

地下貯水槽計画の経緯、現在の対応（要因分析他） と今後の方向性について

平成25年4月19日

東京電力株式会社

1. 地下貯水槽計画の経緯

- 3.11地震直後の平成23年4月ごろより大規模な汚染水貯留施設の検討を開始し、その中のひとつの案として地下貯水槽計画が浮上した
- 当時、汚染水は増加の一途をたどっていたが、重量物である鋼製タンクを設置できる場所（大型クレーンが使用できる場所）が発電所構内で枯渇しつつあった
- 地下貯水槽はその課題を克服すべく、大型クレーンが使用できない送電線下の土地の活用方法としてより具現化していった
- 地下貯水槽は、雨水を貯留する技術であるが、これに廃棄物最終処分場で数多く採用されている遮水シート技術を組み合わせ、更に『使用期間にわたって汚染水を貯留できる施設』としての性能を確保するために検討を加えた
- なお、地下貯水槽の実施工前には施工試験を実施し、施工後の遮水シートの状態や施工性等について確認している

2. 設計上の配慮 ～ 類似構造物との仕様の比較

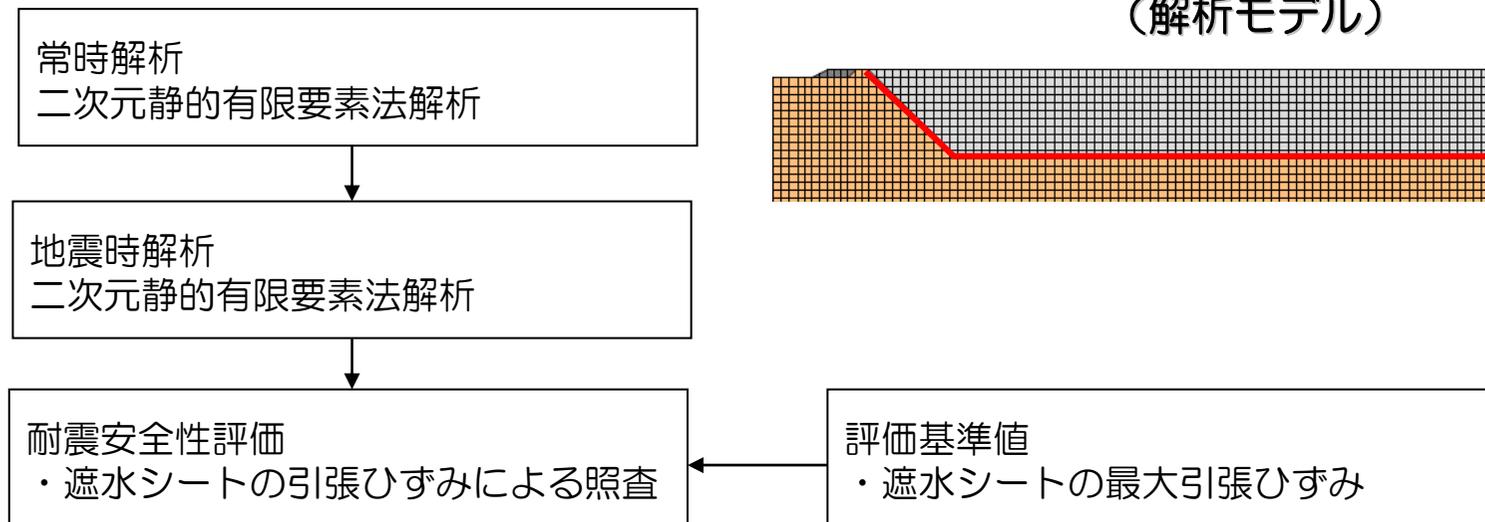
比較ケース	地下貯水槽 (代表的なもの)	廃棄物最終処分場 (代表的なもの)	1F地下貯水槽
遮水シート	遮水シート（塩化ビニルシート）1重等	遮水シート2重、あるいは遮水シート1重＋ベントナイト（粘土）または水密アスファルトコンクリート等	高強度かつ損傷検出が容易な遮水シート※ 2重＋ベントナイトシート1重を選定
掘削面の仕上げ	掘削整形等		掘削、掘削整形、地盤改良により平滑仕上げを実施
監視項目	水位監視等	ドレーン水のモニタリング等	(1)貯水槽内水位 (2)漏えい検知孔水位 (3)塩素イオン濃度モニタリング

※導電性を有する高密度ポリエチレンシート：製品不良や輸送時の損傷によるピンホールをスパーク検査によって確認できる特殊なシート。高密度ポリエチレンシートについては、既往の研究成果や試験結果より、耐放射線性能や耐塩水性能について問題ないことを確認済み。

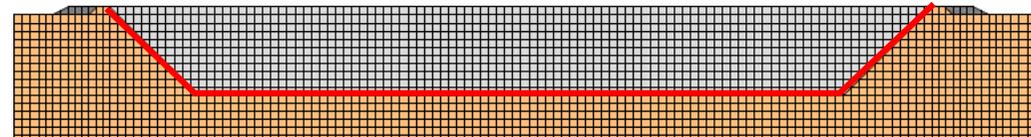
3. 設計上の配慮 ～ 耐震設計

- 地下貯水槽の遮水シートについて、常時および地震時に生じる地盤変形（ひずみ）を算出し、シートの最大引張ひずみと比較して、シートの健全性を評価（設計水平震度 $K_h=0.3$ 、 $K_h=0.6$ について評価）

（評価フロー）



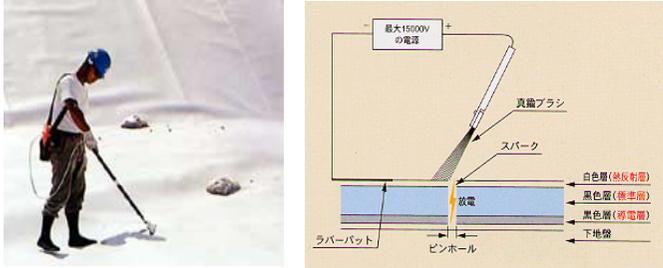
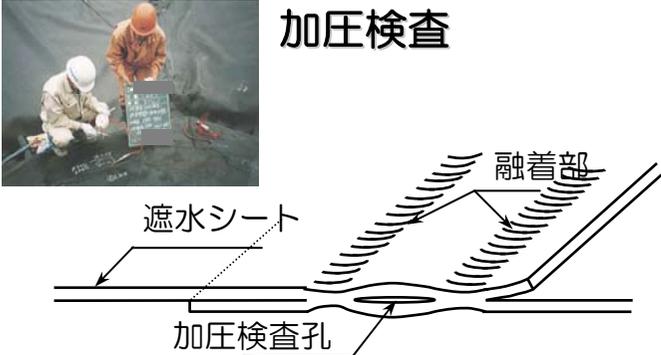
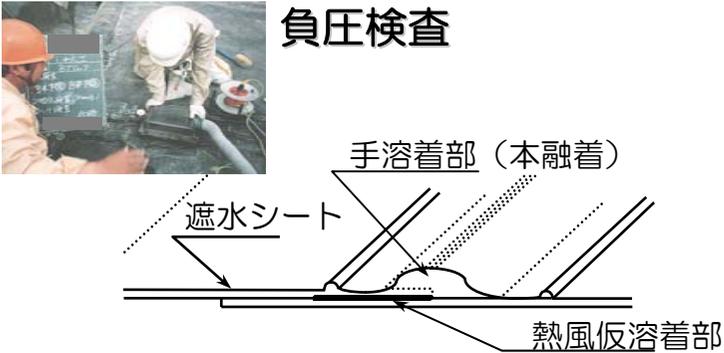
（解析モデル）



評価結果

	最大発生引張ひずみ ϵ_d (%)	評価基準値 ϵ_u (%)	ϵ_d / ϵ_u
$K_h=0.3$ の場合	0.148	560	0.00026
$K_h=0.6$ の場合	0.206	560	0.00037

