

女川原子力発電所2号炉
耐津波設計方針について
(審査会合での指摘事項に対する回答)

令和元年5月21日
東北電力株式会社

1. 審査会合での指摘事項(一覧)
2. 指摘事項に対する回答

1. 審査会合での指摘事項(一覧)

【耐津波設計方針】

No.	審査会合日	指摘事項の内容	回答頁
37	H31.3.12	入力津波の設定について、地形改変等も含め、入力津波の設定における不確かさ及びばらつきの考慮を網羅的に整理した上で、裕度設定の考え方を提示すること。	3
38	H31.3.12	管路解析について、解析に用いている変数を取放水路の該当箇所に図示するとともに、解析手法及び各部の流速を提示すること。また、津波時の流速に対して、文献による損失係数が適用範囲内であることを提示すること。	17
39	H31.3.12	1号炉流路縮小工の設置に伴う構造成立性について、津波時の流速による影響を提示すること。	33
40	H31.3.12	1号炉流路縮小工の設置に伴う取放水立坑の水位評価について、貝付着等の保守的な条件を考慮しても、2号炉の安全性等への影響がないことを提示すること。	41
41	H31.3.12	1号炉流路縮小工について、施工方針及び常時における津波防護機能維持の確認方針を提示すること。	44
42	H31.3.12	滑動評価について、施設・設備の設置状況又は構造を踏まえた具体的な判断基準を提示すること。	— (まとめ資料に反映)
43	H31.3.12	漂流物衝突荷重について、先行プラントの実績を踏まえ、対象漂流物の考え方等を提示すること。	— (まとめ資料に反映)

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 37)(1/14)

(1) 指摘事項

入力津波の設定について、地形改変等も含め、入力津波の設定における不確かさ及びばらつきの考慮を網羅的に整理した上で、裕度設定の考え方を提示すること。

(2) 回答方針

- 入力津波は、津波高さに対する影響要因(不確かさの要因)を考慮し検討を実施しているが、各要因のうち地震による地形変化(防波堤、護岸付近の敷地の沈下)及び管路状態(貝付着、スクリーン損失)については、津波の流況や管路内損失に影響することから、その有無が津波高さに与える影響を整理した。あわせて、管路解析に用いる津波水位抽出位置の違いが入力津波に与える影響についても整理した。
- 復旧・改修工事計画(将来計画を含む)を反映した地形が入力津波に与える影響を確認するため、上記整理結果を踏まえた津波解析、管路解析を追加実施した。
- 追加解析の結果、水位上昇側について、工事計画を反映した地形による水位は、現状の入力津波水位に包含されることを確認した。
- 一方、水位下降側のうち取水口前面(2号炉)については、工事計画を反映した地形による水位が現状の入力津波水位を下回ることを確認したことから、入力津波水位を見直すこととした。

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 37)(2/14)

【不確かさ要因が津波高さに与える影響】

- 入力津波については、津波高さに対する不確かさ要因(図1:①~④)を考慮して評価している。
- このうち、潮位変動(②)及び地震による地殻変動(③)については、水位上昇側・下降側評価のそれぞれに一律な保守性を考慮することから、各要因が津波高さに与える影響は明確である。
- 一方、地震による地形変化(①)及び管路状態(④)については、津波の流況や管路内損失に影響することから、現状地形における入力津波高さに関するパラメータスタディ結果を用いて、各要因の有無が津波高さに与える影響を網羅的に整理する。

■ : 影響を確認する不確かさ要因

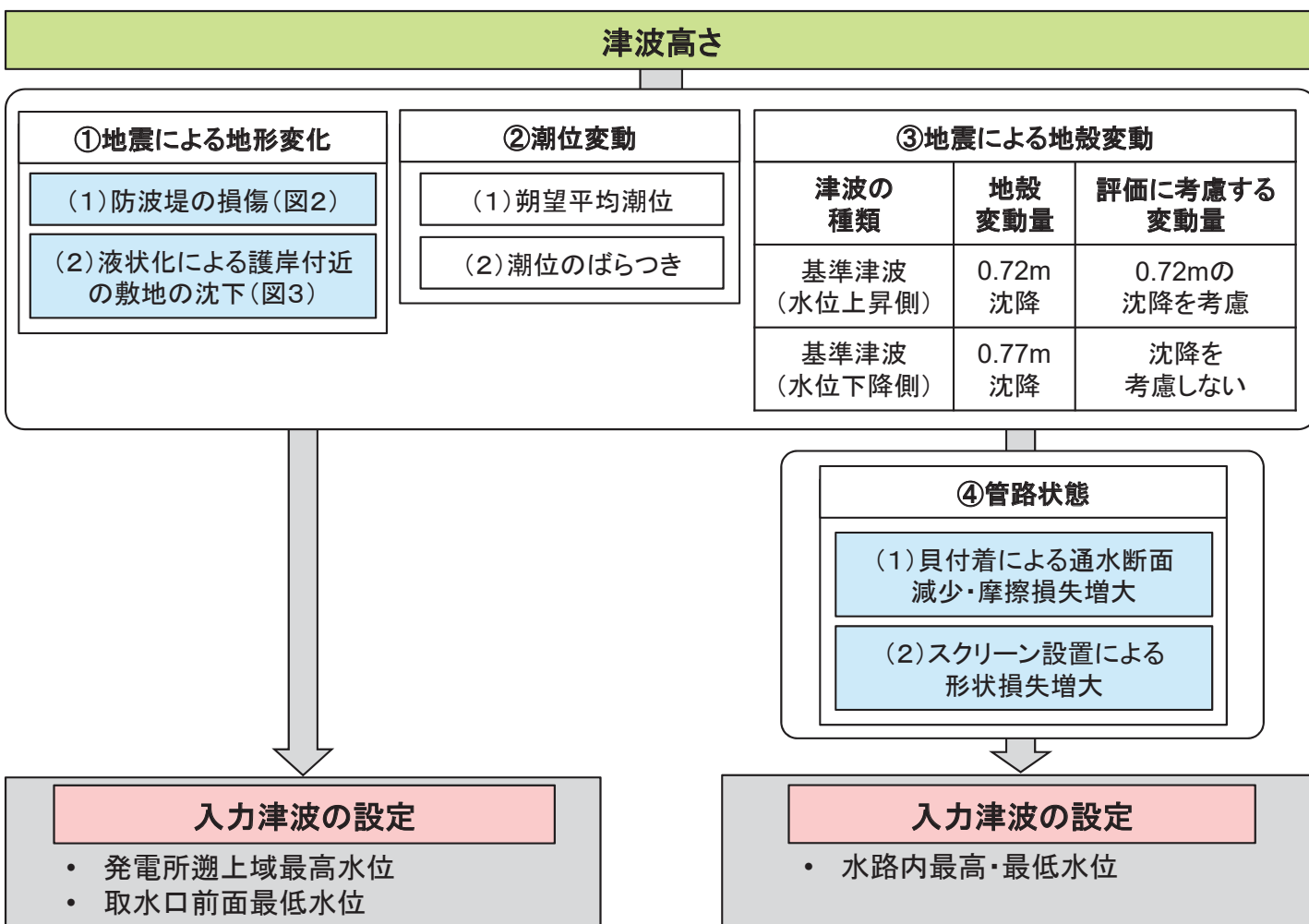


図1 入力津波の検討フロー

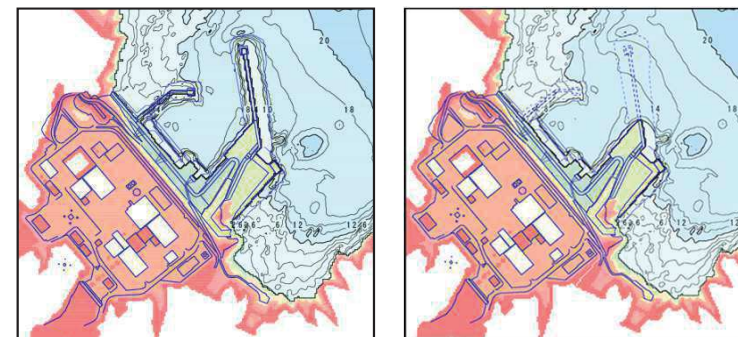


図2 防波堤の損傷を考慮した地形モデル
(左)防波堤あり, (右)防波堤なし

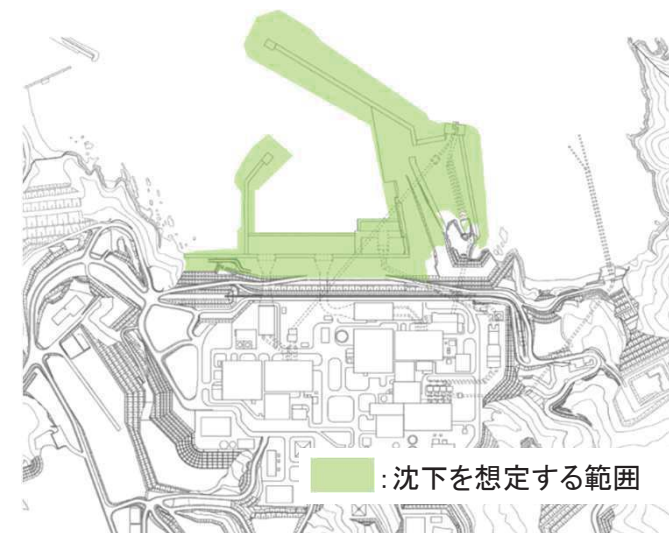


図3 液状化による護岸付近の敷地の沈下範囲

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 37)(3/14)

【不確かさ要因が津波高さに与える影響:現状地形における入力津波高さ(水位上昇側)】

- 各不確かさ要因が津波高さ(水位上昇側)に与える影響を確認するため、現状地形における入力津波高さのパラメータスタディ結果を用いて、不確かさ要因の有無による水位の変動を下表のとおり整理した(確認結果の詳細は、別添1の添付資料32に示す)。
- 防波堤の有無の影響については、防波堤なしの場合に発電所敷地全体(防潮堤)の水位は低下する傾向が明確であるが、海水ポンプ室及び放水立坑については各号炉で傾向が異なることから、適切に不確かさを考慮する必要があることを確認した。
- 護岸付近の敷地の沈下の有無の影響については、沈下ありの場合に発電所敷地全体(防潮堤)及び海水ポンプ室の水位は上昇する傾向が明確であるが、放水立坑については各号炉で傾向が異なることから、適切に不確かさを考慮する必要があることを確認した。
- 貝付着の有無の影響については、貝付着なしの条件は損失が小さくなるため、海水ポンプ室の水位は高くなることが明確であり、保守的であることを確認した。
- スクリーン損失の有無の影響については、スクリーンなしの条件は損失が小さくなるため、海水ポンプ室の水位は高くなることが明確であり、保守的であることを確認した。

表1 不確かさ要因が津波高さ(水位上昇側)に与える影響

設定位置		①地震による地形変化				④管路状態			
		防波堤 (あり→なし)		護岸付近の敷地の沈下 (なし→あり)		貝付着 (あり→なし)		スクリーン損失 (あり→なし)	
		変動傾向	変動範囲	変動傾向	変動範囲	変動傾向	変動範囲	変動傾向	変動範囲
発電所敷地全体 (防潮堤)		低下	-0.84m ~ -0.94m	上昇	+0.45m ~ +0.55m	— ※1	— ※1	— ※1	— ※1
海水ポンプ室	1号炉	低下	-0.04m	上昇	±0.00m ~ +0.01m	上昇	+0.03m ~ +0.04m	上昇	±0.00m ~ +0.04m
	2号炉	上昇	+0.35m ~ +0.44m	上昇	+0.03m ~ +0.12m	上昇	+0.34m ~ +0.36m	上昇	+0.04m ~ +0.06m
	3号炉	上昇	+0.29m ~ +0.39m	上昇	+0.02m ~ +0.11m	上昇	+0.22m ~ +0.24m	上昇	+0.02m ~ +0.07m
放水立坑	1号炉	低下	-0.18m	低下	-0.03m	— ※2	— ※2	変動なし	±0.00m
	2号炉	上昇	+0.18m ~ +0.23m	上昇	+0.03m ~ +0.08m	— ※2	— ※2	— ※3	— ※3
	3号炉	上昇	+0.16m ~ +0.23m	上昇	+0.04m ~ +0.11m	— ※2	— ※2	変動なし	±0.00m
評価		海水ポンプ室及び放水立坑については、各号炉で傾向が異なることから、適切に不確かさを考慮する必要がある。		放水立坑については、各号炉で傾向が異なることから、適切に不確かさを考慮する必要がある。		貝付着なしの条件は損失が小さくなるため、海水ポンプ室水位は高くなることが明確であり、保守的である。		スクリーン損失なしの条件は損失が小さくなるため、海水ポンプ室の水位は高くなることが明確であり、保守的である。	

※1: 管路解析対象外。

※2: 放水路は、1系統のみであるとともに水深が深いこと等から抜水点検できない構造となっており、清掃は行わない。また、清掃可能な箇所である放水立坑について「貝付着なし」とすると、津波溢水に対する容量が大きくなり、水位低減に寄与することから、「貝付着あり」を基本条件としている。

※3: 2号炉補機放水路は、基準津波時に逆流防止設備により遮断されるため、補機冷却系海水ポンプ流量が放水立坑水位に影響を与えない。

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 37)(4/14)

【不確かさ要因が津波高さに与える影響:現状地形における入力津波高さ(水位下降側)】

- 各不確かさ要因が津波高さ(水位下降側)に与える影響を確認するため、現状地形における入力津波高さのパラメータスタディ結果を用いて、不確かさ要因の有無による水位の変動を下表のとおり整理した(確認結果の詳細は、別添1の添付資料32に示す)。
- 防波堤の有無の影響については、防波堤なしの場合に2号炉取水口前面の水位は低下する傾向が明確であるが、海水ポンプ室の水位については明確な変動傾向が認められないことから、適切に不確かさを考慮する必要があることを確認した。
- 護岸付近の敷地の沈下の有無の影響については、沈下の有無によって2号炉取水口前面及び海水ポンプ室の水位に明確な変動傾向が認められないことから、適切に不確かさを考慮する必要があることを確認した。
- 貝付着の有無の影響については、貝付着なしの条件は損失が小さくなるため、海水ポンプ室の水位は下がることが明確であり、保守的であることを確認した。
- スクリーン損失の有無の影響については、スクリーンなしの条件は損失が小さくなるため、海水ポンプ室の水位は下がることが明確であり、保守的であることを確認した。

表2 不確かさ要因が津波高さ(水位下降側)に与える影響

設定位置	①地震による地形変化				④管路状態			
	防波堤 (あり→なし)		護岸付近の敷地の沈下 (なし→あり)		貝付着 (あり→なし)		スクリーン損失 (あり→なし)	
	変動傾向	変動範囲	変動傾向	変動範囲	変動傾向	変動範囲	変動傾向	変動範囲
取水口前面 (2号炉)	低下	-0.96m ~ -0.97m	上昇	+0.02m ~ +0.03m	—※	—※	—※	—※
海水ポンプ室 (2号炉)	上昇・低下	-0.01m ~ +0.03m	低下	-0.02m ~ ±0.00m	低下	-0.15m ~ -0.19m	低下	-0.02m ~ ±0.00m
評価	海水ポンプ室については、明確な変動傾向が認められないことから、適切に不確かさを考慮する必要がある。		取水口前面と海水ポンプ室で変動傾向が異なることから、適切に不確かさを考慮する必要がある。		貝付着なしの条件は損失が小さくなるため、海水ポンプ室水位は下がることが明確であり、保守的である。		スクリーン損失なしの条件は損失が小さくなるため、海水ポンプ室の水位は下がることが明確であり、保守的である。	

※:管路解析対象外。

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 37)(5/14)

【不確かさ要因が津波高さに与える影響:まとめ】

- 入力津波は、津波高さに対する影響要因(不確かさ要因)を考慮し検討を実施しているが、各要因のうち地震による地形変化(防波堤、護岸付近の敷地の沈下)及び管路状態(貝付着、スクリーン損失)については、津波の流況や管路内損失に影響することから、現状地形における入力津波高さに関するパラメータスタディ結果を用いて、各要因の有無が津波高さに与える影響を網羅的に整理した。
- 水位上昇側について、地震による地形変化に係る不確かさ要因は、入力津波設定位置毎に変動傾向が異なるため、適切に不確かさを考慮する。一方、管路状態に係る不確かさ要因(貝付着、スクリーン損失)については、損失が小さくなる条件(貝付着なし、スクリーン損失なし)で評価することが保守的であることから不確かさは考慮しない。
- 水位下降側について、地震による地形変化に係る不確かさ要因は、入力津波設定位置毎に変動傾向が異なるため、適切に不確かさを考慮する。また、管路状態に係る不確かさ要因(貝付着、スクリーン損失)については、損失が小さくなる条件(貝付着なし、スクリーン損失なし)で評価することが保守的であることから不確かさは考慮しない。

表3 パラメータスタディ時における不確かさの考慮方法について

	①地震による地形変化		④管路状態	
	防波堤	護岸付近の敷地の沈下	貝付着	スクリーン損失
不確かさの考慮方法	・あり ・なし	・現地形 ・1m沈下	・なし (保守的条件で実施)	・なし (保守的条件で実施)

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 37)(6/14)

【管路解析に用いる津波水位抽出位置の違いが現状地形における入力津波に与える影響】

- 管路解析に用いる時刻歴波形抽出位置については、周辺構造物からの反射波等の影響が少なくなるように各取放水口中央から離隔をとって設定している(図4(1), 図4(2))。一方、基準津波評価では、不確かさを考慮した多数のパラメータスタディを実施するが、各ケースによって港湾内の流況が異なることを踏まえ、水位評価範囲を広めに設定している(図4(3))。
- 抽出位置の違いが各海水ポンプ室・放水立坑位置の入力津波高さに与える影響を確認するため、現状地形における各取放水口前面最高・最低水位位置での水位時刻歴波形を用いた管路解析結果を整理した。整理結果を表4に示す(最高・最低水位位置の詳細は、別添1の添付資料6に示す)。
- 最高・最低水位としては地形の影響を受けるためわずかな差が生じるものの、管路解析に用いる水位時刻歴波形はほぼ一致しているため(図5), 入力津波評価に影響を与えないことを確認した。
- 以上から、復旧・改修工事計画に伴う地形改変が入力津波に与える影響の確認は、取放水口前面中央位置の波形を用いて行う。

表4(1) 津波高さ(水位上昇側)に与える影響

設定位置	水位抽出位置	取放水口前面水位(O.P.)	管路解析結果(O.P.)	入力津波(O.P.)	
海水ポンプ室	1号炉	①取水口前面※1	+20.66m	+10.38m	+10.4m
		②最高水位※2	+20.91m	+10.34m	+10.4m
		②-①	+0.25m	-0.04m	±0.0m
	2号炉	①取水口前面※1	+21.12m	+18.06m	+18.1m
		②最高水位※2	+21.35m	+18.07m	+18.1m
		②-①	+0.23m	+0.01m	±0.0m
	3号炉	①取水口前面※1	+21.65m	+18.95m	+19.0m
		②最高水位※2	+21.89m	+18.99m	+19.0m
		②-①	+0.24m	+0.04m	±0.0m
放水立坑	1号炉	①放水口前面※1	+18.70m	+11.79m	+11.8m
		②最高水位※2	+18.77m	+11.78m	+11.8m
		②-①	+0.07m	-0.01m	±0.0m
	2号炉	①放水口前面※1	+19.65m	+17.35m	+17.4m
		②最高水位※2	+19.66m	+17.38m	+17.4m
		②-①	+0.01m	+0.03m	±0.0m
	3号炉	①放水口前面※1	+19.65m	+17.44m	+17.5m
		②最高水位※2	+19.66m	+17.48m	+17.5m
		②-①	+0.01m	+0.04m	±0.0m

表4(2) 津波高さ(水位下降側)に与える影響

設定位置	水位抽出位置	取水口前面水位(O.P.)	管路解析結果(O.P.)	入力津波(O.P.)	
海水ポンプ室	2号炉	①取水口前面※1	-10.56m	-6.34m	-6.4m
		②最低水位※3	-10.60m	-6.34m	-6.4m
		②-①	-0.04m	±0.00m	±0.0m

※1: 各取水口前面中央位置の時刻歴波形(図4(1))
 ※3: 最低水位位置の時刻歴波形(図4(3))

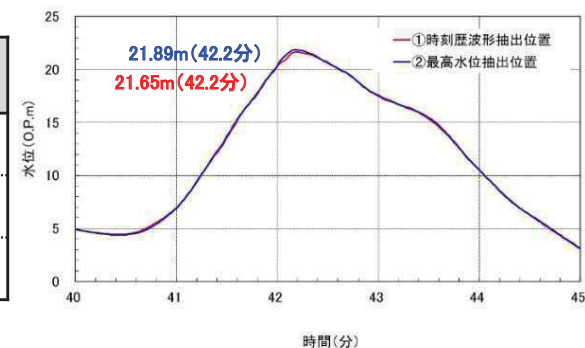


図5 水位時刻歴波形の比較(3号取水口前面(水位上昇側))

