

2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30日

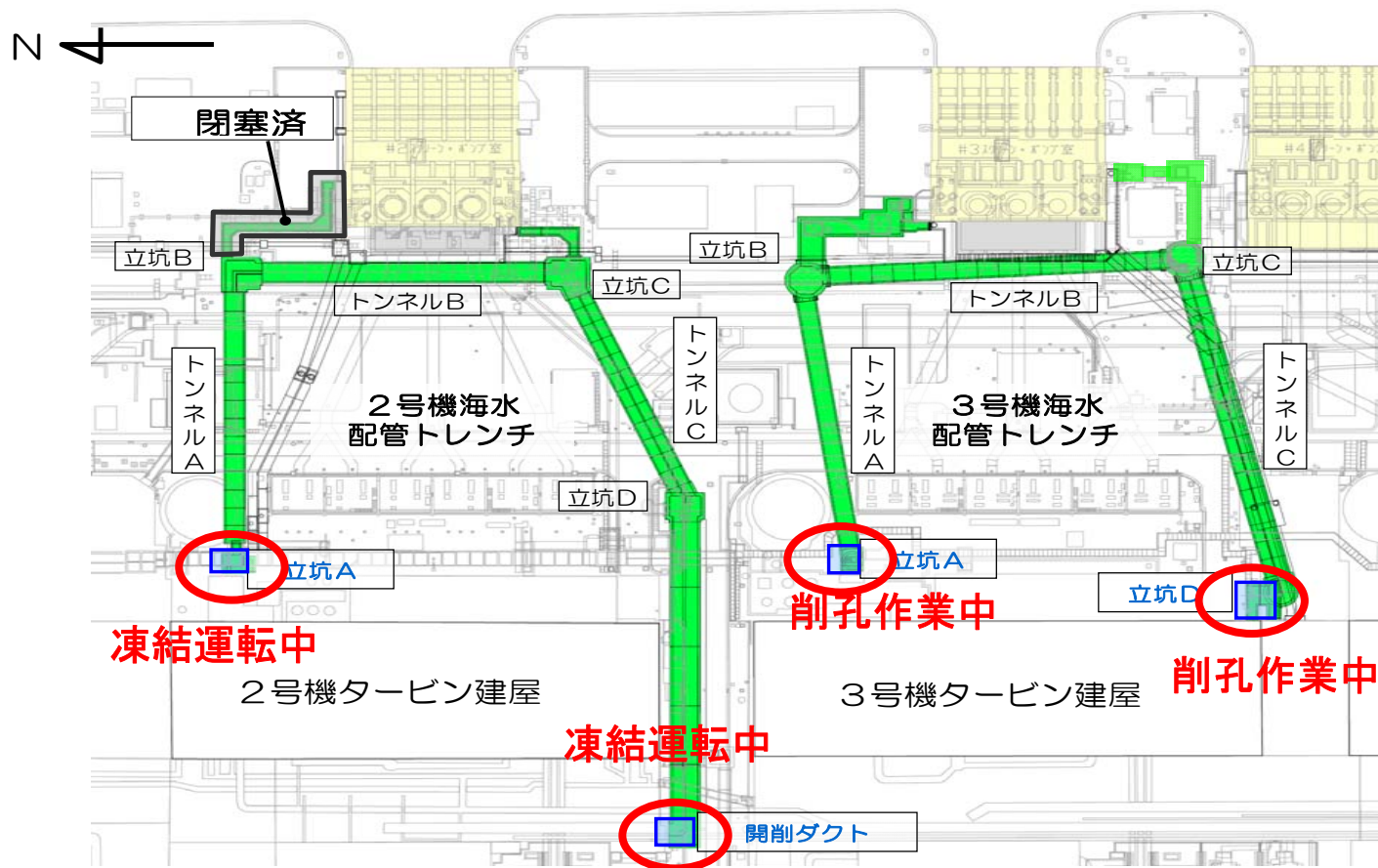
東京電力株式会社

福島第一廃炉推進カンパニー

福島第一原子力発電所

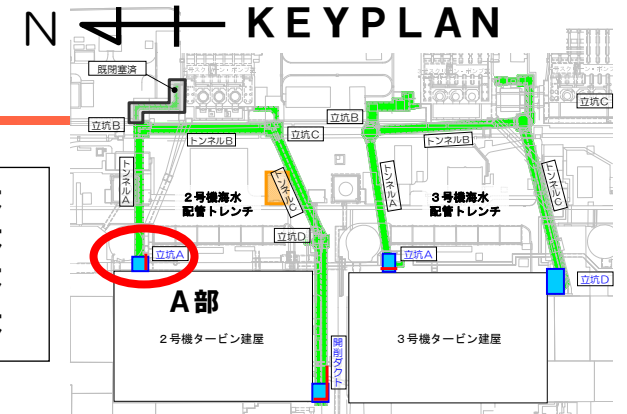
1. 全体進捗状況

■ 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~)