4. 施工・品質管理上の配慮

部位等	検査	検査基準・対象	当社立会
遮水シート のピンホール 等	<p style="text-align: center;">スパーク検査</p> 	<p style="text-align: center;">スパークが発生しない こと (電圧15,000V以上)</p> <p style="text-align: center;">全面検査</p>	<p style="font-size: 1.2em;">全面立会</p>
溶着部の 不具合 (自動)	<p style="text-align: center;">加圧検査</p> 	<p style="text-align: center;">漏気がなく圧力低下率 が20%以下であること 〔 圧力150kPa 保持時間30秒 〕</p> <p style="text-align: center;">全数検査</p>	<p style="font-size: 1.2em;">全数立会</p>
溶着部の 不具合 (手動)	<p style="text-align: center;">負圧検査</p> 	<p style="text-align: center;">気泡が発生しないこと 〔 ゲージ圧-6.7kPa程度 保持時間10秒 〕</p> <p style="text-align: center;">全数検査</p>	<p style="font-size: 1.2em;">全数立会</p>

5. 事前に想定された不具合に対する考え方

考えられる不具合	区分	考え方
遮水シートの破損	設計	<ul style="list-style-type: none"> 十分な強度、伸び性能を有し、損傷の検出が容易な高密度ポリエチレンシートを採用（不織布を挟んで直接遮水シートに異物等があたらないように配慮） 高密度ポリエチレンシートの2重化+ベントナイトシートにより漏えいリスクを低減 耐放射線性能、耐塩水性能については社外の研究および試験結果より問題ないことを確認
	施工	<ul style="list-style-type: none"> 敷設面の状態については、シート敷設前に確認（当社が全面立会） 全面でスパーク検査を実施（当社が全面立会）
溶着部（自動）の不具合	設計	<ul style="list-style-type: none"> 溶着線を2重化することで自動溶着部の信頼性を向上
	施工	<ul style="list-style-type: none"> 全線で加圧検査を実施（当社が全数立会） <p>〔「廃棄物最終処分場の計画・設計・管理要領 2010改訂版（社団法人）全国都市清掃会議）」に準拠〕</p>
溶着部（手動）の不具合	設計	<ul style="list-style-type: none"> 手動溶着部の強度は、自動溶着部と遜色ないことを社外の試験結果により確認することで信頼性を確保
	施工	<ul style="list-style-type: none"> 全線で負圧検査を実施（当社が全数立会） <p>〔「廃棄物最終処分場の計画・設計・管理要領 2010改訂版（社団法人）全国都市清掃会議）」に準拠〕</p>
その他の不具合	水張り試験	<ul style="list-style-type: none"> 上記以外の想定できないような不具合については、施工完了後に水張り試験を実施して貯水位の低下がないことを確認

6. これまでの観測結果に対する考察

地下貯水槽	No1	No2	No3
貯水槽内水位	H25.4.6：No2から移送を開始 H25.4.8：57%に到達 H25.4.16：H2タンクに移送再開	H25.3.12：水位低下（95%以下に低下） H25.4.6：No1に移送開始（現在の貯水率約8%）	H25.2.8：水位95%に到達後変化なし H25.4.13～14：No.6に移送（現在の貯水率約80%）
漏えい検知孔内水位	—	H25.3.17：この日以降、若干の上昇傾向	特段の異常なし
サンプリング結果 (全ベータ)	H25.4.9：北東側検知孔の値が $1.0 \times 10^4 \text{Bq/cm}^3$ に上昇	H25.4.5：北東側検知孔の値が $5.8 \times 10^3 \text{Bq/cm}^3$ （初採水） H25.4.7：南西側検知孔の値が約 10Bq/cm^3 に上昇	H25.4.6：南西側検知孔の値が $1.8 \times 10^3 \text{Bq/cm}^3$ （初採水） 移送による水位低下に伴い、全ベータ、塩素濃度とも減少傾向
漏えい事象と水位の関係	水位57%（水深約3m）で保持している間も漏えいが発生していることから、水深3m以下の場所で発生している	現状の貯水率8%（水深約0.5m）でも汚染水が漏えい検知孔内に流入しているため、底部にごく近い場所で微量の漏えいが発生している可能性あり	移送による水位低下後、全ベータ、塩素濃度が下がっているが、データが少なく詳細は不明

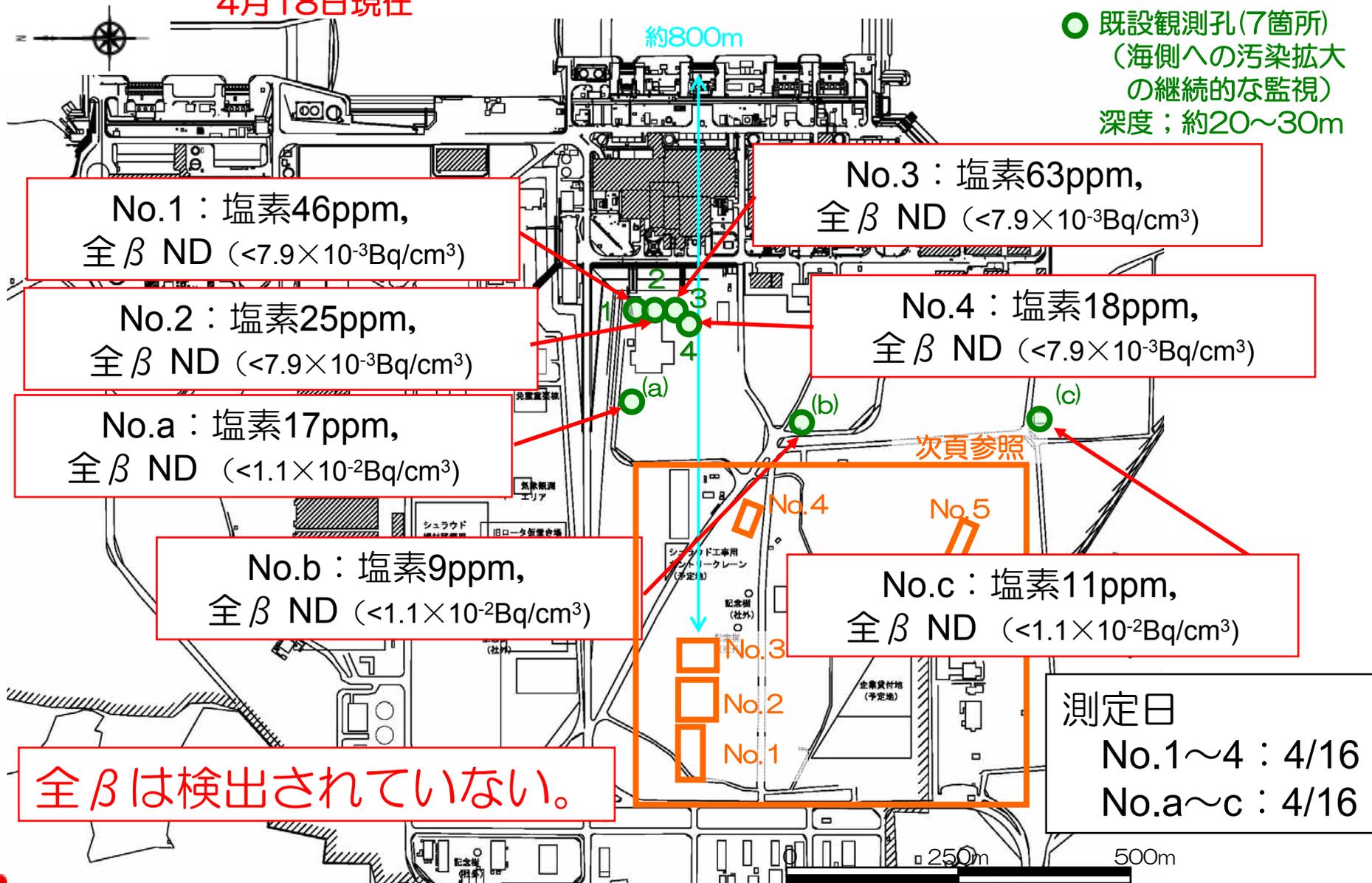
注）詳細な観測データについては参考1-1～1-3参照

7. 漏えいを踏まえた原因の推定と今後の方向性

- 事前に想定された不具合に対しては、設計・施工・品質管理において一定の配慮を行ってきたが、事実として漏えいが発生していることを踏まえ、改めて要因分析を実施した（別紙参照）
- その中で、水圧による応力集中やクリープ現象が発生するような場所については、供用開始後、局所的にシートが損傷するおそれが完全には否定できないと考え、具体的な漏えいメカニズムについて推定を行った（参考2-1～2-4参照）
- 今後は、汚染されたプラスチック製型枠や碎石の撤去には大きな困難が伴うことや、直接シートの状態を確認した場合でも損傷箇所の発見が極めて困難である可能性があることなどを踏まえ、さらなる原因究明に向けて、実験や地下貯水槽外周から漏えい箇所を推定する調査などの実施について検討を進めていく

