

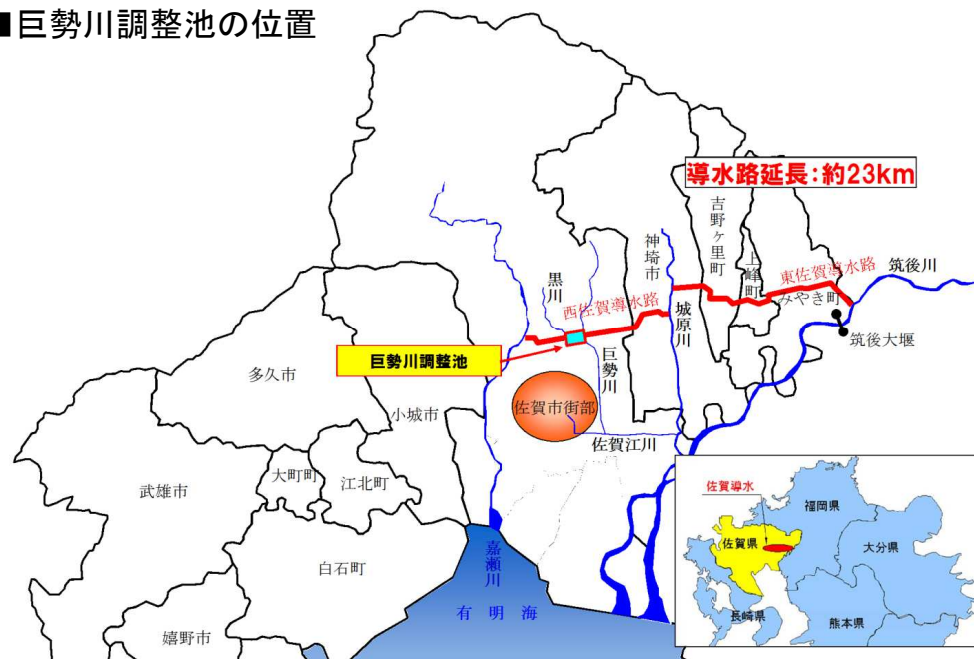
巨勢川調整池における東名遺跡の保存対策について

平成29年11月15日

武雄河川事務所 施設管理課

巨勢川調整池・東名遺跡の概要

■巨勢川調整池の位置



■巨勢川調整池と東名遺跡の位置関係



●巨勢川調整池の概要

目的: 洪水調節 (H21.4月運用開始)

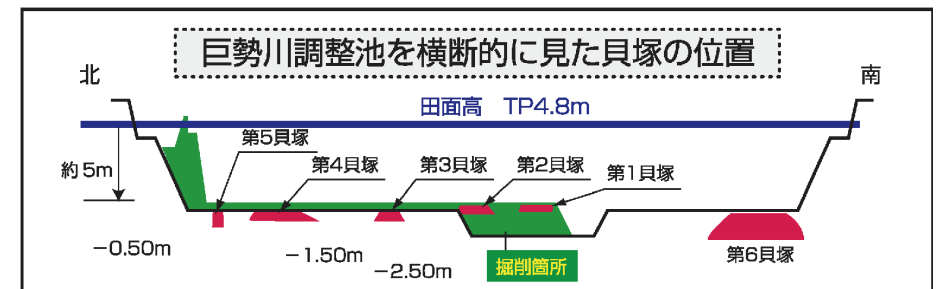
西佐賀導水路の金立地区にある治水施設

面積: 約55ha 洪水調節容量: 220万 m^3

洪水調節量: 200 m^3/s → 70 m^3/s

(ピーク流量130 m^3/s 調節)

主な施設: 水門, ポンプ場



●東名遺跡とは？

- ・巨勢川調整池の掘削工事時に発見
- ・標高3m付近にて、縄文時代後期の集落跡や墓地が発見され、平成5～8年度にかけて発掘調査を実施
- ・標高0.5m地点にて、縄文時代早期(約8000年前)の貝塚が発見され、平成16年9月より本格調査
- ・貝塚は6箇所発見され、貝層の面積は1,700 m^2 に及ぶと想定

東名遺跡の概要

●主な出土遺物

木製品(網かご)



木製品(櫛)<国内最古>



木製品(把手付皿)



土器



貝製品



石器



遺跡発掘時の様子



●遺跡周辺の環境

- ・遺跡は、縄文海進により水没し、厚い海成粘土層で包含され、長期間良好な環境下(還元状態)にあった
- ・掘削工事の進捗とともに、遺跡周辺の土壌は雨水や大気に曝され、酸化が進行する環境となった。
 - ⇒粘土層(蓮池粘土層)中に存在する黄鉄鉱から、硫酸が生成されて遺物の劣化を促進する要因となる
 - ⇒平成21年から調整池運用が決定しており、膨大な数の遺物を記録保存することは困難であった

第1～2貝塚は記録保存、第3～6貝塚は現地保存(保存対策施工)

平成28年10月、東名遺跡は国史跡の指定を受ける。



遺跡が形成・残存したメカニズム

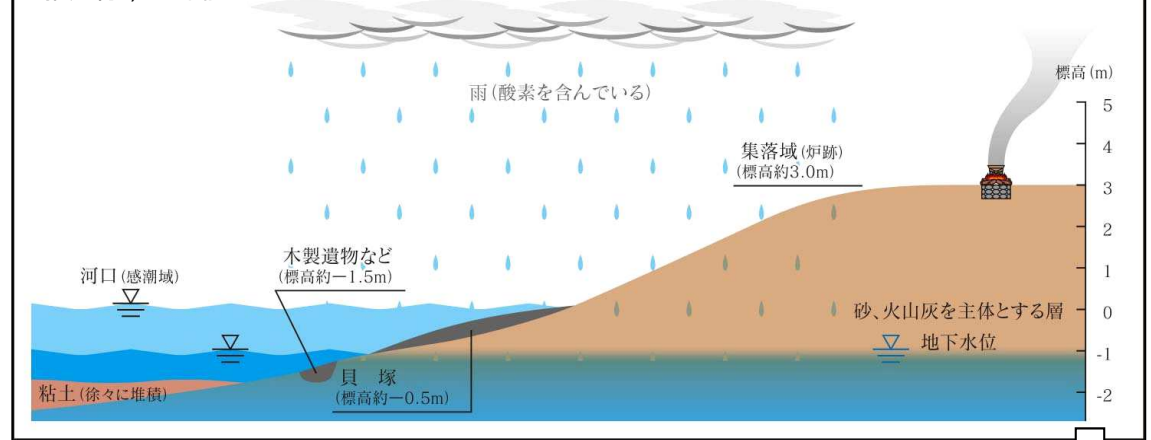
貝塚が発見された場所は約8,000年前は河口付近であったと推定されています。
河口付近の海底で河川の流水で運ばれてきた粘土が徐々に堆積（河川の埋積作用）していったと推定されています。
縄文海進では標高5.0m付近まで海水面が上昇していたと推定されています。
それと同時に河口付近では粘土が徐々に堆積していき、現在の地盤が形成されていきました。
当該地区においては、急速な海面上昇により、遺跡部分が粘土層中に深く埋没し、嫌気的な環境（還元状態）が創出されたことから、遺跡が原形をとどめていたと推定されます。

上記より、調整池で発見された貝塚は現在の地表面から約5m、集落や墓地（人が暮らしていた場所）は約2m掘削した所から発見されました。

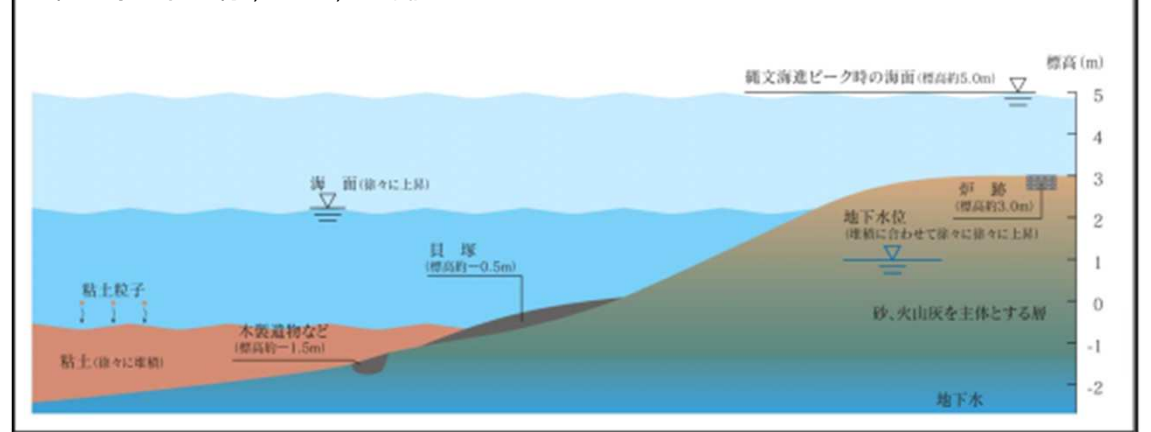
発見された遺跡は、掘削により、風雨にさらされ、酸化状態となりました。



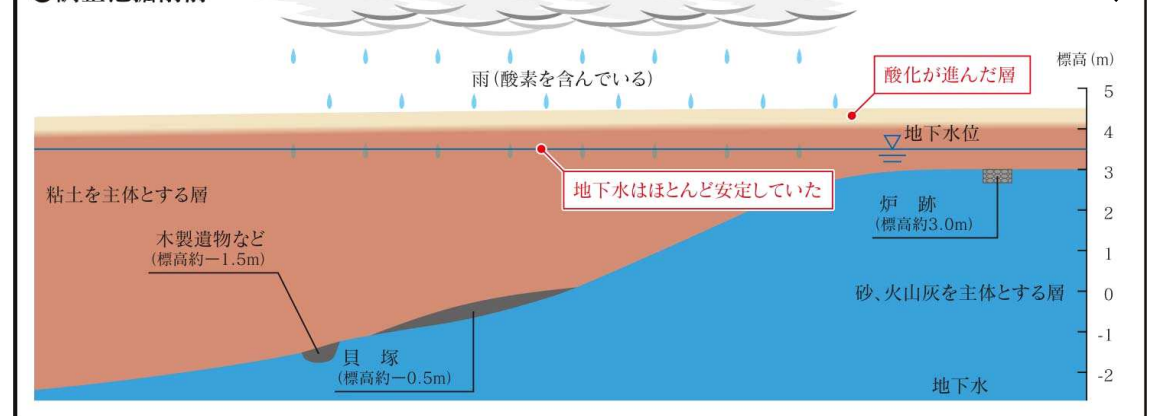
●推定約8,000年前



●縄文海進時代（約6,500～6,000年前）



●調整池掘削前

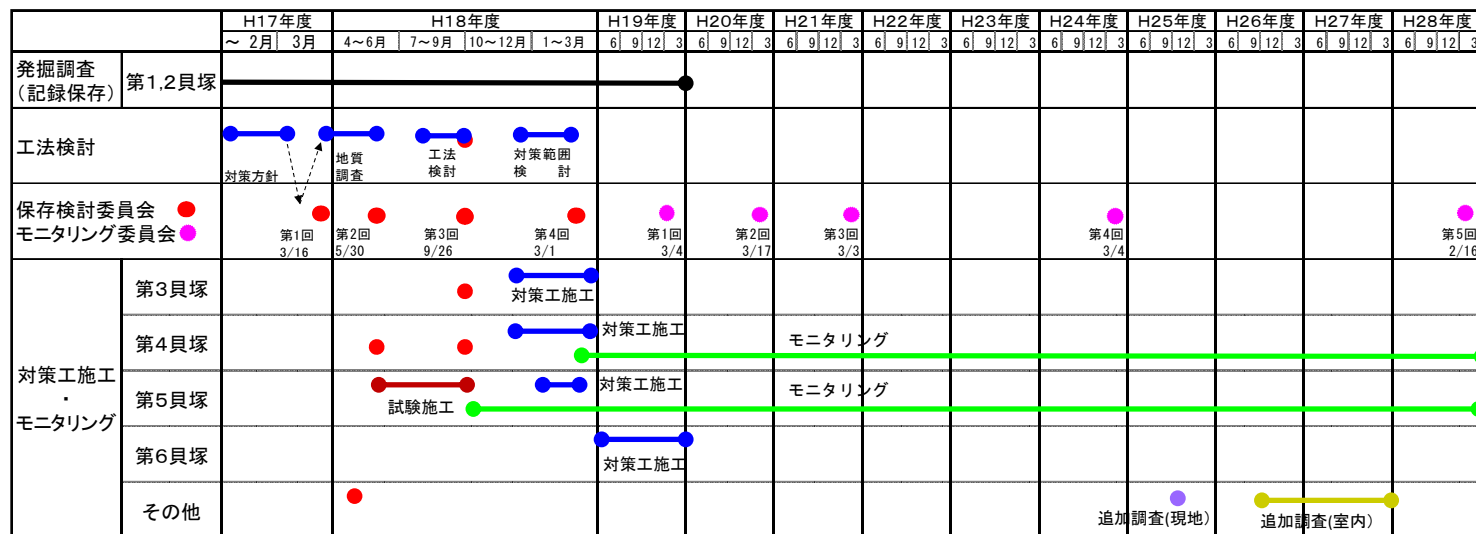


東名遺跡の委員会及びモニタリングの経過状況と実施内容

巨勢川調整池の治水機能の確保を前提に遺跡の現状保存に最も適した方法を検討するため、**東名遺跡保存委員会**を設置。（平成17～18年度）
保存対策実施後、効果検証のための**東名遺跡モニタリング委員会**を設置。（平成18～28年度）

■これまでの委員会及び業務の概要

	年度	委員会開催日	委員会名称	議事 または 実施内容
保存対策検討	平成17年度	平成18年3月16日	第1回 東名遺跡保存検討委員会	東名遺跡保存環境及び対策案について 地下水観測孔設置、水質分析、土壌分析、水位・水質簡易測定
	平成18年度	平成18年5月30日	第2回 東名遺跡保存検討委員会	調査結果及び保存対策案について 土壌分析、室内配合試験、試験盛土（第5貝塚）、キャッピング効果確認試験、溶存酸素消費試験
		平成18年9月26日	第3回 東名遺跡保存検討委員会	試験施工結果及び現地対策工施工状況について キャッピング本施工（第3～第6貝塚）、土壌環境モニタリング、地下水環境モニタリング
		平成19年3月1日	第4回 東名遺跡保存検討委員会	試験施工結果及び現地対策工施工状況について 試験施工モニタリング、対策工施工状況、土壌環境モニタリング、地下水環境モニタリング
モニタリング	平成19年度	平成20年3月4日	第1回 東名遺跡モニタリング委員会	平成19年度 モニタリング結果の評価（土壌環境モニタリング、地下水環境モニタリング、目視点検）
	平成20年度	平成21年3月17日	第2回 東名遺跡モニタリング委員会	平成20年度 モニタリング結果の評価（土壌環境モニタリング、地下水環境モニタリング、目視点検）
	平成21年度	平成22年3月3日	第3回 東名遺跡モニタリング委員会	平成21年度 モニタリング結果の評価（土壌環境モニタリング、地下水環境モニタリング、目視点検）
	平成22年度	—	資料送付	平成22年度 モニタリング結果の評価（土壌環境モニタリング、地下水環境モニタリング、目視点検）
	平成23年度	—	資料送付	平成23年度 モニタリング結果の評価（土壌環境モニタリング、地下水環境モニタリング、目視点検）
	平成24年度	平成25年3月4日	第4回 東名遺跡モニタリング委員会	平成24年度 モニタリング結果の評価（土壌環境モニタリング、地下水環境モニタリング、目視点検）
	平成25年度	—	—	平成25年度 モニタリング結果の評価（土壌環境モニタリング、地下水環境モニタリング、目視点検） 追加調査（現地実験）の実施——トレンチ調査、観測孔による再現実験
	平成26年度	—	—	平成26年度 モニタリング結果の評価（土壌環境モニタリング、地下水環境モニタリング、目視点検） 追加調査（室内実験）の実施——大型コア試料による再現実験
	平成27年度	—	—	平成27年度 モニタリング結果の評価（土壌環境モニタリング、地下水環境モニタリング、目視点検） 平成26年度の室内実験を継続実施
	平成28年度	平成29年2月16日	第5回 東名遺跡モニタリング委員会	平成28年度 モニタリング結果の評価（土壌環境モニタリング、地下水環境モニタリング、目視点検） 追加調査のとりまとめ、モニタリング結果の総括、今後のモニタリング計画



■ 保存対策決定の経緯

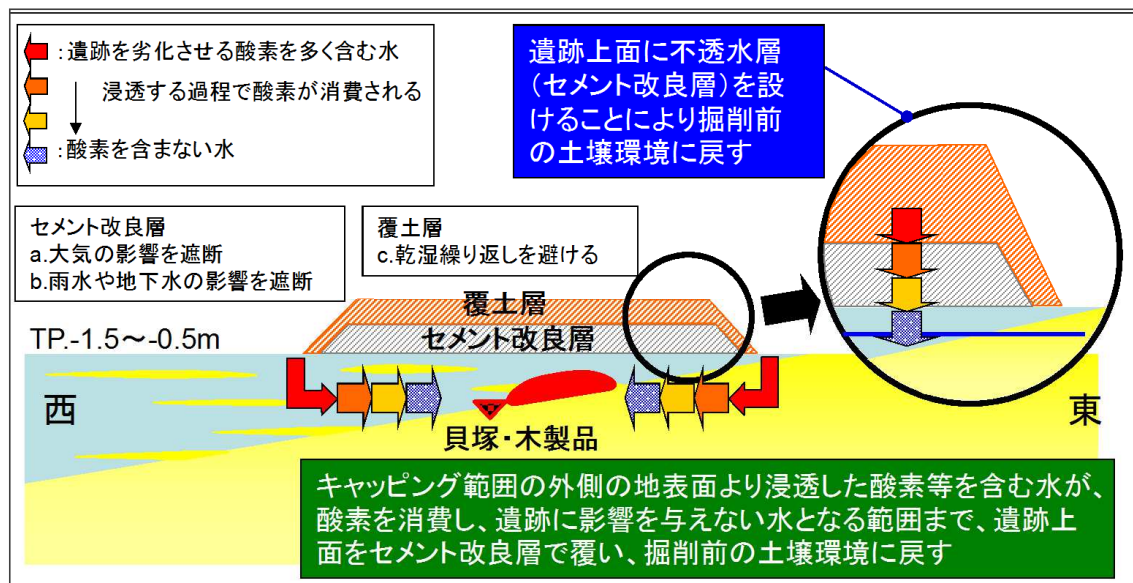
- ・東名遺跡保存検討委員会(第1回～第4回／平成18年3月～19年3月)で決定
- ・治水事業(洪水調節機能)と遺跡保存の共存が必須条件
- ・調整池は、規則により水位を管理しているが、浚渫等の調整池の維持管理上の問題や干ばつ等の気象条件による 水位低下は不可避である。
- ・後世に向けて、掘削前に近い良好な環境を維持することが求められる

