

## 2, 3号機海水配管トレンチ 建屋接続部止水工事の進捗状況について

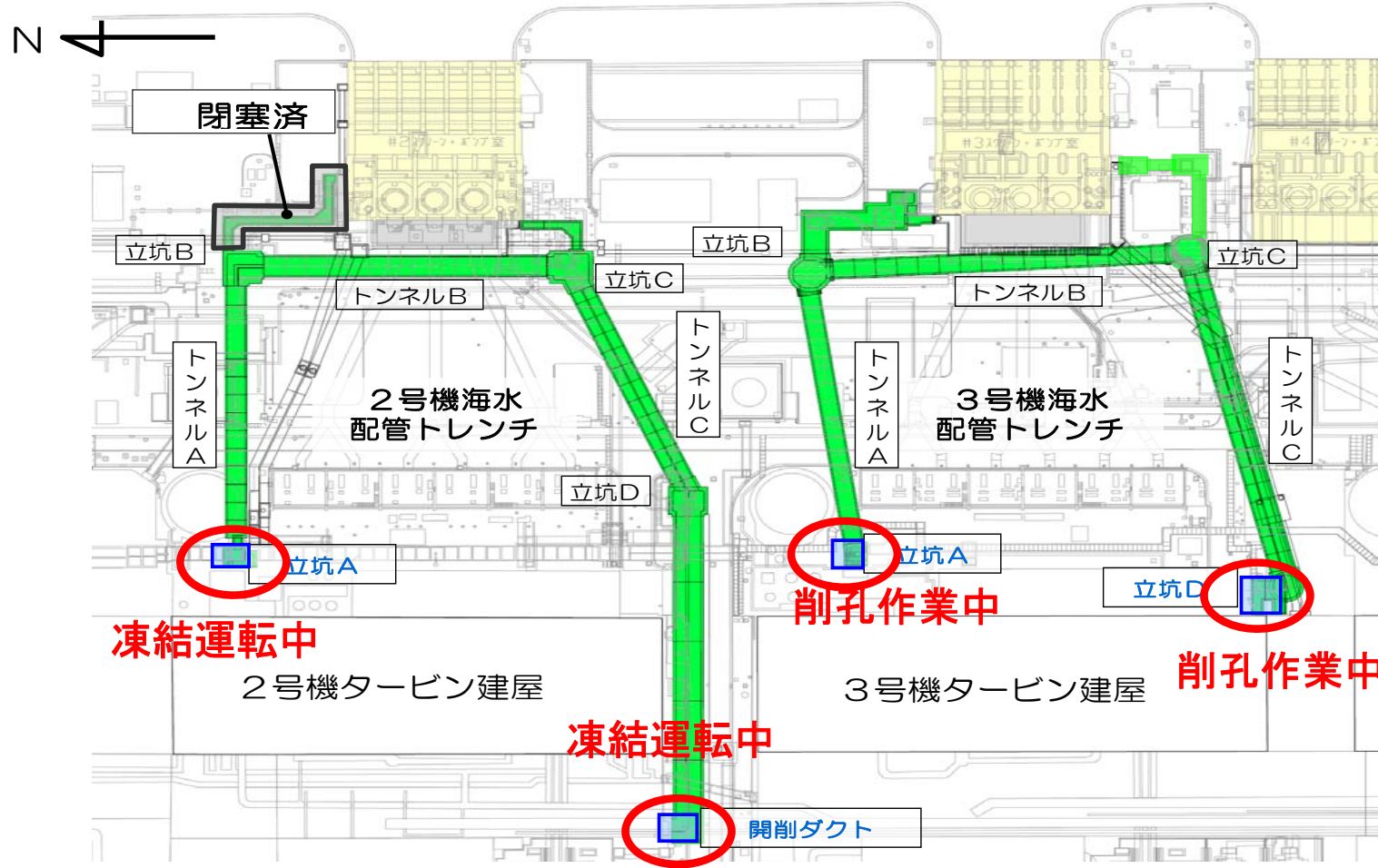
平成26年7月23日

東京電力株式会社

1. 全体進捗状況
2. 2号機立坑A 凍結状況
3. 熱量収支計算
4. 簡易熱量収支計算によるパラメータスタディ
5. 追加対策工の検討・実施状況
6. 2号機開削ダクト部 凍結状況

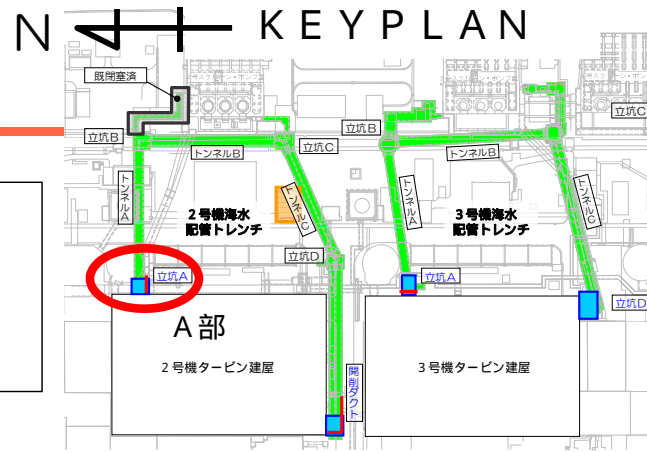
# 1. 全体進捗状況

## ■ 平面図

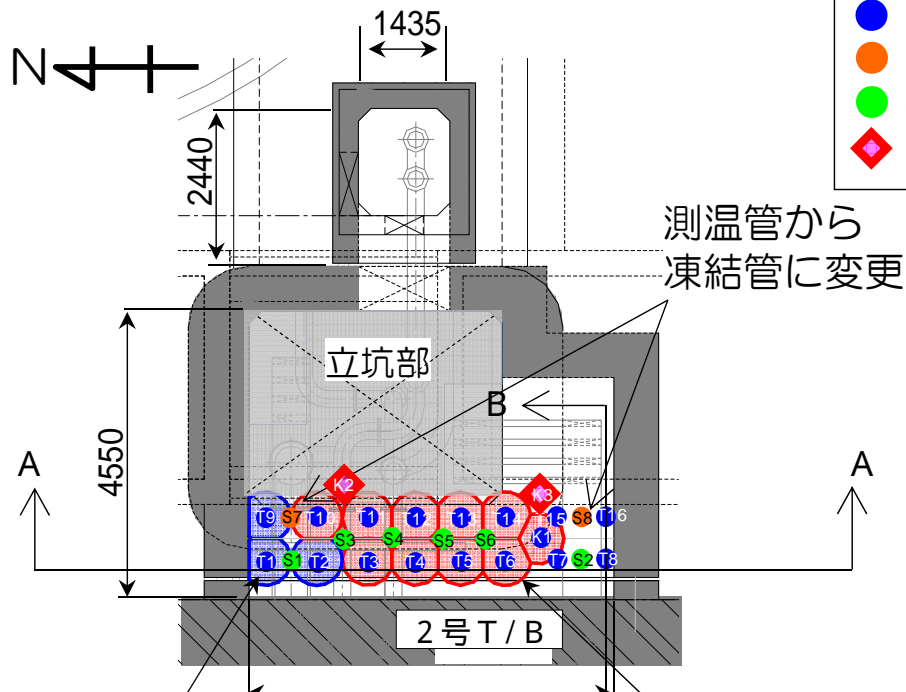


	2号機		3号機
立坑A	凍結運転中(4/28~)	立坑A	削孔作業中(7/2~)
開削ダクト	凍結運転中(6/13~)	立坑D	削孔作業中(5/2~)

## 2. 2号機立坑A 凍結状況①

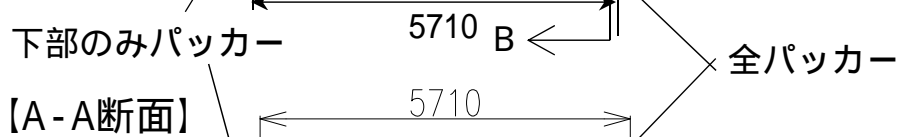


【平面図】



【施工進捗】

● (Blue)	: 凍結管	17 / 17本
● (Orange)	: 測温管	凍結管 (6/4に変更) 2 / 2本
● (Green)	: 測温管	6 / 6本
◆ (Red)	: 観測孔	2 / 2本



OP+3.8m 水位変動幅  
OP+3.1m  
OP+2.7m

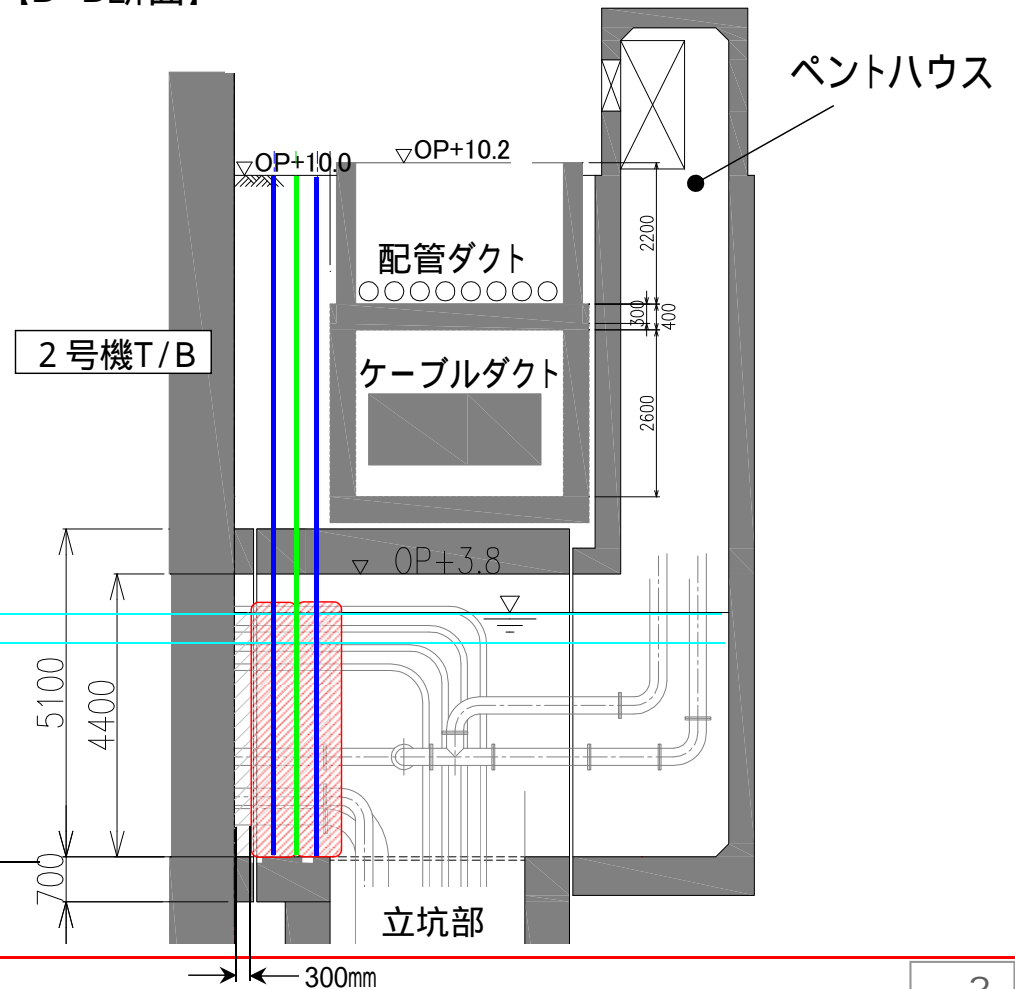
ケーブルトレイ幅600mm

配管

OP-0.6m

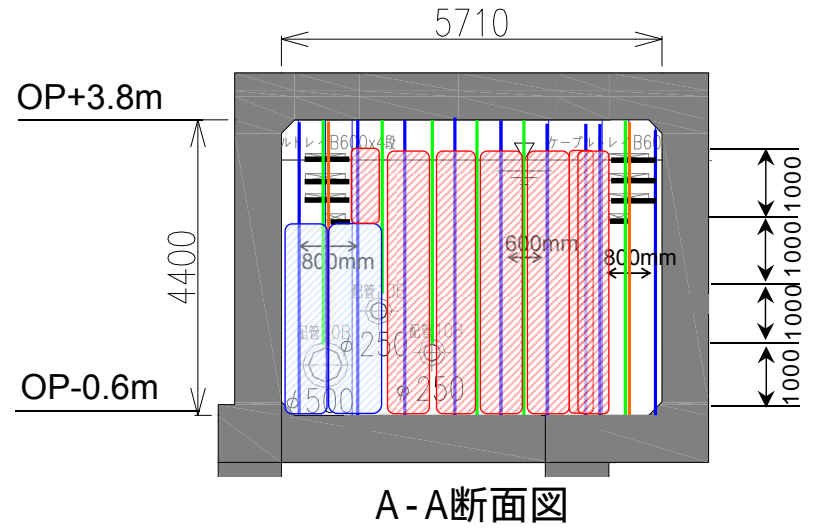
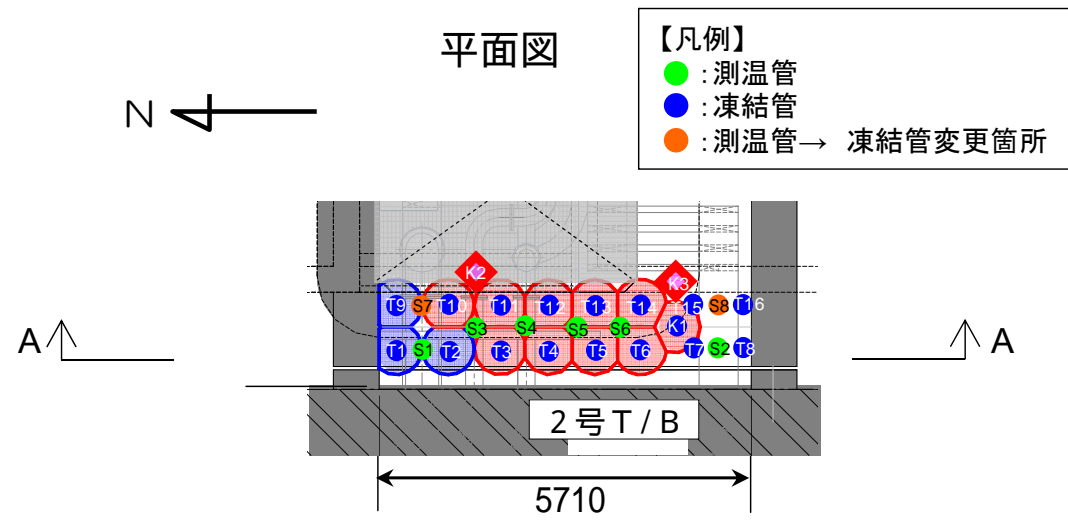
凍結管の間隔は約400mm ~ 800mm

【B-B断面】



## 2. 2号機立坑A 凍結状況②

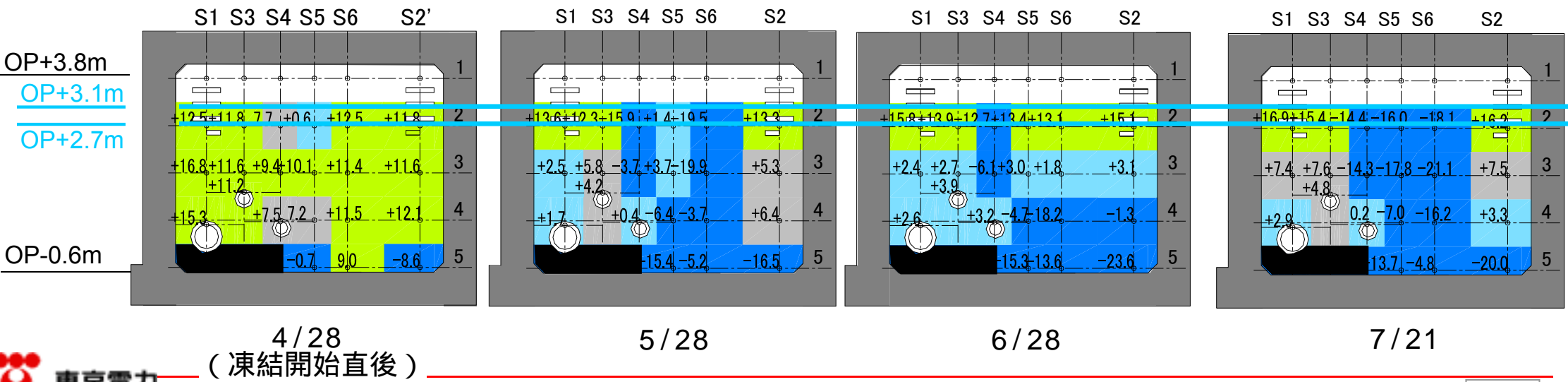
- 運転開始直後（4/28）から、全体的に温度は低下し、一部は凍結。
- ケーブルトレイ付近（上部左右）、配管貫通部、パッカー未設置箇所は未凍結の状況。



