

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	O2-他-F-19-0017_改0
提出年月日	2021年2月10日

# 女川原子力発電所第2号機 地下水位の設定について

---

2021年3月●日  
東北電力株式会社

# 目次

---

1. はじめに
2. 地下水位の設定について
3. 耐震評価における断面選定及び解析手法選定について

【参考】 追加液状化試験を踏まえた液状化評価について

# 1. はじめに

- 第876回原子力発電所の新規規制基準適合性に係る審査会合(令和2年7月14日)において説明した主な説明事項のうち、「地下水位の設定」について説明する。
- 「地下水位の設定」について、浸透流解析を用いた設計用地下水位の設定プロセス及び設定結果を説明する。
- 併せて、今後説明予定の「耐震評価における断面選定」における基本的な考え方を説明する。

10

## 【2-1】地下水位の設定, 耐震評価における断面選定

**1. 概要**

- 各施設の耐震設計の前提条件となる設計用地下水位の設定について、女川特有の地下水位低下設備の構成や、地下水位低下設備の機能を考慮した三次元浸透流解析を用いた地下水位の設定結果について説明する。
- また、設計用地下水位を踏まえた各施設の解析手法(全応力解析または有効応力解析)の選定結果及び地震応答解析断面の選定結果について説明する。

(a) 解析モデル概要 (腐土・旧表土を非表示)

(b) 揚水井戸・ドレーン配置

図1 三次元浸透流解析モデル

図2 地下水位低下設備の概要

**2. 今後の説明予定**

- 地下水位の設定, 各施設の解析手法・断面選定について, 2020年5月提出の説明書等にて説明予定。なお, 地下水位低下設備の耐震性は2020年9月・11月, アクセスルート評価<sup>\*</sup>は2020年11月資料提出し, 説明予定。

\*:アクセスルートは, 地下水位低下設備の機能喪失を想定しても, 地震時の液状化に伴う地下構造物の浮き上がりに対して通行性を一定期間確保する設計とする。

## 2. 地下水位の設定について(1/22)

### 【耐震評価に用いる設計用地下水位の設定】

#### (設計用地下水位の設定方法)

- 耐震評価に用いる設計用地下水位は、設置変更許可段階の方針同様、地下水位低下設備の効果が及ぶ範囲(O.P.+14.8m盤)においては、その機能を考慮した設計用地下水位を設定し水圧の影響を考慮する。地下水位低下設備の効果が及ばない範囲においては、自然水位\*より保守的に設定した水位又は地表面にて設計用地下水位を設定し水圧の影響を考慮する。
- 詳細設計段階においては、地下水位低下設備の詳細設計を行うとともに、設定した地下水位低下設備の配置を踏まえ、浸透流解析により解析水位を算出し、これに基づき設計用地下水位を設定する。

#### (浸透流解析を用いた設計用地下水位の設定)

- 浸透流解析により設計用地下水位を設定するにあたり、モデル作成に必要なデータを収集し、その十分性を確認した上で、敷地の地下水流動場を表現する広域モデルを作成した。
- 広域モデルの妥当性については、観測降雨を与えた非定常解析にて得られた解析水位と観測水位を比較することにより確認した。
- この上で、解析領域をO.P.+14.8m盤周辺とし、安全対策工事完了段階における造成形状・施設配置等を設定した予測解析モデルを作成した。
- 予測解析モデルは、液状化検討対象施設を幅広く抽出する目的から、水位が高めに算出されるような解析条件とし、得られた解析水位を上側に包絡するよう設計用地下水位を設定した。
- 設計用地下水位は、豪雨条件を仮定した非定常解析との比較から、十分な余裕を有し妥当な設定内容であることを確認した。

#### (水位が低い場合の影響)

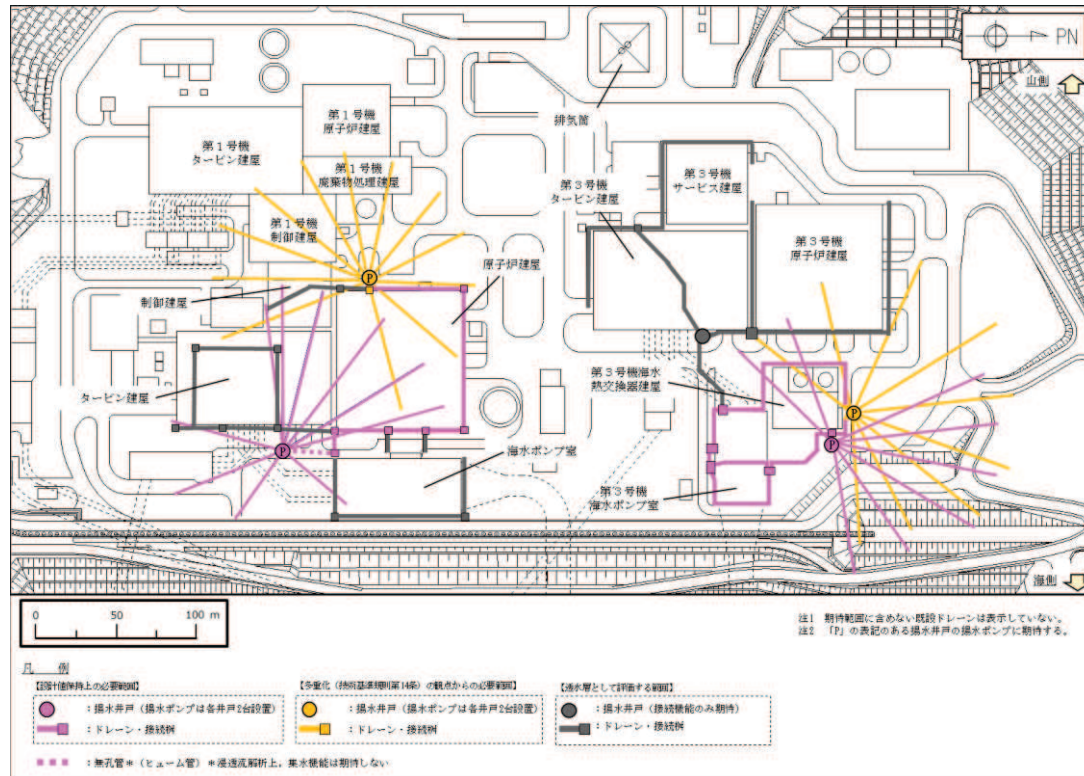
- 地下水位低下設備の信頼性向上(多重化等)により、地下水位低下設備の影響を受ける範囲の平常時の地下水位は設計用地下水位より低くなることから、地下水位が低い場合に耐震評価へ影響を与える可能性のある事象を抽出し、影響検討を行う方針としている。

\*: 自然水位とは、地下水位低下設備等の人為的な措置の影響が含まれない地下水位を指す。O.P.+14.8m盤は浸透流解析の境界条件として地下水位低下設備の機能を考慮している一方、O.P.+62m盤の地下水位は地下水位低下設備の影響が含まれない。

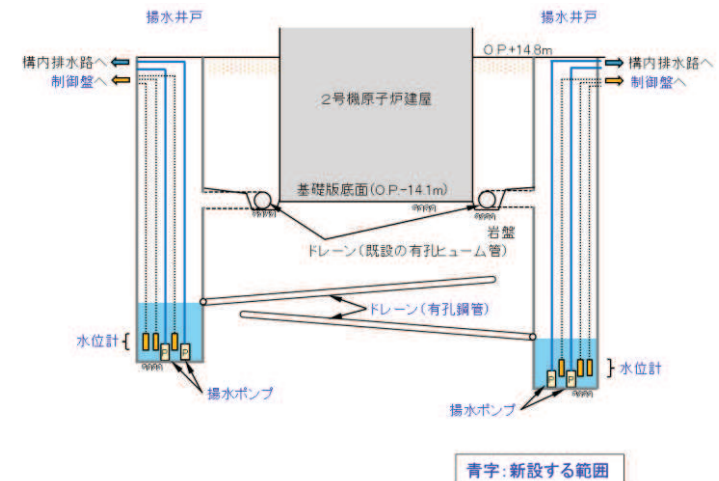
## 2. 地下水位の設定について(2/22)

### 【地下水位低下設備について】

- 設計用地下水位の設定において想定した地下水位低下設備の配置を下図に示す。
- 地下水位低下設備は、設置変更許可段階における方針と同様、安全重要度分類におけるクラス1相当として信頼性向上を図ることとしており、集水機能を担うドレーンについては耐久性・耐震性・保守管理性の要件を満たし、かつ揚水ポンプの単一故障やドレーンの部分閉塞を仮定しても機能保持できる範囲として設定した。
- 地下水位低下設備を構成するドレーン・揚水井戸や揚水ポンプ・水位計などは、新設にて対応し信頼性を確保する(ドレーンは信頼性が確認された範囲で既設の一部を活用)。
- 新設するドレーン(鋼管)については、地下水位低下設備が機能喪失し地下水位の上昇が続く状況を仮定しても、設計値に到達するまでの時間を十分確保できるよう、浸透流解析により平面配置や設置深度を設定している。



予測解析において考慮するドレーン(平面)



地下水位低下設備の概要(立面)

## 2. 地下水位の設定について(3/22)

### 【浸透流解析を用いた設計用地下水位の設定フロー】

- 地下水位低下設備の機能を考慮し浸透流解析により設計用地下水位を設定する場合の手順は、解析の信頼性を確保するため、米国ASTMガイドライン等を参考に設定した。
- 地下水位低下設備の機能を考慮し設計用地下水位を設定する場合のフローを以下に示す。



# 2. 地下水位の設定について(4/22)

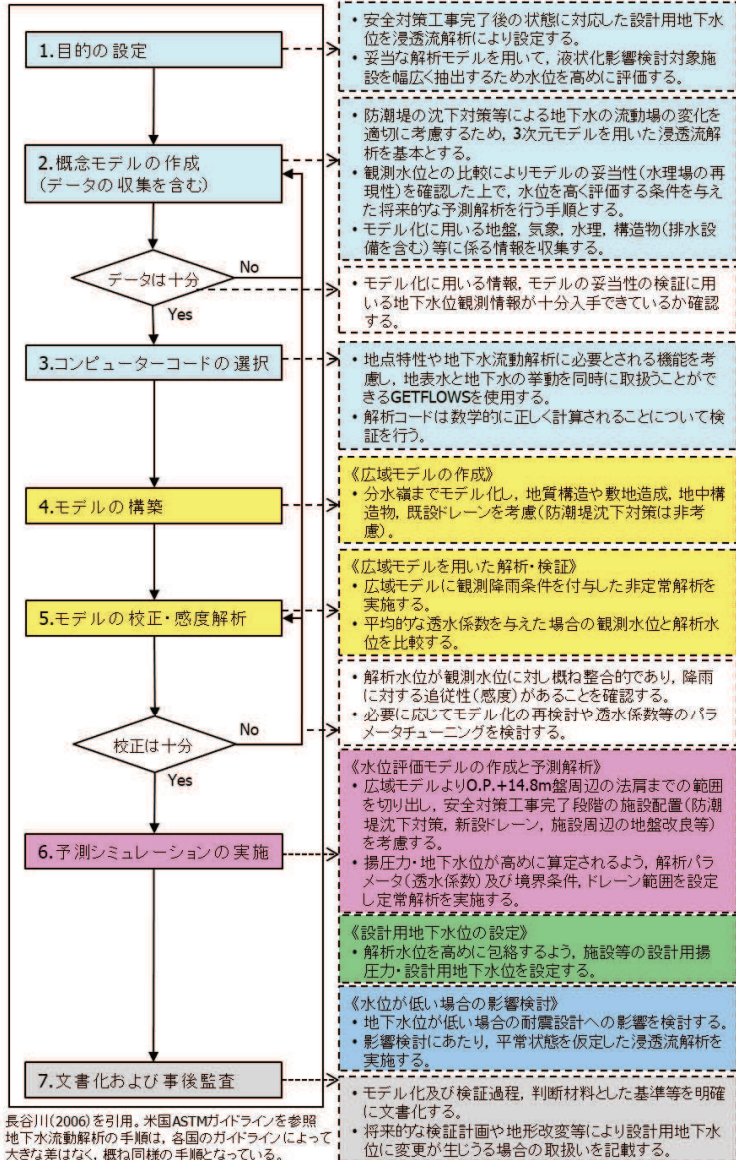
## 【(参考)浸透流解析を用いた設計用地下水位の詳細設定フロー】

地下水流動解析の一般的なプロセス  
(米国ASTMガイドラインを参考)

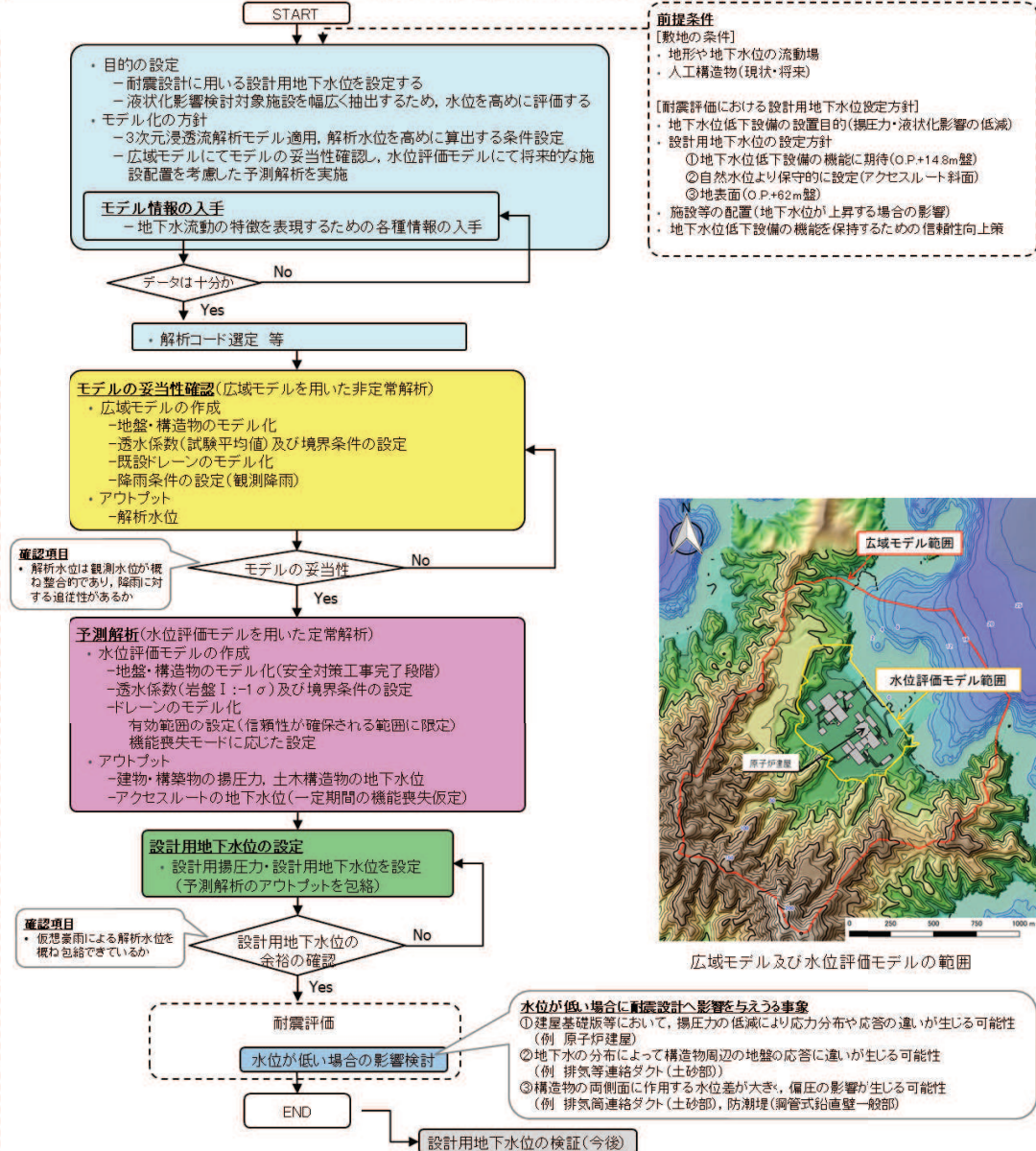
特記事項など

女川原子力発電所におけるプロセス

浸透流解析を用いた設計用地下水位の設定フロー



・長谷川(2006)を引用。米国ASTMガイドラインを参照  
 ・地下水流動解析の手順は、各国のガイドラインによって大きな差はなく、概ね同様の手順となっている。



## 2. 地下水位の設定について(5/22)

### 【モデル情報の入手】

- 浸透流解析モデル作成にあたり、サイトの地盤(地形・地質構造)や気象の情報、水理特性(地下水位観測記録を含む)、構造物や排水設備等の情報を入手した。
- これらの情報は観測データや工事記録、文献等に基づくものであり、地下水位流動場の表現に必要なデータが収集できていることを確認した。