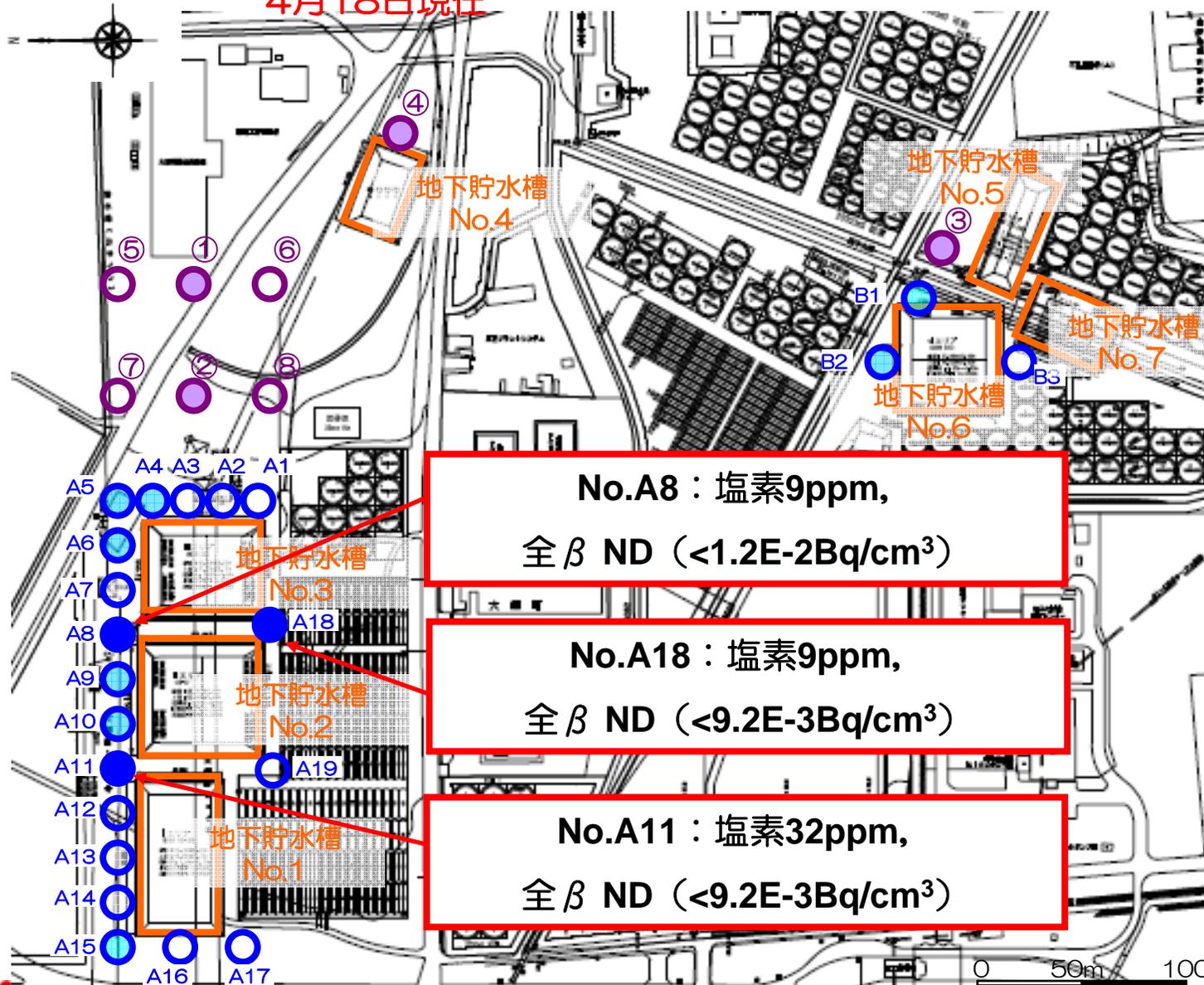
8. 現在の対応（1）～既設ボーリング孔モニタリング

4月18日現在



8. 現在の対応（2） ～ 新設ボーリング掘削とモニタリング

4月18日現在



○新設観測孔(22箇所)
(地下貯水槽周辺
の汚染状況の把握)
深度；約7~15m

- 削孔完了・採水
- 削孔中
- 準備中

○新設観測孔(8箇所)
(海側への汚染拡大
の継続的な監視)
深度；約20~30m

- 削孔完了・採水
- 削孔中
- 準備中

測定日：4/17

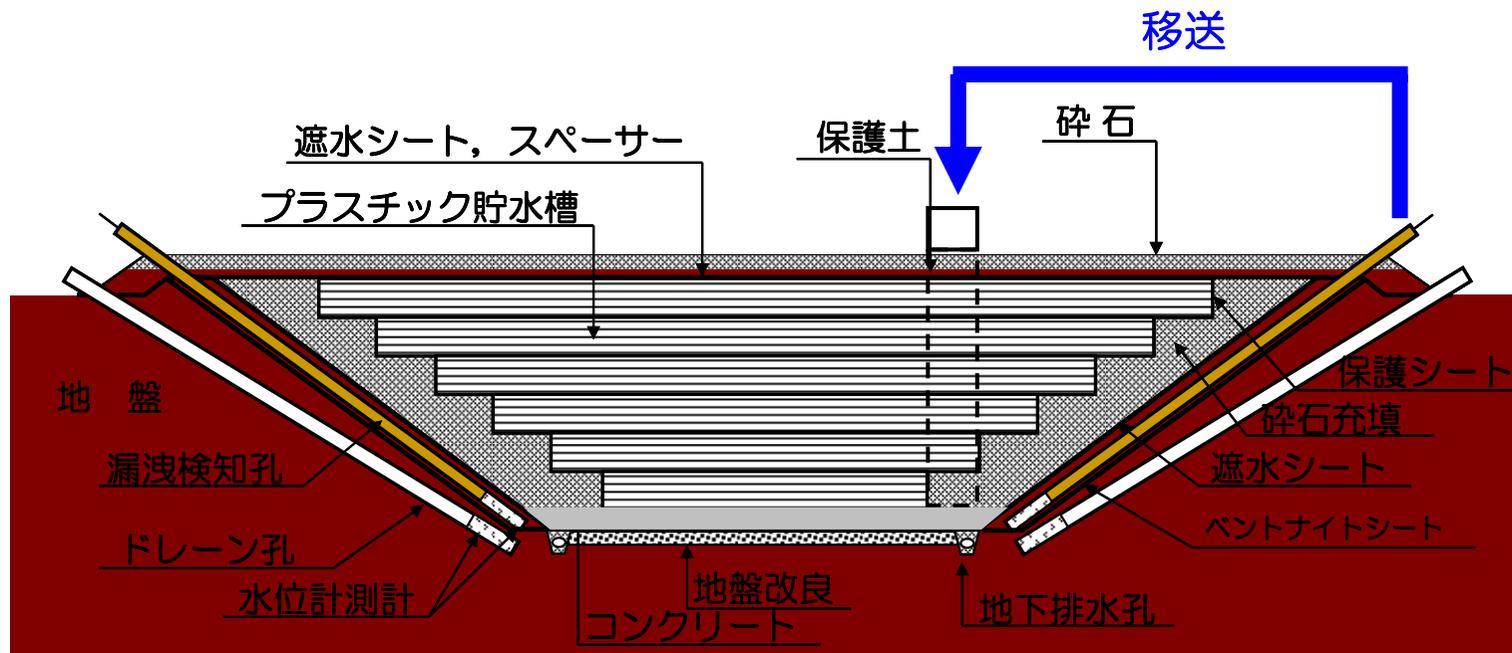
ND：検出限界値未満

0 50m 100m

8. 現在の対応（3） ～ 漏えい検知孔水抜き循環の実施

■4月18日現在

- No1地下貯水槽：4/10より開始し、4/18までに22回実施
（揚水量：1～17リットル程度／回）
- No2地下貯水槽：4/11より開始し、4/18までに17回実施
（揚水量：3～19リットル程度／回）
- No3地下貯水槽：4/13より開始し、4/18までに20回実施
（揚水量：2～35リットル程度／回）