■ 保存対策の考え方

- ・大気による酸素の影響を出来るだけ遮断する
- ・遺跡を劣化させる恐れのある溶存酸素等を含む雨水や地下水等の出入りを抑制する
- ・土壌の乾湿繰り返しを出来るだけ避ける

東名遺跡の保存対策の概要

キャッピング概念図



■キャッピング材料の性能と構造

①求められる性能: 遮水性

- ・廃棄物最終処分場整備の計画・設計要領(平成13年)に準拠
- ・50~100年の耐久性を想定

厚さ50cm以上かつ透水係数が $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 以下の連続した層

②構造: 粘性土(10cm) + セメント改良層(40cm) + 覆土層(100cm)

■現地試験による対策仕様の検討

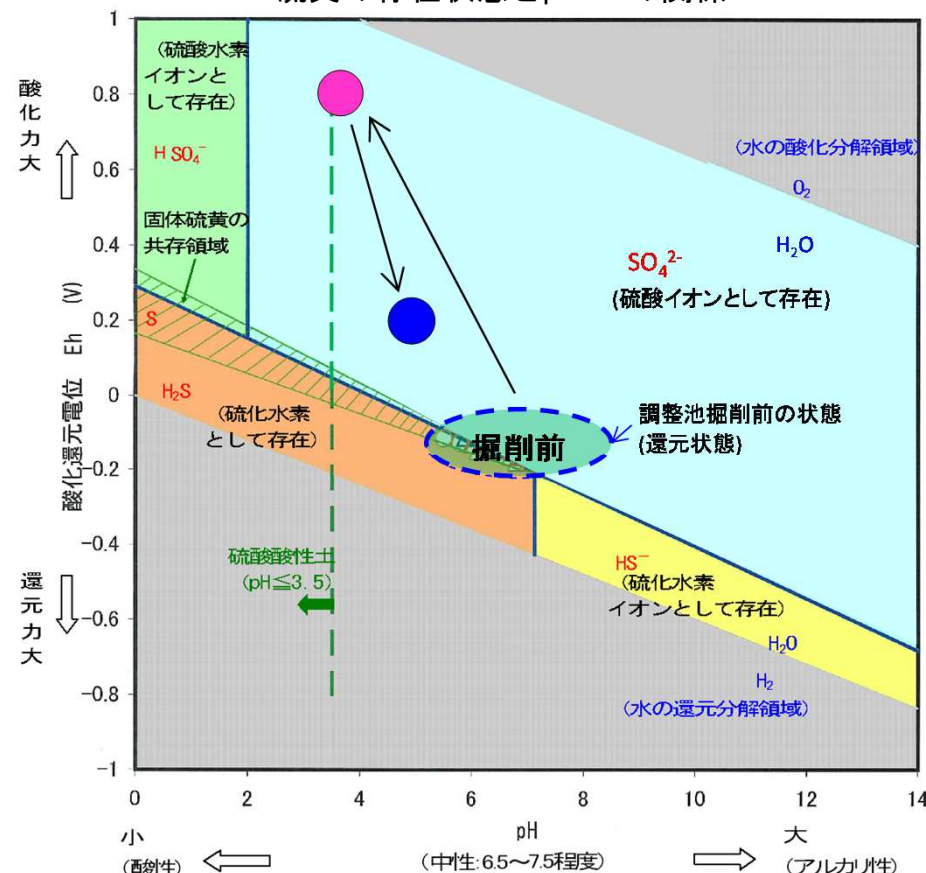
(1)キャッピング効果確認試験

- ・キャッピング材料の遮水性や施工仕様の把握
- ・キャッピング下の土壌環境変化(還元環境への移行状況をモニタリング)等の把握 ⇒ **キャッピング仕様の検討**

(2)溶存酸素消費試験

- ・地下水が地中を通過する際の溶存酸素の変化をモニタリングし、低酸素状態になるまでの流動距離(酸素消費距離)を把握 ⇒ **キャッピング範囲の検討**

硫黄の存在状態とpH-Ehの関係



- <凡例>
 調整池掘削前の状態
 キャッピング施工前
 キャッピング施工後

●試験施工における土壌環境の変化について

上図に示すように、キャッピング施工前は左上のピンクの丸にあった土壌がキャッピング7か月後には青丸方向へ推移し、調整池掘削前の状態(還元状態)に戻りつつあることが確認された。

本施工後は、計器モニタリングにより、遺跡の保存環境を確認することとなった。

東名遺跡の保存対策工法の検討

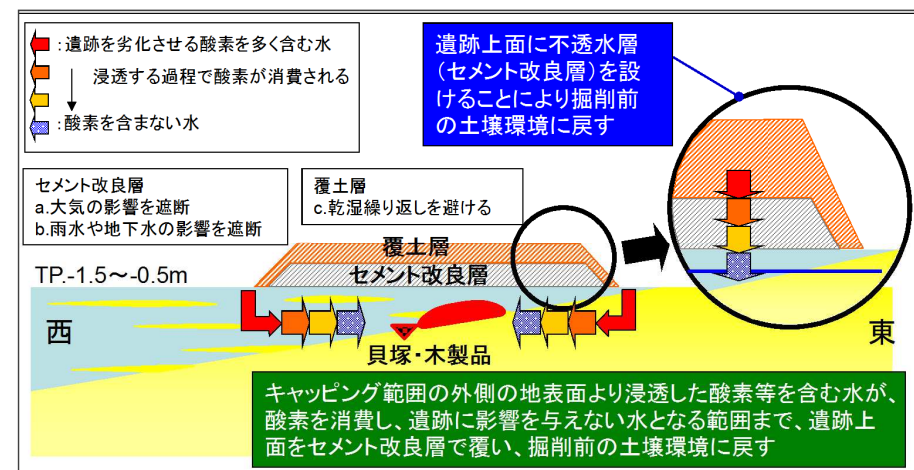
巨勢川調整池の治水運用により、平常時及び洪水時には調整池の水位が変化することを考慮すると、遺跡の現地保存の対策としては、大きく二つのポイントが挙げられる。

○遺跡を劣化させる要因となる大気や雨水など、上方からの遺跡の劣化原因を防止するための対策

⇒キャッピング

○溶存酸素等を含む水（地表水や雨水など）がキャッピング周辺の調整池底版から浸透し、遺跡の劣化を防止するための対策

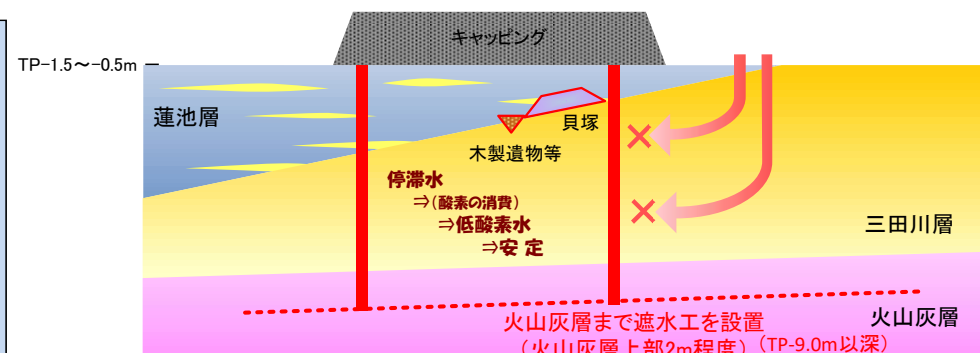
⇒キャッピング範囲の拡大もしくは遮水壁等の対策



キャッピング概念図

遮水壁の検討 ※蓮池層（粘土主体の地層）、三田川層（砂主体の地層）

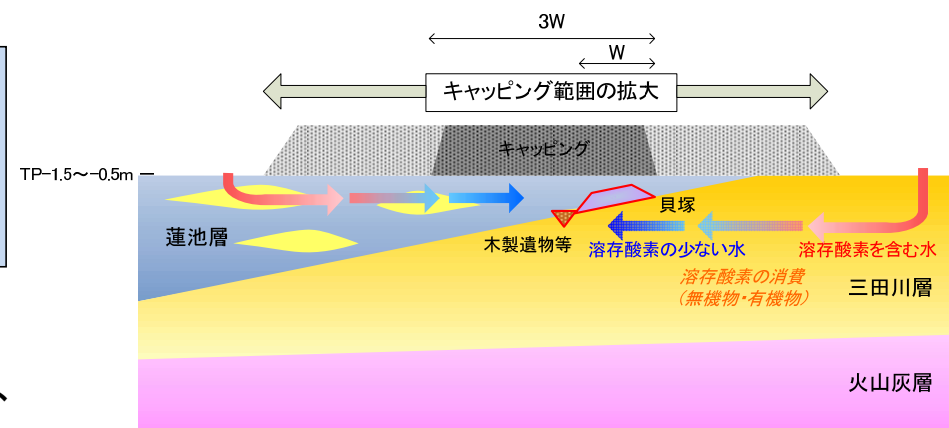
遺跡周辺へ側方からの地下水流入を完全に遮断するためには、遺跡包含層である蓮池層より下層にある三田川層まで遮水壁を設置する必要があるが、溶存酸素を多く含む地下水が遮水壁の下部（三田川層内）を浸透し、遺跡周辺へ流入する恐れがあるため、遺跡に影響を及ぼす地下水の流れを遮断するためには、三田川層より下層の火山灰層まで遮水壁を施工する必要がある。



遮水壁案 概念図

キャッピング範囲拡大の検討

遺跡周辺へ側方からの地下水流入に対して、溶存酸素が消費されて、低酸素状態となるための十分な距離が必要である。



キャッピング範囲拡大案 概念図

施工期間、施工費用、施工による遺跡への影響（損傷等）を考慮し、キャッピングの範囲拡大の方法を採用した。

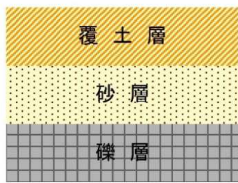
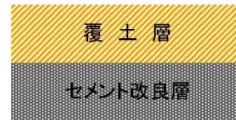
東名遺跡の保存対策工法の仕様

キャッピングの材料と構造

比較検討(施工性、遮水性、耐久性、経済性)の結果、覆土層とセメント改良土層によるものを採用した。

また、キャッピングの遮水性能・耐久性を保つことや、廃棄物最終処分場整備の計画・設計要領の「遮水工が不必要な地盤条件」を基に、厚さが50cm以上かつ透水係数が $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 以下であることとした。

キャッピングの材料と構造の比較表

分 類	土質系キャッピング工法				シート系キャッピング工法	
工 法	粘土層工法	毛管バリア工法	安定処理土工法		土質遮水工法	遮水シート工法
断面構造						
材 質	粘土	砂+礫	現地発生土+石灰	現地発生土+セメント	ベントナイトシート	遮水シート
概 要	透水性の低い粘土によるキャッピング	毛管力の働きによって形成される遮水層による工法	雨水浸透防止と石灰の中和反応を有した工法	セメント改良を行い、雨水浸透及び洪水等による浸食を防止する	ベントナイト等を用いた土質遮水工法	人工素材を用いた雨水遮断工法
施工性	△	△	○	○	○	△
遮水性	○	△	○	○	△	○
耐久性	△	○	△	○	△	△
経済性	◎	○	○	○	△	△
問題点	①含水比が高く施工性が悪い。 ②表面に亀裂が生じ遮水性能が低下する。 ③酸化すると覆土自体から硫酸を発生する可能性がある。 ④乾裂防止のため、覆土が必要である。	①完全な遮水構造ではないため、水没の可能性がある当現場では、目詰り等により機能が不十分となる可能性が高い。 ②洪水時に流失する可能性があるため、覆土が必要である。	①表面に乾裂が生じ雨水が浸透する可能性がある。 ②酸性水が発生しても石灰で中和するが、石灰が消費尽くされると効果がない。 ③乾裂防止のため、覆土が必要である。	①表面に乾裂が生じ雨水が浸透する可能性があるため、覆土が必要である。	①電解質イオンを多く含む浸出水に対して膨潤が抑制され、遮水性が低下する。	①シート単独では、破損の恐れが高い(自己修復する材料もある)。 ②洪水時に水没した場合に浮き上がって流出する恐れがあるため、覆土が必要となる。
総合評価	△	△	○	◎	△	△

現地試験による保存効果の確認

現地保存対策の効果や施工上の問題点などを把握するため、現地試験を実施しました。
第5貝塚の部分において、実際にキャッピング施工を実施しました。

①キャッピング効果確認試験

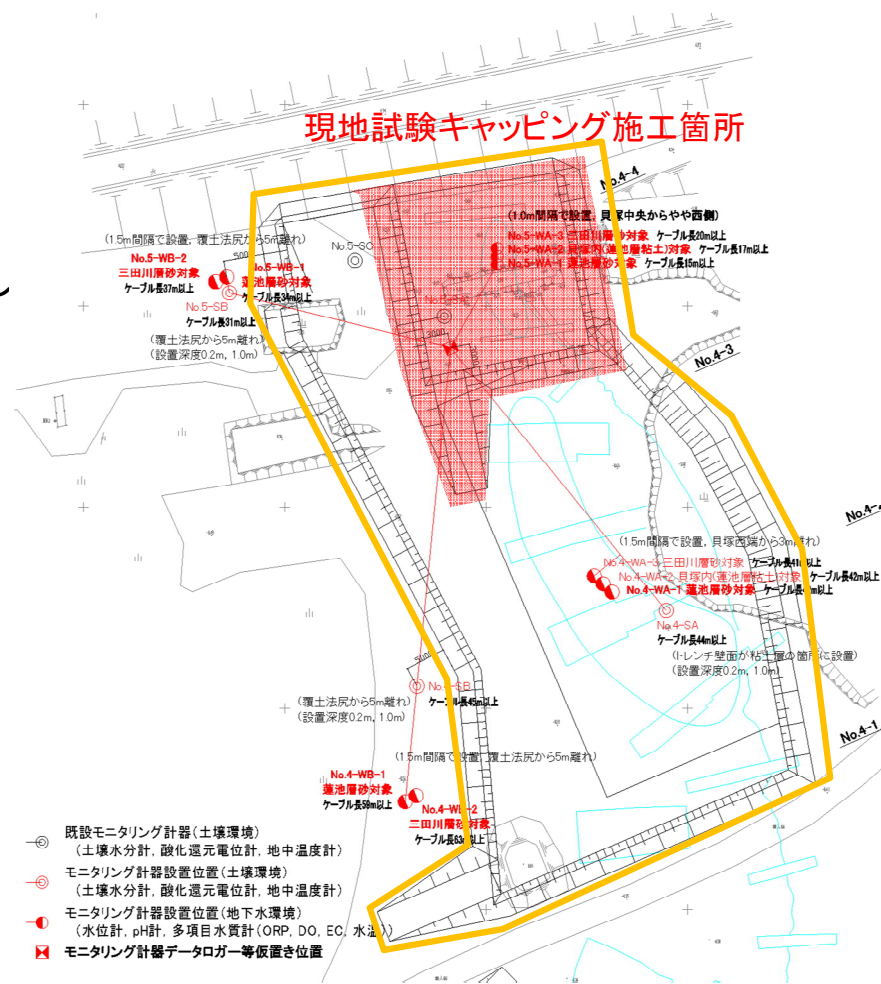
内容:キャッピング造成・・・室内配合試験、試験盛土(現地予備試験)、キャッピング施工(第5貝塚のみ)
モニタリング・・・土壌環境測定、土壌分析

②溶存酸素消費試験

内容:予備調査・・・サウンディング調査、トレーサー試験
溶存酸素消費試験・・・地下水環境測定

※溶存酸素消費試験

地下水が地中を通過する際の溶存酸素の変化をモニタリングし
低酸素状態になるまでの流動距離(酸素消費距離)
を把握するもの。この結果を基にキャッピング幅を検討する。



巨勢川調整池平面図(第3, 4, 5貝塚付近)

キャッピング効果確認試験

①室内配合試験

キャッピング材料の仕様を検討するため、現場発生土の土質、セメント添加量等の条件について数パターンの配合量で実施。

①室内配合試験

②現地予備試験(試験盛土)

室内配合試験結果をもとに、現場で試験施工を行い、要求される効果や問題点を確認し、本施工の仕様を決定するため実施。

②現地予備試験 (試験盛土)

③キャッピング造成(第5貝塚のみ)

試験盛土を経た後、実際に遺跡発掘調査時に掘削したトレンチの埋め戻しを行い、キャッピング層・覆土層の造成を実施。
(結果、この仕様が本施工となる)