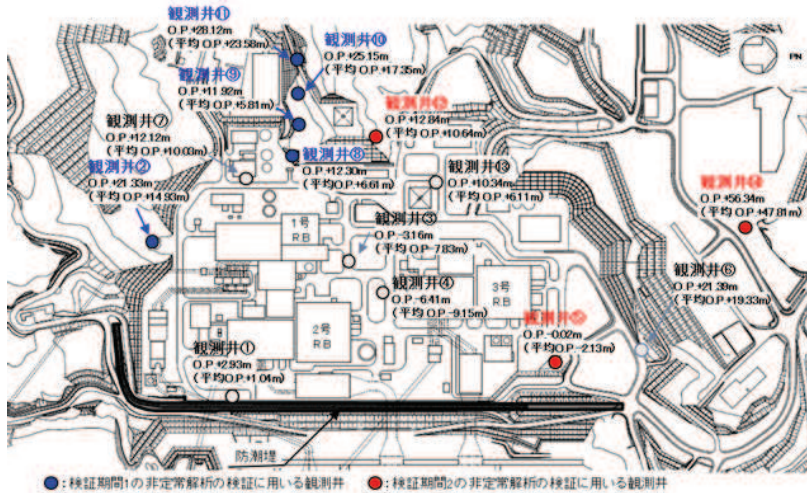
収集したデータ

種類	内容	参照するデータ
地盤	・ 地形の情報(図面, 数値標高モデル(DEM)等)	・ DEM(数値標高モデル, 国土地理院) ・ 工事記録による造成履歴 ・ 安全対策工事計画(工事完了時の状態)
	・ 敷地の地質・地質構造の情報(敷地造成を含む)	・ 地質調査に基づく敷地の地質・地質構造 ・ 敷地造成に係る図面等
気象	・ 降水量, 気温, 日射量, 相対湿度, 風速	・ 構内観測所データ ・ 気象庁データ ・ 地下水ハンドブック
水理	・ 水理特性(透水係数) ・ 検証において参照する地下水位観測記録	・ 原位置透水試験結果等 ・ 地下水位観測記録
構造物	・ 地中構造物	・ 工事記録 ・ 設計計算書等(今後設置する施設等)
排水設備等	・ 地下水位低下設備, 構内排水	・ 工事記録(既設) ・ 設計計算書等(今後新設する地下水位低下設備)
その他	・ 既往の地下水位設定方法	・ 建設時工事計画認可段階において実施した2次元浸透流解析
	・ 地下水流動解析の実施方法	・ 文献等





## 2. 地下水位の設定について(6/22) 【モデル情報の入手/収集したデータの例】



(観測孔位置)

(補足)

- モデルの検証に用いる観測水位は、構内観測データを用いた。
- 観測水位データの取得状況と敷地造成等の改変状況、排水条件として既設の地下水位低下設備の稼働状況から、モデル化対象とする期間(観測水位との比較検証を行う期間として、期間1(2006-2007年)・期間2(2013-2014年))を設定し、その時期に対応した地形、地中構造物等のモデル化を行った。



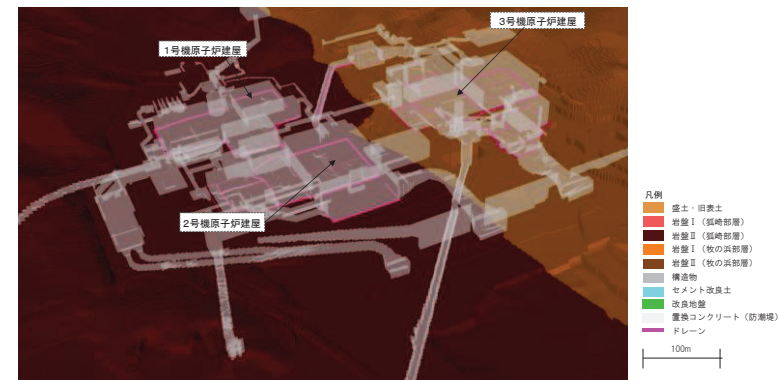
地形 [出典: 国土地理院DEMデータ]

項目	観測期間							備考
	2006	2008	2010	2012	2014	2016	2018	
主なイベント (地下水状況に影響する経緯等)						▼2016年度環境影響評価(2016年度)実施 土壌汚染調査開始		▼防漏構造下対策完了 ▼排水ドレーン施工完了
地下水(地下設備)の稼働状況	新設に限り一部廃止							
地下水水位観測 モデルの妥当性確認用	観測孔①	■			■		■	観測中
	観測孔②	■			■		■	観測中
	観測孔③	■			■		■	観測中
	観測孔④	■			■		■	観測中
	観測孔⑤	■			■		■	観測中
	観測孔⑥	■			■		■	観測中
	観測孔⑦	■			■		■	観測中
	観測孔⑧	■			■		■	観測中
	観測孔⑨	■			■		■	観測中
	観測孔⑩	■			■		■	観測中

注) ■: 広域モデルを用いた非常常解析による検証期間(期間1: 2006年4月~2007年3月、期間2: 2013年2月~2014年12月)

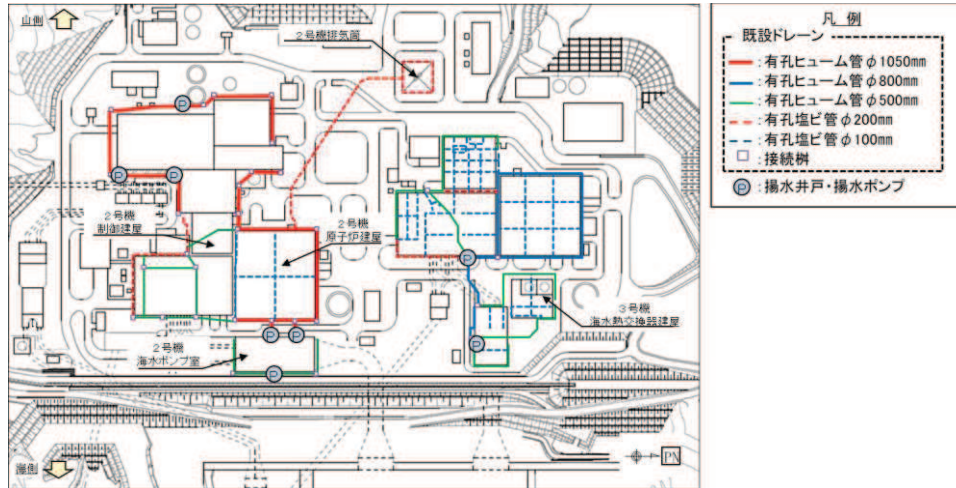
(観測時期)

地下水位 [出典: 地下水位観測記録]



地質構造・地中構造物 [出典: 地質調査結果, 工事記録等]

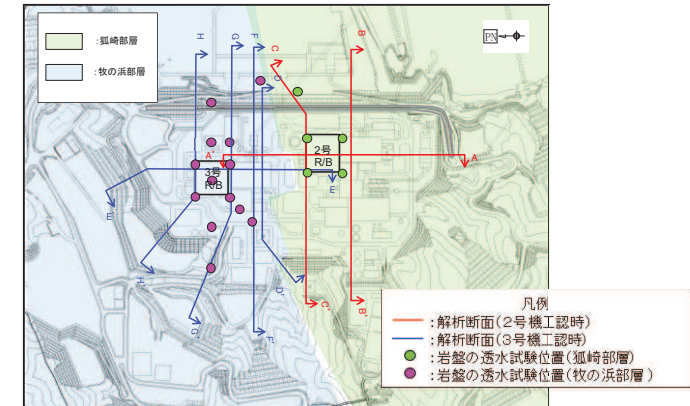
## 2. 地下水位の設定について(7/22) 【モデル情報の入手/収集したデータの例】



既設の地下水位低下設備 [出典:建設記録]

(補足)

- 検証を行う期間は既設の地下水位低下設備が稼働していたことから、この情報をモデルに取り込むため、建設記録より既設の地下水位低下設備の情報を入手した。
- 建設時工認段階においては、2次元浸透流解析に基づき設計用地下水位を設定していたため、透水係数の設定が地下水位への感度が大きいことを把握していた。本検討では、建設時工認段階及びその後実施した透水試験等の情報を踏まえ、透水係数を設定した。
- なお、浸透流解析により敷地の地下水位分布を評価するにあたり、長谷川(2006)を参照し、米国ASTMガイドライン等を参考とした。



建設時工認段階に実施した浸透流解析と透水試験位置

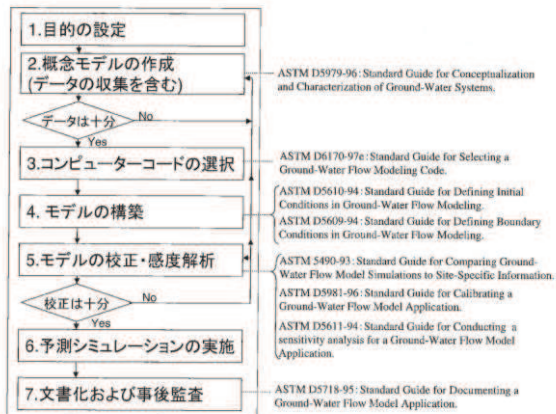


図2 地下水流動解析フローと ASTM の関係  
(フロー全体は、ASTM D5447-93 Standard Guide for Application of a Ground-Water Flow Model to a Site-Specific Problem を参照)

(参考)標準的な解析手順の例 [出典:長谷川(2006)\*]

地層	設定値(m/s)	設定根拠	
盛土・旧表土	$3.0 \times 10^{-5}$	試験結果の平均値	
狐崎部層	岩盤 I		$1.6 \times 10^{-6}$
	岩盤 II		$5.0 \times 10^{-7}$
牧の浜部層	岩盤 I		$1.1 \times 10^{-6}$
	岩盤 II	$1.0 \times 10^{-7}$	
セメント改良土・改良地盤	$2.0 \times 10^{-7}$	試験結果の平均値	
透水層(砕石)	$1.0 \times 10^{-2}$	試験結果の平均値	
コンクリート構造物(MMR含む)	(不透水)	—	

収集したデータの例

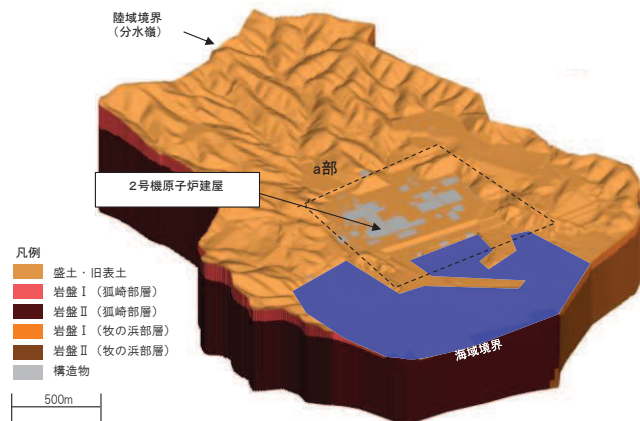
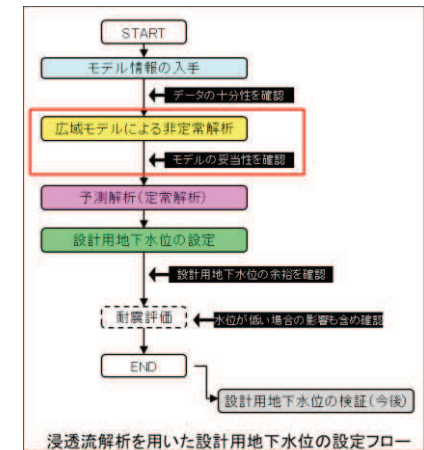
透水係数 [出典:透水試験等]

\*: 地下水流動解析のガイドラインに関する調査(長谷川琢磨, 地下水学会誌第48巻第2号75~86(2006))

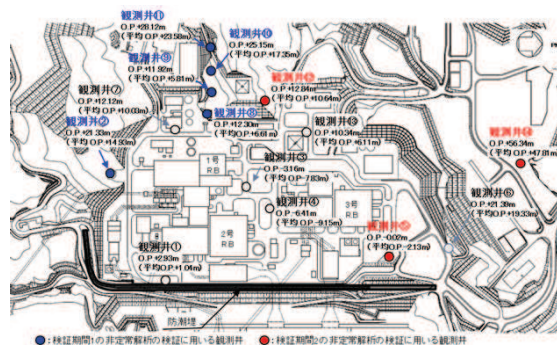
## 2. 地下水位の設定について(8/22)

### 【広域モデルによる非定常解析, モデルの妥当性確認】

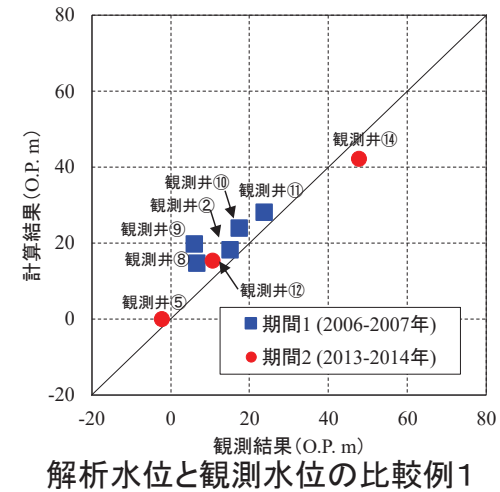
- 施設へ流入する地下水を適切に表現できるよう, 施設を含む分水嶺までの範囲をモデル化領域とする浸透流解析モデル(広域モデル)を作成した。
- 広域モデルは検証期間に対応した造成形状や施設配置等を設定した。
- ドレーンは既設全てを考慮するなど, 実際の状態に近い解析条件にて実施した。
- 観測降雨を与えた非定常解析にて解析水位を算出し, 観測水位と比較を行った。両者は整合的であり, 妥当なモデルであることを確認した。



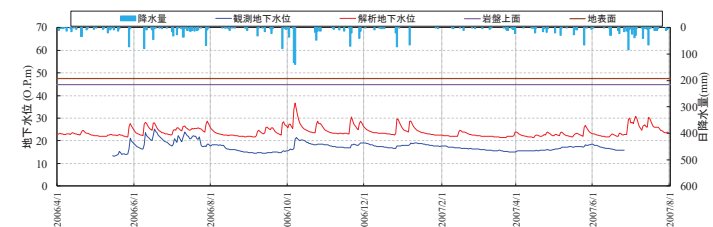
広域モデル鳥瞰図



観測井位置図



解析水位と観測水位の比較例1

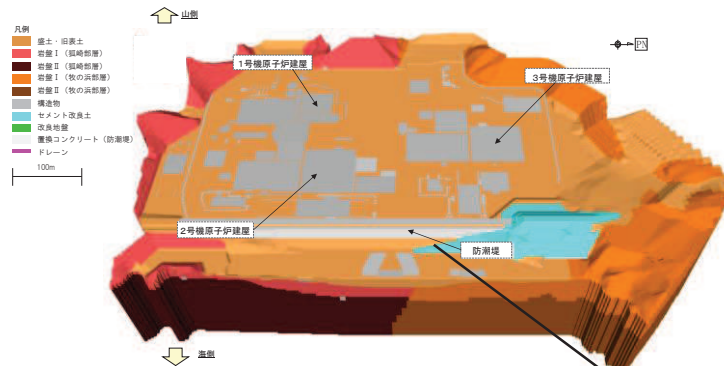
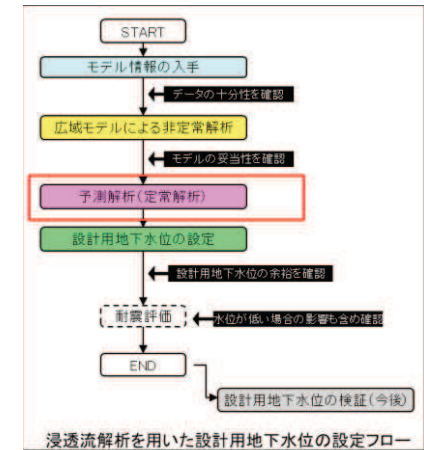


解析水位と観測水位の比較例2(観測井⑩)

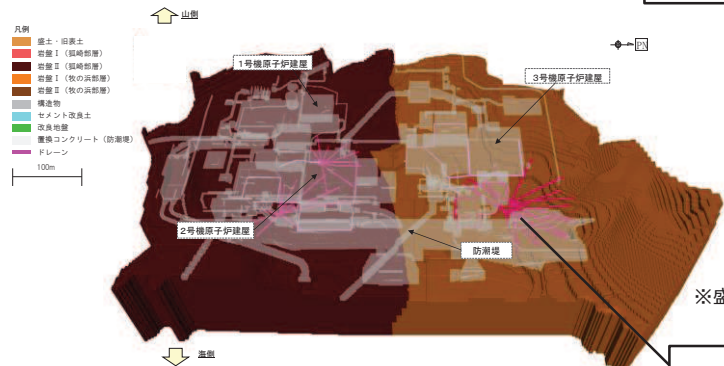
## 2. 地下水位の設定について(9/22)

### 【予測解析(定常解析)】

- 妥当性を確認した広域モデルより, O.P.+14.8m盤及び周辺法面を解析領域として切り出した浸透流解析モデル(水位評価モデル)を作成し, 予測解析を実施した。
- 水位評価モデルは安全対策工事完了段階の敷地の状態(防潮堤の沈下対策や新設ドレーン)は施工完了)に対応した造成形状や施設配置等を設定した。
- ドレーンは, 設置範囲全てを考慮せず, 信頼性が確保される範囲に限定してその機能を考慮した。

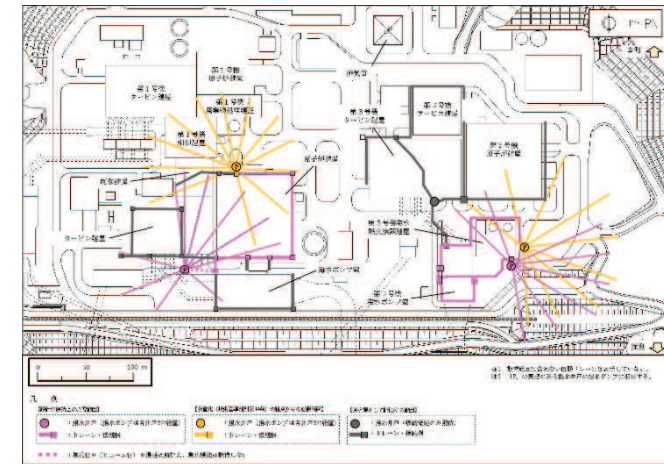


防潮堤の沈下対策を考慮



新設ドレーンを考慮

水位評価モデル鳥瞰図



予測解析において考慮するドレーン

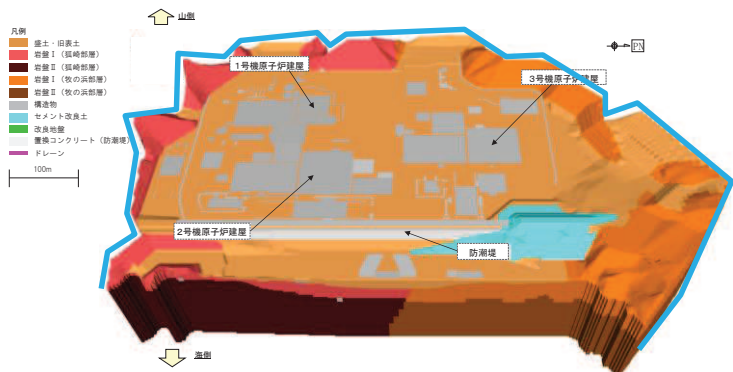
## 2. 地下水位の設定について(10/22)

