらの成果を受けて閉鎖設計を行う。以上の流れを図 2.1-14 に示す。

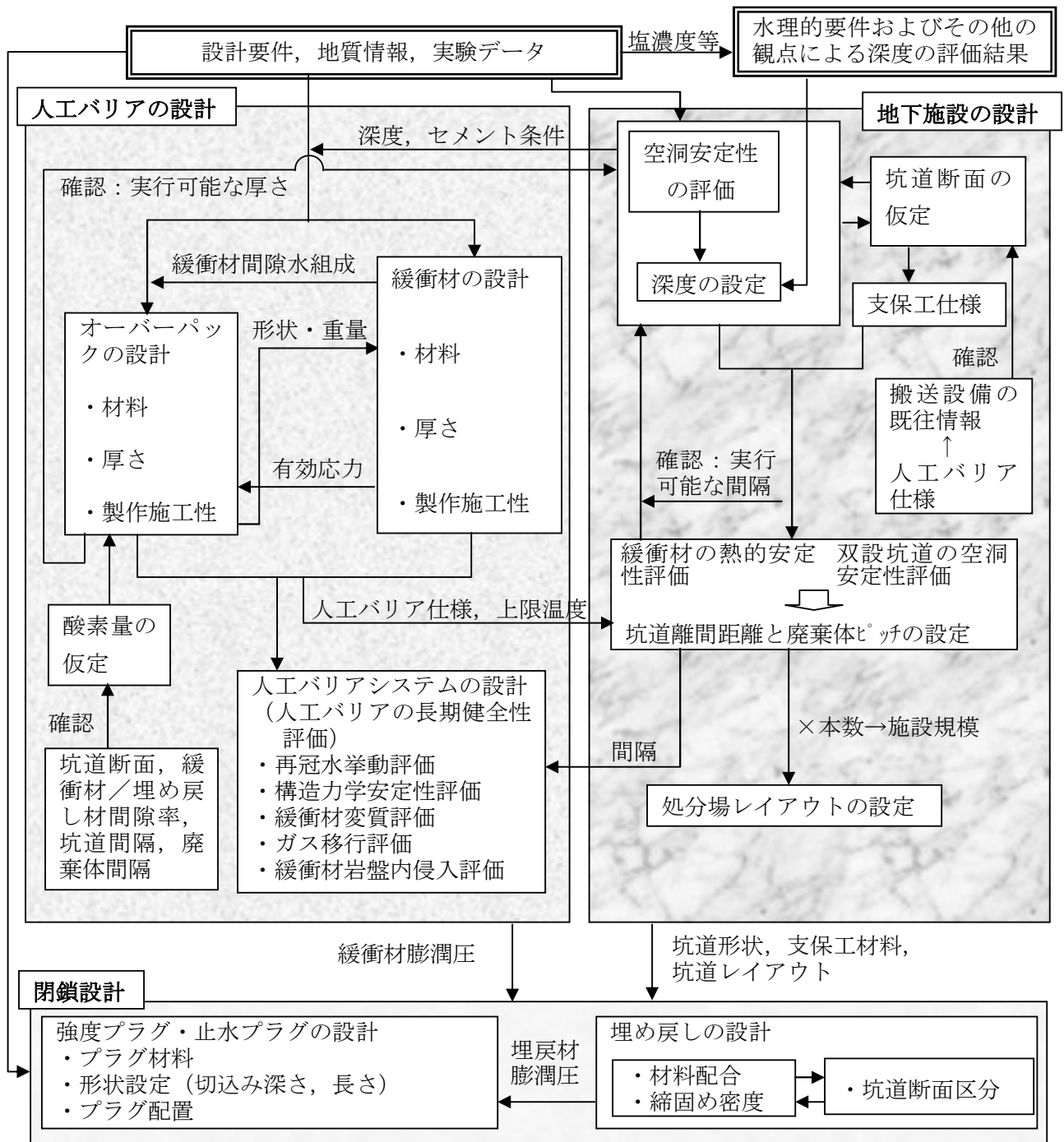


図 2.1-14 処分場全体の具体的な設計フロー

2.2 地質環境と設計の関係および設計に必要なデータ

地下水の塩濃度が高くなると、ベントナイト混合材料の透水係数が影響を受け、緩衝材の設計要件である低透水性へ影響する可能性が出てくる（サイクル機構，2003）。この影響に対しては有効粘土密度などの人工バリア仕様での対応が適切と考えられる。このような地質環境と設計要件および設計での対応の関係を図 2.1-8～図 2.1-10 に示した人工バリアの設計フローに基づいて表 2.2-1、表 2.2-2 に整理した。なお、ここで対象とする設計要件は設計フローに示したもののうち、地質環境の影響を受け、かつ人工バリアの安全機能に係わる要件とした。また、表 2.2-2 には緩衝材とともに人工バリアシステムに関連するものも併せて示した。

表 2.2-1 オーバーパックに関する地質環境と設計の関係

影響を及ぼす地質環境	地質環境以外の影響要因	影響内容	影響を受ける設計要件	設計での対応
地下水組成 地下水の酸化還元性 温度	緩衝材の化学的緩衝性 固化体からの熱	腐食挙動，腐食速度が影響される	閉じ込め性 耐食性	材質 腐食厚さ
微生物の存在 温度	緩衝材中での増殖と活動 固化体からの熱	腐食挙動，寿命が影響される	閉じ込め性 耐食性	材質
地下水の酸化還元性	固化体からの放射線	水の放射線分解による酸化性化学種により腐食速度が影響される	放射線遮蔽性	放射線遮蔽厚さ
地下水の pH 温度	支保工材料の影響 緩衝材の化学的緩衝性 固化体からの熱	腐食挙動が影響される	閉じ込め性 耐食性	材質 腐食厚さ
地下水圧 地圧 岩盤の力学特性	緩衝材の有効応力（岩盤のクリープ挙動） （オーバーパックの腐食膨張）	オーバーパックに作用する外力が影響される	閉じ込め性 耐圧性	材質 耐圧厚さ

表 2.2-2 緩衝材に関する地質環境と設計の関係

影響を及ぼす地質環境	地質環境以外の影響要因	影響内容	影響を受ける設計要件	設計での対応
地下水組成（塩濃度） 動水勾配 温度	固化体からの熱	拡散場の確保が影響される	低透水性	材質
地下水組成（塩濃度） 温度	固化体からの熱	コロイド濾過性能，自己シール性能が影響される	コロイド濾過性 自己シール性	材質
地下水組成（塩濃度）	廃棄体形状，重量	オーバーパックの支持性能が影響される	力学的安定性	材質
地圧 岩盤の力学特性	岩盤のクリープ挙動 オーバーパックの腐食膨張量	オーバーパックに作用する外力が影響される	応力緩衝性	厚さ
温度 岩盤の熱特性	固化体からの熱 オーバーパック，支保工，埋め戻し材の熱特性 埋設間隔	熱的な変質が影響される	熱伝導性	材質 （施設設計における埋設間隔）
地下水の pH 温度	支保工材料の影響	pH による変質が影響される	長期健全性	システムとしての評価*
地圧 岩盤の力学特性	岩盤のクリープ挙動評価 オーバーパックの腐食膨張量評価	せん断破壊に対する安全性が影響される オーバーパックの支持性能が影響される	力学的安定性	システムとしての評価*
地下水組成（塩濃度） 温度	オーバーパックからのガス発生	緩衝材中のガス移行挙動が影響される	低透水性 自己シール性	システムとしての評価*
亀裂の存在 地下水流速 温度		岩盤亀裂中への侵入により緩衝材密度が影響される	低透水性 自己シール性	システムとしての評価*

*：評価結果により必要に応じて緩衝材，オーバーパックの材質と厚さ，または設計要件へフィードバックされる

人工バリアの設計に当たっては、表 2.2-1 および表 2.2-2 に示した「影響を及ぼす地質環境」を設計入力データとして設定する必要がある。この具体的内容を表 2.2-3 に示す。これが人工バリアの設計に必要な地質環境に関する設計入力データ項目となる。

表 2.2-3 地質環境に関する人工バリア設計入力データ項目

分類	設計入力データ項目
地球化学	溶存酸素濃度 or Eh, pH 地下水組成 優先 : $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}/\text{H}_2\text{CO}_3$, SO_4^{2-} , $\text{HS}^-/\text{H}_2\text{S}$, Cl^- , イオン強度 (Na,Ca,K,Mg, 陰イオン) その他 : P, NO_3^- , $\text{NH}_3(\text{aq})$, NH_4^+ , B
力学	地圧, 時間依存性パラメータ, 変形係数, ポアソン比, 一軸圧縮強度, 引張強度
水理	動水勾配, 地下静水圧, 流速
熱	温度, 熱伝導率, 比熱
その他	微生物 (硫酸塩還元菌, メタン生成菌, 鉄細菌), 岩盤の亀裂状態

2.3 設計入力データ

2.3.1 入力データとしての要件

2.1 節に示した人工バリアの設計フローを基に、人工バリア設計と地質情報の関連を模式的に図 2.3-1 に示す。ここでは現地調査から設計入力データにいたる過程を中心に検討を行う。なお、図 2.3-1 の「人工バリアの設計」の内容は、図 2.1-8～図 2.1-10 の設計フローにおいて、凡例で“設計作業項目”として提示した内容を意味する。

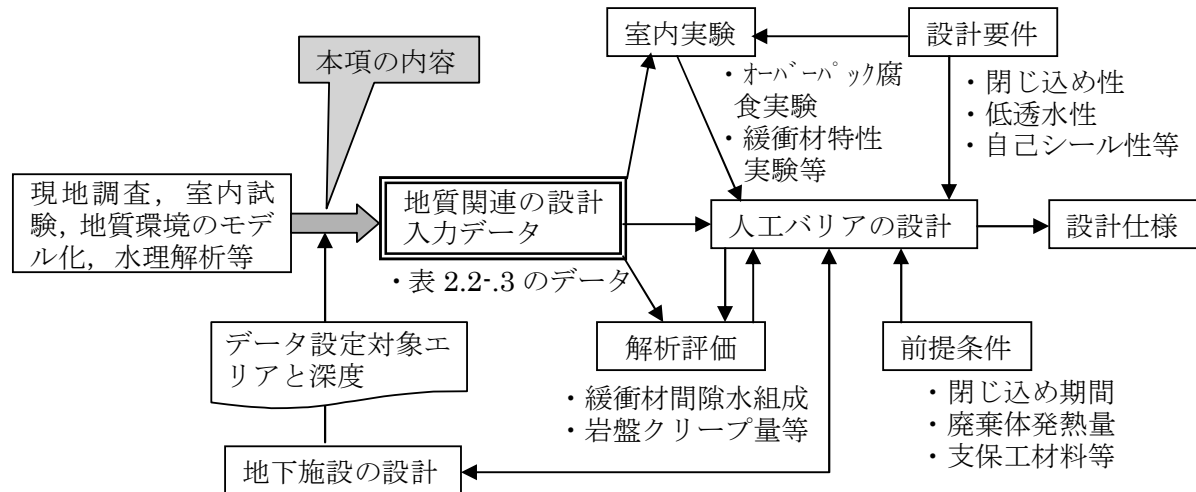


図 2.3-1 人工バリア設計と地質情報の関連

表 2.2-3 にある項目は、その他欄の“微生物”と“岩盤の亀裂状態”を除きすべて数値での記述が可能である。この数値の設計入力データとしての要件は以下に示すものである。