【測温管計測温度状況（時系列）】

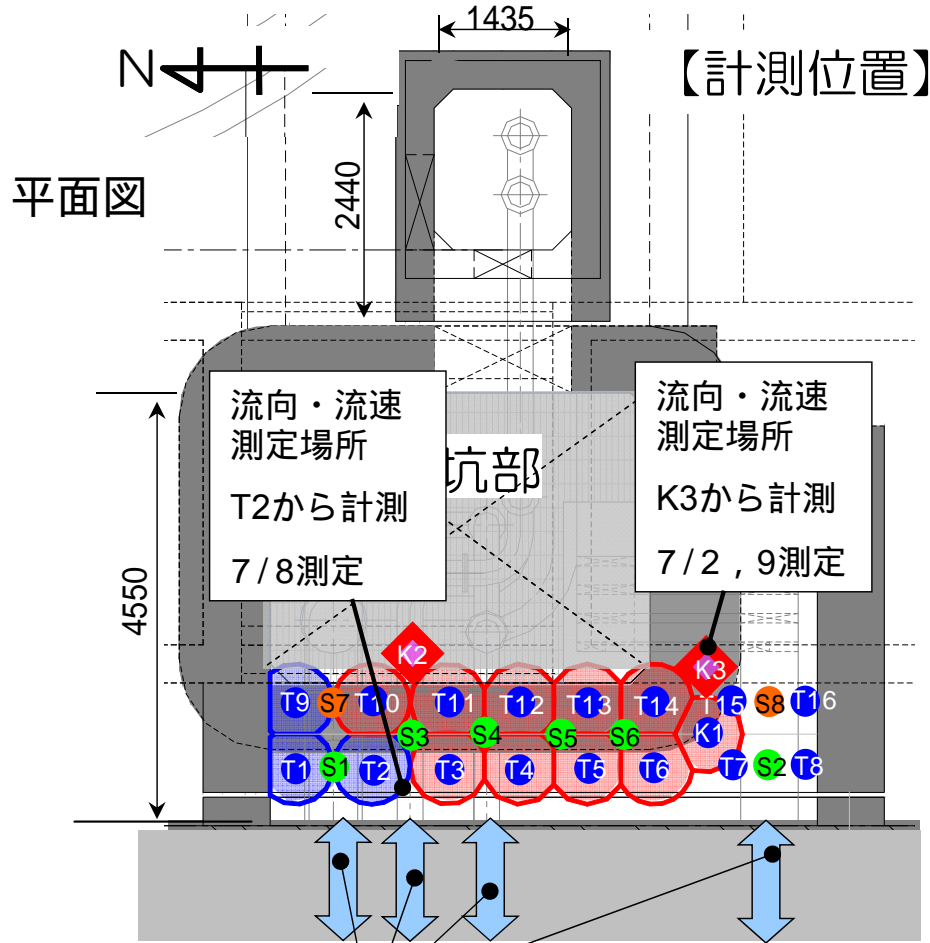
凡例

- : 8 以上
- : 4~8
- : 0~4
- : 0 以下
- : 計測値無し

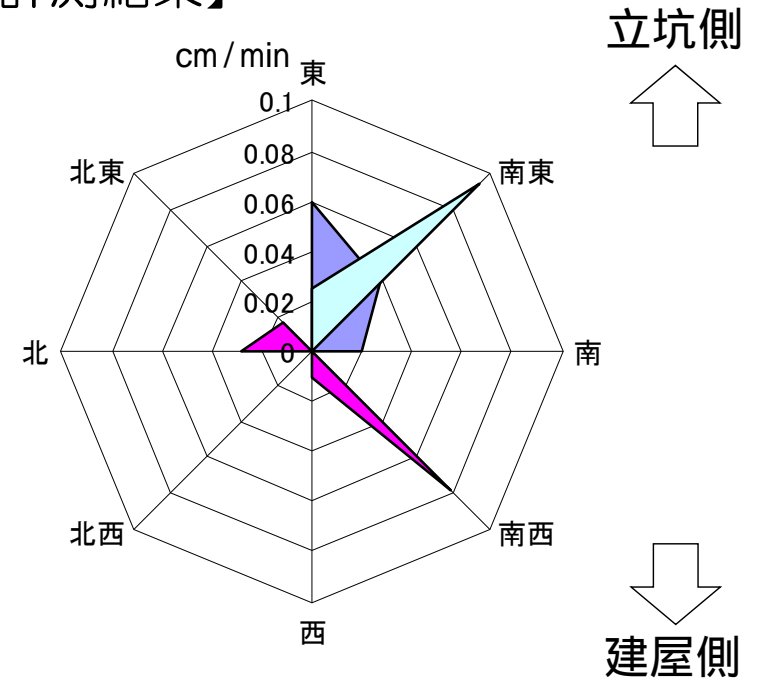


# (参考) 2号機立坑A 流向・流速追加調査について

▶ 計測結果より、タービン建屋内ポンプ停止時（水位上昇時）には建屋→トレンチ方向（概ね東方向）、タービン建屋ポンプ稼働時（水位下降時）にはトレンチ→建屋方向（概ね西方向）の水流が発生しており、建屋側ポンプの稼働状況から想定される流向と概ね整合



【計測結果】



立坑側  
↑

↓  
建屋側

- : 7/2 計測平均値（建屋水位下降時）
- : 7/8 計測平均値（建屋水位上昇時）
- : 7/9 計測平均値（建屋水位上昇時）

建屋貫通部により水の行き来が発生していると想定

### 3. 熱量収支計算 概要

熱量収支計算により、下記内容について確認

#### 1. 現状のプラントの冷却能力の確認

- 凍結負荷と冷凍能力の比較や、冷媒の流量増の前後における凍結管の仕事量の変化により、冷却能力の不足が生じているか確認。

#### 2. 系全体の水流の影響の確認

- 水流が発生している状況における系全体の熱収支の計算により、凍結の進展に対する水流の影響を確認。

#### 3. 簡易熱量収支計算によるパラメータスタディ（凍結の促進に影響を与える要因の把握）

- 凍結面における熱収支バランスを元に氷の成長状況をモデル化。
- モデルのパラメータスタディを行い、氷の成長に影響を与える要因と、それを変化させた場合の効果を把握し、対策工選定の参考とする。

### 3. 熱量収支計算 現状プラントの冷却能力の確認

- 立坑Aおよび開削ダクトの凍結負荷に対して十分な余裕がある冷凍機の容量を確保。
- 冷媒の流量を増やしても凍結管の仕事量は変わらず，除熱される側の容量に限界があることを確認。

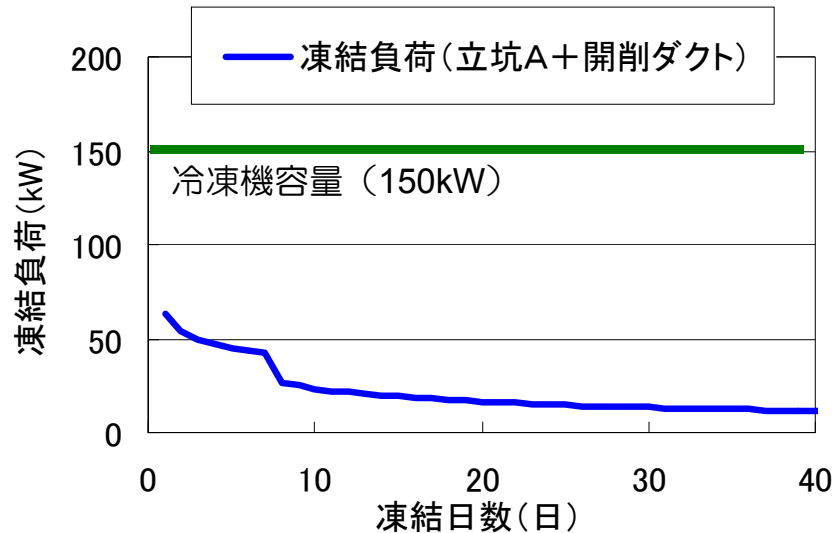
#### (1) システム全体の冷凍機容量の確認

- ✓ 凍結工事において必要な冷凍機容量を決めるための，凍結負荷の計算式（地盤凍結工法、日本機械化協会編）を用いて，現在の冷凍機の容量が十分であることを確認。
- ✓ 現場で使用している冷凍機の容量150kWに対して，凍結負荷は凍結日数とともに低下し，40日経過後は10kW程度であり，余裕がある。

#### (2) 冷媒の流量増加による効果

- ✓ 7/16から，送りポンプを追加設置し，冷媒の流量を増加させ，立坑Aの凍結管の仕事量の変化を確認。
- ✓ 7/16に流量は1.3倍に増加したものの，凍結管の送りと戻りの温度差が減少し，仕事量は31.3kWと28.1kWでほぼ変わらない結果。
- ✓ 除熱される立坑A側に熱の移動量の限界がある。

- 水温：20
- 凍結管ピッチ：0.8m
- ブライン温度：-40
- 含水率：100%
- 凍結管径：φ114.3mm
- 凍結総延長：141m
  - 立坑A 4.4m×19本
  - 開削ダクト 3.75m×10本 2.5m×8本



計算式による立坑Aおよび開削ダクトの凍結負荷

流量増加前後の流量，温度差，仕事量の比較

	単位	6/13-7/15	7/16
冷媒流量	リットル/分	582	752
温度差 <sup>1</sup> (送り-入り)		0.90	0.63
仕事量 <sup>2</sup>	kW	31.3	28.1

1：送りの冷媒温度は立坑Aの近傍1カ所で測定

戻りの冷媒温度は，凍結管毎に測定

2：仕事量＝流量×密度(1.38kg/l)×比熱(2.6kJ/kg-K)×温度差



### 3. 熱量収支計算 系全体の水流の影響の確認①

- 水流がある状況下で、未凍結部の冷却水温を熱収支計算（3次元詳細熱流動解析・冷凍機の仕事量評価）にて算出
  - 未凍結部以外の閉塞部分は凍結壁が形成されると考え、凍結壁（表面温度0）への伝熱を考慮
  - 未凍結部は、凍結管（管周囲は凍結と想定、表面温度0）への伝熱を考慮

未凍結部・閉塞部域の熱収支(エネルギーバランス)式

$$\frac{dW}{dt} = MC_p \frac{dT}{dt} \cong \underbrace{\dot{m}C_p(T_{in} - T_{out})}_{\text{「流れ」による流出入}} - \underbrace{Q_{cl}}_{\text{凍結管への伝熱率}} - \underbrace{Q_p}_{\text{凍結壁への伝熱率}}$$

当該域の熱の増減
凍結管への伝熱率
凍結壁への伝熱率

領域出口温度（定常状態、冷却後の水温度）

$$T_{out} = T_{in} - \frac{Q_{cl} + Q_p}{\dot{m}C_p}$$

ここで;

- W: 領域内の保有エネルギー(J)
- $\dot{m}$ : 流入水質量流量 (=0.16kg/s (水温10 の水物性(密度)を使用))
- M: 領域内に存在する水質量(kg)
- $C_p$ : 低圧比熱(=4.199×10<sup>3</sup>J/kg-K: (水温10 の水物性))
- T: 領域内水温度
- $T_{in}$ : 流入水温度(K)
- $T_{out}$ : 流出水温度(K)
- $Q_{cl}$ : 凍結管への伝熱率(W)
- $Q_p$ : 凍結壁への伝熱率(W)
- $T_{cl}$ : 凍結管表面温度(K)
- $S_{cl}$ : 凍結管全表面積(m<sup>2</sup>)
- $T_s$ : 凍結壁面温度(K) (273.15K)
- $S_i$ : 凍結壁面面積(m<sup>2</sup>)
- $h_{cl}$ : 水-凍結管 熱伝達係数(W/m<sup>2</sup>-K) (54.9W/m<sup>2</sup>-K) (\*1)
- $h_{fs}$ : 水-凍結壁 熱伝達係数(W/m<sup>2</sup>-K) (\*3)
- $Q_{rod}$ : 凍結管1本当たりの除熱率(W) (1.65kW) (\*2)
- $n_{rod}$ : 冷却に寄与する凍結管本数(4本)

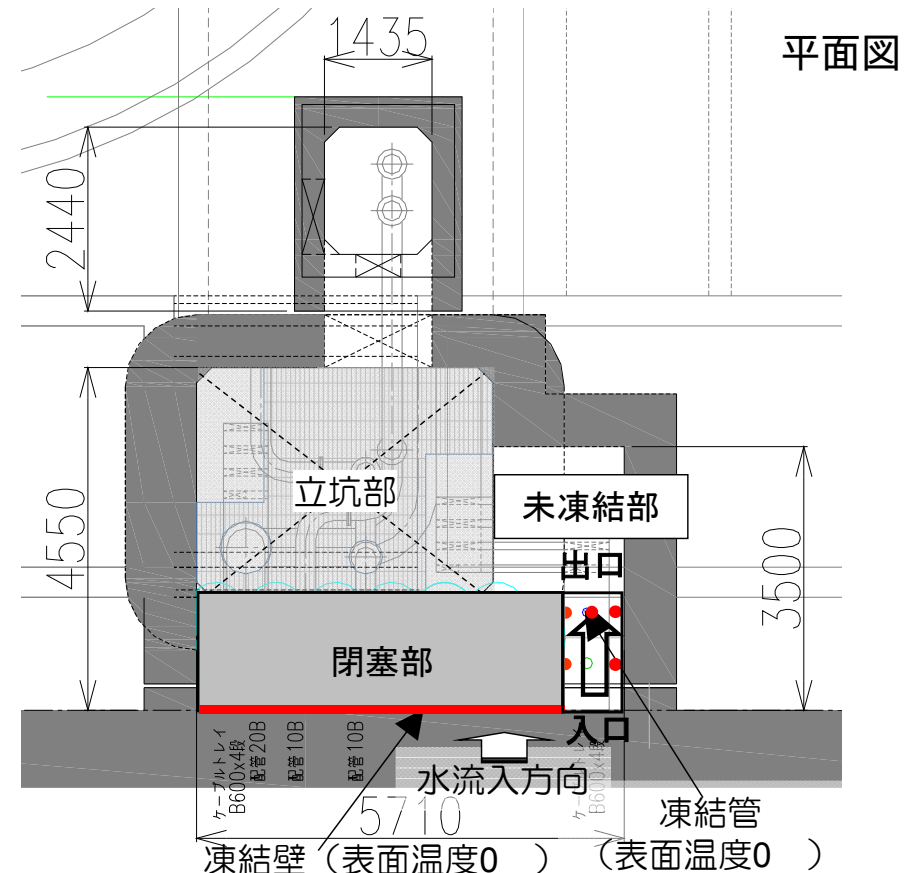
凍結管への伝熱率

$$Q_{cl} = \begin{cases} h_{cl}(T_{in} - T_{cl})S_{cl} \\ Q_{rod} \times n_{rod} \end{cases}$$

凍結壁への伝熱率

$$Q_p = h_{fs}(T_{in} - T_s)S_i$$

流路閉塞・未凍結部の設定状況



- (\*1) 凍結管1本についての3次元詳細熱流動解析(CFD)結果から算出した平均熱伝達係数
- (\*2) 冷凍機の仕事量評価結果(前頁)から算出(=31.3kW/19本)
- (\*3) 平板に対する熱伝達係数式を使用

### 3. 熱量収支計算 系全体の水流の影響の確認②

➤ 解析の結果,

- 残された未凍結部の水温を0 まで低下させることはできない
- 一方で流速を低下させた場合, 水温を0 まで低下させ得る, と評価できる

#### 未凍結部の出口水温

解析条件:

入口水温: 15 °C

未凍結部入口流速: 0.32cm/min

( = 0.00016(m<sup>3</sup>/s) × 100X60 / 2.97(m<sup>2</sup>))

流量0.00016m<sup>3</sup>/s

質量流量0.16kg/s

(未凍結部幅0.9m (仮定値) × 水位3.3m  
(水面位置O.P.+2.7m,底面位置O.P.-0.6m))

下記数値に基づき流量算出

0.16(kg/s)=0.00016(m<sup>3</sup>/s)

× 999.60(kg/m<sup>3</sup>)