9. 放射性物質の拡散の推定＜概要＞

■漏えいの監視はボーリング孔等で実施している。漏えい水の拡散の状況（地下貯水槽から海まで）を推定するために、放射性物質拡散の解析を実施した。

■海までの拡散解析の流れ

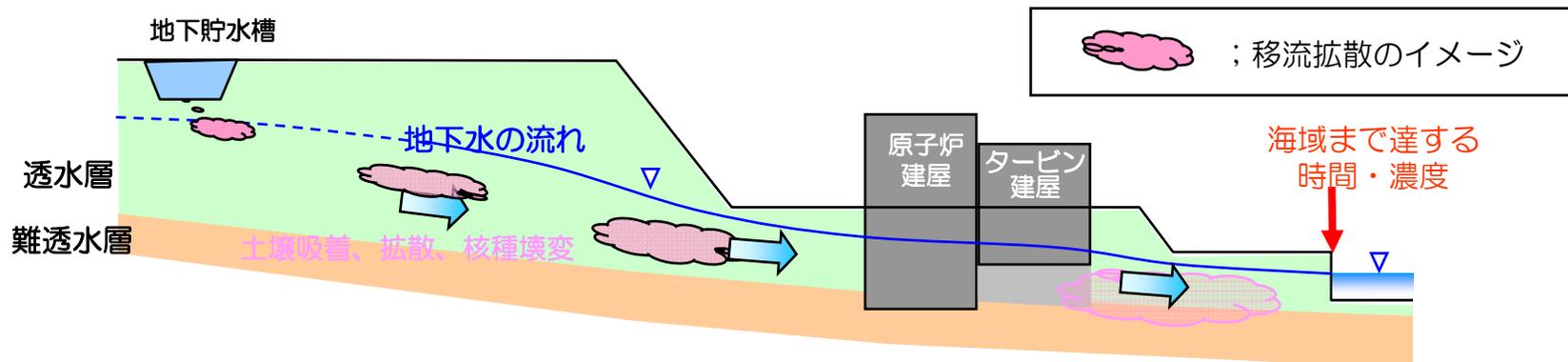
(1) 漏えい箇所からの地下水の流れの評価

・水粒子の流路、流下時間を一次元浸透流解析※を利用して推定

※山側から海側に勾配を持つ砂岩層内のみを流れる流れが卓越すると評価

(2) 核種の移流・拡散の評価（電力中央研究所）

・一次元核種移流拡散解析により地下水中の核種の移流時間、濃度変化を推定



・漏えい箇所から流出した核種の土壌への吸着、半減期などを考慮し、周辺土壌への拡散範囲・時間及び流出先での放射性物質濃度を推定する。

■漏えい監視のモニタリングの補助資料とするため、地下貯水槽の周辺に関して、3次元的な解析を用いて検討中。

9. 放射性物質の拡散の推定<結果>

- ・ 地下貯水槽位置での地下水位について、水位の異なる2ケースで検討を行った。
- ・ 漏えい水に含まれる代表的な核種（ストロンチウム-90、トリチウム）の解析結果は下表の通り。

ケース① 地下貯水槽付近の地下水位が貯水槽底部程度（O.P.+30m）と仮定して算出	海域まで移動する年数		10～10 ² 年程度 （水～ストロンチウム-90）
	海域に到達した時の最大濃度	ストロンチウム-90	10 ⁻⁷ 倍程度
		トリチウム	10 ⁻³ 倍程度
ケース② 地下貯水槽付近の地下水位が透水層底部程度（O.P.+20m）と仮定して算出。	海域まで移動する年数		20～10 ² 年程度 （水～ストロンチウム-90）
	海域に到達した時の最大濃度	ストロンチウム-90	10 ⁻⁸ 倍程度
		トリチウム	10 ⁻⁴ 倍程度

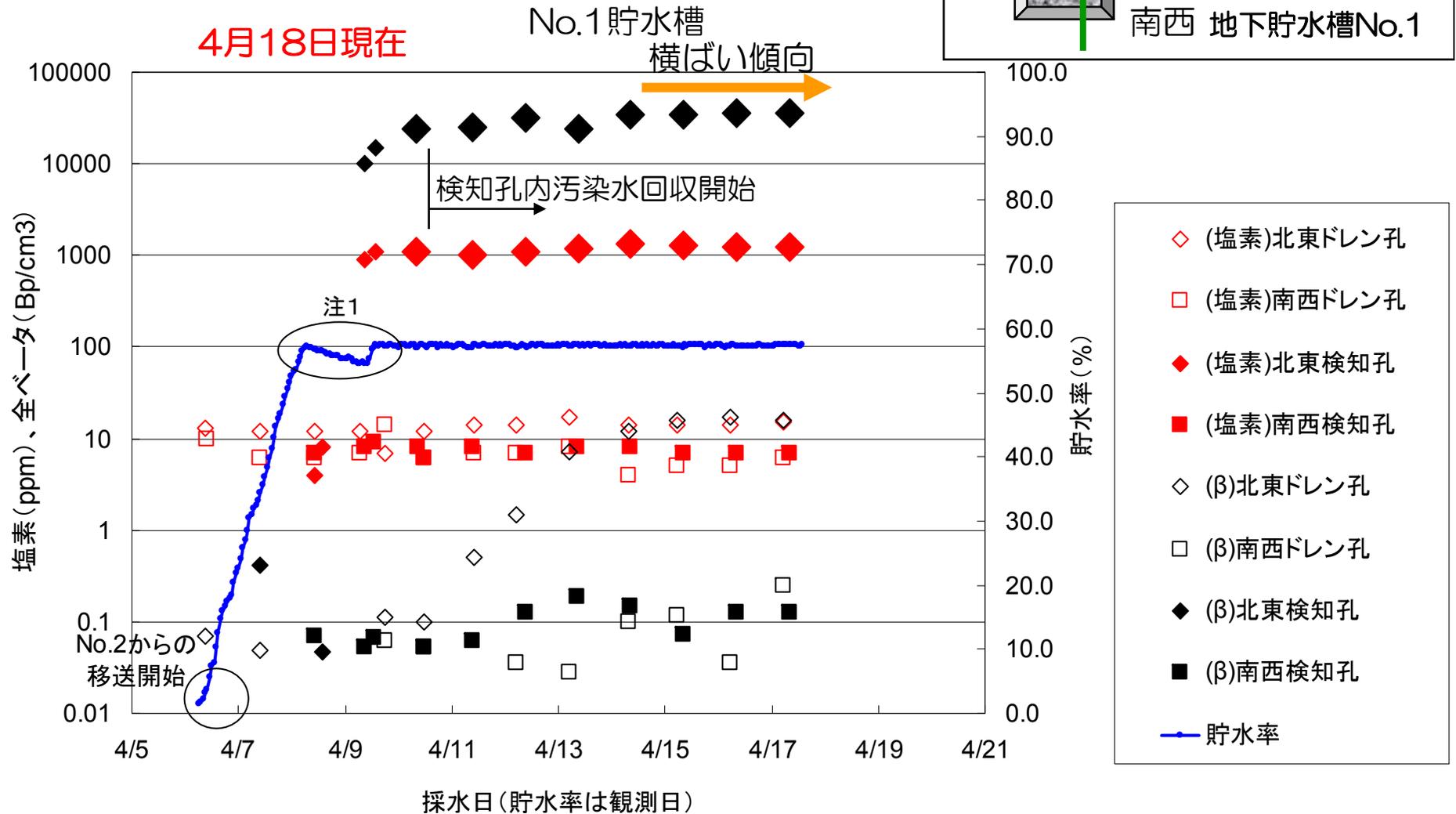
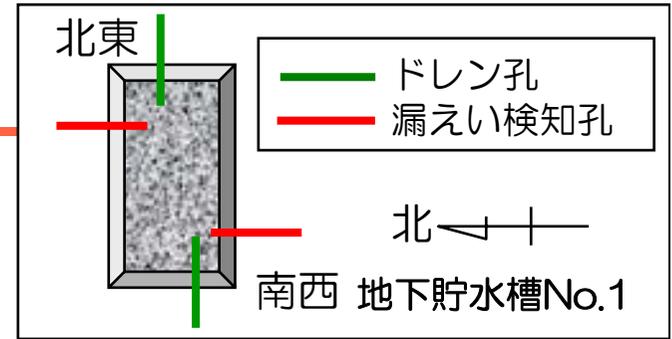
9. 放射性物質の拡散の推定<解析に用いた物性値>

- ・ 計算に関わる諸条件は、現時点で得られている情報・想定結果に基づいて設定。

項目		設定値	備考
浸透距離		880m	地下貯水槽から海域までの距離
透水係数		$3.0 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$	現地砂岩での透水試験結果から算定
間隙比		0.70	「福島第一原子力発電所 原子炉設置変更許可申請書」平成5年4月（平成5年7月一部補正）
比重		2.65	
分配係数(ストロンチウム-90)		$1.0 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{kg}$	JAEAの収着データベースSDBより（砂岩）
半減期	トリチウム	12.3年	—
	ストロンチウム-90	28.9年	—
分散長		移行距離の1/10	Gelhar et al.,1992. A critical review of data on field-scale dispersion in Water Resources Research, Vol.28(7) ,pp.1955-1974.