- : 1号炉取水口前面
- : 2号炉取水口前面
- : 3号炉取水口前面
- : 1号炉放水口前面
- : 2・3号炉放水口前面



図4(1) 管路解析に用いる時刻歴波形抽出位置

- : 取水口前面水位評価範囲
- : 取水口前面時刻歴波形抽出位置

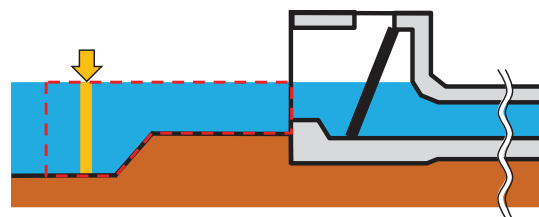


図4(2) 2号炉取水口前面の水位抽出位置の概念図(A-A断面)

- : 敷地前面
- : 1号炉取水口前面
- : 2号炉取水口前面
- : 3号炉取水口前面
- : 1号炉放水口前面
- : 2・3号炉放水口前面

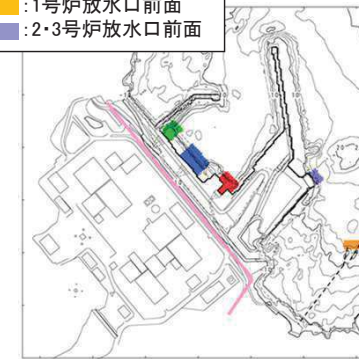


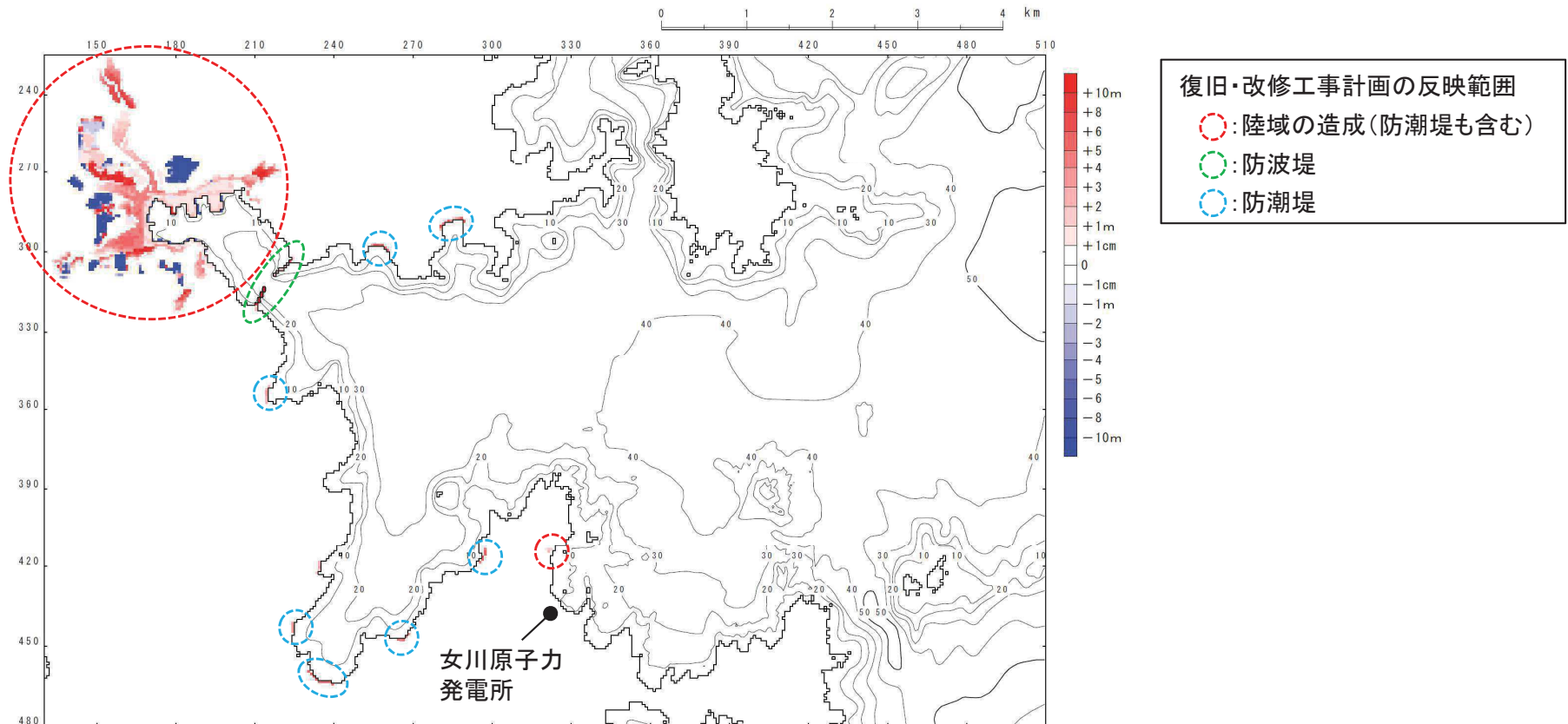
図4(3) 基準津波評価時の水位評価範囲

※1: 各取水口前面中央位置の時刻歴波形(図4(1))
 ※2: 最高水位位置の時刻歴波形(図4(3))

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 37)(7/14)

【復旧・改修工事に伴う地形改変が入力津波に与える影響】

- 3.11地震で被災した地域では、地形改変を伴う復旧・改修工事が進められており、将来、現状の評価に用いている地形が変更になることを踏まえ、今回新たに、工事計画(将来計画を含む)を反映した地形による津波解析、管路解析を実施し、入力津波に与える影響を確認した。
- なお、管路解析については、前述した不確かさ要因が津波高さに与える影響に係る検討結果を踏まえ、保守的設定となる条件(貝付着なし、スクリーン損失なし)で評価した。



2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 37)(8/14)

【復旧・改修工事に伴う地形改変が入力津波に与える影響:入力津波高さに関するパラメータスタディの結果(1/4)】

- ・ 工事計画を反映した地形を用いて, 入力津波に対する各影響要因を考慮したパラメータスタディを実施した。
- ・ 水位上昇側について, 工事計画を反映した地形による水位は, 現状の入力津波水位に包含されることを確認した。

表6(1) 工事計画を反映した津波高さに関するパラメータスタディ結果(水位上昇側(1/3))

入力津波の種類	検討対象基準津波	設定位置	入力津波に対する影響要因							水位(O.P.m)	現状の入力津波(O.P.m)		
			①地震による地形変化(津波解析)			②潮位変動		③地震による地殻変動(m)	④管路状態(管路解析※1)				
			(1)防波堤 ○:あり ×:なし	(2)護岸付近の敷地の沈下 ○:現地形 ×:1m沈下	敷地前面最大水位上昇量(m)	(1)朔望平均潮位(O.P.m)	(2)潮位のばらつき(m)		(1)貝付着 ○:あり ×:なし			(2)スクリーン損失 ○:あり ×:なし	
発電所遡上域最高水位	基準津波(水位上昇側)	発電所敷地全体(防潮堤)	○	○	+21.43	朔望平均満潮位+1.43	+0.16	沈降を考慮+0.72	管路解析対象外	+23.74	+24.4		
				×	+21.85					+24.16			
			×	○	+20.61					+22.92			
				×	+20.92					+23.23			
		現状評価※2	○	×	+22.03					+24.34			
水路内最高水位	基準津波(水位上昇側)	海水ポンプ室(1号炉)	○	○	+18.37	朔望平均満潮位+1.43	+0.16	沈降を考慮+0.72	×	×	+10.37	+10.4	
				×	+18.35				×	×	+10.37		
			×	○	+18.42				×	×	+10.32		
				×	+18.43				×	×	+10.33		
		現状評価※2	○	×	+18.35				×	×	+10.38		
		海水ポンプ室(2号炉)	○	○	+19.09				×	×	+17.60		+18.1
				×	+19.10				×	×	+17.71		
			×	○	+18.91				×	×	+18.04		
				×	+18.81				×	×	+18.07		
			現状評価※2	×	×				+18.81	×	×		

※1:管路解析の詳細は, 別添1の添付資料6に示す。
 ※2:現状の地形を用いたパラメータスタディ結果のうち最大ケースを記載。

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 37)(9/14)

【復旧・改修工事に伴う地形改変が入力津波に与える影響:入力津波高さに関するパラメータスタディの結果(2/4)】

表6(2) 工事計画を反映した津波高さに関するパラメータスタディ結果(水位上昇側(2/3))

入力津波の種類	検討対象基準津波	設定位置	入力津波に対する影響要因							水位(O.P.m)	現状の入力津波(O.P.m)	
			①地震による地形変化(津波解析)			②潮位変動		③地震による地殻変動(m)	④管路状態(管路解析※1)			
			(1)防波堤 ○:あり ×:なし	(2)護岸付近の敷地の沈下 ○:現地形 ×:1m沈下	敷地前面最大水位上昇量(m)	(1)朔望平均潮位(O.P.m)	(2)潮位のばらつき(m)		(1)貝付着 ○:あり ×:なし			(2)スクリーン損失 ○:あり ×:なし
水路内最高水位	基準津波(水位上昇側)	海水ポンプ室(3号炉)	○	○	+19.28	朔望平均満潮位+1.43	+0.16	沈降を考慮+0.72	×	×	+18.54	+19.0
				×	+19.28				×	×	+18.66	
			×	○	+19.48				×	×	+18.93	
				×	+19.26				×	×	+18.95	
			現状評価※2	×	+19.34				×	×	+18.95	
				○	+19.28				×	×	+18.52	
		海水熱交換器建屋取水立坑(3号炉)	○	○	+19.28				+19.0	×	×	+18.64
				×	+19.28					×	×	+18.91
			×	○	+19.48					×	×	+18.93
				×	+19.26					×	×	+18.93
			現状評価※2	×	+19.34					×	×	+18.93
				○	+16.40					○※3	×	+11.77
	放水立坑(1号炉)	○	○	+16.40	+11.8	○※3	×	+11.74				
			×	+16.71		○※3	×	+11.58				
		×	○	+17.74		○※3	×	+11.56				
			×	+17.63		○※3	×	+11.79				
		現状評価※2	○	+16.39		○※3	×	+11.79				
			○	+16.39		○※3	×	+11.79				

※1:管路解析の詳細は、別添1の添付資料6に示す。

※2:現状の地形を用いたパラメータスタディ結果のうち最大ケースを記載。

※3:1系統のみであるとともに水深が深いこと等から排水点検できない構造となっており、清掃は行わない。また、清掃可能な箇所である放水立坑について「貝付着なし」とすると、津波溢水に対する容量が大きくなり、水位低減に寄与することから、「貝付着あり」を基本条件とする。

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 37)(10/14)

【復旧・改修工事に伴う地形改変が入力津波に与える影響:入力津波高さに関するパラメータスタディの結果(3/4)】

表6(3) 工事計画を反映した津波高さに関するパラメータスタディ結果(水位上昇側(3/3))

入力津波の種類	検討対象基準津波	設定位置	入力津波に対する影響要因								水位(O.P.m)	現状の入力津波(O.P.m)			
			①地震による地形変化(津波解析)			②潮位変動		③地震による地殻変動(m)	④管路状態(管路解析*1)						
			(1)防波堤 ○:あり ×:なし	(2)護岸付近の敷地の沈下 ○:現地形 ×:1m沈下	敷地前面最大水位上昇量(m)	(1)朔望平均潮位(O.P.m)	(2)潮位のばらつき(m)		(1)貝付着 ○:あり ×:なし	(2)スクリーン損失 ○:あり ×:なし					
水路内最高水位	基準津波(水位上昇側)	放水立坑(2号炉)	○	○	+17.00	朔望平均満潮位+1.43	+0.16	沈降を考慮+0.72	○*3	—*4	+17.09	+17.4			
				×	+17.18				○*3	—*4	+17.17				
			×	○	+17.15				○*3	—*4	+17.32				
				×	+17.28				○*3	—*4	+17.35				
			現状評価*2	×	×				+17.34			○*3	—*4	+17.35	
		放水立坑(3号炉)	○	○	+17.00						○*3	×	+17.17	+17.5	
				×	+17.18				○*3	×	+17.28				
			×	○	+17.15				○*3	×	+17.41				
				×	+17.28				○*3	×	+17.44				
			現状評価*2	×	×				+17.34			○*3	×	+17.44	

※1:管路解析の詳細は、別添1の添付資料6に示す。

※2:現状の地形を用いたパラメータスタディ結果のうち最大ケースを記載。

※3:1系統のみであるとともに水深が深いこと等から抜水点検できない構造となっており、清掃は行わない。また、清掃可能な箇所である放水立坑について「貝付着なし」とすると、津波溢水に対する容量が大きくなり、水位低減に寄与することから、「貝付着あり」を基本条件とする。

※4:2号炉補機放水路は、基準津波時に逆流防止設備により遮断されるため、補機冷却系海水ポンプ流量が水位に与える影響はない。

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 37)(11/14)

【復旧・改修工事に伴う地形改変が入力津波に与える影響:入力津波高さに関するパラメータスタディの結果(4/4)】

- 水位下降側のうち取水口前面(2号炉)については, 工事計画を反映した地形による水位が, 現状の入力津波水位を0.13m下回ることを確認した。ただし, 貯留堰高さ(O.P.-6.3m)を下回る時間4分以下に変更はなく, 非常用海水ポンプの運転可能継続時間約26分に対して十分余裕があることを確認した。
- 海水ポンプ室(2号炉)については, 現状の入力津波水位に包含されることを確認した。

表6(4) 工事計画を反映した津波高さに関するパラメータスタディ結果(水位下降側)

入力津波の種類	検討対象基準津波	設定位置	入力津波に対する影響要因							水位(O.P.m)	現状の入力津波(O.P.m)	
			①地震による地形変化(津波解析)			②潮位変動		③地震による地殻変動(m)	④管路状態(管路解析※1)			
			(1)防波堤 ○:あり ×:なし	(2)護岸付近の敷地の沈下 ○:現地形 ×:1m沈下	取水口前面最大水位下降量(m)	(1)朔望平均潮位(O.P.m)	(2)潮位のばらつき(m)		(1)貝付着 ○:あり ×:なし			(2)スクリーン損失 ○:あり ×:なし
取水口前面最低水位	基準津波(水位下降側)	取水口前面(2号炉)	○	○	-10.50	朔望平均干潮位 -0.14	-0.10	沈降を考慮しない	管路解析対象外	-10.74	-11.6	
			×	×	-10.53					-10.77		
		現状評価※2	○	○	-11.49					-11.73※3		
			×	×	-11.45					-11.69		
		×	○	-11.35	-11.59※4							
水路内最低水位	基準津波(水位下降側)	海水ポンプ室(2号炉)	○	○	-10.46	-	-	-	×	×	-6.34	-6.4
			×	×	-10.46				×	×	-6.34	
		現状評価※2	○	○	-11.47				×	×	-6.34	
			×	×	-11.38				×	×	-6.34	
		○	×	-10.32	×				×	-6.34※5		

※1:管路解析の詳細は, 別添1の添付資料6に示す。

※2:現状の地形を用いたパラメータスタディ結果のうち最大ケースを記載。

※3:貯留堰高さ(O.P.-6.3m)を下回る時間は4分以下(191秒)であるが, 非常用海水ポンプの運転可能継続時間約26分に対して十分余裕がある。

※4:貯留堰高さ(O.P.-6.3m)を下回る時間は4分以下(183秒)であるが, 非常用海水ポンプの運転可能継続時間約26分に対して十分余裕がある。

※5:最低水位が貯留堰高さを下回る場合には, 取水槽内に確保される貯留水の影響により, 最低水位は変動しにくい。

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 37)(12/14)

【復旧・改修工事に伴う地形改変が入力津波に与える影響:まとめ】

- 復旧・改修工事(将来計画を含む)に伴う地形改変が、入力津波に与える影響を確認するため、今回新たに、津波解析、管路解析を実施した。
- 水位上昇側について、工事計画を反映した地形による水位は、現状の入力津波水位に包含されることを確認した(第692回審査会合(H31.3.12)ご説明内容から変更なし)。
- 水位下降側のうち取水口前面(2号炉)については、工事計画を反映した地形による水位が、現状の入力津波水位を0.13m下回ることを確認した。ただし、貯留堰高さ(O.P.-6.3m)を下回る時間4分以下に変更はなく、非常用海水ポンプの運転可能継続時間約26分に対して十分余裕があることを確認した(第692回審査会合(H31.3.12)ご説明内容から変更なし)。
- また、海水ポンプ室(2号炉)については、現状の入力津波水位に包含されることを確認した(第692回審査会合(H31.3.12)ご説明内容から変更なし)。

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 37)(13/14)

【入力津波高さの見直し:取水口前面(2号炉)における入力津波(水位下降側)の見直し】

- 水位下降側のうち取水口前面(2号炉)については, 工事計画を反映した地形による水位が, 現状の入力津波水位を0.13m下回ったことを考慮し, 入力津波水位をO.P.-11.6mからO.P.-11.8mに見直しする。

表7 取水口前面最低水位及び貯留堰高さを下回る時間の評価

入力津波の種類	設定位置	入力津波に対する影響要因					水位(O.P.m) 上段:現状評価 下段:工事計画の反映 ():貯留堰高さを下回る時間	入力津波 上段:変更前 下段:今回見直し
		①地震による地形変化		②潮位変動		③地震による地殻変動(m)		
		(1)防波堤 ○:あり ×:なし	(2)護岸付近の敷地の沈下 ○:現地形 ×:1m沈下	(1)朔望平均潮位(O.P.m)	(2)潮位のばらつき(m)			
取水口前面最低水位	取水口前面(2号炉)	×	○	朔望平均干潮位 -0.14	-0.10	沈降を考慮しない	-11.59m (183秒) -11.73m (191秒)	-11.6m -11.8m

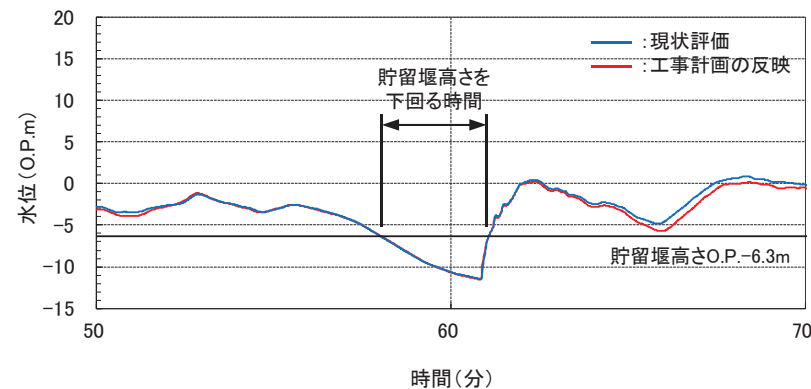


図7 取水口前面における基準津波(水位下降側)による水位時刻歴波形

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 37)(14/14)

【入力津波高さの見直し:まとめ】

- 津波高さに対する不確かさ要因及び3.11地震後の復旧・改修工事(将来計画を含む)に伴う地形改変の影響を踏まえて設定した入力津波高さは以下のとおりである。

表8 入力津波高さ一覧表(水位上昇側)

評価位置			①地震による地形変化		②潮位変動	③地震による地殻変動	④管路状態		設計又は評価に用いる入力津波	
			防波堤	護岸付近の敷地の沈下			貝付着	スクリーン損失		
発電所遡上域(防潮堤)			あり	1m沈下	O.P.+1.59m ^{※1}	沈降を考慮 +0.72m	管路解析対象外		O.P.+24.4m	
水路内 最高水位	海水ポンプ室	1号炉	あり	1m沈下	O.P.+1.59m ^{※1}	沈降を考慮 +0.72m	なし	なし	O.P.+10.4m	
		2号炉	なし	1m沈下	O.P.+1.59m ^{※1}	沈降を考慮 +0.72m	なし	なし	O.P.+18.1m	
		3号炉	なし	1m沈下	O.P.+1.59m ^{※1}	沈降を考慮 +0.72m	なし	なし	O.P.+19.0m	
	海水熱交換器建屋取水立坑		3号炉	なし	1m沈下	O.P.+1.59m ^{※1}	沈降を考慮 +0.72m	なし	なし	O.P.+19.0m
	放水立坑		1号炉	あり	現地地形	O.P.+1.59m ^{※1}	沈降を考慮 +0.72m	あり	なし	O.P.+11.8m
			2号炉	なし	1m沈下	O.P.+1.59m ^{※1}	沈降を考慮 +0.72m	あり	— ^{※2}	O.P.+17.4m
			3号炉	なし	1m沈下	O.P.+1.59m ^{※1}	沈降を考慮 +0.72m	あり	なし	O.P.+17.5m