### 【予測解析(定常解析)】

- 予測解析に用いる水位評価モデルは、液状化検討対象施設を幅広く抽出する目的から、揚圧力・地下水位が高めに算出されるような設計条件とした。  
(A. 境界条件, B. 透水係数, C. 有効ドレーン範囲, D. 機能喪失の考慮 など)

**A. 境界条件**

- 山側境界水位を地表面に固定 (海側境界は朔望平均満潮位)



**B. 透水係数**

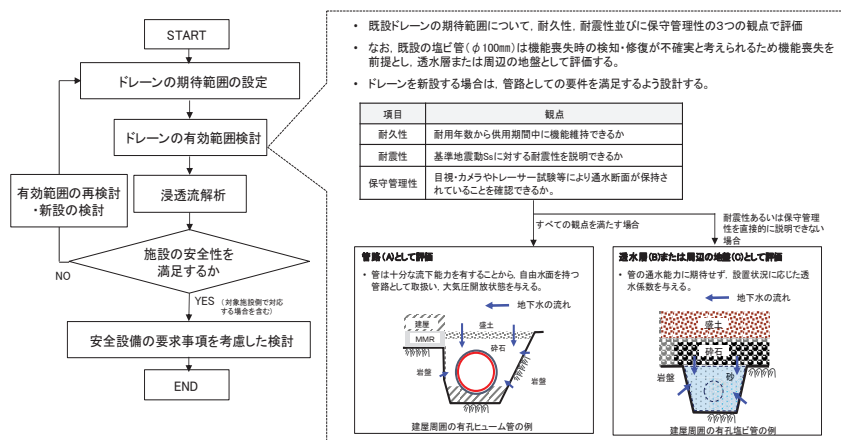
- 水位・揚圧力への影響が大きいパラメータとして透水係数を抽出
- 水位・揚圧力への感度が大きい浅部岩盤(岩盤I)の透水係数を $-1\sigma$

予測解析に用いる透水係数

地層	設定値 (m/s)	設定根拠
盛土・旧表土	$3.0 \times 10^{-5}$	試験結果の平均値
狐崎部層	岩盤 I	$7.0 \times 10^{-7}$ (試験結果の平均値 $-1\sigma$ )
	岩盤 II	$5.0 \times 10^{-7}$ (試験結果の平均値)
牧の浜部層	岩盤 I	$2.0 \times 10^{-6}$ (試験結果の平均値 $-1\sigma$ )
	岩盤 II	$1.0 \times 10^{-7}$ (試験結果の平均値)
セメント改良土・改良地盤	$2.0 \times 10^{-7}$	試験結果の平均値
透水層(砂石)	$1.0 \times 10^{-2}$	試験結果の平均値
コンクリート構造物(MMR含む)	— (不透水)	—

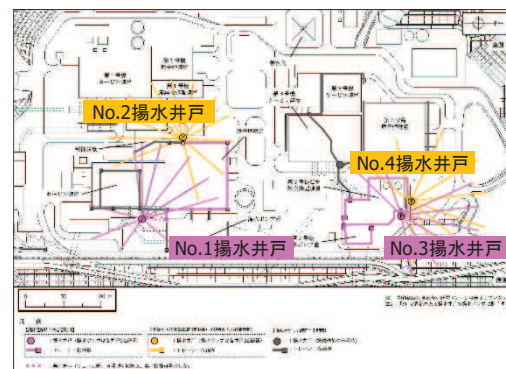
**C. 有効ドレーン範囲**

- 耐久性・耐震性・保守管理性と、単一故障へ配慮し有効範囲を設定



**D. 機能喪失の考慮**

- 各エリア1系統機能喪失しても設計値を保持するようドレーン配置を設定
- 保守的に各エリア1系統同時喪失した状況を仮定

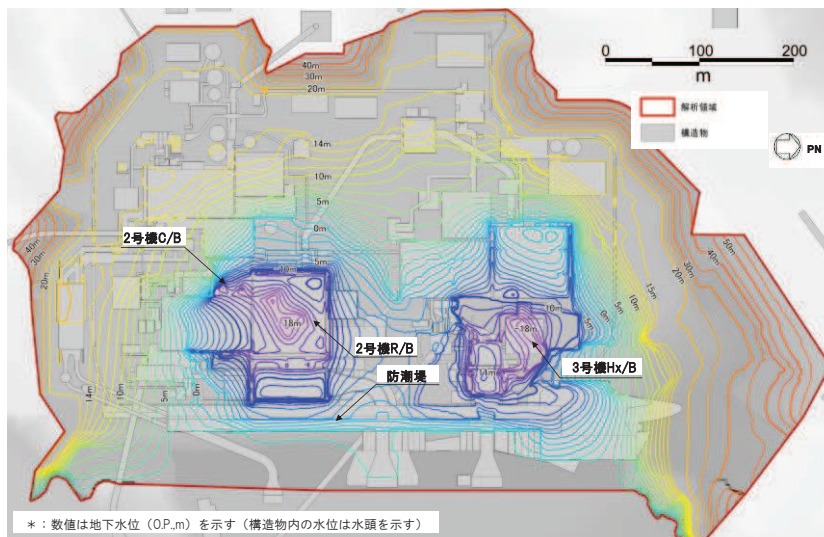


	第2号機エリア		第3号機エリア	
	No.1	No.2	No.3	No.4
①	×	○	×	○
②	×	○	○	×
③	○	×	×	○
④	○	×	○	×

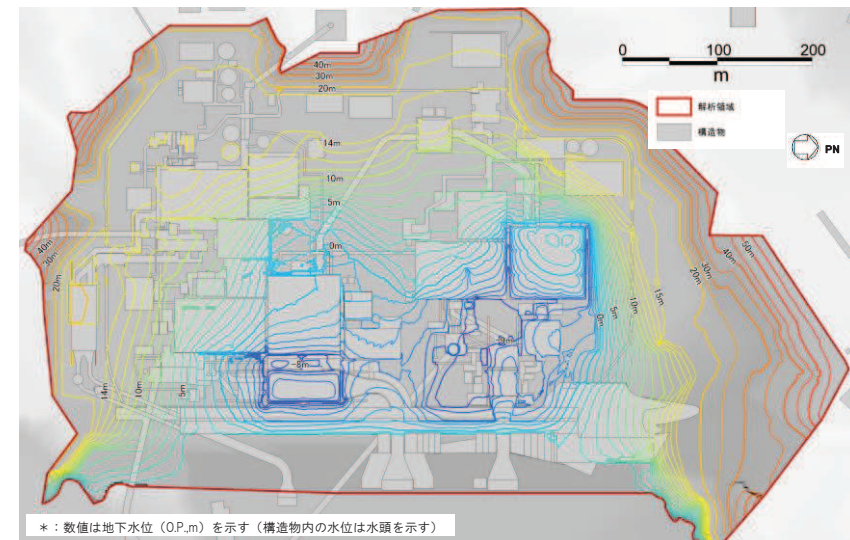
ケース①~④にて得られる地下水位分布を包絡する水位を解析水位とする

## 2. 地下水位の設定について(11/22) 【予測解析(定常解析)】

- 予測解析にて得られた解析水位を示す。
- なお、アクセスルートの評価において参照する解析水位は、同モデルを用いて、地下水位低下設備の機能喪失が長期間(約2ヵ月間)継続し、地下水位が上昇した状態を仮定し評価した。



予測解析結果1(各施設の耐震評価用)

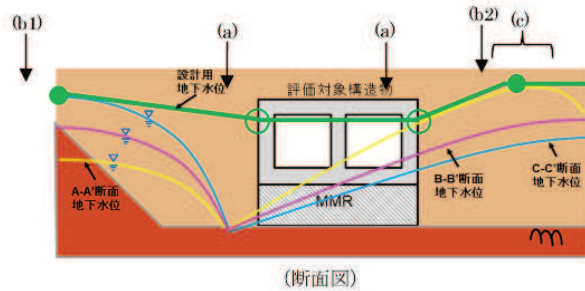
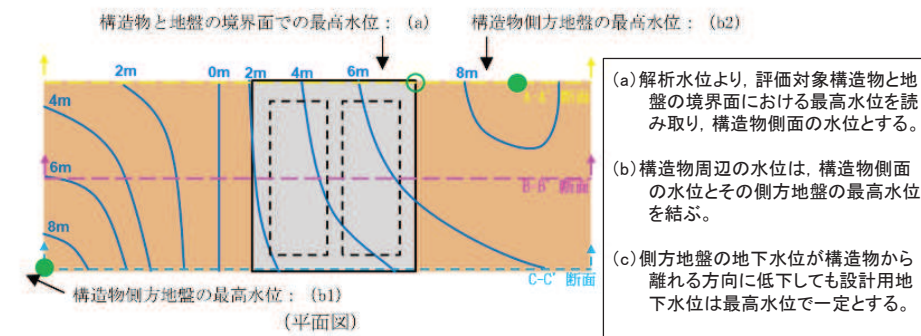
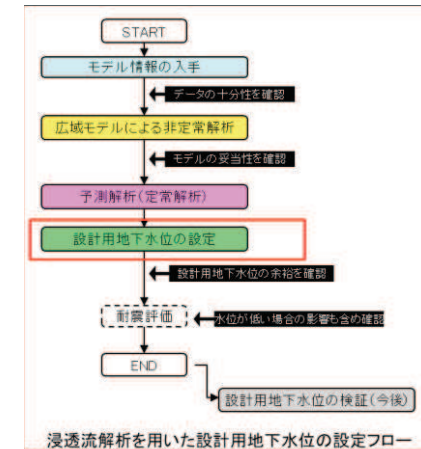


予測解析結果2(アクセスルート評価用)

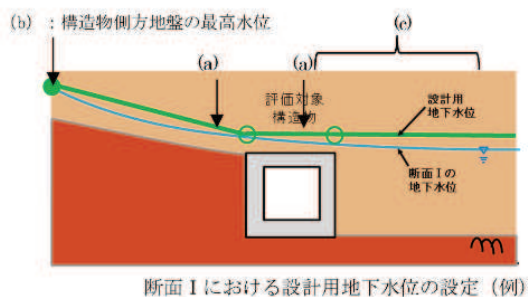
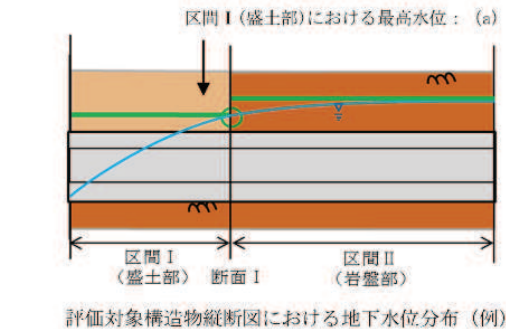
## 2. 地下水位の設定について(12/22)

### 【設計用地下水位の設定方法】

- 設計用地下水位は、水位評価モデルを用いた3次元浸透流解析(定常解析)により得られた解析水位を参照し、これを上側に包絡するよう設定する。
- 設計用地下水位は、解析断面で参照する地下水位のうち、構造物側面や解析断面境界等の各点での最高水位を結んで設定する。



(箱形構造物の場合)



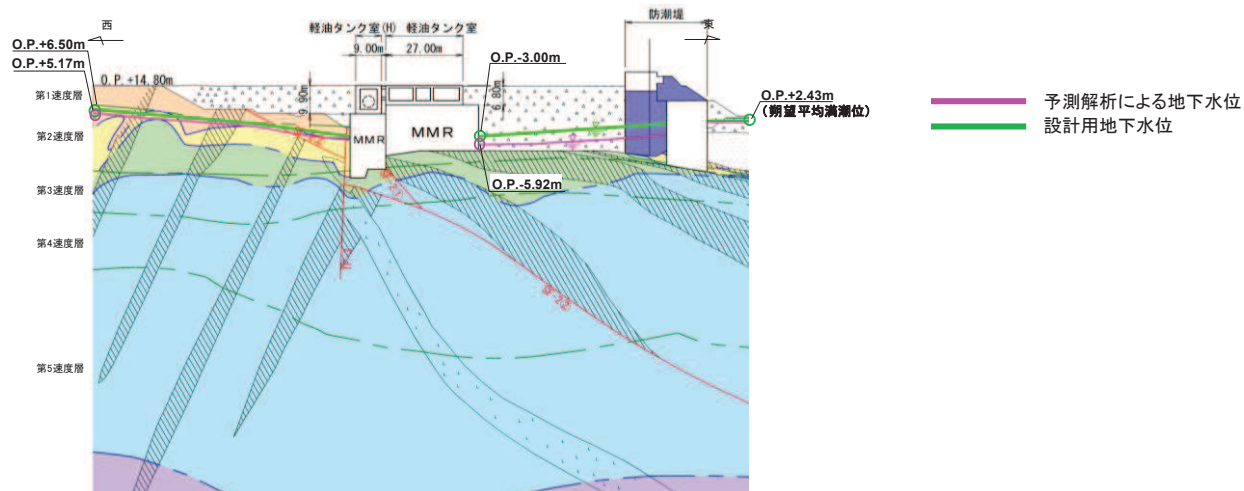
(線状構造物の場合)

- (a) 解析水位より、縦断面において断面選定を行う区間毎に最高水位を読み取り、同区間の構造物位置の水位とする。なお、区間の設定に当たっては、耐震評価断面選定を行う過程において、部材厚や内空断面等の構造的特徴がほぼ同一な区間について、周辺地質や隣接構造物等の周辺状況の観点等を踏まえて設定する。
- (b) 構造物周辺の水位は、横断面における構造物位置の水位とその側方地盤の最高水位を結ぶ。
- (c) 周辺地盤の地下水位が構造物から離れる方向に低下しても設計用地下水位は最高水位で一定とする。

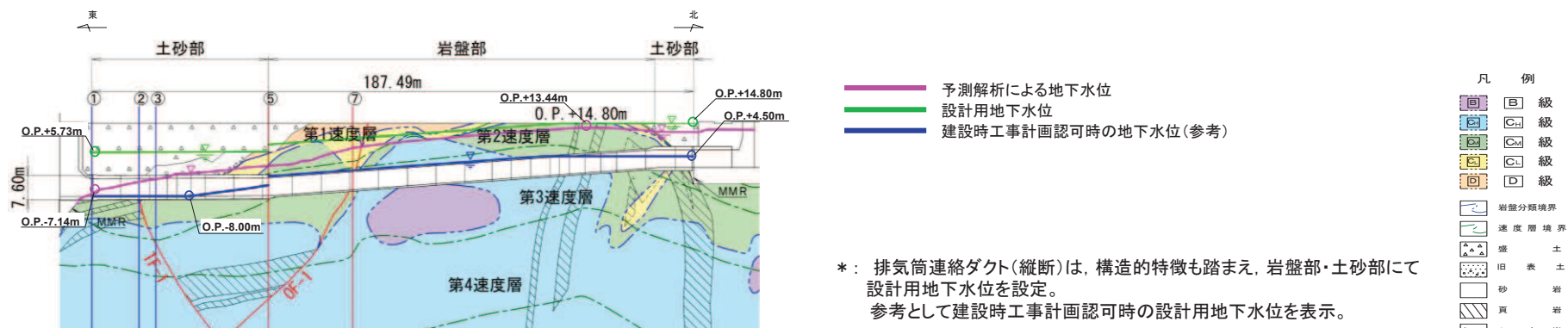
## 2. 地下水位の設定について(13/22)

### 【設計用地下水位の設定例(箱型構造物, 線状構造物)】

- 予測解析結果を参照した設計用地下水位の設定例を以下に示す。
- 耐震評価に用いる設計用地下水位は, 得られた解析水位を高めめに包絡するよう設定した。



軽油タンク室, 軽油タンク室(H)の例



排気筒連絡ダクト(縦断)\*の例

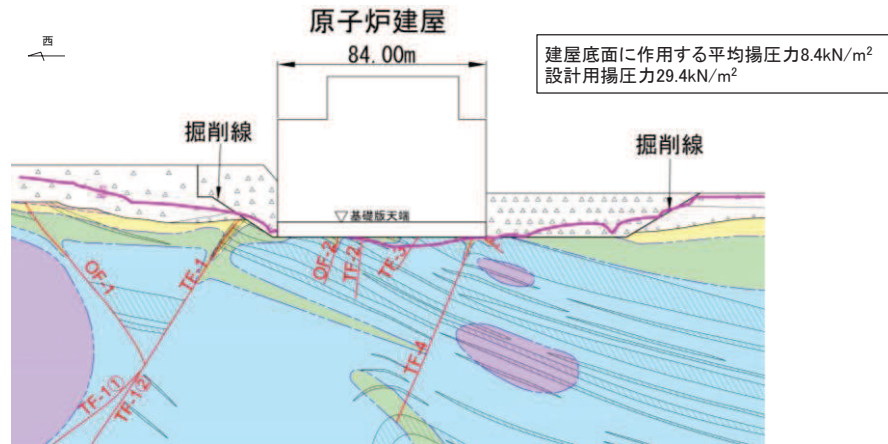
\*: 排気筒連絡ダクト(縦断)は, 構造的特徴も踏まえ, 岩盤部・土砂部にて設計用地下水位を設定。  
参考として建設時工事計画認可時の設計用地下水位を表示。



