

電源開発株式会社
大間原子力発電所

津波の検討

—津波来襲時の補機冷却系ピットの水位変動—

平成19年2月

原子力発電安全審査課

本資料の内容は、取水路縦断線形が設計の進捗に伴い変更されていることに伴い、[04-大間設C-49改]の内容及び[04-大間設C-51]の一部の内容を、修正したものである。

なお、[04-大間設C-47]及び[04-大間設C-51]には、設計進捗を反映する前の取水路縦断線形等に関わる内容が含まれるが、本資料の内容と併せて検討することにより、大間原子力発電所の原子炉施設の安全性評価において、問題は生じないと判断した。

目 次

1. 検討目的	1
2. 補機冷却系ピットの水位変動の検討	2
2.1 検討条件	2
2.2. 数値シミュレーションの手法	3
2.3. 計算結果	5
3. 取水路内の共振周期の検討	7
4. 評価	9
5. 参考文献	10

1. 検討目的

津波来襲時の補機冷却系ピット内の水位変動について検討し、原子炉補機冷却海水ポンプの取水が確保されることを確認する。

また、取水路内の共振周期を確認する目的で、取水路内の応答特性について検討する。

本検討は、設計進捗により主取水路の一般部敷高が約 0.7m～約 1.0m低下したこと、取水槽の形状が変更されたこと等（図-1 参照）の新たな設計条件を反映して、再度、実施したとしている。

なお、本検討では、追加実施された水理実験結果を参照し、補機冷却系ピット内の水位が保守側となるよう、補機冷却系取水路への分流部及び主取水路漸縮部の損失係数を見直したとしている。

2. 補機冷却系ピットの水位変動の検討

2.1 検討条件

申請者は、発電所の通常運転中に津波が来襲した場合の、各取水ピット室内の水位変動について検討している。取水路、取水ピット室等の取水設備の概要、ポンプの運転条件、並びに検討対象津波について、以下のとおりとしている。

(1) 取水設備の概要

取水路、取水ピット等の取水設備概要図を図-2 に示す。主取水路はA系、B系及びC系と3つに分かれており、各々の主取水路から取水された冷却水は循環水ポンプ（以下「CWP」という。）から復水器へ送水される。

補機冷却系取水路は主取水路から分岐し、補機冷却水は原子炉補機冷却海水ポンプ（以下「RSWP」という。）及びタービン補機冷却海水ポンプ（以下「TSWP」という。）から、それぞれ熱交換器へ送水される。

また、各海水ポンプの設置標高及び取水可能最低水位を図-3 に示す。各海水ポンプの取水可能最低水位は、CWP が T.P. -3.1m、RSWP が T.P. -5.7m、TSWP が T.P. -4.3mであるとしている。

(2) 海水ポンプの運転条件

通常運転時には、CWP が 3 台、RSWP が 3 台、TSWP が 2 台で稼働し、約 $91\text{m}^3/\text{s}$ の冷却水を取水するとしている。津波来襲時に CWP ピット水位が T.P. -3.0mを下回る場合には CWP を停止し、RSWP

が3台、TSWPが2台稼働する計画であるとしている。

(3) 検討対象津波

本検討の対象とする津波としては、大間原子力発電所において最大水位下降量を与える土木学会(2002)⁽¹⁾に基づきチリ沖に波源を設定した津波(以下「チリ沖の想定津波」という。)を選定している。

また、チリ沖の想定津波は遠地津波であり周期が140～150分程度と長く水位変動が緩やかであるため、周期が20分程度以下と短く水位変動が急な近地津波についても検討対象としている。日本海東縁部及び日本海溝沿いで発生する近地津波のうち、水位下降量が最大となるのは土木学会(2002)⁽¹⁾に基づき日本海東縁部に波源を設定した津波(以下「日本海東縁部の想定津波」という。)であることから、本検討対象として選定している。

チリ沖の想定津波の取水口スクリーン前面の波形を図-4に、同様に日本海東縁部沖の想定津波の波形を図-5に示す。

2.2 数値シミュレーションの手法

数値シミュレーションは、取水口スクリーン室からCWPピット室までの主取水路と、補機冷却系水路分岐部からTSWP及びRSWPピット室までの補機冷却系水路とに分けて検討している。

主取水路における数値シミュレーションの計算条件を表-1に、補機冷却系水路における計算条件を表-2に示す。

主取水路内では、津波による水位変動により開水路状態と満管状

態が漸移的に現れるためスロットモデル⁽²⁾⁽³⁾による計算を行っている。また、補機冷却系水路では、常に満管状態であるため、土木学会(1999)⁽⁴⁾によるサージング計算を行っている。

数値シミュレーションの計算条件の設定は、以下のとおりとしている。

発電所の運転開始後（経年時）は通常の場合では取水路内に貝の付着（以下「貝代^{かいしろ}」という。）が認められることから、貝代を考慮しモデル化を行っている。実際には、貝が付着しないように取水路内の頂版及び側壁に防汚塗料を塗布する計画であるが、計算条件設定の際には、保守側の計算結果が得られるように防汚塗料の効果を考慮せず、電力土木技術協会編(1995)⁽⁵⁾による既設発電所取水路を対象とした設計条件の調査結果を参考として、水路内の全周に0.1mの貝代を考慮し通水断面積を低減させている。