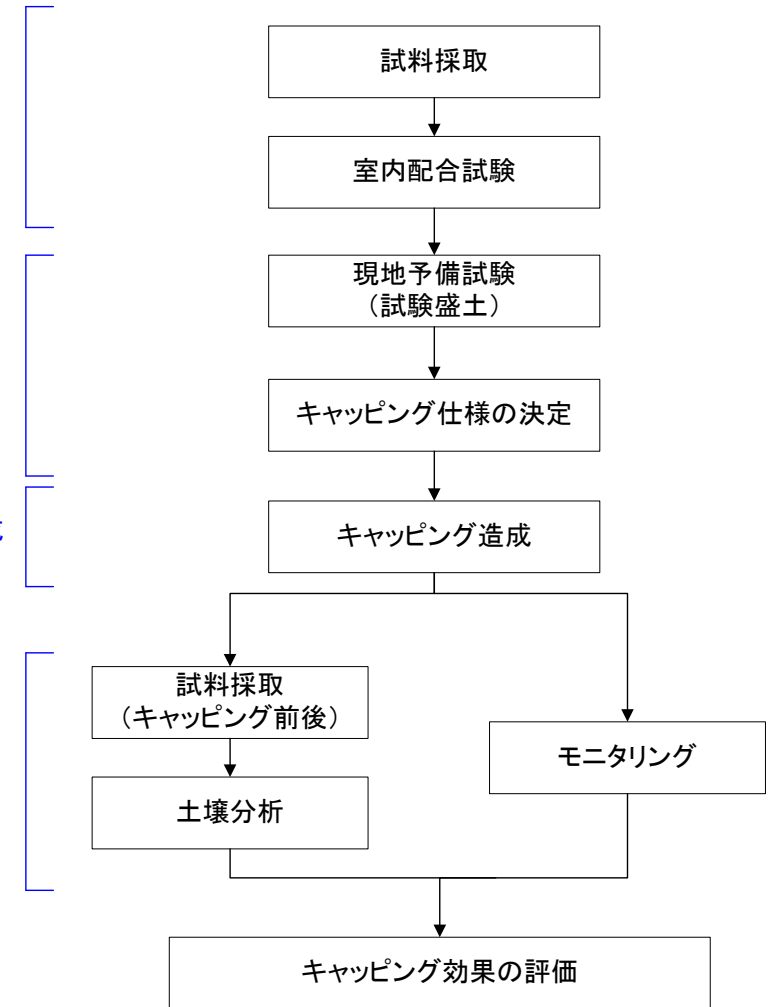
③キャッピング造成

④土壌環境測定

キャッピングの範囲内と範囲外に、測定機器(酸化還元電位計、土壌水分計、地中温度計)を埋設し、キャッピング施工前後における土壌環境のモニタリングを実施した。

④土壌環境測定

また、キャッピング施工前後の土壌環境の変化(ph、硫酸態硫黄等の計器によるモニタリングが困難なもの)を把握するため、室内分析による土壌分析を実施した。



キャッピング効果確認の流れ

キャッピング盛土の仕様

【構造】 粘性土敷設(10cm 厚) + セメント改良層(40cm 厚) + 覆土層(100cm 厚)

【粘性土の塗り立ておよび敷設】

☆土質材料 … 蓮池層粘性土（地下水面下の還元状態にある粘性土を使用。貝塚露出箇所周辺やトレンチ壁面等に敷設）

☆敷設機種 … 法面バケット付きバックホウ（トレンチ壁面は人力施工）

☆粘性土敷設上面には、土木シート（PP シート）を敷設（トラフィカビリティの確保）

【セメント改良層】

・天端面積 $20 \times 20\text{m} = 400\text{m}^2$ 、法面勾配 1 : 2.0

計画高 TP-0.10m（層厚 0.4m）、土量 210m^3

☆土質混合比 … 蓮池層粘性土：三田川層砂質土 = 1 : 1

☆固化材種類および添加量 … 高炉セメント B 種 $30\text{kg}/\text{m}^3$

☆混合機種 … バックホウ（1 次混合）+ 自走式土質改良機（2 次混合）

☆混合速度 … $40\text{m}^3/\text{h}$ 程度を標準とする（自走式土質改良機）

☆締め固め機種 … 小型湿地ブルドーザ（1 次転圧）、16t 級程度湿地ブルドーザ（2 次転圧）

【覆土層】 キャッピング層の乾燥収縮亀裂等の抑制

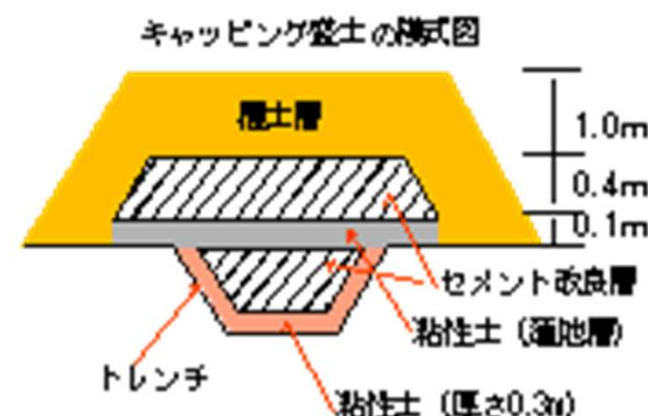
・天端面積 $20 \times 24\text{m}$ （北側は仮堤防にすりつけ）= 480m^2 、法面勾配 1 : 2.0

計画高 TP+0.90m（層厚 1.0m）、土量 694m^3 （坂路含む）

☆土質混合比 … 既往石灰処理粘性土：三田川層砂質土 = 1 : 1

☆混合機種 … バックホウ（1 次混合）+ 自走式土質改良機（2 次混合）

☆締め固め機種 … タイヤローラ



トレンチ埋戻し

トレンチの埋戻しは、蓮池層粘土及び安定処理土を用い、遺跡に損傷を与えないように人力作業にて実施した。
トレンチ壁面および底面には安定処理土からのアルカリ浸出水の影響を抑制するため、粘性土を30cm厚で塗り立てた。



①トレンチ埋戻し状況(粘性土塗立て)



②トレンチ埋戻し状況(安定処理土投入)

セメント改良層 配合試験結果

セメント改良層の配合においては、室内試験結果を基に右の図のような配合・サンプルで試験盛土を実施。

透水係数とコスト面から、セメント添加量30kg/m³が(No.5～8)選定され、さらに乾湿繰り返しによる亀裂発生を考慮し、砂質土混合比1:1(No.7,8)が選定される。(粘性土が多い配合はひび割れが生じやすい)
施工性を考慮し、混合速度40のNo.8が最終的に選定された。

試験盛土番号	固化材添加量 (高炉Bセメント) (kg/m ³)	砂質土混合比 (体積比)	混合速度 (m ³ /h)	透水係数 k(cm/sec)				コーン指数 qc(kN/m ²)
				供試体1	供試体2	供試体3	平均	
No.1	50	0.5	20	5.95E-05	4.35E-06	2.47E-06	2.21E-05	1059
No.2			40	7.33E-06	1.85E-06	2.65E-06	3.94E-06	522
No.3		1.0	20	3.19E-05	5.83E-05	1.66E-05	3.56E-05	829
No.4			40	2.94E-05	1.79E-05	1.33E-05	2.02E-05	783
No.5	30	0.5	32	2.66E-07	2.27E-07	1.76E-07	2.23E-07	282
No.6			40	3.61E-07	2.10E-07	6.26E-07	3.99E-07	218
No.7		1.0	32	4.21E-07	4.16E-07	1.85E-07	3.41E-07	205
No.8			40	2.83E-07	2.53E-07	5.14E-07	3.50E-07	194

セメント改良層の施工は事前に実施した予備試験(試験盛土)結果を参考に、目標透水係数($k \leq 1.0E^{-6}$ cm/s)が得られた仕様で実施した。目標透水係数は確保できるものの、目標強度 $qc \geq 400$ kN/m²に達しないため、締固めには接地圧が小さな16t級の湿地ブルドーザーを使用し、セメント改良層を2層に分けて入念に締固めた。なお、セメント改良層の最下端には、アルカリ浸出水の影響の緩和や、より高い水密性を確保するため、10cm厚程度で蓮池層粘性土を敷設した。なお、粘性土敷設は散水を行う事により乾燥亀裂の発生に配慮しながら隙間無く塗り立てた。

セメント改良層



①蓮池層粘土敷設 (10cm)



②土木シート敷設



③セメント改良層 1次混合



⑥セメント改良層 養生



⑤セメント改良層 仮転圧



④セメント改良層 2次混合



⑦セメント改良層 締固め



⑧セメント改良層 完成状況

覆土層

覆土層は、調整池施工時の発生土の石灰処理粘性土と三田川層砂質土とを混合し、粒度調整を行い、亀裂が生じにくい土質に改良し、築堤工に準拠し施工した。

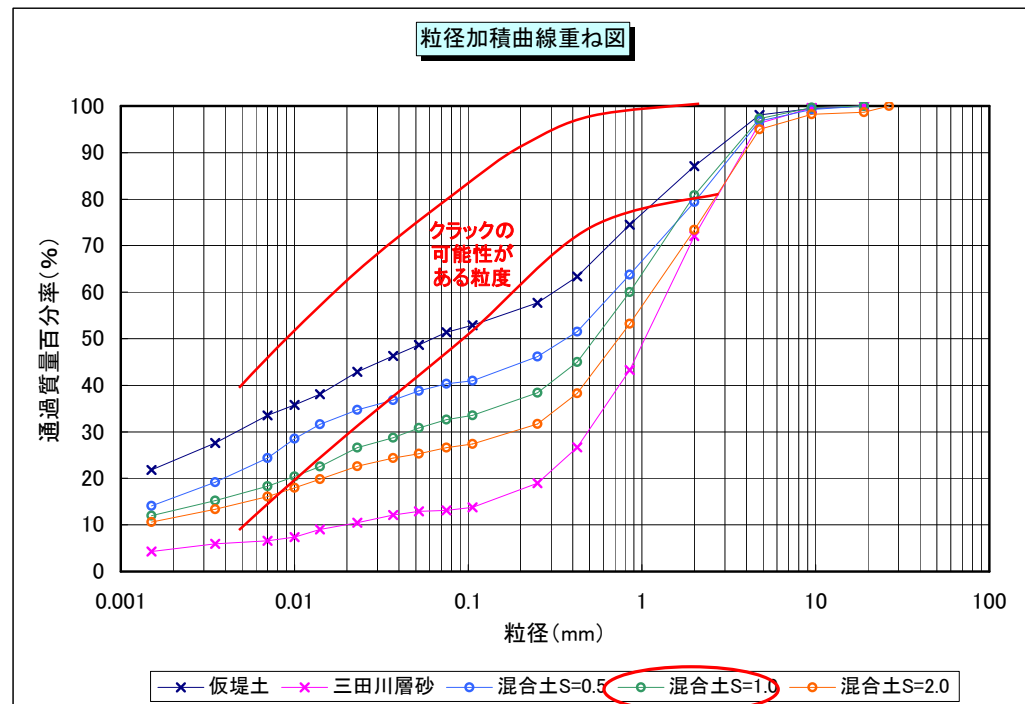
混合土の配合は、砂質土混合比を変化させた事前の土質試験を参考に「石灰処理粘性土：砂質土＝1：1」を採用した。

【覆土層として望ましい土質】（河川土工マニュアルより）

- ・ 粒度分布が良い土 ... 締固めが十分に行うことができ、粗粒分は粒子のかみ合わせにより強度を発揮し、細粒分は透水性を小さくするのに必要
- ・ 細粒分(0.075mm以下の粒子)が15%以上 ... 難透水性の確保
- ・ シルト分があまり多くない土 ... シルト分が多い土は、降雨による浸食や浸透水による法面崩壊などを生じやすい
- ・ 細粒分があまり多くない土(50%以下) ... 細粒分50%以上の土は、乾燥時に亀裂が入る可能性が高い
- ・ 極端な酸性を呈していない土

覆土層 配合試験結果

試料名		仮堤土	三田川層 砂質土	混合土(砂質土混合比)		
				S=0.5	S=1.0	S=2.0
一般	土粒子の密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.509	2.614	2.518	2.551	2.568
	自然含水比 $W_n(\%)$	39.4	14.8	28.2	24.7	19.9
粒度 組成	礫分(2~75mm) %	12.9	27.9	20.6	19.2	26.6
	砂分(0.075~2mm) %	35.7	59.0	39.1	48.2	46.8
	シルト分(0.005~0.075mm) %	20.6	6.9	18.9	15.9	11.9
	粘土分(0.005mm未満) %	30.8	6.2	21.4	16.7	14.7
	細粒分含有率(シルト+粘土) %	51.4	13.1	40.3	32.6	26.6
	均等係数 U_c	---	67.9	---	---	1053
	曲率係数 U_c	---	8.29	---	---	24.7
コンシ ステン シー	20%粒径 $D_{20}(\text{mm})$	0.001未満	0.286	0.0041	0.0092	0.0144
	液性限界 $W_L(\%)$	75.7	NP	68.0	61.7	51.4
	塑性限界 $W_p(\%)$	38.9	NP	36.8	35.4	30.3
	塑性指数 I_p	36.8	NP	31.2	26.3	21.1
土質 分類	土質分類名	礫混じり 砂質シルト	細粒分混 じり礫質砂	シルト分質 礫質砂	シルト分質 礫質砂	シルト分質 礫質砂
	分類記号	(MHS-G)	(SG-F)	(SMG)	(SMG)	(SMG)
	pH	8.5	3.4	8.0	6.7	6.8



覆土層



①覆土層 1次混合



②覆土層 2次混合



④覆土層 締固め



③覆土層 敷均し



⑤キャッピング完成状況

土壌環境測定

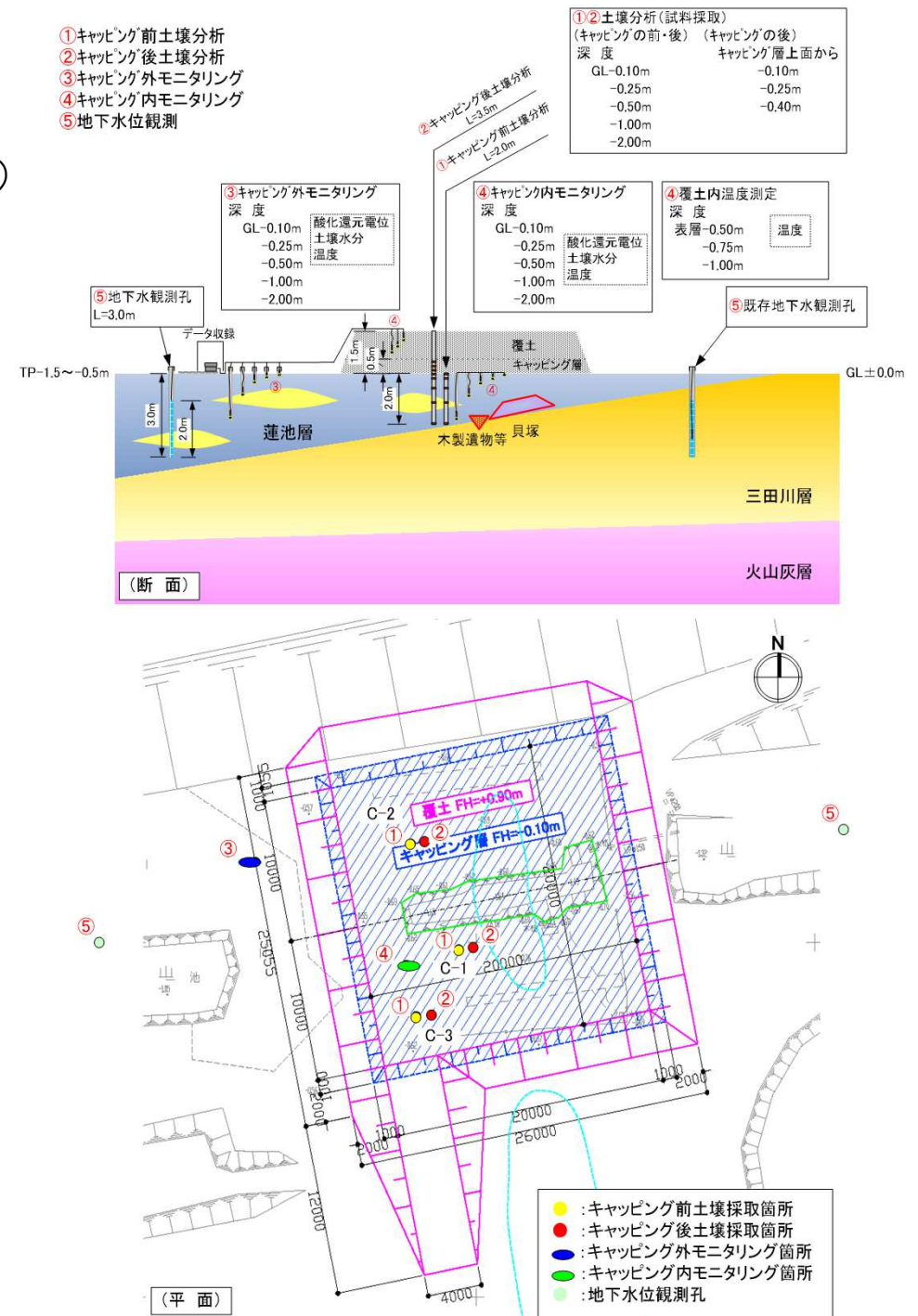
キャッピング試験施工後、その効果や土壌環境の変動状況を把握するため、測定計器を設置し、キャッピング試験施工後、約7ヶ月間、週1回の土壌環境測定を行った。

(比較できるように、キャッピングの内側と外側に観測地点を設置した。)

また、計器では測定できない項目においては、キャッピング前後でボーリングにより試料採取し、室内分析を行った。

土壌環境・地下水位 測定項目

項目	対 象 (時 期)	深 度 (GL-m)	分析(測定)項目	備 考
土壌環境測定	土 壌 分 析	①蓮池層 (キャッピング施工前)	0.10m 0.25m	pH (H ₂ O, H ₂ O ₂) 酸化還元電位
		②セメント改良層 下位の蓮池層 (キャッピング施工後)	0.50m 1.00m 2.00m	水溶性成分 (硫酸塩; H ₂ O, H ₂ O ₂) 硫黄含有量 (全硫黄、硫酸態硫黄)
		層上面から		
		②セメント改良層 (キャッピング施工後)	0.10m 0.25m 0.40m	カルシウム含有量 有機炭素含有量
	モ ニ タ リ ン グ	③キャッピング範囲外 (キャッピング施工前後)	0.10m 0.25m	酸化還元電位
		④キャッピング範囲内 (キャッピング施工前後)	0.50m 1.00m 2.00m	土壌水分 地中温度
		④覆土層 (キャッピング施工後)	表層から 0.50m 0.75m 1.00m	酸化還元電位計 土壌水分計 地中温度計
地下水位観測	⑤蓮池層砂質土 (キャッピング施工前後)			・自記水位計
	⑤三田川層砂質土 (キャッピング施工前後)			