## 2. 地下水位の設定について(14/22)

### 【設計用揚圧力, 設計用地下水位の設定例】

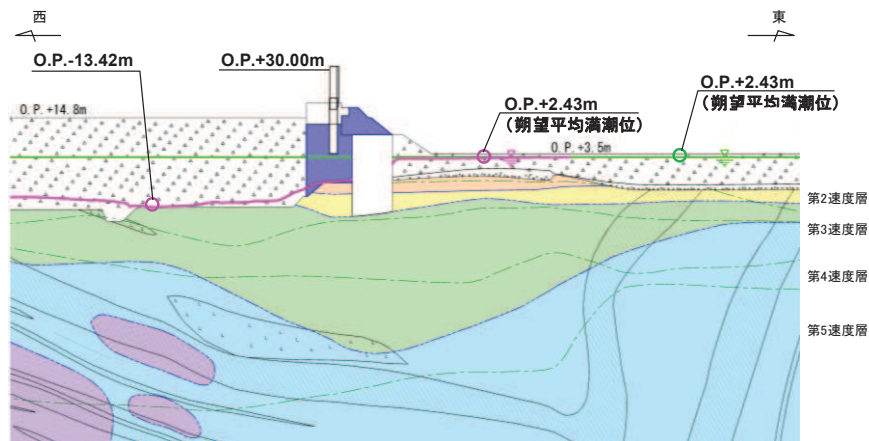
- 予測解析結果を参照した設計用揚圧力・設計用地下水位の設定例を以下に示す。
- 耐震評価に用いる設計用地下水位は、得られた解析水位を高めめに包絡するよう設定した。



原子炉建屋\*1の例

— 予測解析による解析水位

\*1: 原子炉建屋は、今回解析で得られた揚圧力を上回る建設時工事計画認可時の設計用揚圧力と同値に設定。



防潮堤(鋼管式鉛直壁)\*2の例

— 建設時工事計画認可時の地下水位(参考)  
— 予測解析による解析水位

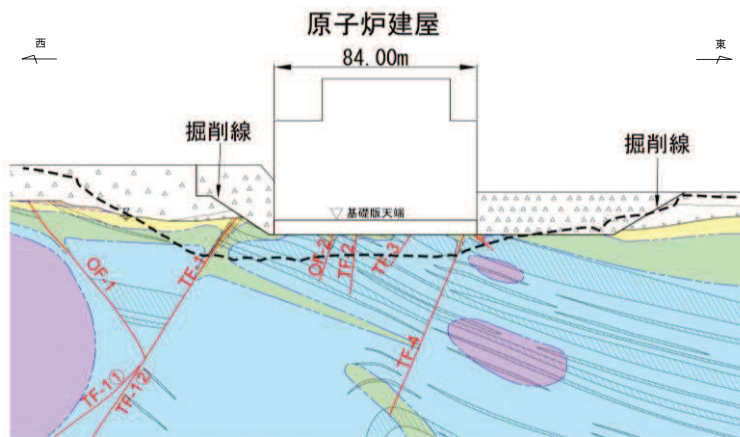
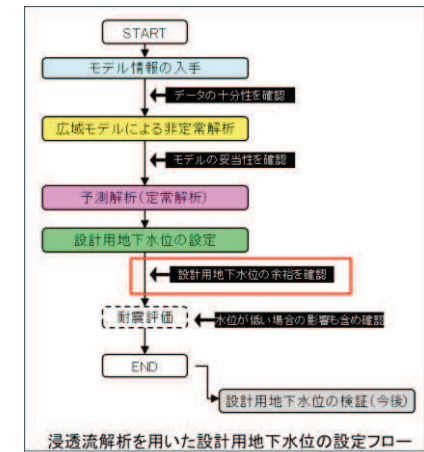
\*2: 防潮堤の設計用地下水位は、設置変更許可段階における設計方針と同様に設定しており、浸透流解析結果により保守性を確認する。(鋼管式鉛直壁の設計用地下水位は山側・海側とも期望平均満潮位に設定)

凡 例	
	B 級
	C 級
	Cw 級
	Cl 級
	D 級
	岩盤分類境界
	速度層境界
	盛 土
	旧 表 土
	砂
	頁 岩
	ひ ん 岩
	断 層
	地 質 界 界
	改良地盤等

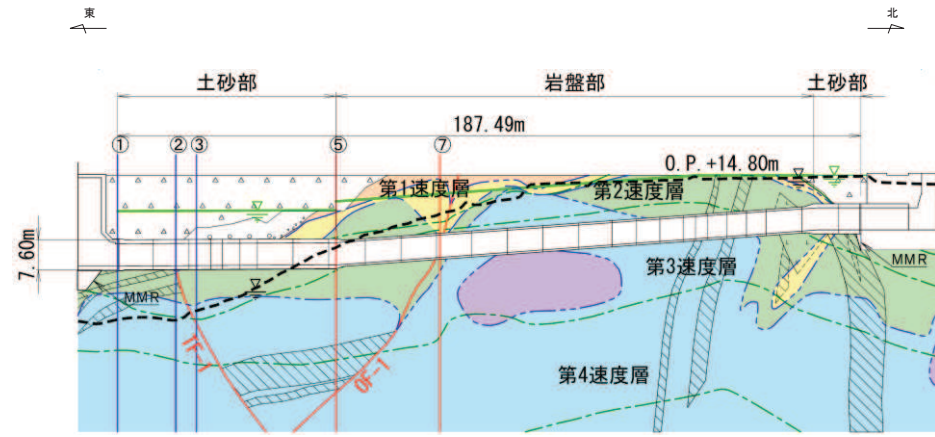
## 2. 地下水位の設定について(15/22)

### 【設計用地下水位の余裕】

- 設計用地下水位の余裕を確認するため、豪雨条件として450mm/3日間(150mm/日×3日間)を仮定\*1した非定常解析を行った。
- 仮想豪雨時の水位と設計用地下水位との比較から、設計用地下水位は十分な余裕を有することを確認した。
- また、地下水位低下設備の排水能力(揚水ポンプ、ドレーン)についても、同様な豪雨条件を与えた場合の流入量に対して、十分な余裕を有することを確認している。



原子炉建屋(東西)



排気筒連絡ダクト(縦断)

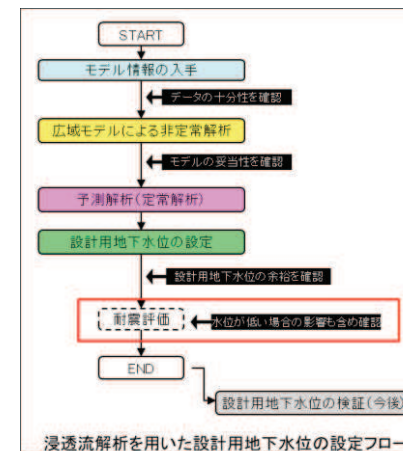
### 豪雨解析結果による設計用地下水位の余裕の確認

\* 1 仮定の豪雨条件として150mm/日×3日(合計450mm)を付与。再現期間400年に相当する。これは、国土交通省河川砂防技術基準(平成30年3月)における、一級河川の主要区間での砂防計画における対象降雨の降雨量の超過確率年(200年以上)と比較しても、十分に保守的な条件と考えられる。

## 2. 地下水位の設定について(16/22)

### 【地下水位が低い場合の影響検討】

- 地下水位が低い場合に耐震評価へ影響を与えうる事象として以下を抽出した。
  - ・ パターンA: 建屋基礎版等において、揚圧力の低減により、応力分布や応答の違いが想定されるケース
  - ・ パターンB: 地下水の分布によって構造物周辺の地盤の応答に違いが生じると想定されるケース
  - ・ パターンC: 構造物の両側面に作用する水位差が大きく、偏圧の影響が想定されるケース
- この3パターンにおいて、施設の設置状況等から耐震設計へ影響する可能性がある施設を整理し、地下水位が低い場合の影響を検討する施設(検討対象施設)を以下に整理した。
- 各検討対象施設における地下水位が低い場合の影響検討結果については、各施設の耐震設計結果と併せて今後説明予定。



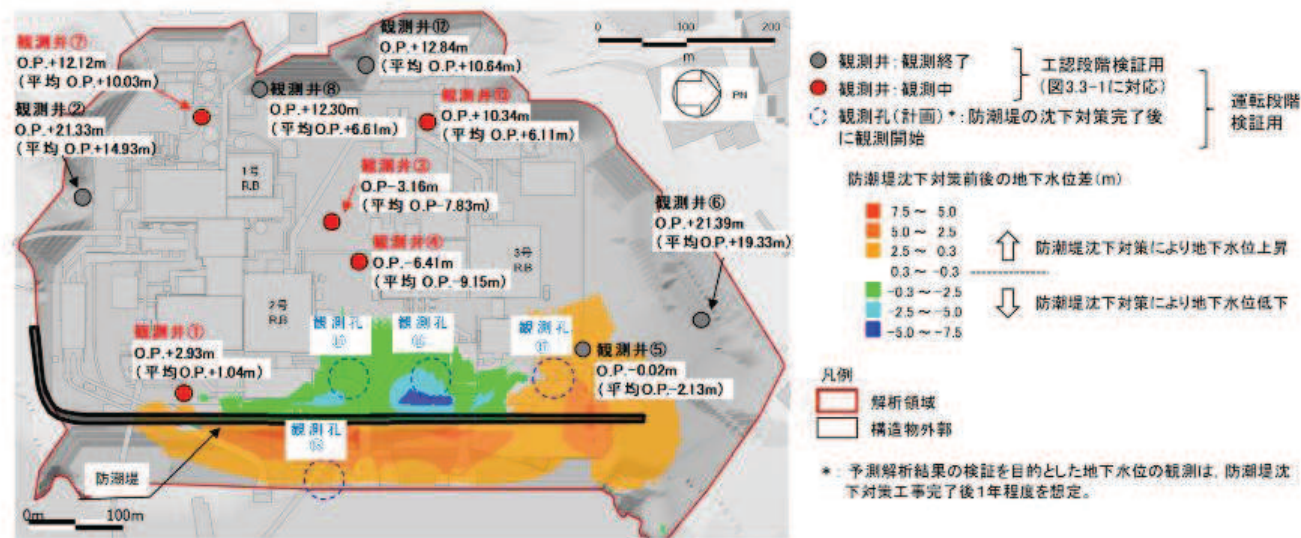
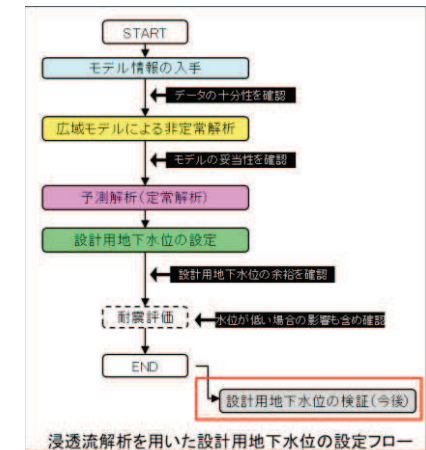
地下水位が低い場合に耐震評価へ影響を与えうる事象と検討対象施設

	パターンA(揚圧力)	パターンB(地盤応答)	パターンC(偏圧)
耐震設計へ影響する可能性がある施設	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 原子炉建屋</li> <li>・ 制御建屋</li> <li>・ 第3号機海水熱交換器建屋</li> <li>・ 緊急時対策建屋</li> <li>・ 緊急用電気品建屋</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 排気筒連絡ダクト(土砂部)</li> <li>・ 防潮堤</li> <li>・ 地下水位低下設備(揚水井戸No.2)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 排気筒連絡ダクト(土砂部)</li> <li>・ 防潮堤(鋼管式鉛直壁(一般部), 盛土堤防)</li> </ul>
検討対象施設と選定の観点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 原子炉建屋</li> <li>・ 建屋直下のドレーン(鋼管)新設により、平常時の建屋基礎版へ作用する揚圧力は大きく低減し、地震時の評価のうち地震力下向きの場合の評価が厳しくなる可能性がある。</li> <li>・ 設計用地下水位と浸透流解析結果の差が最も大きい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 排気筒連絡ダクト(土砂部)</li> <li>・ 縦断方向の水位分布も考慮し設計用地下水位を設定する線状構造物であり、原子炉建屋接続部の断面①において、設計用地下水位と実水位の差が大きくなる可能性がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 排気筒連絡ダクト(土砂部)</li> <li>・ 防潮堤(鋼管式鉛直壁(一般部))</li> <li>・ 排気筒連絡ダクト(土砂部)</li> <li>・ 岩盤上に設置した線状構造物であり、地下水位を堰き止め、偏水圧が生じる可能性がある。設計用地下水位と浸透流解析結果の差が最も大きい。</li> <li>・ 防潮堤(鋼管式鉛直壁(一般部))</li> <li>・ 防潮堤の前背面での盛土+旧表土の高さが異なるため、地震時に液状化の影響で地盤が片押しになる可能性がある。</li> </ul>

## 2. 地下水位の設定について(17/22)

### 【設計用地下水位の検証(今後)】

- ▶ 予測解析結果に基づく設計用地下水位は、将来的な防潮堤の沈下対策や新設ドレーン等を考慮したものであることから、今後、これらを含む安全対策工事が完了した運転段階において地下水位の観測記録を取得し、設計用地下水位と比較することにより、設計用地下水位の設定の妥当性を確認する方針とする。
- ▶ 将来的な地形改変等により設計用地下水位に変更が生じる場合は、設計用地下水位を再検討する。



防潮堤沈下対策による影響範囲と今後の地下水位観測計画

## 2. 地下水位の設定について(18/22)

### 【(参考)透水係数の設定について】

#### ■ 透水係数の設定値と設定根拠

広域モデル

地層	設定値(m/s)	設定根拠	
盛土・旧表土	$3.0 \times 10^{-5}$	クレーガー法*1(平均値)	
狐崎部層	岩盤 I	2.0×10 <sup>-6</sup>	原位置透水試験(平均値)
	岩盤 II	$5.0 \times 10^{-7}$	原位置透水試験(平均値)
牧の浜部層	岩盤 I	$1.0 \times 10^{-6}$	原位置透水試験(平均値)
	岩盤 II	$1.0 \times 10^{-7}$	原位置透水試験(平均値)
セメント改良土・改良地盤	— (設定なし)	—	
透水層(砕石)	— (設定なし)	—	
コンクリート構造物 (MMR含む)	— (不透水)	—	

\*1: 粒度試験結果に基づく推定方法。(以下、同様)

水位評価モデル

地層	設定値(m/s)	設定根拠	
盛土・旧表土	$3.0 \times 10^{-5}$	クレーガー法(平均値)	
狐崎部層	岩盤 I	$7.0 \times 10^{-7}$	原位置透水試験(-1σ)
	岩盤 II	$5.0 \times 10^{-7}$	原位置透水試験(平均値)
牧の浜部層	岩盤 I	$2.0 \times 10^{-7}$	原位置透水試験(-1σ)
	岩盤 II	$1.0 \times 10^{-7}$	原位置透水試験(平均値)
セメント改良土・改良地盤	$2.0 \times 10^{-7}$	原位置透水試験(平均値)	
透水層(砕石)	$1.0 \times 10^{-2}$	室内透水試験(平均値)	
コンクリート構造物 (MMR含む)	— (不透水)	—	

(参考)地下水流入量評価モデル

地層	設定値(m/s)	設定根拠	
盛土・旧表土	$7.0 \times 10^{-4}$	クレーガー法(+1σ)	
狐崎部層	岩盤 I	$4.0 \times 10^{-6}$	原位置透水試験(+1σ)
	岩盤 II	$1.0 \times 10^{-6}$	原位置透水試験(+1σ)
牧の浜部層	岩盤 I	$6.0 \times 10^{-6}$	原位置透水試験(+1σ)
	岩盤 II	$3.0 \times 10^{-7}$	原位置透水試験(+1σ)
セメント改良土・改良地盤	$2.0 \times 10^{-6}$	原位置透水試験(+1σ)	
透水層(砕石)	—	—	
コンクリート構造物 (MMR含む)	— (不透水)	—	

(補足)

- ポンプの排水能力設定にあたっては、流入量が大きく算出されるように透水係数を設定し、ドレーンは既設・新設の全ての範囲を有効とした。

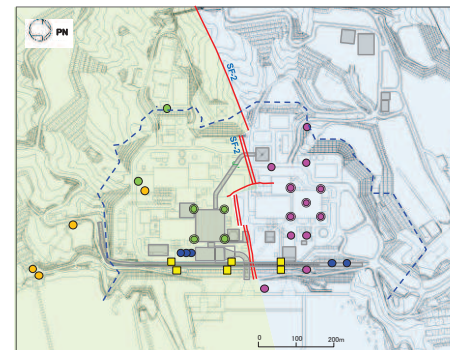
#### ■ 透水試験結果一覧

透水試験結果一覧

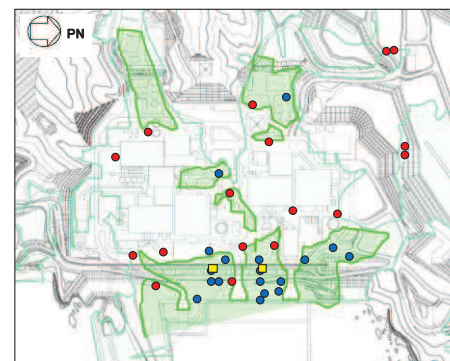
地層	データ数	試験結果(平均値)(m/s)	平均値-1σ(m/s)	平均値+1σ(m/s)	
盛土・旧表土(クレーガー法)	158	$2.1 \times 10^{-5}$	$7.3 \times 10^{-7}$	$6.2 \times 10^{-4}$	
(盛土:原位置透水試験)*2	3	$0.9 \times 10^{-5}$	—	—	
(旧表土:原位置透水試験)*2	4	$0.7 \times 10^{-5}$	—	—	
狐崎部層	岩盤 I	$1.6 \times 10^{-6}$	$7.2 \times 10^{-7}$	$3.7 \times 10^{-6}$	
	岩盤 II	54	$1.3 \times 10^{-7}$	$2.0 \times 10^{-8}$	$0.8 \times 10^{-6}$
牧の浜部層	岩盤 I	70	$1.1 \times 10^{-6}$	$2.3 \times 10^{-7}$	$5.3 \times 10^{-6}$
	岩盤 II	57	$0.6 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-8}$	$3.0 \times 10^{-7}$
セメント改良土・改良地盤	11	$2.1 \times 10^{-7}$	$2.7 \times 10^{-8}$	$1.6 \times 10^{-6}$	
改良地盤(追加)	13	$0.5 \times 10^{-7}$	$1.3 \times 10^{-8}$	$1.7 \times 10^{-7}$	
透水層(砕石)	10	$1.2 \times 10^{-2}$	$0.9 \times 10^{-2}$	$1.7 \times 10^{-2}$	