水温10°Cの水物性(密度)を使用

0.00016(m<sup>3</sup>/s)=3.39(mm)/1000/3600

× 335(m<sup>2</sup>)/2

•未凍結部断面積:2.97m<sup>2</sup>

•立坑Aへの流入量0.57m<sup>3</sup>/h

•立坑への流入量1.14m<sup>3</sup>/h

•2号機全立坑面積335m<sup>2</sup>

•水位変動3.39mm/h

2014年6月24日7:00水位2771mm

2014年6月27日7:00水位3015mm

結果:

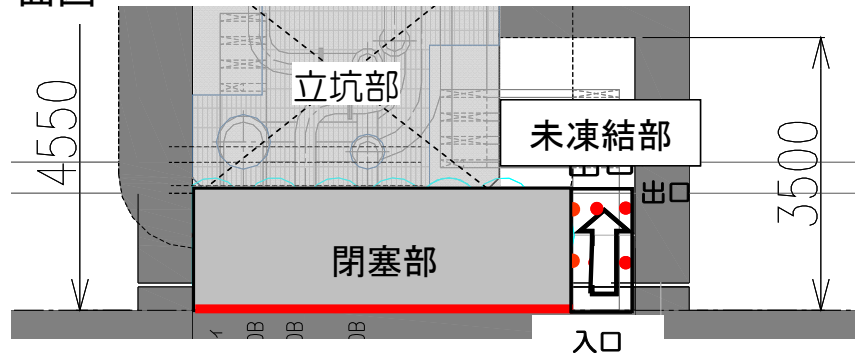
• 水温度:7.9°C

(CFD解析結果に基づく熱伝達係数使用した場合の値)

• 水温度:3.9°C

(冷凍機の仕事量評価から評価した凍結管1本当たりの除熱率評価に基づく値)

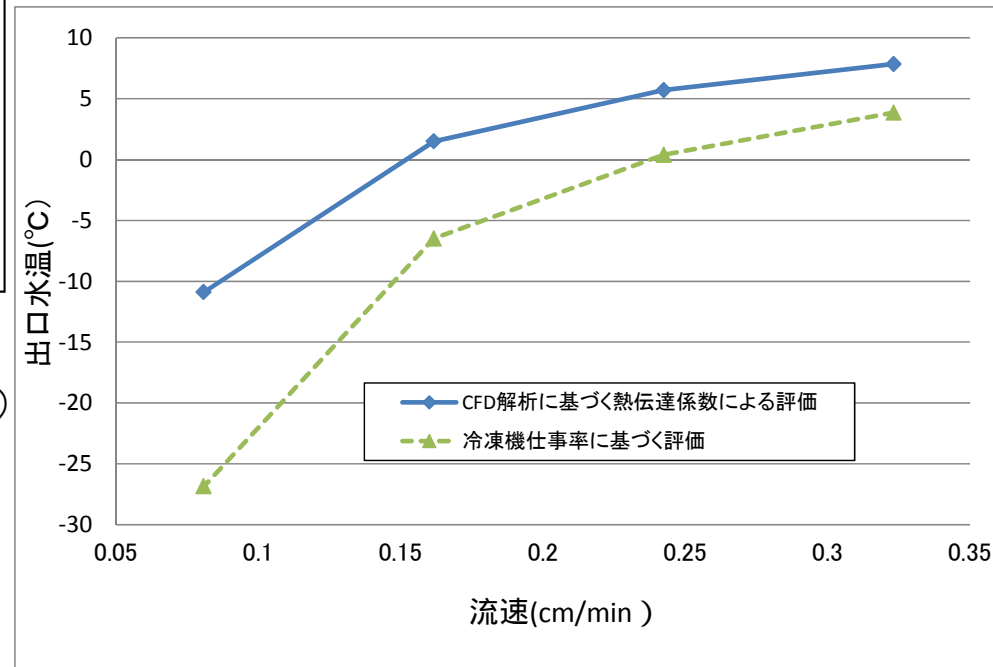
平面図



#### 水流量変化時の未凍結部の水温変化

流量が減少した場合の温度評価を行い, 未凍結部が凍結可能となるか検討を行った

流速を変化させた場合の当該部の水温を下図に示す流速を, およそ0.15cm/min以下に低下させると水温は0 以下となる



注: 本評価では液相水の温度変化を計算対象としており, 凍結現象は考慮していない。本計算結果における「0 以下」の温度表示は計算上の値であり, 凍結能力を示す指標として示している。

# 4. 簡易熱量収支計算によるパラメータスタディ

- 2本の凍結管の間に一定流量が生じている場合において、凍結面における熱収支のバランスから凍結管周囲の氷の発生状況を計算するためのモデルを構築。
- 繰り返し計算を行い、凍結開始からの氷の厚さの変化を計算。
- 初期流速 $U_0$ 、水温 $T_f$ 、凍結管の間隔 $d$ 、凍結管除熱量 $W$ 等をパラメータとして、氷の厚さがどのように変化していくのかを比較。

## 【モデルの概念図】

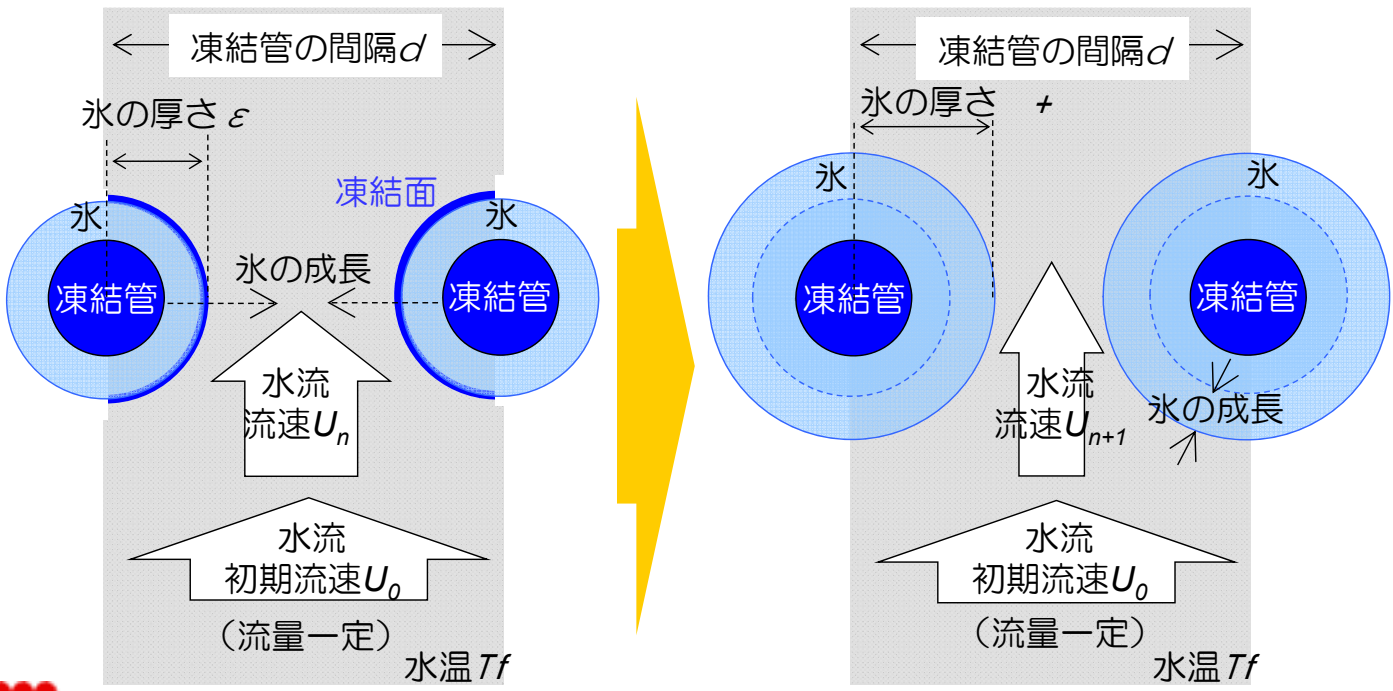
• 氷の厚さと流速の関係  
(流量一定、氷の成長とともに流速が変化)

$$d \times U_0 = (d - 2\varepsilon_n) \times U_n$$

• 凍結面における熱収支  
(氷の成長 = 凍結管の除熱量 - 水流の除熱量)

$$\rho_i \cdot L \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{W}{2\pi \varepsilon l} - \alpha_i (T_f - T_s)$$

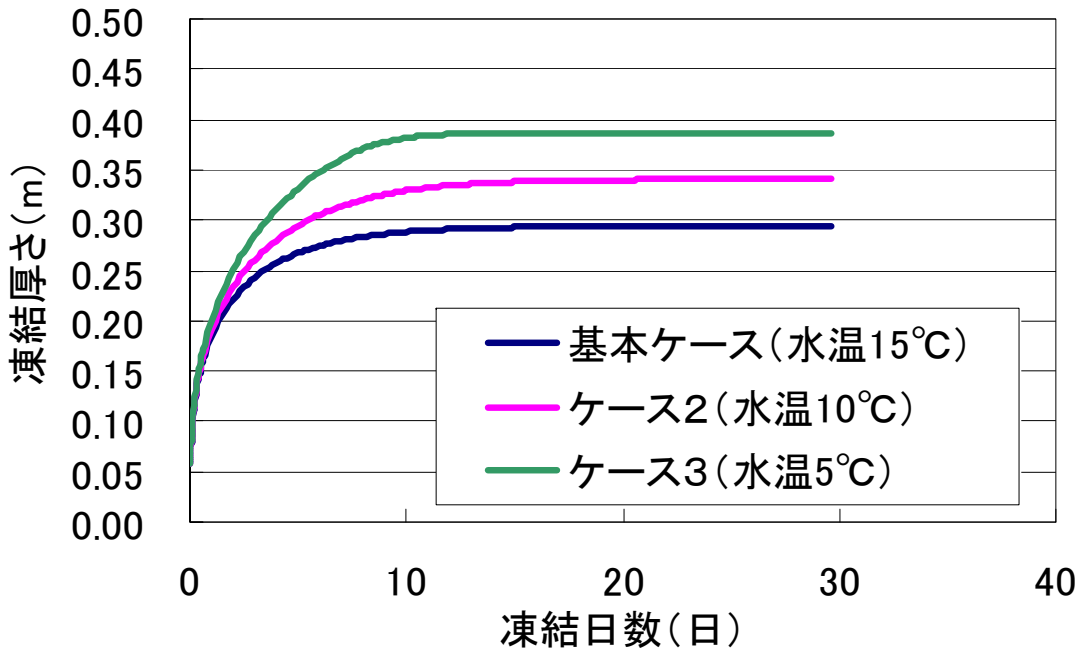
ここに、  
 $d$  : 凍結管間隔 (基本ケースは80cm)  
 $U_0$  : 初期流速 (基本ケースは0.32cm/min)  
 $0.00016\text{m}^3/\text{s} \div (0.9\text{m} \times 3.3\text{m})$   
 建屋水位変動から求めた流量 :  $0.00016\text{m}^3/\text{s}$   
 未凍結部幅 : 0.9m (仮定値)  
 最低水位時水面高さ : 3.3m  
 $U_n$  : 凍結管の間の流速  
 $\varepsilon$  : 氷の厚さ  
 $\rho_i$  : 氷の密度 (917kg/m<sup>3</sup>)  
 $L$  : 氷の潜熱 (333.5kJ/kg)  
 $W$  : 凍結管除熱量 ( $\varepsilon$ の関数)  
 $l$  : 凍結管長さ (3.3m, 最低水位時水面高さ)  
 $\alpha_i$  : 凍結面の熱伝達率 (鉛直円柱の熱伝達の実験式を元に求める。 $U_n$ や $\varepsilon$ の関数)  
 $T_f$  : 水温 (基本ケースは15 )  
 $T_s$  : 凍結面温度 (0 )



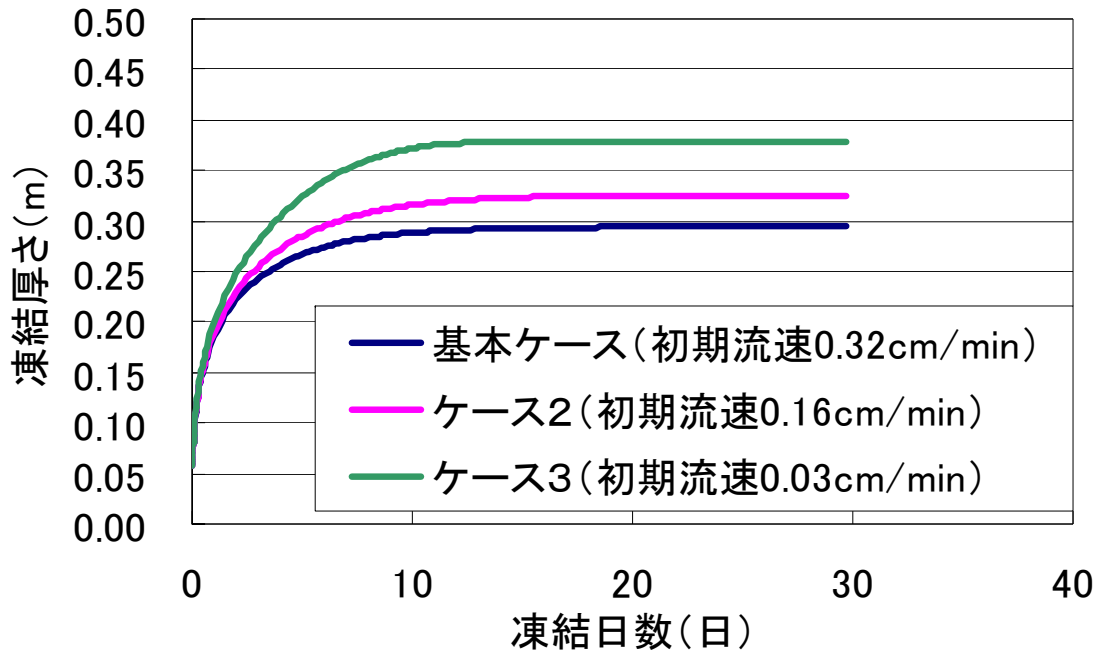
## 4. 簡易熱量収支計算によるパラメータスタディ結果①

➤ 現在の立坑Aの条件を基本ケース（水温15℃，初期流速0.32cm/min、凍結管間隔80cm）とし，水温 $T_f$ ，初期流速 $U_0$ の各パラメータを変化させた場合の，氷の厚さの変化を比較（凍結管間隔の半分の長さに達すると閉塞を意味する）。

1. 水温を下げた場合



2. 初期流速を下げた場合



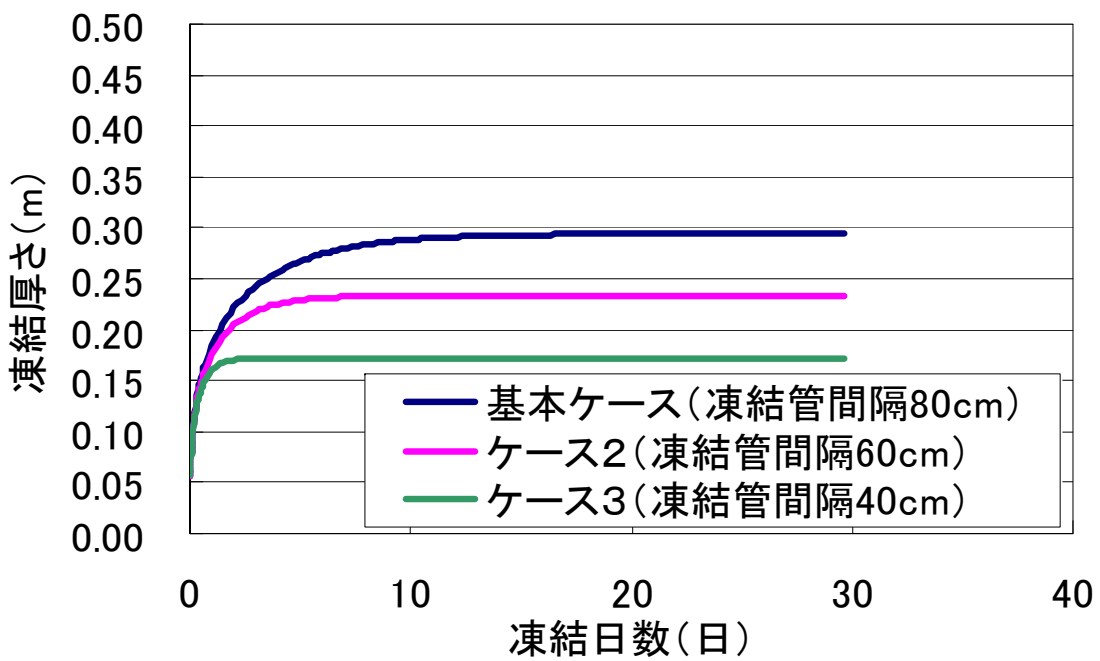
- ✓ 現状の水温（15℃）から低下させると，氷の厚さは増加していき，水温5℃ではほぼ氷がつながり止水壁ができる結果。
- ✓ 対策工としては氷やドライアイスの投入等が考えられる。立坑A内の滞留水に加えて，建屋から流入してくる水の水温を下げる必要がある。

