

陸側遮水壁の閉合について

2016年3月3日
東京電力株式会社

建屋内外の水位管理は従来はO.P.表記からT.P.表記で実施することになっているが、これまでの資料との整合性を考慮しO.P.表記を併記して資料を作成した。
(水位(T.P.)を水位(O.P.)に換算する場合は、約1.4m～1.5m加算する。)

陸側遮水壁の閉合の進め方

- 特定原子力施設監視・評価検討会（第40回）で報告のとおり，陸側遮水壁の海側の閉合を先行させ，陸側遮水壁の山側についても段階的な閉合を目指す方針とする。
- 陸側遮水壁の閉合は以下の3段階で進める。
 - 第一段階：海側全面閉合＋山側部分閉合する段階
 - 第二段階：第一段階と第三段階の間の段階
 - 第三段階：完全閉合する段階

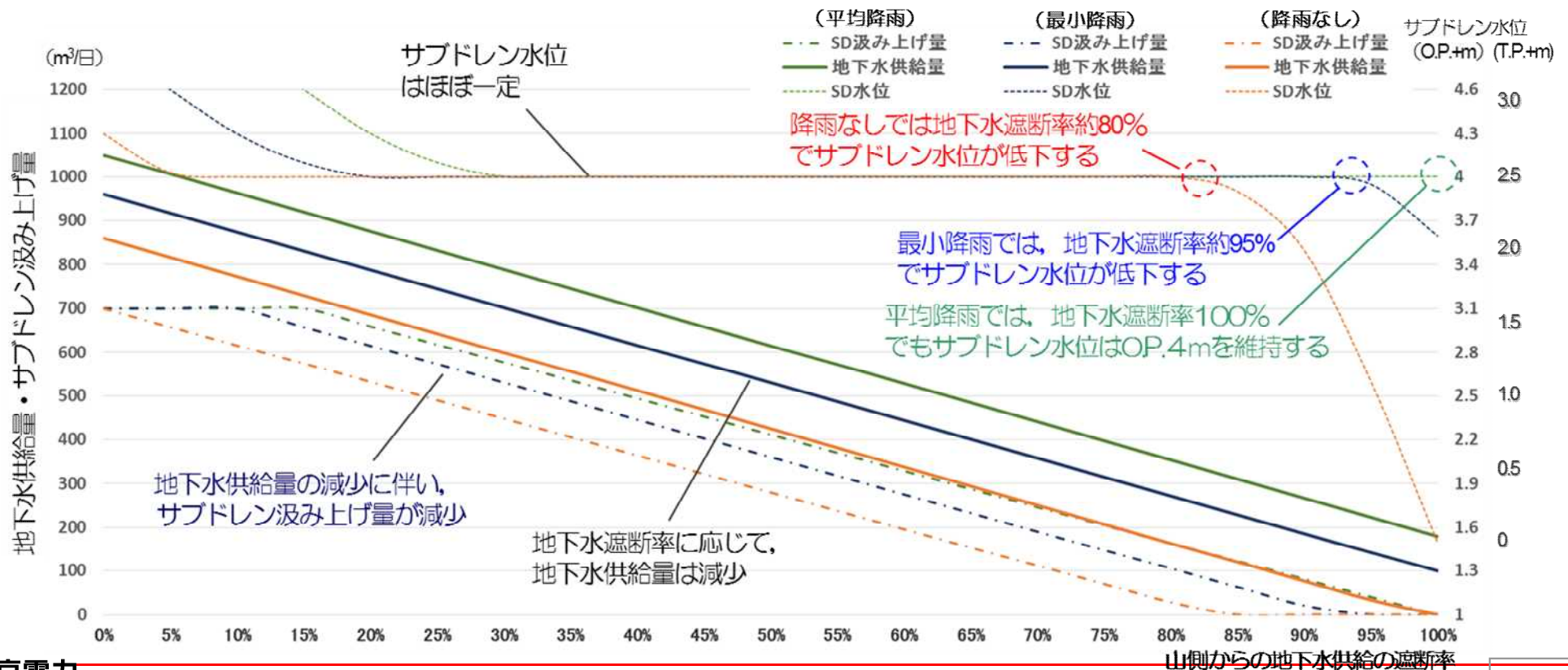
第一段階の定義

- サブドレンが稼働していることを前提に，建屋周りの地下水位が低下した際にも，サブドレンを停止することで迅速かつ確実に地下水位が回復でき，建屋水位と地下水位の逆転リスクが極めて低い段階

【参考】第一段階 山側の閉合率の考え方

- 地下水遮断率※¹とサブドレン汲み上げ量，サブドレン水位の関係を見ると，最小降雨（2mm/日）時には地下水遮断率約95%までサブドレンは稼働し，降雨なしの状態を想定しても地下水遮断率約80%までサブドレンは稼働している状態が保たれている。
- 解析によると，山側の閉合率※²95%に対して，地下水遮断率は約50~60%（p23参照）であり，降雨なしの状態でサブドレンが停止し水位が低下する変曲点である約80%よりも十分低い値となっている。
- 第一段階では，十分余裕を持ってサブドレンが稼働を継続できるように山側の閉合率を95%とする。

※1：山側からの地下水流入の減少率を地下水遮断率とする
 ※2：山側総延長に対して閉合する長さの割合



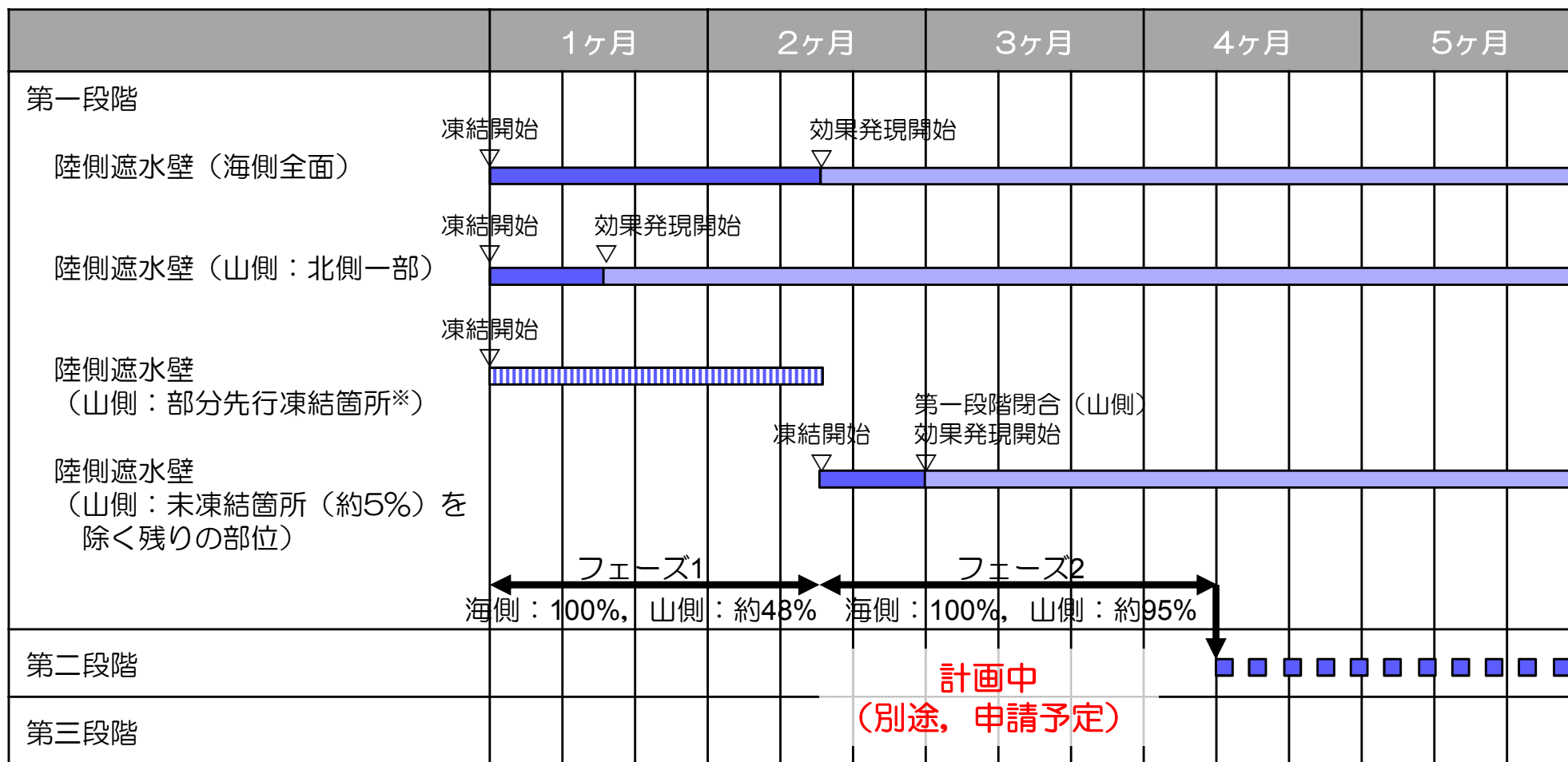
- 陸側遮水壁では以下に示す実施計画の認可を得ており、設置工事を行い2016年2月9日に工事が完了し、全ての凍結開始準備が整った。
 - ✓ 山側ライン上の埋設物との干渉箇所での貫通施工による凍結管設置工事
 - ✓ 海側ライン上の埋設物との干渉箇所での貫通施工による凍結管設置工事
 - ✓ 陸側遮水壁造成後の基礎地盤沈下検討
 - ✓ 山側ライン上の運用中の設備の損傷防止対策
 - ✓ 海側ライン上の運用中の設備の損傷防止対策
 - ✓ 不明埋設物への対応
 - ✓ 陸側遮水壁（山側ライン）における試験凍結の実施

