

泊発電所 3 号炉 耐津波設計方針について

〔 入力津波の設定に係る指摘事項回答
及び入力津波の評価条件について 〕

令和6年1月11日
北海道電力株式会社

これまでの審査経緯と本日の説明事項

<これまでの審査経緯>

- 泊発電所3号炉の審査工程において入力津波の解析工程がクリティカルパスとなっていることから、基準津波が確定する前であるが、入力津波の解析条件・解析モデルに係る事項について優先してご説明している。
- 第1076回審査会合(令和4年9月29日)において、耐津波設計方針の概要についてのご説明の中で入力津波解析の条件についてご説明した。
- 第1098回審査会合(令和4年12月6日)において、第1076回審査会合(令和4年9月29日)における2件の指摘事項(入力津波の影響要因に関する指摘事項)に関する回答をご説明した(一部回答を含む)。
- 第1111回審査会合(令和5年2月2日)において、第1076回審査会合(令和4年9月29日)における1件の指摘事項(管路解析に関する指摘事項)に関する回答をご説明した(一部回答を含む)。
- 第1201回審査会合(令和5年10月31日)において、審査会合時点での上昇側の基準津波候補に基づき、5件の指摘事項(入力津波の影響要因及び管路解析に関する指摘事項)に関する回答をご説明した(一部回答を含む)。

<本日の説明事項>

審査会合指摘事項に対する回答

- 入力津波の設定に係る第1111回審査会合(令和5年2月2日)において頂いた1件の指摘事項及び第1201回審査会合(令和5年10月31日)において頂いた1件の指摘事項について、本資料P.4～27にて回答する(一部回答を含む)。

本日の説明事項の位置付け

基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド

泊発電所3号炉
第5条 耐津波設計方針(まとめ資料)

審査会合における
指摘事項

基準津波

I. 基準津波

II. 耐津波設計方針

3. 基本事項

3.1 敷地及び敷地周辺における地形及び施設の配置等

3.2 基準津波による敷地周辺の遡上・浸水域

3.2.1 敷地周辺の遡上・浸水域の評価

3.2.2 地震・津波による地形等の変化に係る評価

3.3 入力津波の設定

3.4 津波防護方針の審査にあたっての考慮事項(水位変動, 地殻変動)

入力津波

津波防護

泊発電所3号炉の耐津波設計方針 別添

1. 基本事項

1. 1 津波防護対象の選定

1. 2 敷地及び敷地周辺における地形及び施設の配置等

1. 3 基準津波による敷地周辺の遡上・浸水域

(1) 敷地周辺の遡上・浸水域の評価

(2) 地震・津波による地形等の変化に係る評価

1. 4 入力津波の設定

1. 5 水位変動・地殻変動の考慮

1. 6 設計又は評価に用いる入力津波

添付2 津波シミュレーションに用いる数値計算モデルについて

添付3 基準津波による敷地周辺の遡上・浸水域について

添付4 港湾内の局所的な海面の励起について

添付5 管路解析の詳細について

添付6 入力津波に用いる潮位条件について

①
指摘事項 230202-08
指摘事項 231031-01
⇒管路解析に関するご指摘

本資料でご指摘に対する回答を行う

はじめに

基準津波について

今回提出範囲

1. 入力津波の設定に係る指摘事項回答

- 1.1 審査会合における指摘事項と回答概要
- 1.2 敷地及び敷地周辺の特徴の整理
- 1.3 審査ガイド(3.2.1)の確認内容と検討結果
- 1.4 審査ガイド(3.2.2)の確認内容と検討結果
- 1.5 管路解析の解析条件・解析モデル
- 1.6 放水施設の損傷の考慮について

1.7 3号炉放水ピット流路縮小工への一次元解析適用の妥当性

P.5

1.8 損失係数設定の妥当性について

1.8.1 1号及び2号炉取水路流路縮小工の損失係数設定の妥当性について

P.21

1.8.2 取水ピット中間スラブ及び天端開口部の損失係数設定の妥当性について

2. 入力津波の評価条件について

- 2. 1. 入力津波の検討フロー(全体概要)
- 2. 2. 基準津波に基づいた検討対象の整理
- 2. 3. 入力津波の設定に当たり考慮する影響要因の検討
- 2. 4. 入力津波の設定
- 2. 5. まとめ