※1: 朔望平均満潮位O.P.+1.43mと潮位のばらつき+0.16mを考慮。

※2: 2号炉補機放水路は基準津波時に逆流防止設備により遮断されるため、補機冷却系海水ポンプ流量が水位に与える影響はない。

表9 入力津波高さ一覧表(水位下降側)

評価位置			①地震による地形変化		②潮位変動	③地震による地殻変動	④管路状態		設計又は評価に用いる入力津波
			防波堤	護岸付近の敷地の沈下			貝付着	スクリーン損失	
取水口前面最低水位			なし	現地地形	O.P.-0.24m ^{※3}	沈降を考慮しない	管路解析対象外		O.P.-11.8m ^{※4}
水路内 最低水位	海水ポンプ室	2号炉	あり	1m沈下	O.P.-0.24m ^{※3}	沈降を考慮しない	なし	なし	O.P.-6.4m

※3: 朔望平均干潮位O.P.-0.14mと潮位のばらつき-0.10mを考慮。

※4: 東北地方太平洋沖地震後の発電所周辺における地形改変の影響を考慮。

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 38)(1/16)

(1) 指摘事項

管路解析について、解析に用いている変数を取放水路の該当箇所に図示するとともに、解析手法及び各部の流速を提示すること。また、津波時の流速に対して、文献による損失係数が適用範囲内であることを提示すること。

(2) 回答方針

- 解析手法の概要を示した上で、各取放水設備の通常運転時、津波時における流速の経時変化等を整理するとともに、津波時の高流速を対象とする際の損失係数の設定方法等に係る知見(Moodyのダイヤグラム)や既往の実験結果等より、管路解析における解析条件、損失係数の設定の妥当性及び適用性について説明する。

【主な解析条件(津波時)】

計算時間	地震発生から4時間
計算時間間隔 Δt	0.0001秒
計算空間間隔 Δx	0.5m
ポンプ取水・放水量	1号炉: 1,920m ³ /hr 2号炉: 8,300m ³ /hr 3号炉: 7,800m ³ /hr
摩擦損失係数	貝付着あり: $n=0.018\text{m}^{-1/3}\cdot\text{s}$ 貝付着なし: $n=0.015\text{m}^{-1/3}\cdot\text{s}$
局所損失係数	電力土木技術協会(1995) : 火力原子力発電所土木構造物の設計 千秋信一(1967) : 発電水力演習 土木学会(1999) : 水理公式集 による

① 主な解析条件を右表に示す。管路解析に用いる各損失係数について、各局所損失については電力土木技術協会(1995)、千秋信一(1967)、土木学会(1999)を参照し、摩擦損失係数については Manning 則を適用している。

② 土木学会(1999)によると、摩擦損失は Darcy-Weisbach 式により与えられ、摩擦損失係数 f の値は摩擦抵抗則(摩擦損失係数とレイノルズ数 Re の関係式)により計算される、としている。

③ 千秋信一(1967)によると、各局所損失水頭算定式について、対象となる流れは十分に乱れの発達した乱流状態である、としている。

④ 上記を踏まえ、通常運転時・津波時の水路内流速及び設定した損失水頭について整理し、各損失係数の適用性について検討する。

レイノルズ数の算定式

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

ここに、

Re : レイノルズ数, V : 流速(m/s), D : 管径(m), ν : 動粘性係数
(水(海水)の動粘性係数は $\nu = 1.0 \cdot 10^{-6} \text{ (m}^2/\text{s)}$ を用いる)

※ 土木学会(1999)によれば、レイノルズ数 Re は $Re = 3000$ 以上の場合、乱流状態として定義している。

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 38)(2/16)

【管路解析に用いる手法について】

- 管路解析では、非定常の開水路の連続式・運動方程式を用いている。

【解析フローチャート】

(1) 一次元開水路非定常流の連続式及び運動方程式

- 連続式

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \left(gA \frac{n^2 |v| v}{R^{4/3}} + \frac{1}{\Delta L} f \frac{|v| v}{2g} \right) = 0$$

- 運動方程式

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

ここに、 $A = A_0 + B_s(h - D)$, $B_s = \frac{gA_0}{a^2}$

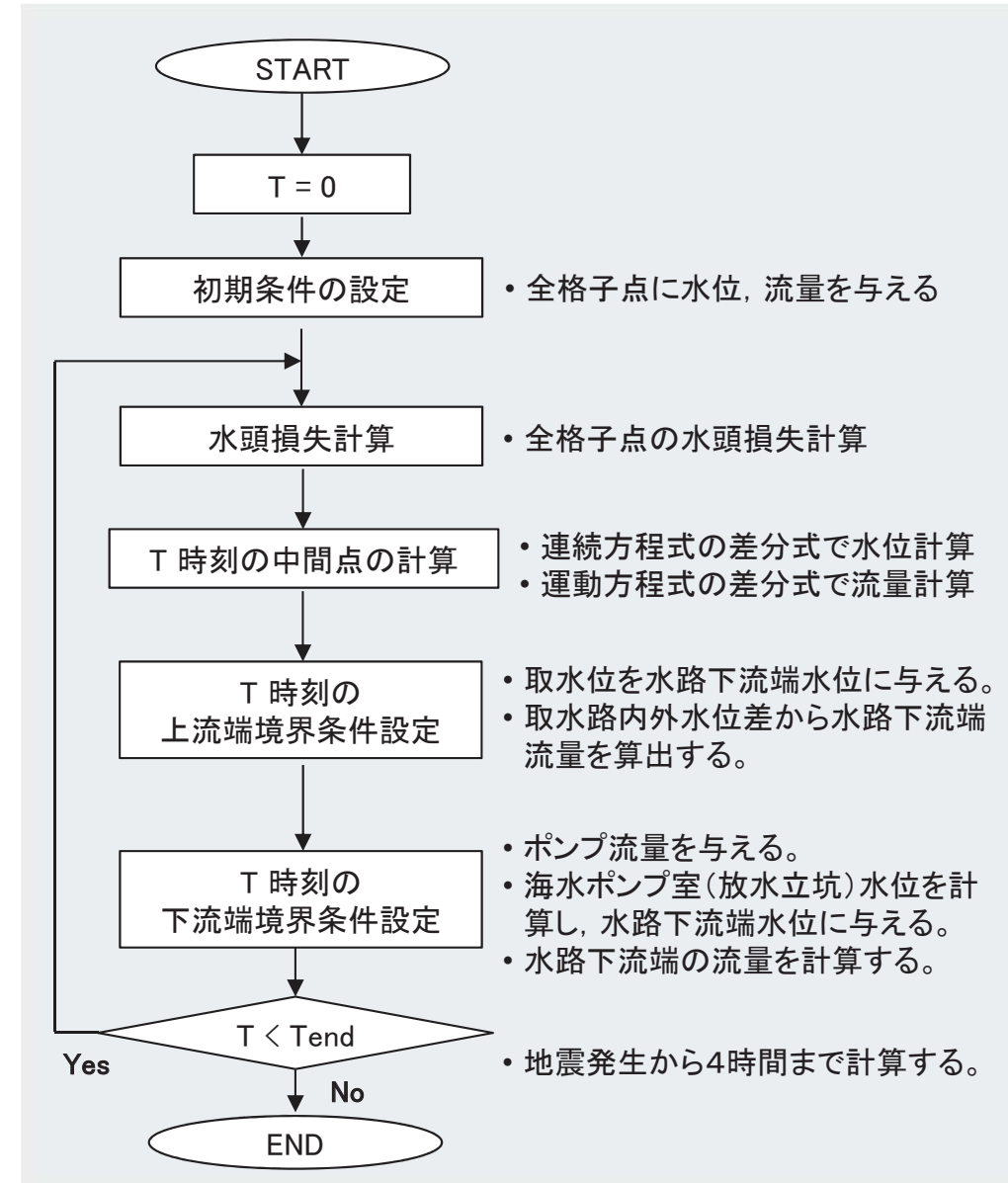
A : 流水面積 (m ²)	n : マニングの粗度係数 (m ^{-1/3} s)
A_0 : 管断面積 (m ²)	ΔL : 局所損失区間の長さ (m)
B_s : 仮想スロット幅 (m)	x : 底面に沿った座標 (m)
H : 水位 (ピエゾ水頭) (m)	Q : 流量 (m ³ /s)
a : 圧力伝播速度 (m/s)	g : 重力加速度 (m/s ²)
t : 時間 (s)	R : 径深 (m)
v : 流速 (m/s)	f : 局所損失係数
h : 水深 (圧力水頭) (m)	D : 水路高 (m)

(2) 海水ポンプ室, 放水立坑の連続式

$$A_H \frac{dH_P}{dt} = Q_N - Q_P$$

ここに、

H_P : 水位 (m)	Q_N : 流入出量 (m ³ /s)
A_H : 水面面積 (m ²)	Q_P : ポンプ流量 (m ³ /s)
	(取水側: +, 放水側: -)

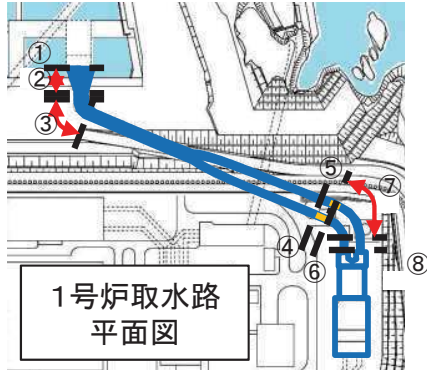


2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 38)(3/16)

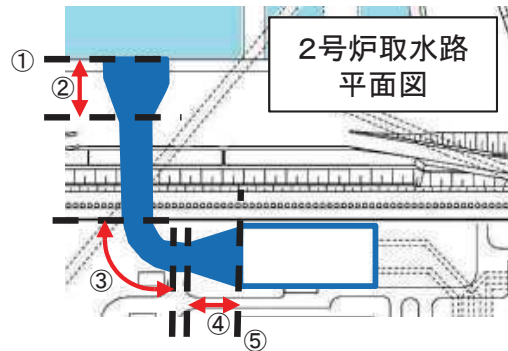
【各取放水設備における水の流れの状態について:通常運転時】

- 通常運転時における1～3号炉取水路のレイノルズ数算定結果を下表に示す。
- 各取水路のレイノルズ数 R_e は $R_e = 10^4 \sim 10^6$ 程度であり、通常運転時においても乱流状態であることを確認した。

(補機冷却系海水ポンプ通常運転:1,920m³/hr)



区分	位置	位置* (m)	断面積(貝代なし) (m ²)	流速 (m/s)	レイノルズ数
1号炉 取水路	①流入/流出損失考慮位置	0.00	24.39	0.01	6.13E+04
	②漸縮/漸拡損失考慮位置	0.00~16.00	10.03	0.03	9.65E+04
	③曲がり損失考慮位置	20.51~44.25	10.03	0.03	9.65E+04
	④急縮/急拡損失考慮位置	245.05	0.79	0.34	3.39E+05
	⑤流路縮小工貫通部	246.55	0.79	0.34	3.39E+05
	⑥急拡/急縮損失考慮位置	248.55	0.79	0.34	3.39E+05
	⑦曲がり損失考慮位置	252.49~270.29	8.59	0.03	1.03E+05
	⑧流出/流入損失考慮位置	282.55	8.59	0.03	1.03E+05



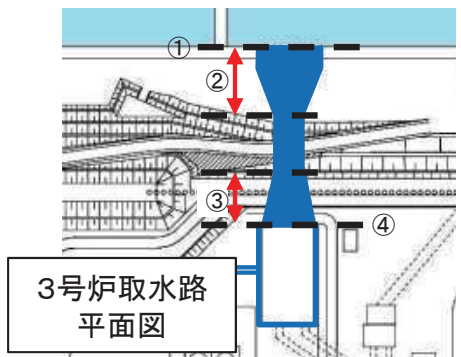
(循環水ポンプ通常運転:199,440m³/hr + 補機冷却系海水ポンプ通常運転:8,300m³/hr)

区分	位置	位置* (m)	断面積(貝代なし) (m ²)	流速 (m/s)	レイノルズ数
2号炉 取水路	①流入/流出損失考慮位置	0.00	36.21	0.80	5.41E+06
	②漸縮/漸拡損失考慮位置	0.00~24.50	15.09	1.91	8.38E+06
	③曲がり損失考慮位置	73.57~112.84	15.09	1.91	8.38E+06
	④漸拡/漸縮損失考慮位置	118.19~148.19	15.09	1.91	8.38E+06
	⑤流出/流入損失考慮位置	148.19	70.96	0.41	3.87E+06

(循環水ポンプ通常運転:202,600m³/hr + 補機冷却系海水ポンプ通常運転:7,800m³/hr)

区分	位置	位置* (m)	断面積(貝代なし) (m ²)	流速 (m/s)	レイノルズ数
3号炉 取水路	①流入/流出損失考慮位置	0.00	36.17	0.81	5.48E+06
	②漸縮/漸拡損失考慮位置	0.00~24.50	15.09	1.94	8.49E+06
	③漸拡/漸縮損失考慮位置	58.12~88.12	15.12	1.93	8.48E+06
	④流出/流入損失考慮位置	88.12	71.45	0.41	3.90E+06

※:取水口からの位置(距離)



2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 38)(4/16)

【各取放水設備における水の流れの状態について:通常運転時】

- 通常運転時における1～2号炉放水路のレイノルズ数算定結果を下表に示す。
- 1～2号炉放水路のレイノルズ数 R_e は $R_e = 10^5 \sim 10^7$ 程度であり、通常運転時においても乱流状態であることを確認した。

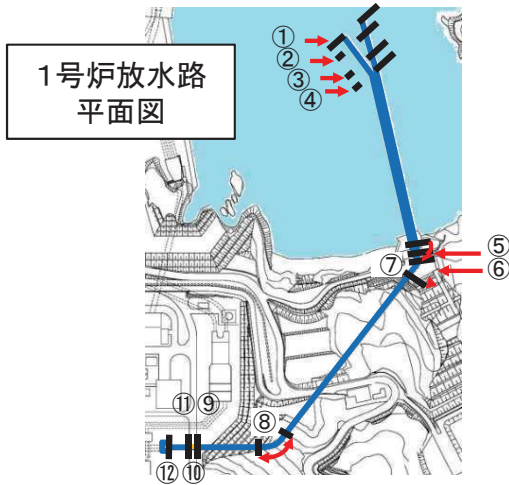
(補機冷却系海水ポンプ通常運転:1,920m³/hr)

区分	位置	位置※ (m)	断面積(貝代あり) (m ²)	流速 (m/s)	レイノルズ数
1号炉 放水路	①流入/流出損失考慮位置	0.00	7.69	0.07	2.16E+05
	②漸拡/漸縮損失考慮位置	3.00~6.00	7.69	0.07	2.16E+05
	③屈折損失考慮位置	26.00	12.46	0.04	1.71E+05
	④屈折損失考慮位置	32.00	12.50	0.04	1.72E+05
	⑤漸拡/漸縮損失考慮位置	267.37~271.67	12.37	0.04	1.71E+05
	⑥漸縮/漸拡損失考慮位置	271.67~277.97	15.26	0.04	1.54E+05
	⑦曲がり損失考慮位置	279.43~290.13	15.26	0.04	1.54E+05
	⑧曲がり損失考慮位置	508.24~599.00	15.25	0.04	1.54E+05
	⑨急縮/急拡損失考慮位置	646.36	0.20	2.69	1.35E+06
	⑩流路縮小工貫通部	648.86	0.20	2.69	1.35E+06
	⑪急拡/急縮損失考慮位置	651.36	0.20	2.69	1.35E+06
	⑫流出/流入損失考慮位置	679.00	15.26	0.04	1.54E+05

(循環水ポンプ通常運転:199,440m³/hr + 補機冷却系海水ポンプ通常運転:8,300m³/hr)

区分	位置	位置※ (m)	断面積(貝代あり) (m ²)	流速 (m/s)	レイノルズ数
2号炉 放水路	①流入/流出損失考慮位置	0.00	14.59	3.95	1.70E+07
	②屈折損失考慮位置	15.50	14.60	3.95	1.70E+07
	③屈折損失考慮位置	24.00	14.58	3.95	1.70E+07
	④漸拡/漸縮損失考慮位置	28.50~39.00	11.44	5.04	1.92E+07
	⑤曲がり損失考慮位置	55.10~64.67	24.86	2.32	1.31E+07
	⑥漸拡/漸縮損失考慮位置	59.88~85.79	13.77	4.17	1.75E+07
	⑦曲がり損失考慮位置	81.07~90.51	17.26	3.34	1.56E+07
	⑧曲がり損失考慮位置	236.93~256.38	24.65	2.34	1.31E+07
	⑨屈折損失考慮位置	354.72	25.09	2.30	1.30E+07
	⑩流出/流入損失考慮位置	398.72	25.09	2.30	1.30E+07

※:放水口からの位置(距離)

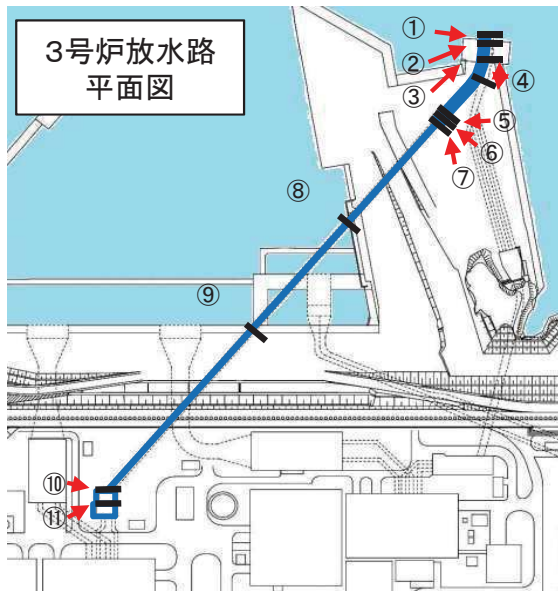


2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 38)(5/16)

【各取放水設備における水の流れの状態について:通常運転時】

- 通常運転時における3号炉放水路のレイノルズ数算定結果を下表に示す。
- 3号炉放水路のレイノルズ数 R_e は $R_e = 10^6 \sim 10^7$ 程度であり, 通常運転時においても乱流状態であることを確認した。

(循環水ポンプ通常運転:202,600m³/hr + 補機冷却系海水ポンプ通常運転:7,800m³/hr)