\*2: クレーガー法の検証として実施

#### ■ 試験実施位置



(岩盤, セメント改良土, 改良地盤)

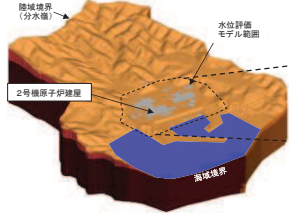
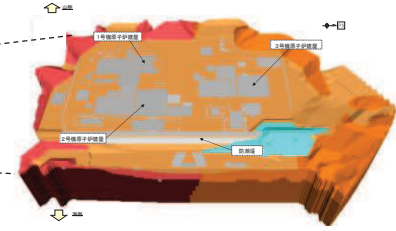


(盛土・旧表土)

## 2. 地下水位の設定について(19/22)

### 【(参考)浸透流解析モデル諸元】

広域モデルと水位評価モデルの諸元対比

項目	広域モデル	水位評価モデル	備考
1.目的	<ul style="list-style-type: none"> <li>モデル化の妥当性を確認 (観測結果の再現性を確保)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>設計用地下水位の設定において参照</li> <li>液状化影響検討対象施設を幅広く抽出するため、高めの水位を算定</li> </ul>	
2.解析コード	<ul style="list-style-type: none"> <li>GETFLOWS Ver.6.64.0.2</li> </ul>		
3a.解析領域	<ul style="list-style-type: none"> <li>分水嶺を山側境界とし水位評価モデルを包絡する範囲</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>O.P.+14.8m盤及びO.P.+14.8m周辺の法面</li> </ul> 	
3b.格子数	<ul style="list-style-type: none"> <li>平面格子数:約33.4万</li> <li>総格子数:約1600万</li> <li>格子寸法:0.5~6m程度 (構造物近傍は最小0.5m程度, 山側領域は3~6 m程度)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>平面格子数:約16.7万</li> <li>総格子数:約770万</li> <li>格子寸法:0.5~2m程度 (構造物近傍は最小0.5m程度)</li> </ul>	
4.解析種別	<ul style="list-style-type: none"> <li>非定常解析</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>定常解析・非定常解析*1</li> </ul>	
5a.検証期間	<ul style="list-style-type: none"> <li>期間1: 2006-2007年</li> <li>期間2: 2013-2014年</li> </ul>	—	
5b.気象条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>降水量・気温・日射量・相対湿度・風速:構内観測所データ (欠測値は, 周辺気象庁データから欠測補間)</li> </ul>	—	
5c.蒸発散	<ul style="list-style-type: none"> <li>定常状態:ハーモン法*2</li> <li>非定常状態:熱収支法</li> </ul>	—	
6a.モデル(地形)	<ul style="list-style-type: none"> <li>検証期間に対応した状態</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>安全対策工完了段階に対応した状態</li> </ul>	
6b. " (地盤)	<ul style="list-style-type: none"> <li>検証期間に対応した状態</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>安全対策工完了段階に対応した状態 (施設周辺の地盤改良を含め)</li> </ul>	
6c. " (構造物)	<ul style="list-style-type: none"> <li>検証期間に対応した状態</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>安全対策工完了段階に対応した状態</li> </ul>	
6d. " (ドレーン)	<ul style="list-style-type: none"> <li>既設の全範囲を管路として考慮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水位が高めに算出されるよう集水機能への寄与範囲を限定                     <ul style="list-style-type: none"> <li>既設・新設のうち信頼性が確保された範囲を管路相当</li> <li>信頼性の確保状況に応じ透水層相当</li> </ul> </li> <li>機能喪失の考慮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水位が低い場合の影響検討では, 広域モデルをベースに既設・新設の全範囲を考慮 (流入量評価も同様)</li> </ul>
7.境界条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>実態に則した設定                     <ul style="list-style-type: none"> <li>山側:閉境界</li> <li>海側:平均潮位に水位固定</li> <li>ドレーン:ドレーン計画高に水位固定</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水位が高めに算出されるよう設定                     <ul style="list-style-type: none"> <li>山側:地表面に水位固定</li> <li>海側:H.W.L.に水位固定</li> <li>ドレーン:ドレーン計画高</li> </ul> </li> </ul>	
8.透水係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>試験平均値</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水位が高めに算出されるよう設定 (岩盤Iを-1σ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>流入量評価では, 水位評価モデルを全て+1σとし流入量を大きめに評価</li> </ul>
9.有効間隙率	<ul style="list-style-type: none"> <li>文献値*3</li> </ul>		
10.粗度係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>文献値*4</li> </ul>	—	

\*1:アクセスルートの評価においては, 地下水位低下設備の機能喪失から2ヵ月後の水位分布を参照

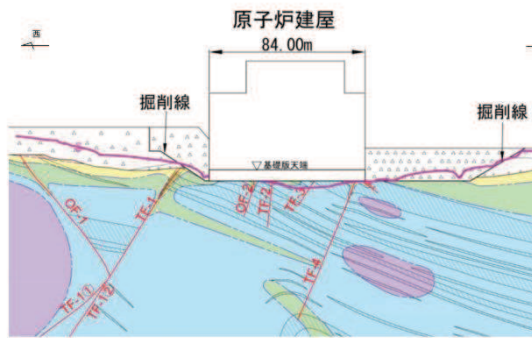
\*2:平均気温・平均降水量は発電所内観測値, 日照時間は地下水ハンドブックによる

\*3:地下水ハンドブック(建設産業調査会), 水理公式集(土木学会)等を参照し設定

\*4:水理公式集(土木学会), 河川砂防技術基準(国土交通省)等を参照し設定

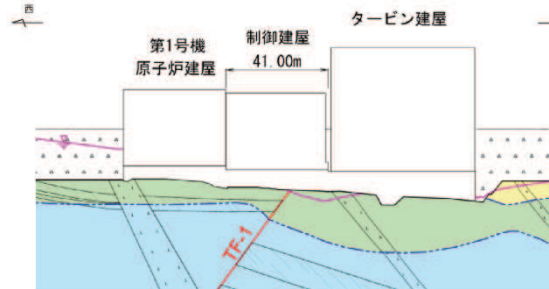
## 2. 地下水位の設定について(20/22) 【(参考)各施設の設計用地下水位の設定例】

### ■建物・構築物の地下水位分布の例



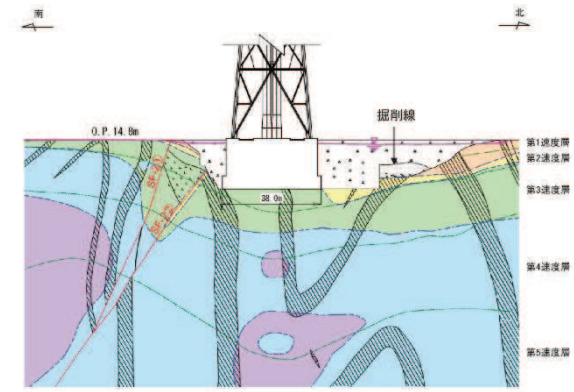
予測解析による地下水位

原子炉建屋周辺の地下水位分布(東西)



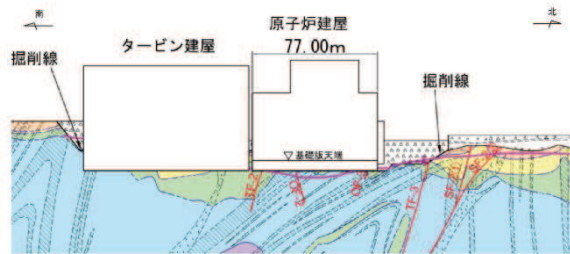
予測解析による地下水位

制御建屋周辺の地下水位分布



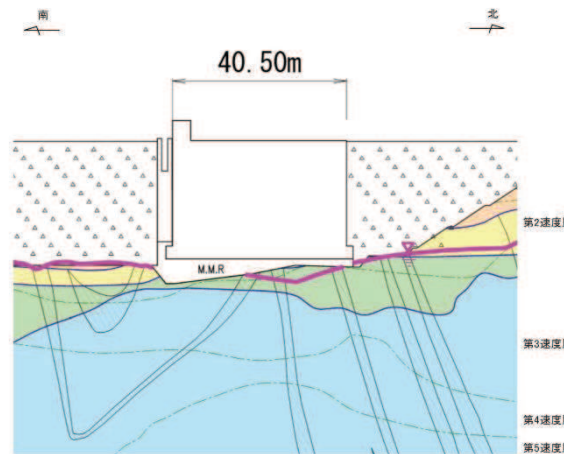
予測解析による地下水位

排気筒周辺の地下水位分布



予測解析による地下水位

原子炉建屋周辺の地下水位分布(南北)



予測解析による地下水位

第3号機海水熱交換器建屋周辺の地下水位分布

凡例

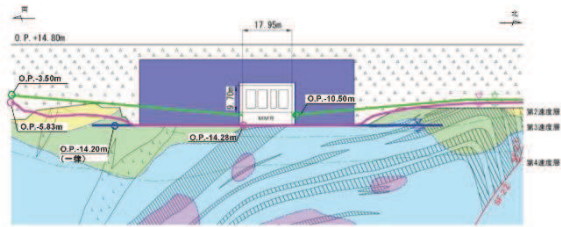
B	B	級
C <sub>1</sub>	C <sub>11</sub>	級
C <sub>2</sub>	C <sub>21</sub>	級
C <sub>3</sub>	C <sub>31</sub>	級
D	D	級

岩盤分層境界  
 速度層境界  
 盛土  
 田表土  
 砂  
 真岩  
 ひん岩  
 断層  
 地質境界  
 改良地盤等

# 2. 地下水位の設定について(21/22)

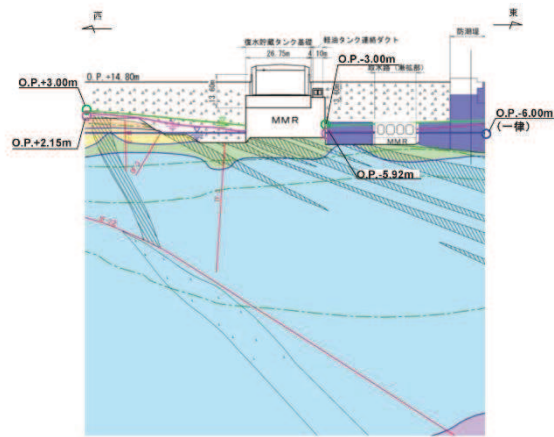
## 【(参考)各施設の設計用地下水位の設定例】

### ■土木構造物の設計用地下水位の例(1/2)



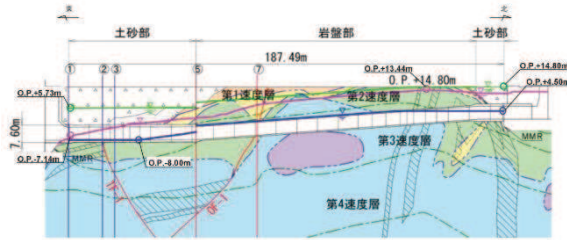
— 建設時工事計画認可時の地下水位  
— 予測解析による地下水位  
— 設計用地下水位

原子炉機器冷却海水配管ダクトの設計用地下水位(横断)



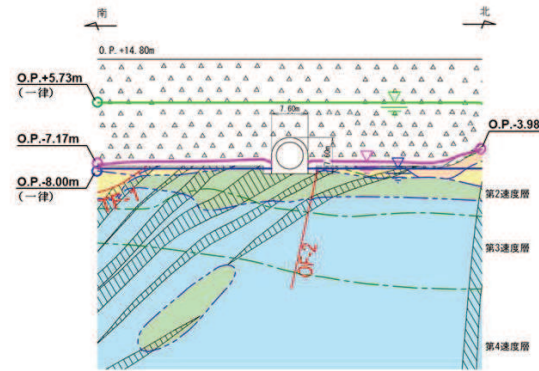
— 建設時工事計画認可時の地下水位  
— 予測解析による地下水位  
— 設計用地下水位

軽油タンク連絡ダクトの設計用地下水位(東西)  
(復水貯蔵タンク基礎の東西方向断面の設計用地下水位含む)



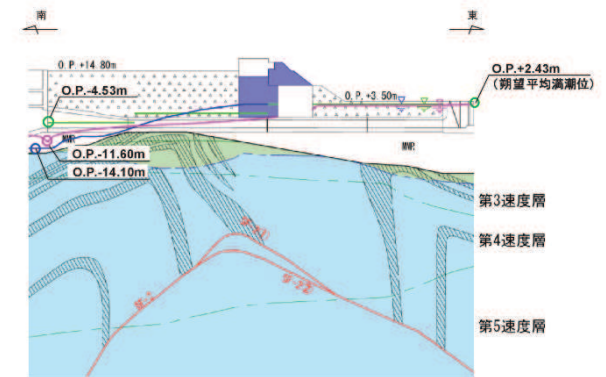
— 建設時工事計画認可時の地下水位  
— 予測解析による地下水位  
— 設計用地下水位

排気筒連絡ダクトの設計用地下水位(縦断)



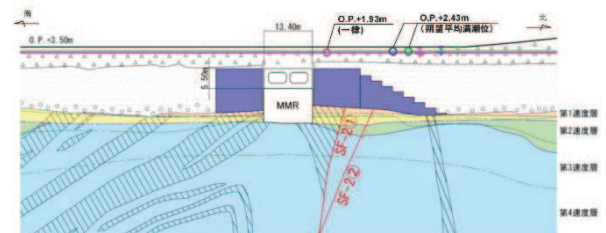
— 建設時工事計画認可時の地下水位  
— 予測解析による地下水位  
— 設計用地下水位

排気筒連絡ダクトの設計用地下水位(横断(断面①))



— 建設時工事計画認可時の地下水位  
— 予測解析による地下水位  
— 設計用地下水位

取水路の設計用地下水位(縦断)



— 建設時工事計画認可時の地下水位  
— 予測解析による地下水位  
— 設計用地下水位

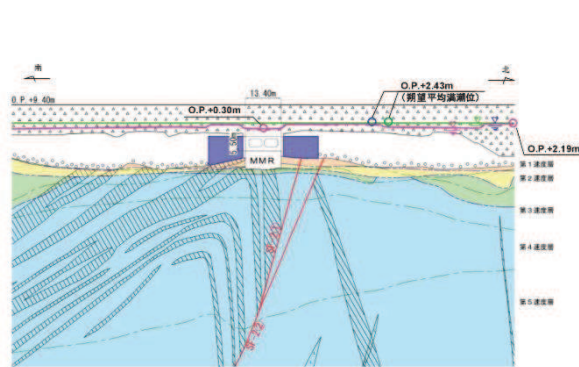
取水路の設計用地下水位(横断(標準部①))  
(改良地盤に囲まれる箇所)



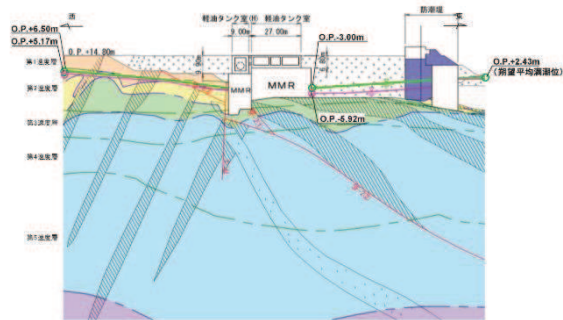
# 2. 地下水位の設定について(22/22)

## 【(参考)各施設の設計用地下水位の設定例】

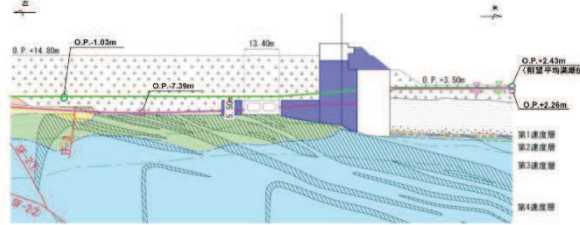
### ■土木構造物の設計用地下水位の例(2/2)



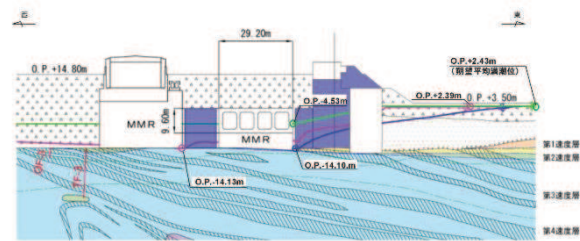
取水路の設計用地下水位(横断(標準部②))  
(改良地盤に囲まれる箇所以外)



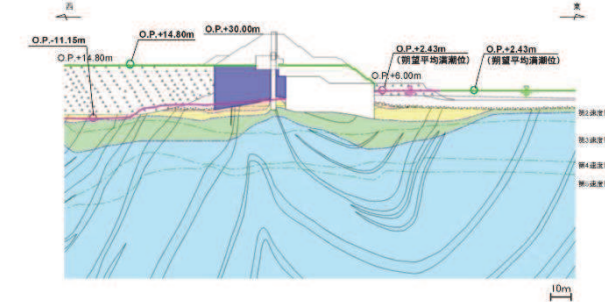
軽油タンク室、軽油タンク室(H)の設計用地下水位(東西)



海水ポンプ室の設計用地下水位(縦断)

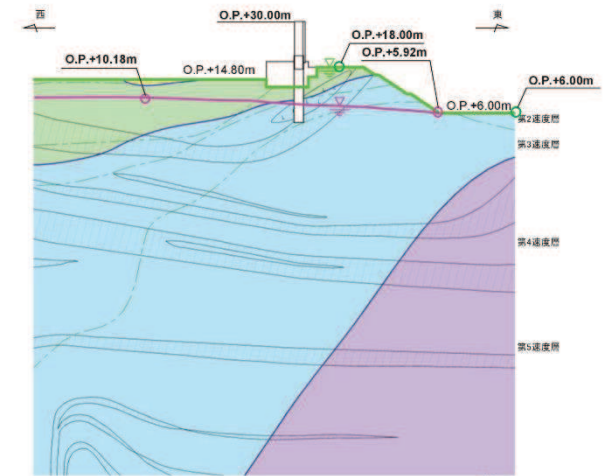


海水ポンプ室の設計用地下水位(横断)