- 今回の陸側遮水壁閉合に関する申請範囲は、以下の通り。
 - ✓ **陸側遮水壁海側全面閉合及び山側段階閉合（第一段階）**

※第二段階、第三段階は**別途申請**を行う

陸側遮水壁 第一段階の実施工程

- 第一段階では更に段階的に2つのフェーズを設け、フェーズ毎の凍結状況を確認しながら慎重に閉合を進める。
- フェーズ1では、陸側遮水壁の「海側全面」、「北側一部」、「山側の部分先行凍結箇所（凍結管間隔が広く凍りにくい箇所）」を同時に凍結する。これにより山側の閉合範囲は山側総延長の約48%となる。
- フェーズ2では、海側の遮水効果発現開始に併せて第一段階の「未凍結箇所（詳細は後述）」を除く山側の残りの部位を凍結する。これにより山側の閉合範囲は山側総延長の約95%となる。



※ 山側未凍結箇所（約5%）を除く残りの部位の凍結を開始するまで部分先行凍結を継続する

: 凍結開始～効果発現開始
 : 効果発現開始後，凍土成長～維持
 : 部分先行凍結

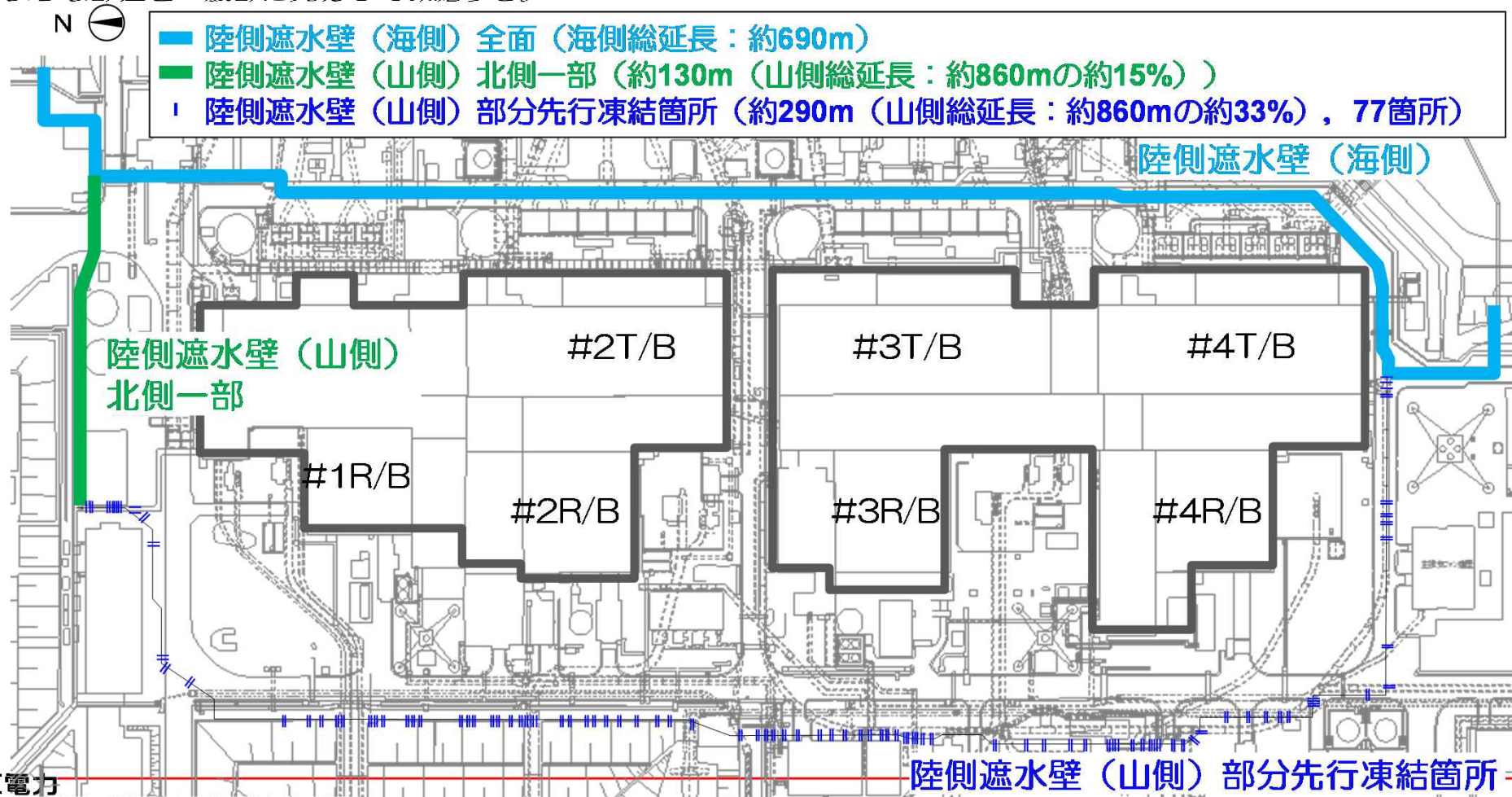
第一段階 閉合範囲（フェーズ1）

- 第一段階（フェーズ1）では、以下の3つの範囲を先行して同時に凍結する。

海側全面 + 北側一部 + 山側部分先行凍結箇所

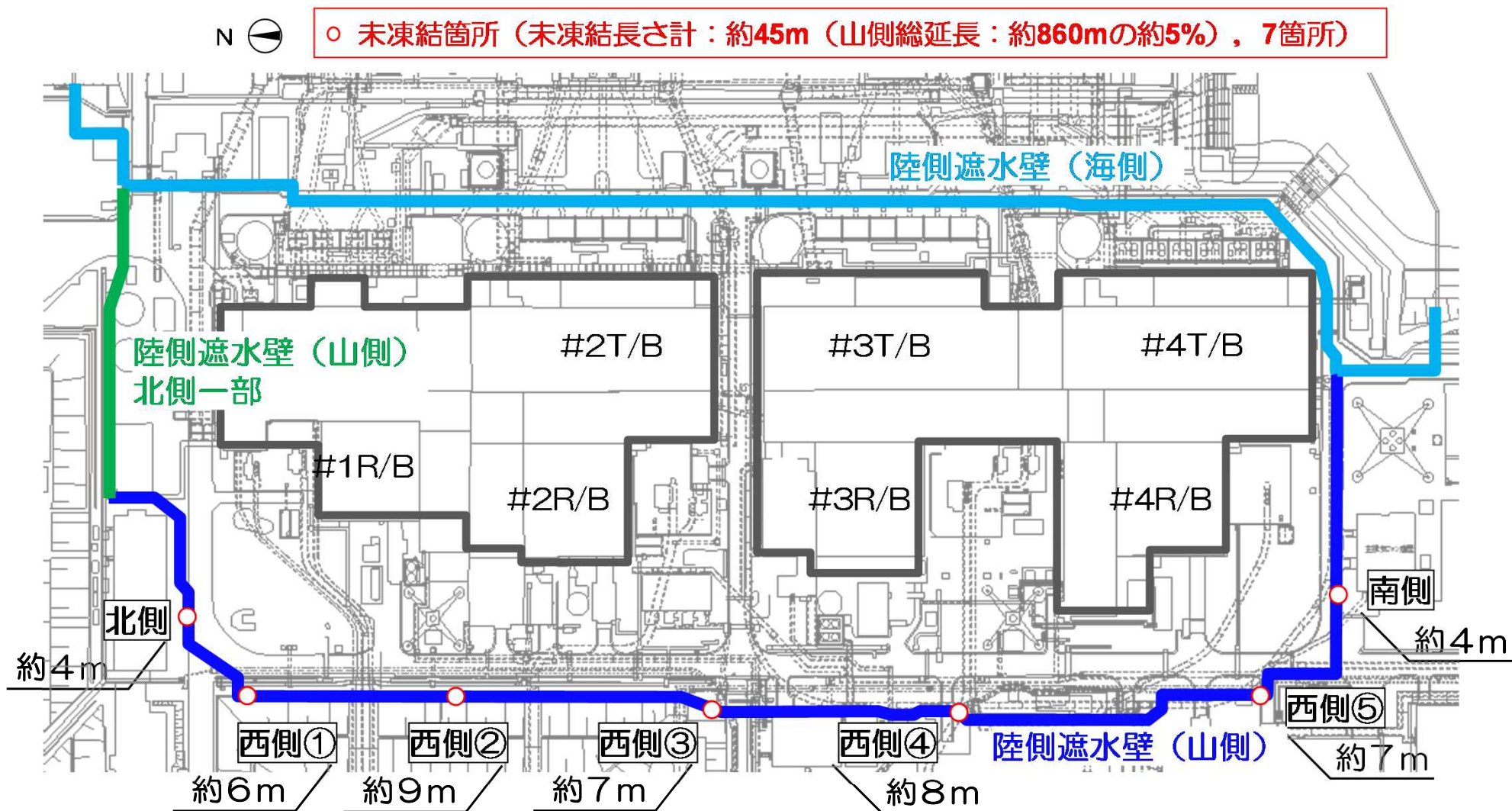
- 海側全面：山側より先行させることにより、水位逆転リスクを低減するため
- 北側一部：1号機建屋周辺の地下水の拡散を抑制するため
- 部分先行凍結箇所：凍結に時間を要すると予想される部位を先行し、確実に凍結するため※

※ 凍結管間隔が広い箇所（複列施工箇所など）は、一般部（凍結管間隔：約1m）と比較して、凍結に時間を要するため、一般部と同時に凍結開始した場合、地下水流が集中し、さらに凍結しにくくなる事象が想定される。これを避けるため、そのような部位を一般部に先行して凍結する。