- ①データの信頼性が評価できること
- ②人工バリア設置範囲での空間的な変動が考慮されていること
- ③時間的な変動（将来の変化）が考慮されていること

上記の①については、少なくともデータの履歴（何時、どのような方法で取得されたデータか、どのような加工を経て設定された数値か、など）が明らかになっている必要がある。

また、入力情報の形態としては、以下のような形が望ましい。

- ①代表値または数値の範囲で提示されること
- ②必要に応じて以下のような統計量等が提示できること
（個々のデータの値、ヒストグラム、平均値、標準偏差、%点、データ相互の相関関係）

2.3.2 入力データの設定手順

調査からその成果の反映先である設計や性能評価へ至るフローを図 2.3-2～図 2.3-4 に示す（戸井田ほか，2003 に加筆修正）。これらは人工バリア設計で必要となる表 2.2-3 のデータの値の設定手順として参考とすべきものであり，図中の太線枠が人工バリア設計に関連する部分である。以下に入力データの設定手順の概要を述べる。

(1)地球化学に関する入力データの設定手順

地下水採取による室内分析試験，地下水長期モニタリング，岩石の鉱物分析，物理探査など，局部的・離散的な調査結果をもとに，対象とする領域の地表および地下の水質分布を求め，地球化学モデルを構築する。モデル構築に当たっては，現在の水質のみならず水質の起源やその形成機構の検討を行うとともに，地質構造モデルや水理地質モデルとの整合性を考慮する。このモデルにおいて処分深度に該当する部分のデータを抽出することにより，地球化学に関する入力データを設定する。

(2)力学に関する入力データの設定手順

試錐コアの室内試験結果，原位置での初期応力測定や物理探査，物理検層などの局部的・離散的データをもとに岩盤力学モデルを構築する。モデル構築に当たっては地質構造モデルとの整合を考慮する。このモデルにおいて，地下施設設計に対しては地表から処分深度までの，人工バリア設計に対しては処分深度部分のデータを抽出することにより，力学に関する入力データを設定する。

(3)水理に関する入力データの設定手順

試錐孔における水理試験，コアの透水試験，表層水理調査，地下水長期モニタリング，コアの物理試験などをもとに水理地質構造モデルを構築する。モデル構築の過程においては流向・流速，動水勾配，塩淡境界分布，流跡線などの水理解析結果と地質構造モデル，地球化学モデルおよび地史・古環境の理解との整合を図る。次に，このモデルの処分深度該当部分の水理解析結果を抽出することにより水理に関する入力データを設定する。

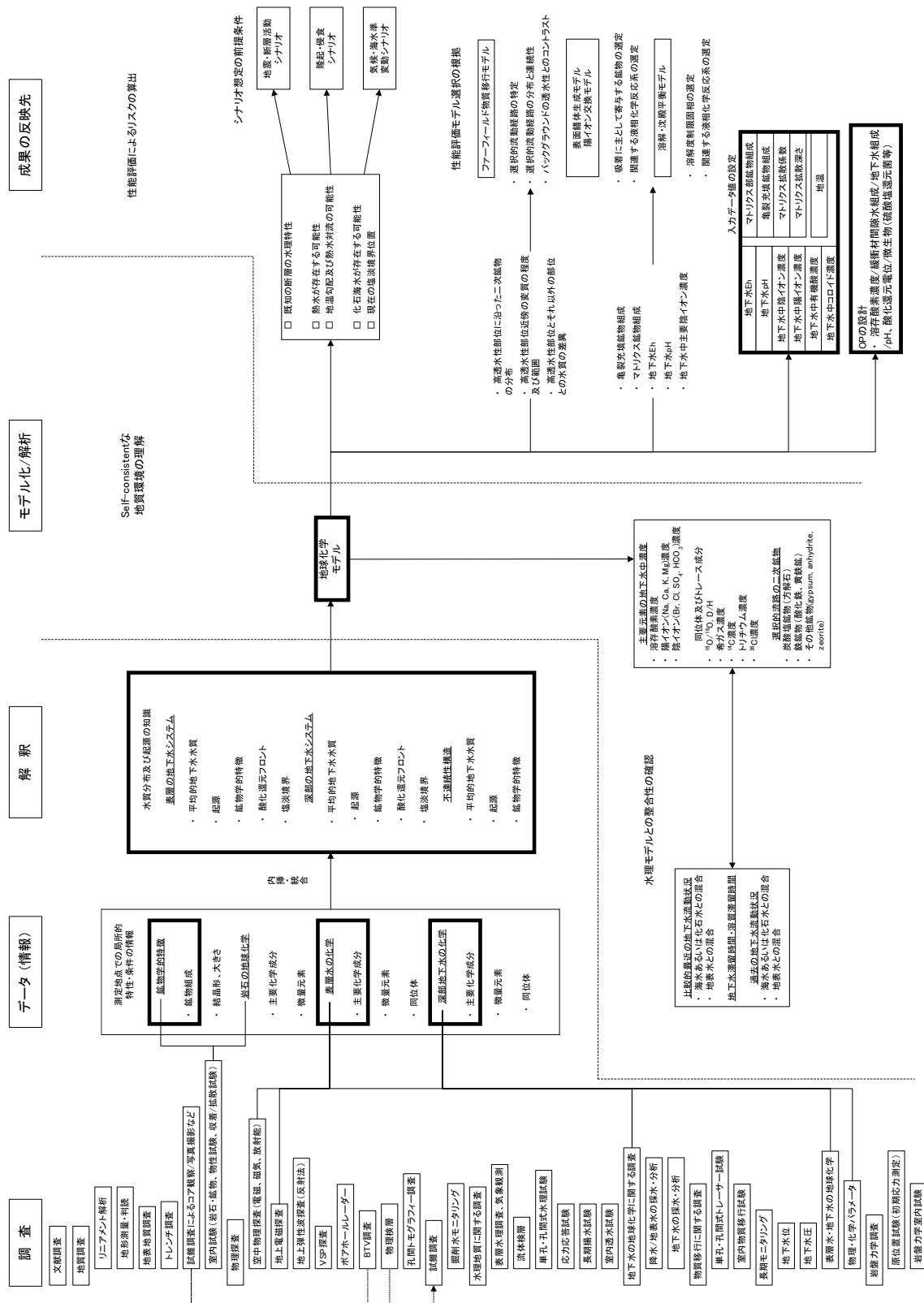


図 2.3-2 地球化学モデルの作成および成果の反映先に至るフロー

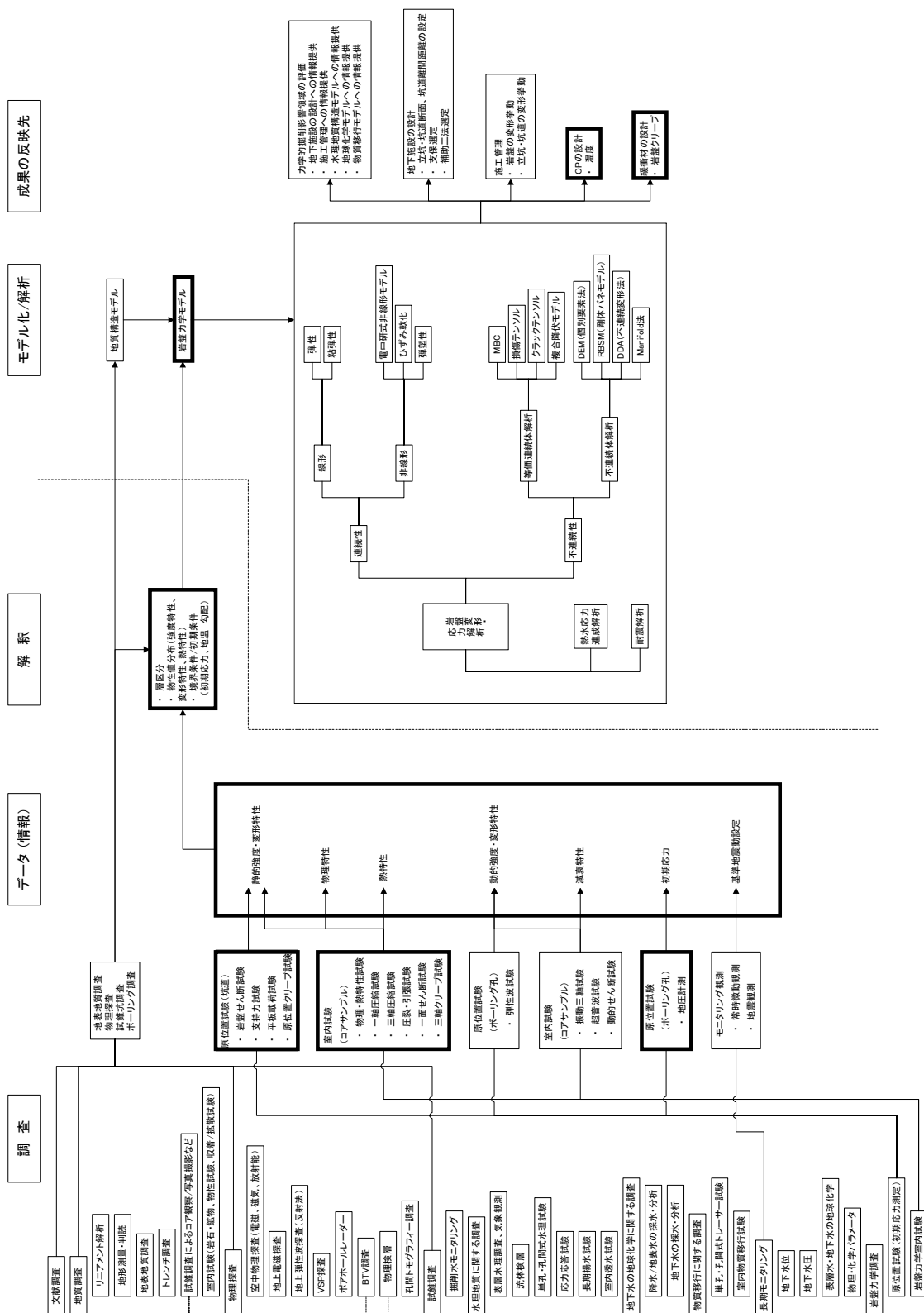
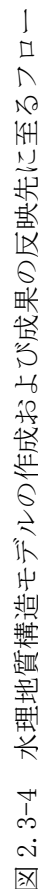


図 2.3-3 岩盤力学モデルの作成および成果の反映先に至るフロー



3 深度が原位置試験環境に与える影響評価

地層処分におけるオーバーバックや緩衝材は、その設置環境の地下水の化学的性質によって腐食挙動や膨潤性能が大きく影響を受けることから、設計要件を満たすためには地下水化学に応じた材質や厚さなどの設計仕様を設定する必要がある。また、地下水化学は人工バリア周辺に支保工などのコンクリート材料が設置された場合、大きく影響を受ける。さらに、支保工の有無は空洞安定性評価によって判断され、この空洞安定性評価の入力条件となる岩盤の力学物性値と地圧条件は深度によって影響される。このように、処分深度は人工バリアの設計に影響を及ぼす重要な要因である。