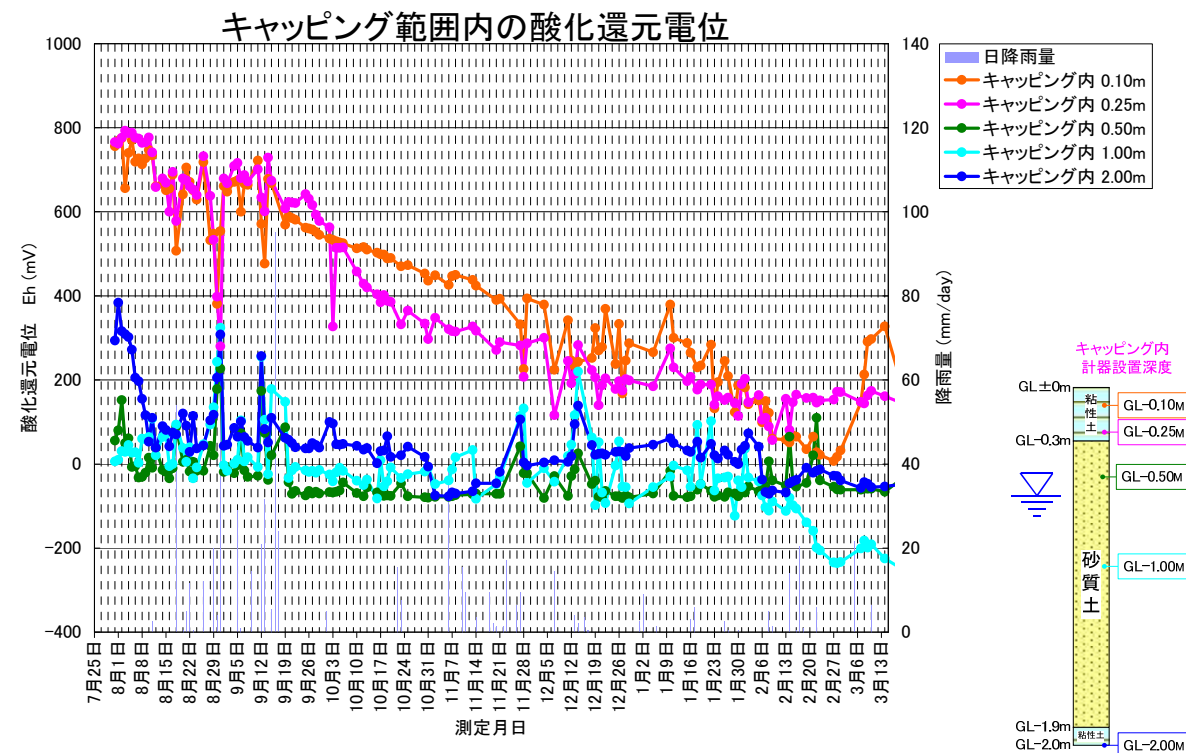
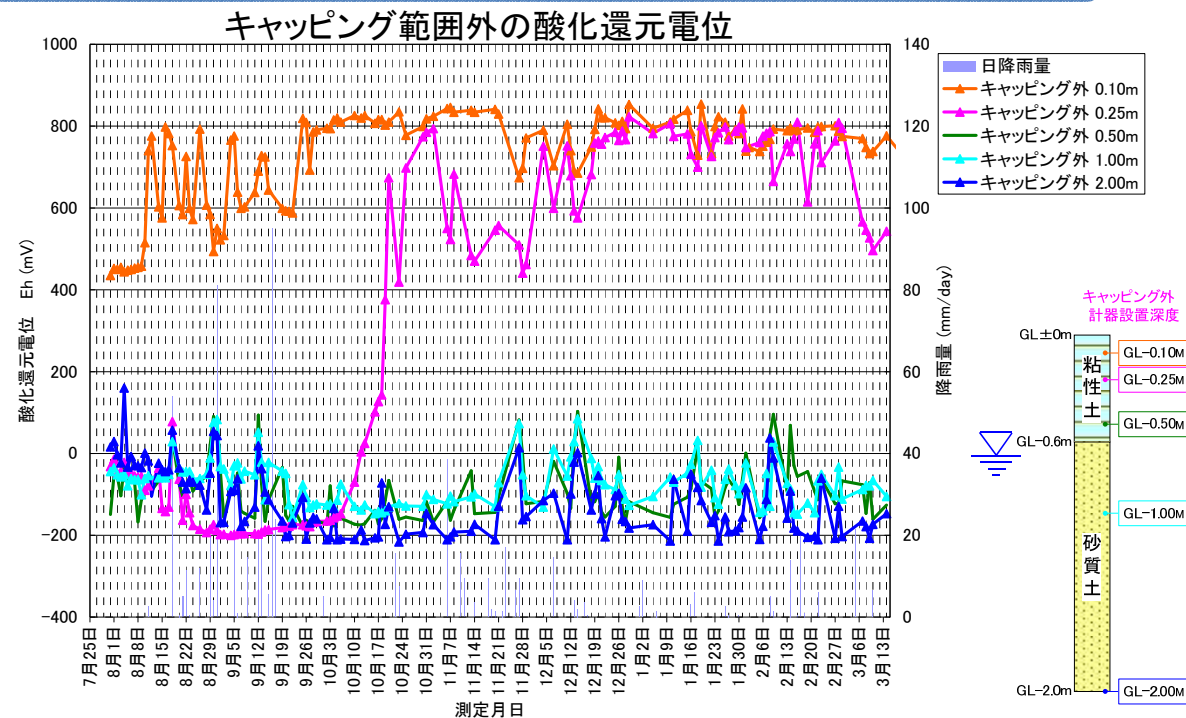
土壌環境・地下水位 測定概要図

キャッピング範囲外と範囲内の酸化還元電位モニタリング結果

- ・キャッピング範囲内の浅い深度(0.1m、0.25m)の値は、約7ヶ月のモニタリング期間を通じて低下し続けており、還元状態に戻りつつあった。
- ・キャッピング範囲外・範囲内とも、深い深度の値は大きな値を示しておらず、変動も小さい。
- ・キャッピング範囲外の値はほぼ一定であった。
(深度0.25mにおいては、調整池内工事(水路埋め戻し)の影響によるもの)

※試験施工のキャッピングは8/4から施工し9/4に完成。

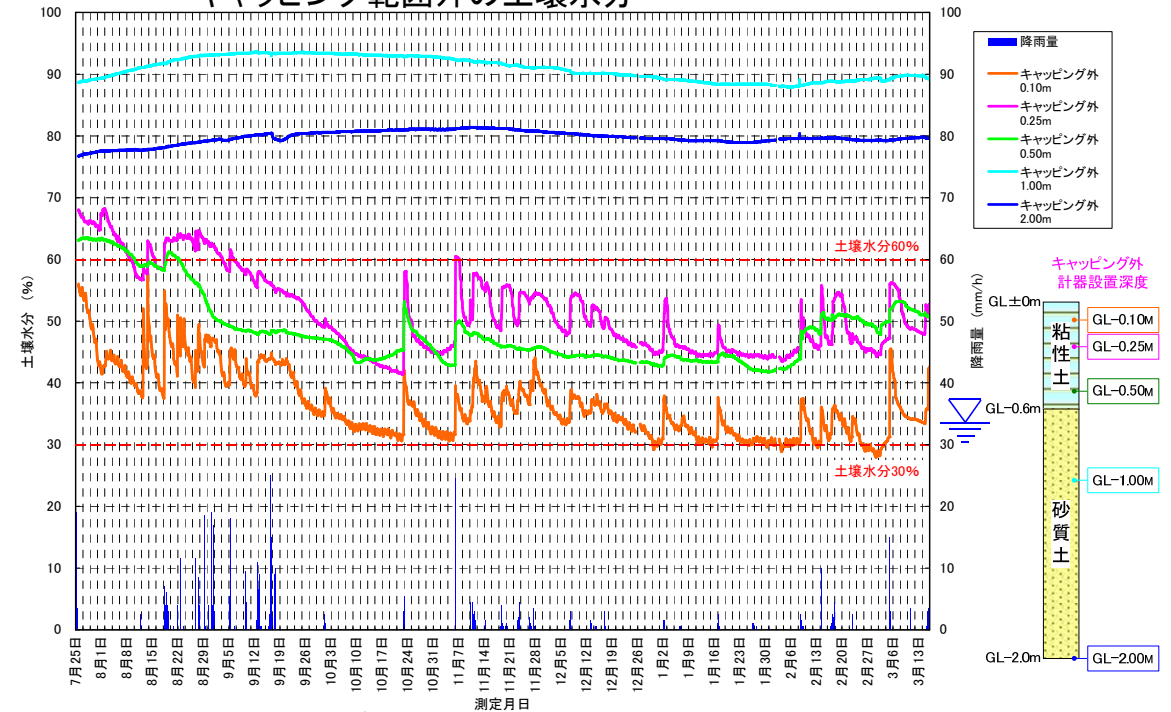
※キャッピング範囲外の箇所において、3/3からキャッピング本施工を実施。



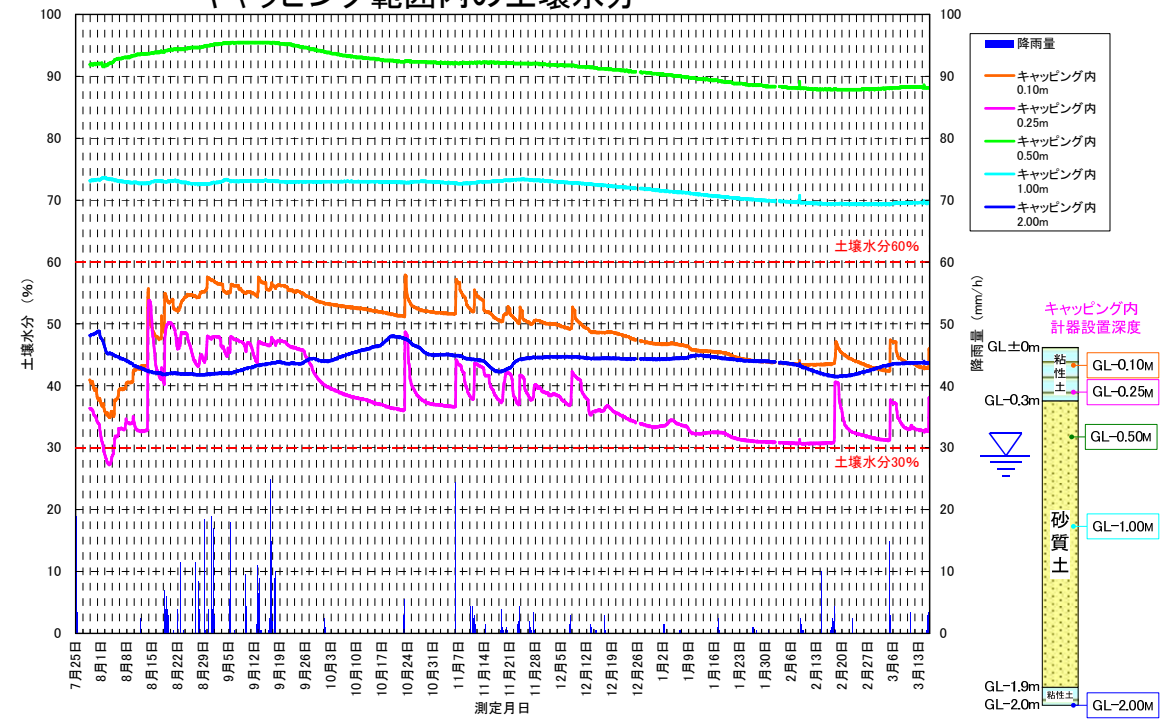
キャッピング範囲外と範囲内の 土壌水分モニタリング結果

- ・キャッピング範囲内の値は、範囲外の値と比べると日変動が小さい。
- ・キャッピング範囲外と範囲内ともに、浅い深度(0.1m、0.25m)の値は、降雨の影響により変動している。
- ・土壌水分の値は30%~60%で変動しており、上昇傾向は認められない。