摩擦による水路の損失は、粗度係数を設定することにより考慮している。取水路内の粗度係数 n は、電力土木技術協会編(1995)⁽⁵⁾による、普通コンクリート貝類付着水路を参照し、補機冷却系海水ピット室の水位が低下する傾向となるよう、上限値を採用したとしている。

次に、取水口スクリーンによる損失については、機器の設計条件に基づき、スクリーンの前後で0.5mの水頭差を考慮したとしている。

また、取水路内の局所損失については、一般的な構造である流入、急拡・急縮、漸拡・漸縮、曲がり、屈折、流出等は、電力土木技術

協会編(1995)⁽⁵⁾、土木学会(1999)⁽⁴⁾及び千秋(1997)⁽⁶⁾を参照して損失係数を設定したとしている。さらに、主取水路から補機冷却系水路への各分岐部（A系、B系、C系）の分流損失及び主取水路の漸縮については、水理模型実験結果に基づき損失係数を設定したとしている。ただし、津波による水位低下時に補機冷却系水路から主取水路へ水が逆流する場合には、補機冷却系海水ポンプ取水ピット等の水位が低下する傾向となるよう、各分岐部の損失係数を0として設定している。

なお、津波来襲時の潮位条件は、朔望平均干潮位を用いている。

2.3 計算結果

チリ沖の想定津波及び日本海東縁部の想定津波を対象とした RSWP 各ピット室の最低水位を図-6 に示す。また、チリ沖の想定津波の検討における RSWP ピット室の水位低下量が最大となるケースの水位変動を図-7 に、同様に日本海東縁部の想定津波の水位変動を図-8 に示す。

以上の検討の結果、RSWP ピット室の最低水位はチリ沖の想定津波のケースで発生し、B系水路の RSWP (B, E) において T. P. -4.4m程度であるとしている。一方、RSWP の取水可能最低水位は T. P. -5.7m であることから、津波により水位が低下した場合でも、RSWP の取水は可能であると評価している。

さらに、図-3 に示すように、RSWP 等の各取水ポンプはタービン建屋内に設置されており、ポンプが貫通する床とポンプの間には、水

圧に十分耐えることのできるようにシールを施し，建屋内への海水の漏出を防止する設計とされている。

3. 取水路内の共振周期の検討

取水路内の共振周期を把握する目的で、入射波として正弦波を与えた取水路内の数値シミュレーションを行うことにより、取水路内の応答特性について検討している。

入射波とする正弦波の周期は、60秒、80秒、100秒、2分、4分、6分、10分、20分及び60分とし、取水口スクリーン前面から与えることとしている。また、その振幅は、津波の水位変動により主取水路内では開水路状態と満管状態が現れることを勘案し、想定津波の水位変動量に相当する3.5mとして設定している。

計算結果として、まず、A系及びB系水路の CWP ピット室における津波周期と最高・最低水位との関係を図-9に示す。図-9に示すとおり、取水口スクリーン室から CWP ピット室までの主取水路では、最高水位が 100秒程度でピークを示すことから、主取水路の共振周期は 100秒程度であることが確認できたとしている。なお、最低水位時には主取水路は開水路状態となり、明瞭なピークを示さない結果が得られている。

一方、津波の周期は、日本海東縁部の津波（図-5）に代表されるように、7～10分程度であり、主取水路の共振周期と比べて長いことから、共振現象が生じにくいと考えられるとしている。

また、A系及びB系水路の RSWP ピット室における津波周期と最高・最低水位との関係を図-10に示す。図-10に示すとおり、RSWP ピット室では、最高水位及び最低水位共に明瞭なピークを示さず、主取水

路の水位と長周期側では連動するが、短周期側では追従しない結果
が得られたとしている。これは、図-2に示すとおり、RSWPピット室
につながる補機冷却系水路は主取水路から分岐する構造であり、断
面積も主取水路と比べて小さいことから、RSWPピット室がCWPピッ
ト室と比べて津波の影響を受けにくい構造となっているためと考え
られるとしている。

以上の検討より、主取水路内の共振周期は100秒程度であること、
また、RSWPピット室は津波の影響を受けにくい構造となっているこ
とが確認できたとしている。

4. 評価

以上のことから、申請者が実施した津波来襲時の RSWP ピット室の水位変動の検討結果は、妥当なものと判断した。

5. 参考文献

- (1) 土木学会原子力土木委員会津波評価部会(2002)：原子力発電所の津波評価技術, 321p.
- (2) 大谷英夫・酒井雅史・石野和男・荒川茂樹・水向直人(1998)：放水路内の段波による立坑の水位変動現象と段波の抑止方法, 水工学論文集, 第42巻, pp. 667-672.
- (3) 大谷英夫・東江隆夫・石野和男(1999)：放水槽を有する放水路の水位変動特性とその計算方法, 水工学論文集, 第43巻, pp. 467-472.
- (4) 土木学会(1999)：水理公式集 [平成11年版] , 713p.
- (5) 電力土木技術協会編(1995)：火力・原子力発電所土木構造物の設計 (補強改訂版) , 1102p.
- (6) 千秋信一(1997)：発電水力演習, 学献社, 423p.