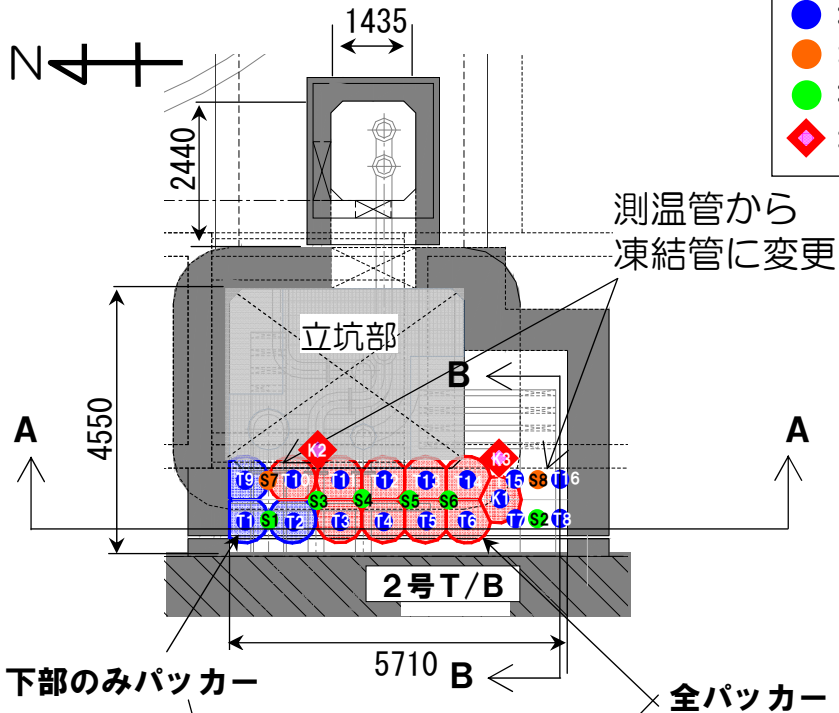
2. 2号機立坑A 凍結状況①



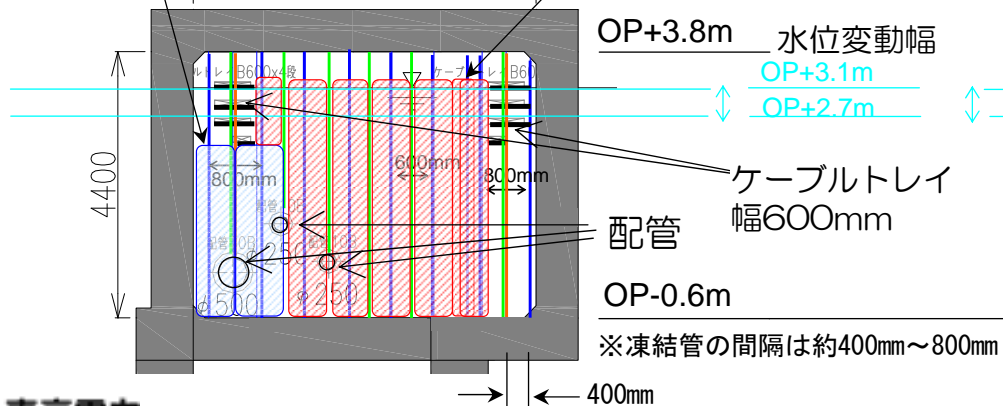
【平面図】

【施工進捗】

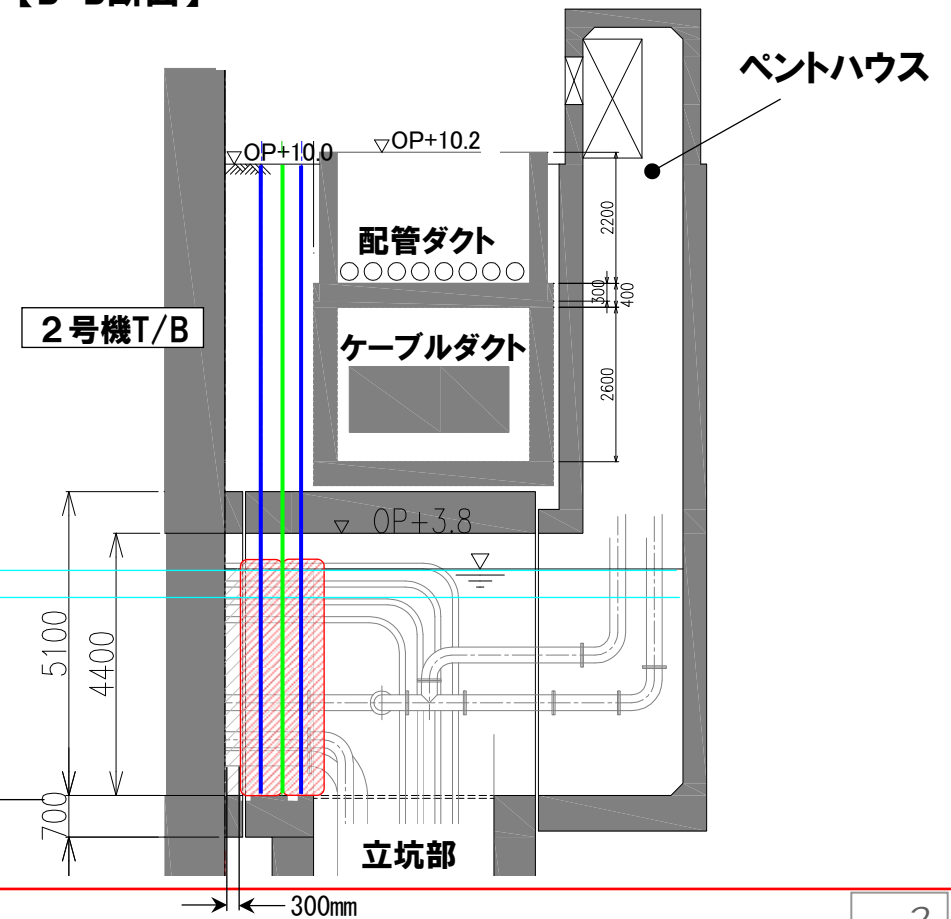
● : 凍結管	17 / 17本
● : 測温管→凍結管 (6/4に変更)	2 / 2本
● : 測温管	6 / 6本
◆ : 観測孔	2 / 2本