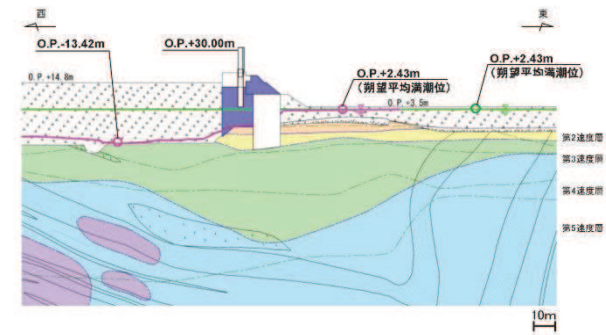


\* : 鋼管杭下方の C<sub>1</sub> 級岩盤部は MMR により置換

防潮堤(盛土堤防)の設計用地下水位(横断①)



防潮堤(鋼管式鉛直壁)の設計用地下水位(岩盤部②)



防潮堤(鋼管式鉛直壁)の設計用地下水位(一般部①)

(防潮堤における地下水位は、設置変更許可段階の検討(浸透流解析実施前)を踏まえ、一般部では保守的に海面平均満潮位とする。)

(防潮堤における地下水位は、設置変更許可段階の検討(浸透流解析実施前)を踏まえ、岩盤部では保守的に岩盤面とする。)

### 3. 耐震評価における断面選定及び解析手法選定について(1/7)

#### 【断面選定及び解析手法選定の基本方針】

屋外重要土木構造物の耐震評価を行うための評価対象断面の選定，地盤の液状化特性を踏まえた解析手法の選定の方針について説明する。

#### ① 断面選定

- 女川原子力発電所2号機の屋外重要土木構造物等については，構造物の断面形状，周辺の地盤状況，地下水位等を考慮し，耐震評価上最も厳しくなる断面を評価対象断面として選定する。
- 構造物は，線状構造物と箱形構造物に大別され，構造物周辺の地盤状況も様々であることから，断面選定の選定プロセス，判断基準の考え方を説明する。

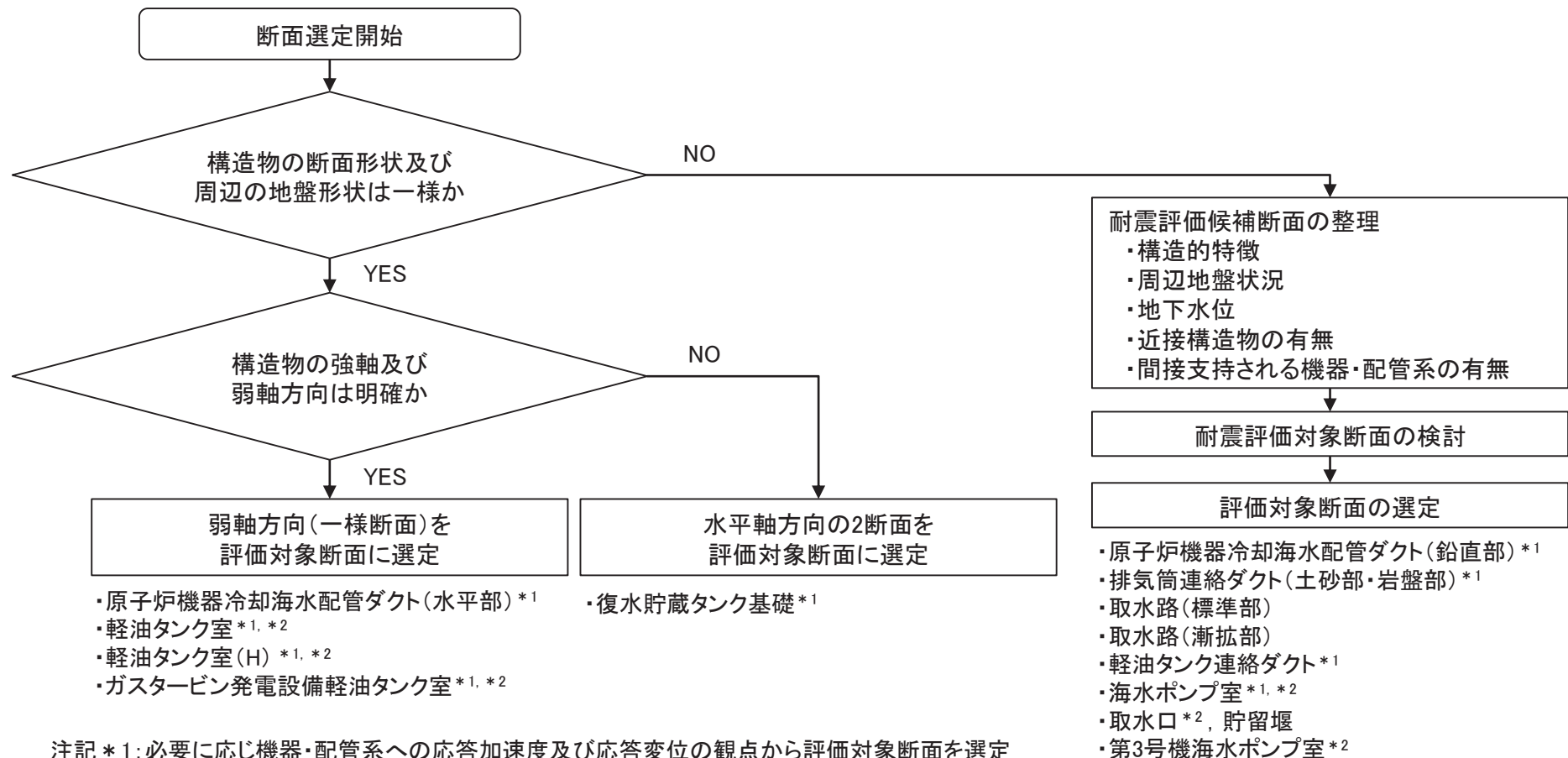
#### ② 解析手法選定

- 耐震評価及び地震時荷重算出のための解析手法は，敷地に分布する液状化検討対象層（盛土，旧表土）の液状化特性を考慮し，全応力解析と有効応力解析から，保守的な解析手法を選定する。
- 屋外重要土木構造物等の周辺地盤には盛土・旧表土・改良地盤・岩盤などが分布し，液状化による施設への影響は様々であることから，地盤の液状化特性を踏まえた解析手法の選定プロセス，判断基準の考え方を説明する。

### 3. 耐震評価における断面選定及び解析手法選定について(2/7)

#### 【① 断面選定】

- 建造物の断面形状, 周辺地盤状況等が一様な建造物は, 周辺の地盤が建造物に与える影響は, どの断面でも大きな差異はないと考えられるため, 建造物の中心を通る断面を選定する。
- 断面形状が異なる, もしくは周辺地盤状況等に変化がある建造物は, 構造的特徴や周辺地盤状況等を整理した上で, 断面選定を行う。



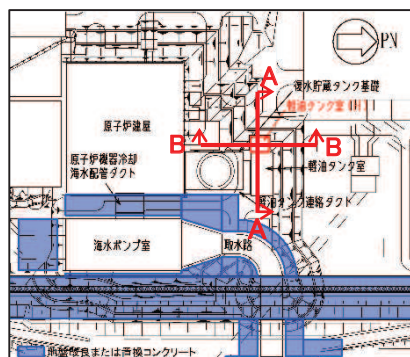
注記\*1: 必要に応じ機器・配管系への応答加速度及び応答変位の観点から評価対象断面を選定  
\*2: 三次元構造解析で耐震評価するため, 強軸方向荷重算定用の断面選定も実施

### 3. 耐震評価における断面選定及び解析手法選定について(3/7)

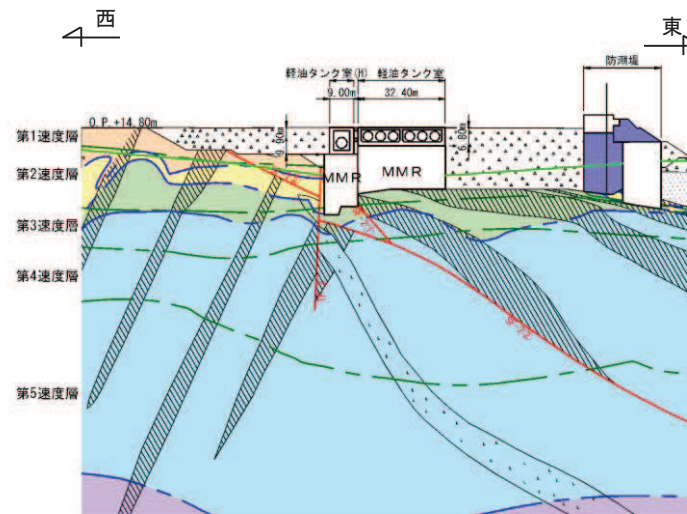
#### 【① 断面選定】

#### 断面選定の例（軽油タンク室(H)）

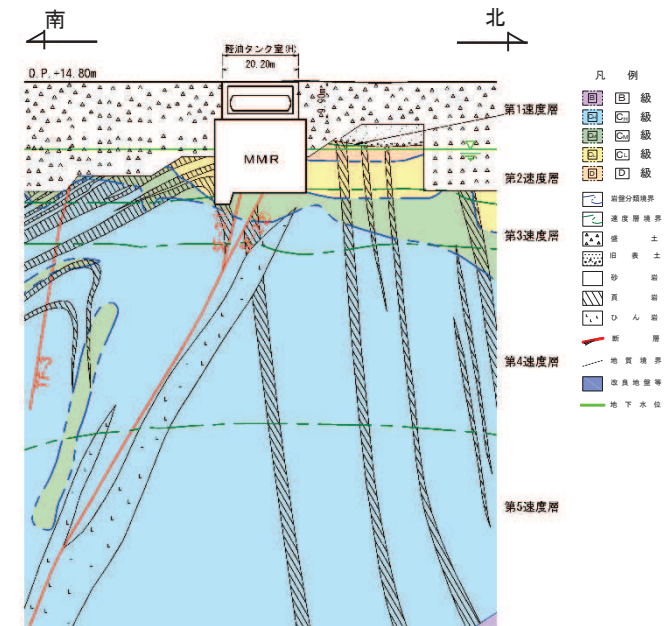
- 軽油タンク室(H)は、MMR(人工岩盤)を介して岩盤に支持された、幅9m×長さ20.2m×高さ9.9mの1室の箱形構造であり、東西方向が弱軸方向となる。内部には、1基のタンクが中央に配置されている。
- 周辺地盤は、盛土が一様に分布し、東側には軽油タンク室が隣接する。地下水位は構造物底版より十分に低くほぼ一様に分布している。
- 構造的特徴や周辺の地盤状況、地下水位は、どの断面でも同様であることから、構造物の中心を通る断面を評価対象断面とする。



平面図・掘削図



A-A 断面



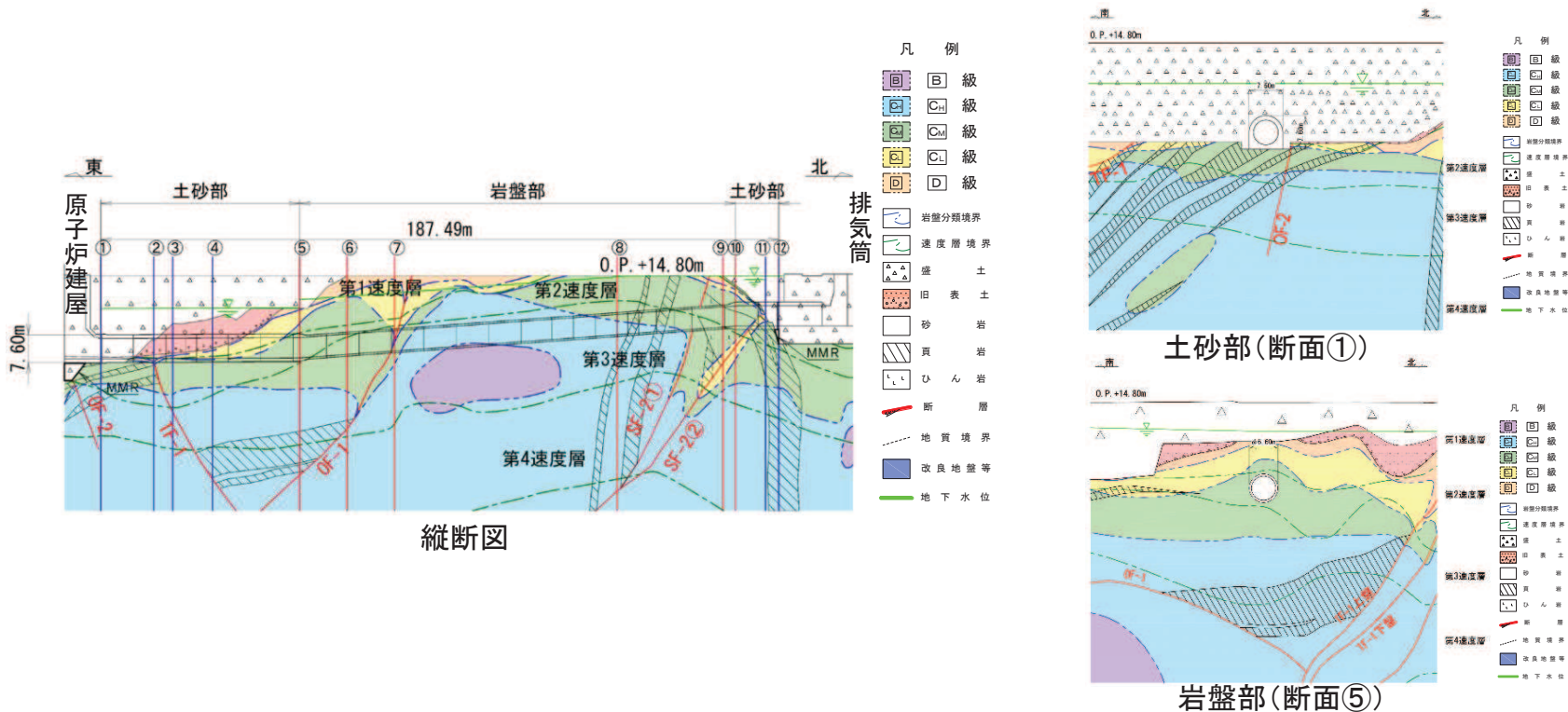
B-B 断面

### 3. 耐震評価における断面選定及び解析手法選定について(4/7)

#### 【① 断面選定】

#### 断面選定の例（排気筒連絡ダクト）

- 排気筒連絡ダクトは、原子炉建屋と排気筒を結ぶ、延長187.49mの鉄筋コンクリート造のトンネル構造物であり、幌型の土砂部と円形の岩盤部で断面形状等が異なることから、それぞれ評価対象断面を選定する。
- 周辺地盤は、土砂部は盛土・旧表土が分布し、岩盤部は岩盤である。また、排気筒側に上り勾配がついており、原子炉建屋側が土被り厚が大きくなっている。設計用地下水位は構造物底版から定距離に分布している。
- 評価対象断面は、土被り厚が大きく、耐震裕度が小さくなると想定される土砂部は断面①、岩盤部は断面⑤を選定する。また、床応答の観点から、構造物下端の応答加速度が最も大きい断面③を選定する。



#### 【② 解析手法選定】

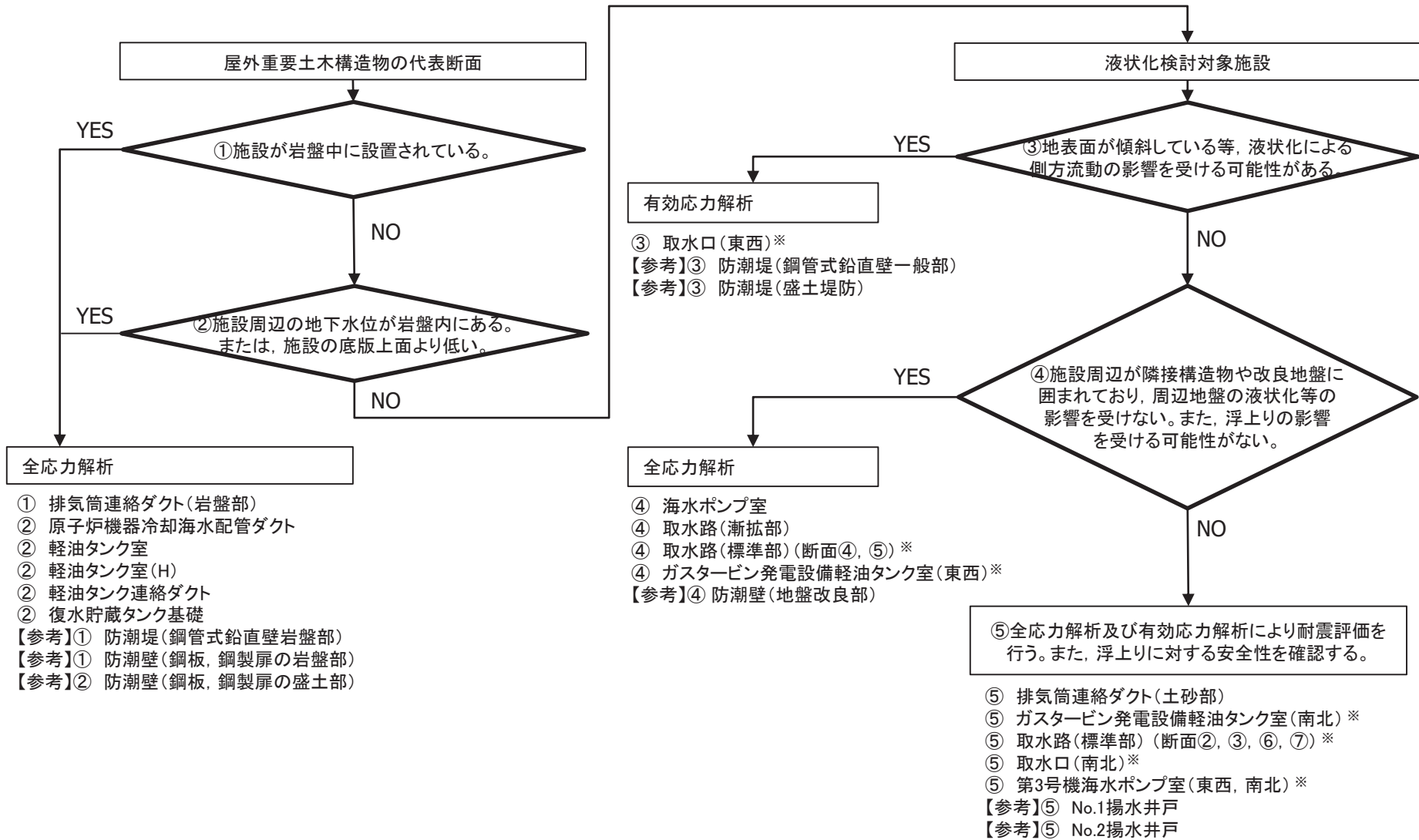
---

#### 対応方針

- 女川原子力発電所の液状化検討対象層である盛土・旧表土は、液状化強度試験の結果、有効応力がゼロとなり液体状になることは無いものの、過剰間隙水圧が上昇しひずみが漸増するねばり強い挙動(繰返し軟化)を示すため、解析上、保守的に液状化しやすい条件を考慮した評価を行う。
- 解析手法は、地下水位を高め評価し、幅広く液状化検討対象施設を抽出したうえで、地盤の液状化(繰返し軟化)、側方流動、浮き上がりのおそれがある断面については、有効応力解析も含めて保守的な耐震設計が可能となるよう手法の選定を行う。