- ✓ 流速を抑制すれば，凍結は促進される。但し，大きな効果を期待するためには，流速を限りなくゼロに近づける必要がある。
- ✓ 初期流速を抑えるためには，建屋水位変動を抑制する必要がある。水位変動をほぼゼロに維持することは，運用上の問題から容易ではない。

## 4. 簡易熱量収支計算によるパラメータスタディ結果②

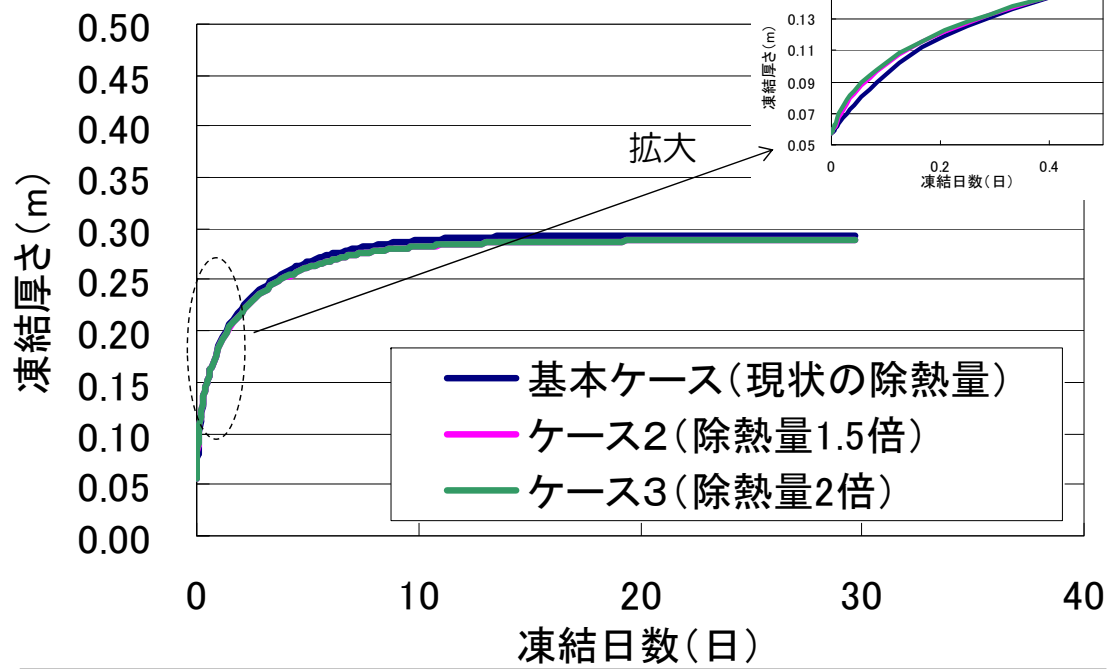
➤ 現在の立坑Aの条件を基本ケース（水温15℃，初期流速0.32cm/min，凍結管間隔80cm）とし，凍結管の間隔d，凍結管の出力の各パラメータを変化させた場合の，氷の厚さの変化を比較（凍結管間隔の半分の長さには達すると閉塞を意味する）。

### 3. 凍結管の間隔を狭めた場合



- ✓ 凍結管の間隔を狭めると，閉塞しやすくなる結果。
- ✓ 対策工としては，測温管を凍結管に変更することにより，凍結管の間隔を狭める等が考えられる。

### 4. 凍結管の除熱量を上げた場合

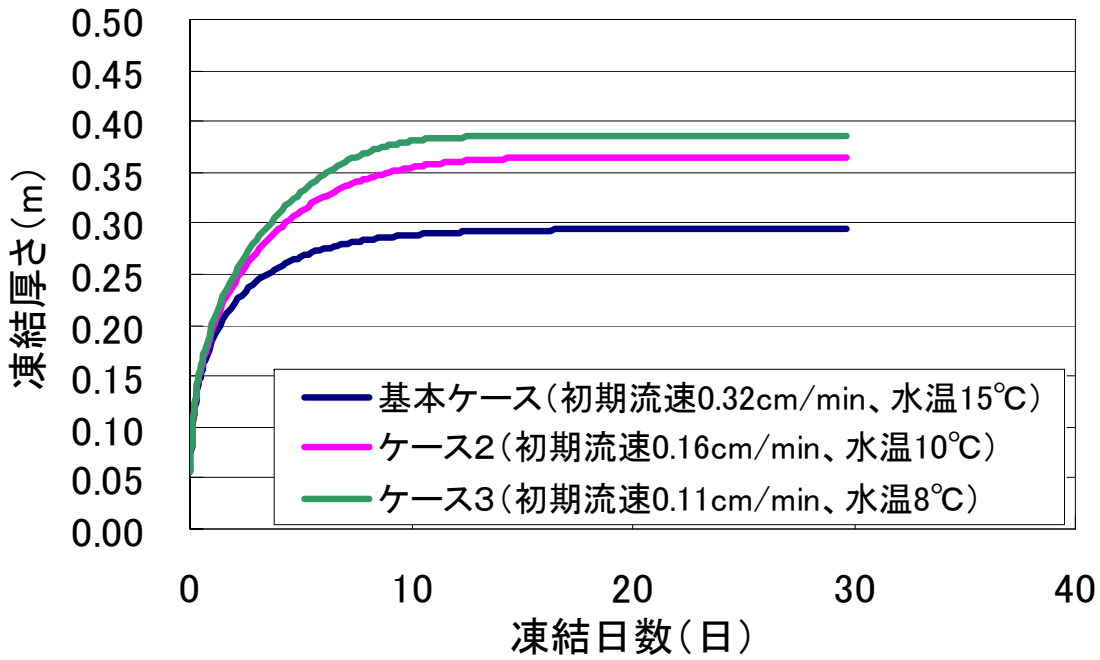


- ✓ 凍結管の除熱量<除熱される側の伝熱量の限界値（熱伝導率や温度勾配により決まる）の関係が成立している期間の，凍結管の除熱量を上げた場合の結果が上のグラフ。
- ✓ 凍結初期においてわずかに凍結が早くなる程度であり，凍結促進の効果はほとんどない。

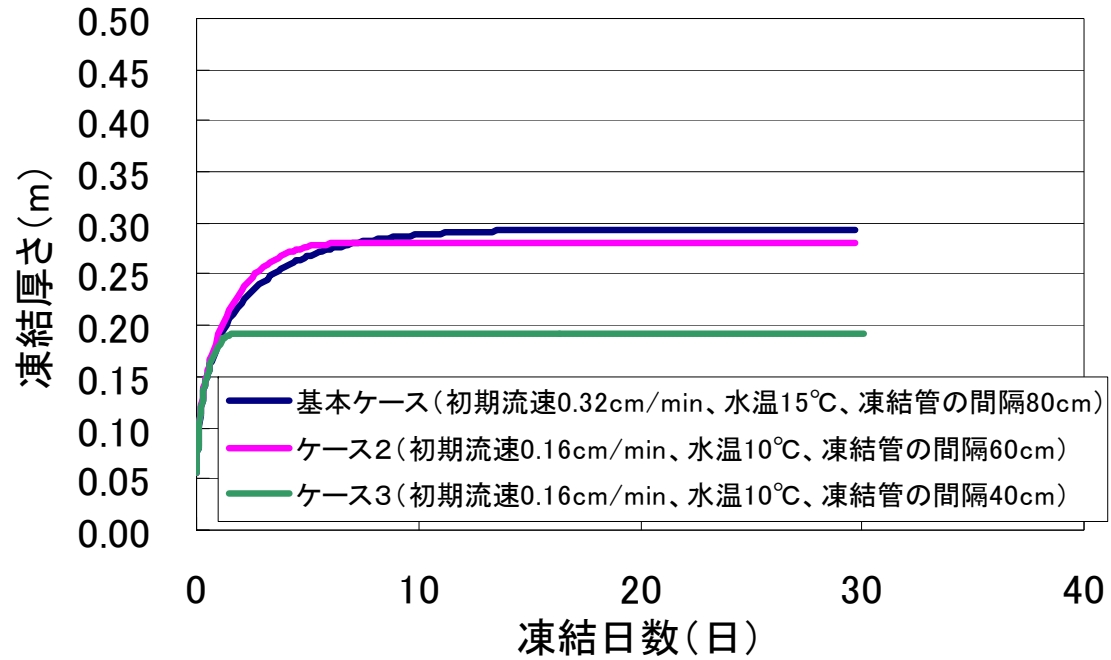
## 4. 簡易熱量収支計算によるパラメータスタディ結果③

- 複数のパラメータを組み合わせることで改善させた場合の氷の厚さの変化を比較。
- その結果、一つのパラメータを大きく変化させる場合と比較して、複数のパラメータを少しずつ変化させることで同等の効果が見込める結果。

### 5. 初期流速と水温低下を行う場合



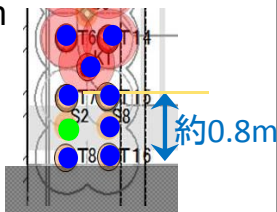
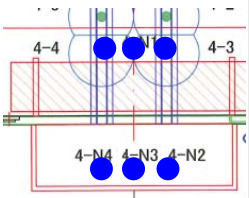
### 6. 初期流速, 水温低下, 凍結管の間隔変更を行う場合



- ✓ 特に、初期流速の抑制と水温の低下させた場合の凍結促進効果が大きいと見込まれる。
- ✓ 実際の対策工の選定においては、これら結果を踏まえて選定していくことを基本とするが、モデルの不確実性・現場の施工性、工程も考慮する必要がある。

## (参考) 実証試験との条件の差異について

- 実証試験では、閉空間での試験であり、建屋水位変動に伴うわずかな水流、系外からの伝熱、凍結部背面の立坑の存在などが十分に模擬されていなかった。

項目		現地条件（立坑A）	実証試験（ケース4）	実証試験の現地条件との比較
1.水槽	幅 水深 滞留水量  設置条件 水温 流水の有無 トレンチ内の縦断線形	<ul style="list-style-type: none"> <li>5.7m</li> <li>3.3m~3.7m</li> <li>約90m<sup>3</sup> (トレンチ全体は5,500m<sup>3</sup>)</li> <li>地中、建屋に隣接</li> <li>15</li> <li>0.00016m<sup>3</sup>/s (上昇時)</li> <li>凍結部背面に立坑</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2.2m</li> <li>2m</li> <li>25m<sup>3</sup></li> <li>気中、断熱</li> <li>30 (初期温度)</li> <li>なし</li> <li>なし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水量が少なく小規模。</li> <li>水槽を断熱材で被覆していた（夏で外気温が高かったため）。そのため、系外からの伝熱が再現されていない。</li> <li>建屋水位変化に伴う流水が再現されていない。</li> <li>凍結部背面の立坑が再現されていない。対流が発生している可能性。</li> </ul>
2.凍結管	管径 材質 ピッチ パッカー充填材 ブライン温度	<ul style="list-style-type: none"> <li>114.3mm</li> <li>SGP（ガス管）</li> <li>0.8m以下</li> <li>セメントベントナイト（比重1.3, 配合同じ）</li> <li>約-40</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>凍結管の仕様に差異はない。</li> </ul>
3.支障物	ケーブルトレイ 配管 配管内	<ul style="list-style-type: none"> <li>幅0.6m×4段×2カ所</li> <li>500A×1, 250A×2</li> <li>満水と推定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>幅0.6m×4段×1カ所</li> <li>500A×1, 250A×1</li> <li>満水</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>現地の支障物を実物大で模擬している。但し、配管支持架台・ケーブルは模擬せず。</li> </ul>
4.パッカー未設置部	未設置部の幅 凍結管（パッカーなし） 側壁外凍結管	<ul style="list-style-type: none"> <li>約0.4m</li> <li>5本</li> <li>0本</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>約0.6m</li> <li>1本</li> <li>3本</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>実証試験では側壁外側に凍結管を入れているものの、現地条件では代わりに側壁沿いに凍結管を入れている。</li> </ul>
5.その他	水質	<ul style="list-style-type: none"> <li>140ppm（塩素濃度, H25.5.30測定値）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水道水</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ほぼ水と考えられる。</li> </ul>

## (参考) 熱量収支計算 パッカーの熱伝導率について

- パッカー内に充填されているセメントベントナイトの熱伝導率は、水よりも高い。
- ナイロンの熱伝導率は低いが、厚さが2mm程度で薄く、パッカー全体の熱伝導率への影響は小さい。

### 【パッカー充填材】

#### セメントベントナイトの配合表

	単位	ベントナイト	セメント	水	合計	氷 (参考)
密度	kg/リットル	2.7	3.1	1.0	1.3	0.92
重量	kg/m <sup>3</sup>	63	375	856	1293	—
体積	リットル/m <sup>3</sup>	23	121	856	1000	—
重量比	%	4.9	29.0	66.1	100	—
熱伝導率	W/m・K	0.293 <sup>*2</sup>	コンクリート1.2 <sup>*1</sup>		1.1	2.2 (水 (0℃) 0.569)

パッカー充填材の熱伝導率は、セメントベントナイトの重量比と熱伝導率から、1.1程度と推察される。この値は水の約2倍であり、氷（熱伝導率2.2W/m・K）の半分。

1 伝熱工学資料第4版P322

2 土木学会第55回年次学術講演会「すきま充填材としてのベントナイト特性に関する研究（その2）」

### 【パッカーの袋材の熱伝導率】

- 材質 : ナイロン
- 熱伝導率 : 0.2 W/m・K (熱伝導の観点から、厚さ2mmのナイロンは、5.7mmの水の層と同等)
- 厚さ : 約2mm

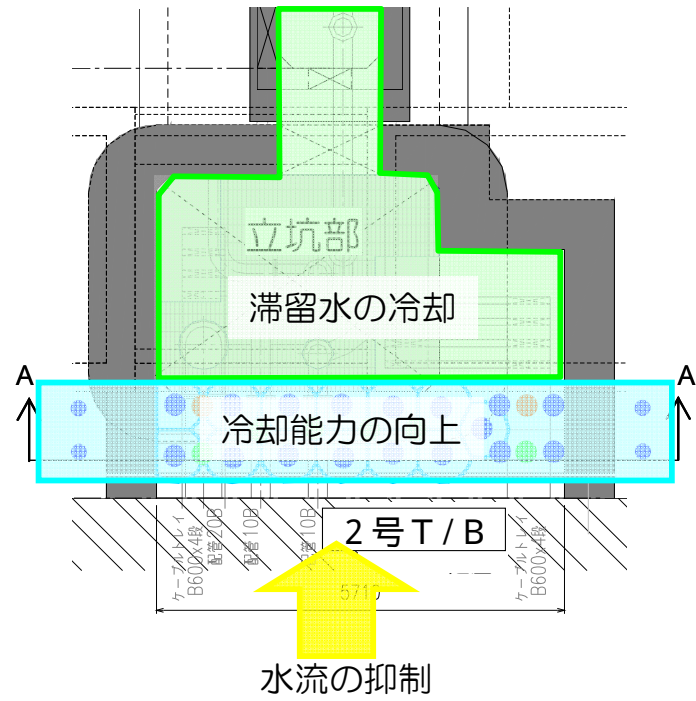


# 5. 追加対策工の検討・実施状況

➤ 熱量収支計算結果から得られた期待される効果、各工法の現場における施工性・工程・リスクを踏まえ、下記の工法を検討。

目的	対策案	概要
冷却能力の向上	○ 躯体外側への凍結管設置	トレンチ躯体の外側に凍結管を追加設置する。
	○ 躯体内側への凍結管設置	凍結止水壁未造成範囲に凍結管を増設する。
	・ 新たに孔を削孔し凍結管を設置	
	・ 既設測温管を凍結管に変更	
	○ 冷媒・流量の変更	冷媒の流量を増加することにより、除熱量を増加させる。
	・ 冷媒の流量増加	
	・ 冷媒の使用温度変更	
・ 不凍液の変更	現状の不凍液より使用温度の低い不凍液に変更する。	
・ LN2(液体窒素)へ変更	冷媒を液化窒素に変更する。	
滞留水の冷却	○ 氷の投入	立坑内に氷を投入し、トレンチ内の滞留水温を下げる。
	○ ドライアイスの投入	立坑内にドライアイス投入し、トレンチ内の滞留水温を下げる。
	○ 立坑側への凍結管の設置	立坑内に凍結管を設置し、トレンチ内の滞留水温を下げる。
	○ 気化LN <sub>2</sub> の躯体内封入	立坑内に気化したLN <sub>2</sub> を封入し、トレンチ内の気層部温度を下げる。
水流の抑制	○ 追加パッカーの設置	現状大きな通水断面となっている南側ケーブルトレイ下にパッカーを追加設置する。
	○ グラウト材による間詰め	凍結止水壁および追加パッカーなどで閉じ切れなかった通水断面について、グラウト材で間詰めを行い、水流の発生を抑制する。
	○ その他材料による間詰め	グラウト材による間詰め同様、高分子系材料などにより、隙間を間詰めし、水流の発生を抑制する。
	○ 建屋水位変動の抑制	トレンチ側での水流発生要因のひとつである、建屋側の水位変動を抑制することにより、水流の発生を抑制する。