【A-A断面】

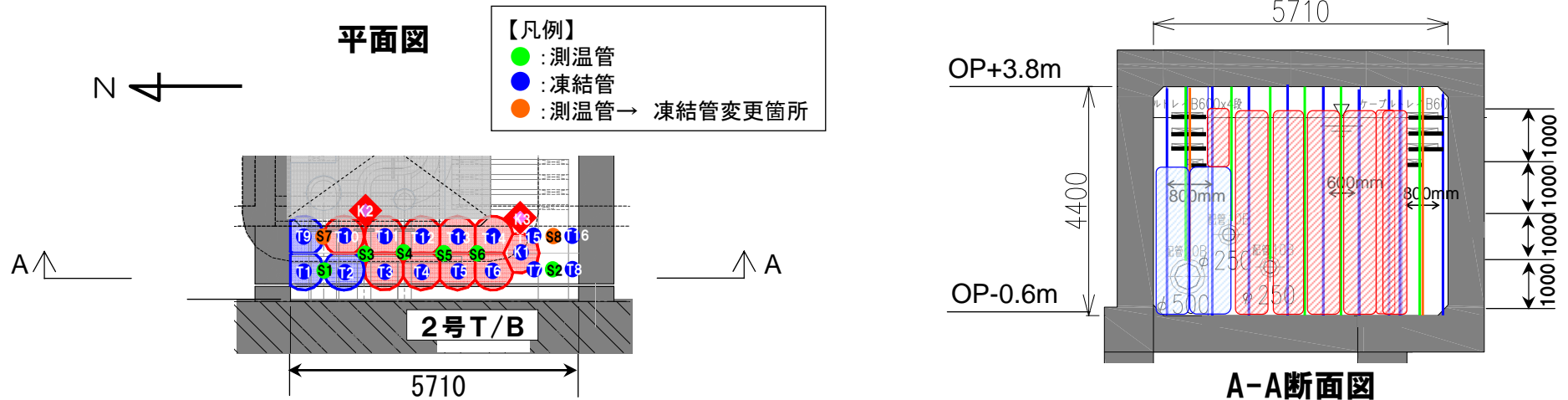


【B-B断面】



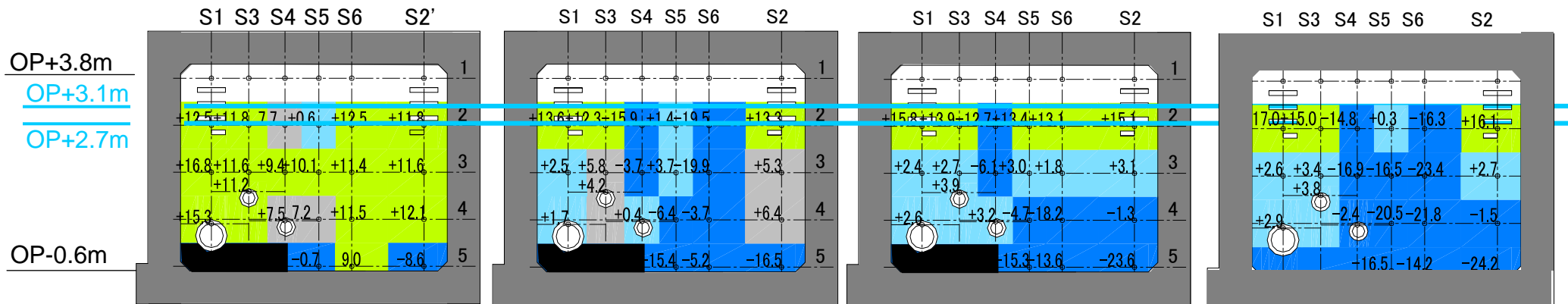
2. 2号機立坑A 凍結状況②

- 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



3. 簡易熱量収支計算によるパラメータスタディ

1. 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. 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。

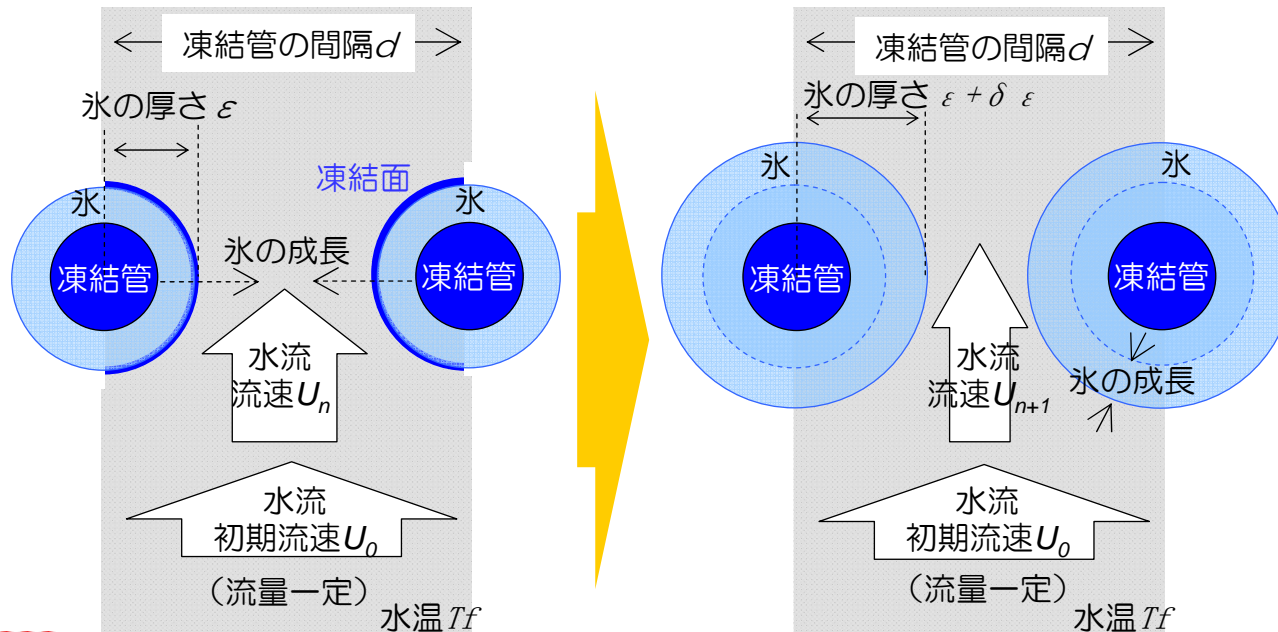
下記数値に基づき流量算出
 $0.16(\text{kg/s})=0.00016(\text{m}^3/\text{s})$
 $\times 999.60(\text{kg}/\text{m}^3)$
 水温 10°C の水物性(密度)を使用
 $0.00016(\text{m}^3/\text{s})=3.39(\text{mm})/1000/3600$
 $\times 335(\text{m}^2)/2$
 ・未凍結部断面積: 2.97m^2
 ・立坑Aへの流入量 $0.57\text{m}^3/\text{h}$
 ・立坑への流入量 $1.14\text{m}^3/\text{h}$
 ・2号機全立坑面積 335m^2
 ・水位変動 $3.39\text{mm}/\text{h}$
 2014年6月24日 7:00 水位 2771mm
 2014年6月27日 7:00 水位 3015mm