キャッピング範囲外の土壌水分



キャッピング範囲内の土壌水分



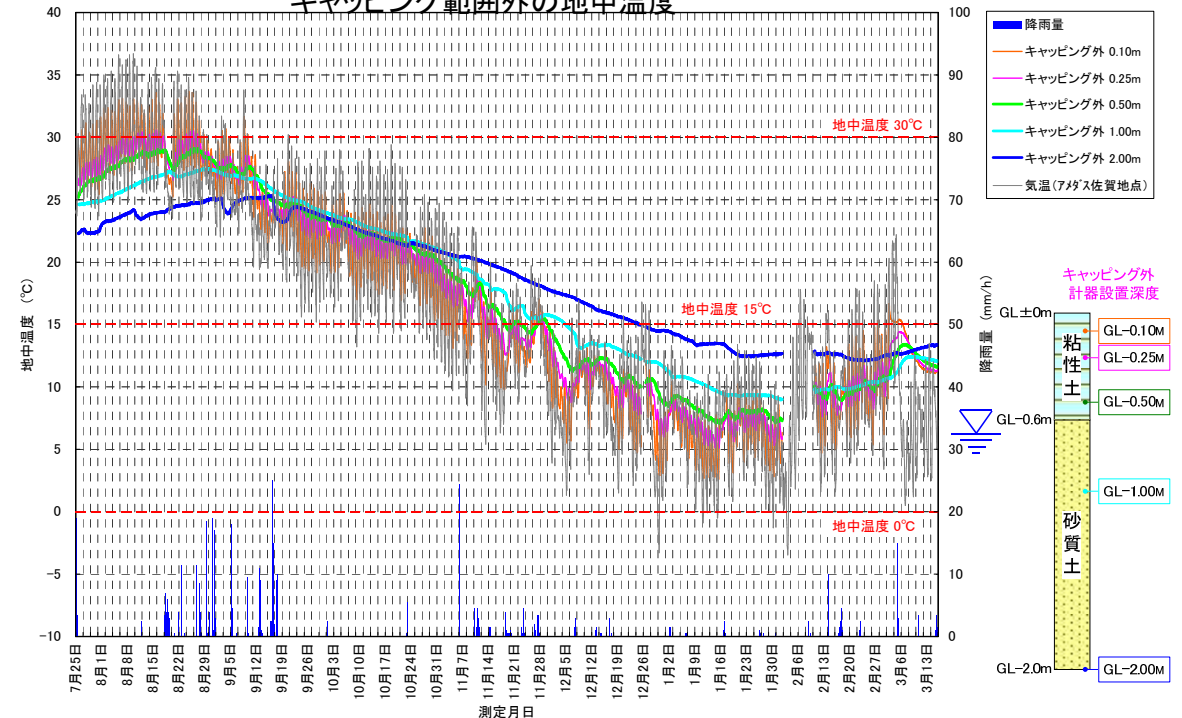
※試験施工のキャッピングは8/4から施工し9/4に完成。

※キャッピング範囲外の箇所において、3/3からキャッピング本施工を実施。

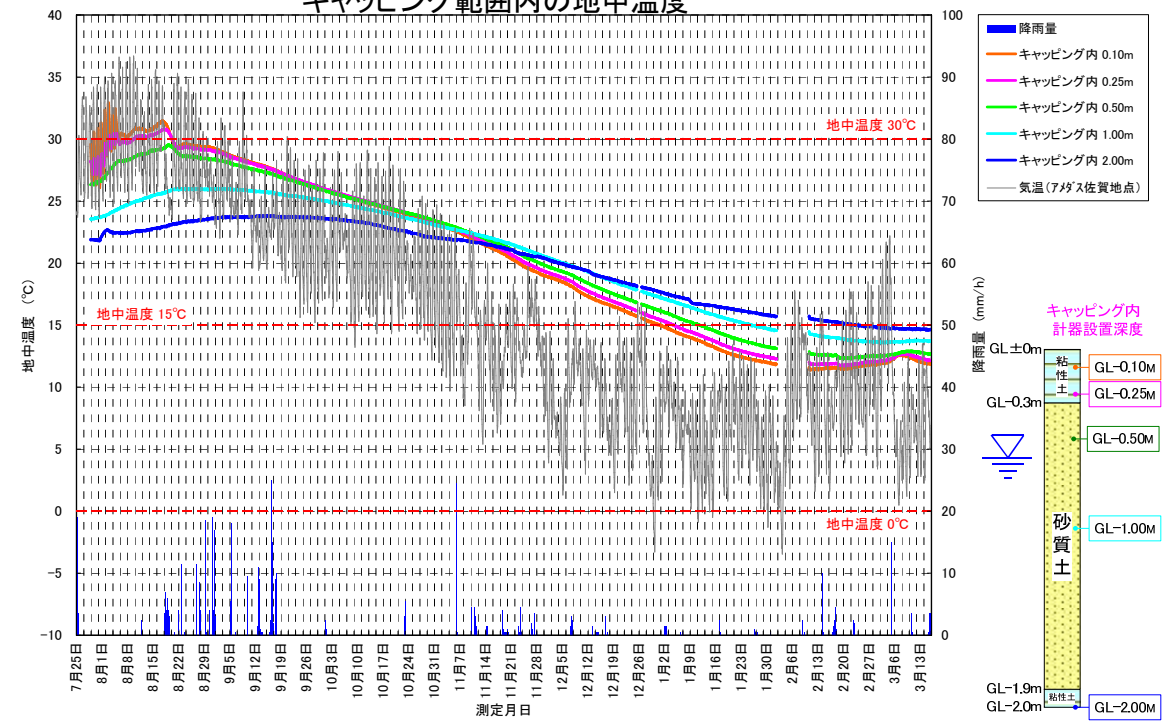
キャッピング範囲外と範囲内の 地中温度モニタリング結果

- ・キャッピング範囲外の値は、0.10m～0.50mにかけて日変動量が大きい。
- ・キャッピング範囲内では、どの層においても日変動量は小さい。

キャッピング範囲外の地中温度



キャッピング範囲内の地中温度



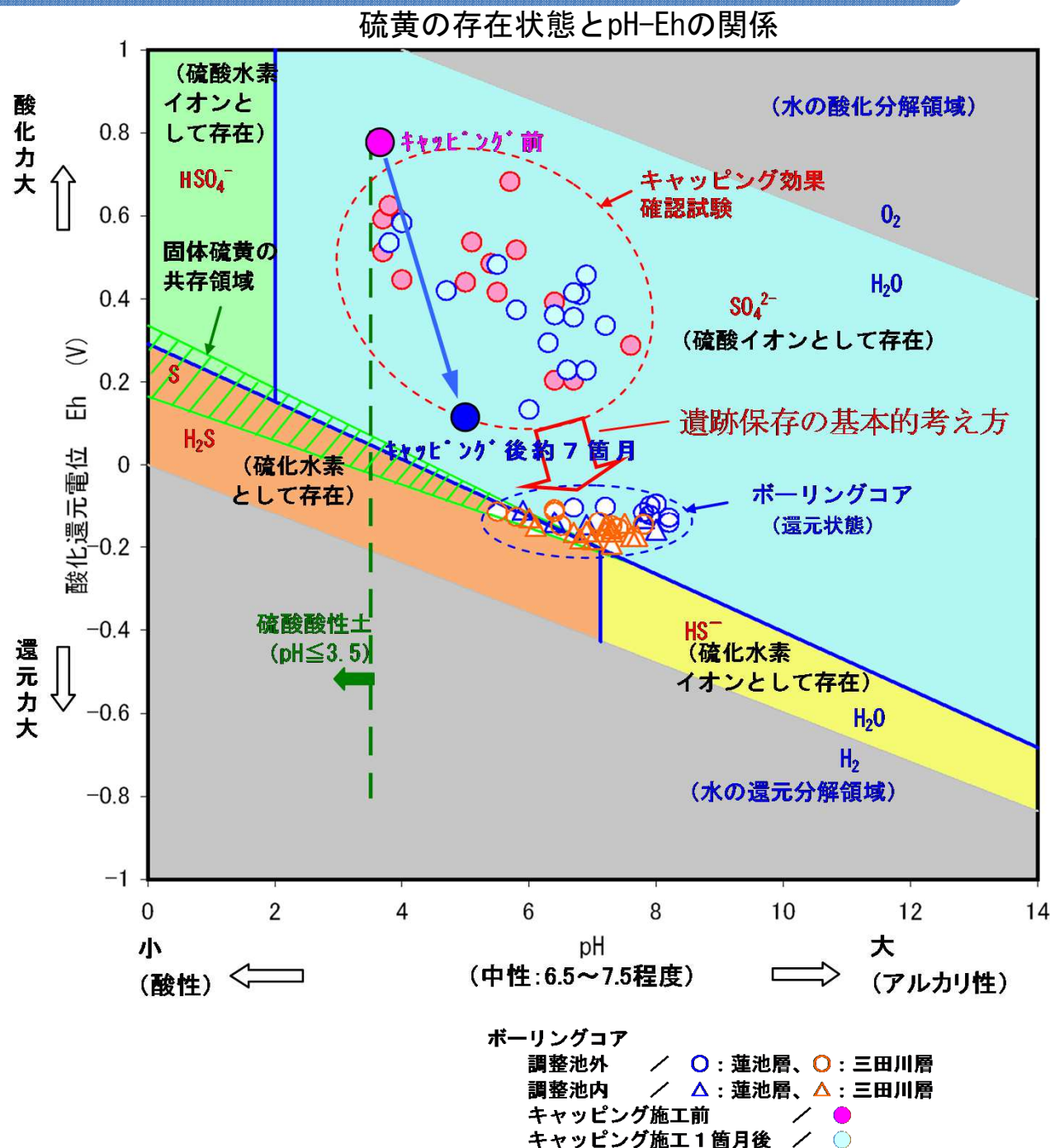
※試験施工のキャッピングは8/4から施工し9/4に完成。

※キャッピング範囲外の箇所において、3/3からキャッピング本施工を実施。

右図はキャッピング施工前、キャッピング施工1ヶ月後、キャッピング施工7ヶ月後のボーリング試料のpHとモニタリングで得られた酸化還元電位の関係を示したものの。

・キャッピング後1ヶ月では、pHは中性に向かっていくデータも存在するが、酸化還元電位に顕著な変化は見られなかった。

・キャッピング後7ヶ月では、pHは中性に向かっており、酸化還元電位は還元状態に移行しつつあった。



●セメント改良層の透水係数は、敷設粘土層、セメント改良層とも目標値（ $1.0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ ）を満足し、遮水性を確保した施工が行えた。

●7ヶ月のモニタリング調査の結果からも、酸化還元電位は低下し続けており、土壌環境は還元状態に戻りつつあった。



キャッピングの効果は発現している。

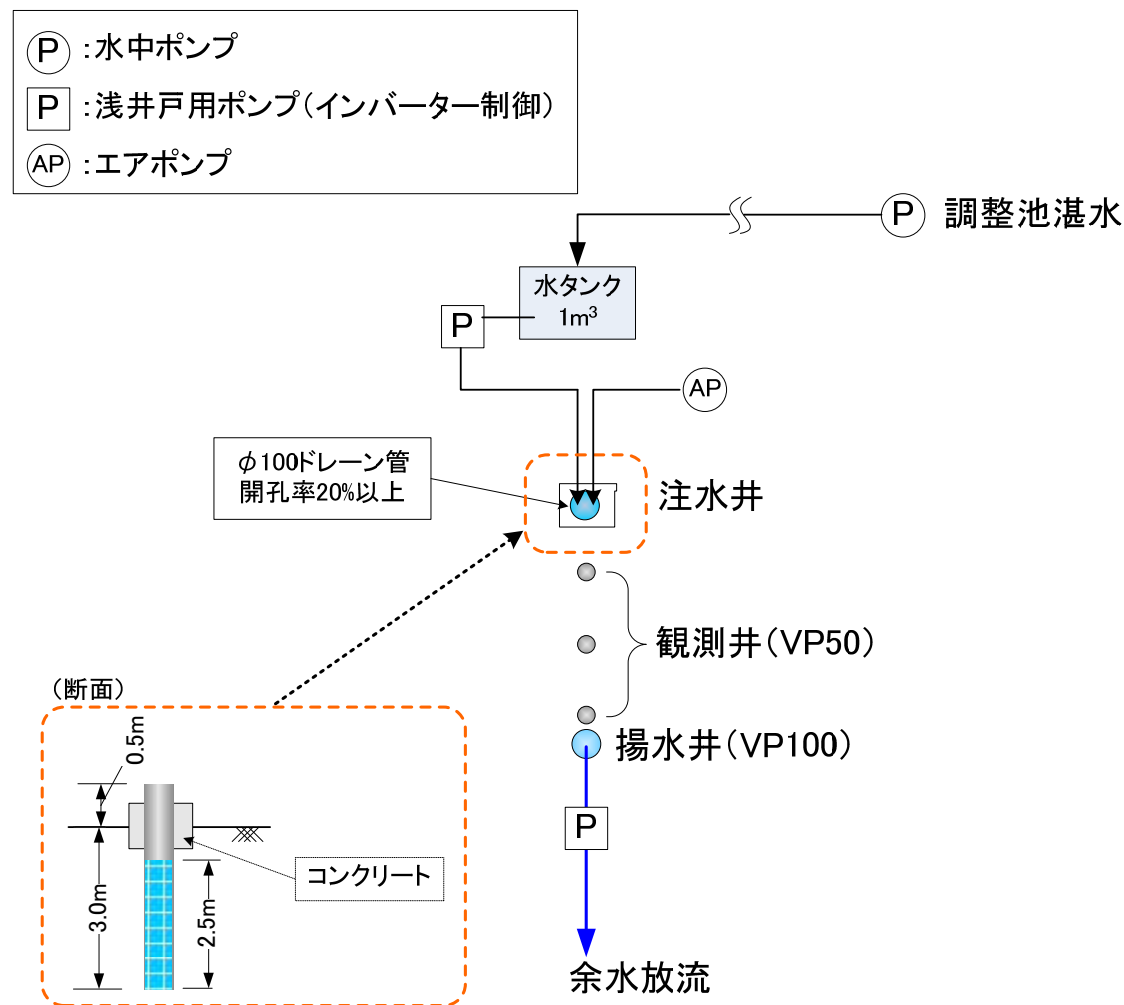
地下水が地中を通過する際の溶存酸素の変化をモニタリングし、低酸素状態になるまでの流動距離(酸素消費距離)を把握するため、溶存酸素消費試験を実施した。

○試験設備

- ・観測井は、蓮池層では注水井から1、3、5m離れた位置に、三田川層では注水井から1、3、5、10m離れた位置に設置。(蓮池層は地下水流動範囲が小さいため、観測井の配置を狭くした)
- ・注水井及び各観測井に観測用計器のpH計、マルチ水質計(溶存酸素量、導電率、水温)を設置した。
- ・注水井の深度は3mとし、ストレーナーを設置。
- ・揚水井の深度は砂溜まり分を考慮し、5mのストレーナーを設置。
- ・観測井の深度は3mとし、ストレーナーを設置。

○溶存酸素消費試験

- ・調整池の水を注水井へ注入するとともに、エアポンプを稼働して注水井で酸素飽和水を作成し、揚水ポンプを稼働しながら強制的に注水した。
- ・地下水位の動水勾配を一定に保った状態で注水井と各観測井における水位、溶存酸素、導電率、水温の変動状況を1分間隔で連続して観測し、注水井からの離隔に伴う水質の変動状況を把握した。

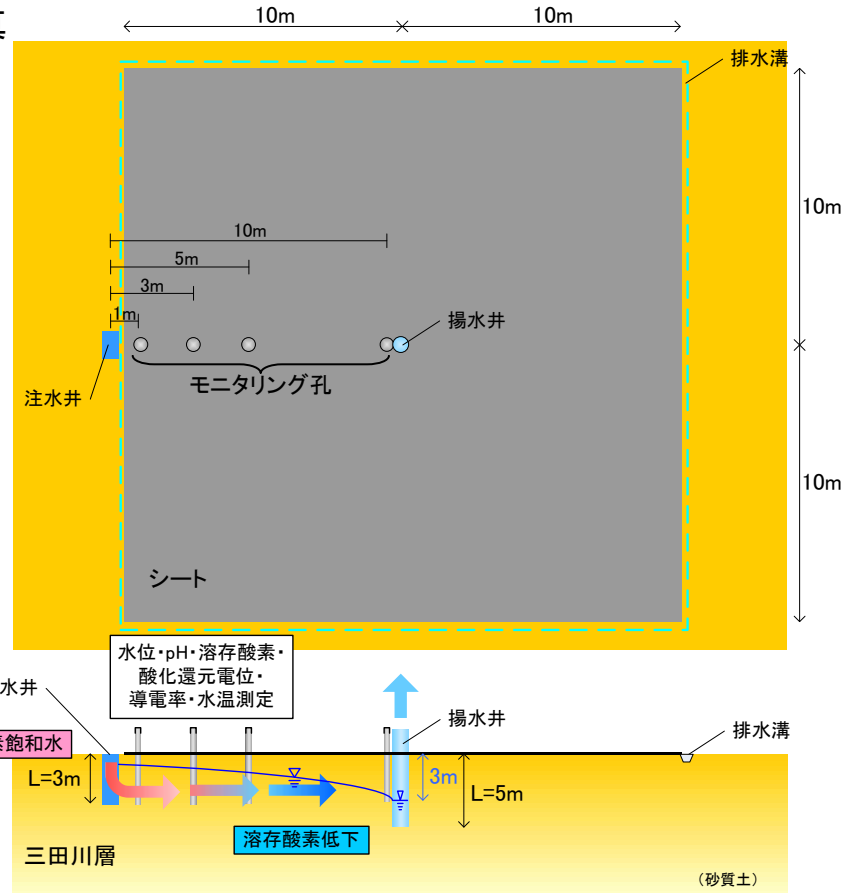
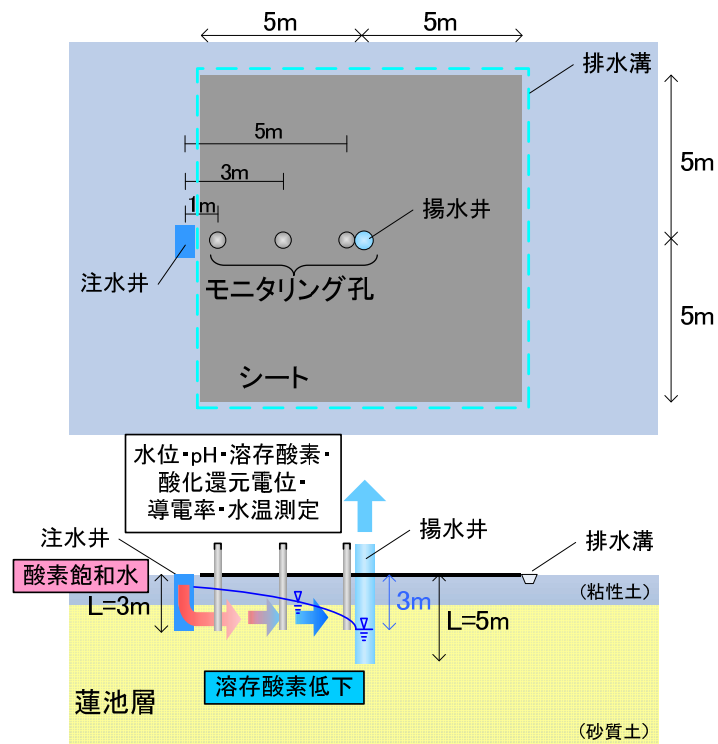


※蓮池層の観測井は1m、3m、5mの3地点
三田川層の観測井は1m、3m、5m、10mの4地点

溶存酸素消費試験の施設概要図

溶存酸素消費試験

溶存酸素消費試験 概要図・写真



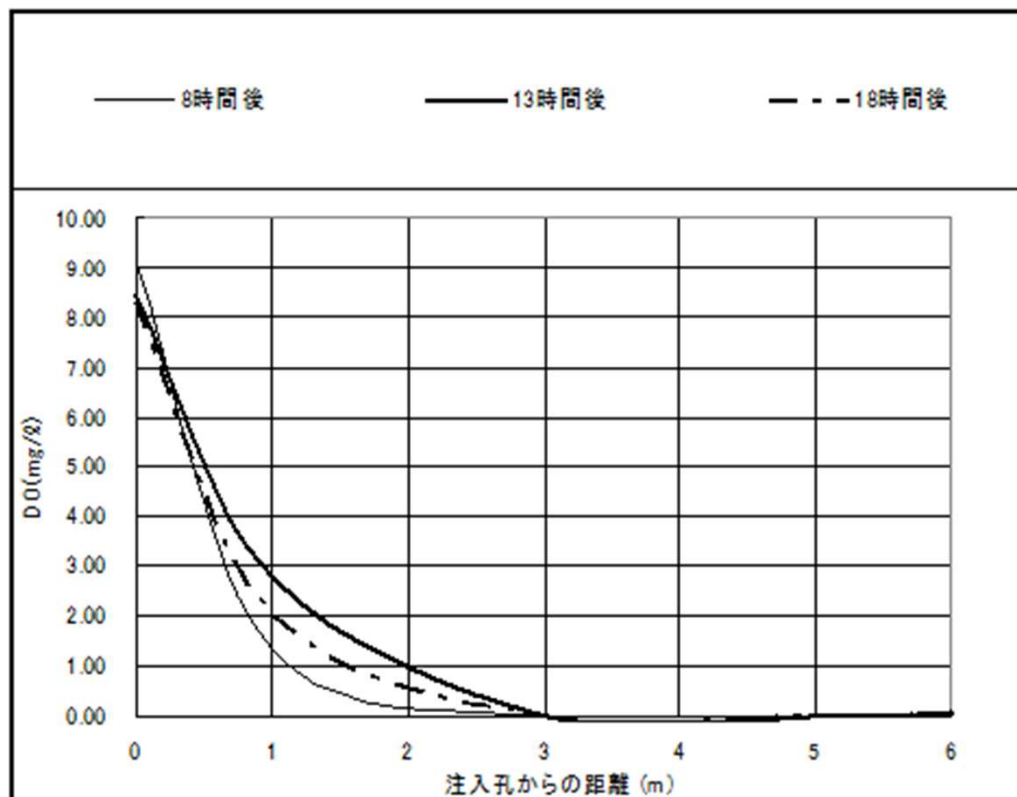
溶存酸素消費試験結果

透水性の良い蓮池層砂質土では、注水井より3m以上離れると溶存酸素濃度は、ほとんど0mg/Lとなることを確認した。好気性バクテリアの活動や鉄イオンの酸化によるものと考えられる。

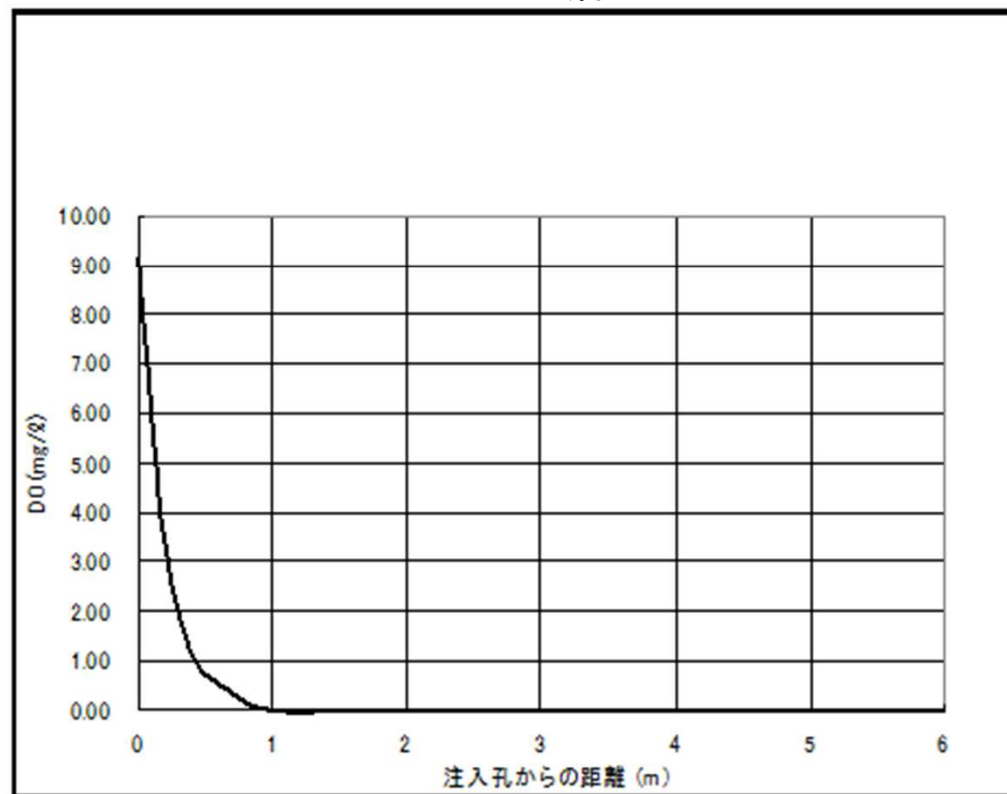
また三田川層砂質土では、蓮池層砂質土よりも透水係数は低く、注水井より1m地点においても溶存酸素濃度が上がらないことを確認した。