第一段階 閉合範囲（フェーズ2）

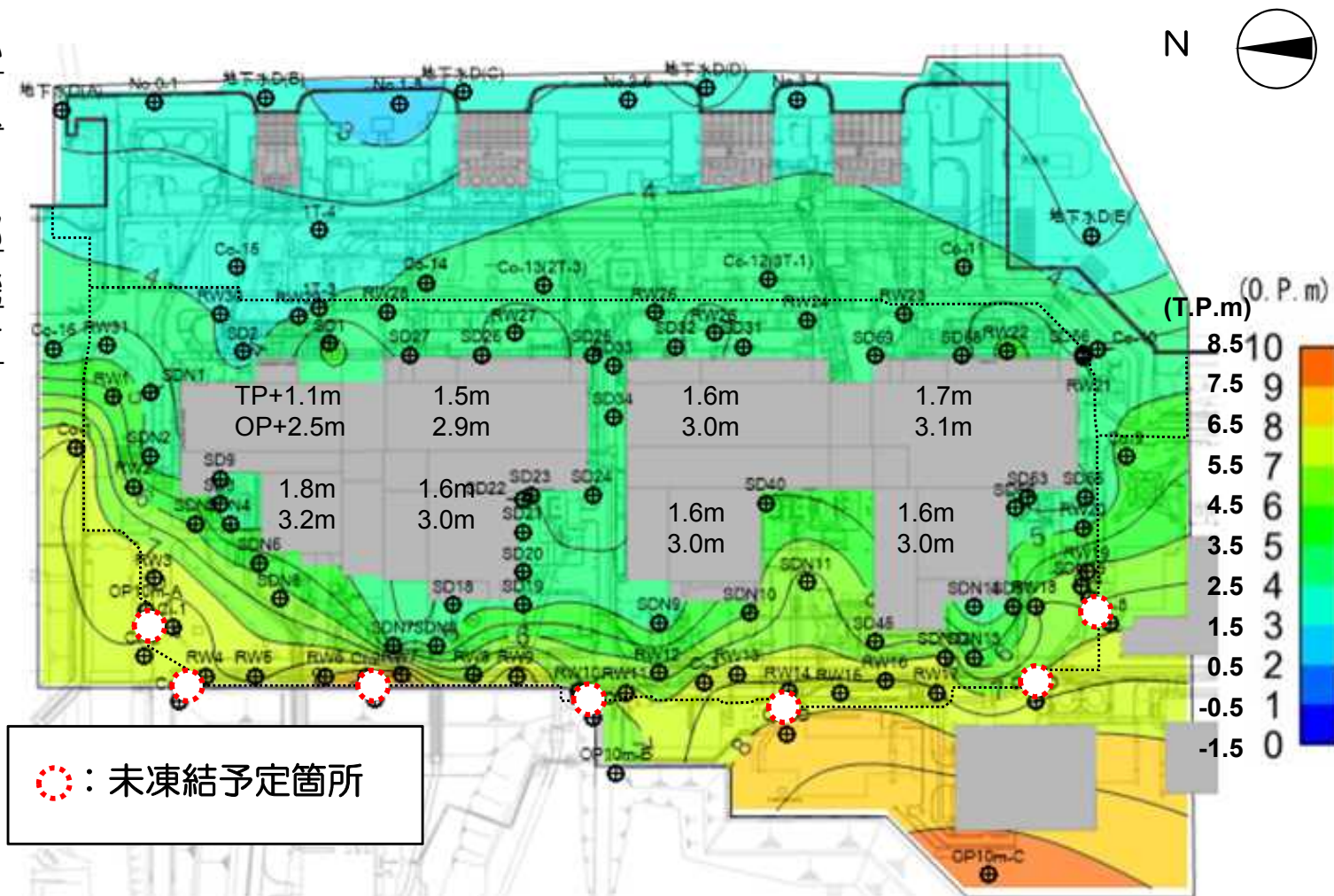
- 「海側全面 + 北側一部 + 山側部分先行凍結箇所」の凍結後，第一段階（フェーズ2）では，閉合域内への地下水の流れ込みを確保することとし，未凍結箇所7箇所を除く山側を凍結する。



第一段階 未凍結箇所配置において考慮した事項①

第一段階では、閉合域内への地下水の流れ込みを確保する。

- 実測データから作成した地下水の等水位線は汀線に並行に分布しており、地下水は山側(西)から海側(東)の流れが支配的であり、建屋山側には局所的に特異な地下水の流れは見られない。未凍結箇所は可能な限り山側(西)に配置して、地下水流入を期待し、建屋内外の水位差確保に努める。
- また、2～3号機建屋間から建屋海側への地下水流入の確保にも配慮する。
- さらに、南北にも未凍結部を配置することで、1号機北側や4号機南側への地下水流入を期待する。



地下水位分布は実測の地下水位から、Golden Software社のソフトウェアSurfer ver13を用いてKriging法に基づいて作成した。

サブドレン稼働・海側遮水壁閉合後(2016/1/17)
 [海側サブドレン稼働水位T.P.+2.8m(O.P.+4.2m)]
 [山側サブドレン稼働水位T.P.+3.1m(O.P.+4.5m)]

第一段階 未凍結箇所配置において考慮した事項②

■ 地下水管理への配慮

陸側遮水壁閉合範囲内の地下水位のばらつきが少なくなるように、未凍結箇所を均等に配置する。また、未凍結箇所からの地下水流入量を評価するため、未凍結箇所を観測井近傍に配置する。

■ 凍結状態管理への配慮

未凍結長さを適切に管理するため、未凍結箇所を測温管の近傍に配置する。

■ 陸側遮水壁（海側）閉合による影響への対処

陸側遮水壁（海側）閉合によりせき止められた地下水が南北方向へ移動することによる周辺環境への影響を考慮して未凍結箇所を配置する。

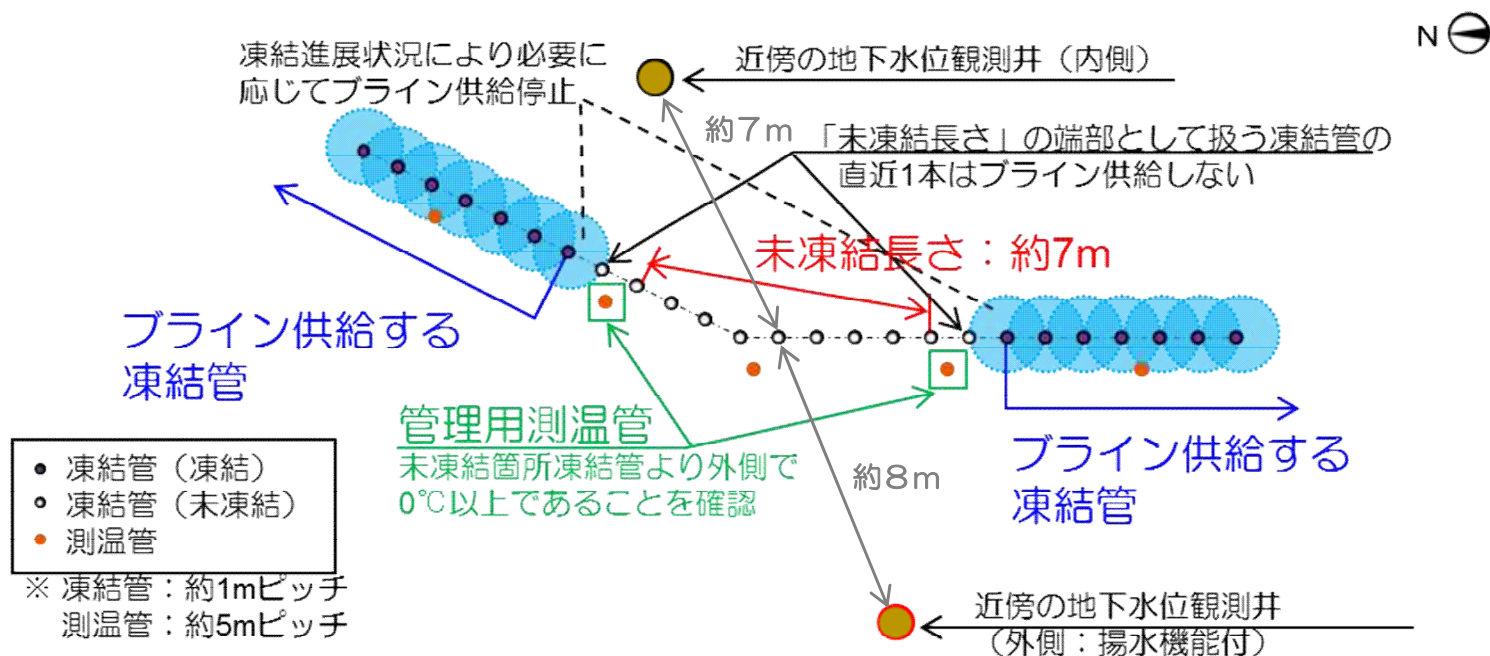
■ 第二段階における施工性への配慮

第二段階以降に未凍結箇所を凍結する際には、地下水流速が速くなり（p24・25参照）、凍結しにくい状態となる可能性がある。地下水流速を低減させて凍結させるために計画している補助工法（地盤改良により地下水流速を低減させて凍結し易くする方法）の施工位置や揚水機能付観測井の位置を考慮して未凍結箇所を配置する。