### 3. 耐震評価における断面選定及び解析手法選定について(6/7)

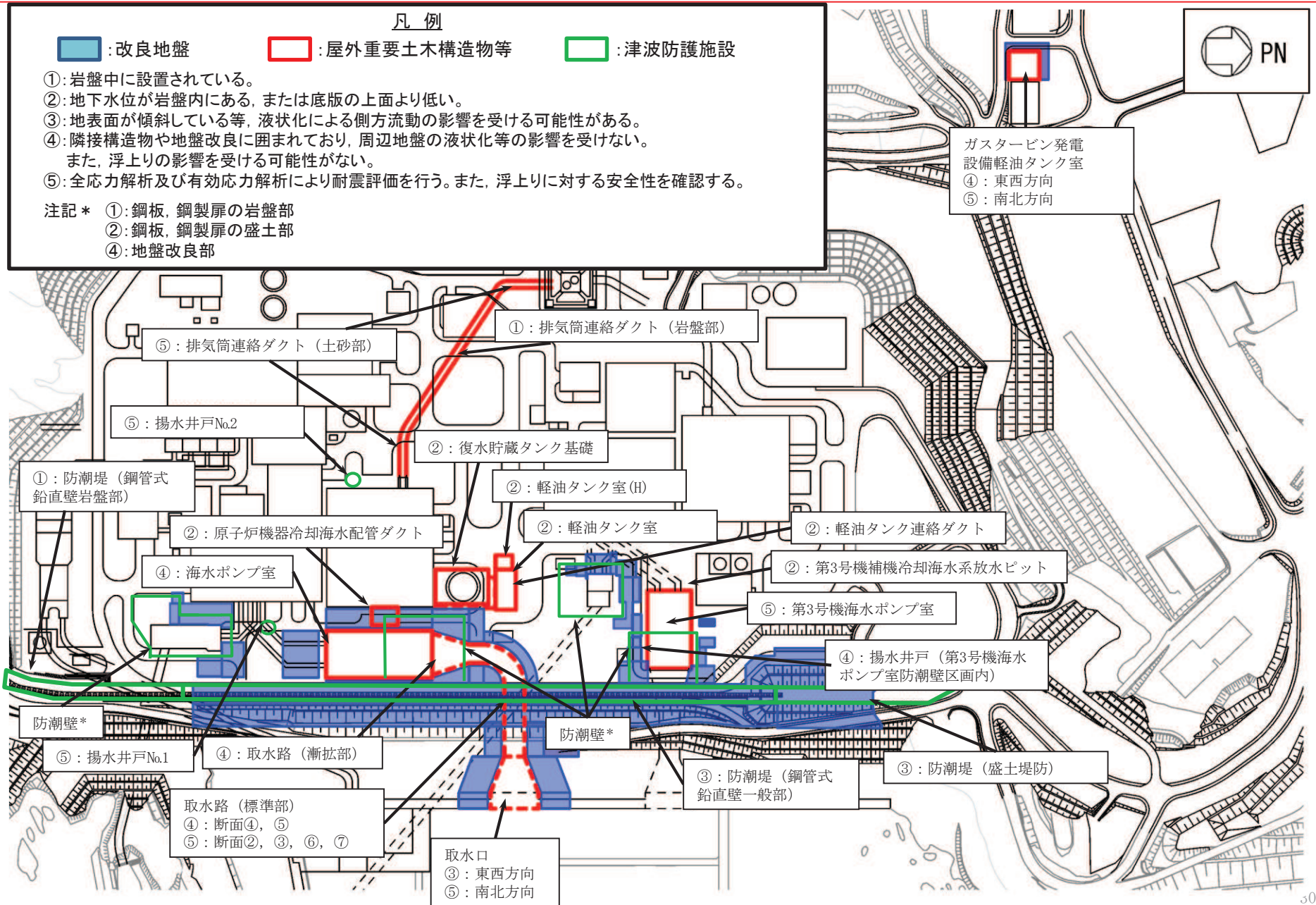
#### 【② 解析手法選定:フロー】



※: 三次元構造解析に複数断面の荷重を作用させる場合、断面によって解析手法が異なる場合でも保守的に荷重の大きい組合せを採用する。

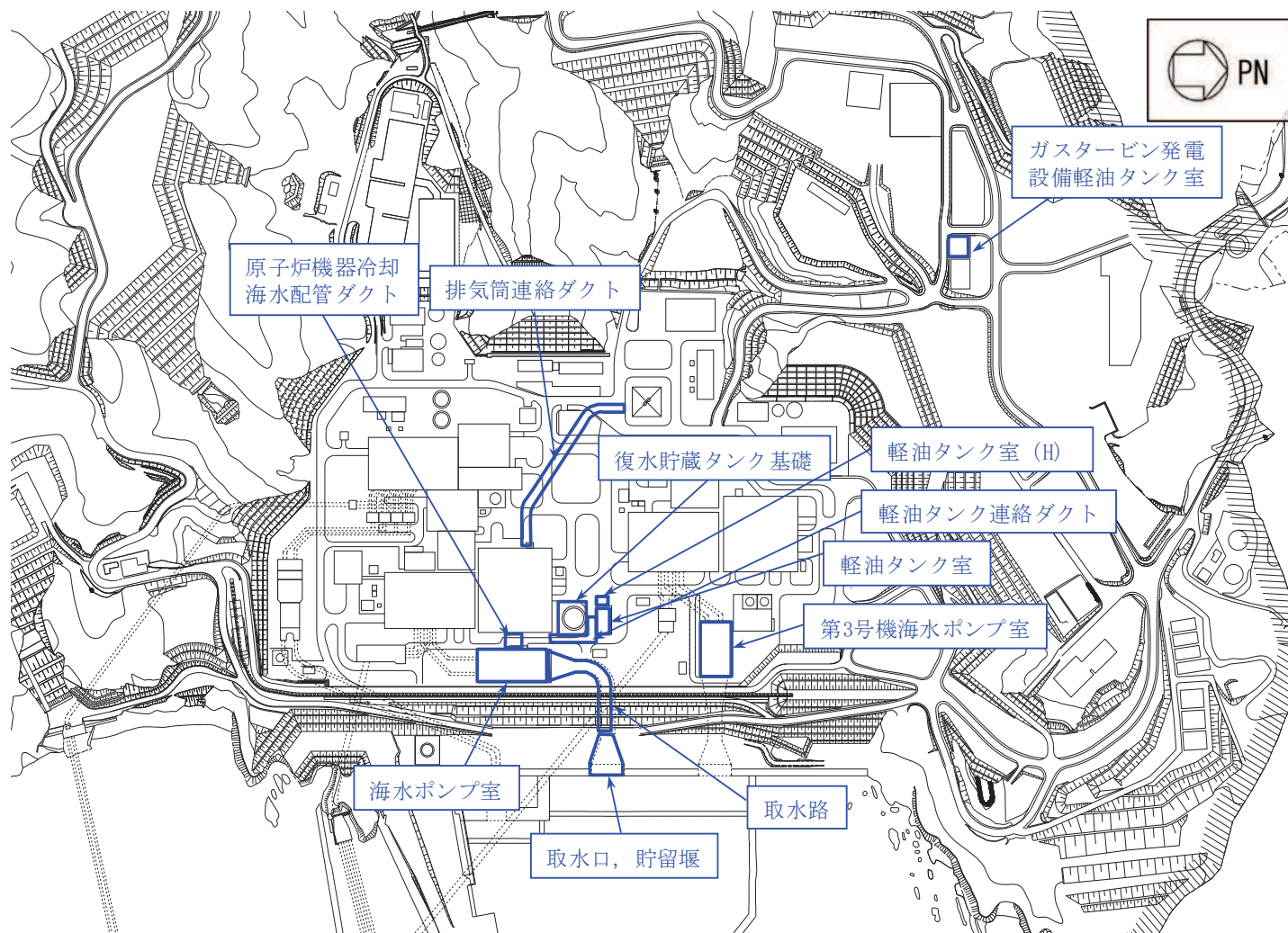
### 3. 耐震評価における断面選定及び解析手法選定について(7/7)

#### 【②解析手法選定： 構造物の配置図】





### 3. 耐震評価における断面選定及び解析手法選定について(参考①)

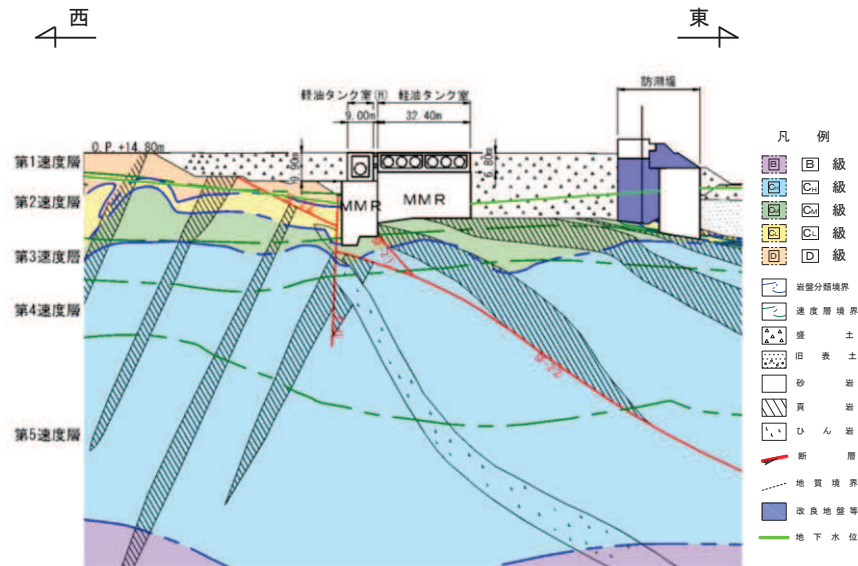


屋外重要土木構造物の位置図

### 3. 耐震評価における断面選定及び解析手法選定について(参考②)

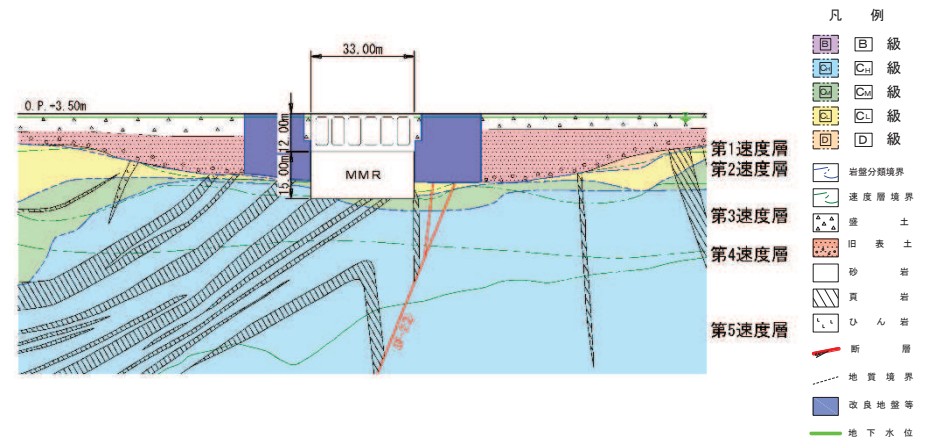
#### 解析手法選定の例

地下水位が構造物底版より十分に低い  
: 全応力解析



軽油タンク室, 軽油タンク室(H)

地盤改良があるものの、旧表土が周囲に存在し土被りが浅く、地下水位が高い構造物  
: 全応力解析及び有効応力解析



取水口

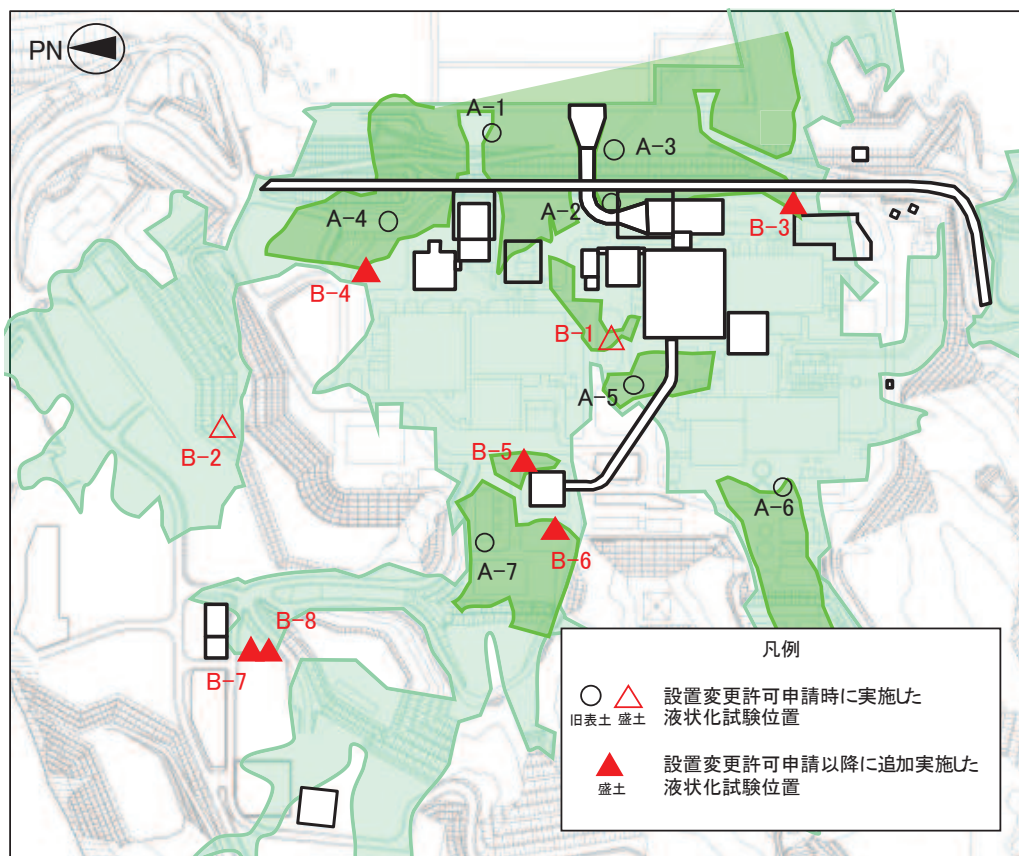
## 【参考】 追加液状化試験を踏まえた液状化評価について(1/6)

---

- 女川原子力発電所の敷地に分布する盛土及び旧表土について、設置変更許可段階において液状化強度試験を実施したうえで、液状化評価を行っている。
- 詳細設計段階において、盛土の液状化強度試験を追加実施したことから、追加試験を含めた試料採取位置の代表性確認結果及び試験結果について説明する。
- また、追加試験の結果を踏まえた、盛土の液状化強度特性(有効応力解析に使用する解析用物性値)の設定結果について説明する。

## 【液状化強度試験箇所】

- 盛土については，設置変更許可段階において，2箇所(B-1, B-2)から試料採取して液状化評価を行っていたが，評価対象施設を網羅し，かつ代表性を確保する観点から，詳細設計段階で6箇所(B-3～B-8)を対象に液状化強度試験を追加実施した。
- なお，旧表土については，設置変更許可段階において，敷地内に残存する範囲から網羅的に試料採取(7箇所：A-1～A-7)して液状化評価を行っている。