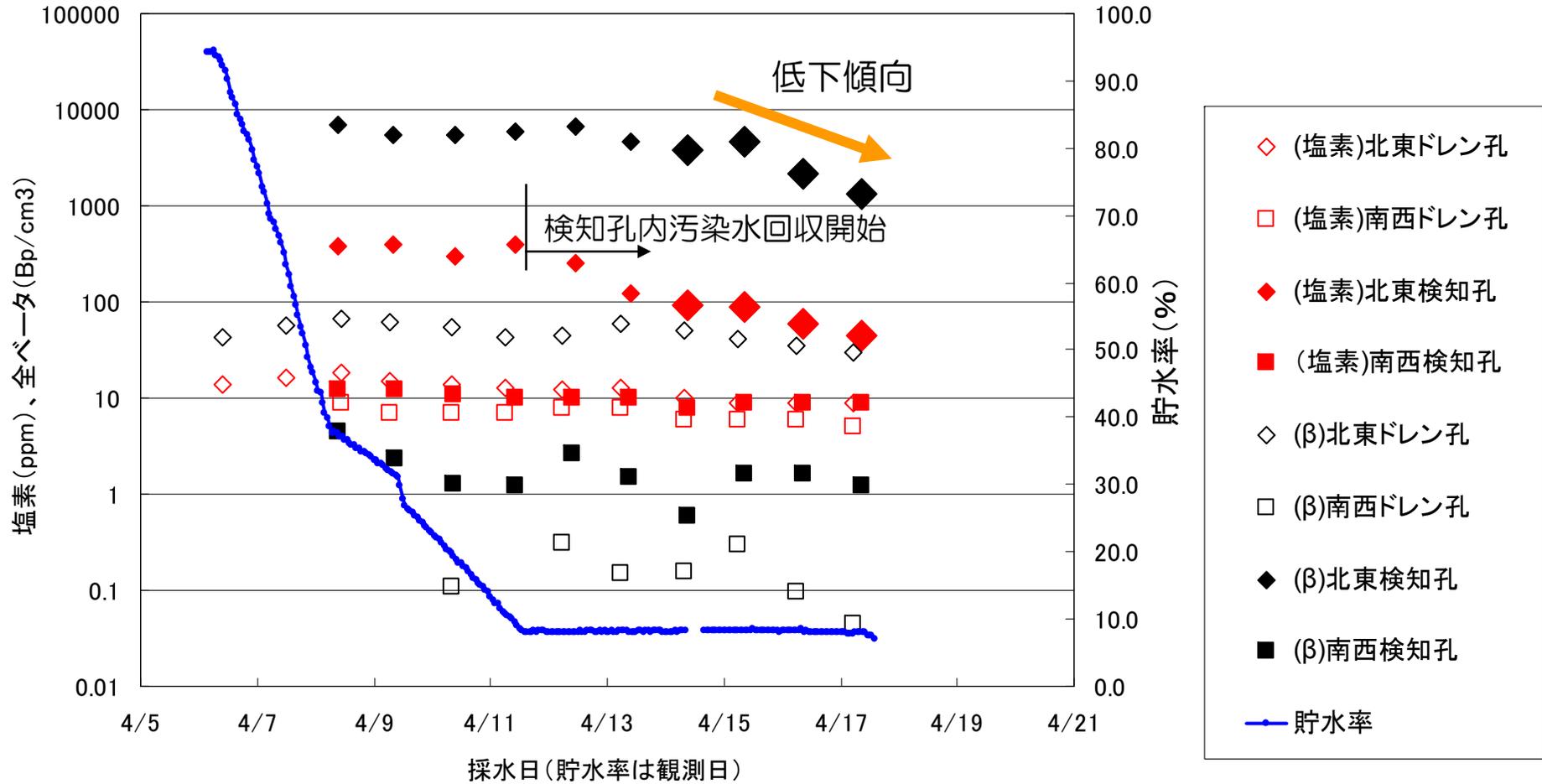
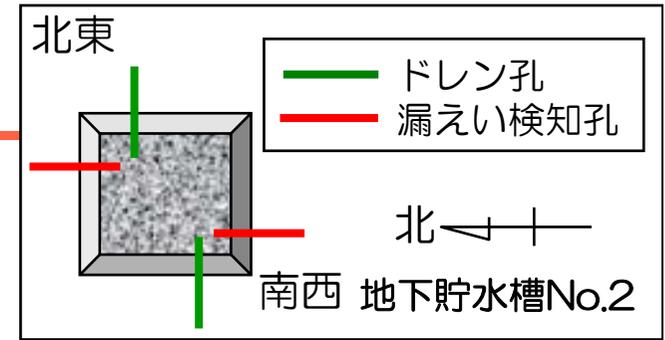
【参考1-1】 No1のモニタリングデータ