未凍結箇所への配置例

未凍結箇所への配置例として西側③を下図に示す。未凍結長さは未凍結箇所単位で下記により管理する。

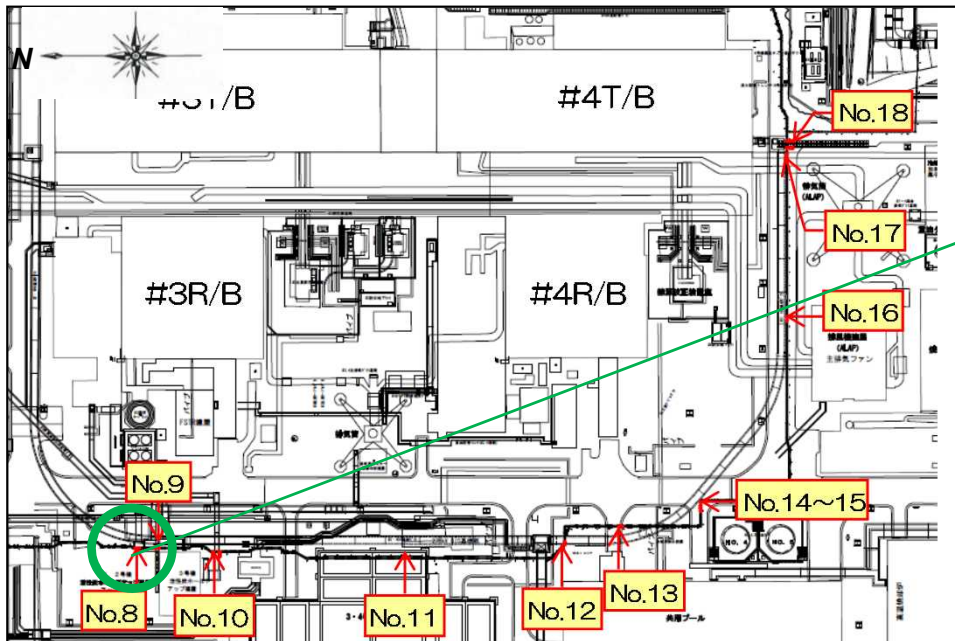
- 未凍結箇所近傍に配置した管理用測温管の温度を確認することで、未凍結箇所の未凍結長さが計画値を下回らないように管理する。
- 仮に、管理用測温管で 0°C 未満が確認された場合、凍結箇所の一番外側に位置する凍結管からバルブを閉止し、ラインの供給を停止して温度を回復する。



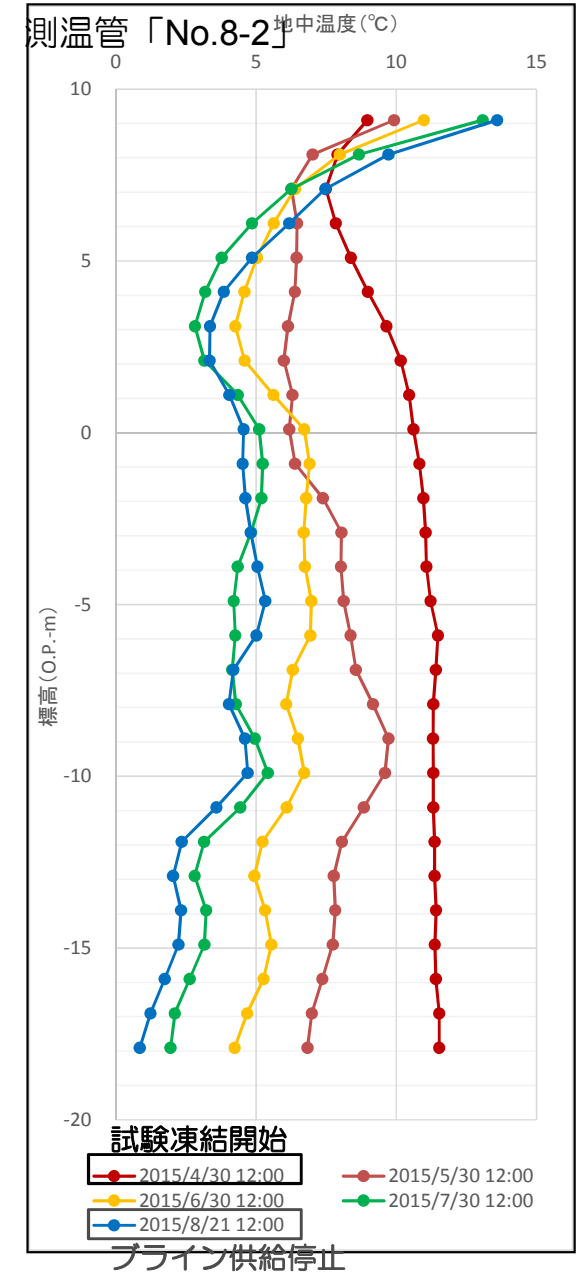
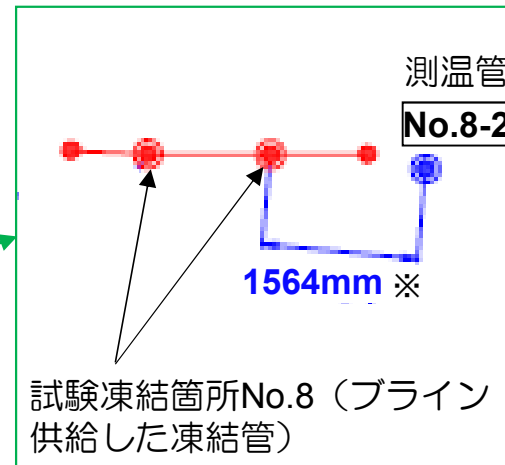
未凍結箇所への配置例 (西側③)

【参考】試験凍結における地中温度低下（未凍結箇所近傍に近い条件）

- 未凍結箇所近傍の「凍結管（凍結）と管理用測温管」の距離・位置関係が近い条件である「試験凍結箇所No.8と測温管No.8-2」に着目し，試験凍結期間（昨年4/30開始，8/21ブライン供給停止）中の地中温度の低下傾向を確認した。
- 測温管No.8-2（凍結管からの距離：1.564m※）の地中温度は凍結運転開始に伴い徐々に低下している（試験凍結期間中の約4ヶ月間）が，0℃を下回ることにはなかった。
- よって，「未凍結長さ」の端部の凍結管の位置（ブライン供給する凍結管からの距離：約2m）では，約4ヶ月経過後においても，0℃を下回ることはない想定している。



試験凍結箇所No.8と測温管No.8-2の配置

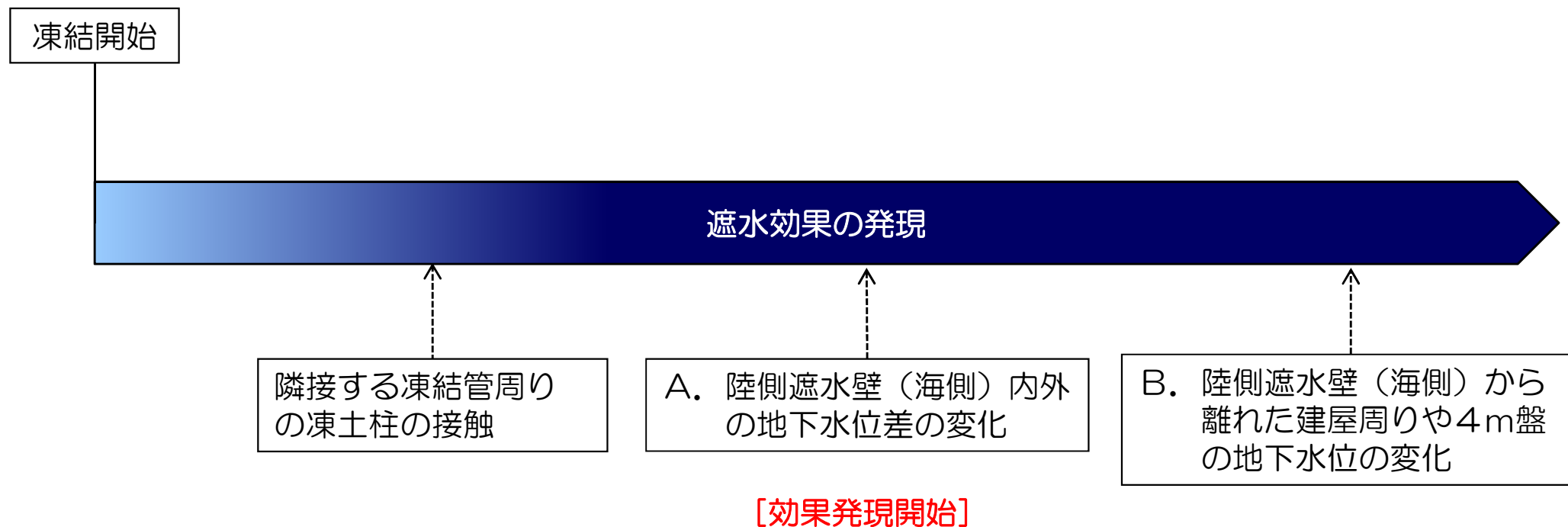


測温管No.8-2の地中温度変化

陸側遮水壁（山側）の凍結開始時期について(1/2)

■陸側遮水壁（海側）の効果発現開始

- 凍結開始後は、隣接する凍結管周りの凍土柱が接触し、陸側遮水壁（海側）内外で地下水位差が生じて(A)、その後、陸側遮水壁（海側）から離れた建屋周りや4m盤の地下水位に変化(B)が現われる。
- 遮水状況の管理上、「A. 陸側遮水壁（海側）内外の地下水位差の変化」が観測され始める時点を以て、効果発現開始と定義する。



陸側遮水壁（山側）の凍結開始時期について(2/2)