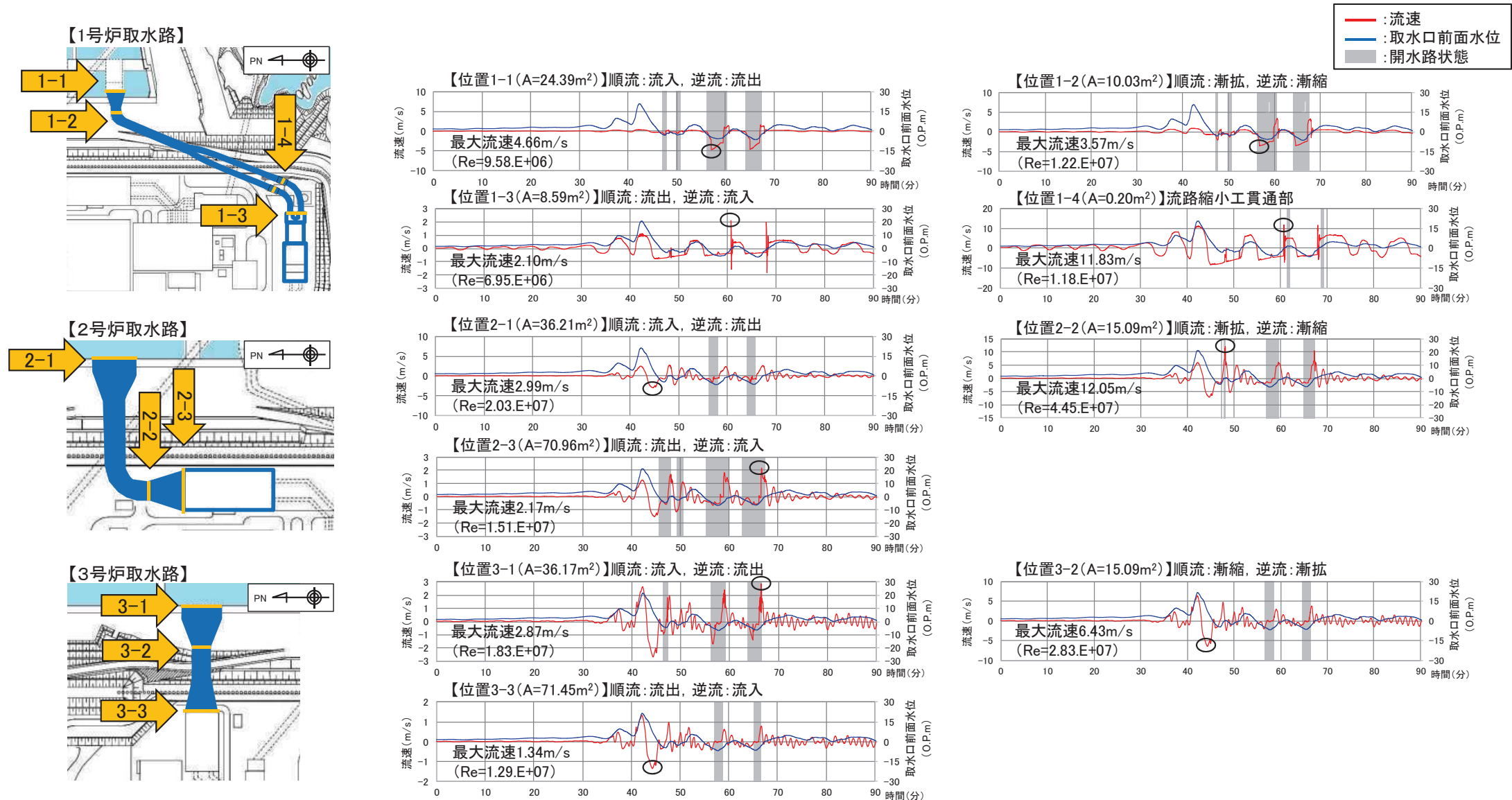
区分	位置	位置※ (m)	断面積(貝代あり) (m ²)	流速 (m/s)	レイノルズ数
3号炉 放水路	①流入/流出損失考慮位置	0.00	13.83	4.23	1.77E+07
	②屈折損失考慮位置	12.80	13.83	4.16	1.75E+07
	③屈折損失考慮位置	26.24	13.71	4.16	1.74E+07
	④曲がり損失考慮位置	27.94~47.30	13.71	4.26	1.78E+07
	⑤急拡, 屈折/急縮, 屈折 損失考慮位置	82.21	103.86	0.55	6.34E+06
	⑥急縮/急拡損失考慮位置	95.01	75.92	0.77	7.53E+06
	⑦急縮, 屈折/急拡, 屈折 損失考慮位置	128.41	25.64	2.21	1.26E+07
	⑧屈折損失考慮位置	261.58	25.80	2.27	1.30E+07
	⑨屈折損失考慮位置	350.65	25.80	2.27	1.30E+07
	⑩急拡, 屈折/急縮, 屈折 損失考慮位置	554.9	78.14	0.74	7.37E+06
	⑪流入損失考慮位置	584.75	75.96	0.77	7.56E+06

※:放水口からの位置(距離)

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 38)(6/16)

【各取放水設備における水の流れの状態について:津波時(取水路)】

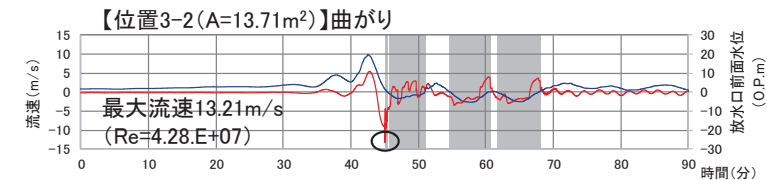
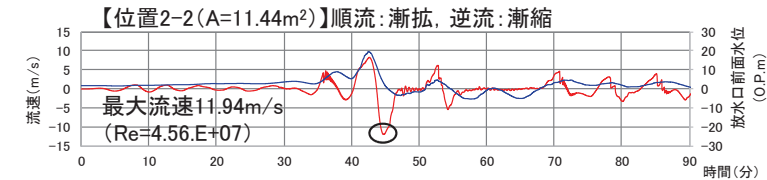
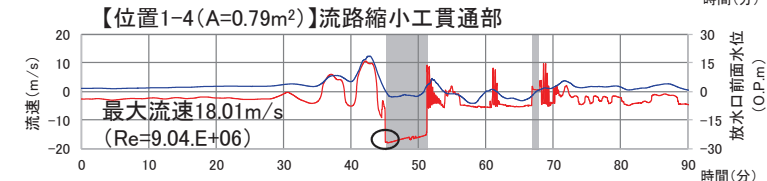
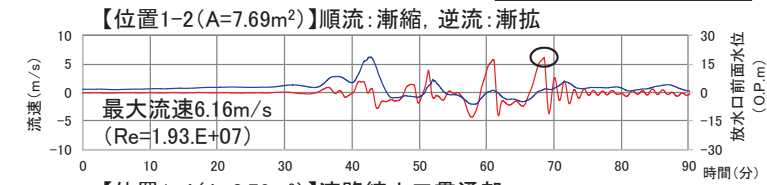
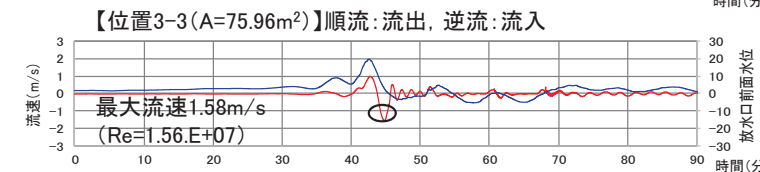
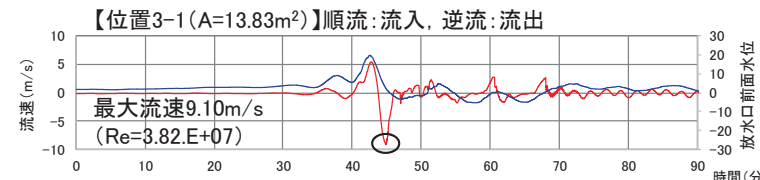
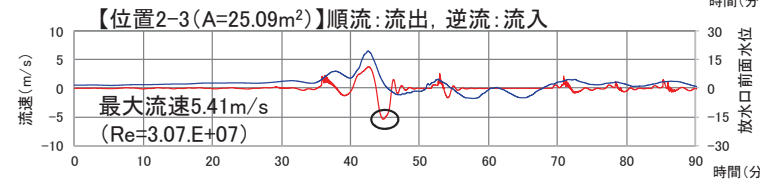
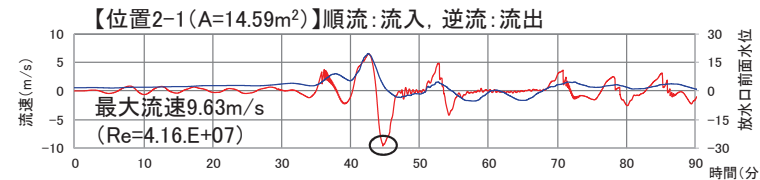
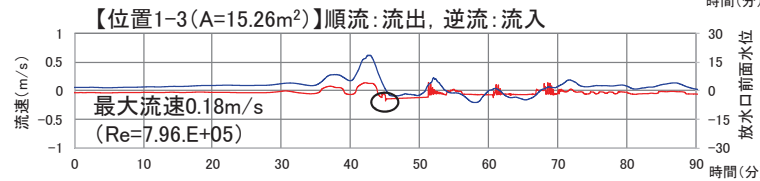
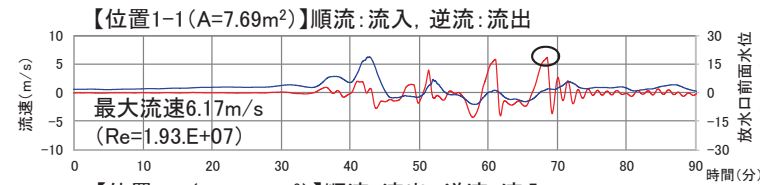
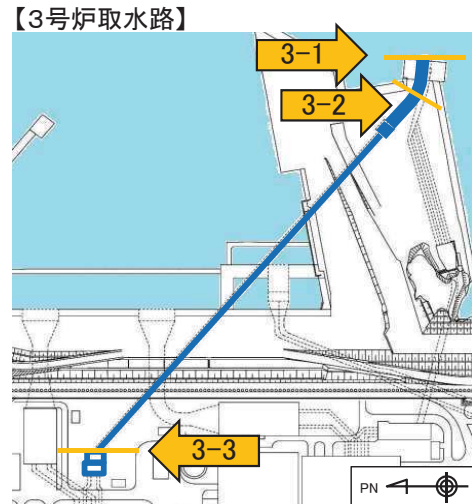
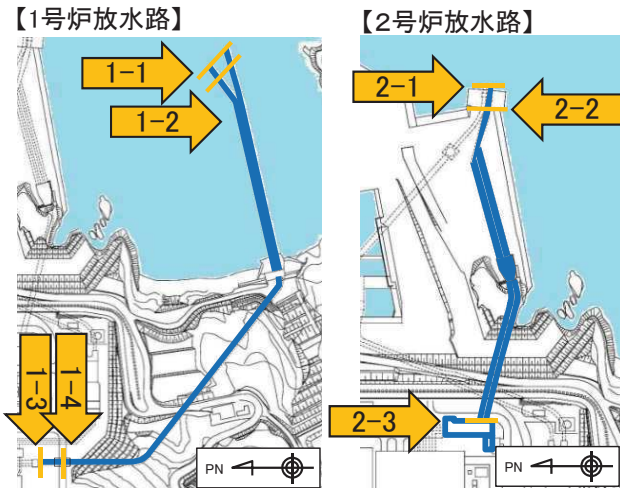
- 各取水路のうち津波の流入・流出断面及び水路内で最も流速が速い断面を代表に整理した。なお、1号炉については流路縮小工貫通部についても整理した。
- 各取水路のレイノルズ数 R_e は $R_e = 10^6 \sim 10^7$ 程度であり、津波時においても乱流状態であることを確認した。
- 最大流速は開水路状態から管路状態(又は管路状態から開水路状態)に遷移する際や水位変化が急激な場合に発生することを確認した。なお、1号炉取水路は取放水路流路縮小工の設置により海水の流出入が抑制されることから、全区間管路状態における流速は2・3号炉取水路と比較して小さい。



2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 38)(7/16)

【各取放水設備における水の流れの状態について:津波時(放水路)】

- 各放水路のうち津波の流入・流出断面及び水路内で最も流速が速い断面を代表に整理した。なお、1号炉については流路縮小工貫通部についても整理した。
- 各放水路のレイノルズ数 R_e は $R_e = 10^6 \sim 10^7$ 程度であり、津波時においても乱流状態であることを確認した。
- 最大流速は開水路状態から管路状態(又は管路状態から開水路状態)に遷移する際や水位変化が急激な場合に発生することを確認した。なお、1号炉放水路は取放水路流路縮小工の設置により海水の流出入が抑制されることから、全区間管路状態における流速は2・3号炉放水路と比較して小さい。



2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 38)(8/16)

【各取放水設備における水の流れの状態について:まとめ】

- 各取放水設備における通常運転時, 津波時のレイノルズ数(通常運転時はレイノルズ数が最低となる位置, 津波時はレイノルズ数が最大となる位置)を整理した。
- 通常運転時はレイノルズ数が $10^4 \sim 10^7$, 津波時は $10^6 \sim 10^7$ であり, 共に乱流状態であることを確認した。

【流速, レイノルズ数整理結果(通常運転時)】

	位置	流速 (m/s)	レイノルズ数	状態
1号炉取水路	流入／流出損失考慮位置	0.01	6.13E+04	乱流
	流路縮小工貫通部	0.34	3.39E+05	乱流
2号炉取水路	流出／流入損失考慮位置	0.41	3.87E+06	乱流
3号炉取水路	流出／流入損失考慮位置	0.41	3.90E+06	乱流
1号炉放水路	曲がり損失考慮位置	0.04	1.54E+05	乱流
	流路縮小工貫通部	2.69	1.35E+06	乱流
2号炉放水路	屈折損失考慮位置	2.30	1.30E+07	乱流
3号炉放水路	急拡, 屈折／急縮, 屈折損失考慮位置	0.55	6.34E+06	乱流

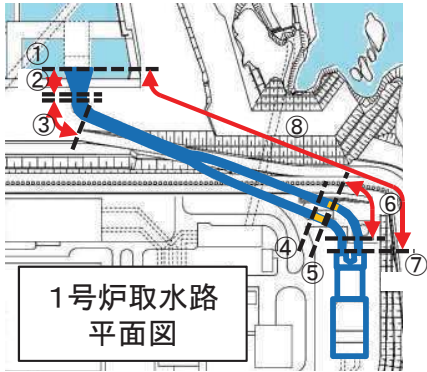
【流速, レイノルズ数整理結果(津波時)】

	位置	流速 (m/s)	レイノルズ数	状態
1号炉取水路	漸縮／漸拡損失考慮位置	3.57	1.22E+07	乱流
	流路縮小工貫通部	11.83	1.18E+07	乱流
2号炉取水路	漸拡／漸縮損失考慮位置	12.05	4.45E+07	乱流
3号炉取水路	漸縮／漸拡損失考慮位置	6.43	2.83E+07	乱流
1号炉放水路	流入／流出損失考慮位置	6.17	1.93E+07	乱流
	流路縮小工貫通部	18.01	9.04E+06	乱流
2号炉放水路	漸拡／漸縮損失考慮位置	11.94	4.56E+07	乱流
3号炉放水路	曲がり損失考慮位置	13.21	4.28E+07	乱流

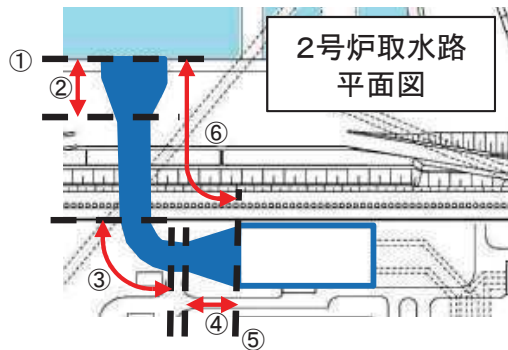
2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 38)(9/16)

【各取放水路における損失係数, 流速, レイノルズ数及び損失水頭について(1/3)】

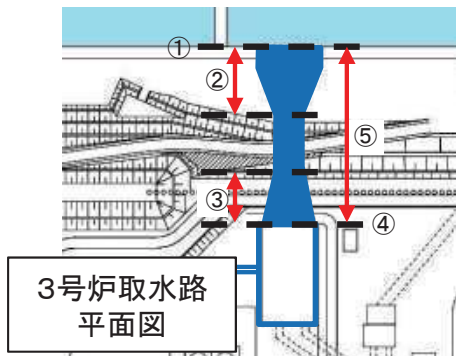
- 津波時の各海水ポンプ室水位最大ケースにおける最大流速, 最大レイノルズ数及び最大損失水頭を整理した。なお, 各損失位置における最大損失水頭の発生時刻は各々で異なっている。



区分	損失番号・名称 (順流/逆流)	位置※1 (m)	局所損失係数等 (順流/逆流)		最大流速 (m/s)	最大レイノルズ数	最大損失水頭 (m)
1号炉 取水路	①流入/流出	0.00	f_e	0.500/1.000	4.66	9.58E+06	1.11
	②漸縮/漸拡	0.00~16.00	f_{gc}	0.003/0.049	3.57	1.22E+07	0.03
	③曲がり	20.51~44.25	$f_{b1}f_{b2}$	0.143	3.42	1.22E+07	0.09
	④急縮/急拡	245.05	f_{sc}	0.489/0.825	11.83	1.18E+07	3.49
	⑤急拡/急縮	248.55	f_{se}	0.825/0.489	11.83	1.18E+07	5.89
	⑥曲がり	252.49~270.29	$f_{b1}f_{b2}$	0.160	2.12	6.99E+06	0.04
	⑦流出/流入	282.55	f_o	1.000/0.500	2.10	6.95E+06	0.23
	⑧摩擦	0.00~282.55	n	0.015	—※2	—※2	3.22



区分	損失番号・名称 (順流/逆流)	位置※1 (m)	局所損失係数等 (順流/逆流)		最大流速 (m/s)	最大レイノルズ数	最大損失水頭 (m)
2号炉 取水路	①流入/流出	0.00	f_e	0.500/1.000	2.99	2.03E+07	0.46
	②漸縮/漸拡	0.00~24.50	f_{gc}	0.002/0.048	7.18	3.15E+07	0.13
	③曲がり	73.57~112.84	$f_{b1}f_{b2}$	0.195	7.73	3.25E+07	0.59
	④漸縮/漸拡	118.19~148.19	f_{ge}	0.112/0.006	12.05	4.45E+07	0.83
	⑤流出/流入	148.19	f_o	1.000/0.500	2.17	1.51E+07	0.24
	⑥摩擦	0.00~148.19	n	0.015	—※2	—※2	1.33



区分	損失番号・名称 (順流/逆流)	位置※1 (m)	局所損失係数等 (順流/逆流)		最大流速 (m/s)	最大レイノルズ数	最大損失水頭 (m)
3号炉 取水路	①流入/流出	0.00	f_e	0.500/1.000	2.87	1.83E+07	0.37
	②漸縮/漸拡	0.00~24.50	f_{gc}	0.002/0.048	6.43	2.83E+07	0.10
	③漸縮/漸拡	58.12~88.12	f_{ge}	0.112/0.006	6.41	2.82E+07	0.23
	④流出/流入	88.12	f_o	1.000/0.500	1.35	1.29E+07	0.09
	⑤摩擦	0.00~88.12	n	0.015	—※2	—※2	0.50

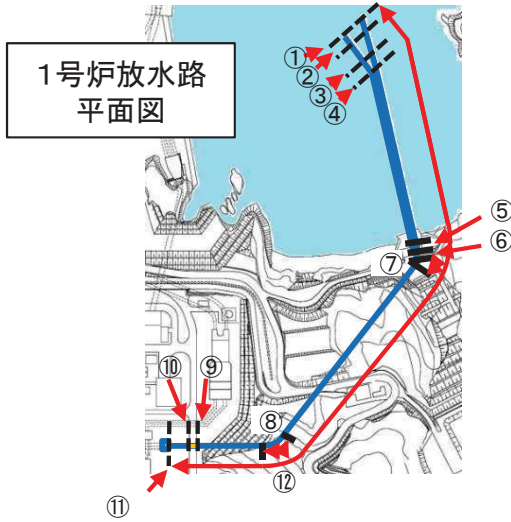
※1 取水口からの位置(距離)

※2 水路内の全計算格子で算出されることから「—」としている。

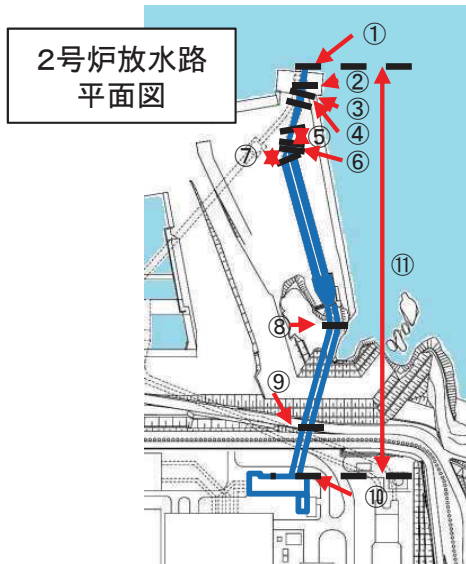
2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 38)(10/16)

【各取放水路における損失係数, 流速, レイノルズ数及び損失水頭について(2/3)】

- 津波時の1~2号炉放水立坑水位最大ケースにおける最大流速, 最大レイノルズ数及び最大損失水頭を整理した。なお, 各損失位置における最大損失水頭の発生時刻は各々で異なっている。



区分	損失番号・名称 (順流/逆流)	位置*1 (m)	局所損失係数等 (順流/逆流)		最大流速 (m/s)	最大レイノルズ数	最大損失水頭 (m)
1号炉 放水路	①流入/流出	0.00	f_o	0.500/0.100	6.17	1.93E+07	0.97
	②漸拡/漸縮	3.00~6.00	f_{gc}	0.030/0.002	6.16	1.93E+07	0.06
	③屈折	26.00	f_{be}	0.051	3.78	1.51E+07	0.04
	④屈折	32.00	f_{be}	0.070	3.76	1.50E+07	0.05
	⑤漸拡/漸縮	267.37~271.67	f_{gc}	0.049/0.006	3.84	1.50E+07	0.04
	⑥漸縮/漸拡	271.67~277.97	f_{ge}	0.043/0.336	3.03	1.33E+07	0.09
	⑦曲がり	279.43~290.13	$f_{b1}f_{b2}$	0.102	3.03	1.33E+07	0.05
	⑧曲がり	508.24~599.00	$f_{b1}f_{b2}$	0.100	3.19	1.28E+07	0.05
	⑨急縮/急拡	646.36	f_{se}	0.499/0.974	18.01	9.04E+06	16.12
	⑩急拡/急縮	651.36	f_{sc}	0.974/0.499	18.01	9.04E+06	8.26
	⑪流出/流入	679.00	F_e	1.000/0.500	0.18	7.96E+05	0.001
	⑫摩擦	0.00~679.00	n	0.018	—※2	—※2	9.32