一方、幌延の深地層の研究施設においても人工バリアに関する原位置試験が計画されており、深度はこの試験環境に影響を及ぼす重要な要因である。ここで具体的地質環境を例にとり、試験深度が人工バリアに関する原位置試験環境に与える影響を評価することは、原位置試験仕様設定に向けた検討として有用と考えた。よって、ここでは幌延においてこれまでに取得されたデータから、力学に関する設計入力データを設定するとともに、このデータに基づいた複数の深度における人工バリアに関する原位置試験環境（試験孔）の空洞安定性評価を行い、試験孔における支保工コンクリートの有無の検討を行う。

付録・2 に、幌延におけるデータ取得状況（平成 15 年度まで）を示す。

3.1 岩盤力学に関する入力データの設定

ここでは幌延における試験錐 HDB-1 孔および HDB-3 孔で取得されたデータに基づき、力学に関する設計入力データの設定を実際に行う。以下に示す設定は、幌延の深地層の研究計画における地下施設の空洞安定性評価（幌延深地層研究センター，2004）における地山条件の設定を基本に検討したものであり、これに人工バリア設計に必要な時間依存性パラメータの設定を加えた。設計入力データは、①岩盤物性、②初期地圧、③時間依存性パラメータの 3 つに分類して述べる。なお、以下のデータ設定では 2.3.1 項で要件とした時間的／空間的変動は考慮していない。

3.1.1 岩盤物性

設計に必要な岩盤物性の項目と、それを得るために幌延で実施した調査試験を表 3.1-1 に示す。また、実際に岩盤物性値を設定した流れを、図 3.1-1 に示す。

表 3.1-1 設計に必要な岩盤物性と調査試験

岩盤物性	調査試験
単位体積重量	物理試験
ポアソン比	一軸圧縮試験
一軸圧縮強度	一軸圧縮試験
弾性係数	一軸圧縮試験
内部摩擦角	三軸圧縮試験
粘着力	一軸圧縮試験，三軸圧縮試験
引張強度	一軸圧縮試験，圧裂引張試験
P,S 波速度＊	弾性波測定

＊：データ欠損区間の補間に使用

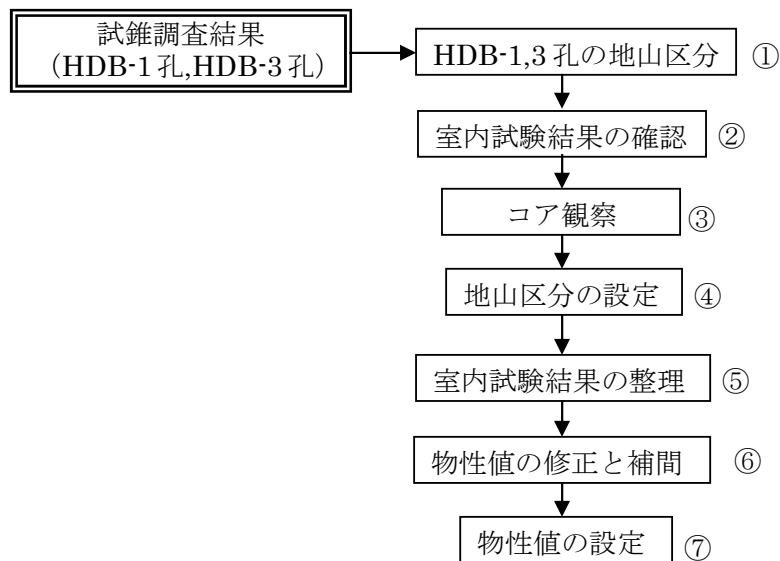


図 3.1-1 岩盤物性値の設定フロー

①HDB1,3 孔の地山区分

以下の項目に着目して、深度方向の物性分布設定の基礎となる HDB-1 孔および HDB-3 孔の地山区分を行った（図 3.1-2 参照）。

- ・地層境界
- ・岩石境界
- ・岩級区分境界
- ・岩相が顕著に変化する境界
- ・RQD が顕著に変化する境界
- ・割れ目頻度が顕著に変化する境界
- ・検層データ（孔径，P・S 波，密度，空隙率）が顕著に変化する境界
- ・硬さが顕著に変化する境界

②室内試験結果の確認

①で設定した地山区分毎に HDB-1，HDB-3 の室内試験結果を整理し，データ欠損区分を確認した。

③コア観察

地層境界が明確でないなど，懸案が残る部分に着目してコア観察を行い，地山区分設定のための情報を取得した。

④地山区分の設定

声間層と稚内層の層境の標高が一致するよう HDB-1，HDB-3 の標高補正を行い（図 3.1-2 参照），両孔の区分標高を用いた地山区分の設定を試みたが，両孔の地山区分標高が一致しないため，原則として研究所設置場所に近い HDB-3 の地山区分を採用し，HDB-3 のデータのない深部については HDB-1 の地山区分を採用することとした。この区分にコア観察の検討結果による修正を加えた。最終的に設定された地山区分を図 3.1-3 に示す。

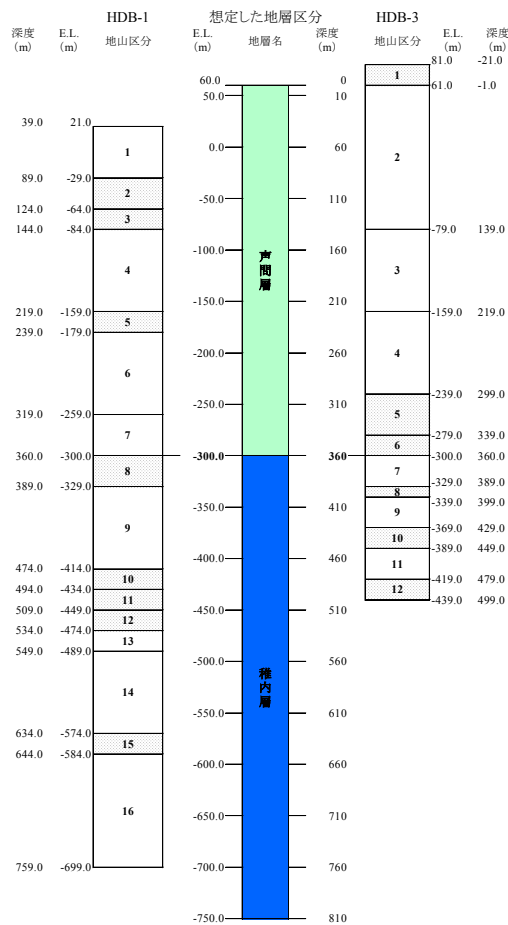


図 3.1-2 HDB-1,3 孔の地山区分（標高補正後）

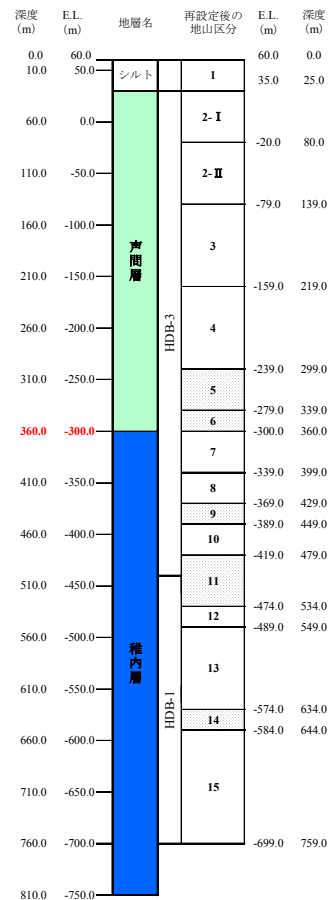


図 3.1-3 設定した地山区分

⑤室内試験結果の整理

④で設定した地山区分毎に HDB-1,3 孔の室内試験結果から単位体積重量，弾性係数，ポアソン比，一軸圧縮強度，粘着力，内部摩擦角，引張強度のそれぞれについて最小値，平均値，最大値を算定した。この内一軸圧縮強度の例を表 3.1-2 に示す。

⑥物性値の修正と補間

岩石の物性値である室内試験結果から岩盤の物性値へ修正する方法として，室内試験試料の弾性波速度（ v_p ）と岩盤の弾性波速度（ V_p ）の比の 2 乗で求まる低減率 k （ $k = (V_p/v_p)^2$ ）を用いた。また，データ欠損区間の補間方法としては連続してデータの得られている検層結果を利用することとした。一軸圧縮強度と弾性係数については一軸圧縮強度と弾性係数との相関および一軸圧縮強度と弾性波速度の相関を用いた。また，内部摩擦角については内部摩擦角と一軸圧縮強度の相関を利用した。

⑦物性値の設定

最小値から最大値までのばらつきを持つ物性値から表 3.1-3 に示す方針により物性値の設定を行った。個々の物性値における設定方針は，以下に示すとおりである。

- ・単位体積重量：単位体積重量は主に地圧の算定に用いられ，この推定に当っては平均的な値が妥当と考えられることから，平均値を採用した。

- ・粘着力：一軸圧縮強度と破壊基準の整合性を図るため、低減率を考慮した一軸圧縮強度と内部摩擦角から次式により算定した。

$$C = \frac{qu(1 - \sin \phi)}{2 \cos \phi} \quad \text{ここに、} C: \text{粘着力, } qu: \text{一軸圧縮強度, } \phi: \text{内部摩擦角}$$

なお、この算定による値は三軸圧縮試験結果より小さく、設計としては安全側の値となっている。

- ・内部摩擦角：地山区分に1つのデータしかないため、この値を採用した。
- ・弾性係数：安全側の設計を考え、地山区間の最小値を採用した。
- ・ポアソン比：ポアソン比は一概に大きい方が安全側とは言えないことから、解析結果は平均的な挙動を表現することが妥当と判断し、平均値を採用することとした。
- ・一軸圧縮強度：弾性係数と同様安全側の設計を考え、地山区間の最小値を採用した。
- ・引張強度：引張強度試験結果は一軸圧縮強度の1/10の値と比較してほとんど差がないか、それ以上であることから、一軸圧縮強度の1/10とした。

表 3.1-2 設定した地山区分における一軸圧縮強度

地山区分	地層名	E.L. (m)	深度 (m)	一軸圧縮強度 (MPa)			
				最小値	平均値	最大値	サンプル数
1	声問層			—	—	—	—
2-I		35 ~ -20	80	1.2	2.3	3.1	6
2-II		-20 ~ -79	139	2.4	2.7	3.1	3
3		-79 ~ -159	219	3.2	4.1	4.7	3
4		-159 ~ -239	299	3.7	4.9	5.9	6
5		-239 ~ -279	339	—	—	—	—
6	稚内層	-279 ~ -300	360	—	—	—	—
7		-300 ~ -339	399	3.3	5.6	9.8	3
8		-339 ~ -369	429	3.6	7.4	15.3	6
9		-369 ~ -389	449	—	—	—	—
10		-389 ~ -419	479	5.7	6.3	6.8	3
11		-419 ~ -474	534	—	—	—	—
12		-474 ~ -489	549	10.6	12.7	13.9	3
13		-489 ~ -574	634	12.2	15.8	21.8	6
14		-574 ~ -584	644	—	—	—	—
15		-584 ~ -699	759	11.1	12.7	15.3	6

表 3.1-3 物性値の設定方針

岩盤物性項目	設定根拠	設定方針
単位体積重量	物理試験結果	地山区分の平均値を採用
粘着力	一軸圧縮強度 qu と内部摩擦角 ϕ	qu と ϕ を用いて算定
内部摩擦角	三軸圧縮試験 (CU 試験) 結果	地山区分内のデータを採用
弾性係数	一軸圧縮試験におけるひずみゲージによる静弾性係数測定	地山区分の最小値を採用
ポアソン比	一軸圧縮試験結果による静ポアソン比	地山区分の平均値を採用
一軸圧縮強度	一軸圧縮試験結果	地山区分の最小値を採用
引張強度	一軸圧縮試験結果	一軸圧縮強度の 1/10 の値として算定