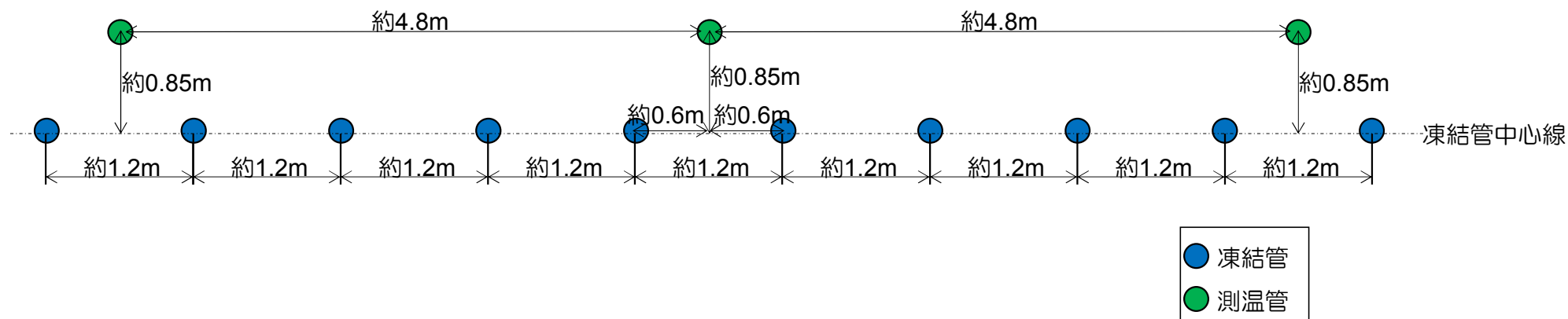
■陸側遮水壁（山側）の凍結開始時期

- ・陸側遮水壁（海側）内外に設置した5組の地下水位計の水位差に増加傾向が見られることを確認した上で、陸側遮水壁（山側）の凍結を開始する。
- ・なお、降雨の影響等により水位差が明瞭でない場合は、下記の①～⑥の変化傾向を確認して、陸側遮水壁（海側）の効果が発現開始していることを総合的に評価する。

確認項目	確認内容
①陸側遮水壁（海側）より海側の地下水位	・陸側遮水壁（海側）より海側の地下水位の低下傾向
②建屋周りの地下水位	・陸側遮水壁（海側）とタービン建屋間の地下水位の上昇傾向
③建屋周りのサブドレン稼働状況	・サブドレンの汲み上げ量の増加傾向
④地下水ドレン稼働状況	・地下水ドレンの汲み上げ量の減少傾向
⑤ウェルポイント稼働状況	・ウェルポイントの汲み上げ量の減少傾向
⑥建屋流入量	・建屋流入量の増加傾向

第一段階の確認事項① 「陸側遮水壁（海側）の遮水性発現状況」

第一段階の期間を通じて、陸側遮水壁（海側）の遮水性発現状況を遮水壁内外の水位差およびサブドレン・ウェルポイント・地下水ドレンの汲み上げ量等の変化により確認する。なお、凍結管周辺に設置した測温管（海側は延長約4.8m毎に1箇所、深度方向約30m）で地中温度を測定し、凍結状況を把握する。



海側測温管の基本配置

※ 現場の状況により、基本配置通りに測温管を配置していない箇所がある。

■地下水遮断率の評価

- 第一段階のフェーズ2において、未凍結箇所における地下水位・水頭から地下水流入量を想定する。また併せて、全体的な地下水収支を見ていくことで、「地下水遮断率」を総合的に評価する。
- また、第一段階においては「サブドレンを停止することで迅速かつ確実に地下水位が回復できる」状態であることから、サブドレンの稼働状態についても確認し、地下水遮断率が過大となっていないことを評価する。
- 上記の評価の結果、下記のような場合には異常と判断し、凍結範囲の見直しを実施する。
 - ◆地下水収支計算によって「地下水遮断率が80%（降雨無しの場合にサブドレンが停止し水位が低下する変化点）」以上と評価した場合
 - ◆サブドレンの広範囲な停止が懸念されると評価した場合
- なお、第一段階における実測値を用いた地下水収支から、第二段階以降において建屋内外水位の逆転が起こらないことを評価する（詳細は第二段階申請時に報告）。

【参考】 地下水収支の評価方法

実測値等に基づき、以下により第一段階における水収支に関わる諸値を評価する。

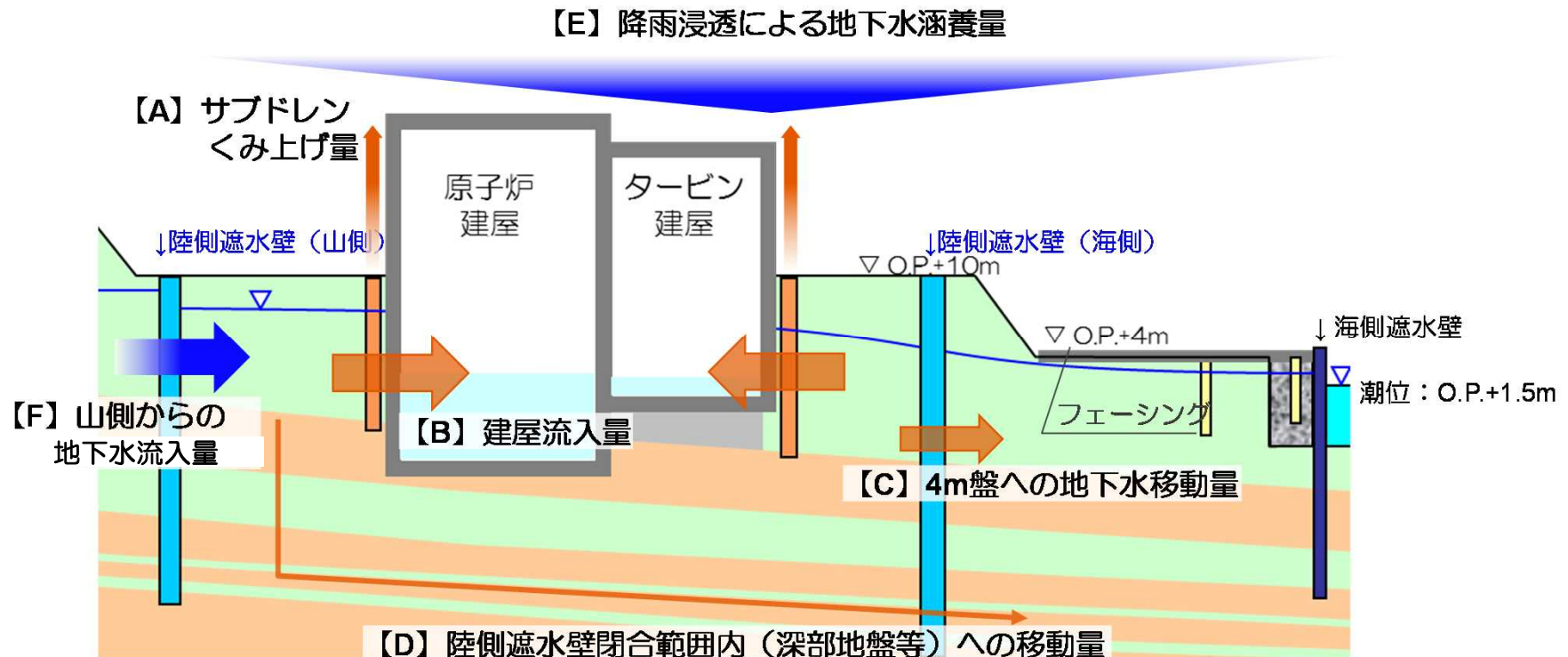
- サブドレンくみ上げ量【A】， 建屋流入量【B】， 4m盤への地下水移動量^{※1}【C】から閉合範囲外への地下水移動量（支出量）を評価

※1：4m盤への移動量：陸側遮水壁（海側）の4号機海水配管トレンチ末凍結部近傍の地下水位実測データから推定

- 降雨浸透による地下水涵養量【E】， 山側からの地下水流入量^{※2}【F】から閉合範囲外からの地下水供給量を評価

※2：陸側遮水壁未凍結箇所からの地下水流入量：陸側遮水壁（山側）の未凍結箇所近傍の地下水位実測データから推定

- 地下水収支計算により， 陸側遮水壁閉合範囲外（深部地盤等）への移動量【D】を評価



- 各建屋の滞留水の漏えいを防止するための建屋内外水位管理として、既認可に基づいて運用を行っている下記の3点の管理は変わることなく、陸側遮水壁閉合の第一段階では同様の管理を行う（建屋内外水位管理における異常時の運用ルールは次頁参照）。
 - 「建屋滞留水とサブドレン間の水位差の確保」
 - 「建屋滞留水水位管理」
 - 「サブドレン水位管理」
- 「注水井への注水」は、地下水位に関する状況改善の効果を有していると考えており、サブドレン水位低下時などの異常時の対応手段の一つとして実施する。
- 陸側遮水壁閉合範囲内の地下水位に次頁に示すような挙動が確認されたときには、建屋内外水位管理における異常時の運用ルールに従って対応する。

■ 滞留水の漏えいを防止するための異常時の運用ルール

☐: 陸側遮水壁閉合 第一段階 追加箇所

● 建屋ーサブドレンの水位差確保

- ◆ 各建屋に滞留した高レベル放射性汚染水の建屋からの漏えいを防止するため、建屋水位がサブドレンの水位より低くなるように管理している。
- ◆ 実際の運用としては、建屋水位計とサブドレン水位計の誤差や裕度を考慮した「建屋ーサブドレンの水位差」を確保することとしており、水位差が確保できない場合は「建屋ーサブドレンの水位差小」の警報が発報するよう設定している。警報が発報した場合には、サブドレンポンプの停止・建屋水位の低下で対応する手順を整備している。
- ◆ 「建屋ーサブドレンの水位差小」警報とは別に、建屋水位の異常検知のための『高高』警報、サブドレン水位の異常検知のための『低低』警報を設定し、それぞれに対応する手順を整備している。