このことにより、地下水中を3m流動すれば溶存酸素はほとんど消費されと考えられ、遺跡から3m拡幅してキャッピングを施工すれば、溶存酸素を含む水が側方から流入しても、地下水を多く含む地層で溶存酸素は消費され、遺跡は酸化しない環境となることから、キャッピング拡幅範囲を3mとした。

蓮池層



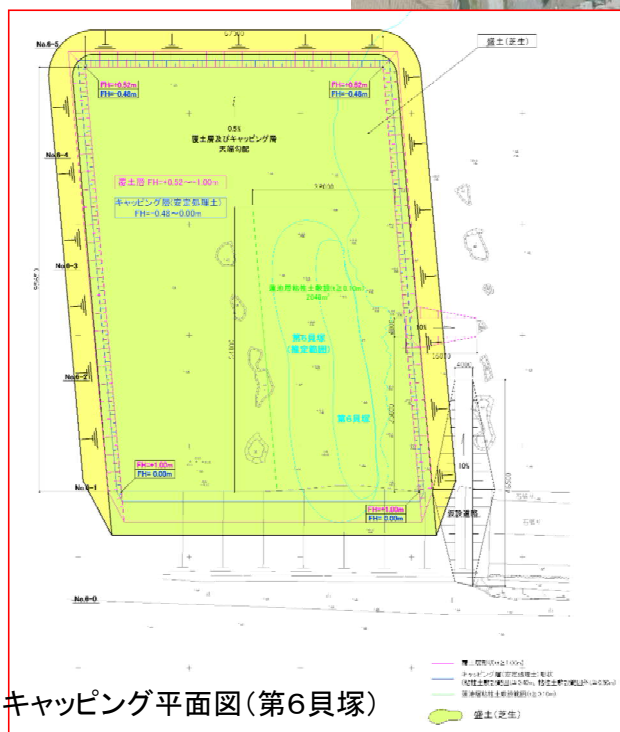
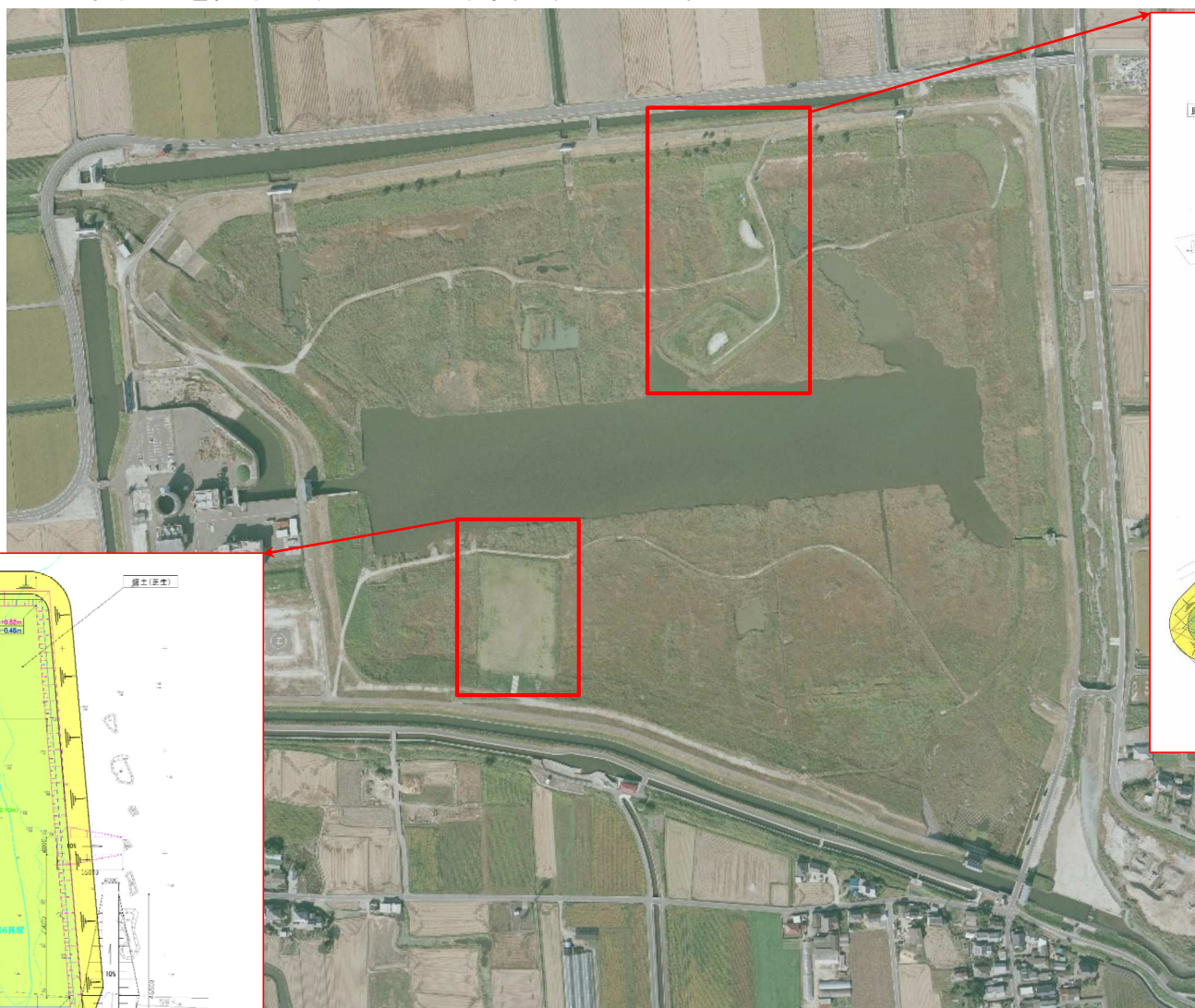
三田川層



注入孔からの距離と溶存酸素濃度

東名遺跡の保存対策の施工

前述のキャッピング効果確認試験や溶存酸素消費試験の結果から得られた、キャッピングの仕様、施工範囲(3m拡幅)を基にキャッピングの本施工を実施し、平成19年度に完成した。



キャッピング平面図(第6貝塚)



キャッピング平面図
(第3, 4, 5貝塚)

巨勢川調整池 航空写真(キャッピング施工後)

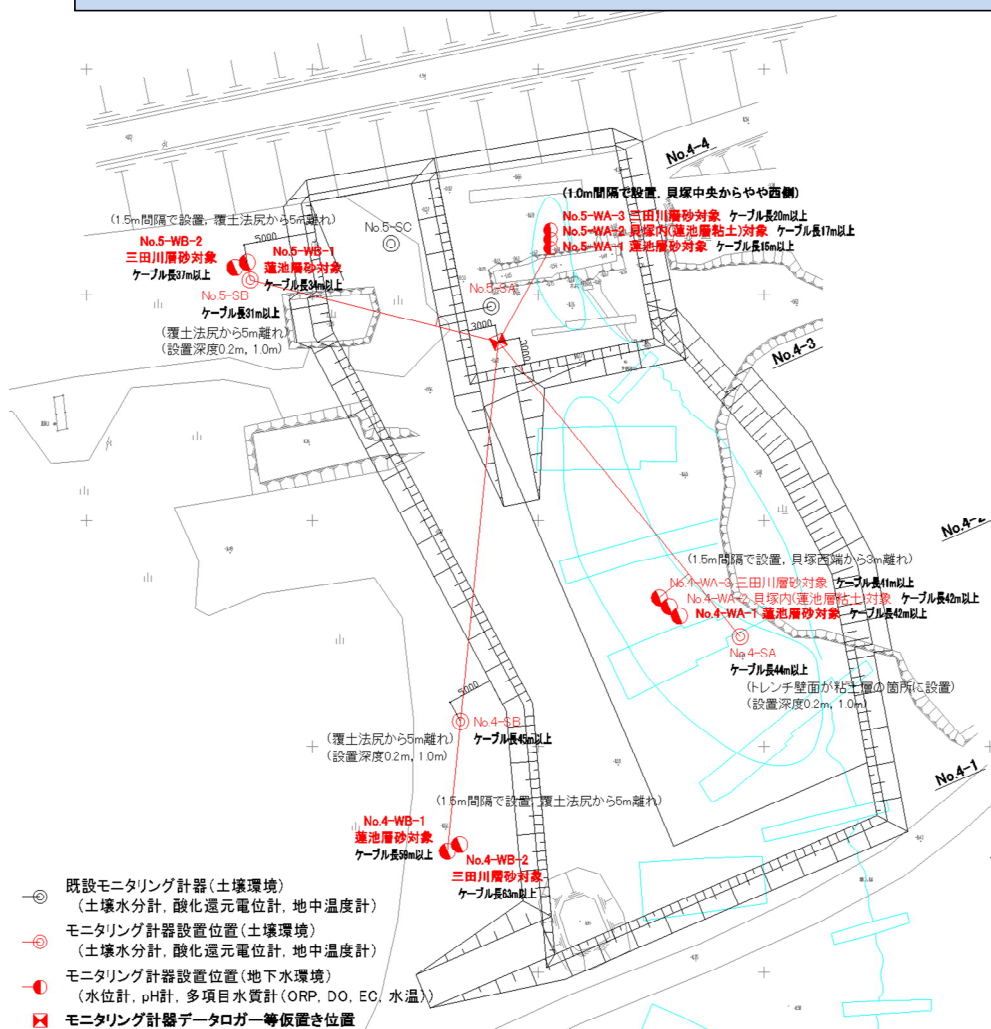
遺跡保存対策のモニタリングについて

■遺跡保存対策後、効果検証のため
平成18～28年、モニタリングを実施。
(キャッピング施工時に設置した測定計器をそのまま使用)

- 土壌環境測定：酸化還元電位・土壌水分・地中温度
- 地下水環境測定：水位・水温・pH・溶存酸素量・導電率
(比較できるように、キャッピングの内側と外側に観測地点を設置した。)

上記の測定結果より、溶存酸素が少なく、還元状態であれば、遺跡の保存状態が良好であると判断できる。

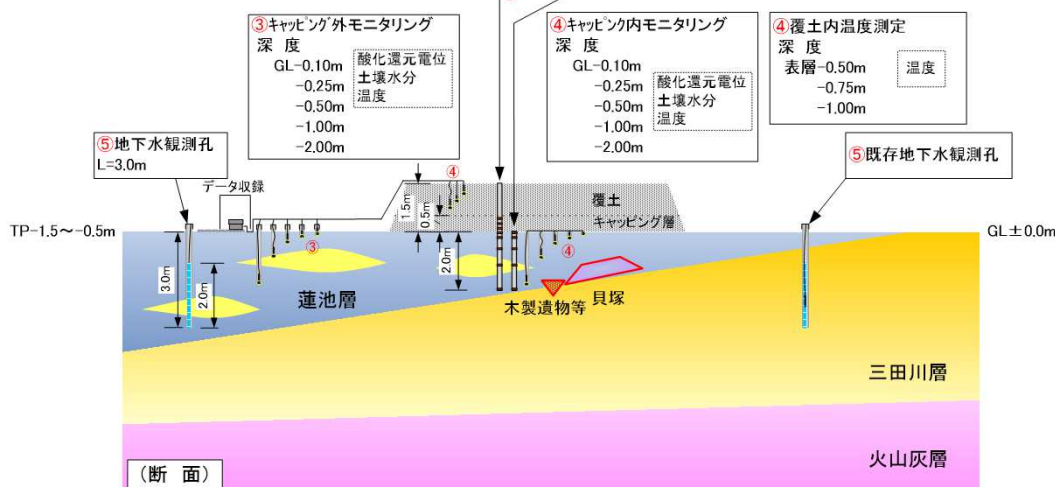
項目		対 象 (時 期)	深 度 (GL-m)	分析 (測定) 項目	備 考		
土 壌 環 境 測 定	土 壌 分 析	①蓮池層 (キャッピング施工前)	0.10m 0.25m	pH (H ₂ O、H ₂ O ₂) 酸化還元電位 水溶性成分 (硫酸塩: H ₂ O、H ₂ O ₂) 硫黄含有量 (全硫黄、硫酸態硫黄) カルシウム含有量 有機炭素含有量	・ボーリング試料を用いて室内分析 ・pH (H ₂ O ₂)、硫酸塩 (H ₂ O ₂)、全硫黄は、キャッピング施工前のみ		
		②セメント改良層 下位の蓮池層 (キャッピング施工後)	0.50m 1.00m 2.00m				
		②セメント改良層 (キャッピング施工後)	0.10m 0.25m 0.40m				
			③キャッピング範囲外 (キャッピング施工前後)			0.10m 0.25m 0.50m	・測定計器を地中または覆土層内に埋設する 酸化還元電位計 土壌水分計 地中温度計
						④キャッピング範囲内 (キャッピング施工前後)	
		④覆土層 (キャッピング施工後)					
	モニタリング		⑤蓮池層砂質土 (キャッピング施工前後)	⑤三田川層砂質土 (キャッピング施工前後)	地下水位	・自記水位計	



- ①キャッピング前土壌分析
- ②キャッピング後土壌分析
- ③キャッピング外モニタリング
- ④キャッピング内モニタリング
- ⑤地下水位観測

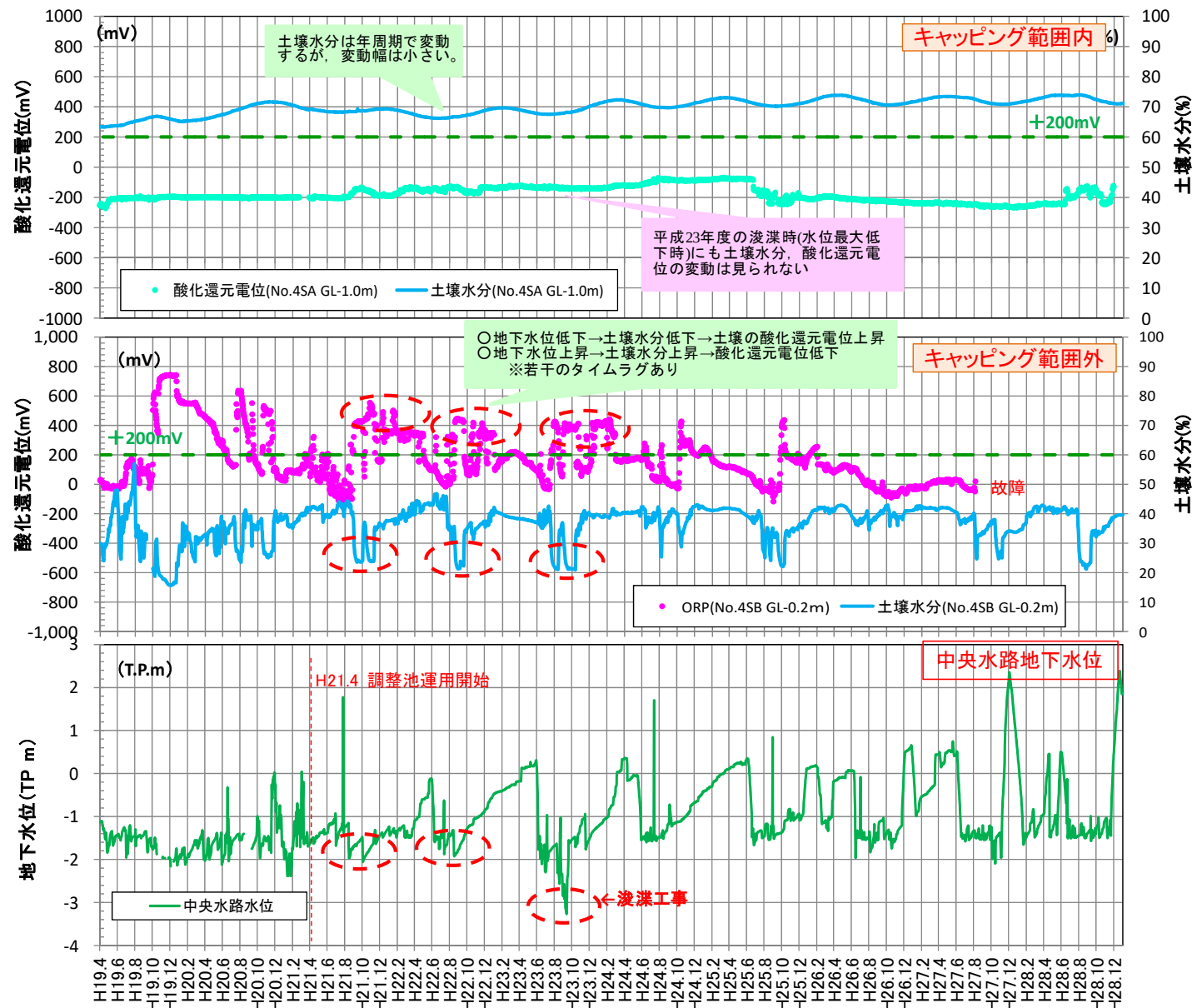
①②土壌分析(試料採取)
(キャッピングの前・後) (キャッピングの後)