以上、①～⑦の手順に基づいて設定した力学物性値を表 3.1-4 に示す。

表 3.1-4 設計入力用岩盤物性値

地山区分	深度 (m)	単位体積重量 (kN/m ³)	粘着力 (MPa)	内部摩擦角 (°)	弾性係数 (MPa)	ポアソン比 (—)	一軸圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)
1	0～25	14.8	0.1	24.1	8.3	0.30	0.2	0.02
2	25～139	14.9	0.9	8.1	337.3	0.18	2.1	0.21
3	139～219	14.4	1.0	16.5	365.5	0.12	2.8	0.28
4	219～299	15.4	1.3	19.6	626.0	0.13	3.7	0.37
5	299～339	14.9	0.9	16.3	449.5	0.14	2.5	0.25
6	339～360	14.9	1.2	18.2	522.2	0.14	3.2	0.32
7	360～399	16.8	1.1	16.0	845.6	0.10	2.9	0.29
8	399～429	18.6	1.1	16.5	1032.4	0.11	3.0	0.30
9	429～449	18.0	1.9	20.5	1177.0	0.11	5.5	0.55
10	449～479	18.1	2.0	20.8	1153.0	0.12	5.7	0.57
11	479～534	18.0	1.7	19.5	1116.2	0.11	4.8	0.48
12	534～549	18.4	3.8	19.2	2300.0	0.18	10.6	1.06
13	549～634	19.3	3.7	27.5	2520.0	0.24	12.2	1.22
14	634～644	18.9	3.4	25.1	2346.9	0.22	10.8	1.08
15	644～759	19.1	3.2	29.3	2410.0	0.23	11.1	1.11

3.1.2 初期地圧

鉛直方向の初期地圧は、単位体積重量に深度を乗じた値とした。水平方向の初期地圧は試錐孔内における水圧破碎法による初期地圧測定結果に基づいて算定した。表 3.1-5 に水平方向応力の最大値（ S_{max} ）と最小値（ S_{min} ）を鉛直方向応力を 1 とした時の比で示す。なお、方向は S_{max} が東西、 S_{min} が南北方向となっている。

表 3.1-5 水平方向初期応力比（鉛直応力 = 1）

孔名	ボーリング 深度	S_{max}	S_{min}	水平面内 応力比
HDB-3	263.5m	1.02	0.8	1.28
	392.5m	1.2	0.9	1.33
HDB-1	381m	1.9	1.1	—
	515m	1.2	1.0	1.20
	521m	1.2	1.0	1.20
	555m	1.2	1.0	1.20
	585m	1.3	0.9	1.44
	635m	1.1	0.9	1.20
	650m	1.1	0.9	1.20
	660m	1.1	0.9	1.20
	710m	1.0	0.9	1.10

水平方向初期地圧の設定は、地山区分および物性値の設定を HDB-3 孔を主体に行っていることから HDB-3 孔の結果に基づいた。表 3.1-5 より、 S_{max} は 1.2、 S_{min} は安全側を考慮して水平面内応力比（偏圧）が大きくなる 0.8 を採用した。なお、HDB-1 孔の深度 381m の値は周辺データと比較して異なる傾向であることから、現時点においてデータとして考慮しないこととした。

よって、初期地圧は以下ようになる。

- ・鉛直方向地圧：単位体積重量×深度
- ・東西方向地圧：鉛直方向地圧×1.2
- ・南北方向地圧：鉛直方向地圧×0.8

なお、2次元解析における東西・南北方向以外の水平坑道の水平方向地圧は、安全側を考慮して鉛直方向地圧×1.2 を採用した。

3.1.3 時間依存性パラメータ

時間依存性パラメータは、図 2.1-9 において「岩盤クリープ量」の算定に必要となる力学物性値である。岩盤クリープの算定では大久保らにより提案されたコンプライアンス可変型構成方程式（大久保，1992，大久保ほか，1997）を用いる。この方程式は次式に示すように、岩盤のコンプライアンス（ひずみ／応力に相当）が時間とともに増大すると仮定したものであり、この増大速度が差応力の n 乗に比例するとともに、コンプライアンスの m 乗に比例すると仮定したものである。

$$\frac{d\lambda}{dt} = a \cdot \sigma^n \cdot \lambda^m \quad (3.1-1)$$

ここに、 λ ：コンプライアンス、 t ：時間、 a ：ピーク強度を決める定数、 σ ：差応力

この n と m が時間依存性パラメータであり、 n はひずみ速度と一軸圧縮強度との関係を表す値で、岩盤の時間依存性の程度を決める定数である。 m はピーク強度以降の応力－ひずみ曲線の傾きを決める定数である。なお、これらの時間依存性パラメータ (n , m) はともに室内試験により設定できるものである。

本検討では、これまでの HDB-1 孔と HDB-3 孔のコアを用いた室内試験結果に基づいて設定した。なお、この室内試験とは 2 種類のひずみ速度による載荷を交互に繰り返す一軸圧縮試験である。表 3.1-6 にこれまで取得されたデータを示す（井上ほか，2003；井上ほか，2004；大久保，2003；大久保，2004）。

表 3.1-6 これまでに取得された時間依存性パラメータ

			一軸圧縮強度 MPa	コア採取 深度(m)	地山区分 深度(m)	地山区分	n	m	m/n
幌延稚内層頁岩	HDB-1	1	14.5	514	562	13	31	31	1
		2	11.4	514	562	13	25	25	1
		3	9.4	514	562	13	44	44	1
		4	8.3	517	565	13	30	30	1
		max	14.5	515	563	13	44	44	1
		min	8.3				25	25	1
		ave.	10.9				31	31	1
	HDB-3	1	20.3	463	440	9	49	49	1
		2	17.6	463	440	9	20	20	1
		3	10.9	463	440	9	43	43	1
		4	6.7	463	440	9	18	18	1
		5	11.0	463	440	9	50	50	1
		6	14.0	463	440	9	42	42	1
		max	20.3	463	440	9	50	50	1
		min	3.9				18	18	1
		ave.	10.9				37	37	1
		7	3.9	420	397	7	43	25	0.58
		8	5.3	420	397	7	39	35	0.91
		9	3.9	420	397	7	28	15	0.54
		10	4.4	420	397	7	48	35	0.72
		max	20.3	420	397	7	48	35	0.91
		min	3.9				28	15	0.54
		ave.	10.9				39	28	0.69

データの取得された地山区分は 7, 9, 13 であり、それぞれの n , m の平均値は 7 (n : 39, m : 28), 9 (n : 37, m : 37), 13 (n : 31, m : 31) となっている。時間依存性パラメータは人工バ

リア設計に用いるデータであることから、人工バリア設置深度の地山区分に対して必要となる。この深度については次の 3.2 節で検討するが、結果として地山区分 11 と 13 となっている。地山区分 11 の n と m は地山区分 9 と 13 からの補間により設定することも考えられるが、その他の力学物性値を表 3.1-4 で見ると、地山区分 9 と 11 の強度特性および変形特性は共にほぼ同等であることから、 n と m についても地山区分 9 の値を地山区分 11 の値とした。

表 3.1-6 の地山区分 9, 13 の n , m の値を図 3.1-4 に示す。データはばらつきを持っており、特に地山区分 9 のばらつきは大きく、 n , m の有効数字は 1 桁が妥当と考えられる。また、 m/n の比率を変えないで n および m の値を小さくすると、解析では同等のクリープ荷重においてクリープ破壊に至る時間が短くなり、このことから n , m の値をともに小さく設定する方がより安全側となることが推定される。

以上の考えから、地山区分 11 (=地山区分 9) と地山区分 13 の n , m の値は、共に 3×10^1 に設定する。

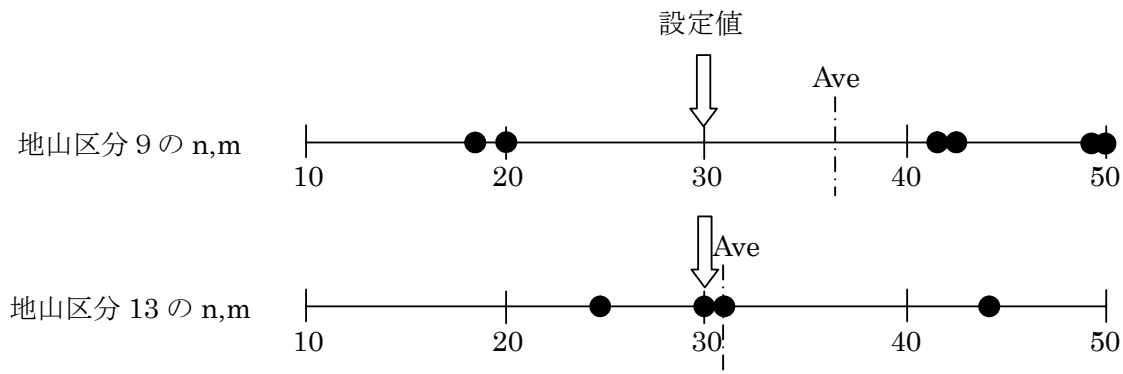


図 3.1-4 地山区分 9, 13 の n と m

3.2 空洞安定性評価とその結果に基づく支保工仕様の検討

ここでは前節 3.1 で設定した設計入力データに基づき、原位置試験における試験孔の力学的安定性評価と、その結果に基づいた支保工仕様の検討を行う。

3.2.1 検討条件の設定

(1) 地山条件

岩盤物性値は表 3.1-4 に示した値を用い、地圧は、

- ・鉛直方向地圧：単位体積重量×深度
- ・水平最大地圧：鉛直方向地圧×1.2
- ・水平最小地圧：鉛直方向地圧×0.8

とする。また、水平最大地圧と水平最小地圧の方向は、互いに直交とする。

なお、参考として「第 2 次取りまとめ」(サイクル機構, 1999)における軟岩系岩盤データセットを表 3.2-1 に示す。この軟岩系岩盤データセットは、わが国の軟岩地質環境を SR-A (SR: Soft Rock) から SR-E まで 5 段階に分類したものである。この表と比べると、表 3.1-4 の値は地下深部において一軸圧縮強度が 2~11(MPa)、弾性係数が 500~2500(MPa)と、ほぼ SR-D, SR-E に相当する。

表 3.2-1 第 2 次取りまとめでの軟岩系岩盤データセット（サイクル機構，1999）

ケース	深度 (m)	単位体 積重量 (kN/m ³)	粘着力 (MPa)	内部摩 擦角 (°)	弾性係数 (MPa)	ポアソン比 (—)	一軸圧 縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)
SR-A	(一様)	24.0	5.0	30.0	5000.0	0.30	25.0	3.5
SR-B	(一様)	23.0	4.0	29.0	4000.0	0.30	20.0	2.8
SR-C	(一様)	21.6	3.0	28.0	3500.0	0.30	15.0	2.1
SR-D	(一様)	19.1	2.0	27.0	2500.0	0.30	10.0	1.4
SR-E	(一様)	16.7	1.0	25.0	1500.0	0.30	5.0	0.7