区分	損失番号・名称 (順流/逆流)	位置*1 (m)	局所損失係数等 (順流/逆流)		最大流速 (m/s)	最大レイノルズ数	最大損失水頭 (m)
2号炉 放水路	①流入/流出	0.00	f_o	0.500/1.000	9.63	4.16E+07	4.73
	②屈折	15.50	f_{be}	0.006	9.59	4.14E+07	0.03
	③屈折	24.00	f_{be}	0.012	9.67	4.17E+07	0.06
	④漸拡/漸縮	28.50~39.00	f_{gc}	0.062/0.004	11.94	4.56E+07	0.22
	⑤曲がり	55.10~64.67	$f_{b1}f_{b2}$	0.102	5.48	3.09E+07	0.16
	⑥漸縮/漸拡	59.88~85.79	f_{gc}	0.022/0.000	5.65	3.14E+07	0.04
	⑦曲がり	81.07~90.51	$f_{b1}f_{b2}$	0.108	5.65	3.14E+07	0.18
	⑧曲がり	236.93~256.38	$f_{b1}f_{b2}$	0.091	5.51	3.10E+07	0.14
	⑨屈折	354.72	f_{be}	0.006	5.41	3.07E+07	0.01
	⑩流出/流入	398.72	f_e	1.000/0.500	5.41	3.07E+07	0.75
	⑪摩擦	0.00~398.72	n	0.018	—※2	—※2	4.39

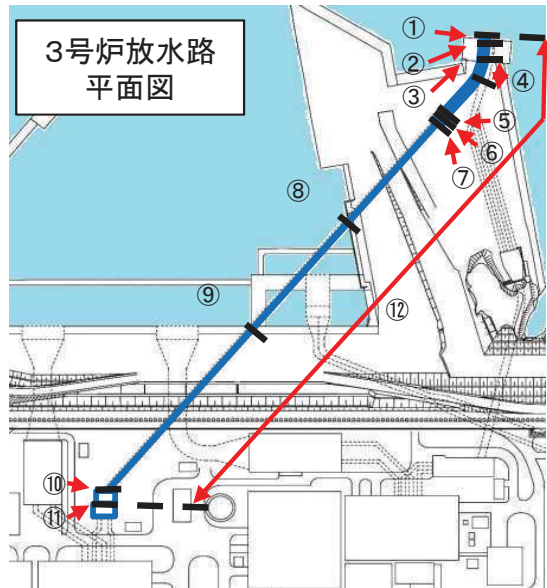
※1 放水口からの位置(距離)

※2 水路内の全計算格子で算出されることから「—」としている。

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 38)(11/16)

【各取放水路における損失係数, 流速, レイノルズ数及び損失水頭について(3/3)】

- 津波時の3号炉放水立坑水位最大ケースにおける最大流速, 最大レイノルズ数及び最大損失水頭を整理した。なお, 各損失位置における最大損失水頭の発生時刻は各々で異なっている。



区分	損失番号・名称 (順流/逆流)	位置※1 (m)	局所損失係数等 (順流/逆流)		最大流速 (m/s)	最大レイノルズ数	最大損失水頭 (m)
			f_o				
3号炉 放水路	①流入/流出	0.00	f_o	0.500/1.000	9.10	3.82E+07	4.22
	②屈折	12.80	f_{be}	0.183	8.80	3.70E+07	0.72
	③屈折	26.24	f_{be}	0.183	10.88	3.92E+07	1.10
	④曲がり	27.94~47.30	$f_{b1}f_{b2}$	0.082	13.21	4.28E+07	0.73
	⑤急拡, 屈折/ 急縮, 屈折	82.21	f_{sc}, f_{be}	1.823/1.473	1.92	1.32E+07	0.34
	⑥急縮/急拡	95.01	f_{se}	0.309/0.291	1.61	1.59E+07	0.04
	⑦急縮, 屈折/ 急拡, 屈折	128.41	f_{se}, f_{be}	1.307/1.366	4.51	2.58E+07	1.42
	⑧屈折	261.58	f_{be}	0.001	4.74	2.73E+07	0.001
	⑨屈折	350.65	f_{be}	0.001	4.72	2.72E+07	0.001
	⑩急拡, 屈折/ 急縮, 屈折	554.9	f_{sc}, f_{be}	1.366/1.307	1.51	1.51E+07	0.15
	⑪流入	584.75	f_e	1.000/0.500	1.58	1.56E+07	0.06
	⑫摩擦	0.00~584.75	n	0.018	—※2	—※2	4.36

※1 放水口からの位置(距離)

※2 水路内の全計算格子で算出されることから「—」としている。

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 38)(12/16)

【津波時における摩擦損失及び局所損失の適用妥当性について】

- 津波を対象とした管路解析に用いる各損失係数の設定について、土木学会(2016)では、電力土木技術協会編(1995)や土木学会編(1999)等に示される局所損失係数を用いて適切にモデル化し、摩擦損失係数についてはマンニング則を適用する、としている。
- 上記を踏まえ、女川原子力発電所の管路解析においては、土木学会(1999)、電力土木技術協会(1995)、千秋信一(1967)に示される各損失係数を設定している。
- 摩擦損失係数については、取放水設備内で確認されたレイノルズ数とMoodyのダイヤグラム※1の比較から適用妥当性を確認する。
- 局所損失係数の適用妥当性については、津波を対象とした水理模型実験と解析結果を比較している文献をレビューするとともに、水力発電所(水圧鉄管)のレイノルズ数は一般に $1 \sim 5 \times 10^7$ 程度※2であり、電力土木技術協会編(1999)等に示される局所損失係数を用いて設計していることを踏まえ、津波時のレイノルズ数が水力発電所(水圧鉄管)のレイノルズ数とおおむね同程度であるかを確認する。

※1 レイノルズ数と管内表面の粗さ、摩擦損失係数の関係を示したもの。

※2 水門鉄管協会(1993):水門鉄管基準, 水圧鉄管・鉄鋼構造物編

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 38)(13/16)

【津波時における摩擦損失及び局所損失の適用妥当性について:摩擦損失の適用妥当性について】

- 管路解析に用いている摩擦損失係数について、取放水設備内で確認されたレイノルズ数 R_e とMoodyのダイアグラムの比較から、津波時における適用妥当性を確認する。なお、ここでは、最大流速が確認された1号炉放水路流路縮小工貫通部を代表例として説明する。
- 津波時の取放水設備内のレイノルズ数は $R_e = 10^5 \sim 10^7$ 程度であり、Moodyのダイアグラムの適用範囲内にあることを確認した。
- 管路解析で用いている摩擦損失係数はMoodyのダイアグラムから得られる摩擦損失係数とおおむね同程度であり、津波時においても適用することは妥当であることを確認した。
- なお、通常運転時のレイノルズ数は $R_e = 10^4 \sim 10^7$ 程度であり、津波時よりもレイノルズ数は小さくなるものの、Moodyのダイアグラムの適用範囲内であり、摩擦損失係数についてもMoodyのダイアグラムから得られる摩擦損失係数とおおむね同程度であることを確認した。

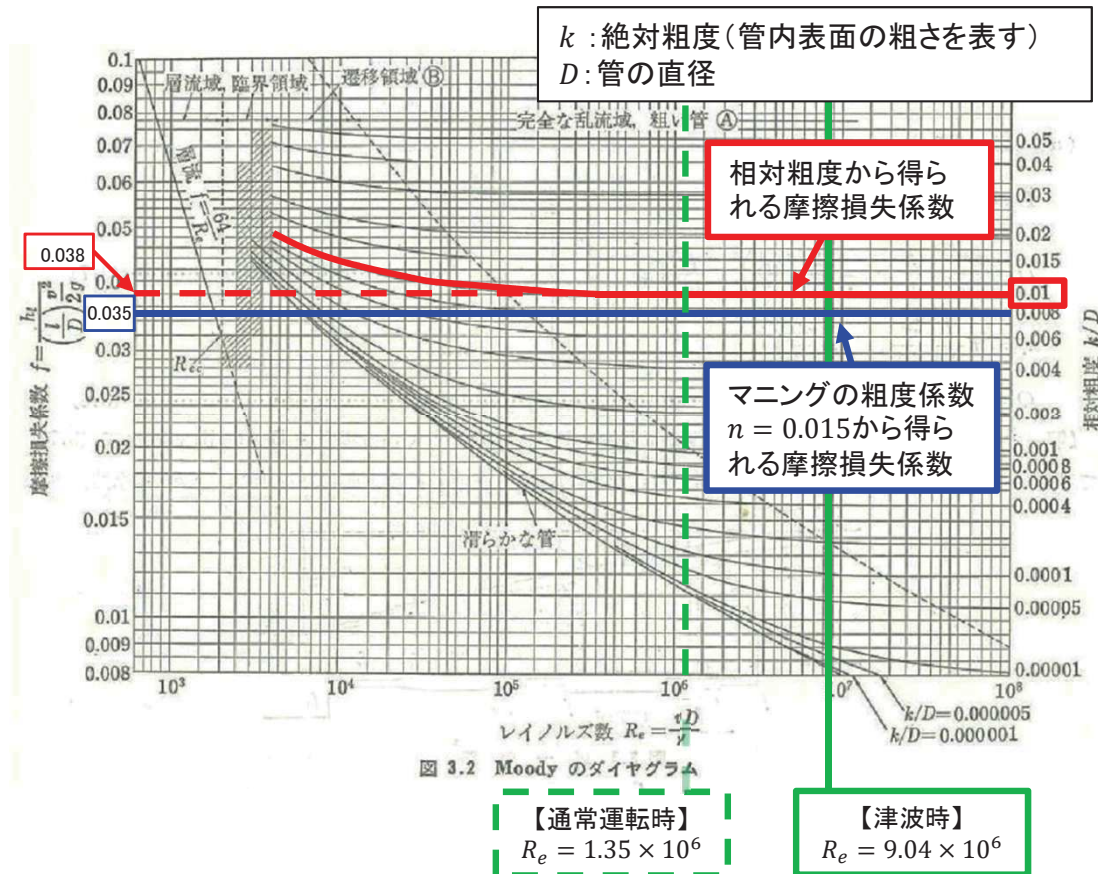
【検討内容】

1号炉放水路流路縮小工貫通部の津波時最大流速は $v = 18.01[m/s]$ 、その時のレイノルズ数は $R_e = 9.04 \times 10^6$ である。

- ① 摩擦係数 f は Manning 公式の粗度係数 n を用いて、(1)式で表される。

$$f = \frac{124.5n^2}{D^{1/3}} \dots \dots \dots (1)$$

- ② 流路縮小工貫通部の Manning の粗度係数は電力土木技術協会(1995)から $n=0.015[m^{-1/3} \cdot s]$ と設定しており、(1)式から得られる摩擦損失係数は $f=0.035$ となる。
- ③ 一方で、水路はコンクリート製であり、土木学会(1999)から $n = 0.015[m^{-1/3} \cdot s]$ の時の絶対粗度は $k = 5 \times 10^{-3}[m]$ であり、相対粗度($k/D = 0.01$)から得られる摩擦損失係数はMoodyのダイアグラムの赤実線で表現される。
- ④ 津波時の流路縮小工貫通部のレイノルズ数は $R_e = 9.04 \times 10^6$ であり、その時の摩擦損失係数はMoodyのダイアグラムから $f = 0.038$ が求められる。



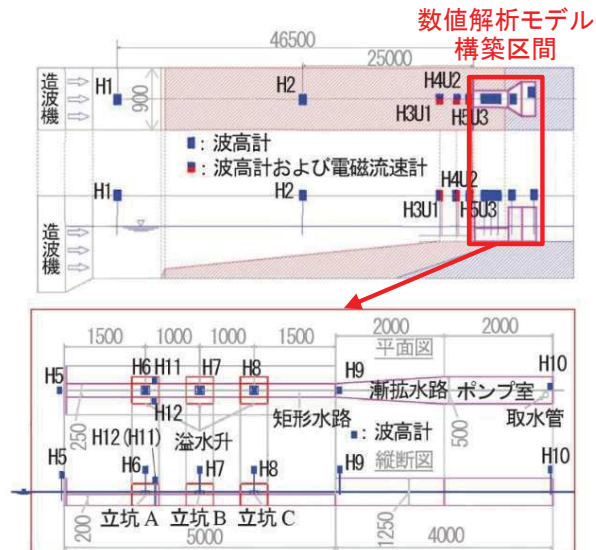
2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 38)(14/16)

【津波時における摩擦損失及び局所損失の適用妥当性について:局所損失の適用妥当性について(1/2)】

- 管路解析に用いている局所損失の津波時における適用妥当性を確認するため、佐藤ほか(2017)による津波を対象とした水理模型実験と各局所損失を考慮した一次元管路モデルによる解析結果の比較内容についてレビューを行った。
- 佐藤ほか(2017)による局所損失係数の取り扱いについて、土木学会(1999)に示される局所損失係数(流入, 流出, 漸拡, 漸縮)を用いるとともに、同一断面で異なる局所損失が発生する際は、各局所損失係数を組合せて解析を実施している(漸拡+流出, 漸縮+流入)。
- 水理模型実験結果と一次元管路モデルによる解析結果はおおむね整合しており、各取放水設備の管路解析に用いている局所損失及び局所損失の組合せを適用することは妥当であることを確認した。

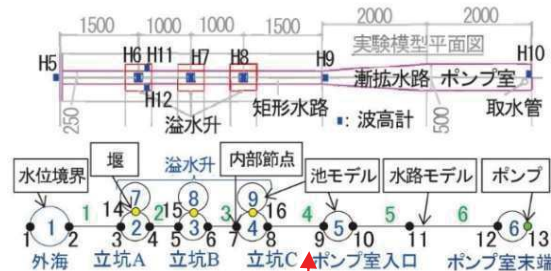
【水理模型実験の概要】

- ✓ 水路上流端に造波機を、実験水路内に取放水設備の実験模型を設置
- ✓ 取放水設備の実験模型に設けた立坑やポンプ室に波高計を設置して水位を計測。



【再現解析条件】

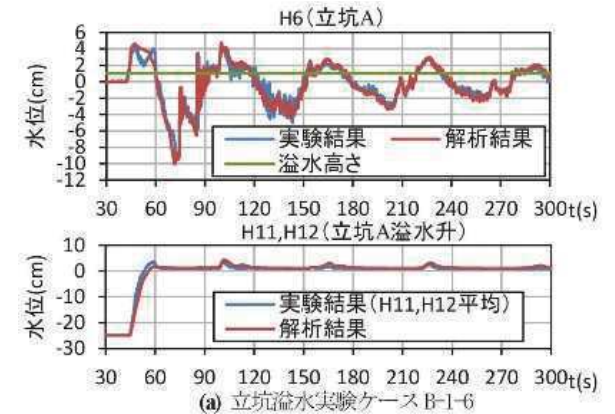
- ✓ 取放水設備区間のみ数値解析モデルを作成
- ✓ 局所損失係数 f は、水路への流入損失, 漸拡水路の漸拡損失, ポンプ室への流出損失のほか、矩形水路から取水口への流入出損失を考慮



項目	設定内容
水路分割長さ	10cm
計算時間間隔	0.01秒
境界条件	上流側: 外海を水位境界とし、実験結果の H5 水位を設定 下流側: ポンプ条件 (取水量 0.95t/s)
摩擦損失係数	マンニングの粗度係数 0.007(m ^{-1/3} s)
局所損失係数	節点 2: 順流: 0.5 (流入) 逆流: 1.0 (流出) 節点 9: 順流: 1.038 (漸拡+流出) 逆流: 0.501 (漸縮+流入)
立坑流入出損失の流量係数	0.5

佐藤ほか(2017)要約

【水理模型実験と解析結果の比較】



- 水路から立坑の流入出による損失をモデル化に含めた結果、周期10秒などの短周期側のケースにおいて各立坑の水位波形の再現性が向上した。
- 各立坑溢水量の大小関係は実験とおおむね整合している。
- 本手法でおおむね良好な再現性が得られることを確認できた。

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 38)(15/16)

【津波時における摩擦損失及び局所損失の適用妥当性について:局所損失の適用妥当性について(2/2)】

- 各取放水設備の管路解析に用いている局所損失のうち曲がり損失及び屈折損失について、津波時のレイノルズ数は $10^6 \sim 10^7$ であり、水力発電所(水圧鉄管)の一般的なレイノルズ数: $1 \sim 5 \times 10^7$ 程度と同程度であることから、電力土木技術協会編(1999)等に示される上記局所損失係数を津波時に適用することは妥当と考えられる。
- なお、上記津波時のレイノルズ数は通常運転時のレイノルズ数ともおおむね同程度※¹であることを確認した。

※1 1号炉取水路及び1号炉放水路については、通常運転時の流量(補機冷却系海水ポンプ通常運転=1,920m³/hr)が小さいため、流速及びレイノルズ数が津波時よりも小さくなるが、津波時のレイノルズ数は2号炉取水路、2号炉放水路及び3号炉放水路とおおむね同程度である。

■津波時と通常運転時のレイノルズ数の比較

【曲がり損失を考慮している断面位置での比較】

区分	損失番号	位置※ ² (m)	津波時		通常運転時		
			最大流速 (m/s)	最大レイノルズ数	流速 (m/s)	レイノルズ数	
取水路	1号炉	③	20.51~44.25	3.42	1.22E+07	0.03	9.65E+04
		⑥	252.49~270.29	2.12	6.99E+06	0.03	1.03E+05
	2号炉	③	73.57~112.84	7.73	3.25E+07	1.91	8.38E+06
放水路	1号炉	⑦	279.43~290.13	3.03	1.33E+07	0.04	1.54E+05
		⑧	508.24~599.00	3.19	1.28E+07	0.04	1.54E+05
	2号炉	⑤	55.10~64.67	5.48	3.09E+07	2.32	1.31E+07
		⑦	81.07~90.51	5.65	3.14E+07	3.34	1.56E+07
		⑧	236.93~256.38	5.51	3.10E+07	2.34	1.31E+07
	3号炉	④	27.94~47.30	13.21	4.28E+07	4.26	1.78E+07

※2 各取放水口からの位置(距離)

【屈折損失を考慮している断面位置での比較】

区分	損失番号	位置※ ² (m)	津波時		通常運転時		
			最大流速 (m/s)	最大レイノルズ数	流速 (m/s)	レイノルズ数	
放水路	1号炉	③	26.00	3.78	1.51E+07	0.04	1.71E+05
		④	32.00	3.76	1.50E+07	0.04	1.72E+05
	2号炉	②	15.50	9.59	4.14E+07	3.95	1.70E+07
		③	24.00	9.67	4.17E+07	3.95	1.70E+07
		⑨	354.72	5.41	3.07E+07	2.30	1.30E+07
	3号炉	②	12.80	8.80	3.70E+07	4.16	1.75E+07
		③	26.24	10.88	3.92E+07	4.16	1.74E+07
		⑤	82.21	1.92	1.32E+07	0.55	6.34E+06
		⑦	128.41	4.51	2.58E+07	2.21	1.26E+07
		⑧	261.58	4.74	2.73E+07	2.27	1.30E+07
⑨	350.65	4.72	2.72E+07	2.27	1.30E+07		
⑩	554.90	1.51	1.51E+07	0.74	7.37E+06		

※2 各取放水口からの位置(距離)

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 38)(16/16)

【津波時における摩擦損失及び局所損失の適用妥当性について】

■まとめ

以下の検討を実施し、管路解析に用いている摩擦損失係数及び局所損失係数の津波時における適用妥当性を確認した。

- 摩擦損失係数について、取放水設備内で確認されたレイノルズ数 R_e とMoodyのダイヤグラムの比較から、マンニング則から得られる摩擦損失係数を津波時に適用することの妥当性を確認した。
- 局所損失係数について、佐藤ほか(2017)による津波を対象とした水理模型実験と各局所損失を考慮した次元管路モデルによる計算結果の比較内容をレビューするとともに、水力発電所(水圧鉄管)のレイノルズ数と津波時のレイノルズ数の比較から、電力土木技術協会編(1999)等に示される局所損失係数を津波時に適用することの妥当性を確認した。

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 39)(1/8)

(1) 指摘事項

1号炉流路縮小工の設置に伴う構造成立性について、津波時の流速による影響を提示すること。

(2) 回答

- 津波時流速が作用した場合において、構造成立性に関する既往知見について整理するとともに、それを踏まえ流路縮小工の各部位が損傷し要求機能を喪失しうる事象(例えば、津波による作用水圧や貫通部の高流速により躯体安定性が確保できない、すりへりや負圧により損傷する)を抽出し、これらの損傷モードの発生可能性を評価する。これを踏まえ、構造成立性を示す。