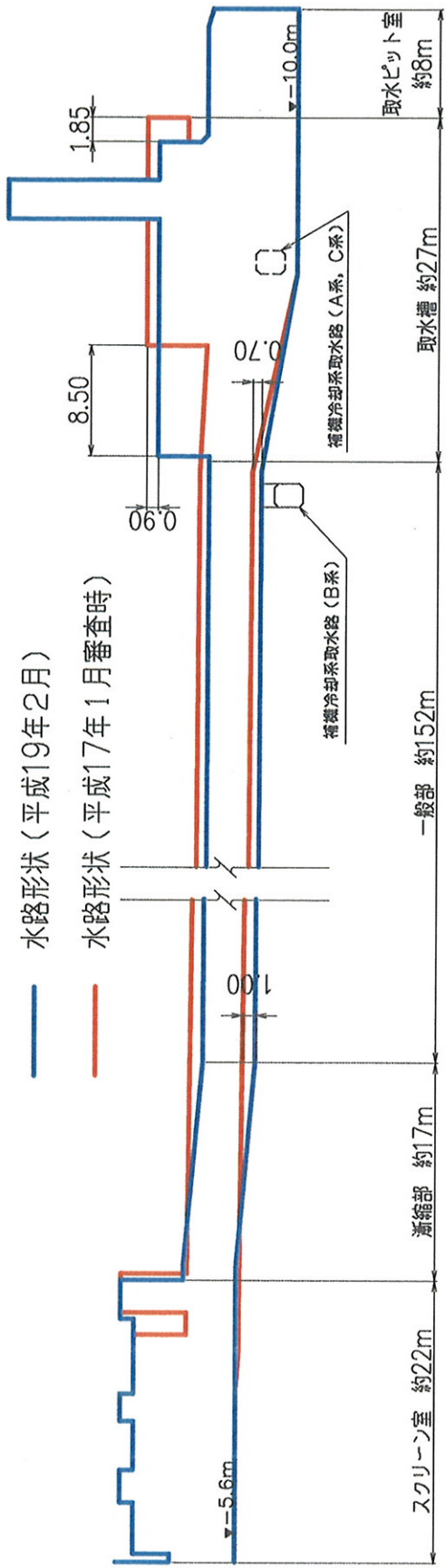


図-1 設計進捗による取水路縦断線形等の主な変更箇所

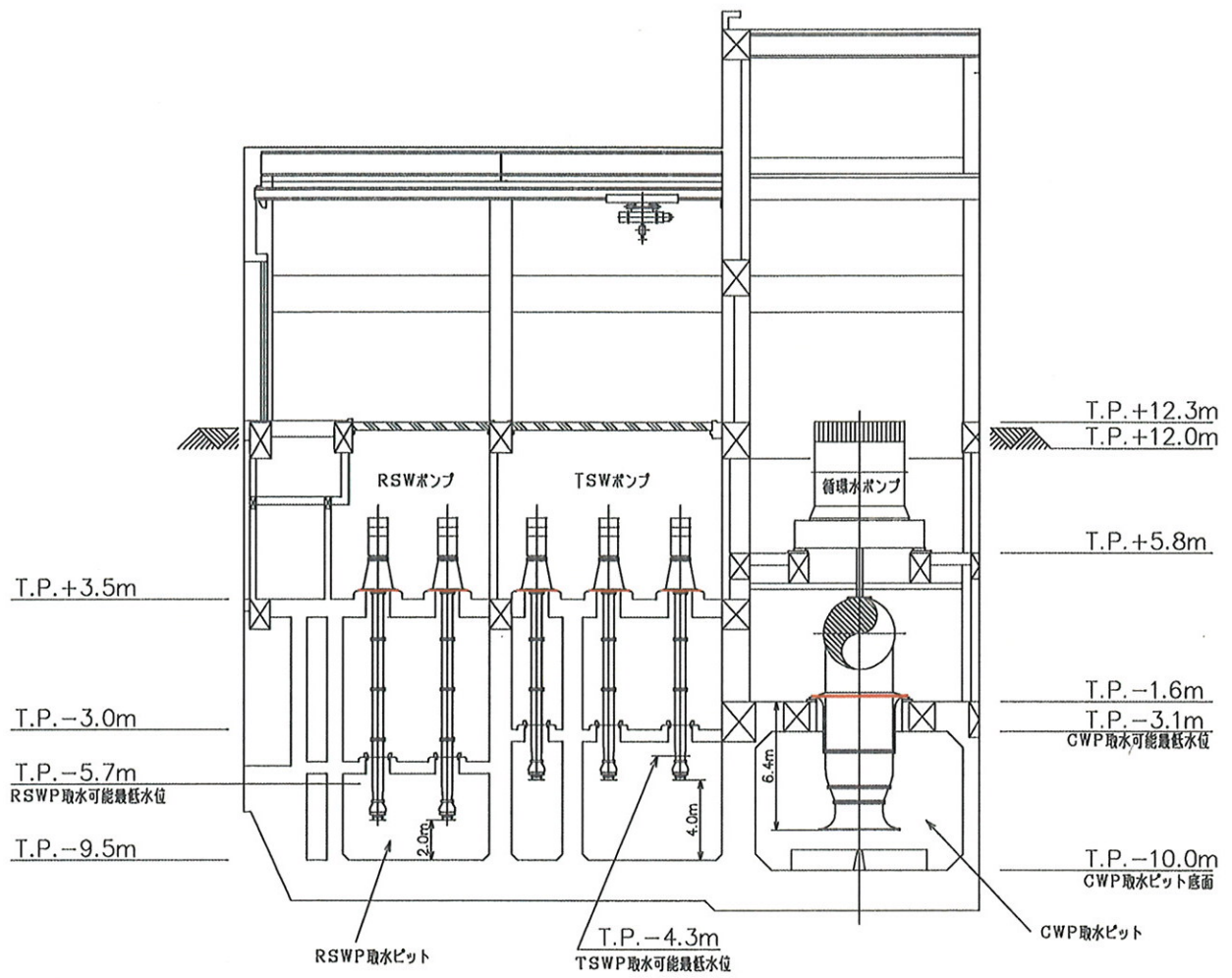


図-3 原子炉補機冷却海水ポンプ等の設置標高

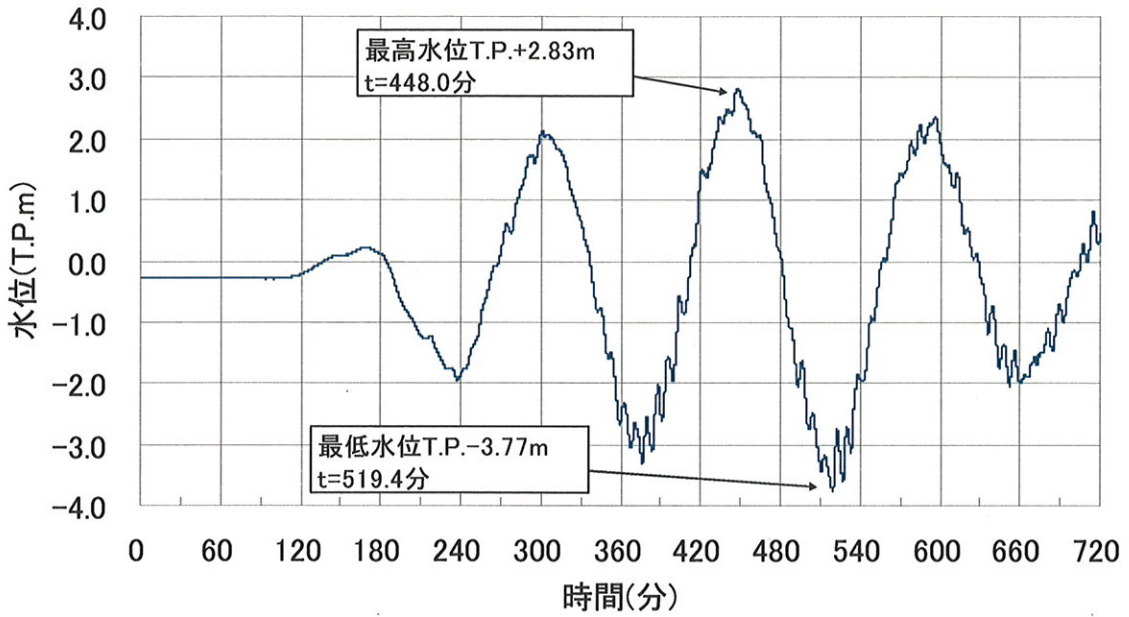


図-4 取水口スクリーン前面における水位（チリ沖）

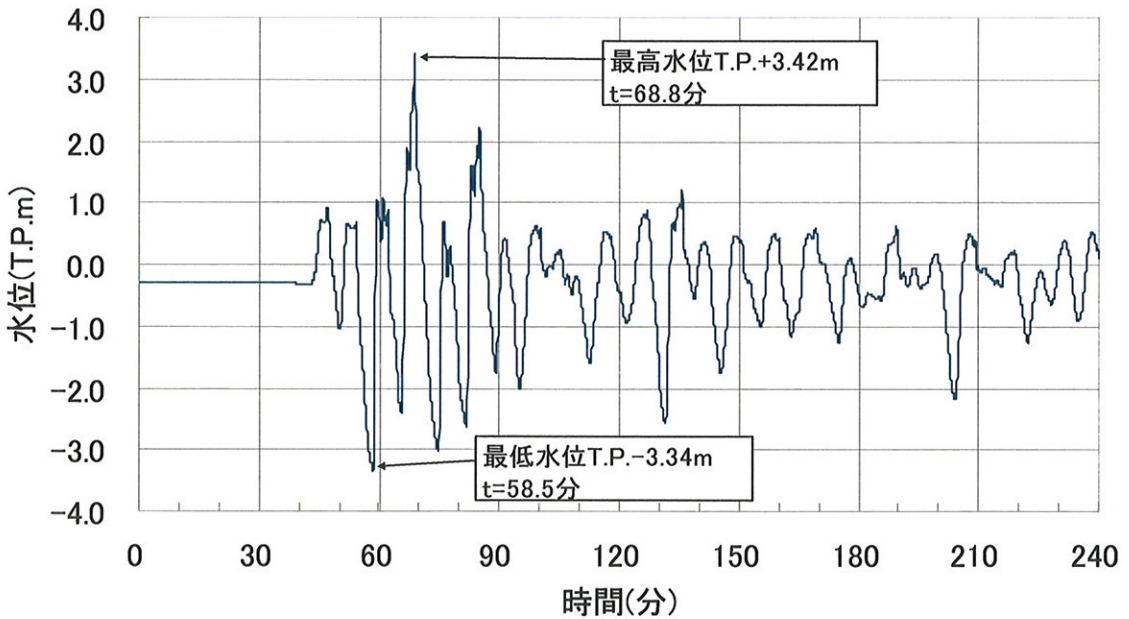


図-5 取水口スクリーン前面における水位（日本海東縁部）

表-1 主取水路の計算条件一覧

項目 \ 取水路	A系	B系	C系
計算領域	取水口スクリーン室～CWPピット室		
計算格子間隔 Δs	0.5m		
計算時間間隔 Δt	0.001 秒		
基礎方程式	非定常開水路・管路流の連続式及び運動方程式 ⁽²⁾⁽³⁾		
取水口側の境界条件	津波計算結果における取水口スクリーン前面の水位を与えている		
取水ピット側の境界条件※	通常運転時: 32.64m ³ /s CWP 停止時: 0.55m ³ /s	通常運転時: 34.05m ³ /s CWP 停止時: 1.96m ³ /s	通常運転時: 33.81m ³ /s CWP 停止時: 1.72m ³ /s
取水路の摩擦損失係数	マンシングの粗度係数 $n = 0.020$ (経年時: 水路全周に 0.1m の貝代を考慮)		
局所損失係数	土木学会(1999) ⁽⁴⁾ 等による		
潮位条件	朔望平均干潮位 T.P. -0.29m		
計算時間	日本海側近地津波: 地震発生後 4 時間 遠地津波: 沖合波形入射後 12 時間		