液状化強度試験箇所

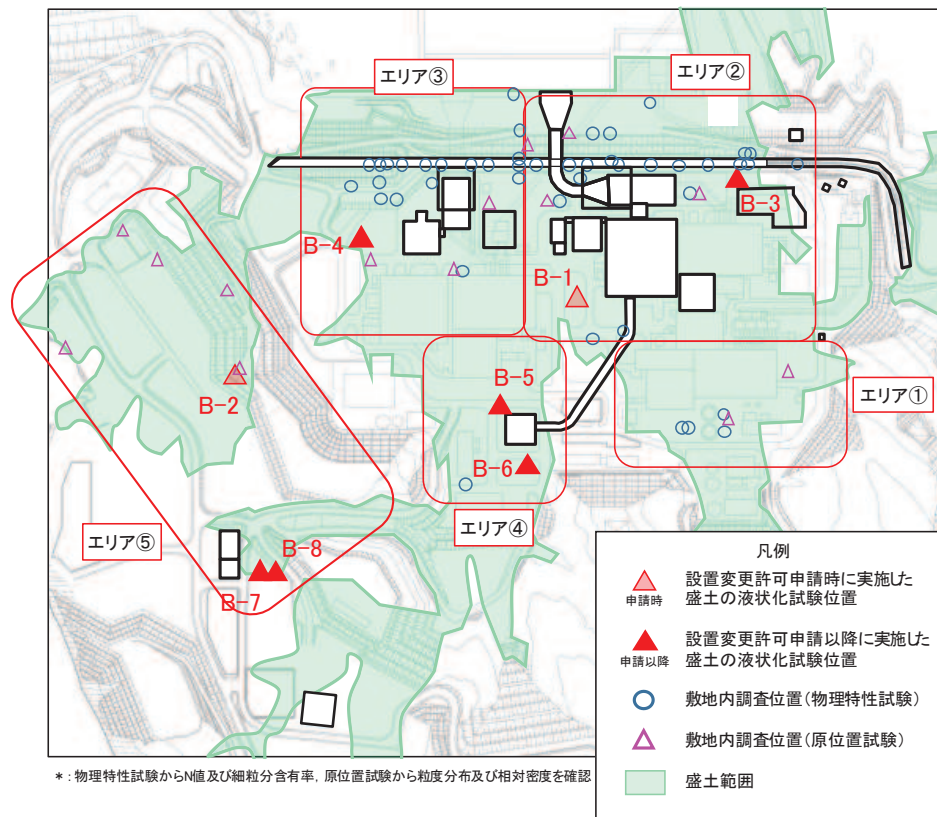
### 【盛土追加試料採取箇所選定方針】

- ① 設計基準対象施設，常設重大事故等対象施設，可搬型重大事故等対処設備保管場所及びアクセスルートがO.P.+14.8m盤及び高台の2エリアに設置されていることを踏まえ，設置変更許可申請時に実施済みの液状化強度試験試料採取位置(B-1, B-2)と合わせて，これらの施設・設備を網羅できるようにそれぞれのエリアから複数の位置を選定する。
- ② 上記の施設・設備が敷地全域に分散して設置されていることを踏まえ，試料採取位置についても代表性の観点から偏りが無いよう分散して選定する。

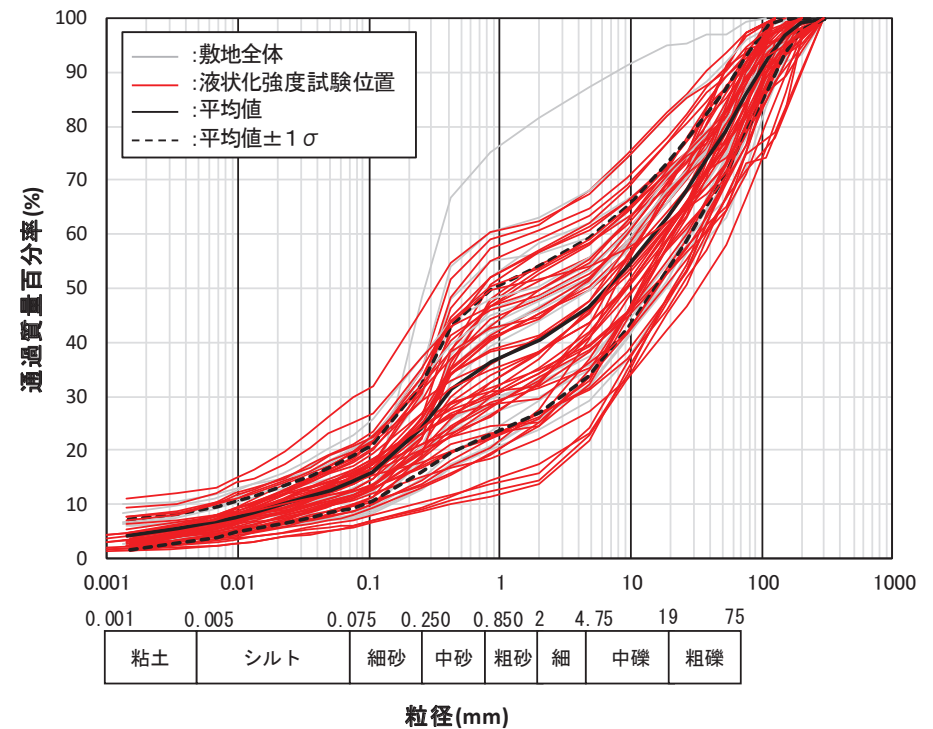
# 【参考】追加液状化試験を踏まえた液状化評価について(3/6)

## 【試料採取位置の代表性確認(盛土)】

- 追加で実施した試験を含めた盛土の液状化強度試験の試料採取位置の代表性を確認するため、盛土の液状化強度試験位置と敷地全体の粒度分布、細粒分含有率、相対密度、N値を比較した。
- 粒度分布については、試験位置と敷地全体で類似しており、敷地全体のばらつきの範囲内にある。



液状化強度試験の試料採取位置

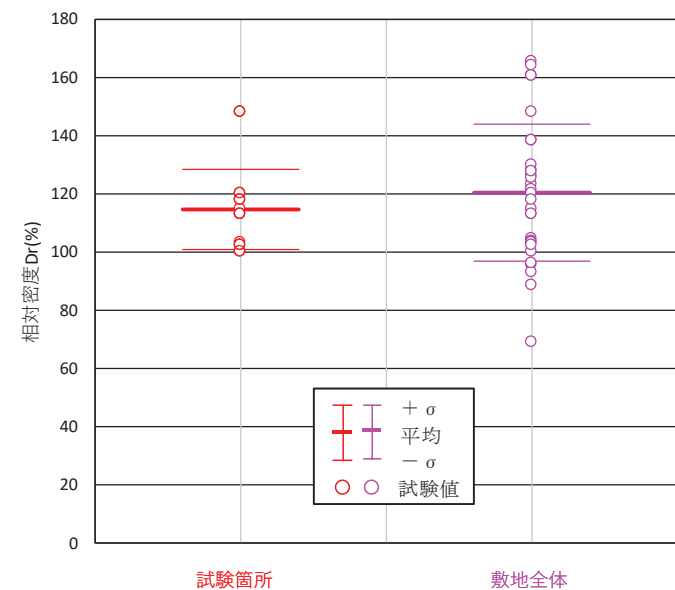
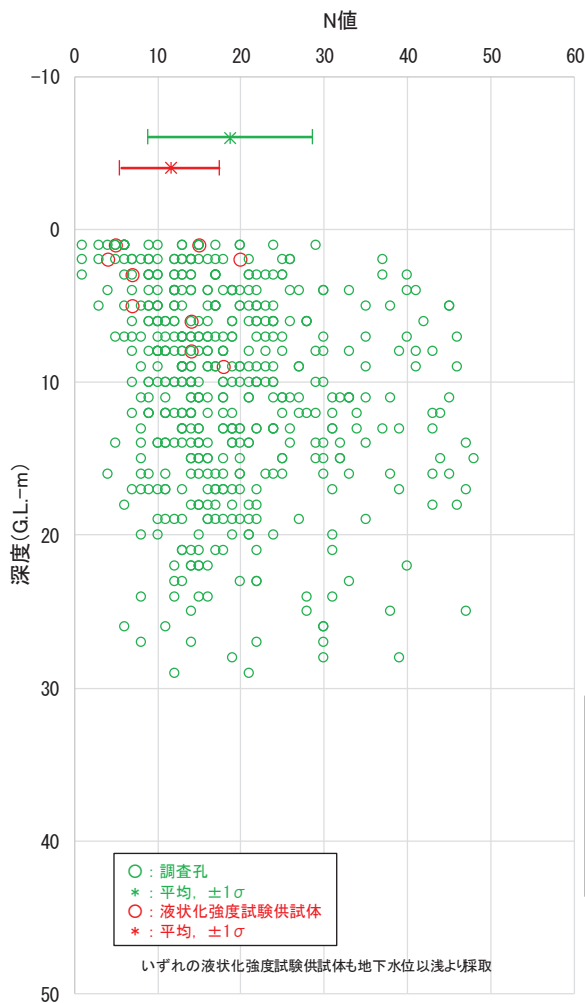
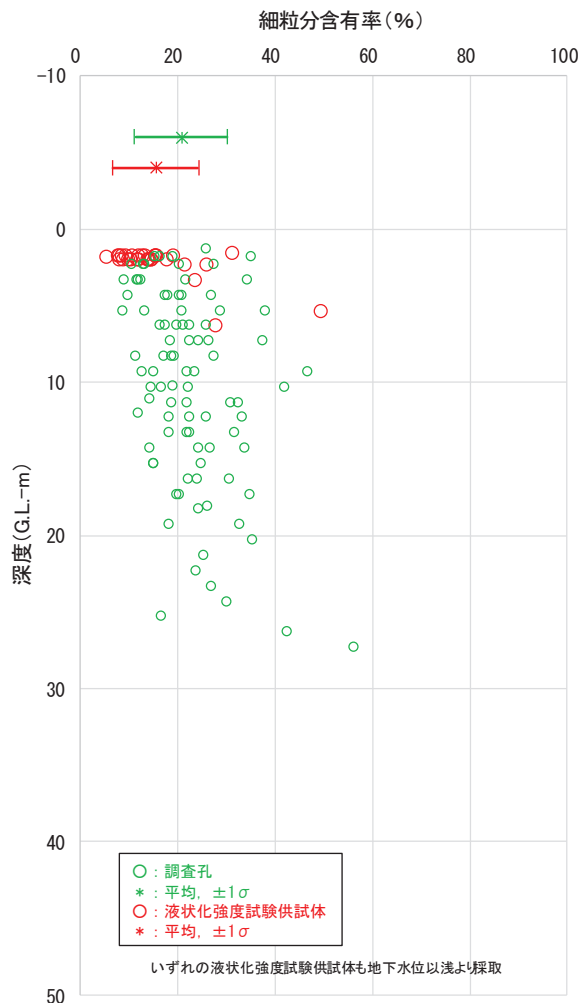


粒度分布の確認結果

# 【参考】 追加液状化試験を踏まえた液状化評価について(4/6)

## 【試料採取位置の代表性確認(盛土)】

- 細粒分含有率については、試験位置が敷地全体よりもやや低い範囲にある。
- 相対密度については、試験位置が敷地全体の平均に近いが又はやや小さい範囲にある。
- N値については、試験位置がおおむね敷地全体の平均以下に分布している。
- これらの結果は、盛土の液状化強度試験位置が敷地全体と同程度あるいは盛土の液状化強度試験位置の方がやや液状化しやすい傾向があることを示している。



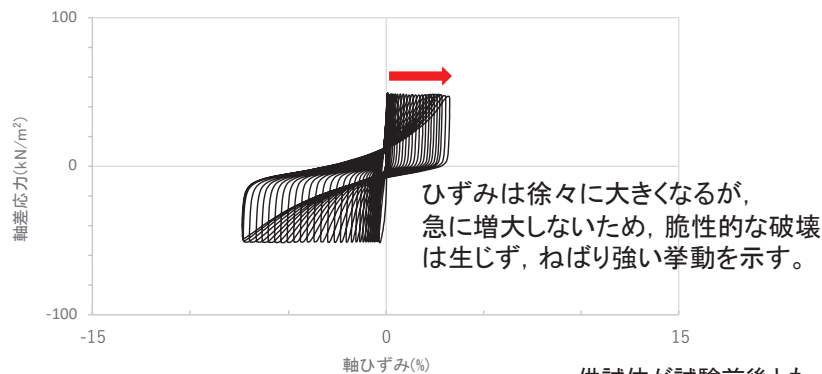
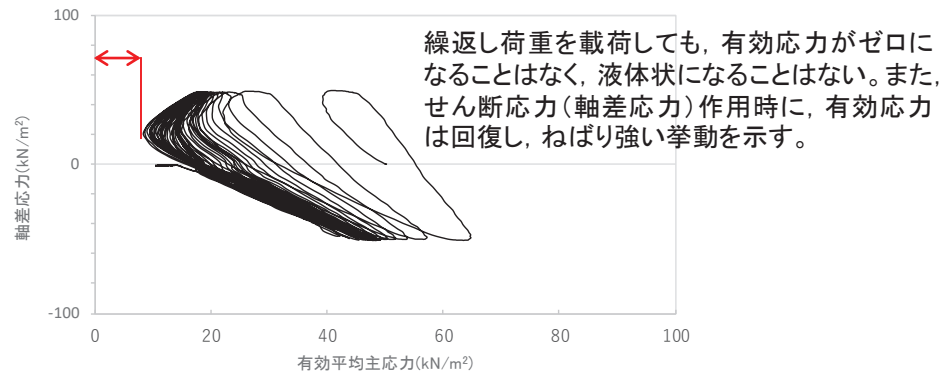
以上のことから、盛土の液状化強度試験位置は、追加で実施した試験結果を含めても敷地内の盛土に対して代表性及び網羅性を有していることを確認した。

細粒分含有率, N値, 相対密度の確認結果

# 【参考】追加液状化試験を踏まえた液状化評価について(5/6)

## 【追加液状化試験結果(盛土)】

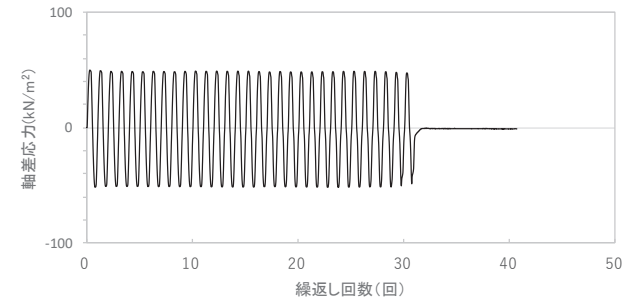
- 盛土の追加液状化試験結果の例を示す(B-3試料, 供試体No.3)。
- 設置変更許可段階で実施した液状化試験結果と同様に, 繰返し軟化を示す結果を確認した。



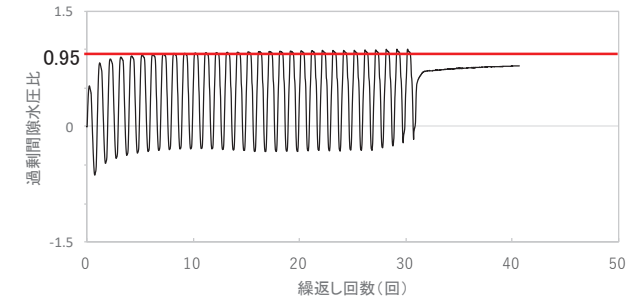
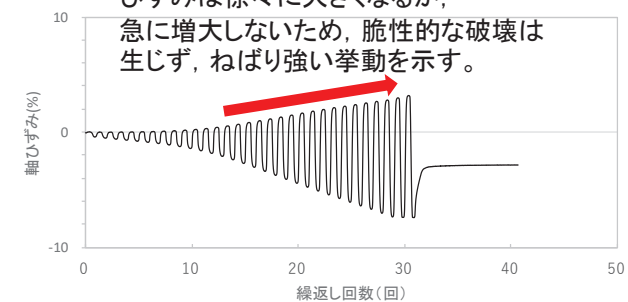
供試体が試験前後とも自立するほどの強度がある。



試験後の供試体



ひずみは徐々に大きくなるが, 急に増大しないため, 脆性的な破壊は生じず, ねばり強い挙動を示す。



過剰間隙水圧比は95%を超過するものの, 頭打ちとなり, 100%にはならない。

せん断応力作用時には, 正のダイレイタンスー効果により, 過剰間隙水圧は低下し(さらに負になる。), 有効応力が回復する。

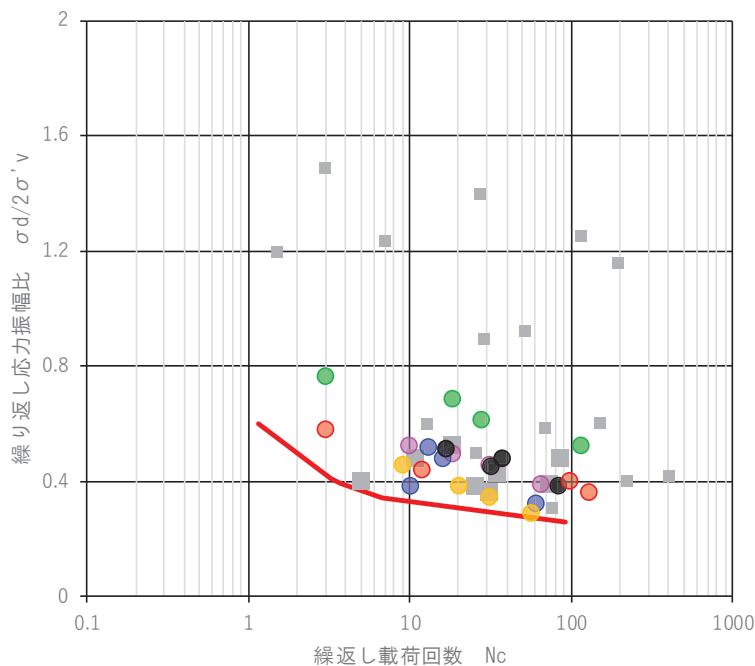
液状化強度試験の結果

試験結果		液状化の判断
間隙水圧が上昇・蓄積する(95%)	○	繰返し軟化
有効応力がゼロまで低下する	×	
液体状となり流動する(ひずみ急増)	×	
ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復)	○	

# 【参考】 追加液状化試験を踏まえた液状化評価について(6/6)

## 【液状化強度特性の設定】

- 追加の液状化強度試験を含めた盛土の液状化強度特性について、保守的に下限値となるように設定した。
- その結果、詳細設計段階に追加実施したB-3～B-8の試験結果を考慮しても、設置変更許可申請段階において、B-1及びB-2の下限値から設定した液状化強度特性が変わらないことを確認した。
- なお、盛土は建設時に岩盤を掘削した岩砕を用いて、最大粒径300mmで調整し施工したものであるのに対し、液状化強度試験はφ100～300mmで実施し、液状化強度特性(下限値)はφ300mmでの試験結果から設定しているため、最大粒径を考慮したものである。



詳細設計段階に  
実施した液状化試験

(盛土の液状化強度特性)

液状化パラメータ

	$\phi_P$ ( $^{\circ}$ )	W1	p1	p2	c1	s1
盛土	28	14	1.0	0.6	2.8	0.005