平面図



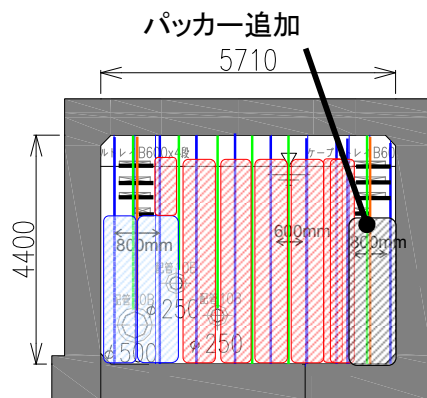
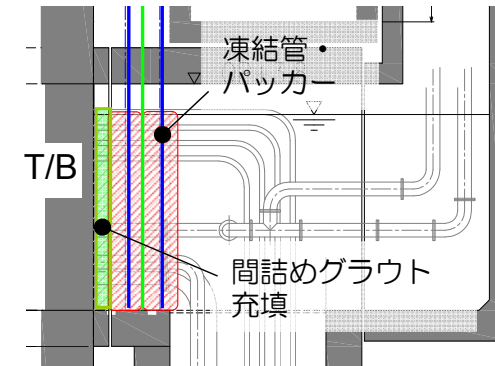
# 5. 追加対策工の検討 各対策工の比較表 冷却能力の向上

	冷却能力の向上		
	躯体外側への凍結管設置	躯体内側への凍結管の追加設置	冷媒並びに流量の変更
概要	<p>トレンチ躯体の外側に凍結管を追加設置する</p> <p>躯体外側への凍結管設置</p>	<p>①新たに孔を削孔し、凍結管を設置 ②既設測温管を凍結管へ変更</p> <p>①新たに孔を削孔し凍結管を設置 ②既設測温管を凍結管へ変更</p>	<p>①冷媒の流量増加 ②使用中の冷媒の使用温度変更 ③冷媒の変更（より低温まで対応可能な不凍液への変更） ④冷媒の変更（LN<sub>2</sub>への変更）</p>
想定される効果	<ul style="list-style-type: none"> <li>トレンチの躯体外へ逃げる冷熱を低減することによる、冷却能力の間接的な向上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>未凍結範囲での冷却能力を直接向上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>冷媒および流量の変更による冷却能力の向上</li> </ul>
施工性 懸案事項 進捗状況	<ul style="list-style-type: none"> <li>作業構台等ヤード整備・準備作業が必要</li> <li>現在準備作業中</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>既に2本の測温管を凍結管へ変更済（6/4時点）</li> <li>測温管を引き抜くと温度計測ができなくなるため、変更箇所を選抜し、凍結管を挿入</li> <li>併せて測温管の追加設置についても、検討中</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>流量の増加については、並列している予備ポンプを使用し、即時対応可能。現在試験実施中。</li> <li>現状、冷媒の使用限界温度付近で運用しており、冷媒を変えずに温度を変更するのは不可能。</li> <li>冷媒の変更は、設備ごと取り替える必要があり、工程に影響を及ぼす。</li> </ul>

# 5. 追加対策工の検討 各対策工の比較表 滞留水の冷却

		滞留水の冷却			
		氷の投入	ドライアイスの投入	立坑側への凍結管の挿入	気化LN <sub>2</sub> の躯体内封入
概要	氷を開口部から投入する	ドライアイスを開口部から投入する		立坑側への凍結管の挿入	気化LN <sub>2</sub> の躯体内封入
		既削孔箇所から投入 ペンthouseから投入	既削孔箇所から投入 ペンthouseから投入	ペンthouseから投入	既削孔箇所から投入 ペンthouseから投入
想定される効果	<ul style="list-style-type: none"> <li>水温低下により凍結しやすい環境にする</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水温低下により凍結しやすい環境にする</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水温低下により凍結しやすい環境にする</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水温低下により凍結しやすい環境にする</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水面に接している気体を冷却することにより凍結しやすい環境にする</li> </ul>
施工性 懸案事項 進捗状況	<ul style="list-style-type: none"> <li>既削孔箇所およびペンthouseからの投入が可能</li> <li>氷の調達を手配済み</li> <li>氷は浮遊するため、表面の温度低下を期待</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ドライアイスは沈降するためT/B側からの投入が必要</li> <li>調達については手配済み</li> <li>気化CO<sub>2</sub>ガスが建屋側に流入することが想定されるため、酸欠等への配慮が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>設置に際し、グレーチング等内部設備の撤去が必要。</li> <li>内部の雰囲気線量が高い。(10mSv/h程度)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>気化LN<sub>2</sub>ガスが建屋側もしくは地上部に噴出することによる酸欠への配慮が必要であり、効果と併せて検討中。</li> </ul>	

# 5. 追加対策工の検討 各対策工の比較表 水流の抑制

	水流の抑制			
	追加パッカーの設置	グラウト材による間詰め	その他材料による間詰め	建屋水位変動の抑制
概要	<p>現状パッカーの無いS8周辺に追加でパッカーを設置する</p> 	<p>パッカーの密着していない箇所、配管近傍の隙間等をグラウト等で間詰め充填する</p> 	<p>パッカーの密着していない箇所、配管近傍の隙間等を高分子系材料などで間詰め充填する</p>	<p>建屋側での水位変動を抑制することにより、建屋トレンチ間の水の行き来を低減する</p>
想定される効果	<ul style="list-style-type: none"> <li>パッカー設置により通水断面を減少し、当該部の凍結を促進する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>間詰め充填により水流を低減</li> <li>グラウトごと凍結することにより配管近傍の隙間も止水</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>凍結やグラウトでも隙間が発生した場合に、当該箇所の水流を止める</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>建屋トレンチ間の水の行き来を低減し、水流を抑制する</li> </ul>
施工性 懸案事項 進捗状況	<ul style="list-style-type: none"> <li>パッカーを損傷することなくケーブルトレイ下に設置するため、保護管によりガイドする</li> <li>既削孔径の関係から、凍結管付きのパッカーの設置は不可能、当該部分はパッカーのみの設置となる</li> <li>パッカーは手配済み</li> <li>作業構台構築中</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>既設の孔から充填材を、パッカー・建屋間に投入</li> <li>グラウトの流動性を調整し、ケーブルトレイ部まで充填できないか、使用する材料を含め、検討中</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>既設の孔から材料をパッカー・建屋間に投入</li> <li>高分子系材料等の当該箇所への適用可否含め検討中</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>建屋側からの移送先を変更することにより、移送流量を調整（結果して水位の変動が抑制される）</li> <li>移送先の建屋等の容量により継続実施期間に制約あり</li> </ul>

## 5. 追加対策工の検討 各対策工の評価

各工法について、対策の効果および現場での実施可能性について検討した結果、下記対策について採用、順次実施中

目的	対策案	実施検討	評価
冷却能力の向上	○ 躯体外側への凍結管設置	躯体外側への凍結管設置に関しては、削孔位置での支障も少ないため、外部への冷熱放出防止の観点から、実施する。	採用 (準備中)
	○ 躯体内側への凍結管設置 ・ 新たに孔を削孔し凍結管を設置	これまでの削孔による当該頂版部の断面欠損を考慮すると、凍結管の追加削孔は困難。	—
	・ 既設測温管を凍結管に変更	既設孔を使用するため、躯体への悪影響はなく、施工可能。 但し、交換した測温管での温度計測はできなくなるため、選択的に変更することが必要。	採用 (準備中)
	○ 冷媒・流量の変更 ・ 冷媒の流量増加	並列している予備ポンプを使用し、即時対応可能。現在試験実施中。	採用(実施中)
	・ 冷媒の使用温度変更	冷媒の使用限界温度付近で運用しており、冷媒を変えずに温度を変更するのは不可能。	—
	・ 不凍液の変更 ・ LN2(液体窒素)へ変更	冷媒の変更は、設備ごと取り替える必要があり、工程に影響を与える。	—
滞留水の冷却	○ 氷の投入	投入分の滞留水の増加はあるものの、直接的に滞留水の温度を低下できることから、実施する。	採用 (準備完了)
	○ ドライアイスの投入	周辺の酸欠等の配慮が必要であるが、滞留水の増加はなく、直接的に滞留水の温度を低下できることから、実施する。	採用 (準備完了)
	○ 立坑側への凍結管の設置	設置に際し、グレーチング等内部設備の撤去が必要であり、また、内部の雰囲気線量が高いことから、設置方法含め検討中。	検討中
	○ 気化LN <sub>2</sub> の躯体内封入	気化LN <sub>2</sub> ガスが建屋側もしくは地上部に噴出することによる酸欠への配慮が必要であり、実施方法含め検討中。	検討中
水流の抑制	○ 追加パッカーの設置	パッカー未設置箇所(ケーブルトレイ貫通部下)への設置による水流の低減が効果的であるため、ケーブルトレイ部にガイドを設置し、パッカー設置を実施。	採用 (準備中)
	○ グラウト材による間詰め	凍結による止水が完全でなかった場合において、グラウトの流動性を調整し、ケーブルトレイ部まで充填できないか、使用する材料を含め、検討中。	採用 (検討中)
	○ その他材料による間詰め	凍結による止水が完全でなかった場合において、高分子系材料等の当該箇所への適用可否含め検討中。	採用 (検討中)
	○ 建屋水位変動の抑制	上記各対策と併せて、建屋水位変動を実施することによる、水流の発生の抑制について実施。	採用 (調整中)

3号機への水平展開につき、フィン付き凍結管や、より熱伝導率の高いパッカー等についても工程を踏まえた実現可能性を含め検討する。

## 5. 追加対策工の検討 各対策工の実施手順案

### STEP : 凍結促進

#### 【滞留水の冷却】

- ① 氷・ドライアイスの投入（準備完了）  
→ 各凍結管等のスリーブなどから投入予定  
(投入開始以降, 可能な範囲で建屋水位変動を抑制)

#### 【冷却能力の向上】

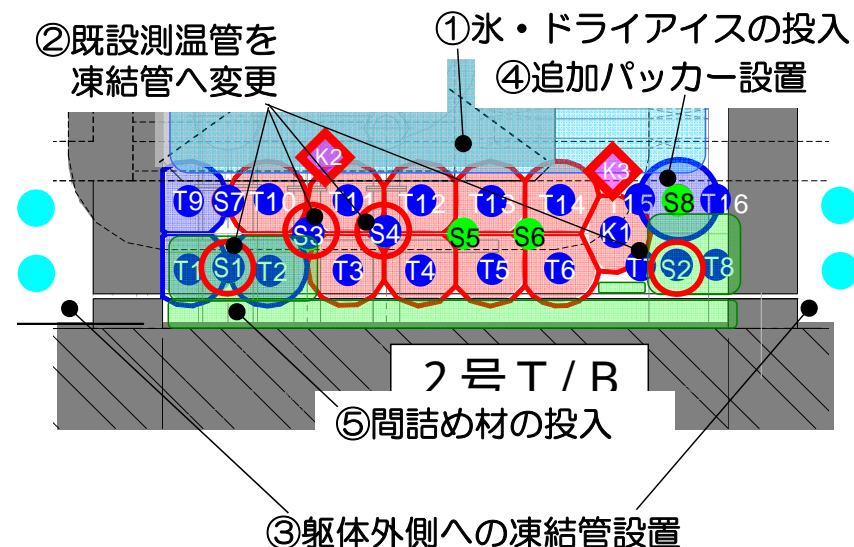
- ② 既設測温管を凍結管へ変更（準備中）  
→ S1,S2,S3,S4を凍結管に変更予定  
(凍結管：19本→23本, 測温管：6本→2本)  
(測温管の追加設置について, 方法含め検討中)
- ③ 躯体外側への凍結管設置（準備中）

### STEP : 間詰め充填

#### 【水流の抑制】

- ④ 追加パッカー設置（着手済み）  
→ S8の位置に設置予定  
(凍結管を撤去し, 測温管付きパッカーを設置)  
(凍結管：23本→22本, 測温管：2本→3本)
- ⑤ 間詰め材の投入（材料・施工方法含め検討中）

施工順序, 設置場所等については現場と詳細調整中



前述の解析結果を踏まえ, 複数の対策を組み合わせ実施していく。

- ・ 氷・ドライアイスの立坑への投入により, 水温の低下を図る (特に温度が低下していない水面付近の水温を下げる)。
- ・ 既設測温管を凍結管に変更することにより, 凍結管間隔を狭める。  
(約800mm → 約400mm)
- ・ さらに, 躯体外側の凍結管設置, 建屋水位の変動の抑制を, 各対策の効果が確実に現れるよう, 同時並行的に実施する。
- ・ 併せて, 凍結のみで止水が完了しない可能性を鑑み, 追加パッカーおよびグラウト材による間詰めについても並行して準備を進める。

# 5. 追加対策工の検討 対策工程（2号機立坑A）

- 前述の実施手順に基づき，対策を順次実施する（一部着手済み）
- STEP については使用する材料等について引き続き検討を実施し，STEP 完了後着手予定

項目		7月			8月		
		20	30	10	20	30	
STEP I	①氷投入	投入準備	試験投入	投入			
	①ドライアイス投入	投入準備	試験投入	投入			
	②既設測温管を凍結管へ変更	凍結管交換	凍結運転	測温管追加設置 ※現在, 設置位置含め検討中			
	③躯体外側への凍結管設置	架台設置	架台設置・削孔	凍結管挿入	凍結運転		
STEP II	④追加パッカー設置	架台設置		削孔・内部確認	パッカー挿入		
	⑤間詰め材の投入				プラント準備	材料投入	

※各対策工程については，天候・実施状況等に応じて変更の可能性あり

# (参考) 各対策工の実施手順①

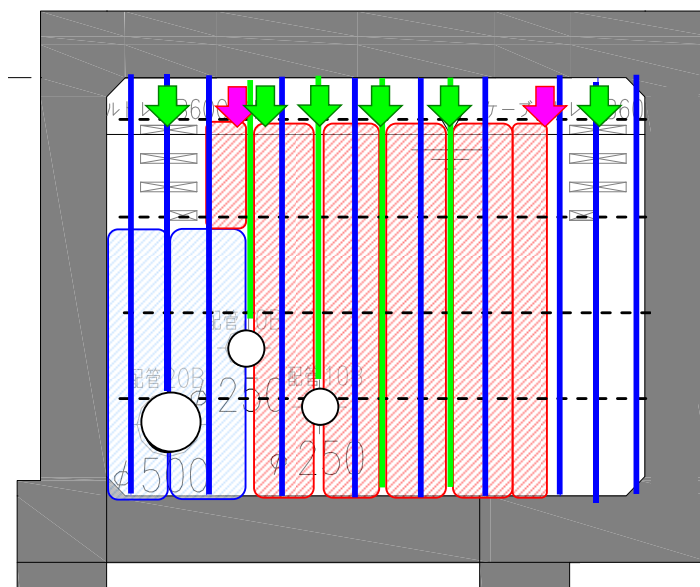
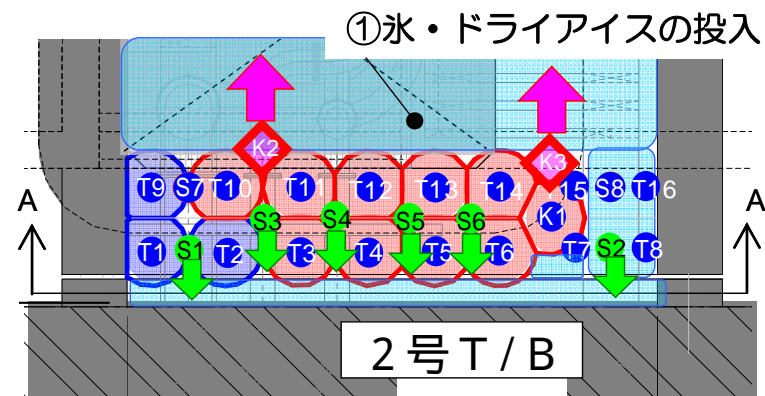
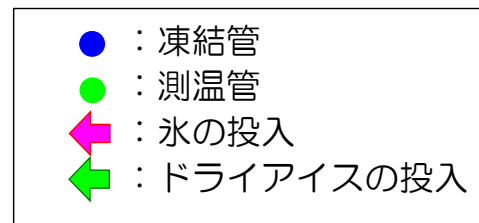
## STEP : 凍結促進