※取水量は定格の 110% を採用している。

基礎方程式: 非定常開水路・管路流の連続式及び運動方程式⁽²⁾⁽³⁾

・連続式

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

・運動方程式

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\frac{p}{\rho} \right) + \frac{Q^2}{A} \right\} = gA(i - i_f)$$

ただし,

$$p = B \frac{\rho g h^2}{2}$$

$$i_f = \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}}$$

・スロットの幅

$$B_s = \frac{g A_0}{c^2}$$

ここに,

t : 時間

A : 流積

p : 圧力項

g : 重力加速度

i_f : 摩擦項

h : 水深

R : 径深

c : 粗密波の伝播速度 (100m/s)

x : 流下方向の座標

Q : 流量

ρ : 水の密度

i : 底勾配

B : 水路幅もしくはスロット幅 B_s

n : マンシングの粗度係数

A_0 : 水路断面積

表-2 補機系取水路の計算条件一覧

項目 \ 取水路	A系	B系	C系
計算領域	補機系分岐部～補機系取水ピット		
計算時間間隔 Δt	0.001 秒		
基礎方程式	非定常管路流の連続式及び運動方程式		
補機系分岐部の境界条件	補機系分岐部の水位を与えている		
取水ピット側の境界条件※	通常運転時：0.55m ³ /s CWP 停止時：0.55m ³ /s	通常運転時：1.96m ³ /s CWP 停止時：1.96m ³ /s	通常運転時：1.72m ³ /s CWP 停止時：1.72m ³ /s
取水路の摩擦損失係数	マンニングの粗度係数 n = 0.020 (経年時：水路全周に 0.1m の貝代を考慮)		
局所損失係数	土木学会(1999) ⁽⁴⁾ 等による		
潮位条件	朔望平均干潮位 T.P. -0.29m		
計算時間	日本海側近地津波：地震発生後 4 時間 遠地津波：沖合波形入射後 12 時間		

※取水量は定格の 110% を採用している。

基礎方程式：サージタンクの連続式及び運動方程式⁽⁴⁾

・連続式

$$A_i \frac{dz_i}{dt} = a_i v_i - a_{i+1} v_{i+1} + Q_i$$

・運動方程式

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{z_i - z_{i-1} - c v_i |v_i| - k}{L_i / g}$$

ただし、

$$k = \frac{v_p^2}{2g} = \frac{|a_i v_i - a_{i+1} v_{i+1}| (a_i v_i - a_{i+1} v_{i+1})}{2g (C_d F_p)^2}$$

ここに、

t : 時間	A _i : ピット断面積
z _i : ピット水位	Q _i : ピットにおける流量
a _i : 管路断面積	v _i : 管路内流速
L _i : 管路長	c _i : 摩擦損失係数
g : 重力加速度	k : 制水口抵抗
v _p : 制水口通過流速	F _p : 制水口面積
C _d : 制水口流量係数	