注1：地下貯水槽No.2からNo.1への移送ポンプ停止後、サイフォン効果によりNo.2に水が一部戻ったため水位低下。4/9に再度移送。

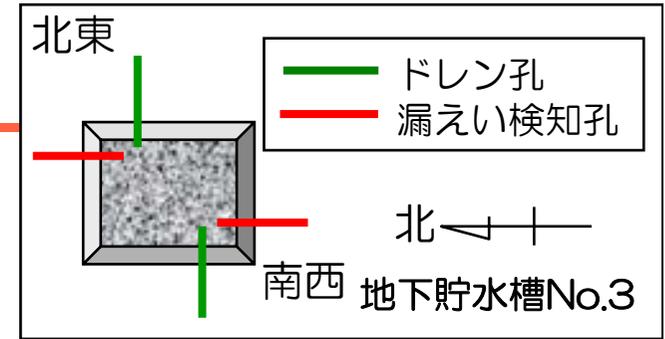


【参考1-2】 No2のモニタリングデータ

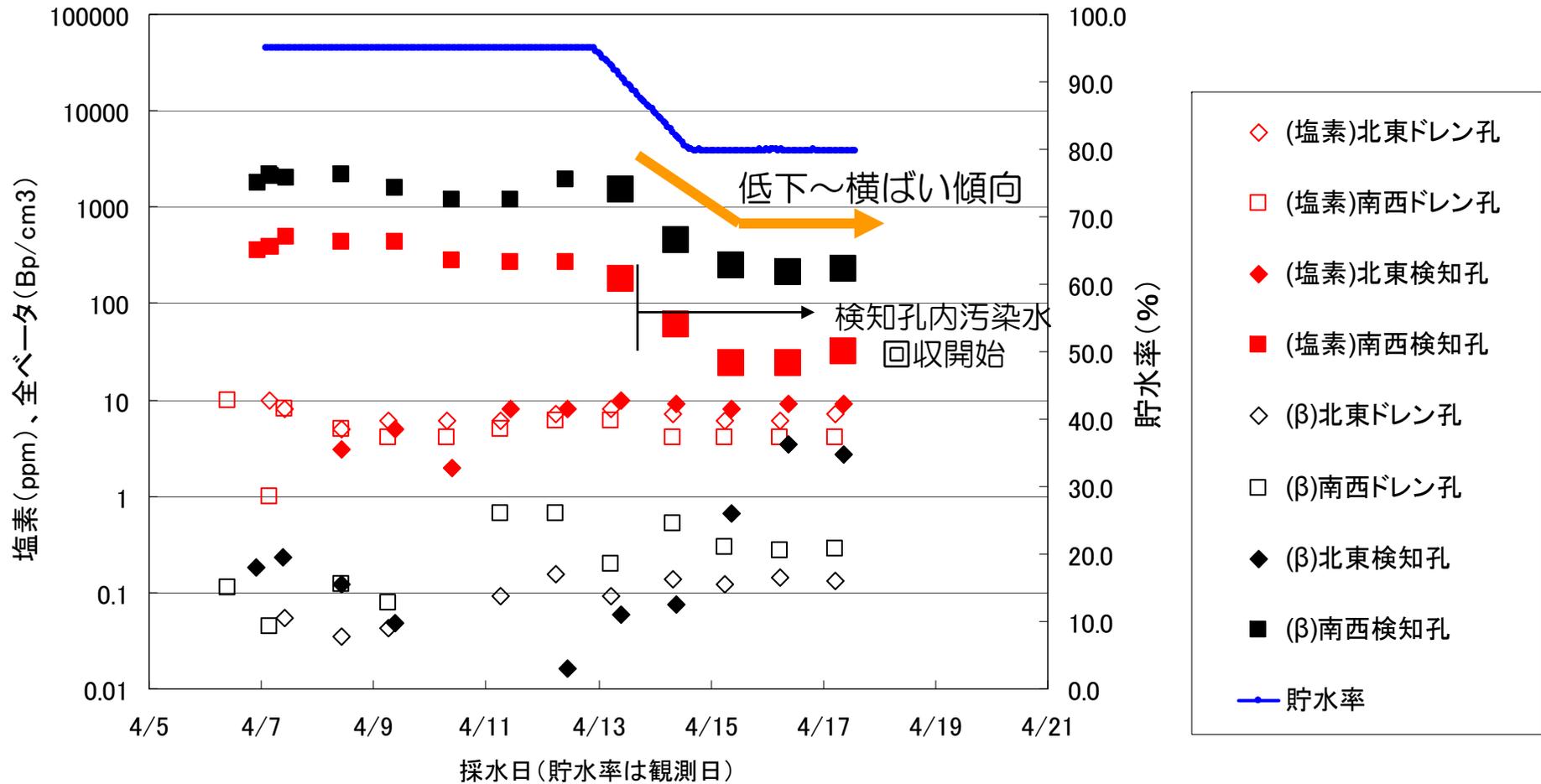
4月18日現在 No.2貯水槽



【参考1-3】 No3のモニタリングデータ

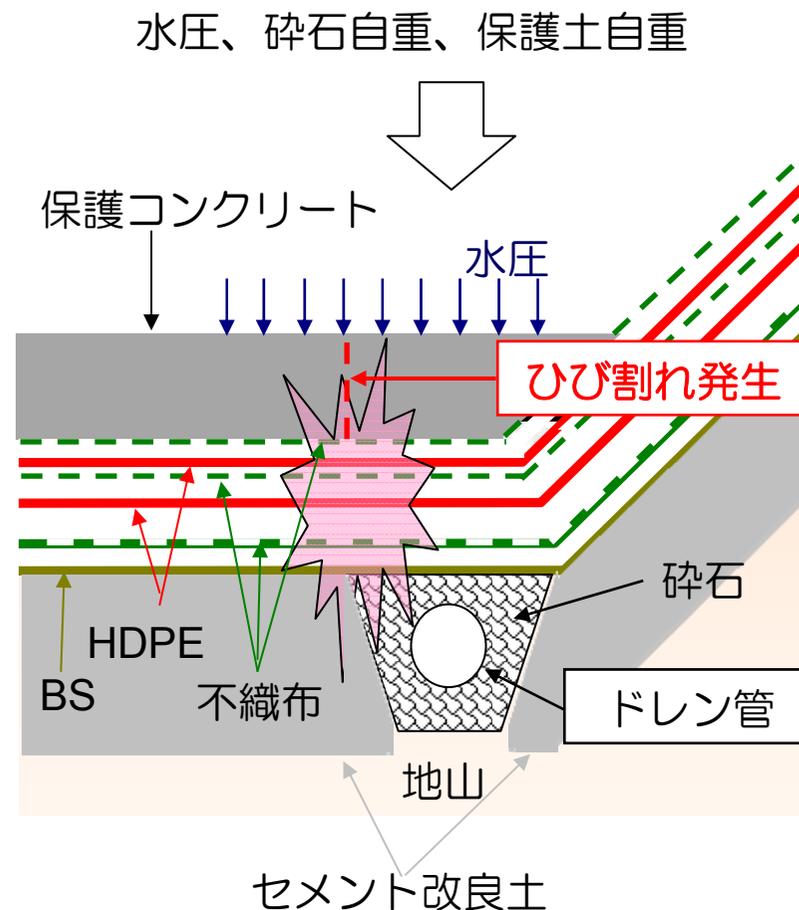


4月18日現在 No.3貯水槽



【参考2-1】 底盤部・ドレン管理設部の損傷(原因推定)

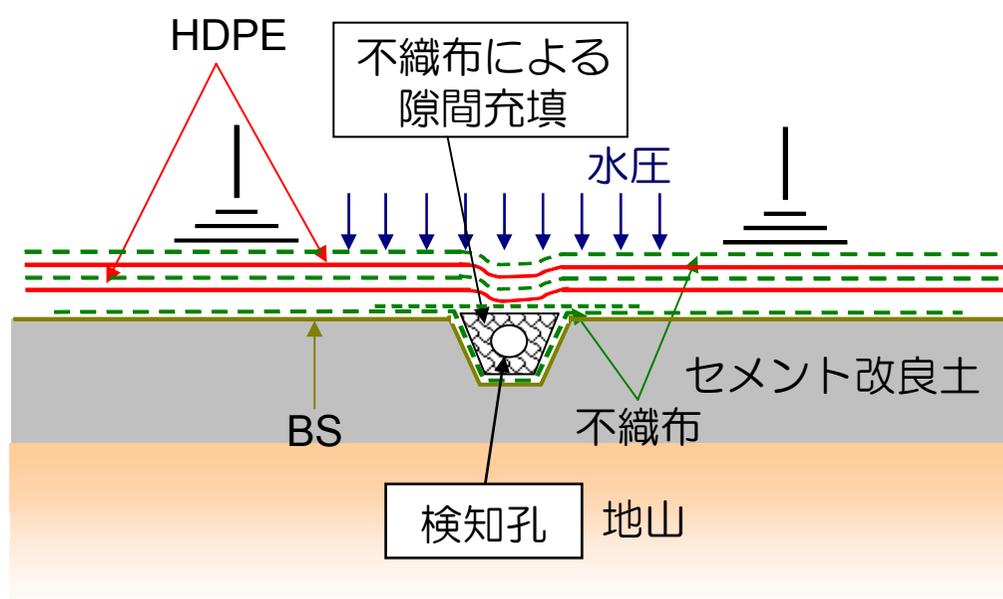
- 底盤部のドレン管は地山を掘削した底面にセメント改良土を敷き詰め、改良土を凹型に掘り込み設置。その上・下・横の隙間には碎石を充填し、その上に養生マット、遮水シートを敷設。
- 充填碎石の締め固め不良、圧密沈下および水圧の作用により、その真上の保護コンクリートにひび割れが発生・破損し、遮水シートに局所的なせん断応力が発生して破損に至るおそれがあると推定した。



底部ドレン管の設置状況・
損傷イメージ図

【参考2-2】 法面部・漏えい検知管 設置部の損傷(原因推定)