### 【滞留水の冷却】

- ① 氷・ドライアイスの投入 (準備完了)  
→ 各凍結管等のスリーブなどから投入予定  
(投入開始以降, 可能な範囲で建屋水位変動を抑制)

### 【氷・ドライアイス投入の具体的手順】

- ① 7/24~7/26に試験施工を実施
  - K3 (観測孔φ250mm) から50mm未満のキューブ状の氷を約2t連続投入  
パッカーのない南側および凍結部背面を含む, 全体の水温低下が目的
  - S1~S6からペレット状のドライアイス約1t連続投入  
主にタービン建屋と凍結壁の間の水温低下が目的
  - K2 (観測孔φ250mm) からカメラを挿入し内部確認  
→必要に応じて氷やドライアイスの大きさの調整を実施
- ② 試験施工を踏まえた本格投入の実施
  - 氷: 約10~20t/日, ドライアイス: 約1t/日の調達が可能
  - S1~S6からドライアイス, K3 (状況によりK2も) から氷投入予定ペントハウス側からの氷の投入については, 投入方法も含めて継続検討  
(水位計への影響, 作業時の被ばく線量などを考慮し判断)



A-A断面



## (参考) 各対策工の実施手順②

### STEP : 凍結促進

#### 【冷却能力の向上】

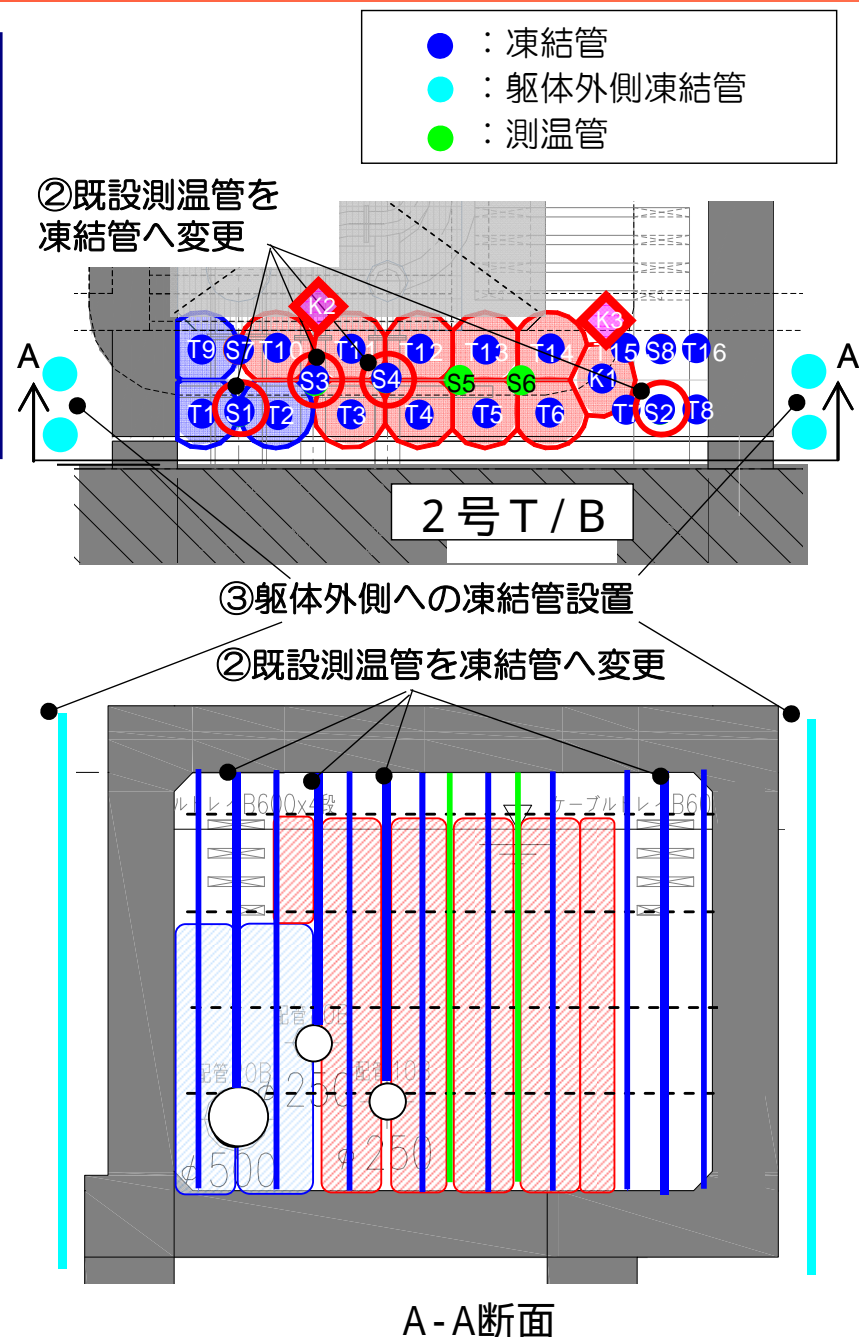
- ② 既設測温管を凍結管へ変更 (準備中)  
→ S1, S2, S3, S4を凍結管に変更予定  
(凍結管: 19本→23本, 測温管: 6本→2本)  
(測温管の追加設置について, 方法含め検討中)
- ③ 躯体外側への凍結管設置 (準備中)

#### 【既設測温管を凍結管への変更の具体的手順】

- S1・S2・S3・S4の測温管4本について, 凍結管への変更を実施  
(既に凍結が進んでいるS5・S6付近は測温管のままで維持)
- 凍結状況の監視を継続するため, S1・S2付近に新たに測温管用の孔を削孔し, 測温管を設置  
(詳細な位置, 設置方法含め検討中)

#### 【躯体外側への凍結管設置の具体的手順】

- トレンチ躯体外への冷熱の放出を抑制するため, 南北に計4本程度の凍結管を新たに設置。
- (設置本数等については現場状況などにより変更の可能性あり)
- 既設測温管を凍結管に変更後, 実施予定。



# (参考) 各対策工の実施手順③

## STEP : 間詰め充填

### 【水流の抑制】

#### ④ 追加パッカー設置 (着手済み)

→ S8の位置に設置予定

(凍結管を撤去し, 測温管付きパッカーを設置)

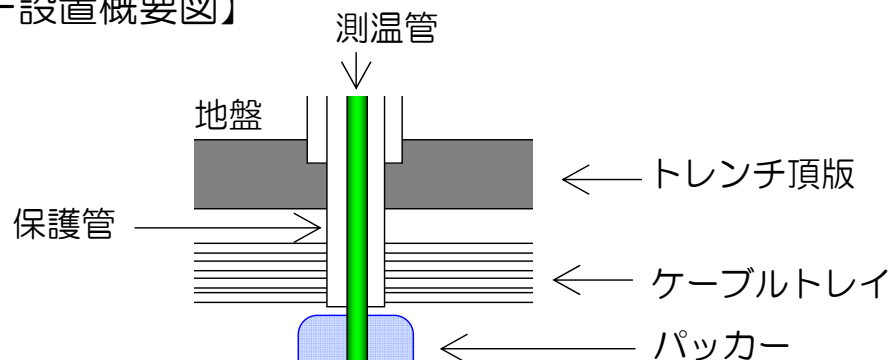
(凍結管: 23本→22本, 測温管: 2本→3本)

### 【追加パッカー設置の具体的手順】

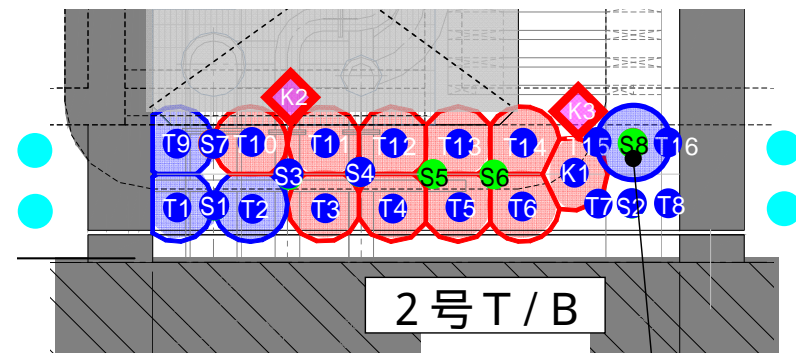
- S8の凍結管について引き抜き
- ケーブルトレイの再削孔 (径の拡幅) の実施
- パッカー挿入時に, パッカーが傷つかないように保護管をケーブルトレイ下まで設置
- 保護管を通し, 測温管およびパッカーの袋をケーブルトレイ下に設置 (測温管はパッカー内の温度を測定)
- 周辺の孔より充填状況を確認しつつ, パッカー内にセメントベントナイトを注入

上記手順については, 詳細検討中

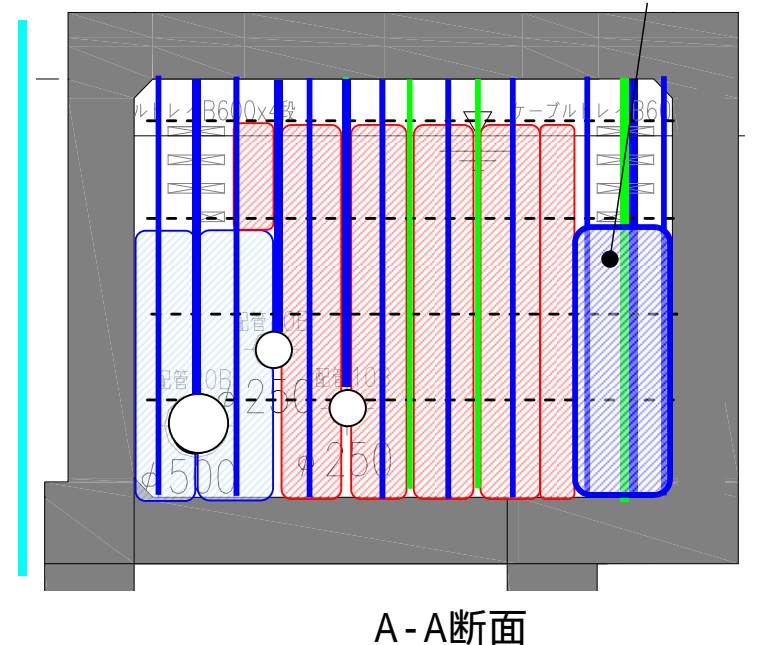
### 【追加パッカー設置概要図】



- : 凍結管
- : 躯体外側凍結管
- : 測温管



④追加パッカー設置



## (参考) 各対策工の実施手順④

### STEP : 間詰め充填

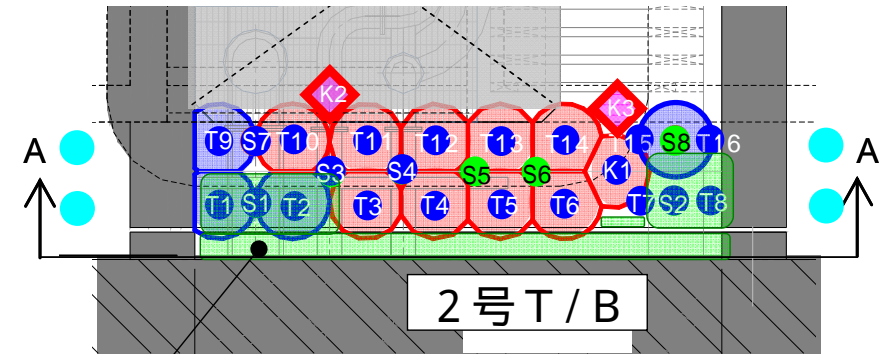
#### 【水流の抑制】

#### ⑤ 間詰め材の投入 (材料・施工方法含め検討中)

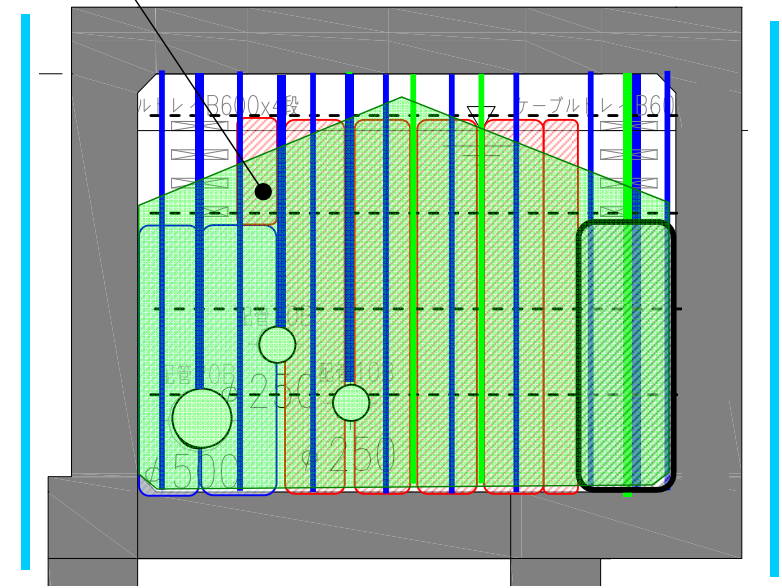
#### 【間詰め充填の具体的手順】

- S1およびS2の凍結管と頂版との隙間から材料投入用の管を挿入する
- 材料投入量と打設高さを確認しつつ、底部より打設する
- 所定の高さ (検討中) まで打設後、T4付近から打設し、打ち上げる