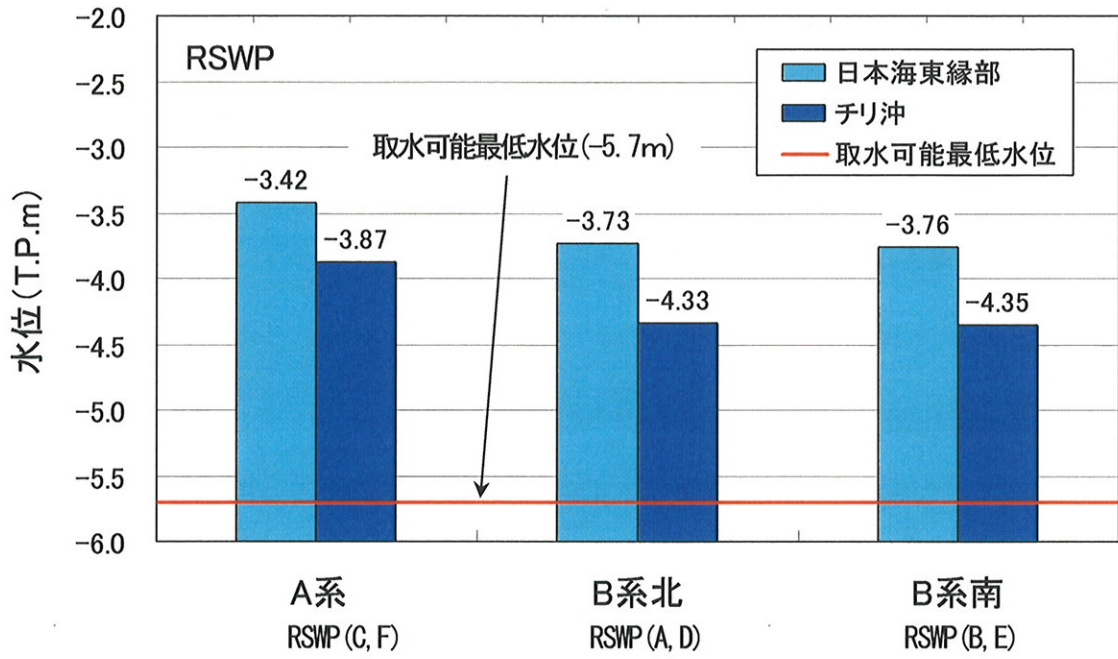


図-6 RSWP ピット室における最低水位

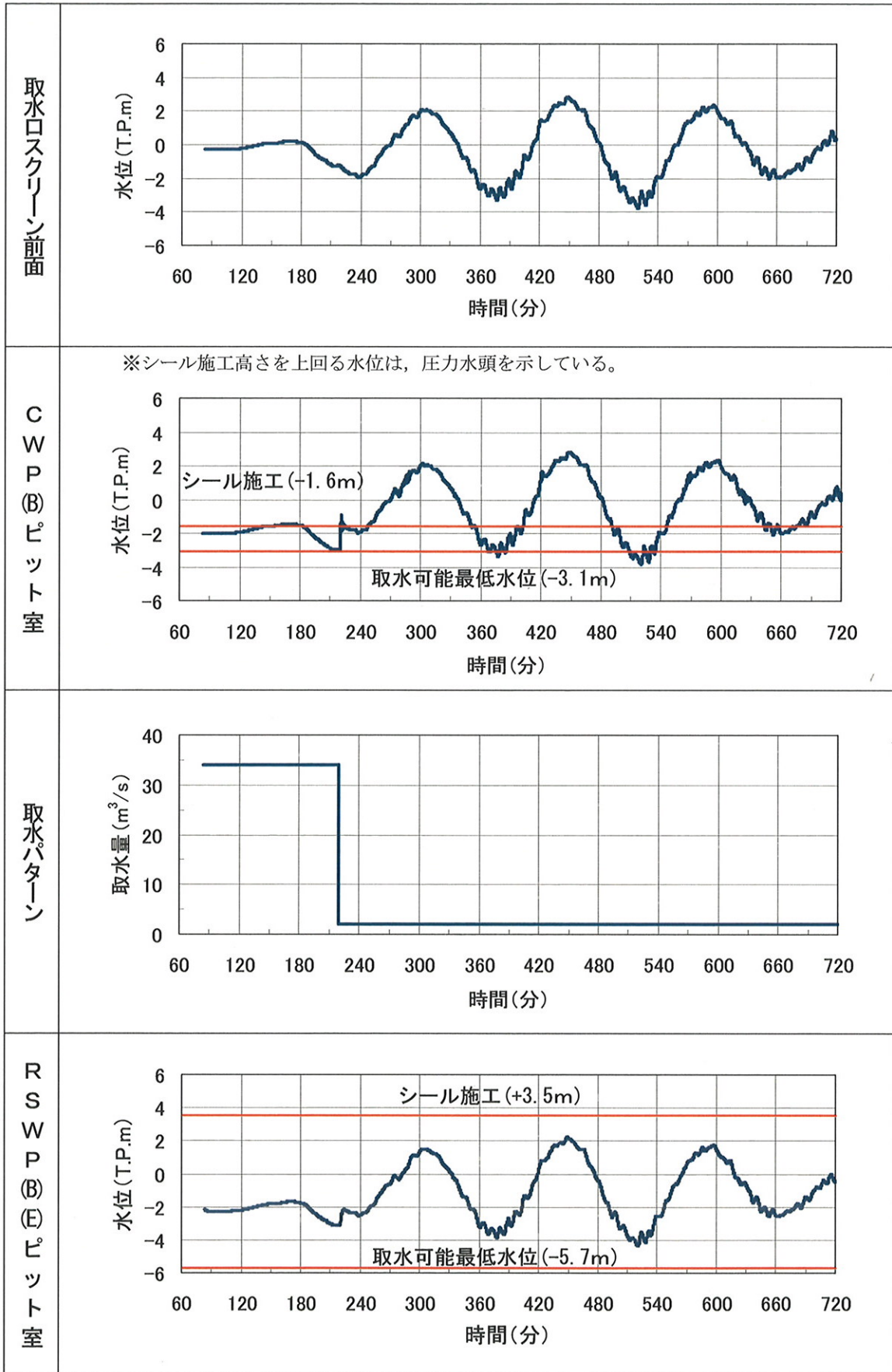


図-7 CWP(B)及びRSWP(B,E)ピット室の水位変動(チリ沖)