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 39)(2/8)

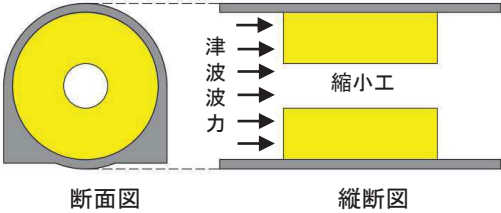
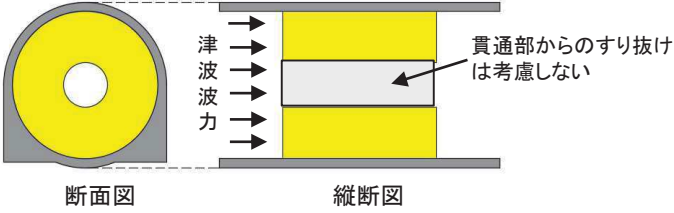
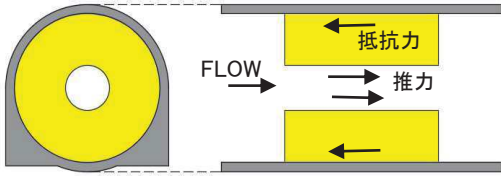
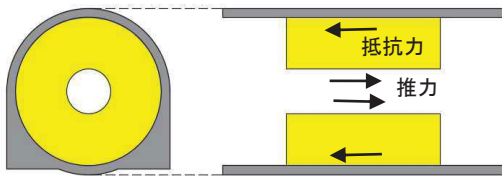
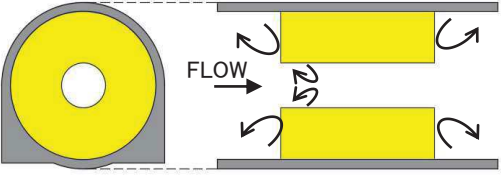
【構造成立性に関する既往知見の整理】

- ・ 流路縮小工は、補機冷却海水ポンプ流量の通水が可能な貫通部を確保しつつ、断面をコンクリートで閉塞する構造である。「土地改良事業計画設計基準 設計[ダム] 技術書[コンクリートダム編](H15.4, 農林水産省)」によれば、作用水圧に対して閉塞工がせん断破壊、滑動、円板としての曲げに対する安定性の観点から、必要閉塞工長を設定することとされている。また、同様に「多目的ダムの建設—平成17年版 第6巻 施工編((財)ダム技術センター)」では、作用水圧に対して確実な止水を行うため、プラグ※そのものが水圧によって破壊しないこと、プラグが抜けないことが求められるとしている。
※ プラグとは、水路トンネルを閉塞するコンクリートのことである。
- ・ 津波時には、流路縮小工貫通部を高流速の津波が通過する。「水門鉄管技術基準(水圧鉄管・鉄鋼構造物編)平成29年版((社)水門鉄管協会)」によれば、水圧鉄管の固定台(アンカーブロック)の設計において、考慮すべき外力として、管の重量(管傾斜による推力)や湾曲部に作用する遠心力等に加え、管内流水の摩擦による推力が挙げられる。
- ・ 津波時には、流路縮小工貫通部を高流速の津波が通過する。「建設省河川砂防技術基準(案)同解説 設計編[I]」によれば、ダムの放水設備について、流水に接する構造物の表面は、流水による洗堀や摩耗の軽減に配慮して設計するとともに、流速が大きい場合には、流水やキャビテーションによる摩耗や浸食の対策を考える必要があり、施工上生じたコンクリート面の不整や段差がキャビテーションの原因となることも予想されるとしている。
- ・ 津波時には、流路縮小工前後及び貫通部に砂礫を含んだ海水の流れが生じる。「コンクリート診断技術[基礎編]’19 日本コンクリート工学協会」によれば、ダムや水路などの水路構造物は、流水に砂礫を含むとすりへりによる損傷が増大するとされている。
- ・ 流路縮小工は、流路断面が縮小されることから、流路縮小工前面と貫通部の間で津波流速の変化が生じる。「コンクリート診断技術[基礎編]’19 日本コンクリート工学協会」によれば、凹凸や急激な屈曲をもつコンクリート表面に沿って高速の水が流れる場合などに局所的な圧力低下が加わると、その下流は負圧となって空洞を生じ、水の流れが圧力の高いところへ移動すると水蒸気の気泡は急激に圧潰され壁面に大きな衝撃を与えて、ピッチング損傷を与えるとされている。

以上を踏まえ、流路縮小工各部位が損傷し要求機能を喪失しうる事象を抽出し、これに対する設計・施工上の配慮を整理した。

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 39)(3/8)

- 前頁を踏まえ流路縮小工全体における、各部位が損傷し要求機能を喪失しうる事象を抽出し、これに対する設計・施工上の配慮を整理した。

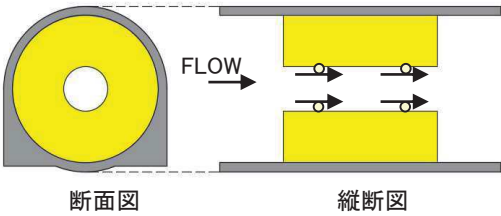
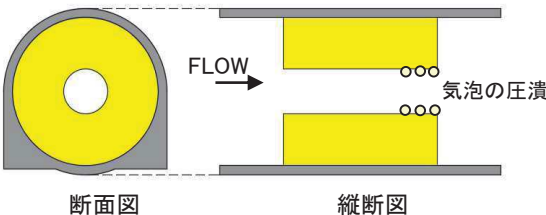
部位の名称	要求機能を喪失しうる事象	設計・施工上の配慮	照査
流路縮小工 全体	<ul style="list-style-type: none"> 津波荷重により、縮小工がせん断破壊又は滑動することで、躯体全体の安定性を失い、要求機能を喪失する。  <p>断面図 縦断図</p>	<ul style="list-style-type: none"> 津波荷重に対する躯体の安定性を評価する。なお、より保守的な評価となるように、貫通部が存在しないものとして荷重を算定する。  <p>断面図 縦断図</p>	○
	<ul style="list-style-type: none"> 貫通部における流水の摩擦により推力が生じ、躯体の安定性を失う。  <p>断面図 縦断図</p>	<ul style="list-style-type: none"> 津波時の流水の摩擦による推力を評価し、安定性が確保されているか確認する。  <p>断面図 縦断図</p>	○
	<ul style="list-style-type: none"> 急縮部・急拡部で発生する渦や流水によるすりへり(エロージョン摩耗※¹)によって、形状に変化が生じ、津波防護機能を喪失する。  <p>断面図 縦断図</p>	<ul style="list-style-type: none"> エロージョン摩耗はすりへりの一つであり、経年的にコンクリートが劣化していく現象であることに対し、津波は短期的な事象であるが、安全側に以下の配慮を行う。 すりへり現象に対しては、水セメント比の低下や細骨材を少なくすることが有効とされている※²ことから、それらを参考に、コンクリート配合設計において配慮を行う。 	—

※1 エロージョン摩耗とは、液体粒子・固体粒子あるいは液体の流れが角度をなしてコンクリートに衝突することで生じる摩耗である。

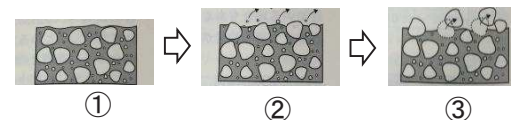
※2 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説(平成20年3月)農林水産省農村振興局整備部設計課監修、本書では、「水セメント比を小さくした $\sigma_{ck}=50\text{N/mm}^2$ 程度の富配合コンクリートで耐摩耗性、耐衝撃性とも優れている。細骨材は少なくすることによって更に効果がある」とされている。

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 39)(4/8)

- 流路縮小工貫通部における、各部位が損傷し要求機能を喪失しうる事象を抽出し、これに対する設計・施工上の配慮を整理した。

部位の名称	要求機能を喪失しうる事象	設計・施工上の配慮	照査
	<ul style="list-style-type: none"> 砂礫や貝を含んだ津波の流入により、コンクリート表面にすりへり(アブレーション摩耗※)が発生することによって、貫通部が広がり津波防護機能を喪失する。  <p style="text-align: center;">断面図 縦断面図</p>	<ul style="list-style-type: none"> アブレーション摩耗はすりへりの一つであり、経年的にコンクリートが劣化していく現象であることに対し、津波は短期的な事象であるが、安全側に以下の配慮を行う。 すりへり現象に対しては、水セメント比の低下や細骨材を少なくすることが有効とされていることから、それらを参考に、コンクリート配合設計において配慮を行う。 	—
流路縮小工貫通部	<ul style="list-style-type: none"> 急縮部に高速な津波が流れ込むことによる局所的な圧力降下によって、その下流は負圧となって空洞を生じ(キャビテーション)、圧力が高まる急拡部付近に移動すると、水蒸気の気泡は急激に圧潰され、壁面に損傷を与えることにより、形状に変化が生じ、津波防護機能を喪失する(ピッチング損傷)。  <p style="text-align: center;">断面図 縦断面図</p>	<ul style="list-style-type: none"> キャビテーションの発生の可能性について評価を行い、発生する場合はキャビテーションに配慮した設計とする。 	発生の可能性を評価

※ アブレーション摩耗とは砂等がコンクリート表面を転がったり滑ったりすることで、コンクリートを損失させる摩耗である。
すりへりの原因として砂礫等によるアブレーション摩耗が想定され三段階で進行する。
①コンクリート表面に近いモルタル層がすりへる。②モルタル層がすりへった後、粗骨材が露出し粗骨材自体がすりへる。③粗骨材が剥離する。



2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 39)(5/8)

【流路縮小工全体の構造成立性】

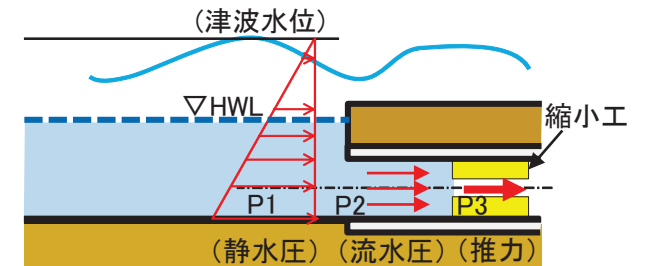
- ・ 津波時における流路縮小工全体の構造成立性について、国や地方自治体等のダムの水路閉塞において、多数の実績を有する「土地改良事業計画設計基準 設計[ダム] 技術書[コンクリートダム編](H15.4, 農林水産省)」の評価手法(次頁に示す)に基づき、評価を行った。
- ・ 同基準によれば、打設面のせん断強さからの必要閉塞長さ、滑動に対する必要閉塞長さ、周辺が固定の円板としての必要閉塞長さの3つの観点から、これを全て満足するように、必要閉塞長を算定することとされている。
- ・ 評価の結果、以下のとおり、流路縮小工は、津波時に作用する外力に対して十分な安定性を有していることを確認した。

(荷重条件)

- ・ 津波時荷重として、津波時の静水圧※¹、流水圧※²、及び流水の摩擦による推力※³を考慮する。
 - ※¹ 取放水口前面の最大津波水位から算定(取水口前面: O.P.+20.78m, 放水路前面: O.P.+20.02m)。
 - ※² 「漂流物対策施設設計ガイドライン(H26.3 沿岸技術センター・寒地港湾技術研究センター)」及び「港湾の施設の技術上の基準・同解説(日本港湾協会)」に基づく評価式(次頁に示す)により算定。津波時流速は、管路解析による流路縮小工前面及び背面の最大流速に基づき保守的に10m/sと設定(取水路2.7m/s, 放水路6.5m/s)(満管時のみを対象)。
 - ※³ 貫通部内の津波時流速によって貫通部に生じる摩擦による推力を水門鉄管技術基準(水圧鉄管・鉄鋼構造物編)平成29年版((社)水門鉄管協会)に基づく評価式(次頁に示す)により算定。津波時流速は、管路解析による流路縮小工貫通部の最大流速に基づき保守的に20m/sと設定(取水路13.0m/s, 放水路14.3m/s)(満管時のみを対象)。

(評価結果)

STEP	項目	取水路	放水路
①荷重算定※ ⁴	P1: 静水圧(津波水位)	267.9kN/m ²	265.5kN/m ²
	P2: 流水圧(縮小工全面に作用する流体力)	103.5kN/m ²	103.5kN/m ²
	P3: 推力(貫通部の流水の摩擦により生じる推力)	21.4kN/m ²	77.3kN/m ²



津波時の荷重作用イメージ※⁴

- ※⁴ p.35に示す設計・施工上の配慮のとおり、P1,P2の算定にあたっては、流路縮小工には貫通部があるが、保守的に開口が無いものとみなし、縮小工全体に荷重が作用するとして評価(P3については貫通部のみに作用)。また、縮小工の敷地側には内水がないものとして評価する。

②必要長算定	L1: 打設面のせん断強さからの必要閉塞長さ	0.66m	0.95m
	L2: 滑動に対する必要閉塞長さ	0.66m	0.95m
	L3: 周辺が固定の円板としての必要閉塞長さ	2.19m	3.26m
	(A)必要長(MAX(L1,L2,L3))	2.19m	3.26m

③判定	(B)流路縮小工の長さL	3.50m	5.00m
	(B)>(A)・・・OK	OK	OK

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 39)(6/8)

【評価式】

■必要長さの算定

「土地改良事業計画設計基準 設計[ダム] 技術書[コンクリートダム編] (H15.4, 農林水産省)」における「11.5 閉塞工の設計」に基づき下記の式により算定

L1: せん断に対する安定性から求まる必要長さ

$$L1 = \alpha \frac{P \cdot A}{\tau \cdot L_0}$$

α : 安全率 (4), P : 作用水圧(kN/m²), A : 水路断面積(m²)

L_0 : 付着面の周長 (m)

τ : コンクリート又は岩盤のせん断強さ (kN/m²)

L2: 滑動に対する安定性から求まる必要長さ

$$L2 = n \frac{P \cdot A}{CA' + fN}$$

n : せん断摩擦安全率(4), P : 作用水圧 (kN/m²)

A : 水路断面積 (m²)

C : コンクリート又は岩盤の付着力 (kN/m²)

A' : 付着面の単位長さ当たりの面積 (m²/m)

f : コンクリート又は岩盤のせん断抵抗係数(= tan ϕ)

N : コンクリート自重による単位長さ当たりの垂直荷重 (kN/m)

L3: 曲げに対する安定性から求まる必要長さ

$$L3 = \alpha \left(\frac{a}{2} \right) \sqrt{\frac{3P}{\sigma'}}$$

α : 安全率 (1.5), a : 縮小工半径 (m), P : 作用水圧 (kN/m²)

σ' : コンクリートの許容曲げ引張応力度 (kN/m²)

■流水圧の算定

「漂流物対策施設設計ガイドライン(H26.3 沿岸技術センター・寒地港湾技術研究センター)」及び「港湾の施設の技術上の基準・同解説(日本港湾協会)」に基づき下記の式により算定

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_0 A U^2$$

F_D : 流体力(kN), C_D : 抗力係数 (保守的に最大値 2.01 とする)

ρ_0 : 水の密度 (海水 1.03t/m³)

A : 流れの方向の物体の投影面積 (m²), U : 流速 (m/s)

■推力の算定

「水門鉄管技術基準(水圧鉄管・鉄鋼構造物編)平成29年版((社)水門鉄管協会)」に基づく下記の式により算定

$$P = \frac{2fQ^2}{g\pi D^3} L$$

P : 流水の摩擦による推力 (kN)

f : 流水の摩擦抵抗係数 (コンクリートの場合 0.3/D^{1/3})

L : 貫通部長さ (m), Q : 流量 (m³/s), D : 貫通部直径 (m)

■評価に用いる物性値

分類	せん断強度 (τ, C)	内部摩擦角 (ϕ)	許容曲げ引張応力度 (σ')
岩盤 (C_{H1} 級)	1.58N/mm ² ※1 (1,580kN/m ²)	43° ※1	—
コンクリート	3.23N/mm ² ※2 (3,230kN/m ²)	0° ※3	0.37N/mm ² ※4 (375kN/m ²)

※1 解析用物性値(狐崎部層の C_{H1} 級岩盤(砂岩, 頁岩, ひん岩)の最小値を採用)

※2 コンクリート標準示方書(ダムコンクリート編2013)の記載を参考に設定

($\tau = 1/5 \times f_{ck}' \times \gamma$, ここで $f_{ck}' = 21\text{N/mm}^2$ (既設覆工コンクリート), $\gamma = 1.3$)

※3 保守的に考慮しないこととする

※4 コンクリート標準示方書(構造性能照査編2002, 設計編2012)に基づき設定

($\sigma' = 1/7 \times f_{tk} \times 1.5$, ここで $f_{tk} = 0.23 \times f_{ck}'^{2/3} \text{N/mm}^2$)

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 39)(7/8)

【キャビテーションの知見の整理】

- 「コンクリート診断技術[基礎編]’19 日本コンクリート工学協会」では、風化・劣化現象の一つとしてキャビテーションが挙げられ、経年的に劣化していくものとされており、徐々に欠損していく現象である。
- 「Cavitation Guide for Control Valves, NUREG/CR-6031, Tullisら」によれば、キャビテーションは段階的に発達し、軽い間欠的なキャビテーションの発生領域を初生キャビテーションとしており、更に発達すると壁面等に損傷を及ぼす初生損傷キャビテーションと定義されている。
- キャビテーションの発生有無は右式により算定されるキャビテーション係数により予測できるとされており^{※1, 2}、文献^{※3}によるとキャビテーション現象の発生限界とされる初生キャビテーション係数(σ_i)を1.8としている。

【評価方針及び保守性確保の考え方】

- キャビテーションによる影響は経年的に劣化するものとされているが、津波時においても評価を行う。
- キャビテーションの発生によって損傷が生じる可能性があるが、ここでは閾値を保守的に初生キャビテーション係数とする。
- キャビテーション係数の算定においては、キャビテーション現象発生近傍の大気圧を含む平均圧力(P_0)や飽和蒸気圧(P_v)が支配的な要因の一つであることから、これらの不確実性を考慮し、保守的に設定する。

①大気圧を含む平均圧力算定における保守性

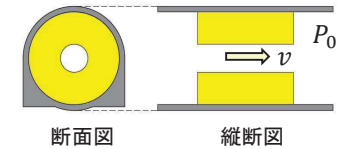
P_0 は大気圧と貫通部下端からの上流側水深の合算によって算定されることから、右図のとおり貫通部下端の標高を仮想的にO.P.±0mと高く設定することにより、相対的に水深を小さくした場合を想定し、保守的に P_0 を算定する。

②飽和蒸気圧の設定における保守性

女川海域よりも高い海水温度^{※5}として30℃(この場合の飽和蒸気圧4,250Pa)を設定する。

【キャビテーション係数の算定式】

$$\sigma = \frac{P_0 - P_v}{\frac{\rho v^2}{2}}$$



σ : キャビテーション係数

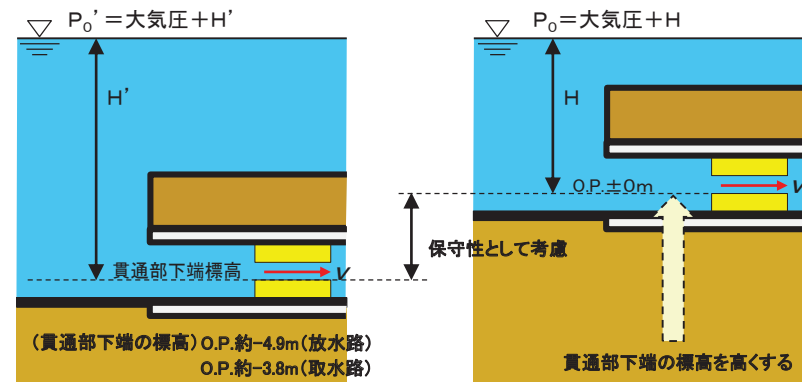
P_0 : キャビテーション現象発生近傍の大気圧を含む平均圧力(Pa)

P_v : 飽和蒸気圧(Pa), 海水温を保守的に30℃とし4,250Pa

ρ : 海水密度, v : 貫通部の流速(m/s)

1. Incipient cavitation σ_i ← 初生キャビテーション
2. Critical (or constant) cavitation σ_c ← 初生損傷キャビテーション
3. Incipient damage σ_d ← 損傷発生
4. Incipient choking σ_{ich} (or K_c)
5. Choked flow σ_{ch}
6. Maximum noise and vibration level σ_{max}

キャビテーションの発達過程(文献^{※4}による、一部加筆)