【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)
- ・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)

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

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

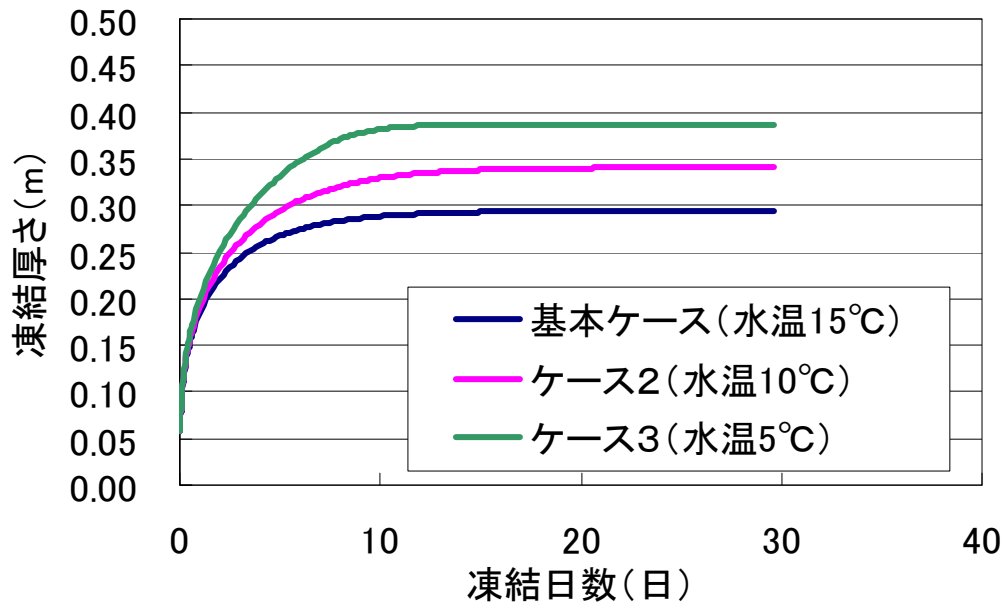


ここに、
 d : 凍結管間隔 (基本ケースは80cm)
 U_0 : 初期流速 (基本ケースは0.32cm/min)
 $0.00016\text{m}^3/\text{s} \div (0.9\text{m} \times 3.3\text{m})$
 建屋水位変動から求めた流量: $0.00016\text{m}^3/\text{s}$
 未凍結部幅: 0.9m (仮定値)
 最低水位時水面高さ: 3.3m
 U_n : 凍結管の間の流速
 ε : 氷の厚さ
 ρ_i : 氷の密度 ($917\text{kg}/\text{m}^3$)
 L : 氷の潜熱 ($333.5\text{kJ}/\text{kg}$)
 W : 凍結管除熱量 (ε の関数)
 l : 凍結管長さ (3.3m, 最低水位時水面高さ)
 α_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 ε の関数)
 T_f : 水温 (基本ケースは 15°C)
 T_s : 凍結面温度 (0°C)