上記手順および具体的な材料投入量・管理高さについては、詳細検討中



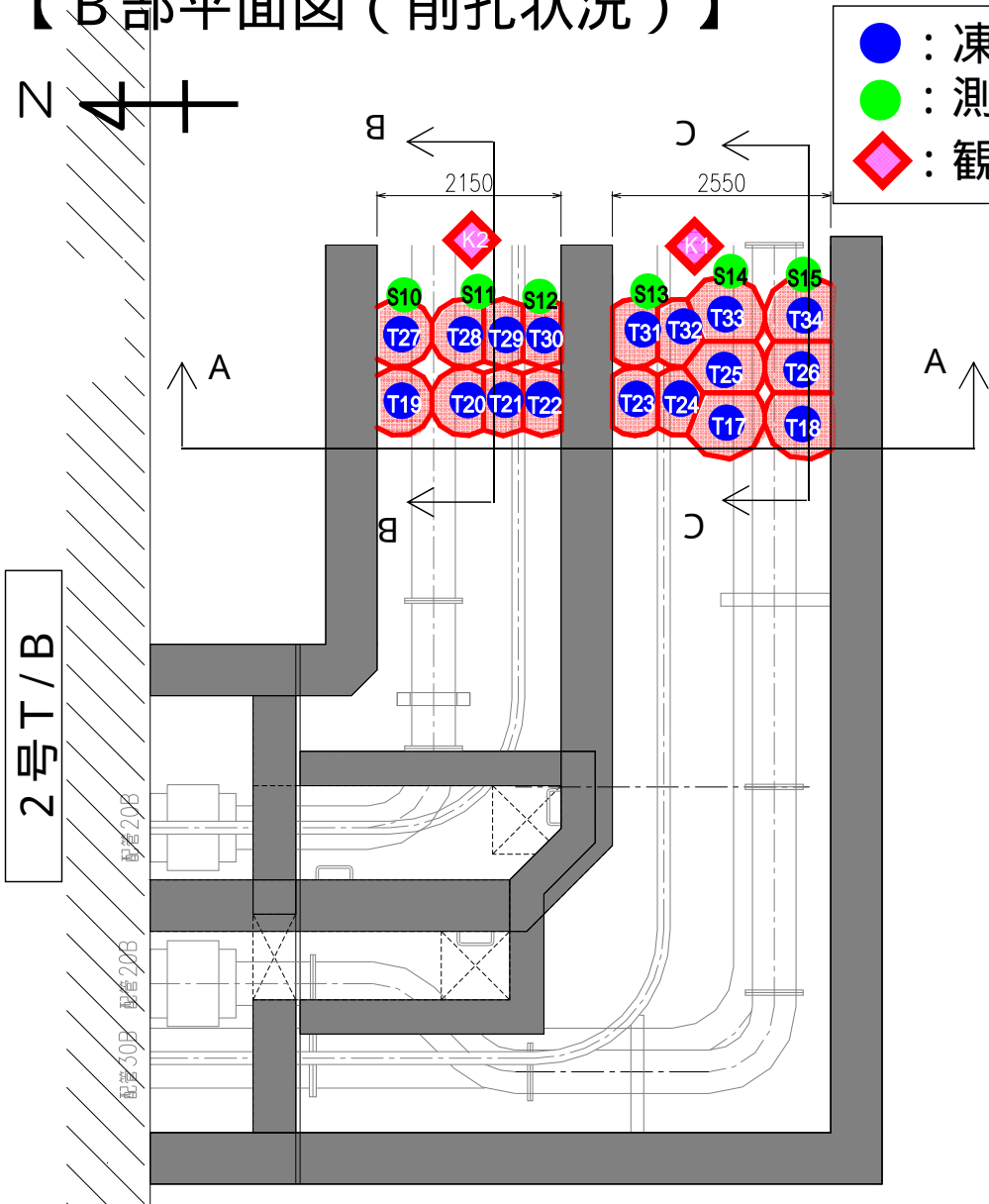
⑤間詰め材の投入



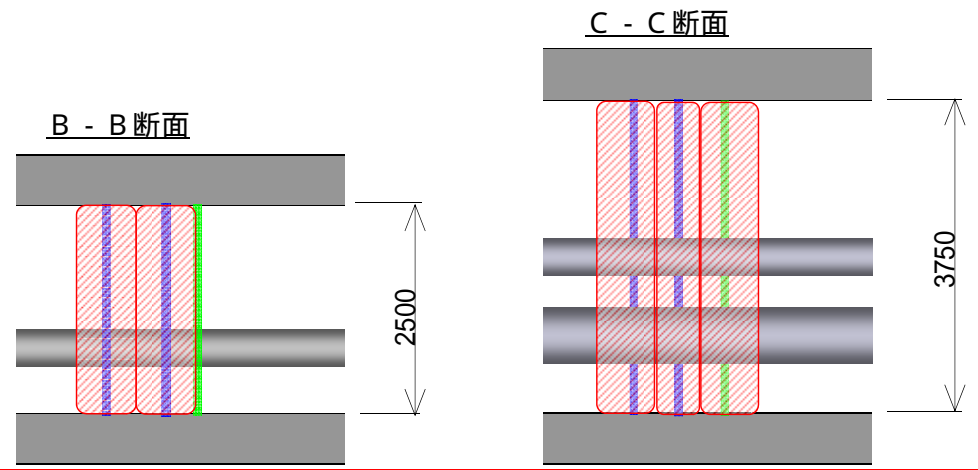
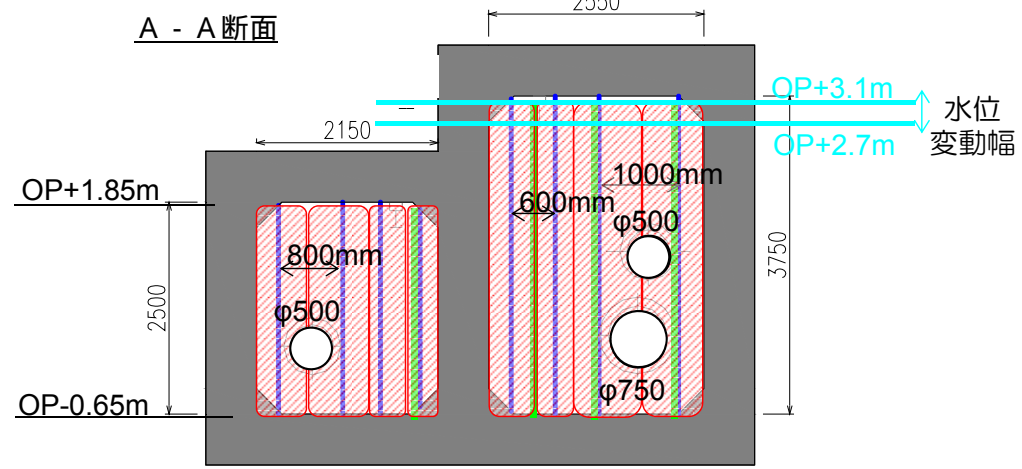
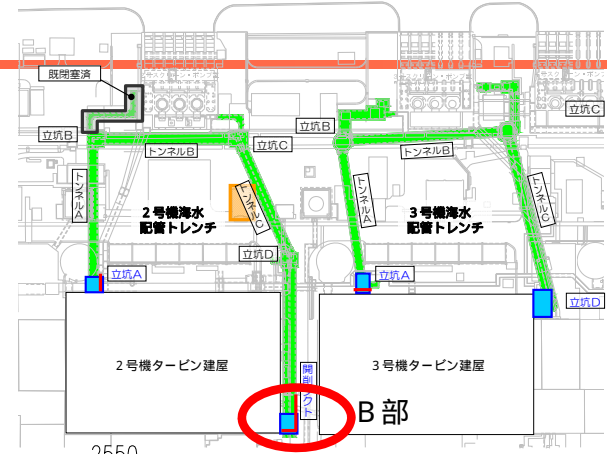
A-A断面

# 6. 2号機開削ダクト部 凍結状況①

【B部平面図（削孔状況）】

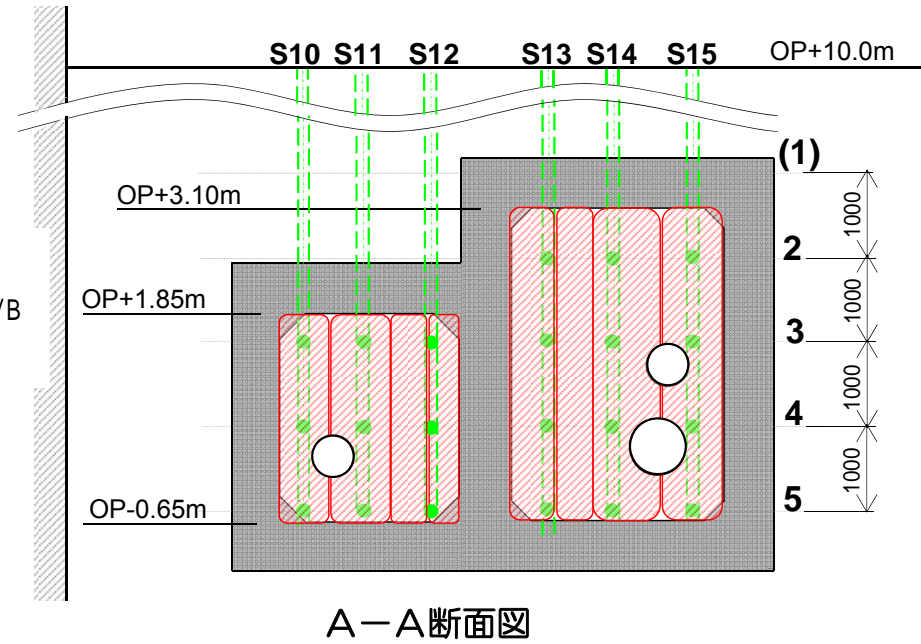
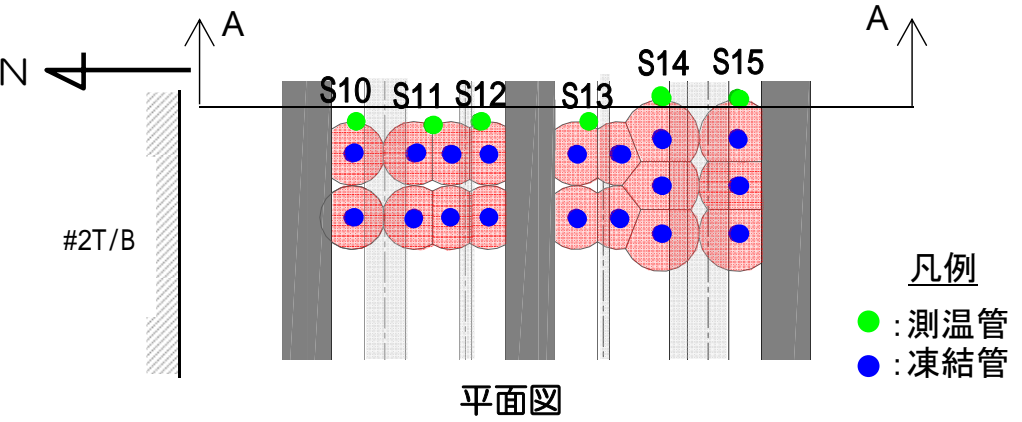


- : 凍結管 18 / 18本
- : 測温管 6 / 6本
- ◆ : 観測孔 2 / 2本



# 6. 2号機開削ダクト部 凍結状況②

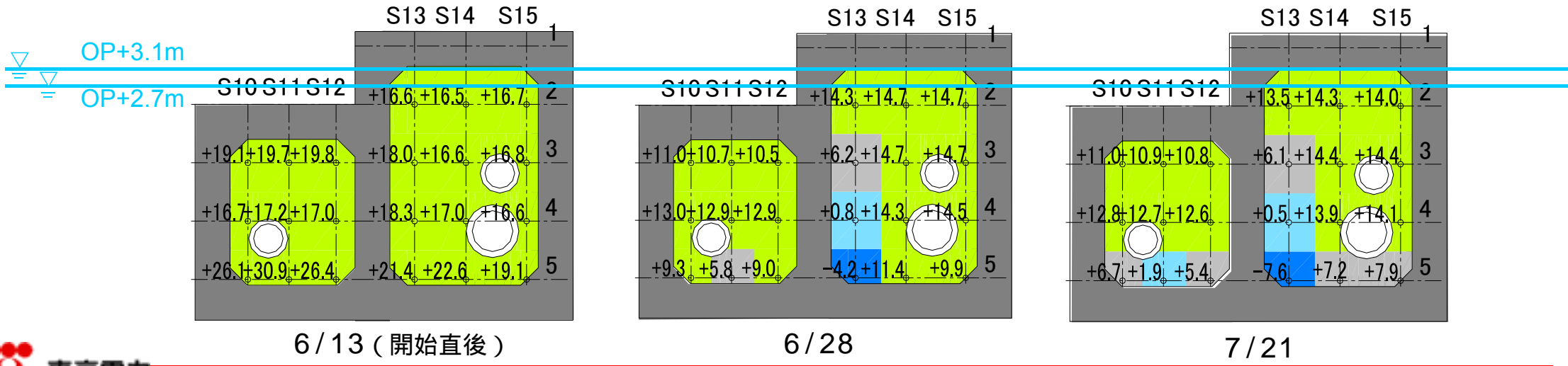
- 全断面においてパッカーを設置し、徐々に温度が低下している。
- 運転開始から1ヶ月程度経過しており、一部箇所において凍結していると思われる。
- 一部に温度低下が遅れている箇所も見られるため、内部確認および流向・流速の調査について実施中。



【測温管計測温度状況（時系列）】

凡例

■ (Yellow)	: 8 以上	■ (Grey)	: 4~8	■ (Cyan)	: 0~4	■ (Blue)	: 0 以下
------------	--------	----------	-------	----------	-------	----------	--------

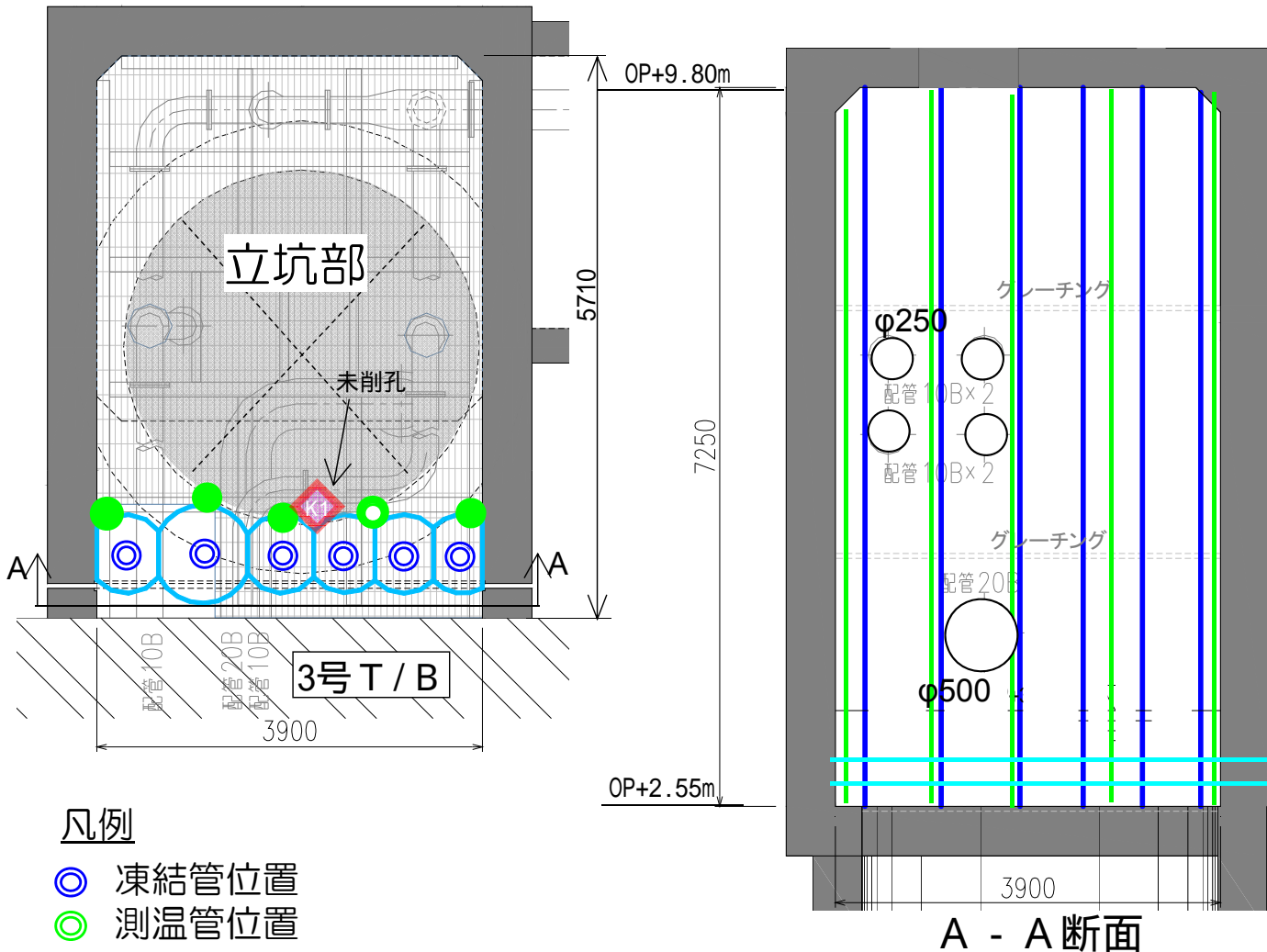


# (参考) 3号機立坑A施工状況

KEY PLAN N

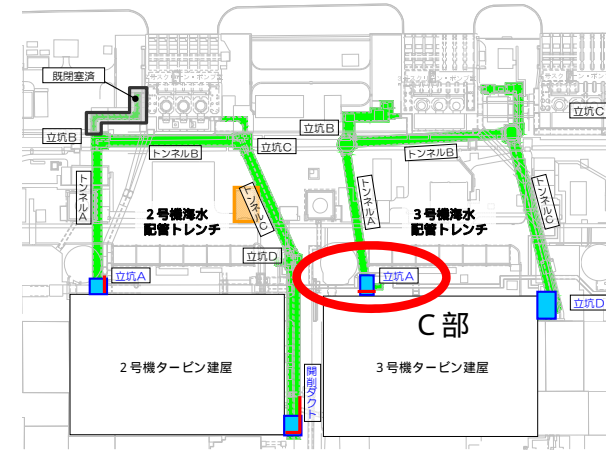
## 【C部平面図(削孔状況)】(H26.7.21時点)