(2) 検討深度

検討深度として、2 つの深度を選定した。一つは「第 2 次取りまとめ」（サイクル機構，1999）の軟岩系岩盤の処分深度であるとともに、幌延深地層研究計画において地下施設の計画深度（サイクル機構，2003）として予定されている 500m を検討深度とした。また、人工バリア等原位置試験環境としては、コンクリート支保工を設置する場合としない場合の両方の環境が必要であることから、もう一つの検討深度として、処分の対象となる 300m 以深において空洞安定性上有利（無支保で空洞安定性が保てる可能性が高い）と予想される深度を選定する。

(3) 定置方式

定置方式として縦置き方式と横置き方式が考えられるが、幌延における人工バリア等の原位置試験が縦置き方式を想定して計画されている（栗原ほか，2004）ことから、ここでは縦置き方式とする。

(4) 試験坑道仕様

試験坑道の内空断面形状は「第 2 次取りまとめ」（サイクル機構，1999）の処分坑道と同様とするが、支保工コンクリートの仕様については幌延における地下施設の空洞安定性評価（サイクル機構，2004）を考慮して、以下のように設定する。

- ・厚さ：40cm
- ・設計基準強度 f_{ck} ：36N/mm²
- ・安全率：仮設部材の場合は 1.3，永久構造物の場合は 4
- ・弾性係数：4000MPa

(5) 試験孔仕様

形状は「第 2 次取りまとめ」（サイクル機構，1999）の処分孔と同じく、径 2.2m，深さ 4.13m とする。なお、支保工を設置する場合には、試験坑道と同じコンクリート材料を用いる。

(6) 安定性の評価指標

「第 2 次取りまとめ」（サイクル機構，1999）は、わが国の幅広い地質環境を対象としており、その不確実性を考慮して空洞安定性の評価指標は保守的なものとなった。ここでは具体的な地質環境を対象とすることから、表 3.2-2 に示す考え方で安定性の判断を行うこととした。

表 3.2-2 空洞安定性の判断指標の比較

	第 2 次取りまとめ	本検討
地山の応力状態	局所安全率が 1.5 を下回る領域が改良可能範囲にあること	塑性領域が改良可能範囲にあること
地山のひずみ状態	最大せん断ひずみが限界ひずみの中央値(*1)を超える領域が局部的であること	最大せん断ひずみと限界ひずみの中央値および上限値(*2)との関連で安定性を相対的に比較評価する
支保工応力度の安全率	3 (鉄筋コンクリートを想定)	仮設の場合 1.3 本設の場合は 4 (無筋コンクリートを想定)

$$* 1 : \log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 \quad * 2 : \log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.59$$

ここに、 ε_c : 限界ひずみ%, E : 弾性係数 kgf/cm²

(7) 解析モデル, 解析方法

岩盤は完全弾塑性モデルとし、破壊規準はモール・クーロンの破壊規準に従うものとした。解析手法は 3 次元有限差分法（解析コード：FLAC-3D）にて行い、初期状態の自重解析→坑道掘削解析→試験孔掘削解析を実施した。なお、検討深度の選定など予備的な解析には理論解析や 2 次元有限要素法解析を用いた。

3.2.2 空洞安定解析による評価

(1) 検討対象深度の選定

ここでは 300m 以深において空洞安定性上有利と予想される深度を選定した。表 3.1-4 の地山区分の内 5～13 について地山強度比の検討、理論解析によるひずみと応力状態の検討を行った。なお、地山区分 14 および 15 は、地山区分 13 と比較して強度特性（粘着力、内部摩擦角、一軸圧縮強度）、変形特性（弾性係数）ともに劣るのに対し、地圧が大きくなることから、明らかに 13 より空洞安定性上不利と判断されるので検討対象から除外した。また、ここでの検討深度は各地山区分の中央深度とした。理論解析は、坑道径 5m の素掘り（無支保）状態において、Kastner の方法により行った。図 3.2-1 に深度と地山強度比関係を、図 3.2-2 の(a)に深度と塑性領域幅の関係、(b)に深度と限界ひずみへの接近度を示す。図 3.2-2(b)の限界ひずみへの接近度とは、横軸の値 1.0 で発生するひずみが限界ひずみの中央値(○)または上限値(□)に等しくなり、それより大きくなると限界ひずみを超えることを示している。なお、以降に示す解析結果は、幌延を条件とした岩盤の長期力学挙動評価（井上ほか、2004）から、本検討に必要な部分を抽出して引用したものである。

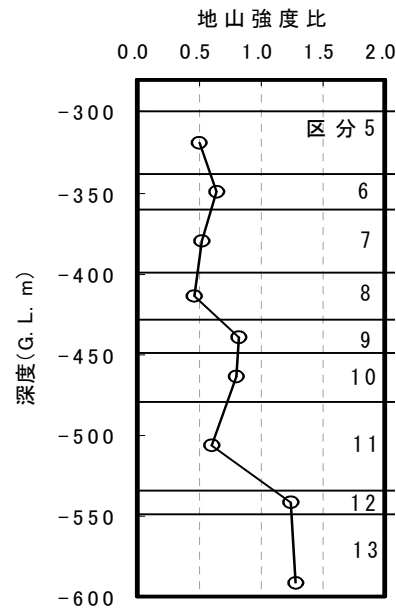


図 3.2-1 深度方向の地山強度比の分布

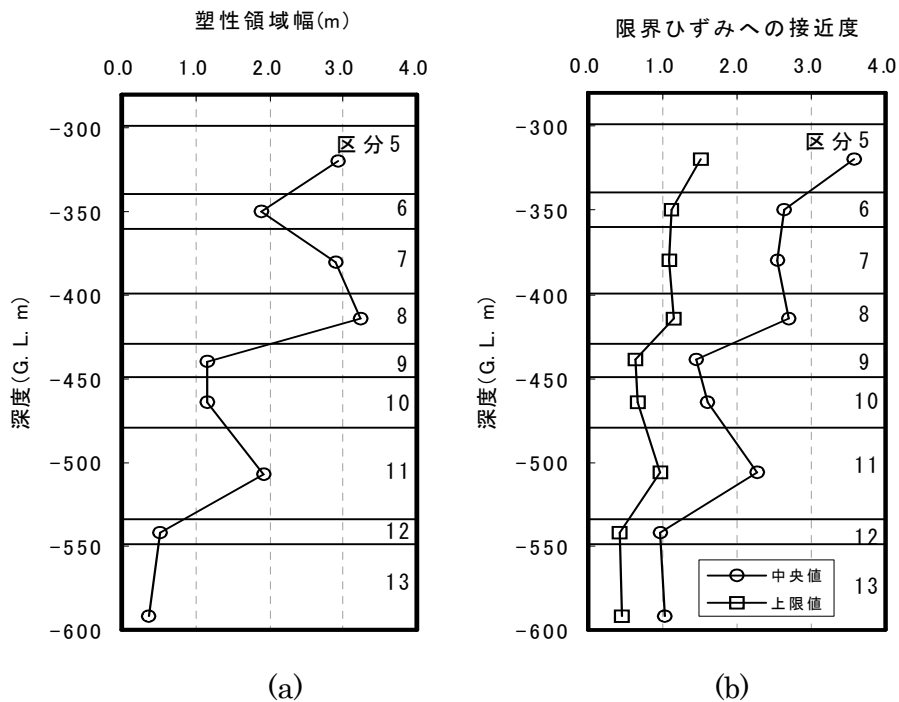


図 3.2-2 深度方向の応力とひずみの状態

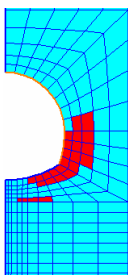
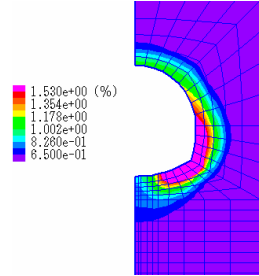
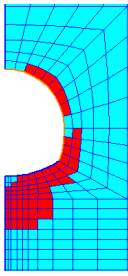
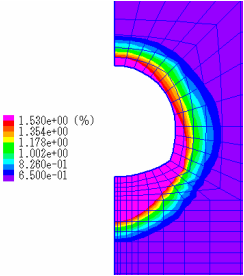
図 3.2-1 から、地山区分 13 の地山強度比が最も大きいことがわかる。また、図 3.2-2(b) のひずみ状態では、地山区分 12 が 13 よりわずかに安定であるが、(a)の塑性領域幅では地山区分 13 が空洞安定性上最も有利となる。以上より、検討対象深度として地山区分 13 を選定した。地山区分 13 の深度は 549m～634mでありこの範囲内では浅い方が地圧が小さく有利となるが、区分 12 との境界から掘削影響領域や緩衝領域を考慮して、深度 570m を検討対象深度として選定した。

(2) 試験坑道方向の検討

今回設定した地山条件では、側圧係数（水平方向地圧／鉛直方向地圧） K が最大主応力方向で 1.2、これと直交する最小主応力方向で 0.8 と異なることから空洞の安定性も坑道方向によって異なる。坑道軸を最大主応力方向と一致させることにより、坑道断面方向には最小主応力が作用することとなり、この平面内の空洞安定性は最も高くなる。また、坑道掘削後に試験孔を掘削する場合も、弾性論的にはこの方向において偏圧状態が緩和される方向にある。よって、坑道軸は最大主応力方向に一致させることとした。

なお、坑道軸方向の違いによる試験坑道の空洞安定性の差異の程度を把握するため、2 次有限要素法による解析を行った。解析は完全弾塑性モデルとし、応力開放率 50% で支保工設置（設計基準強度 $f_{ck}=36\text{N/mm}^2$ 、厚さ 40cm のコンクリート）を条件とした。図 3.2-3 に地山の応力とひずみ状態を示す。図より、塑性領域の発生範囲およびせん断ひずみの発生状況とともに、坑道軸＝最大主応力方向とする方が小さいことがわかる。

<深度 500m の場合>

坑道軸＝最大主応力方向 ($K=0.8$)		坑道軸＝最小主応力方向 ($K=1.2$)	
塑性領域	せん断ひずみ 中央値以下 上限値以上	塑性領域	せん断ひずみ 中央値以下 上限値以上
			

<深度 570m の場合>

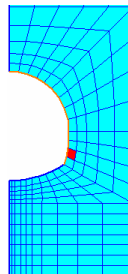
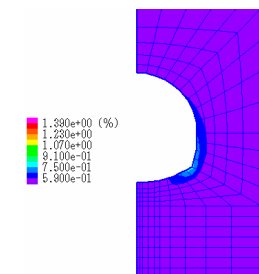
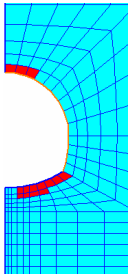
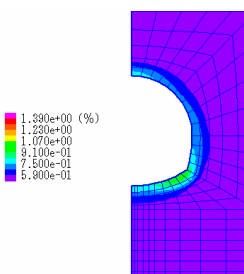
坑道軸＝最大主応力方向 ($K=0.8$)		坑道軸＝最小主応力方向 ($K=1.2$)	
塑性領域	せん断ひずみ 中央値以下 上限値以上	塑性領域	せん断ひずみ 中央値以下 上限値以上
			