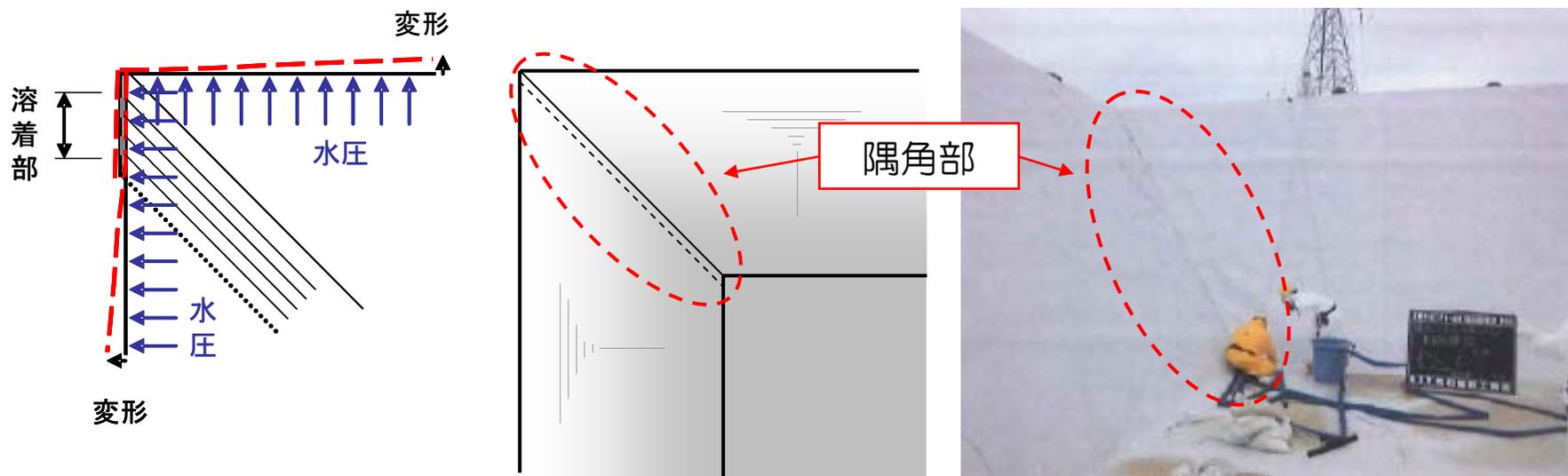
- 漏えい検知孔は地山を掘削した斜面にセメント改良土を貼り付け、改良土を凹型に掘り込み設置。その上・横の隙間に不織布を充填し、その上に不織布・遮水シートを敷設。
- 不織布による隙間充填の不良によりシート下面に凹凸が残り、水圧によりシートが変形、**局部に応力集中が発生して破損するおそれがあると推定した。**



検知孔の設置状況・変形損傷イメージ図・設置状況写真

【参考2-3】 法面隅角部・自動溶着部の損傷(原因推定)

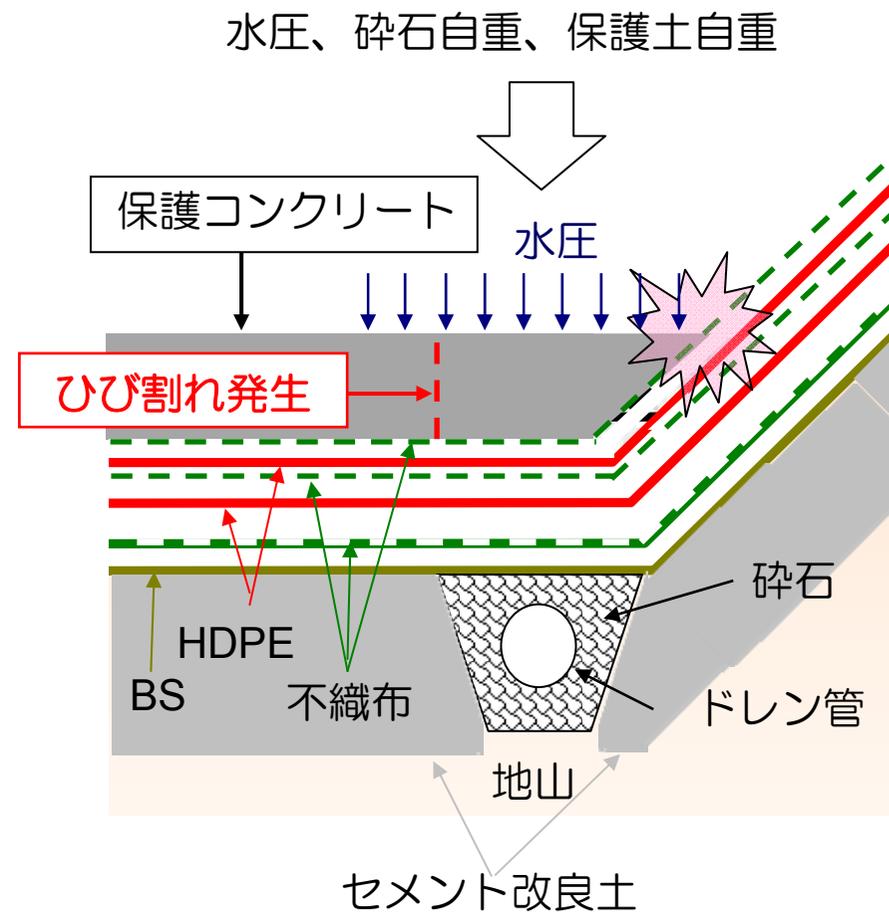
- 法面隅角部には、施工上の問題から自動溶着による遮水シートの継目が配置されている。
- また法面隅角部では、遮水シートと地盤の間に隙間が生じやすい。
- 貯水による水圧作用により、隅角部に応力が集中、大きな変形が発生し、**損傷が発生するおそれ**があると推定した。



法面隅角部溶着部の変形イメージ図、施工状況写真

【参考2-4】 底盤保護コンクリート接触部の損傷(原因推定)

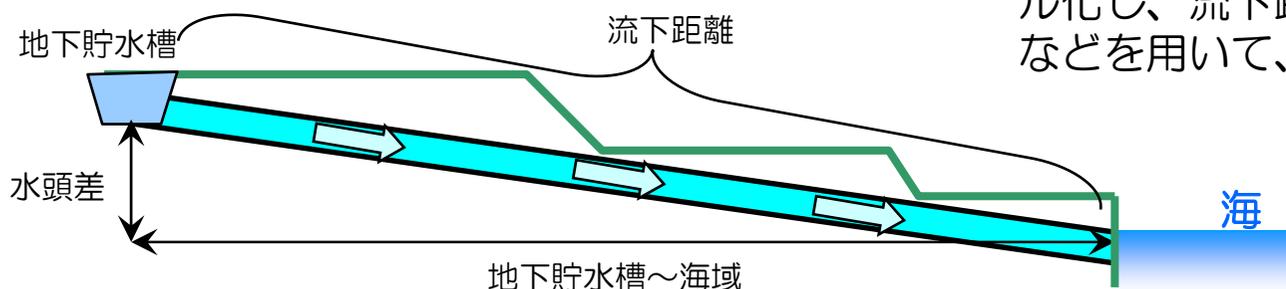
- 底盤保護コンクリートには、ドレン管充填砕石の締め固め不良、圧密沈下および水圧の作用により、ひび割れが発生・破損するおそれがある。
- またこれに伴い、保護コンクリート端部（鋭角部）が遮水シートに接触し、遮水シートに損傷を与えるおそれがあると推定した。