平均圧力 P_0 算定時における保守性の考え方

※1 「応用水理工学, 巻幡ら」

※2 「水理公式集[昭和60年版], 土木学会」

※3 「Hydraulics Engineering, Hunter Rouse」

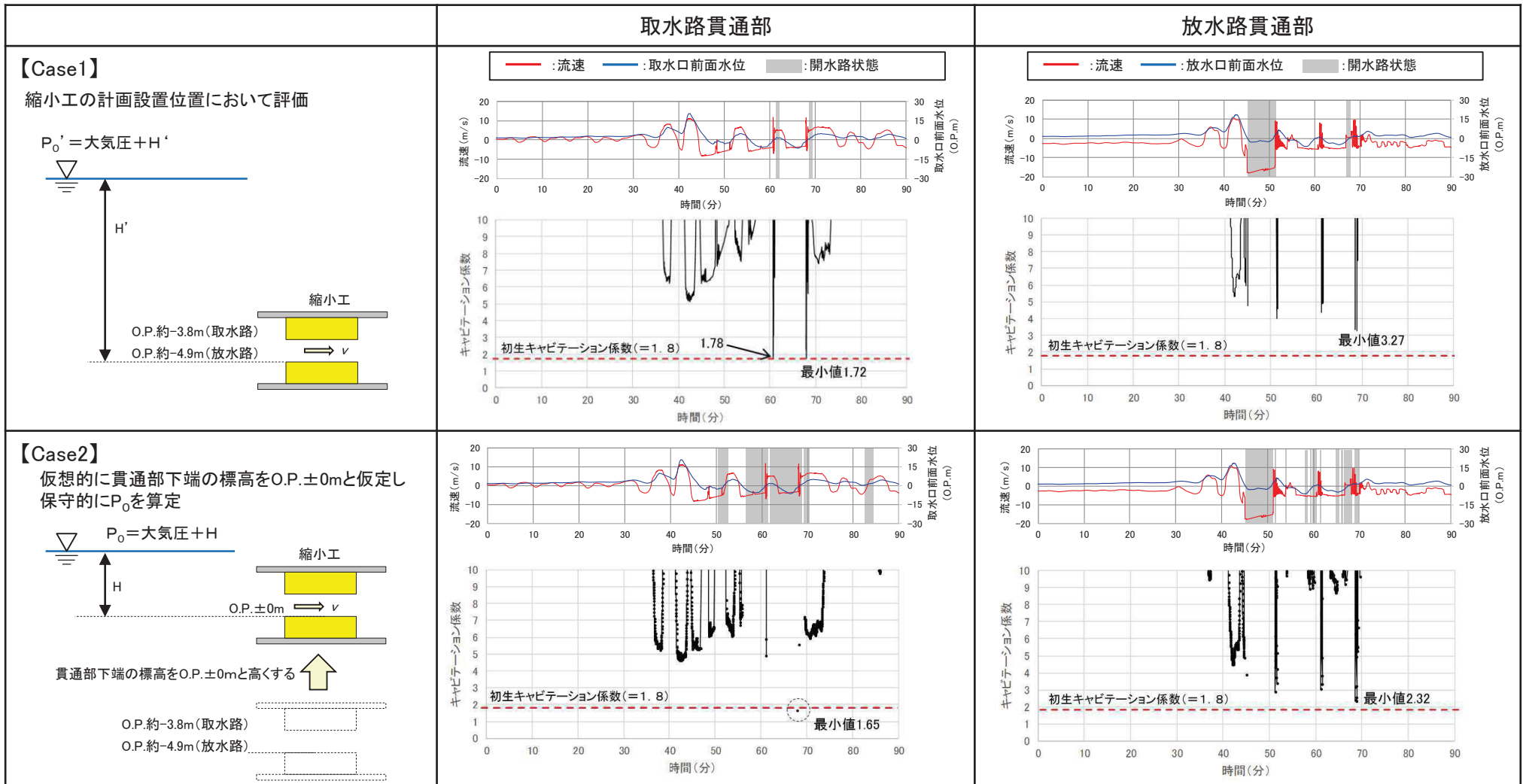
※4 「発電用設備規格 配管減肉管理に関する規格, 2016年版, (社)日本機械学会」

※5 女川3号環境影響調査書によると女川海域の海水温は最高でも22℃である。

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 39)(8/8)

【キャビテーションの発生の可能性に関する評価】

- 前述の評価方針に基づき、下表のとおりCase1は「②飽和蒸気圧の設定における保守性」を考慮し、Case2は更に「①大気圧を含む平均圧力算定における保守性」を考慮して、貫通部周辺のキャビテーション係数を評価した(満管状態となっている場合の評価)。
- この結果、Case1、2ともに取水路貫通部において初生キャビテーション係数1.8を下回るものの、継続時間は極めて短時間であることから、キャビテーションにより流路縮小工の形状に変化を生じさせるような損傷は発生しないと考えられる。なお、常時におけるキャビテーション係数は取水路・放水路ともに10以上であり、キャビテーションは発生しない。
- 以上のことから、キャビテーションにより流路縮小工の健全性に影響を及ぼさないことを確認した。



2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 40)(1/3)

(1) 指摘事項

1号炉流路縮小工の設置に伴う取放水立坑の水位評価について、貝付着等の保守的な条件を考慮しても、2号炉の安全性等への影響がないことを提示すること。

(2) 回答

- 流路縮小工の貫通部における流速等を踏まえた貝付着の可能性について考察を行った上で、保守的に貝の付着厚さを設定し、放水立坑水位を算定する。
- それを踏まえ、算定された放水立坑水位が放水立坑天端レベル以下であること等を示す。

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 40)(2/3)

【流路縮小工(放水路)における貝付着の可能性検討】

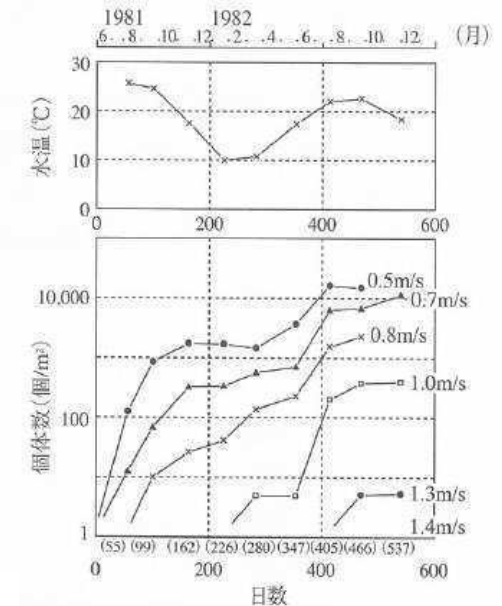
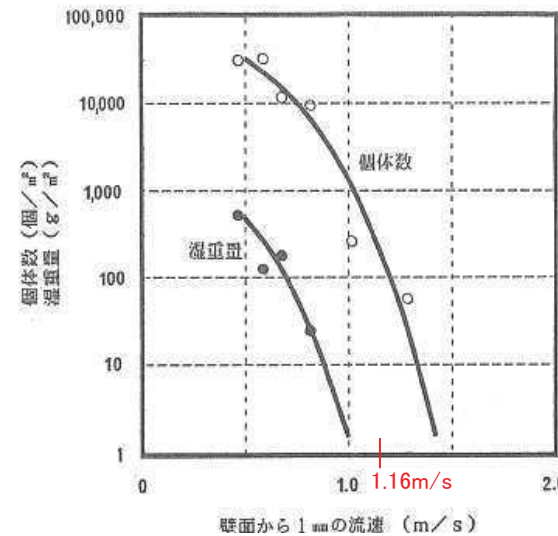
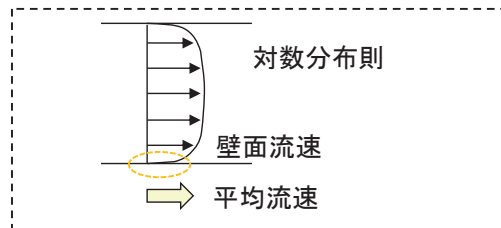
- 流路縮小工貫通部の貝付着は、プラント停止状態における放水立坑の水位評価に影響を与えることから、貫通部の流速等を踏まえた、貫通部への貝付着の可能性について検討した。

(文献調査)

- 坂口ら※は、貝等の付着に影響する流速は、壁面付近での流速であり、平均流速が同一でも管径により壁面付近の流速が異なるため、付着限界流速の検討は、壁面付近の流速を対象としなければならないとしている。
- また、「発電所海水設備の汚損対策ハンドブック(火力原子力発電協会編)」によれば、流速は貝付着の重要な要因とされている。同ハンドブックでは、実験により、管路の流速と海生生物の付着との関係を調べており、壁面流速が1.0m/s以上であれば、付着量は極めて少量で実用上はこの程度の流速でほとんど問題は生じないとされ、1.4m/sでは付着しなかったとしている。

(貝付着の可能性)

- 放水路貫通部の平均流速は2.65m/s(貫通部内径0.5m, 補機冷却海水ポンプ流量0.53m³/s)であり、対数分布則に基づけば壁面流速は1.16m/sとなる。文献によれば、壁面流速が1.16m/sの場合、付着した貝等の湿重量は1g/m²未満であることから、放水路貫通部は貝等の海生生物が付着しにくい環境であると考えられる。



生物付着と流速の関係

(発電所海水設備の汚損対策ハンドブック p156)

※ 海水管内の流速と汚損生物付着との関係, 化学工学, 47(5), 316-318

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 40)(3/3)

【放水立坑水位】

- 貫通部は貝等の汚損生物が付着しにくい環境にあるが、保守的に貝付着を考慮した場合の放水立坑水位を算定し、敷地への溢水等への影響について検討した。
- 貝付着厚さの設定にあたっては、貝付着の実績及び貝付着に関する既往文献等を踏まえ、貫通部内を一律全面的に貝付着代6cm^{※1}に設定した。この場合、貝付着が無い場合に比べ放水立坑水位は約1.8m上昇するが、放水立坑水位はO.P.+3.90mであり、放水立坑天端レベル(O.P.+14.0m)に対して十分な余裕があることを確認した。

※1 貝付着の実績として、流速が放水路貫通部よりも遅く貝が付着しやすいと考えられる1号炉取水路(流路縮小工設置前(壁面流速0.7m/s程度))では平均0.5cm~2cmである。一方、既往文献から貝が付着する限界の壁面流速は1.4m/sであり、貫通部の流速は貝付着厚さが6cmでこの流速を超える。さらに貫通部は、直線形状で延長が短いことから、流れの澁みにより局所的に貝付着が発生しにくい構造である。これらを踏まえ、保守的に貝付着厚さを6cmに設定した。

- 以上のとおり、貫通部への貝付着等の保守的な条件を考慮しても、2号炉の安全性に影響がないことを確認した。
- なお、貝等の貫通部への付着については、定期的に抜水点検やダイバ一点検等で、変状有無を定期的に確認していく。

表 貝付着代を考慮した場合の放水立坑水位

貝付着代 ^{※2}	ポンプ流量 (m ³ /s)	通水断面積 (m ²)	平均流速 (m/s)	壁面流速 (m/s)	放水立坑水位 (m)	放水立坑 天端レベル (m)	(参考) 補機ポンプ 出口レベル ^{※3} (m)
無し	0.53	0.20	2.65	1.16	O.P.+2.08	O.P.+14.0	O.P.+4.6
6cm		0.11	4.82	1.54	O.P.+3.90		

※2 貫通部内の貝付着代を示す。なお、貫通部以外の放水路内の貝付着代は取水路と同様に10cmとした。
(貫通部以外の取水路と放水路の流速は、ほぼ同等であるため取水路の貝の付着代実績(最大)に基づき設定)

※3 貝付着代6cmを考慮した場合の放水立坑水位はO.P.+3.90mであり、補機冷却海水ポンプの放水高さO.P.+4.6mを下回ることから、ポンプの排水性に影響を及ぼさない。なお、補機ポンプの出口レベルはO.P.+4.6mであるが、O.P.+12.0m程度の水位まで排水能力が確保されている。

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 41)(1/8)

(1) 指摘事項

1号炉流路縮小工について、施工方針及び常時における津波防護機能維持の確認方針を提示すること。

(2) 回答

- 流路縮小工の構築に際し、取水路は2系統ある水路を切り替えながら、また、放水路はバイパス水路を設置し、施工する計画であり、施工ステップ図及び既往の施工実績を示す。
- 常時において津波防護機能を維持していく観点から、その機能が喪失しうる事象^{※1}を踏まえた設計・施工上等の配慮^{※2}を行うとともに、機能が喪失しうる事象の進展速度が緩速であることや先行の類似構造物の維持管理事例等を踏まえ、定期的に抜水点検やダイバ一点検等により機能が維持されていることを確認することで、流路縮小工の常時の健全性を維持する方針とする。

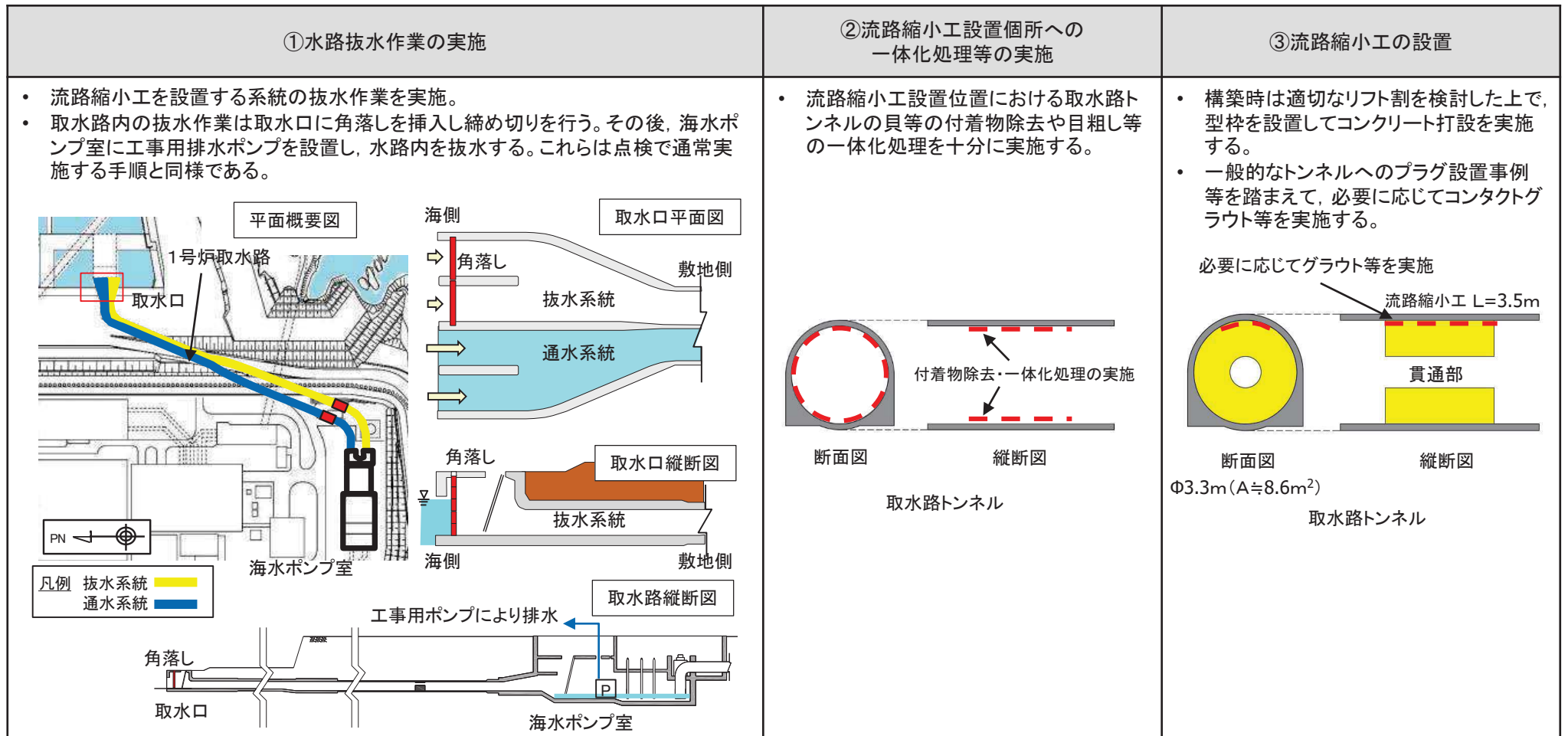
※1 機能が喪失しうる事象として、砂礫や貝を含んだ海水の流下によるコンクリート表面のすりへり、貝付着による流路の縮小、及び水路内の異物混入による流路阻害。

※2 設計・施工上等の配慮として、すりへり抵抗を増すための観点から水セメント比の低下や細骨材を少なくするなどコンクリート配合の配慮、貫通部に貝付着を防止する観点から付着しにくい流速となっていることを確認する。また、定期的な点検時に貝や異物の除去を行う。

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 41)(2/8)

(1) 流路縮小工(取水路)の施工について

- 流路縮小工は基準地震動 S_s 及び津波波圧等に十分耐えられるよう頑健で耐久性のあるコンクリート構造として計画している。
- 本構造を構築するに当たり、コンクリートの強度管理及び貫通部の寸法管理は重要であり、ドライ環境で施工を行い確実に機能確保を行うこととする。
- 1号炉取水路に設置する流路縮小工の施工フローを以下に示す。
- 工事に当たっては、2系統ある取水路を1系統ずつ断水しドライ環境の中で工事を行う※。 ※ 1系統ずつ断水することで1号炉の取水機能は維持される。
- 水路内の貝等の付着物の除去を行った後、既往の水路構造物の施工実績等を踏まえ、既設取水路表面を目粗し等の一体化処理を施す。
- 次に、温度応力によるひび割れを抑制するため適切なリフト割を検討した上で、型枠を設置しコンクリート打設を実施する。
- 施工完了後に出来形を検査し、設計上必要な寸法が確保されているか確認を行う(出来形検査)。



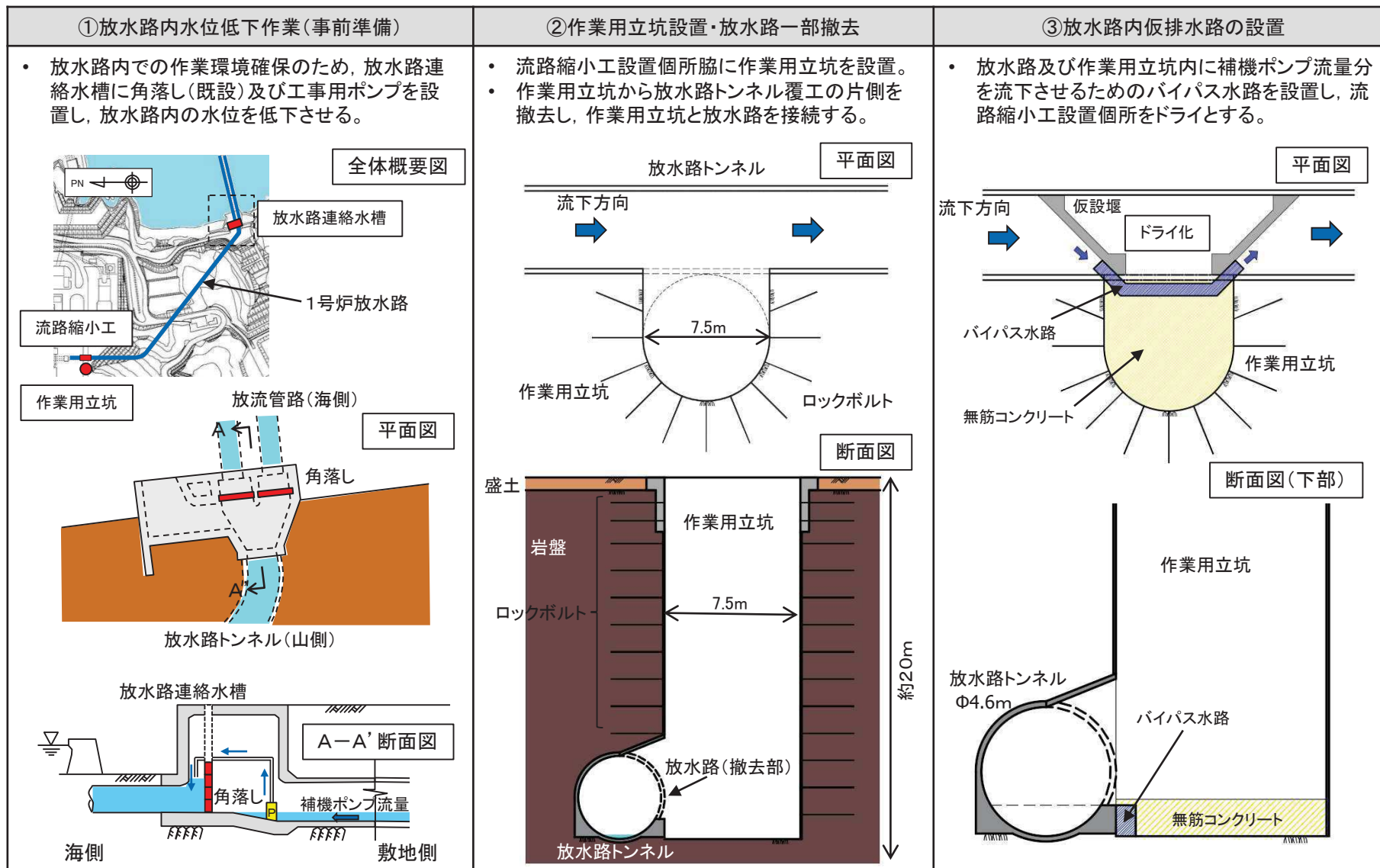
流路縮小工(取水路)の施工フロー

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 41)(3/8)