図 3.2-3 坑道方向による応力状態とせん断ひずみの違い

(3) 安定性解析のステップ

幌延深地層研究計画における地下研究施設の空洞安定性評価（幌延深地層研究センター，2004）における研究坑道の掘削手順を踏まえ，以下のステップで解析を実施した。

①掘削前：初期応力状態を求める自重解析

①上断面掘削：一掘進長 1 m掘削状態の解析

②インバート掘削：一掘進長 1 m掘削状態の解析（①，②の繰り返しにより坑道を掘削）

③インバート撤去：試験孔部の支保工撤去状態の解析

④試験孔掘削：一掘進長 1 m掘削状態の解析（4 ステップ）

⑤試験孔掘削完了：上記の最終ステップの解析

上記の手順を図 3.2-4 に示す。

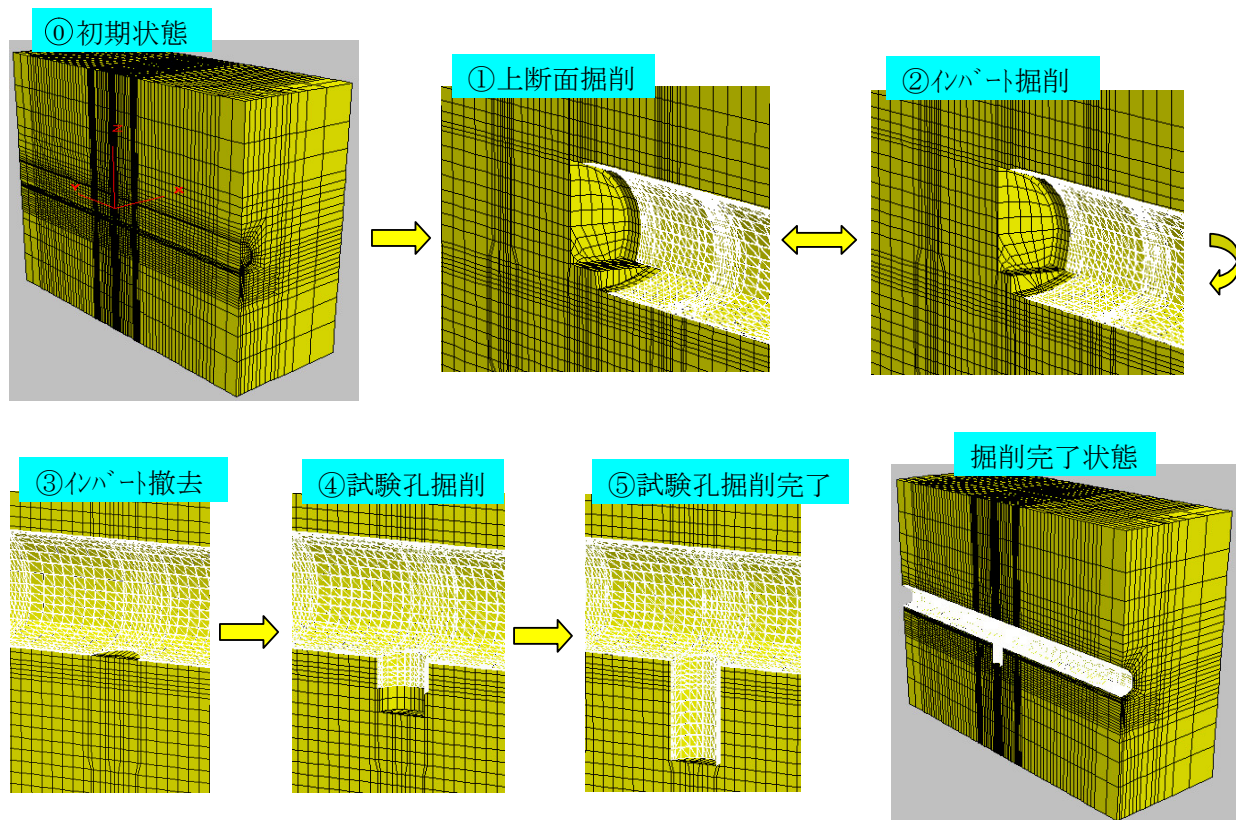
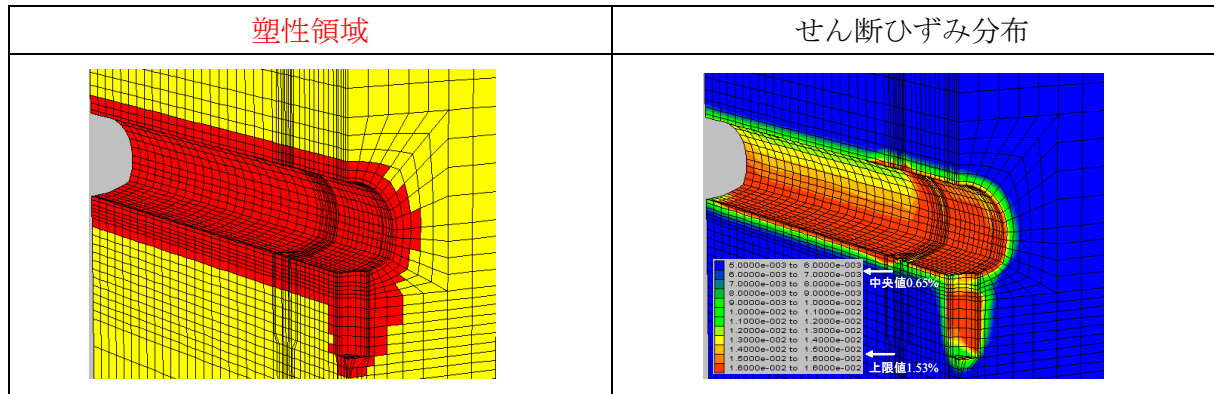


図 3.2-4 空洞安定性解析のステップ

(4) 無支保の場合の安定性

図 3.2-5 に試験坑道を含めた試験孔掘削完了後の地山の応力状態とひずみの状態を示す。また，図 3.2-6 にステップを追った試験孔壁面の変位を示す。これらの図から，深度 570m では試験孔周辺に多少の塑性領域が発生するが，ひずみの状態に関しては安定といえる。これに対して深度 500m では試験孔周りに大きな塑性領域が発生すると共に，ひずみの状態も限界ひずみ上限値を超えることから，無支保状態では不安定状態にある。

< 深度 500m ・ 試験孔無支保 >



< 深度 570m ・ 試験孔無支保 >

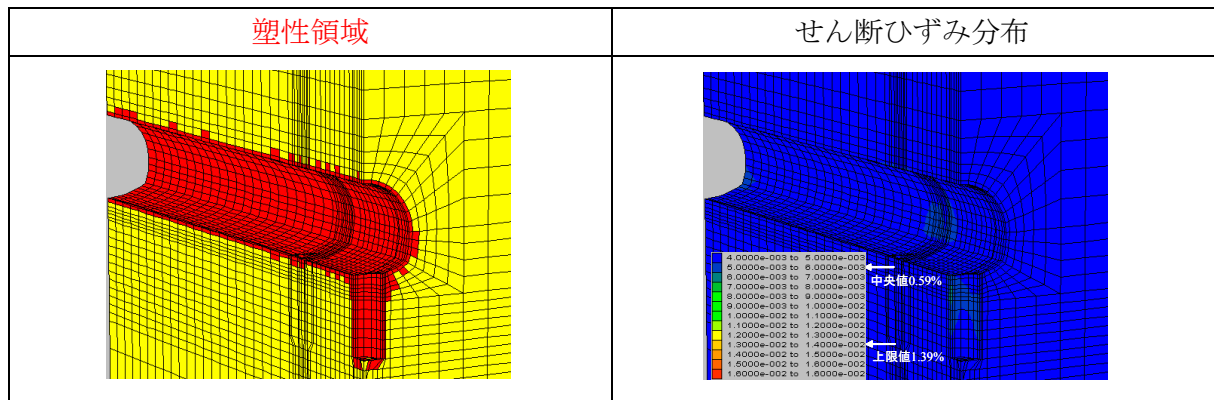
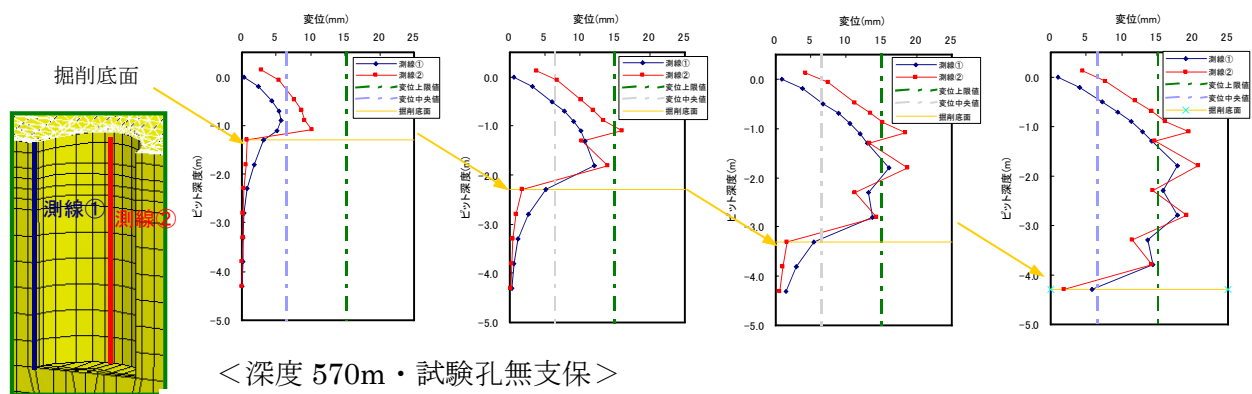


図 3.2-5 試験孔が無支保の場合の地山の応力とひずみの状態

< 深度 500m ・ 試験孔無支保 >



< 深度 570m ・ 試験孔無支保 >

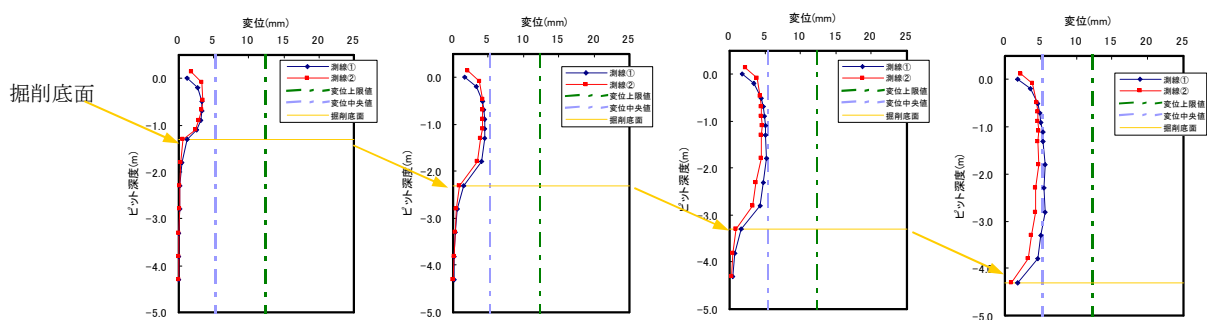


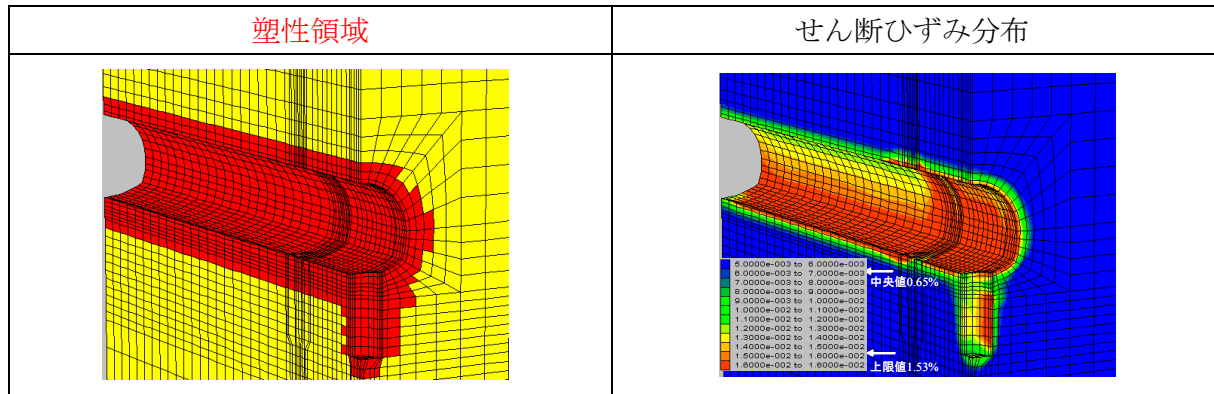
図 3.2-6 試験孔が無支保の場合の試験孔壁面変位

(5) 支保工を設置した場合の安定性

試験孔の支保工として厚さ 10cm のコンクリート（設計基準強度： $f_{ck}=36\text{N/mm}^2$ ）を想定した。無支保の場合と同様試験坑道を含めた試験孔掘削完了後の地山の応力状態とひずみの状態を図 3.2-7 に、ステップを追った試験孔壁面の変位を図 3.2-8 に示す。また、支保工の応力状態を図 3.2-9 に示す。