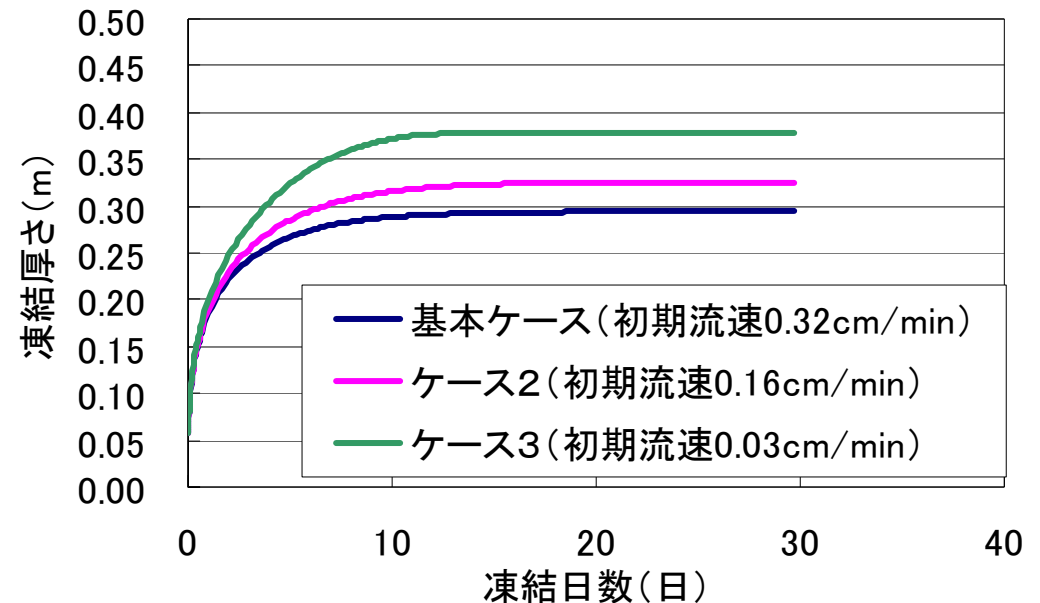
3. 簡易熱量収支計算によるパラメータスタディ結果①

- 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は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



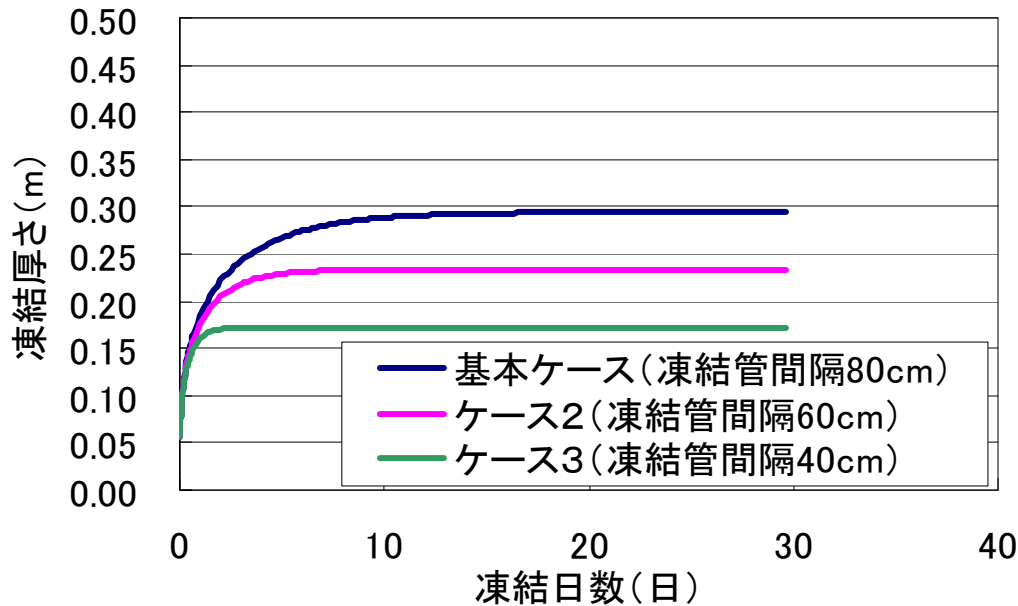
- ✓ 現状の水温（15℃）から低下させると、氷の厚さは増加していき、水温5℃ではほぼ氷がつかがり止水壁ができる結果。
- ✓ 対策工としては氷やドライアイスの投入等が考えられる。立坑A内の滞留水に加えて、建屋から流入してくる水の水温を下げる必要がある。