深 度	キャッピング層上面から
GL-0.10m	-0.10m
-0.25m	-0.25m
-0.50m	-0.40m
-1.00m	
-2.00m	

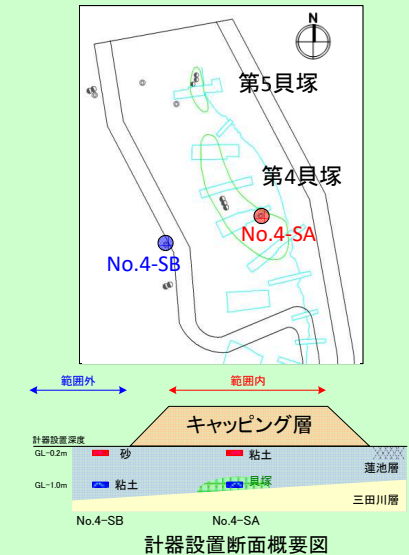


モニタリング結果（キャッピング範囲内と範囲外のデータ比較）

■第4貝塚キャッピング範囲内・範囲外 土壌の酸化還元電位・土壌水分の比較



●モニタリング計器設置位置図



■キャッピング範囲内

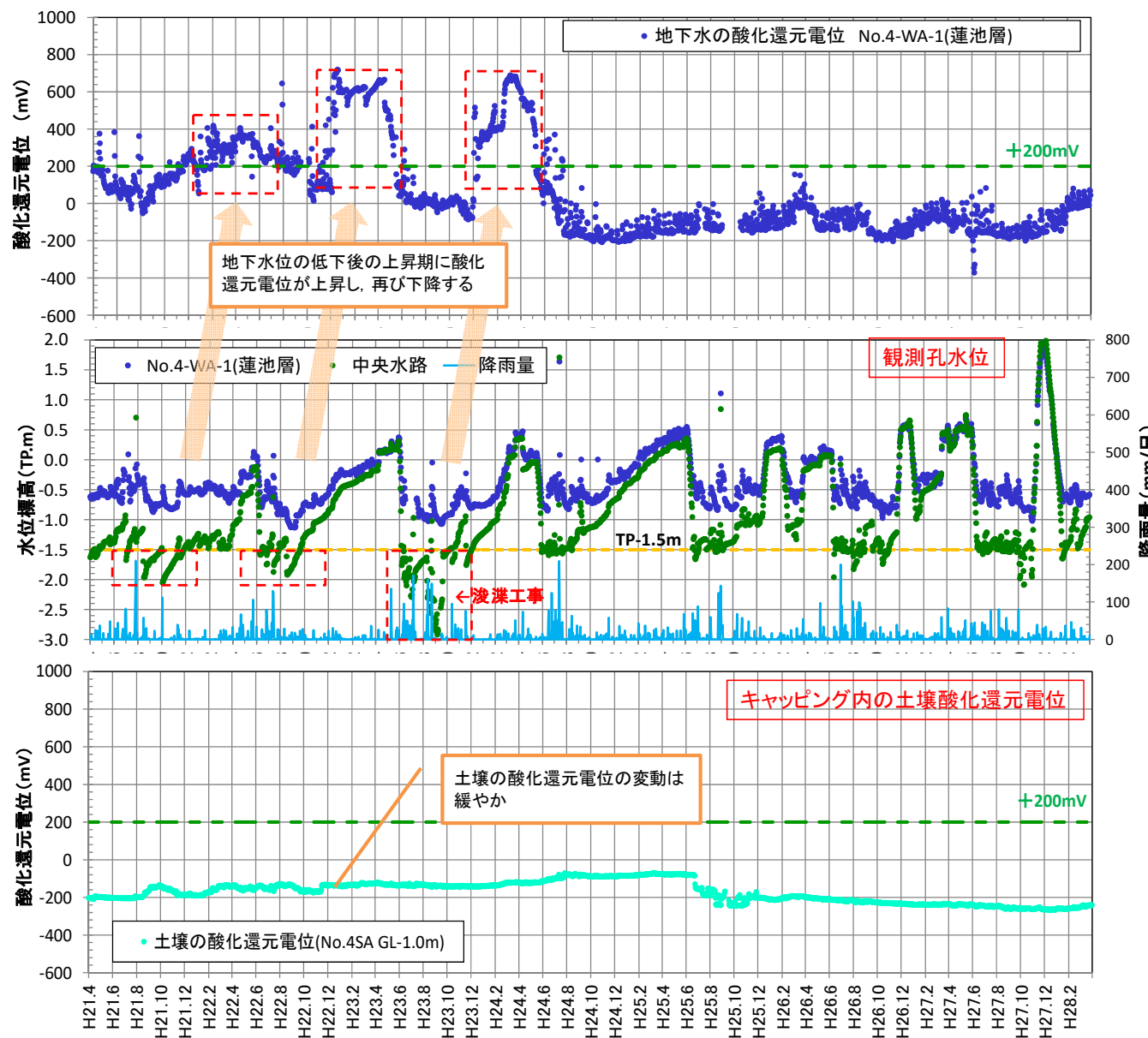
・土壌の酸化還元電位・土壌水分とも大きな変動は見られない。平成23年度の調整池水位最大低下時にも大きな変動は確認されておらず、水位変動の影響を受けていないと考えられる。

■キャッピング範囲外

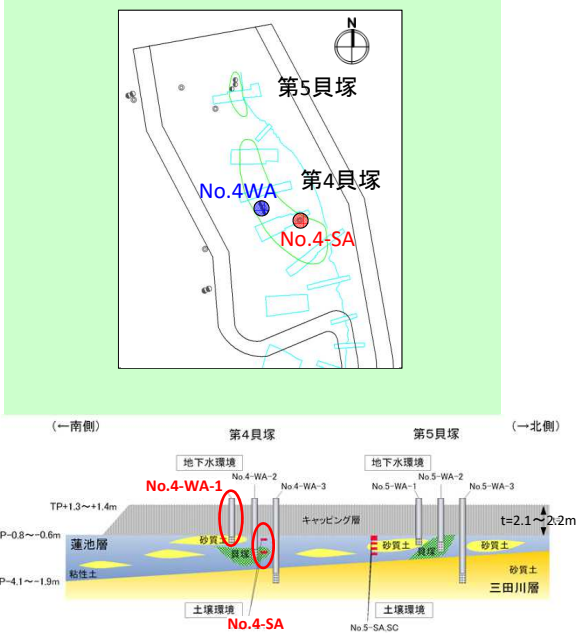
・調整池水位の変動に伴い、土壌の酸化還元電位・土壌水分とも変動する。キャッピング範囲外では水位変動の影響を受けている恐れがある。

モニタリング結果（地下水と土壌のデータ比較）

■第4貝塚キャッピング範囲内 土壌と地下水の酸化還元電位の比較



●モニタリング計器設置位置図



■地下水位の変動

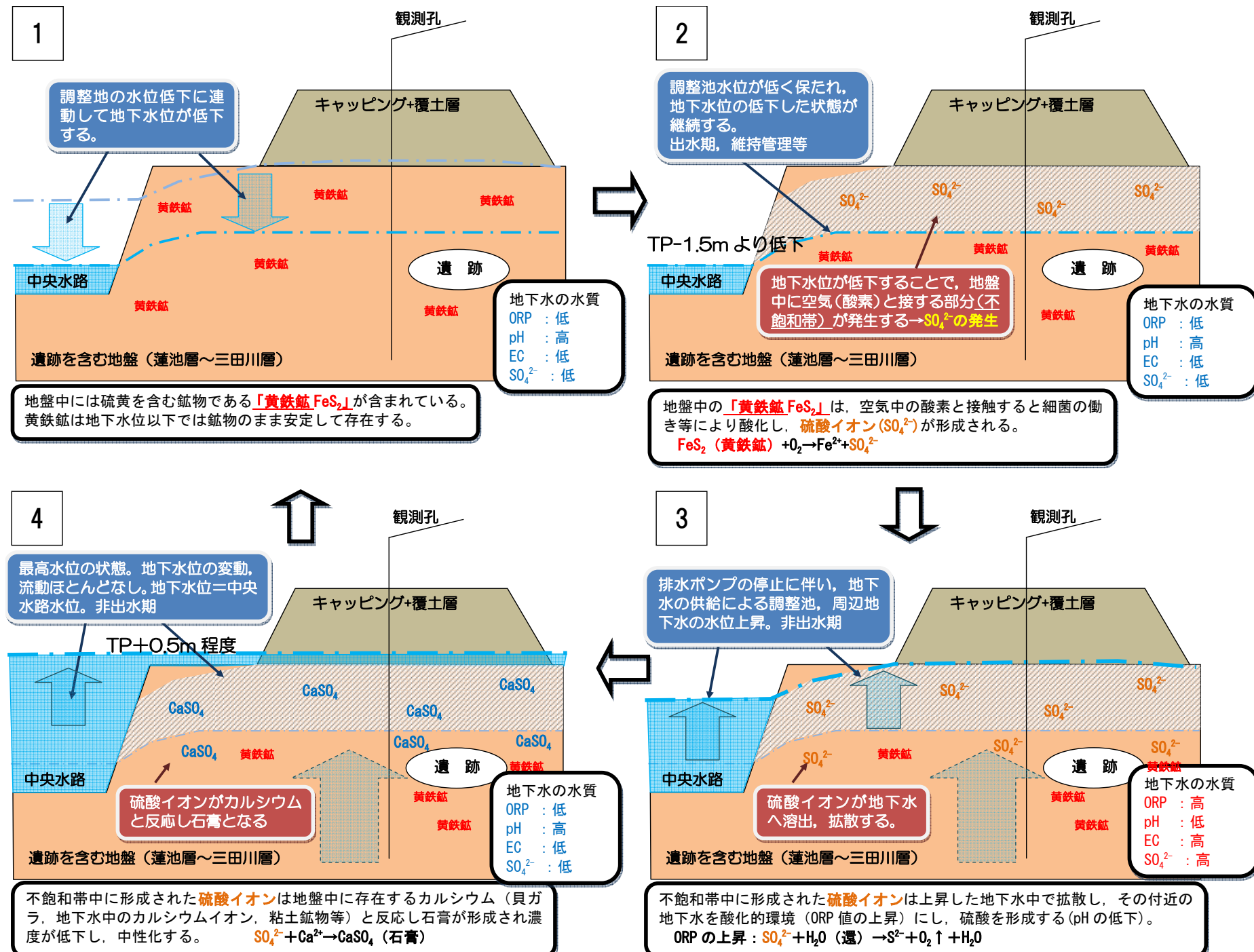
・調整池の管理水位や気象状況により、調整池水位が変動すると、キャッピング内の地下水位は変動する。

■酸化還元電位の比較

・地下水位の変動に伴い、地下水の酸化還元電位は変動するが、土壌の酸化還元電位の変動は緩やか。

※モニタリング委員会では、地下水の酸化還元電位が一時的に上昇するメカニズムについて整理することやその作用が遺跡の酸化に影響しないかなどを整理するよう指摘を受けた。

■地下水環境の変化模式図



■追加調査

<現地実験>

○土壌環境と地下水環境の変化のメカニズム(土壌環境の変化が緩やかである原因, 地下水環境が変化する場合、土壌環境と地下水環境の関連性の有無)を解明するため実施。

・観測孔による再現実験

[考察]

→土壌の空気に触れる箇所では酸化傾向を示すが、土中内部5cm以深では、還元状態である。

<室内実験>

○現地実験結果を踏まえ、水位低下期間が長期化した場合の土壌の変化(酸化と還元)を確認するため実施。

・現地試料による室内実験

[考察]

→現地の不攪乱試料を長期乾燥させた場合、酸化還元電位は上昇するが、水浸した場合、酸化還元電位は低下する。

①平成18年度より実施しているモニタリングで把握された事象

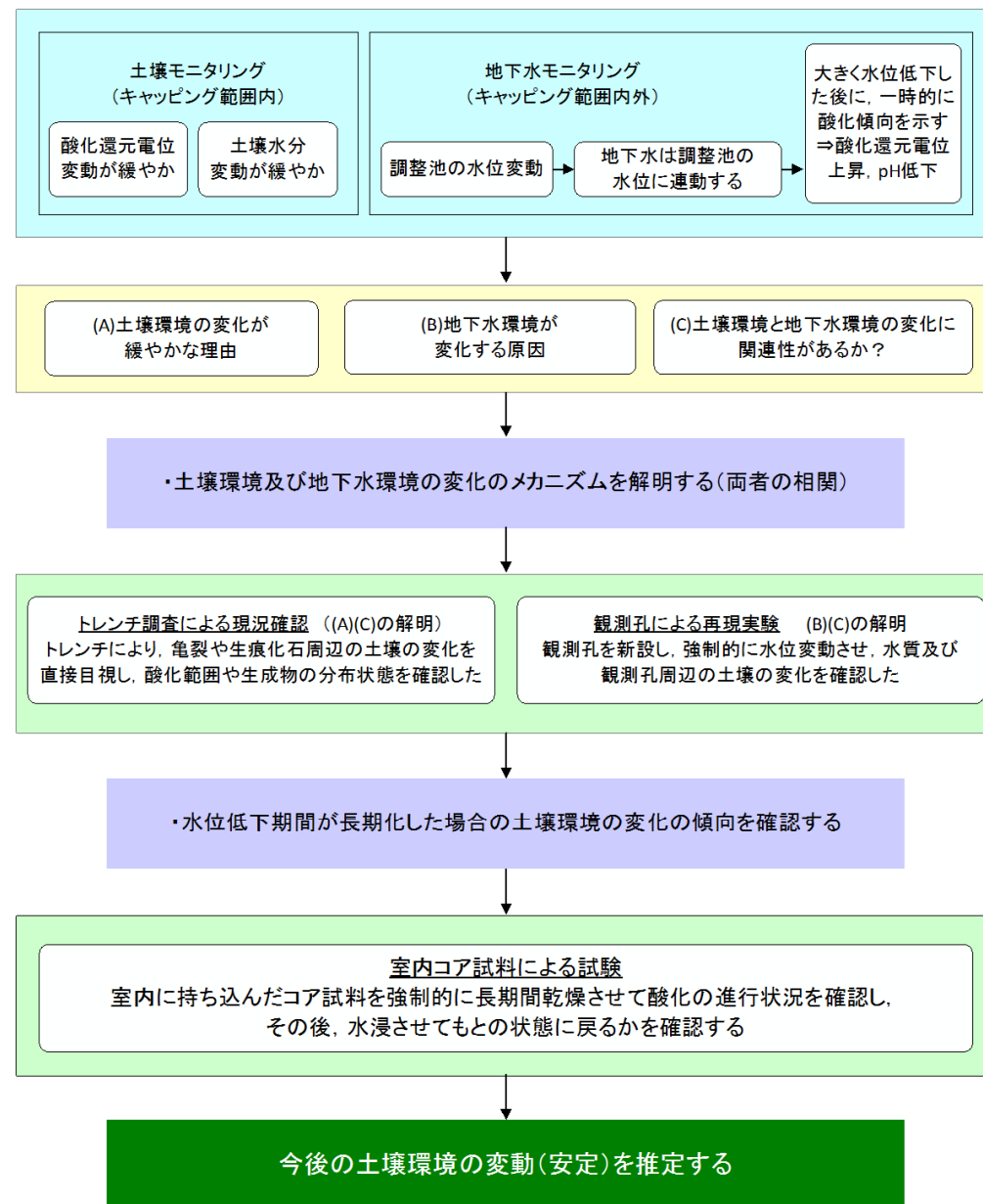
②未解明な事項

③解決すべき課題
(平成24年度第4回委員会指摘事項)

④現地実験(平成25年度)

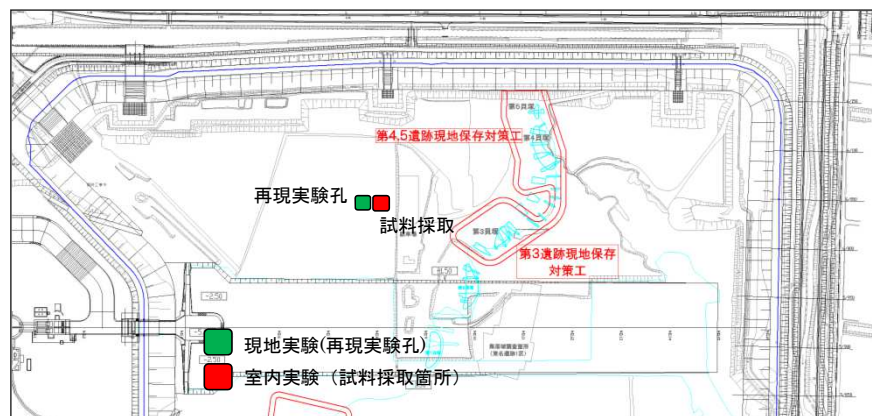
⑤残る課題
(H25年度現地実験後)

⑥室内試験
(平成26～27年度)



①現地実験(観測孔による地下水環境調査)