保護コンクリートの設置状況・
損傷イメージ図

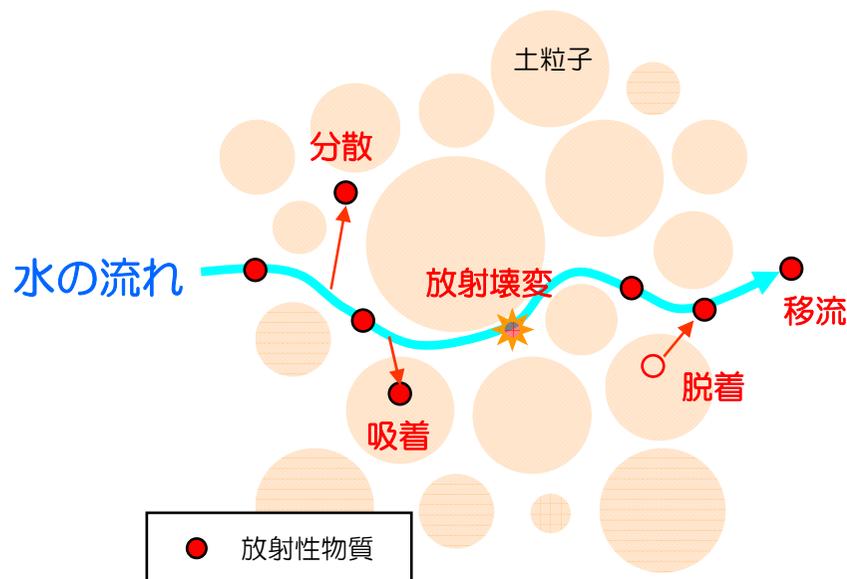
【参考3】放射性物質の一次元拡散解析のイメージ

(1) 漏えい箇所からの地下水の流れの評価



図のように一次元で地下水の流れをモデル化し、流下距離、動水勾配、透水係数などを用いて、流下時間を算定した。

(2) 核種の移流・拡散の評価



地下水の流下距離・流下時間を基に放射性物質の移流、分散、放射壊変、吸着、脱着を考慮して、流出先での放射性物質濃度変化を推定する。

地下貯水槽からの漏えいに対する要因分析表

別紙

不具合発生時期	不具合発生箇所		不具合発生メカニズム	確認時期			設計・施工の留意点・確認事項（解説）	
				設計	施工	水張り		
1) 製品製造時～輸送時	① シート素材		・放射線、放射性物質で腐食・破断	○			・設計時 文献調査により耐久性がある材料を選定している ・施工時 遮水シートの下地50cmについてセメント改良土として均質化するとともに、不織布の敷設、遮水シートを二重化することにより信頼性を向上させている（以下、共通のため記載省略）	
			・塩分等 化学物質で腐食・破断	○			・同 上	
			・輸送時等のピンホールの発生による漏えい	○	○	○	・施工時 外観検査やシート敷設後にスパーク検査を全面実施することにより損傷の有無を確認するとともに、水張り試験で問題が無いことを確認している	
2) 地下貯水槽施工時	① 一般部	a. 底盤部	・ドレーン管理設部の充填砕石による破断	○	○	○	・設計時 砕石上に養生マットを敷設し、遮水シートを保護することで信頼性を向上させている ・施工時 シート敷設後にスパーク検査を全面実施することにより損傷の有無を確認するとともに、水張り試験で問題が無いことを確認している	
			・異物の飛来・落下によるシートの損傷	○	○	○	・施工時 シート敷設後にスパーク検査を全面実施することにより損傷の有無を確認するとともに、水張り試験で問題が無いことを確認している	
			・コンクリート打設による破断	○	○	○	・設計時 コンクリートの下に不織布を敷設し、遮水シートを保護することで信頼性を向上させている ・施工時 保護コンクリートの打設監理により確認するとともに、水張り試験で問題が無いことを確認している	
		b. 法面部	・昇降設備（縄ばしご等）によるシートの損傷	○	○	○	・施工時 シート敷設後にスパーク検査を全面実施することにより損傷の有無を確認するとともに、水張り試験で問題が無いことを確認している	
			・貯水ブロックと遮水シート間の中詰め砕石投入による破断	○	○	○	・設計時 遮水シートの上に不織布を敷設し、遮水シートを保護することで信頼性を向上させている ・設計時 施工前に施工試験を実施し、問題が無いことを確認している ・施工時 水張り試験で問題が無いことを確認している	
		c. 隅角部	・保護コンクリートの溶接金網の接触による破断	○	○	○	・施工時 保護コンクリートの打設前検査および打設監理（溶接金網が遮水シートに触れていないことを確認）するとともに、水張り試験で問題が無いことを確認している	
	②-1 溶着部（自動溶着部）		a. 底盤部	・溶着不良箇所からの漏えい	○	○	○	・施工時 溶着部の加圧検査を全線実施および現場強度試験を実施するとともに、水張り試験で問題が無いことを確認している
			b. 法面部	・溶着不良箇所からの漏えい	○	○	○	・同 上
		c. 隅角部	・溶着不良箇所からの漏えい	○	○	○	・同 上	
	②-2 溶着部（手溶着部）	a. 底面・隅角部		・溶着不良箇所からの漏えい	○	○	○	・施工時 溶着部の負圧検査を全線実施するとともに、水張り試験で問題が無いことを確認している
		③ 漏えい検知孔貫通部周辺部	a. 手溶着部	・漏えい検知孔貫通部	・シートの引き込み沈下による溶着部の破損・変形	○		
	・パッチ～シート			・シートの引き込み沈下による溶着部の破損・変形	○	○	○	・施工時 手溶着部は施工が難しいことから、溶着部の負圧検査を全線実施するとともに、水張り試験で問題が無いことを確認している（なお、No2地下貯水槽で掘削調査した結果、異常が無いことを確認している）
	④ 保護コンクリート部	a. 底部		・溶接金網施工時に遮水シートに損傷	○	○	○	・施工時 保護コンクリートの打設前検査、打設監理および水張り試験で問題が無いことを確認している
		3) 地下貯水槽供用開始後	① 一般部	a. 底盤部	・一般部	・底盤一般部からの漏えい	○	○
・飛来・落下した異物の残置箇所への水圧作用によるシートの損傷	○				○	○	・施工時 シート敷設前に全面確認（目視）を実施するとともに、水張り試験で問題が無いことを確認している	
・ドレーン管理設部	・ドレーン管理設部への応力集中による破断			○	○	○	・設計時 砕石上に養生マットを敷設し、遮水シートを保護することで信頼性を向上させている ・施工時 水圧作用により底盤保護コンクリートにひびわれが発生しシートの破損につながることを防ぐため、不織布を敷設するとともに、水張り試験で問題無いことを確認している ・ただし、当該箇所は応力集中・クリープ現象によるシート損傷のおそれが否定しきれないため、具体的な損傷メカニズムを検討する 【参考2-1】	
	・法面一般部からの漏えい			○	○	○	・施工時 シート敷設後にスパーク試験を全面実施することにより損傷の有無を確認するとともに、水張り試験で問題が無いことを確認している	
b. 法面部	・漏えい検知管設置部			・漏えい検知管設置部への応力集中による破断（シート下面の空洞によりシートが変形し破損）	○	○	○	・設計時 検知孔上部に不織布を敷設することで信頼性を向上させている ・施工時 漏えい検知管敷設部とシートとの間に隙間が残り、供用開始後、徐々にシートが変形して破損に至ることを防ぐため、不織布で隙間を充填するとともに、水張り試験で問題が無いことを確認している ・ただし、当該箇所は応力集中・クリープ現象によるシート損傷のおそれが否定しきれないため、具体的な損傷メカニズムを検討する 【参考2-2】
	・一般部			・溶着不良箇所からの漏えい	○	○	○	・施工時 溶着部の加圧検査を全線実施および現場強度試験を実施するとともに、水張り試験で問題が無いことを確認している
② 溶着部	a. 自動溶着部		・隅角部	・溶着不良箇所+隅角部の応力集中により破断	○	○	○	・設計時 法面隅角部の自動溶着部には応力が集中するため、供用開始後、徐々に溶着部が変形して破損に至ることを防ぐため、伸び能力が十分な材料を採用している ・施工時 溶着部の加圧検査を全線実施するとともに、水張り試験で問題が無いことを確認している ・ただし、当該箇所は応力集中・クリープ現象によるシート損傷のおそれが否定しきれないため、具体的な損傷メカニズムを検討する 【参考2-3】
			b. 手溶着部		・溶着不良箇所からの漏えい	○	○	○
③ 漏えい検知孔貫通部周辺部	a. 手溶着部		・漏えい検知孔貫通部	・シートの引き込み沈下による溶着部の破損・変形	○			・設計時 異種材料の溶着であり、溶接不良になり易いことを防ぐため、伸び能力が十分な材料を採用している（なお、No2地下貯水槽で掘削調査した結果、異常が無いことを確認している）
			・パッチ～シート	・シートの引き込み沈下による溶着部の破損・変形	○	○	○	・施工時 手溶着部は施工が難しいため溶着不足も生じやすいことから、供用開始後、徐々に溶着部が変形して破損に至ることを防ぐため、溶着部の負圧検査を全線実施するとともに、水張り試験で問題が無いことを確認している（なお、No2地下貯水槽で掘削調査した結果、異常が無いことを確認している）
④ 保護コンクリート接触部	a. 法面部		・水圧により保護コンクリートにひびわれが生じ、エッチ部がシートに接触してシートが破損	○	○	○	・設計時 水圧作用により底盤コンクリートにひび割れが発生、端部（鋭角部）が法面部のシートに接触し、シートの破損につながることを防ぐため、遮水シート上面に不織布を敷設して保護している ・施工時 水張り試験で問題が無いことを確認している ・ただし、当該箇所は応力集中・クリープ現象によるシート損傷の恐れが否定しきれないため、具体的な損傷メカニズムを検討する 【参考2-4】	

応力集中やクリープ現象によるシート損傷の可能性が完全には否定できないと考えられる項目