- ✓ 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。

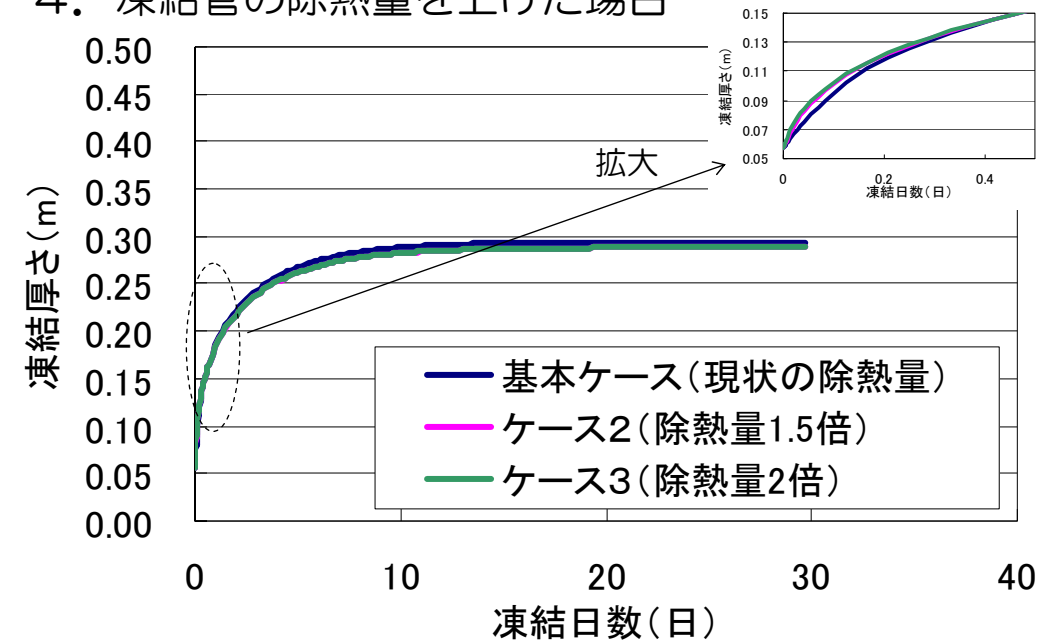
3. 簡易熱量収支計算によるパラメータスタディ結果②

- 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達すると閉塞を意味する）。

3. 凍結管の間隔を狭めた場合



4. 凍結管の除熱量を上げた場合



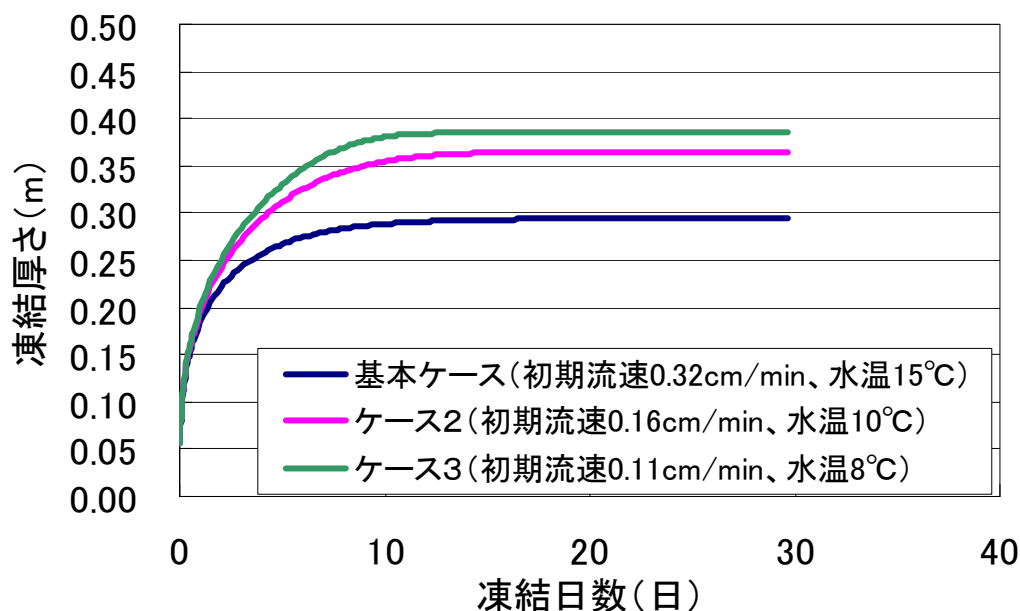
- ✓ 凍結管の間隔を狭めると，閉塞しやすくなる結果。
- ✓ 対策工としては，測温管を凍結管に変更することにより，凍結管の間隔を狭める等が考えられる。