N



### 凡例

- 凍結管位置
- 測温管位置



H26.7.21現在

### 削孔 済

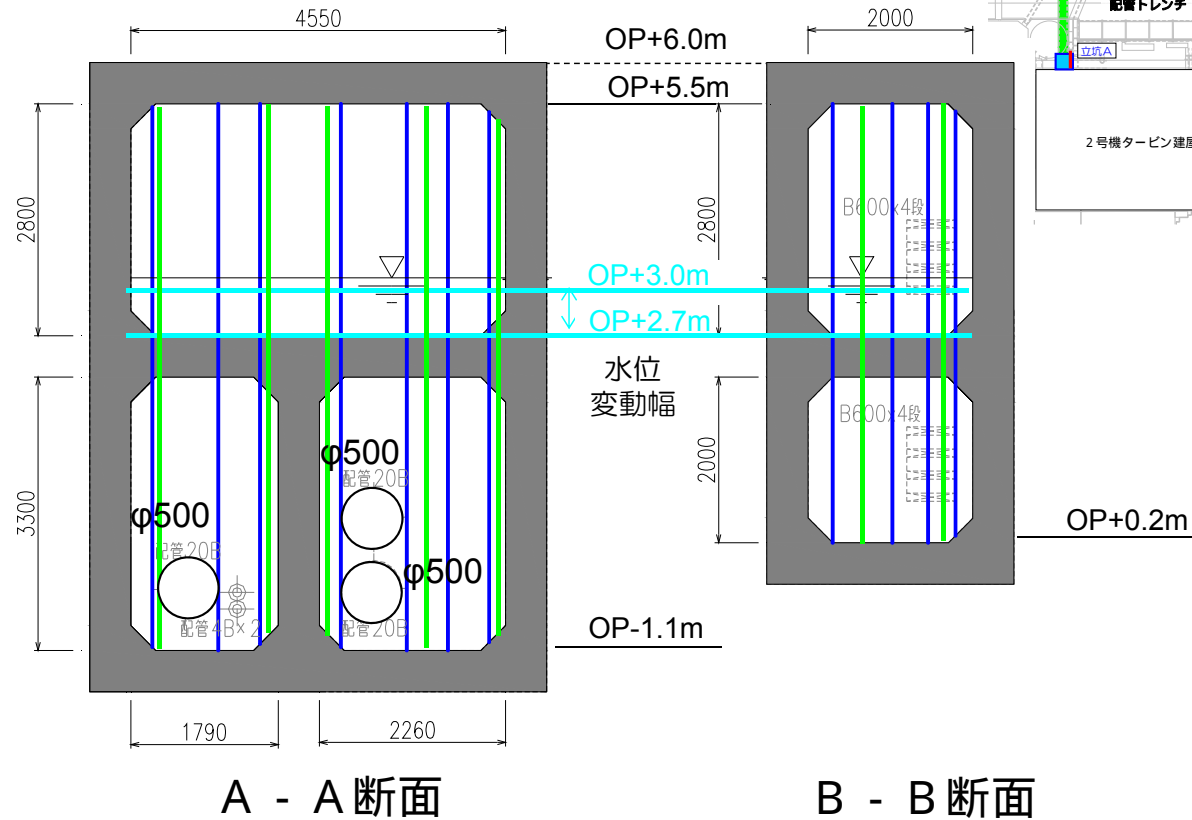
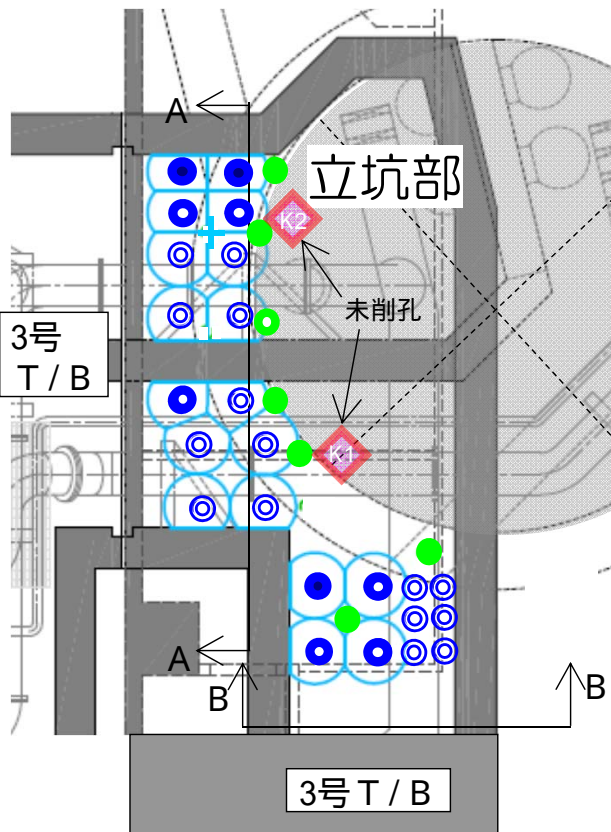
- : 保護管(外管)終了 0 / 6
- : 凍結管挿入用孔(内管)終了 0 / 6
- : 保護管(外管)終了 5 / 5
- : 測温管挿入用孔(内管)終了 4 / 5

(削孔本数・位置等については、追加対策実施に伴い、変更可能性あり)

OP+3.0m  
OP+2.7m  
水位  
変動幅

A - A 断面

【D部平面図(削孔状況)】(H26.7.21時点)



凡例

- 凍結管位置
- 測温管位置

削孔  
済

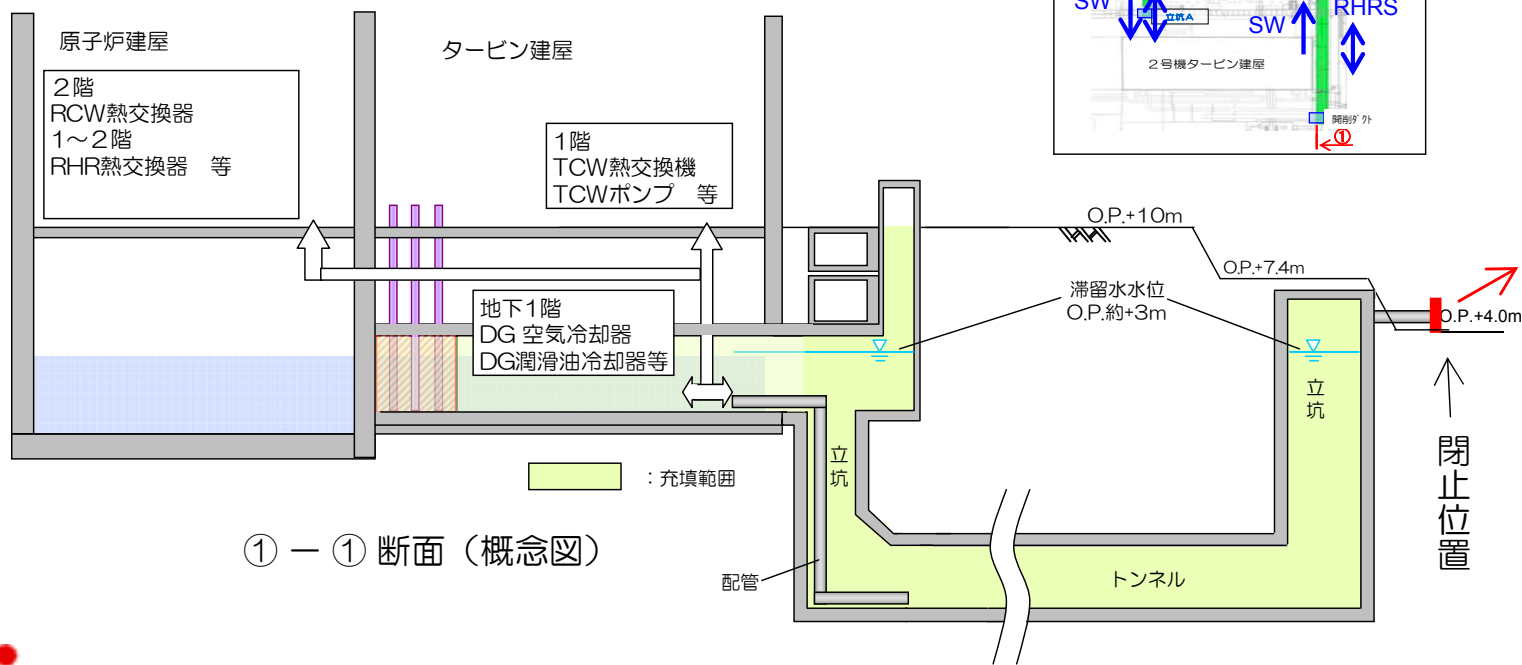
- |                        |                       |
|------------------------|-----------------------|
| : 保護管(外管)終了 9 / 24     | : 保護管(外管)終了 7 / 7     |
| : 凍結管挿入用孔(内管)終了 3 / 24 | : 測温管挿入用孔(内管)終了 6 / 7 |

(削孔本数・位置等については、追加対策実施に伴い、変更可能性あり)

H26.7.21現在

## (参考) 海水配管トレンチ内配管の状況

- 2,3号機の海水配管トレンチ内には、プラントの運転に必要な冷却水（海水）を供給する配管を敷設している。
- 配管は、原子炉の熱除去や機器の除熱を行うRHR S, DGSW系等があり、建屋内の熱交換機等に供給した後に放水口（CW配管）まで敷設される。
- 震災以降、万一の配管からの汚染水の系外流出を防止するため、O.P.+4.0mにある配管（供給元）の閉止を実施した。このため、配管内滞留水の流は生じていないと判断している。



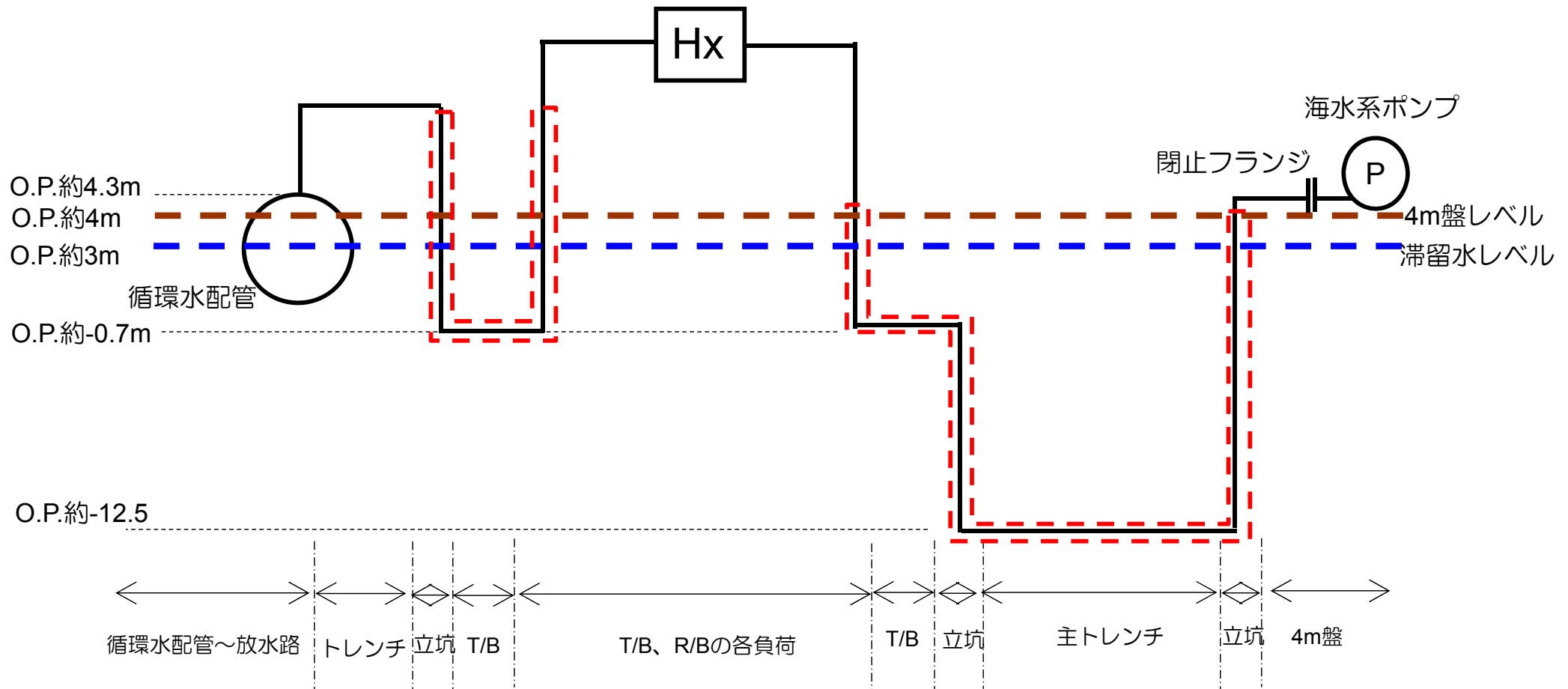
O.P.+4.0mの配管  
(RHR S) 閉塞状況





# (参考) 海水系配管 (RHRS、DGSW、SW) のレベル概要 (2号機の例)

  : 配管内に水が滞留している可能性のある範囲



## (参考) 海水配管トレンチ内配管の保有水の水質

- 震災時は、2, 3号機は運転中であったことから、配管内には系統に応じ、海水またはろ過水が存在しており、現在も残留しているものと考えている。
- O.P.+4.0mにおける配管の閉止の際に流出水を測定し、その水質は $10^{-3}\text{Bq/cm}^3$ オーダーであり、建屋滞留水 ( $10^4\sim 10^5\text{Bq/cm}^3$ ) と比べて十分低いことから混入していないものと推定。

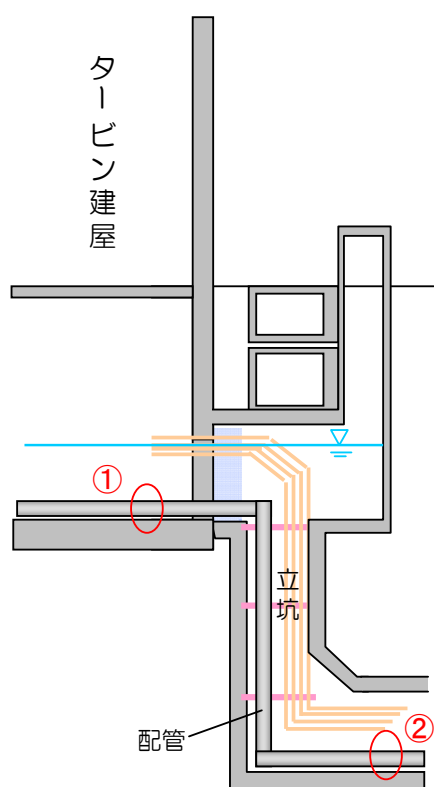
系統・建屋	採水日	Cl (ppm)	放射能濃度 (Bq/cm <sup>3</sup> )	
			Cs-134	Cs-137
2号機RHRS(A)※	2013/06/26	18,000	$6.5 \times 10^{-3}$	$1.7 \times 10^{-2}$
2号機RHRS外行水※	2013/06/26	120	$9.4 \times 10^{-3}$	$2.3 \times 10^{-2}$
2号機T/B	2013/07/22	約100	$1.1 \times 10^4$	$2.5 \times 10^4$
2号機立坑C	2013/07/31	700~ 7,500	$1.1\sim 3.0$ $\times 10^5$	$2.3\sim 6.5 \times 10^5$
3号機T/B	2013/06/13	約200	$1.5 \times 10^4$	$3.1 \times 10^4$
3号機立坑C	2013/07/31	16,000~ 17,000	$1.0\sim 1.3$ $\times 10^5$	$2.2\sim 2.6 \times 10^5$

他の系統から流出水があった場合も周辺の雰囲気線量に有意な変化なし。

## (参考) 海水配管トレンチ内配管の劣化に伴う流出等の周辺への影響

- 海水配管トレンチ内の配管は、震災以降海水に浸水しているが、海水による炭素鋼の腐食速度は小さく<sup>1</sup>、また当該配管は安全系の冷却海水配管であり設計上十分な強度を有しており、劣化による損傷は考えにくい。
- 屋外のO.P.+4.0mの位置において配管を閉塞していること、また建屋滞留水の水位との関係から系外への流出は生じない。
- 万が一配管が損傷した場合でも、下表の通りトレンチ外部への汚染水拡散の影響は考えにくい。

1 海水による炭素鋼の腐食速度は、「材料環境学入門」（腐食防食協会編，丸善株式会社）より0.1mm/年程度と評価される。



①	②	影 響
損傷	健全	建屋内滞留水の配管に流入が想定されるが、滞留水は配管内に留まる。
健全	損傷	海水配管トレンチ内の配管が損傷した場合、海水配管トレンチ内の充填前／後の状況は以下のとおり。 充填前：トレンチ内の滞留水が水圧差により配管内に流入するが、滞留水は配管内に留まる。 充填後：トレンチ内（配管周り）に流入する水はなく、充填により流出しない。
損傷	損傷	海水配管トレンチ内の配管が損傷した場合、海水配管トレンチ内の充填前／後の状況は以下のとおり。 充填前：建屋内の滞留水が、配管内を經由してトレンチ内に流入する可能性があるが、滞留水はトレンチ内に留まる。 充填後：トレンチ内（配管周り）の充填材により流出する可能性は低い。