(2) 流路縮小工(放水路)の施工について(a)

- 1号炉放水路に設置する流路縮小工の施工フローを以下に示す。
- 工事に当たっては、放水路は1系統であることに鑑み、施工用の立坑を構築の上、補機放水経路をバイパスさせドライ環境の中で工事を行う※。この後の工事における留意点は取水路と同様である。

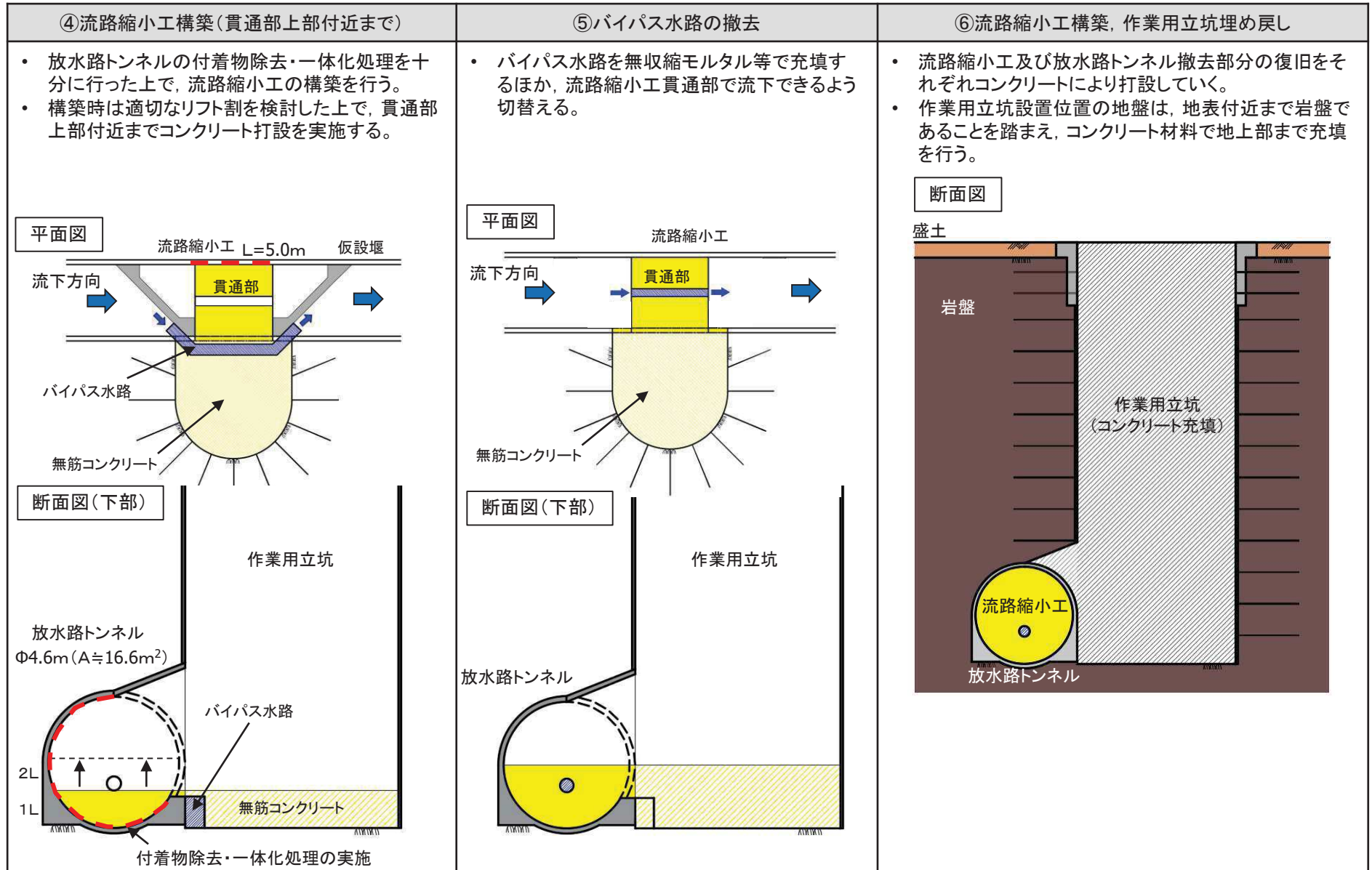
※ 放水経路をバイパスさせることで1号炉の放水機能は維持される。



流路縮小工(放水路)の施工フロー(a)

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 41)(4/8)

(2) 流路縮小工(放水路)の施工について(b)



流路縮小工(放水路)の施工フロー(b)

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 41)(5/8)

(3)水路閉塞に関する既往の施工実績について

- 水力発電所の廃止に伴い、ダムから発電所までの導水路をコンクリートプラグにて閉塞する施工実績が数多く報告※1されている。
- これは、作用水圧に対し閉塞に必要なプラグ長を確保するもので、今回の女川の例は、それと同様なもので施工面積や延長は実績の範囲内にある。
- 以下に、東北電力(株)沼沢沼発電所における水路閉塞の施工例※2を示す。
- この例では、地山の状況も踏まえ、湧水処理のためプラグ施工前に覆工背面の地山にグラウトを実施している。
- その後、水和熱によるひび割れ発生を抑制するため打設のリフト割を検討の上、コンクリートの打設を実施している。
- コンクリートプラグの施工終了後、プラグ上流側を充水し、プラグ下流から目視確認を実施したところ、漏水は認められず、コンクリートプラグが問題なく施工されたことを確認している。

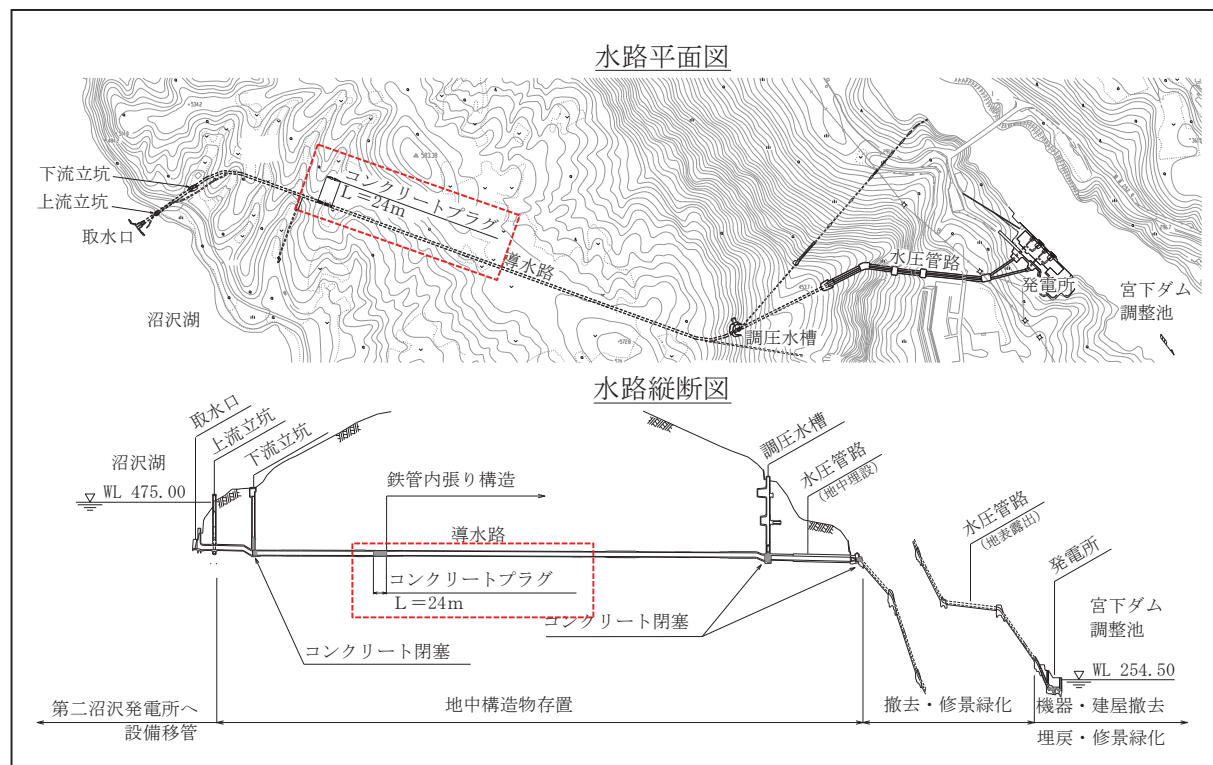


図 東北電力(株)沼沢沼発電所設備概要図

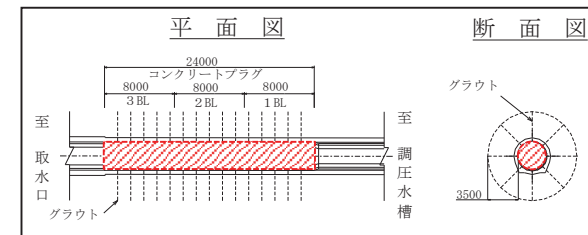


図 コンクリートプラグ概念図(φ3.2m, A≒8.0m²)



写真 施工状況写真

※1 国, 地方自治体, 電力会社において, 多数の実績が報告されている。〈土木学会図書館蔵書の施工記録等より確認(文献調査範囲においては, 竣工年=1975年~2004年, A≒10m²~70m², L≒16m~80m)〉。

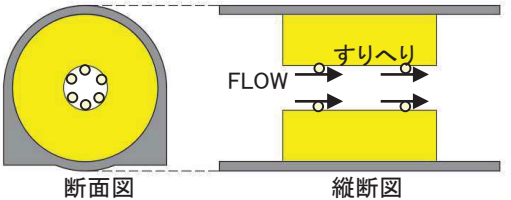
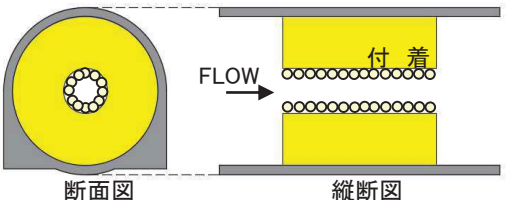
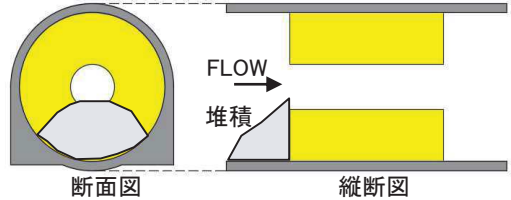
※2 電力土木(316)「沼沢沼発電所廃止に伴う土木設備撤去工事の概要」前田ほか(平成17年3月)

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 41)(6/8)

(4) 常時における津波防護機能維持の確認方針について(a)

- 流路縮小工の常時における津波防護機能維持を図っていく観点から、海水中に設置されていることや構造的な特徴に鑑み機能が喪失しうる事象を挙げ、それを踏まえた設計・施工上等の配慮及び事象の進展予想等を行った上で、機能維持の確認方針を検討した。
- 常時において機能が喪失しうる事象と、それを踏まえた設計・施工上等の配慮及び事象の進展予想を下表に示す。

表 常時において要求機能を喪失しうる事象を踏まえた設計・施工上等の配慮及び事象の進展予想

部位	要求機能を喪失しうる事象	設計・施工上等の配慮	事象の進展予想
流路縮小工貫通部	<ul style="list-style-type: none"> 港湾から供給される砂礫や海生生物(主に貝)を含んだ補機冷却水の流下により、コンクリート表面にすりへりが発生することによって、貫通部が広がり津波防護機能を喪失する。 	<ul style="list-style-type: none"> すりへり現象に対しては、水セメント比の低下や細骨材を少なくすることが有効とされている※2ことから、それらを参考に、コンクリート配合設計において配慮を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> すりへり現象は段階的に進むものであること、また、コンクリート配合の配慮から、事象の進展速度が緩速であるものと想定される。
	<ul style="list-style-type: none"> 貝が貫通部に付着し、貫通部の海水が流れにくくなる。放水側では放水立坑水位が上昇することによって溢水が発生し、2号炉の安全等に影響を与える可能性がある※1。 	<ul style="list-style-type: none"> 定期的な点検時に貝の除去を行う。 文献等を踏まえ貝が付着しない流速を参照し、貫通部に貝付着を防止する観点から付着しにくい流速となっていることを確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 貝は時間をかけて成長することから、事象の進展速度が緩速であるものと想定される。 なお、流速によっては貝が付着しない。
	<ul style="list-style-type: none"> 水路内に入った貝や異物(貝の死骸等)が貫通部前面に付着、堆積し貫通部を塞ぐことで貫通部の水が流れにくくなる。放水側では放水立坑水位が上昇することで溢水が発生し、2号炉の安全等に影響を与える可能性がある※1。 	<ul style="list-style-type: none"> 定期的な点検時に貝や異物の除去を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> 貝は時間をかけて成長し、死骸も同様に徐々に増えることから、事象の進展速度が緩速であるものと想定される。

※1 その他、1号炉の補機ポンプの排水機能に影響を与える可能性あり。

※2 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説(平成20年3月)農林水産省農村振興局整備部設計課監修、本書では、「水セメント比を小さくした $\sigma_{ck}=50N/mm^2$ 程度の富配合コンクリートで耐摩耗性、耐衝撃性とも優れている。細骨材は少なくすることによって更に効果がある」とされている。

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 41)(7/8)

(4) 常時における津波防護機能維持の確認方針について(b)

- 流路縮小工は、先に述べたとおり、頑健で耐久性のあるコンクリート構造であるとともに、施工はドライ環境で確実にでき、機能が喪失しうる事象に対しては、設計・施工上等の配慮を行った上で、事象の進展速度が緩速であることを示した。
- これを踏まえると、常時における津波防護機能維持の確認方法としては、定期的な放水点検、ダイバー点検及び水中カメラによる点検が有効と考えられる。
- 施工の段階で寸法管理が確実にできることから、点検については有意な損傷や変状に着目し実施する。

点検内容(案)

- ① 1号炉流路縮小工は取放水路内部にある海水中に設置された設備となるため、点検は定期点検時に合わせ実施する。
- ② 取水路については定期的な放水による目視点検・清掃等を実施する。放水路については定期的な放水、ダイバー及び水中カメラによる目視点検・清掃等を実施する。
- ③ 損傷や変状の状況に応じ、詳細な点検を行う。
- ④ 点検結果を踏まえ、必要に応じ点検期間の見直しを行う。

- また、今回と同様に海水中に設置されたコンクリート構造物の維持管理について、躯体が受ける劣化の機構(風化・老化のうち摩耗、生物付着)が同様と想定される川内原子力発電所の貯留堰コンクリートでは、次のように定期的な点検方法により機能が維持されていることを確認※している事例もある。

- ① 取水路内部の水中設備となるため、水中からの点検頻度は定期点検時に合わせて実施する。
- ② 点検は潜水士が水中カメラで撮影し、同時に社員が外観を目視点検(確認)する。
- ③ 点検の状況(表面の損傷やクラックなどの異常)に応じ、詳細な点検を計画実施する。
- ④ 長期点検計画は今後、保全の有効性評価を行うことで、適宜見直しを行う。

※ 川内原子力発電所1号機 工事計画に係る説明資料(平成27年3月)資料番号KO-118 改1

2. 指摘事項に対する回答(指摘事項No. 41)(8/8)

(4) 常時における津波防護機能維持の確認方針について(c)

- ・ 事象の進展影響として各構造物における水位の変動が考えられるが、すりへりと貝付着による水位変動について試算した結果を下表に示す。
- ・ 開口径が広がると津波防護機能の低下に繋がるが、保守的にすりへり量を設定した場合でも海水ポンプ室における設計値との水位差は1cmと試算され、水位による事象検出は難しいものと考えられる。
- ・ また、放水立坑における設計値との水位差は34cmであるが、事象の進展速度が緩速であることを踏まえると、水位変動も同様となり経時変化の検出が難しく、定期的な放水等による直接的な点検が維持管理には適しているものと考えられる。
- ・ なお、これまで述べてきたとおり2号炉の津波防護機能維持だけではなく、1号炉に対しても取水機能・放水機能維持の観点から検討し、すりへりや貝付着の事象進展を保守的に考慮した場合において、海水ポンプ室水位は補機冷却海水ポンプの取水可能最低水位を上回り、また、放水立坑水位は補機冷却海水ポンプの放水高さを下回ることから、すりへりや貝付着による水位変動は、1号炉の取水機能・放水機能に影響がないことを確認した。

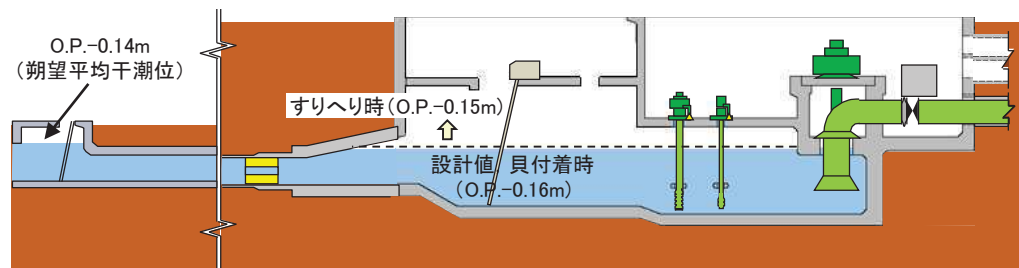
表 事象が進展した場合における海水ポンプ室及び放水立坑の水位変動(常時, ポンプ容量 $Q=0.53\text{m}^3/\text{s}$)

構造物	初期潮位	開口径(事象進展考慮)	構造物位置での水位	備考	(参考) 津波時の構造物位置での水位 ^{※3}	
海水ポンプ室	O.P.-0.14m	すりへりが5cm発生した場合 ^{※1}	Φ1.1m	O.P.-0.15m	・ 構造物水位は初期潮位と同様になる。設計値との差は1cmである。	O.P.+11.05m
		設計値	Φ1.0m	O.P.-0.16m		O.P.+10.38m
		貝が最大限(10cm)付着した場合 ^{※2}	Φ0.8m	O.P.-0.16m	・ 1号炉の取水に影響なし(1号炉補機冷却海水ポンプの取水可能最低水位であるO.P.-2.43mを上回る。なお、取水はφ0.3mまで影響がない。)	O.P.+9.00m
放水立坑	O.P.+1.43m	すりへりが5cm発生した場合 ^{※1}	Φ0.6m	O.P.+1.74m	・ 構造物における水位と設計との差は34cmである。	O.P.+13.03m
		設計値	Φ0.5m	O.P.+2.08m		O.P.+11.79m
		貝が保守的に6cm付着した場合	Φ0.38m	O.P.+3.90m	・ 溢水及び1号炉の放水に影響なし(1号炉補機冷却海水ポンプの放水高さであるO.P.+4.6mを下回る。)	O.P.+11.22m

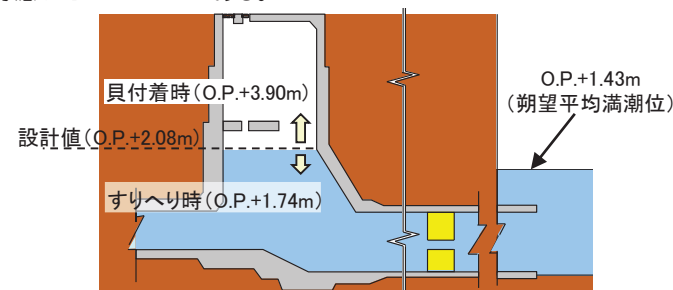
※1 保守的に最大骨材径(25mm)の2倍相当が全面的にすりへったことを想定。

※2 既往の調査結果によると取水路における貝付着量は最大でも9cm程度である。

※3 参考として示す津波時の水位算出における初期潮位は朔望平均満潮位(O.P.+1.43m)に潮位のばらつき(0.16m)を考慮したO.P.+1.59mである。



海水ポンプ室 縦断面図



放水立坑 縦断面図