- ✓ 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。

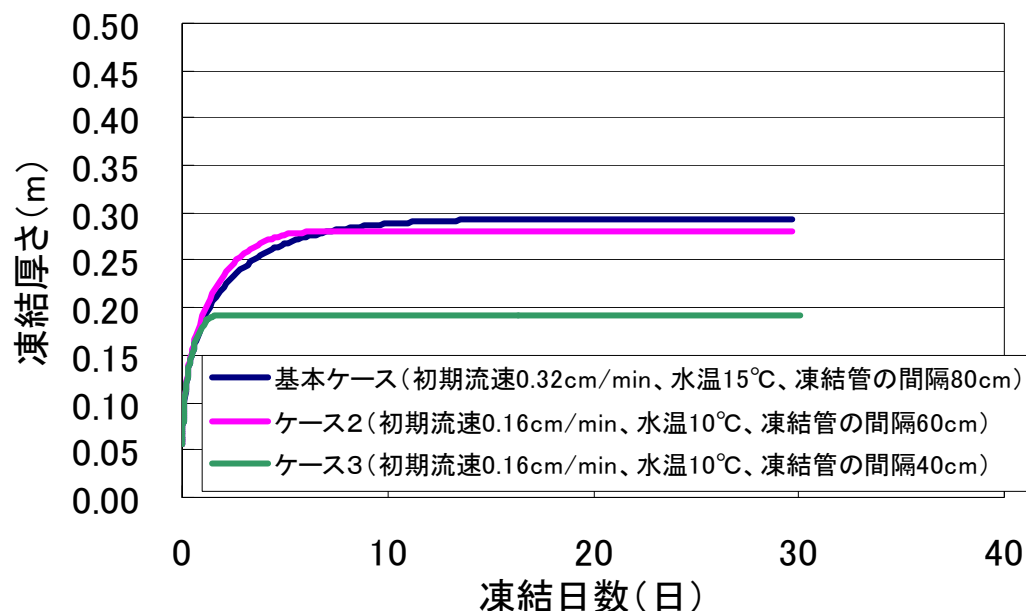
3. 簡易熱量収支計算によるパラメータスタディ結果③

➤ 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。

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



- ✓ 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。
- ✓ 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。

4. 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	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。	—
	・ LN ₂ (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。	検討中 (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 ₂ の躯体内封入	気化LN ₂ 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、水流の発生抑制について実施。	採用 (調整中)

4. 追加対策工の検討 各対策工の実手順案

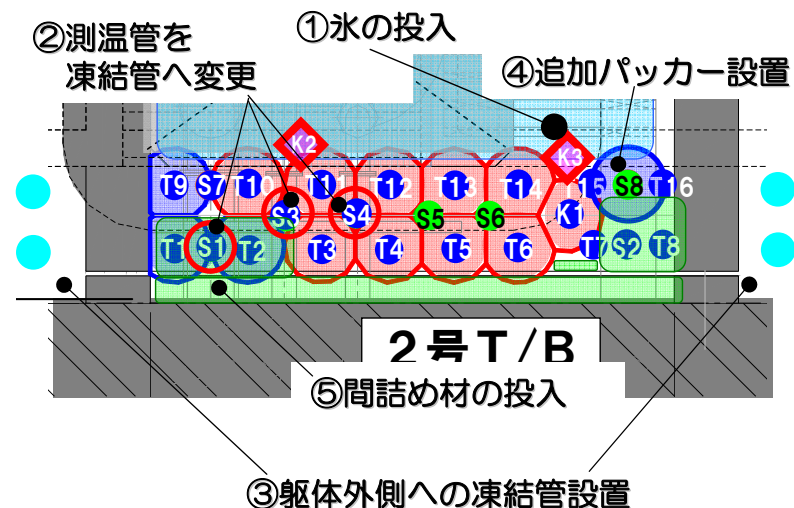
STEP I : 凍結促進

【滞留水の冷却】

- ① 氷の投入(730より本格実施)
ドライアイスの投入(投入試験完了)
→ 主にK3孔より氷を投入

【冷却能力の向上】

- ② 測温管を凍結管へ変更
→ S1,S3,S4を凍結管に変更(実施済み:凍結運転中)
(凍結管:19本→22本, 測温管:6本→3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 II : 間詰め充填

【水流の抑制】

- ④ 追加パッカー設置(準備中)
→ 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予定)
→ S2を凍結管に変更予定(準備中)
(凍結管:22本→23本, 測温管:3本→2本)
- ⑤ 間詰め材の投入(材料・施工方法含め検討中)

複数の対策を組み合わせることで実施していく。
・ 氷を立坑へ投入することにより、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）。
・ 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を設置し、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。

4. 追加対策工の検討 対策工程（2号機立坑A）

- 7/24、28に氷の試験投入、7/25にドライアイスの試験投入を実施。7/30から氷の本格投入を開始
- 測温管（3本）を凍結管（3本）への交換を7/25に完了し、7/26午後から凍結運転を開始した
- STEP II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 I 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	試験投入	投入			
	①ドライアイス投入	投入準備	試験投入	<氷の投入を優先し、状況を見極めた後に投入を判断する				
	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	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	

【参考】2号機トレンチ凍結止水対策における氷の試験投入について



氷の投入①



氷の投入②



氷の投入③

- 実施日時 : 平成26年7月24日 (木)
12:30~15:00頃
- 氷の投入量 : 約2トン (約500kgの袋を4袋)