● 建屋滞留水水位管理

- ◆ 「建屋水位『高高』警報」が発報した場合には建屋滞留水移送ポンプ（含；予備／他建屋）による滞留水移送で建屋水位を低下させる。

● サブドレン水位管理

- ◆ 「サブドレン水位『低低』警報」が発報した場合には、当該サブドレンのポンプの状態を確認し、稼働中の場合には停止させる。

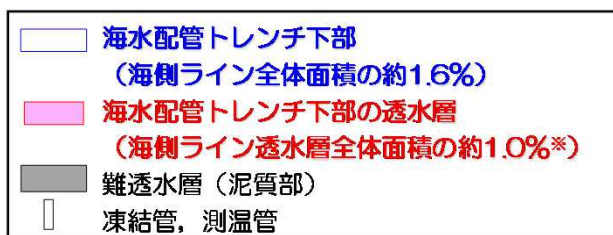
● 上記の警報が発報した場合には、「建屋ーサブドレン水位差」を確保するため、地下水位低下状況、等を分析・評価し、緊急対応の要否を判断し、それぞれの対応を取る。

- ◆ 局所的な地下水位低下などの場合には、『注水井への注水』により対応する。また、必要に応じ「凍結範囲の見直し」等の対策を実施する。
- ◆ 緊急対応が必要な場合には、「陸側遮水壁（山側）へのブライン供給の停止」「陸側遮水壁（山側）の部分撤去」等の対策について、実測データ等から総合的に判断し、実施する。

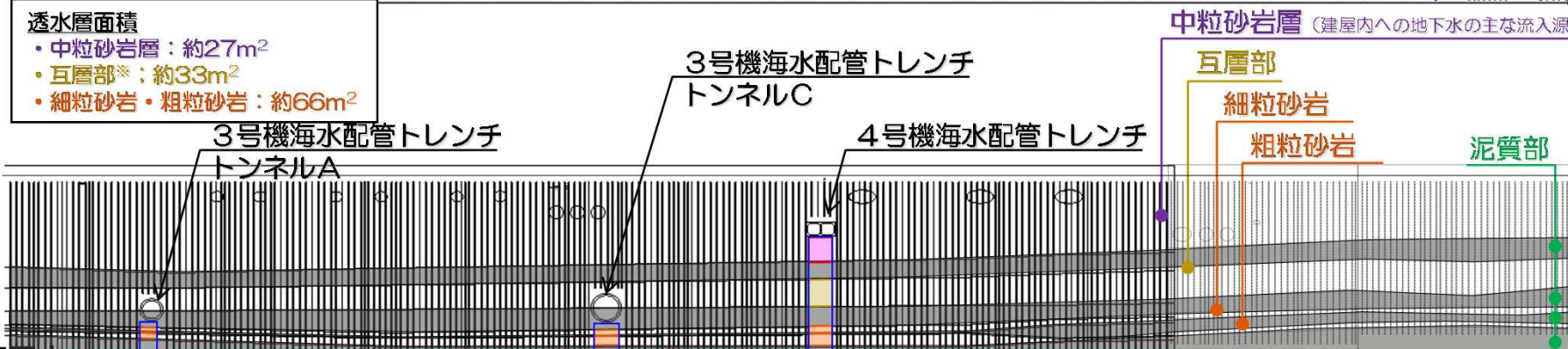
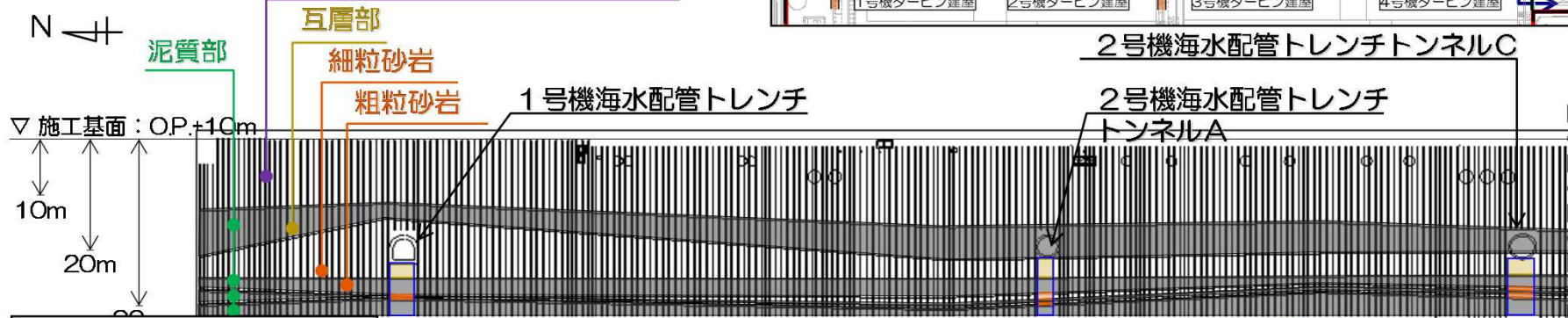
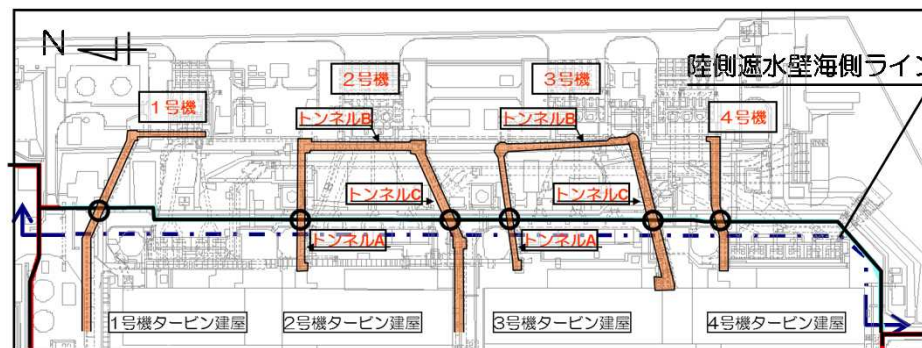
● また、『注水井への注水』については上記に限らず、降雨が少ない時期が継続する等の際には実施する場合がある。

海水配管トレンチ下部非凍結の影響：非凍結範囲概要

1～4号機海水配管トレンチ部（以下、「トレンチ」）は、削孔ビットがトレンチ内部の配管架台（H鋼等）等と干渉し削孔に時間を要することから、トレンチ下部の地盤を除いた範囲を凍結する。その後、トレンチ近傍の地下水位の計測から非凍結部の影響を評価し、トレンチ下部の閉合の要否を決める。非凍結箇所は陸側遮水壁（海側）の全体面積の約1.6%、陸側遮水壁（海側）の透水層全体面積の約1.0%となる。



※ 互層部については砂岩層と泥質部の構成比が4:6として算定
 中粒砂岩層 (建屋内への地下水の主な流入源)