地山の状態について、深度 500m では試験孔壁面変位がほぼ上限値以下に改善されたが依然として大きな塑性領域の発生が認められた。支保工応力度については、深度 570m で許容応力度（ 9N/mm^2 ）以下となったが、深度 500m ではこれを超える部分が発生した。よって、深度 500m では支保工を設置した場合に安定性の改善は見られるものの、依然として不安定状態にあると判断される。

< 深度 500m ・ 試験孔支保工設置 >



< 深度 570m ・ 試験孔支保工設置 >

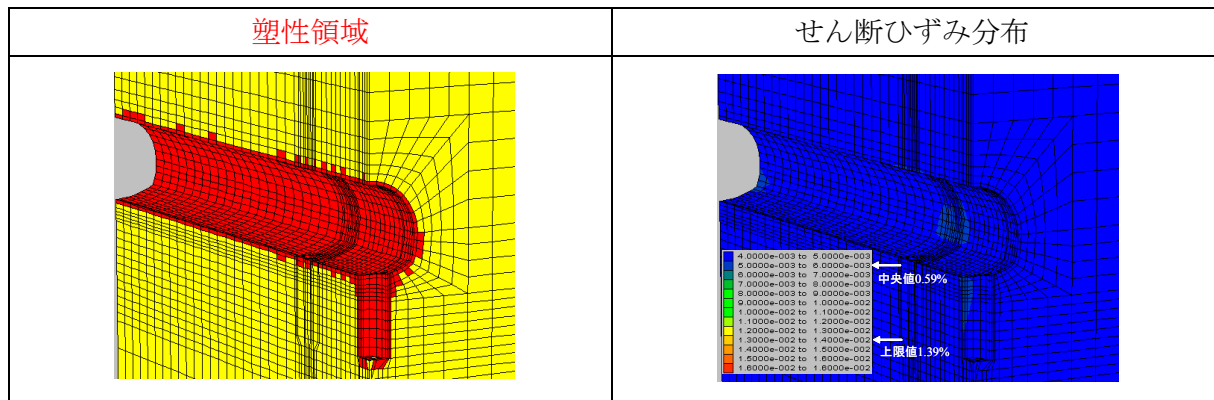
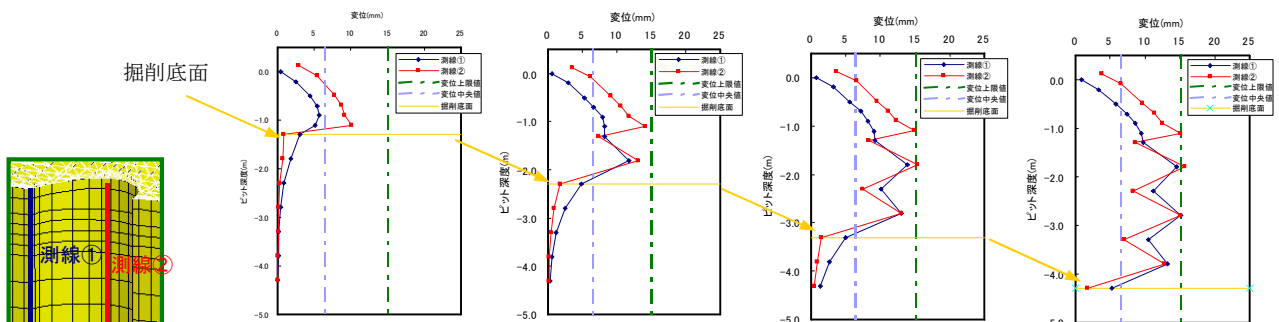
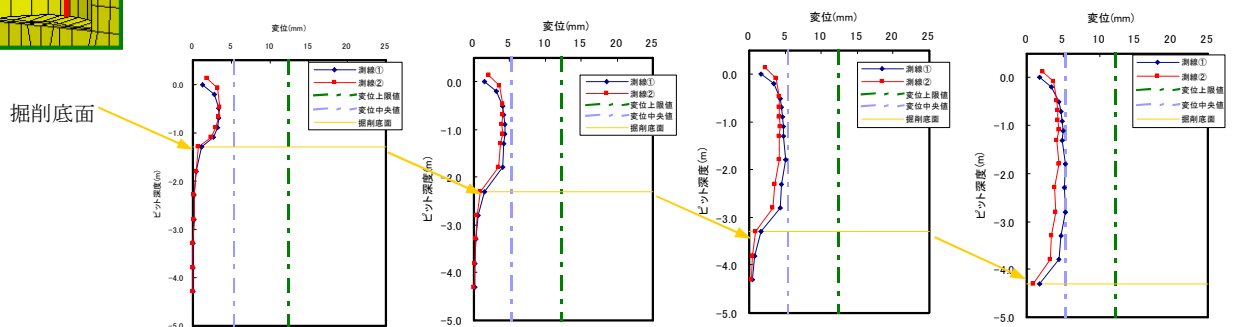


図 3.2-7 試験孔に支保工設置した場合の地山の応力とひずみの状態

< 深度 500m ・ 試験孔支保工設置 >



< 深度 570m ・ 試験孔支保工設置 >



< 深度 500m 図 3.2-8 試験孔に支保工設置した場合の試験孔壁面変位 >

<深度 570m>

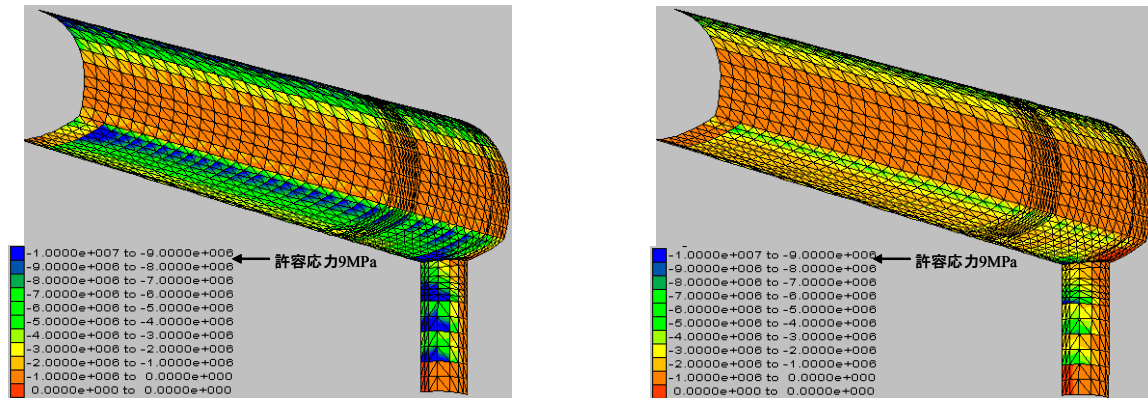


図 3.2-9 支保工の応力状態（岩盤側境界）

3.2.3 試験孔支保工仕様の検討

(1) 深度 500m の場合

厚さ 10cm のコンクリートでは、地山、支保工ともに不安定な状態となることから、より剛性の高い支保工材料や支保工厚さの設定が必要となる。支保工仕様での対応は、厚さの増大→材料の高強度化→鋼性ライナー等他の材料という順序での検討となる。しかし、試験孔掘削から支保工設置までの無支保状態での安定性確保も必要であり、掘削方法や支保工の設置時期・方法など、空洞安定性を確保するための総合的な検討が必要である。

(2) 深度 570m の場合

この深度でも塑性領域が発生していることから、弱部や層理、亀裂など不均質部では連続体としての性質が失われ、無支保の状態では表面の肌落ちや、岩塊の抜け落ちを生じる可能性がある。よって、人工バリア設置空間の確保という観点からは支保工設置が望ましい。しかし、この深度では無支保状態で安定が保たれる可能性もあり、岩塊の抜け落ち等に対する措置が確保される場合は、基本的に無支保とすることも可能と考えられる。

4 おわりに

「第 2 次取りまとめ」(サイクル機構, 1999) では, わが国の幅広い地質環境条件において人工バリア設計や施設設計などの処分技術の信頼性を提示したが, 具体的な地質環境条件における設計手法の適用性確認が課題として残された。本書は幌延の地質環境を例とした設計手法の適用性の確認の第一段階として設計手順の検討などを行い, その成果として設計全体の流れや人工バリア設計の流れ提示できたと考えている。また, 「第 2 次取りまとめ」では明確に示されていなかった設計入力データとしての要件や地質情報と設計との関連を提示した。

また, 幌延の深地層の研究施設における具体的地質環境を例とした人工バリアに関する原位置試験環境を対象とした具体的な設計検討として, HDB-1 孔および HDB-3 孔の試錐データから力学に関する設計入力データの設定を行い, 設定されたデータに基づく空洞安定解析を実施し, 原位置試験試験孔について支保工の有無に関する検討を行った。