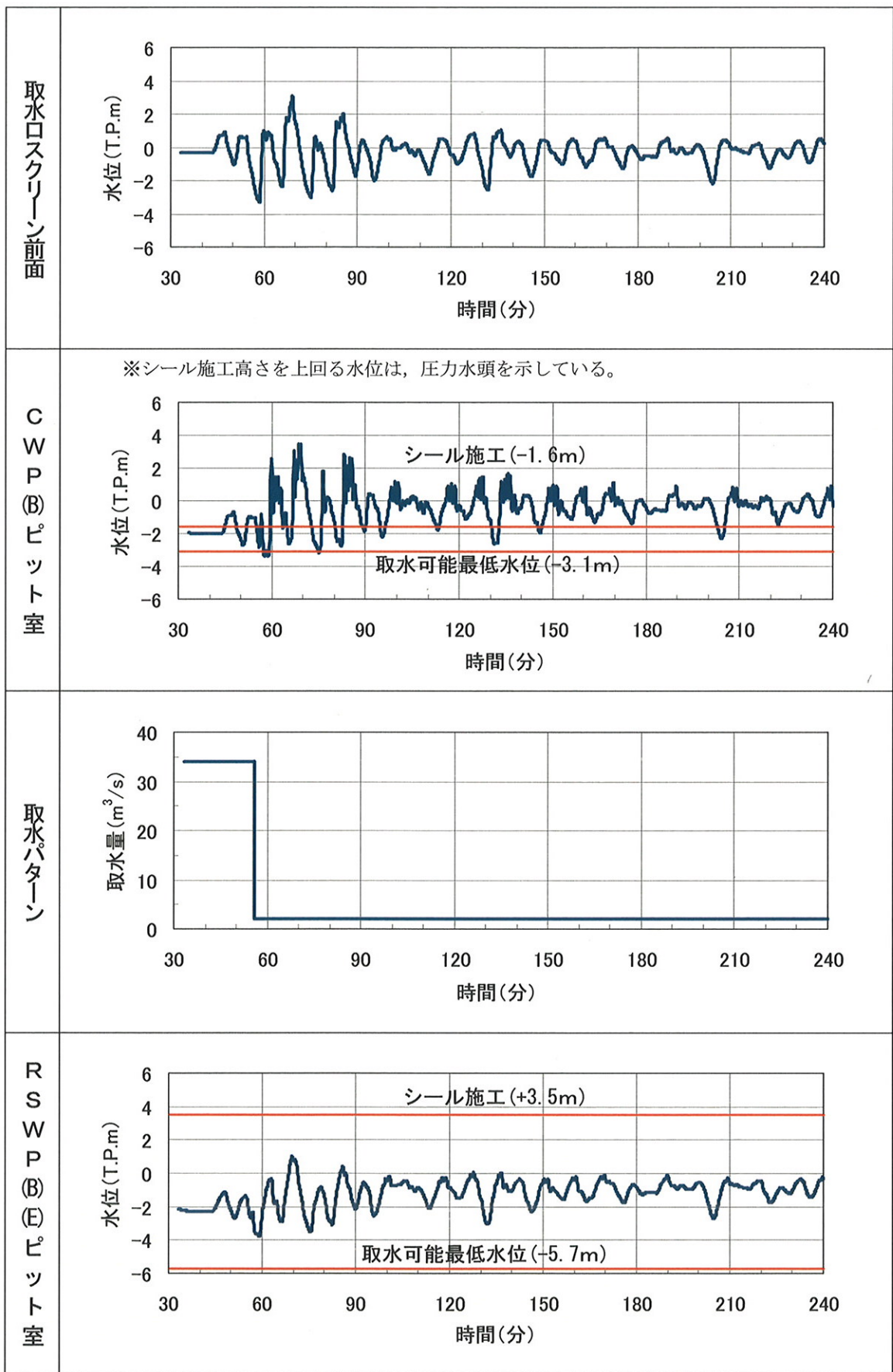
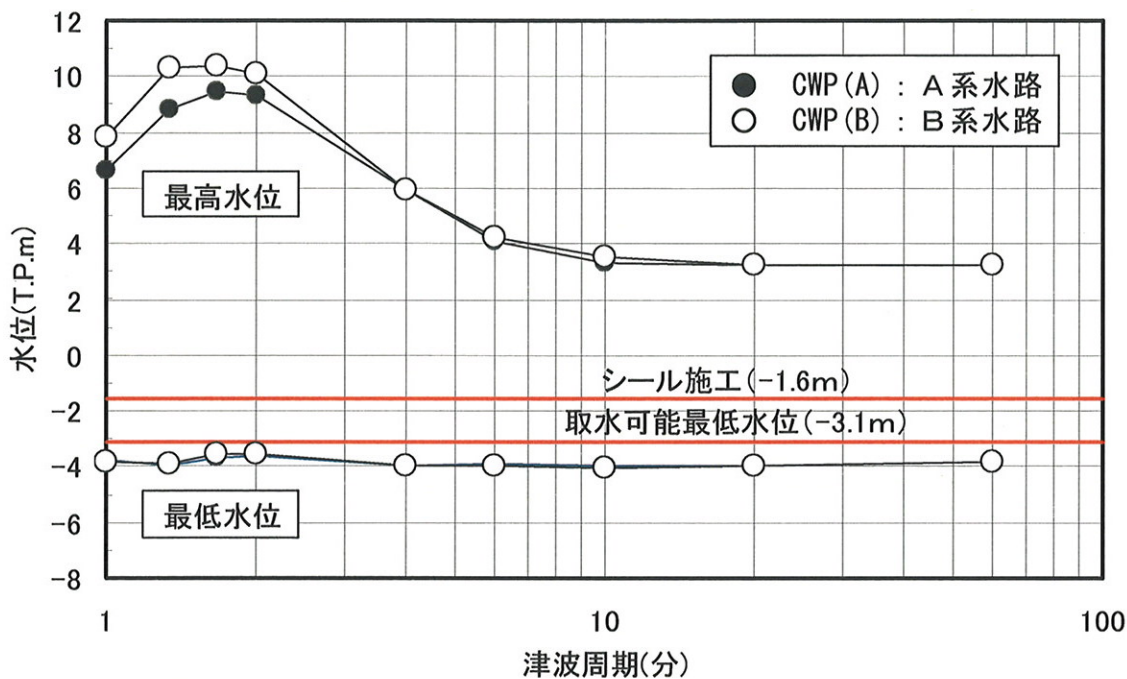
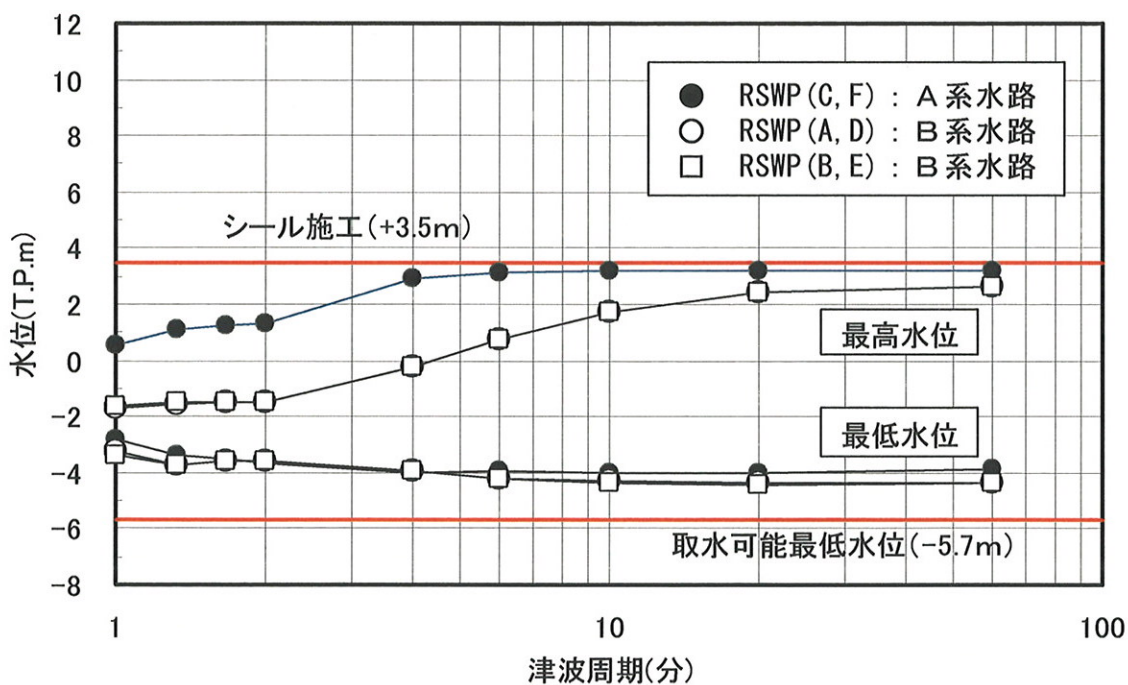


図-8 CWP(B)及びRSWP(B,E)ピット室の水位変動 (日本海東縁部)



※ CWP ピット室の水位が T.P. -3.0m を下回った場合には、CWP を停止する。
シール施工高さを上回る水位は、圧力水頭を示している。

図-9 CWP ピット室の最高・最低水位



※ シール施工高さを上回る水位は、圧力水頭を示している。

図-10 RSWP ピット室の最高・最低水位