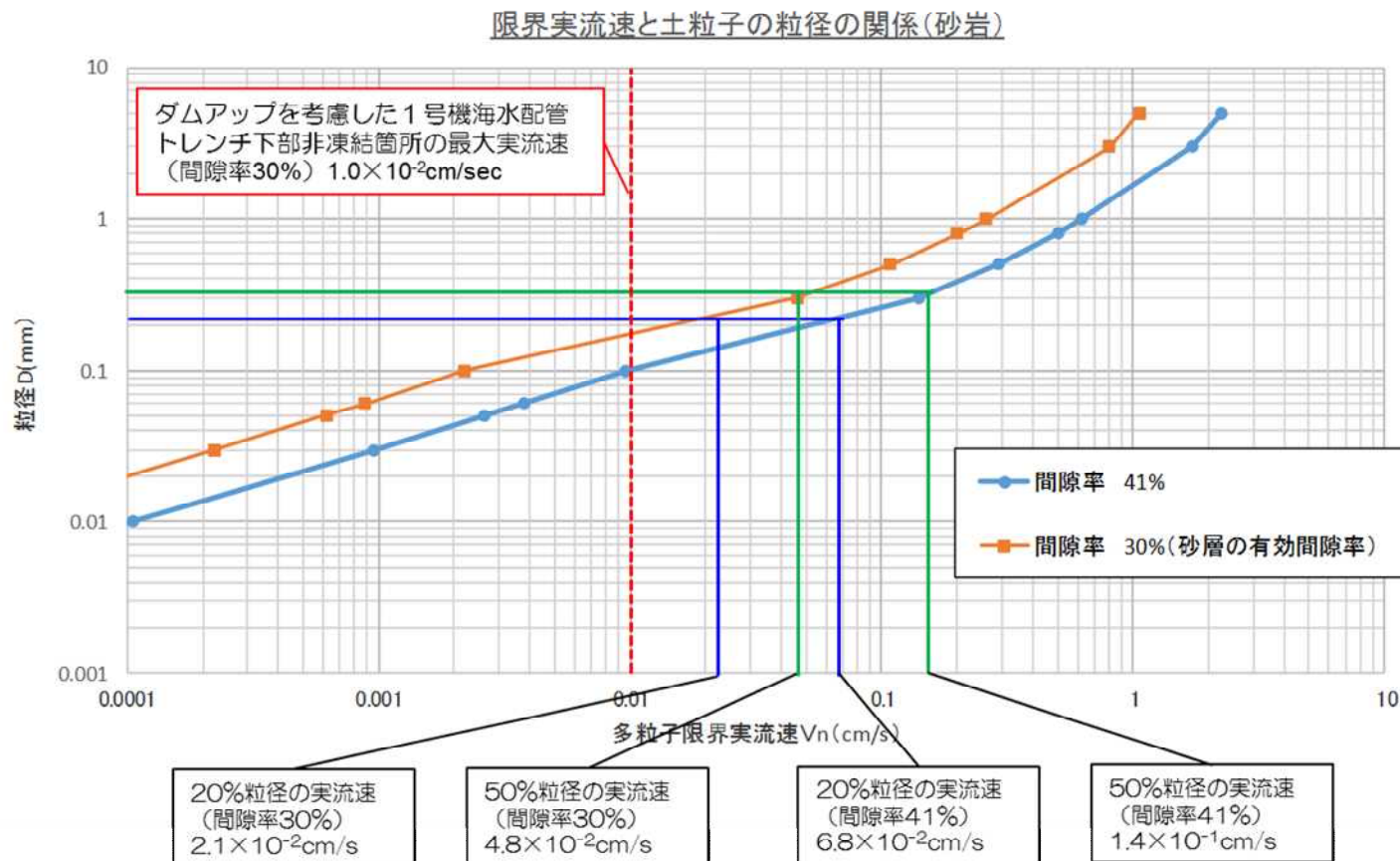


海水配管トレンチ下部非凍結の影響：トレンチ下部の移動量の評価

- 非凍結箇所を通じた地下水の移動量は、非凍結箇所の内外水位差に比例する。
- 地下水収支計算においては、深部地盤の非凍結箇所を通じた移動を見込むなど、一定の保守性をもってトレンチ下部の非凍結箇所を通じた移動量を評価している。（水位差約2mで約110m³/日（地下水遮断率約60%※）、水位差約0.6mで約50m³/日（地下水遮断率約80%※））
- P2の図に示す通り、トレンチ下部の移動量を考慮しても、平均降雨では地下水遮断率が100%まで、最小降雨では約95%まで、降雨なしでは約80%までサブドレンの稼働は維持され、建屋との水位差は確保できると評価している。
- 現状において、深部地盤（互層、細粒・粗粒砂岩）の水頭は中粒砂岩層と同等以上であることから、深部地盤へ地下水が移動することは考えづらく、実際の移動量は上記の評価結果よりも少なくなる。
- なお、サブドレンが稼働している現状において、山側と海側の遮水壁内外水位差（動水勾配）を比較すると、海側の方が山側より小さく（P7参照）、同じ閉合率とした場合、山側に比べ海側の移動量は少なくなる（地下水遮断率は大きくなる）。

海水配管トレンチ下部非凍結の影響：トレンチ下部の地盤の安定性

- 第40回特定原子力施設 監視・評価検討会では、陸側遮水壁海側＋南北側壁を閉合した場合、中粒砂岩層の水位が平均で約1.4m程度上昇する評価結果を示した（P22参照）。
- 水位差が1.4mとなった場合に、流速が最も速くなる1号機海水配管トレンチ下部の互層を通る地下水の流速は、ダルシー流速で約1.0m/日、実流速（有効空隙率0.3、互層内砂岩部（泥質部：砂岩部 = 6：4）のみ地下水が移動と仮定）で約8.7m/日（約 1.0×10^{-2} cm/sec）と評価している。
- 上記の最大実流速においても、土粒子の限界実流速より小さく、地盤の安定性は維持できるものと考えている。なお、山側の段階的閉合に伴い、地下水位は低下するため実流速も低下する。

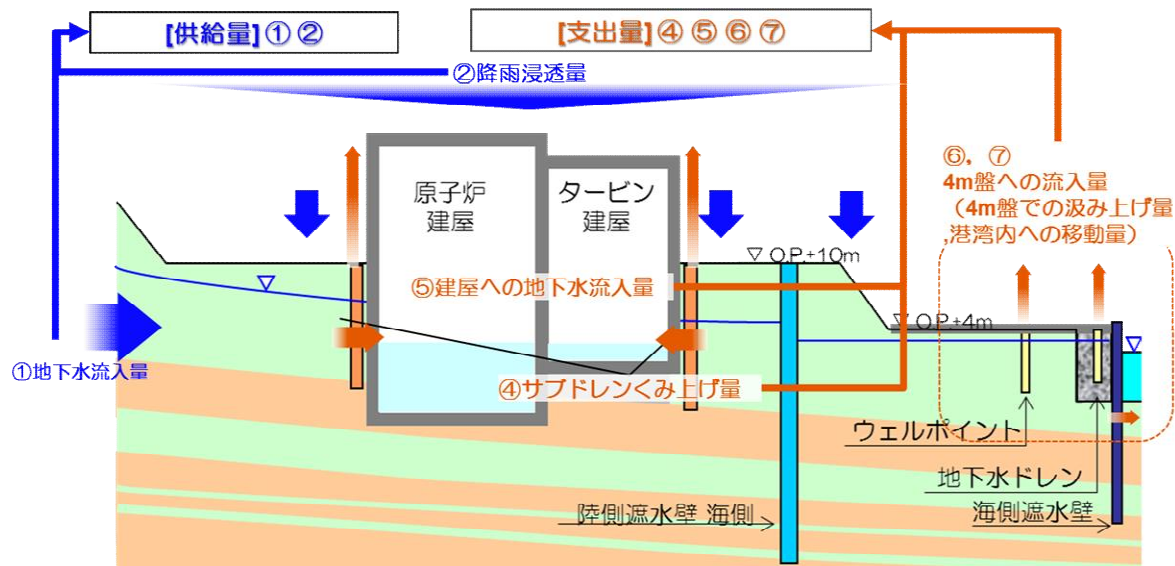


※ 水平方向における土粒子の抵抗を考慮して多粒子限界実流速は「多粒子限界実流速の算定式」の算出結果に摩擦係数（内部摩擦角 38.5° *）を乗じた値としている。内部摩擦角は、「福島第一原子力発電所 原子炉変更許可申請書」を参照。

【参考】陸側遮水壁の段階的閉合における地下水収支

地下水遮断率	地下水流入量 (m ³ /日) ①	降雨浸透量 (m ³ /日) ②	供給量計 (m ³ /日) ③=①+②	SD水位 (OP.+m)	SD汲み上げ量 (m ³ /日) ④	建屋流入量 (m ³ /日) ⑤	4m盤汲み上げ量 (m ³ /日) ⑥	港湾内への移動量 (m ³ /日) ⑦	支出量計 (m ³ /日) ⑧= Σ④~⑦
2015.11.7~ 2016.1.7(実績)	初期値として下記を計算 860	190	1050	L 値 5.0	420	190	410	30	1050
海側閉合 (平均降雨)	860	190 (250)	1050 (1110)	平均 5.4	700	220	100 (160)	30	1050 (1110)
50%(最小降雨)	430	100 (130)	530 (560)	平均 4.0	370	90	40 (70)	30	530 (560)
90%(最小降雨)	90	100 (130)	190 (220)	平均 4.0	30	90	40 (70)	30	190 (220)
100%(最小降雨)	0	100 (130)	100 (130)	平均 3.5	0	50	20 (50)	30	100 (130)