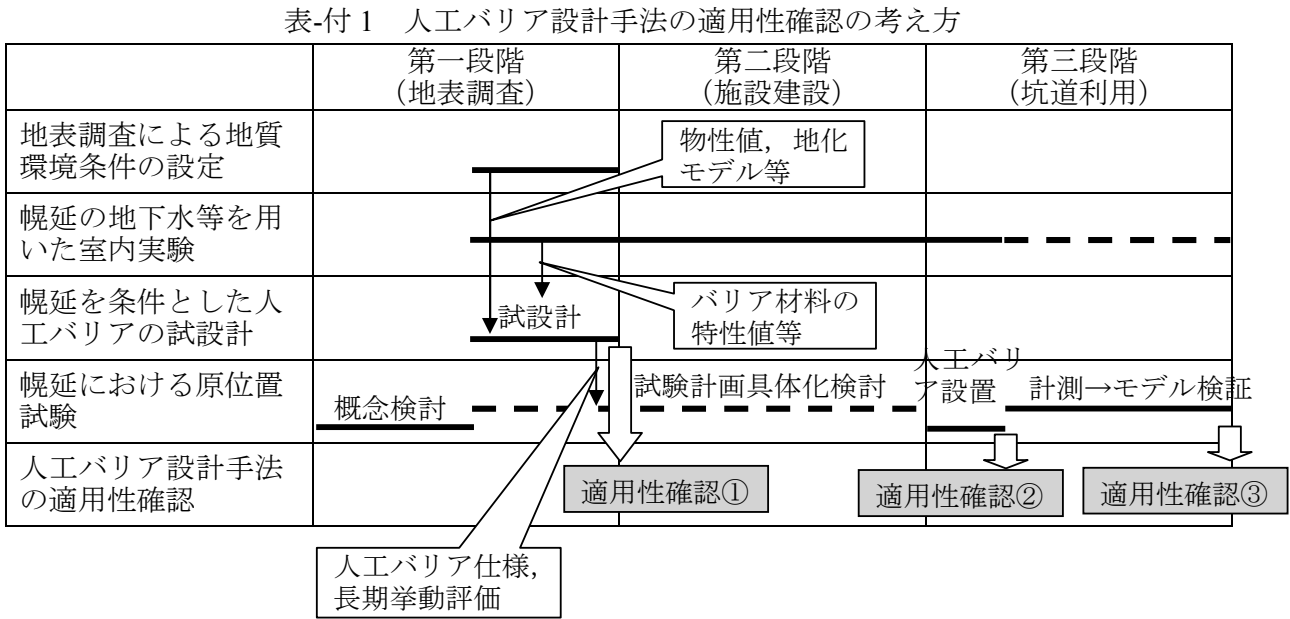
今後は, これらの見直しを行いつつ設計入力データの作成や調査の進展に伴う更新, 材料特性を把握するための室内実験を行い, 具体的情報の蓄積を行う段階に進む。

参考文献

- 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”，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 99-022（1999）
- 電力中央研究所，電気事業連合会：高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術（1999）
- 杉田 裕，栗原雄二，川上 進，神徳 敬，油井三和：“高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリア等の性能保証に関わる研究の進め方と反映先（その2）”，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-015（2003）
- 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14年度報告－”，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 2003-004，p.4-9（2003）
- 戸井田 克，須山 泰宏，塩釜 幸弘，渥美 博行，阿部 泰典，古市 光昭：“幌延深地層研究計画における地質環境モデルの体系化に関する検討”，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；鹿島建設株式会社）JNC TJ5400 2003-003（2003）
- 核燃料サイクル開発機構幌延深地層研究センター：“核燃料サイクル開発機構幌延深地層研究計画における地下研究施設の空洞安定性評価（平成15年度）”，サイクル機構技術資料，（登録準備中）（2004）
- 大久保誠介：“コンプライアンス可変型構成方程式の解析的検討”，資源と素材，Vol.108,pp.601-606(1992)
- 大久保誠介，福井勝則：“コンプライアンス可変型構成方程式の定数について”，資源と素材，Vol.113,pp.561-564(1997)
- 井上博之，南 浩輔：“軟岩の長期力学的変形挙動研究”，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；前田建設工業株式会社），JNC TJ8400 2002-061（2003）
- 井上博之，吉野尚人，宮野前俊一，水谷和彦，野田兼司：“軟岩の長期力学的変形挙動研究（Ⅱ）”，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；前田建設工業株式会社），JNC TJ8400 2004-005（2004）
- 大久保誠介：“軟岩の長期挙動に関する研究”，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；東京大学）JNC TJ8400 2002-062（2003）
- 大久保誠介：“ニアフィールド岩盤の長期安定性評価手法の検討”，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；東京大学）JNC TJ8400 2003-081（2004）
- 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”，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2004-002（2004）

付録－１ 幌延を対象とした人工バリア設計手法の適用性確認の考え方

具体的地質環境を対象とした設計手法の適用性確認のためには，具体的な地質条件における設計を行うだけでなく，設計に必要な室内実験や，関連する原位置試験の実施が必要である。また，適用性確認は時期的にも一度ではなく，段階を追って何度かの局面でなされるものと考えられる。幌延を対象とした適用性確認の考え方を表-付 1 に示す。



適用性確認①

- ・ 具体的地質環境を条件にある程度の根拠を持って「人工バリア仕様が設定し得る」ことを示すことをもって，人工バリア設計手法が具体的地質環境に適用可能であることを確認する。
- ・ ただし，この段階では仕様の妥当性や成立性に対する信頼性の確認はなされていない。

適用性確認②

- ・ 第一段階に設定した設計仕様が第三段階の人工バリア設置により「実現し得るものである」ことを示すことをもって，人工バリア設計手法が具体的地質環境に適用可能であることを確認する。

適用性確認③

- ・ 原位置試験において，長期挙動評価モデルの検証を行い「人工バリア成立性の根拠となる長期挙動評価モデルが信頼性を持つ」ことを示すことをもって，人工バリア設計手法が具体的地質環境に適用可能であることを確認する。

付録－２ 幌延におけるデータ取得状況

平成 15 年度までの調査により幌延で取得された人工バリア設計に必要なデータの取得状況を以下に示す。

(1) 地球化学

1) 溶存酸素濃度/Eh, pH

試錐孔内の湧水、水井戸、掘削リターン水について pH, EC の分析を実施した。揚水した地下水の連続モニタリングでは、pH, 電気伝導度 (EC), 酸化還元電位 (ORP, Pt および Au 電極), 溶存酸素 (DO), 水温の 5 項目の分析を行っている。

本測定の問題点としては、試錐孔内の原位置でのモニタリングと比較すると、測定項目によっては、溶存ガスの逸脱による水質変化や大気中の酸素混入の影響を完全には排除できないことがあげられる。

2) 地下水組成

揚水した地下水、試錐孔内の湧水、水井戸、掘削リターン水について下記の項目の分析を実施した。

分析項目：

トレーサー濃度, 同位体 ($\delta^{18}\text{O}$, δD , T, $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$), 化学成分 (Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Li^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{2+} , Se^{2-} , T-P, I-, Mn^{2+} , 溶存 Si, Ti^{4+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , Total Fe, 非溶存 SiO_2 , Al^{3+} , F-, Cl-, Br-, NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , H_2S , アルカリ度(M, P), HCO_3^- , CO_3^{2-} , TOC, TIC), 有機酸類 (フミン酸, フルボ酸, 酢酸, ギ酸), 溶存ガス (O_2 , N_2 , H_2S , Ar, CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , i- C_4H_{10} , n- C_4H_{10} , $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4, \text{CO}_2)$)

また、岩芯についてもスクイズ分離法により間隙水を抽出し、下記の項目の測定を実施した。

分析項目：

同位体 ($\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O})$, $\delta\text{D}(\text{H}_2\text{O})$), 化学成分 (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl-, SO_4^{2-})

3) 塩分濃度

物理検層結果から地層水の比抵抗や塩分濃度を算出した。この方法は本来頁岩質砂岩について適用されるものであるが、幌延の泥岩にも適用可能と仮定し、地層水の塩分濃度を算出した。その結果、孔井によっては塩淡境界を予想できるものがあった。物理検層を実施した孔内全深度におけるデータが取得されている。

4) ガス

掘削直後の岩芯を専用の容器に封入 (水を満たした容器に封入または岩芯を入れた容器の中の空気を He ガスにより置換して封入) し、容器内のガスについて、以下の測定を実施した。

分析項目：

含有ガス成分 (O_2 , N_2 , H_2S , Ar, CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , i- C_4H_{10} , n- C_4H_{10} , $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4, \text{CO}_2)$), 含有ガス量

また、掘削リターン水のタンクへの排出孔口において、以下の測定を実施した。

分析項目：

含有ガス濃度 (CO_2 , H_2S , CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , i- C_4H_{10} , n- C_4H_{10})

5) 鉱物

岩芯について、下記に示す項目の測定を実施した。

分析項目：

全岩分析 (SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, FeO, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅, H₂O⁺, H₂O⁻, SO₄²⁻, CO₃²⁻, Se, I, TIC), 微量成分 (U, Th, Lu, Yb, Tm, Er, Ho, Dy, Tb, Gd, Eu, Sm, Pm, Nd, Pr, Ce, La, Y), 同位体分析 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, Sr/Rb), 有機物分析 (TOC, TS, TN, ビジュアルケロジェン, 生物指標化合物 (C27, C28, C29 ステラン, C30, C31, C32 トリテルパン, オレアナン, 飽和炭化水素))

(2) 力学

1) 地圧

岩芯を用いた初期地圧測定 (AE 測定), 水圧破碎法による地下深部の初期応力の測定を行った。また, 物理検層 (密度検層, 音波検層) 結果から, 初期応力値のうち最小水平圧縮応力を算出した。これは密度検層による垂直応力と, 音波検層による P・S 波速度から求めたポアソン比により, 水平応力を算出する方法である。その結果, 検層から導いた値と水圧破碎法の結果は整合的であった。

2) 変形係数等

岩芯を用いて, 下記に示す物理試験, 力学試験を実施した。

試験項目：

空隙率試験, 含水量・含水比試験, 密度試験, 単位体積重量, スレーキング試験 (耐スレーキング指数), 吸水膨張試験 (膨潤ひずみ指数), 膨潤圧試験 (膨潤圧指数), 弾性波伝播速度試験 (P 波・S 波速度, 動ポアソン比, 動せん断係数, 動弾性係数), 一軸圧縮試験 (一軸圧縮強さ, 静弾性係数, 破壊ひずみ, 静ポアソン比), 圧裂引張試験 (引張強さ), 三軸圧縮 (CU, CD) 試験 (50%接線ヤング率, 50%接線ポアソン比, 粘着力, 内部摩擦角)

3) 時間依存性パラメータ

岩芯を用いた, 2 種類の歪み速度で交互に繰り返し載荷した一軸圧縮試験を実施し, コンプライアンス可変型モデルの時間依存性パラメータ n, m を取得した。

(3) 水理

1) 動水勾配/地下静水圧/流速

各試験孔においてパルス法, スラグ法, 定流量揚水試験などの水理試験および岩芯の透水試験を実施した。また, 物理検層およびフローメータ検層結果からの推定による透水係数と水理試験より得られた透水係数の比較検討を行った。長期モニタリング装置として, 試験孔に MP システムを設置し, 地下水の水圧, 水温の連続測定を行っている。動水勾配や流速は, これらの調査データや地表水文調査データに基づく水理解析をととして設定される。

(4) 熱

1) 温度

温度検層により深度方向に連続的に測定している。

2) 熱伝導率/比熱

岩芯について, 熱伝導率, 比熱容量, 熱膨張率の測定を実施した。熱伝導率の測定には縦型比較法を, 比熱容量の測定には断熱型熱量計を用い, 飽和, 自然, 乾燥の 3 状態で行った。熱

膨張率の測定には、押棒式熱膨張計を用いた。

(5) その他

1) 微生物

揚水した地下水、試錐孔内の湧水、水井戸、掘削リターン水について、下記の微生物の分析を行った。

分析項目：

全菌数、従属栄養細菌、嫌気性従属栄養細菌、アンモニア酸化菌、亜硝酸酸化菌、鉄酸化菌、硝酸還元菌、脱窒菌、硫酸還元菌、メタン生成菌

2) 岩盤の亀裂状態

岩芯の観察による亀裂の頻度、亀裂の方向や角度、亀裂の形状や充填鉱物などの記録を行うと共に、孔壁画像（比抵抗型）検層により岩相を求めた。