■実験位置図

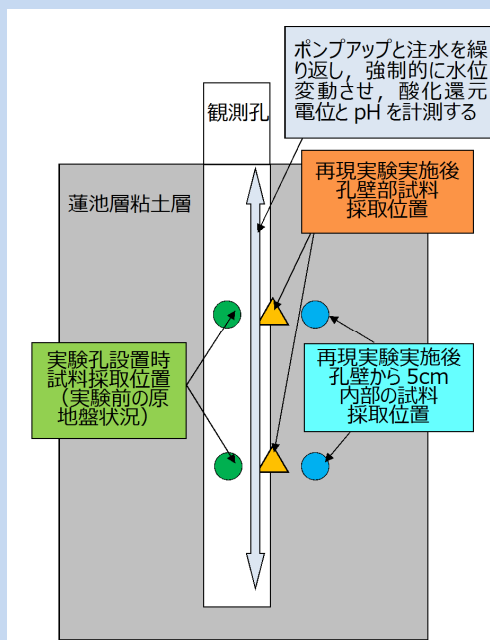


■現地実験の目的と方法

1. 目的
地下水環境の変化と周辺土壌への影響を確認する。

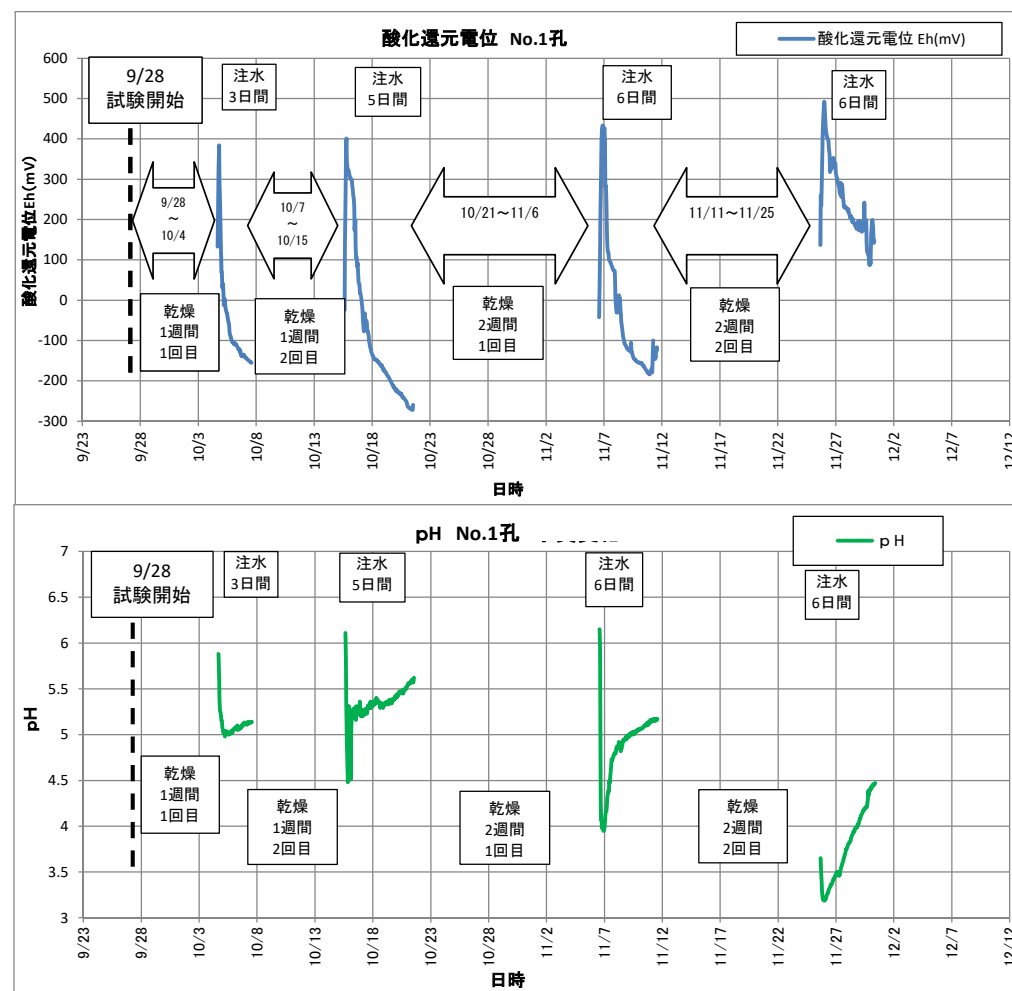
2. 方法
・【地下水環境】新たに設置した観測孔の水位を強制的に変動させながら、孔内(地下水)の水質を計測する。

・【土壌環境】上記計測後に、観測孔を掘り起こし、周辺地盤の変化を確認する。



<現地実験方法 模式図>

■現地実験結果①(観測孔内 地下水環境)

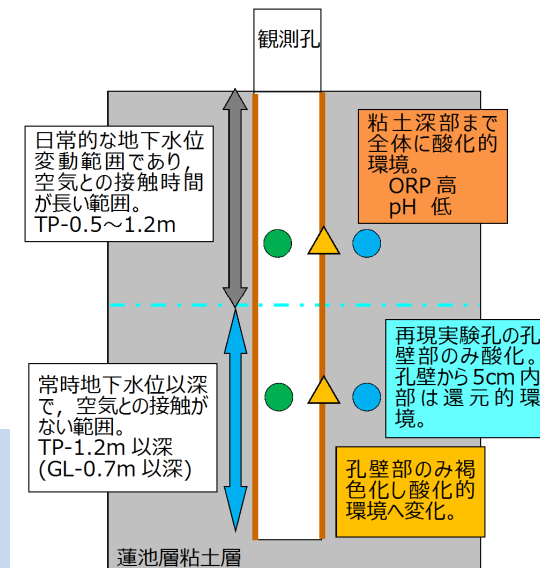
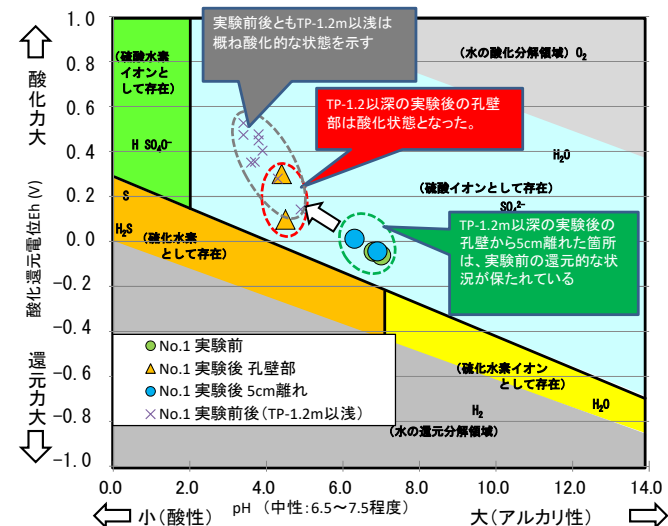
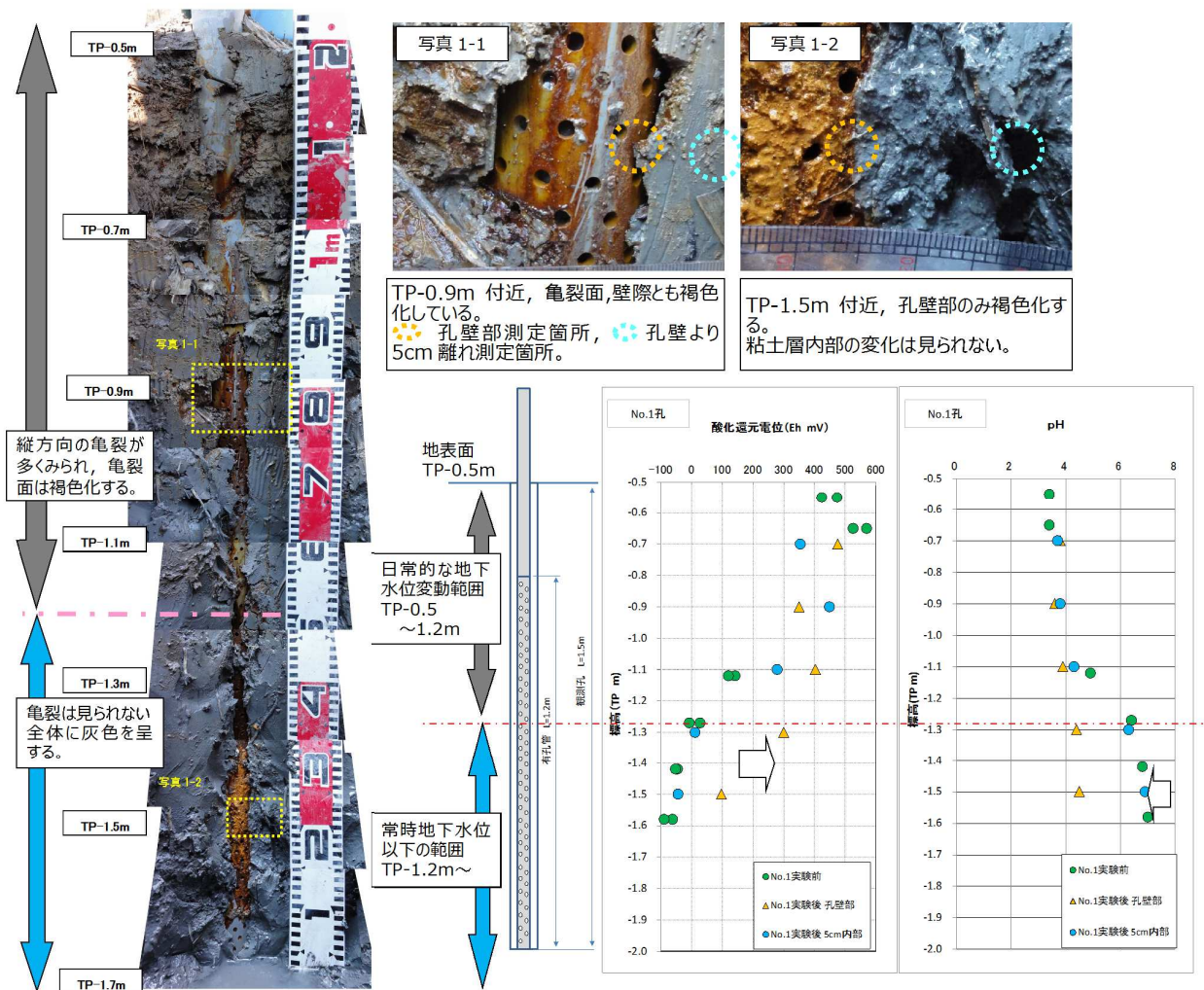


■結果

- ・乾燥期間の後、実験孔に注入した地下水は、一時的に酸性化し、酸化還元電位が上昇する。これは空気と接触して酸化した土壌表層に地下水が接することで生じると考えられる。
- ・実験孔の乾燥期間が長いほど、地下水の酸性化の程度は大きい傾向にある。
- ・注水後時間経過とともに酸化還元電位・Phの値は戻りつつある。

②現地実験（観測孔による土壌環境調査）

■現地実験結果②（観測孔周辺 土壌環境）



<現地実験結果 模式図>

■結果

- ・TP-1.2mから浅い層では、乾燥収縮による空間や草の根が存在し、空気に触れる状態の部分は酸化的な環境になっていた(pH低、酸化還元電位高)。
- ・TP-1.2mより深い層では、一時的に水位低下させたことで、酸化(褐色化)するのは孔壁部のみであった。孔壁から5cm内部の地点では掘削前と同じ還元的な状態が保たれている。
- ・酸性化した地下水の影響は土壌内部に及んでいない。

③室内実験

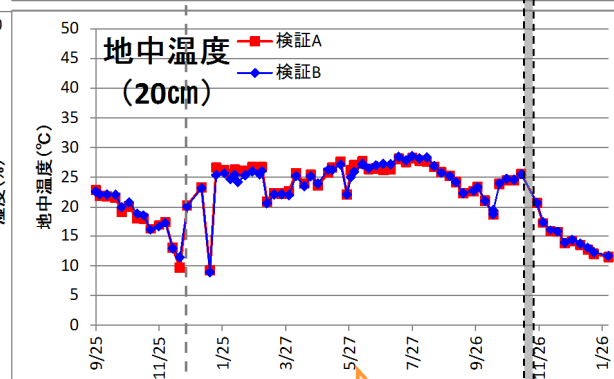
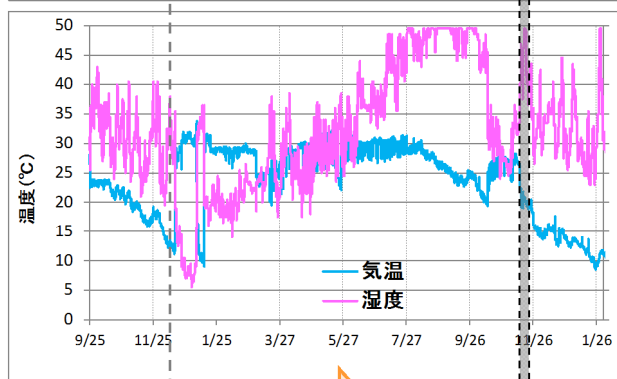
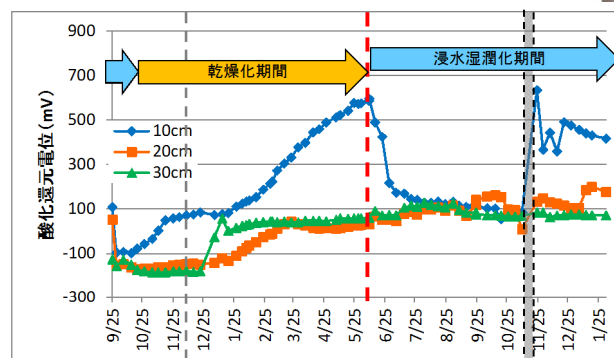
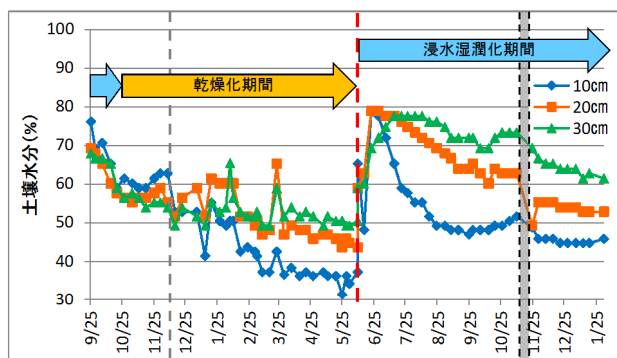
■室内実験の目的と方法

①目的: 水位低下期間が長期化した場合を想定し, 長期の乾燥状態での土壌環境の変化を確認する。あわせて, 土壌の酸化還元電位と土壌水分の関係性を確認する。

②方法

- ・調整池内で, VP500の塩ビ管を押し込み, 不攪乱試料として採取, 室内に搬入する。
- ・計測用試料に, 土壌水分計, 酸化還元電位計, 温度計を設置する(現地モニタリングと同様の埋込式)。
- ・室内でエアコンや送風機により, 強制的に乾燥させた後, 試料表面まで水浸させる。乾燥期間(8ヶ月間)～水浸期間(9ヶ月間)を通して, 週1回の頻度で測定を行う。

■室内実験結果



12/9～送風機稼働
12/15～暖房稼働

11/13～11/24
水位一定装置不具合のため水を抜く

12/9～送風機稼働
12/15～暖房稼働

11/13～11/24
水位一定装置不具合のため水を抜く



写真① 試料採取状況



②試料採取状況

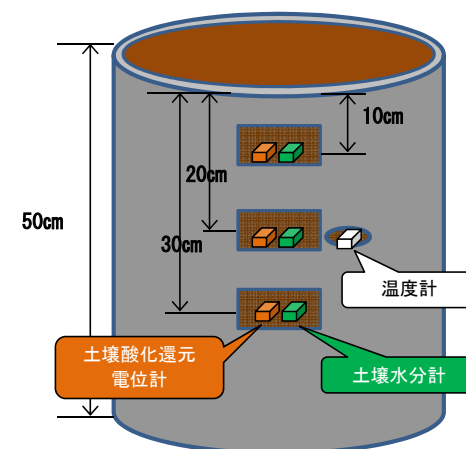


写真③計器設置状況



④試料設置状況

<実験状況 写真>



<室内実験(計測状況) 模式図>

モニタリング(及び追加調査)結果の総括

■監視基準との比較

対象	項目	監視基準	評価
地下水	pH	pH6～8程度で安定していること	概ね満足している。
	酸化還元電位	+200mV程度以下であること	水位の変化に影響を受け変動が大きい。+200mVを越える時期があるもののその後、-200mV程度に低下する。
	溶存酸素	2mg/L未満であること	満足している。
土壌	土壌水分	安定していること	安定した状態を維持している
	酸化還元電位	+200mV程度以下であること	-200～+100mVの範囲内にあり、満足している。
	目視点検	クラックの本数が増加しないこと、幅が拡大しないこと。深さが覆土の層厚(1m)以上にならないこと。	覆土の天端にクラック等の変状は見られない。法面には水位変動による法崩れを防止するため、法覆工にて保護している。

■モニタリングの総括

- ・遺跡の保存状況については、これまでのモニタリングや追加調査結果より、土壌モニタリングの結果で評価することができる。⇒良好な環境が維持されていることから、キャッピング盛土による遺跡保存対策は有効であったと言える。
- ・地下水環境が変化しても、遺跡埋設箇所の土壌環境は変化しない。
- ・今後、土壌水分を計測することで、遺跡の保存状態を推定できる。

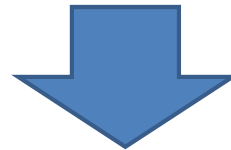


遺跡の保存状態は良好であり、国交省で実施してきたモニタリング調査は終了となり、委員会も閉会した。
今後のモニタリング等の対応は佐賀市へ引き継ぐこととなった。

これまで東名遺跡に携わってこられた方々のご尽力のおかげで、
H29.2.16の委員会を最後に、国交省としての東名遺跡対応について、
一段落つけることができました。ありがとうございました。



- セメント改良層の透水係数は、敷設粘土層、セメント改良層とも目標値($1.0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$)を満足し、遮水性は確保できた。
- キャッピング範囲内の表層の酸化還元電位は、7ヶ月のモニタリング期間を通じて数値が低下し続けており、土壌環境は還元状態に戻りつつあった。
- 地中温度は、キャッピング施工後、日変動が無くなり、遺跡埋蔵箇所ของความ深さでは、急激な温度変化は生じなかった。
- 土壌水分はキャッピングの効果による上昇は認められなかったが、土壌水分の上昇が無くても、酸化還元電位は低下し、またその状態が保たれている。



キャッピングの効果は発現している。

室内実験のまとめ

■室内実験結果

<土壌水分>

- ①乾燥時、土壌水分は初期に低下が大きく見られるが、その後、2ヶ月程度で低下がやや緩やかになる。
- ②水浸させると土壌水分は急激に上昇し、その後緩やかに低下する。（粘土の収縮に伴って、間隙ができ、水浸直後はその間隙に水が入り込み土壌水分値が上昇する。しばらくすると、粘土を構成する鉱物に水分が吸収され、見かけの体積含水率が減少したと推定。）

<酸化還元電位>

- ①酸化還元電位は乾燥が進むにしたがい上昇した。酸化還元電位の上昇は10cmで顕著に見られ、20cm、30cmでは乾燥開始後3か月以降に上昇が見られた。
- ②乾燥時、酸化還元電位は10cmで最も高く、+600mv程度まで上昇した。20cm、30cmは+100mv程度までの上昇であった。
- ③水浸後、10cmの値は顕著な低下傾向を示すが、20cm、30cmの値は水浸開始後あまり変化が見られない。

■総括

- ・表面に近い10cmでは土壌水分の低下に伴い、酸化還元電位の上昇が顕著であるが、20cm以深では酸化還元電位の上昇量は100～200mvと小さく還元状態が保たれている。
- ・現地モニタリングで確認されている「土壌水分の低下に伴い酸化還元電位が上昇し、土壌水分の上昇に伴い酸化還元電位が低下する」という変動サイクルを確認することができた（下図参照）。