4m盤のフェーシングエリアにおける降雨浸透率は0%と仮定、
()内の数字は降雨浸透率を30%とした場合の参考値



地下水収支概要

上表の下段4行は、地下水収支計算による評価値であり、陸側遮水壁運用開始後においても、実態を把握していく。

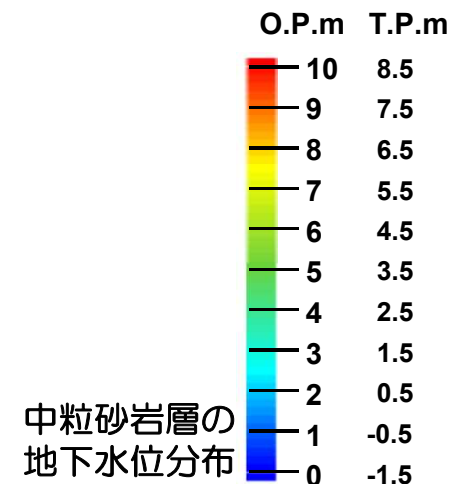
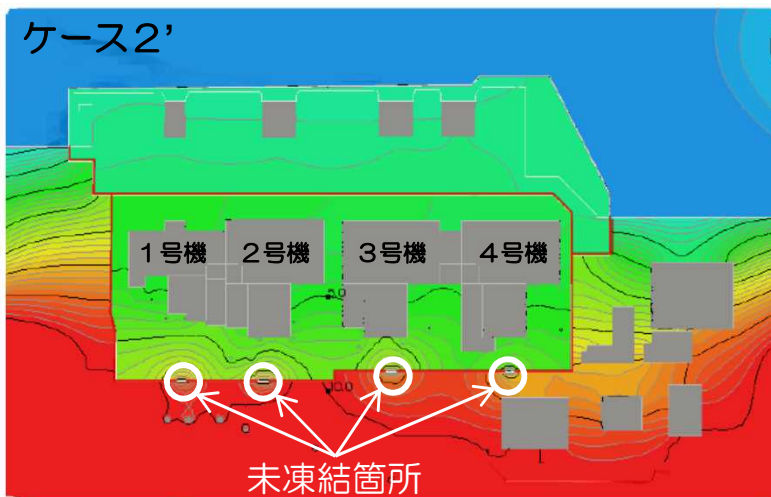
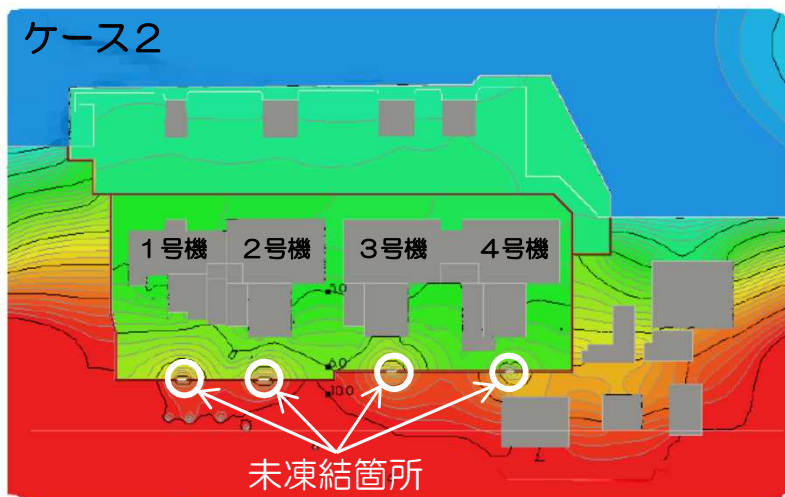
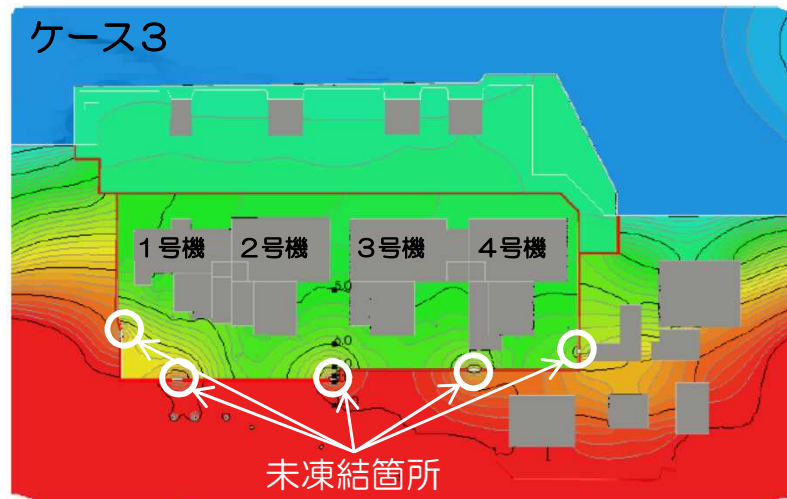
【参考】閉合率に関する解析結果

山側を閉合しない場合（ケース1）と山側を約95%閉合した場合（ケース2, 2', 3）の建屋流入量・サブドレン汲上げ量を解析により求め、山側からの地下水遮断率を算定した。

	未凍結箇所配置	未凍結箇所 中粒砂岩層の透水係数※1
ケース2	西側4箇所	$3.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$
ケース2'	西側4箇所	$1.4 \times 10^{-3} \text{cm/s}$
ケース3	西側3箇所, 南北各1箇所	$3.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$

山側を約95%閉合した場合の地下水遮断率は、約50~60%であった。

※1 透水係数は、室内試験結果の平均値 ($3.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$) と最小値 ($1.4 \times 10^{-3} \text{cm/s}$) とした。



■解析結果と地下水遮断率

	閉合率	建屋流入量 ①	サブドレン 汲上げ量②	海水配管トレンチ下の 4m盤への流出③	浸透流解析の結果 降雨浸透量 ④※2	地下水流入量 ⑤=①+②+③-④	地下水 遮断率※3
ケース1	0%	230	370	5	140	465	—
ケース2	95%	180	170	5	140	215	54%
ケース2'	95%	170	150	5	140	185	60%
ケース3	95%	170	170	5	140	205	56%

※2 陸側遮水壁内の面積を64,000m²として算定
※3 ケース1に対する地下水流入量の減少率

【参考】未凍結箇所地下水流速が速くなる場合の地盤安定性(1/2)

■未凍結箇所の最大流速

- 未凍結箇所の地下水実流速は、95%閉合した場合の解析では、1号機西側互層部で最大2.6m/day (3.0×10^{-3} cm/s) 程度になっている。

未凍結箇所の最大流速（三次元浸透流結果より評価）

	中粒砂岩層	互層部 [※]	細粒砂岩	粗粒砂岩
ダルシー流速 (cm/day)	74	31	40	55
実流速① (cm/day)	180.5	189.0	97.6	134.1
実流速② (cm/day)	246.7	258.3	133.3	183.3

①間隙率41%、②有効間隙率30%

※互層部内のうち砂岩のみ地下水が流れるものと仮定（砂岩：泥岩＝4:6）

■中粒砂岩層の土質試験結果

- 土質試験結果（5号機南側，5資料）による互層部（互層部中の砂岩）の粒度試験結果を下表に示す。
- 下表に示す通り，20%粒径は0.205mm，平均粒径は0.306mmであった。

（単位：mm）

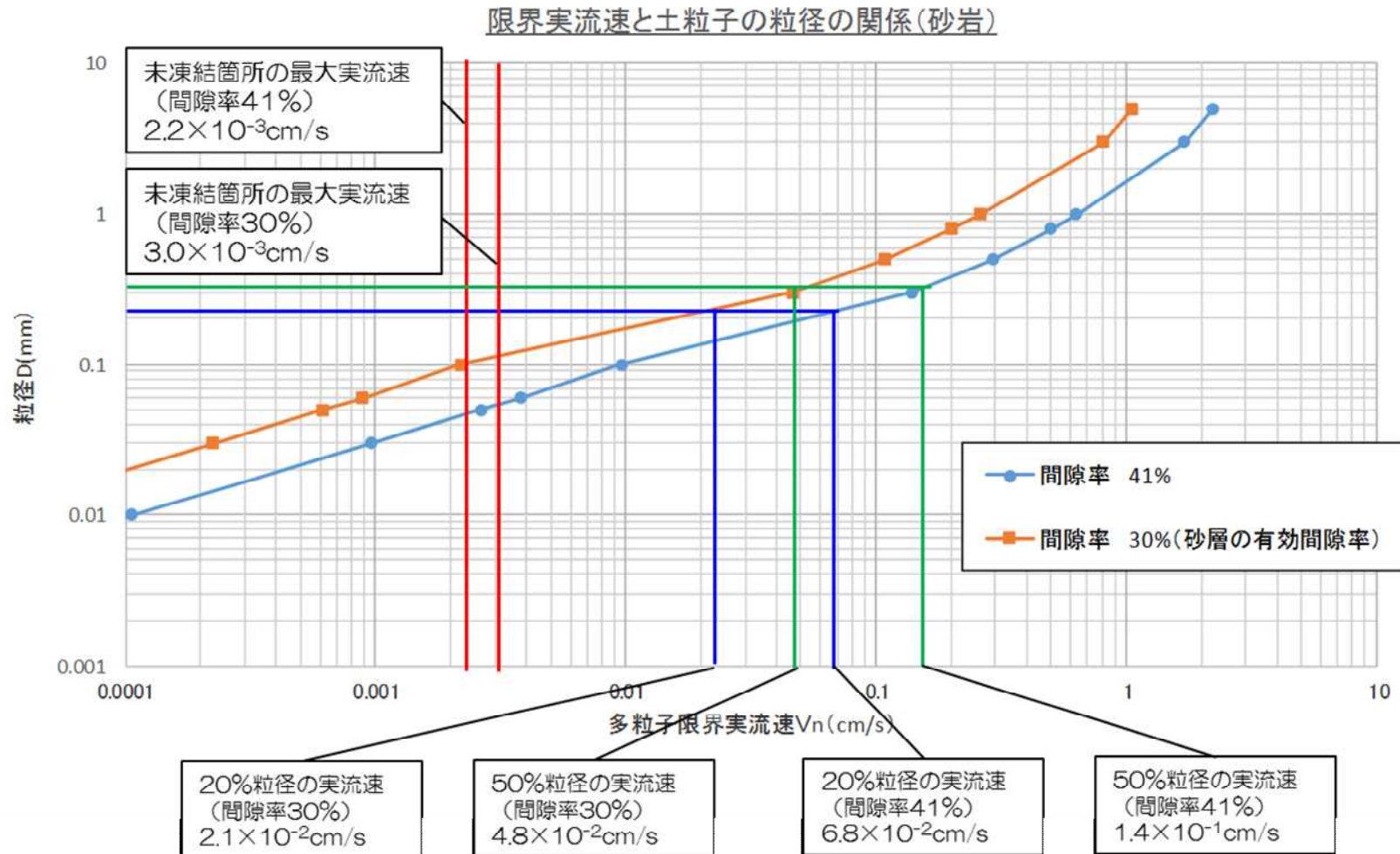
ボーリング名	20%粒径	平均粒径
ow5c-8	0.190	0.300
ow5c-10	0.180	0.300
ow6c-8	0.220	0.320
ow6c-9	0.235	0.310
ow7c-10	0.200	0.300
平均値	0.205	0.306

20%粒径をD20，平均粒径をD50とした

【参考】未凍結箇所地下水流速が速くなる場合の地盤安定性(2/2)

■評価結果

- 20%粒径および50%粒径の限界実流速は、間隙率が30%（砂層の有効間隙率），41%（室内試験値）のいずれの条件でも、未凍結箇所の実流速（解析結果）より1オーダー程度大きい結果となった。
- 以上より、未凍結箇所地下水流速が速くなる場合においても、地盤安定性は維持できるものと考えられる。



※ 水平方向における土粒子の抵抗を考慮して多粒子限界実流速は「多粒子限界実流速の算定式」の算出結果に摩擦係数（内部摩擦角 38.5° ）を乗じた値としている。内部摩擦角は、「福島第一原子力発電所 原子炉変更許可申請書」を参照。