参考文献

追而とする項目と今後の説明予定時期

1. 入力津波の設定に係る指摘事項回答

1.1 審査会合における指摘事項と回答概要

ID	指摘事項	回答概要	回答頁
23 02 - 08	<p>令和5年2月2日審査会合</p> <p>⑧ 3号炉放水ピット流路縮小工付近等の鉛直方向の急激な断面変化部における管路解析について、当該管路解析で使用している一次元不定流解析において仮定している条件及び損失水頭算定公式の根拠となっている条件を踏まえ、解析手法の適用性及び妥当性を説明すること。</p>	<p>3号炉放水ピット流路縮小工付近等の鉛直方向の急激な断面変化部における管路解析において、当該管路解析で使用している一次元不定流解析の解析条件及び損失水頭算定公式の適用性及び妥当性について、以下の2つの項目を行い、検証する方針とする（今回は方針の説明を行い、結果は今後説明予定）。</p> <p>I. 損失係数の確認</p> <ul style="list-style-type: none"> ・三次元解析が、実現象を模擬した水理模型実験と整合しているか損失係数の比較により確認 ・実機スケールによる損失係数を算出 <p>II. 三次元解析と一次元解析の水位比較による検証</p> <ul style="list-style-type: none"> ・三次元解析と電力土木技術協会（1995）及び千秋（1967）に基づいた損失係数を適用した一次元解析における放水ピット内の水位を比較 	P.5 ~20
23 10 31 - 01	<p>令和5年10月31日審査会合</p> <p>① 以下に示す箇所に用いている損失水頭の算定方法について、当該算定方法の引用元の文献における実験又は理論の前提条件を踏まえ、適用性及び妥当性を説明すること。</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 急縮後の断面の長さが短いなど、引用文献の実験の前提条件と異なっている可能性が否定できない、オフィスのような形状をしている1号及び2号炉取水路流路縮小工。 ✓ 鉛直方向の水流であって自由水面を持つなど、引用文献の理論の前提条件と異なっている可能性が否定できない、1号及び2号並びに3号炉取水施設の取水槽の中間スラブ及び天端開口部。 	<p>以下に示す箇所に用いている損失水頭の算定方法について、当該算定方法の引用元の文献における実験又は理論の前提条件を踏まえ、適用性及び妥当性を説明する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 1号及び2号炉取水路流路縮小工について、急縮後の断面の長さも考慮した損失係数を算出した結果、急縮及び急拡による損失が支配的であり、スリーブ長さによる影響は小さく、考慮することで損失係数を大きく見込むこととなることを確認した。1号及び2号炉取水路流路縮小工の損失係数計測のために水理模型実験を実施し、実験により得られた損失係数を用いた管路解析よりも、急縮及び急拡のみの損失係数を考慮したほうが保守的な結果となることを確認する（今回は方針の説明を行い、結果は今後説明予定）。 ✓ 取水ピット内部の中間スラブ及び天端開口部の損失水頭について、鉛直方向に自由水面を有する水流が生じる構造物の損失係数に関する既往文献の実験である川崎ほか(2005)を確認し、泊発電所に適用している電力土木技術協会(1995)による急縮・急拡の損失係数と比較した結果、泊発電所に適用している電力土木技術協会(1995)が保守的な設定となったことから妥当であることを確認した。 	P.21 ~26

1. 入力津波の設定に係る指摘事項回答

1.7 3号炉放水ピット流路縮小工への一次元解析適用の妥当性 (1/8)

「1.1 審査会合における指摘事項と回答概要」の該当箇所(P.8)を再掲

ID	指摘事項	回答概要	回答頁
23 02 02 - 08	<p>令和5年2月2日審査会合</p> <p>⑧ 3号炉放水ピット流路縮小工付近等の鉛直方向の急激な断面変化部における管路解析について、当該管路解析で使用している一次元不定流解析において仮定している条件及び損失水頭算定公式の根拠となっている条件を踏まえ、解析手法の適用性及び妥当性を説明すること。</p>	<p>3号炉放水ピット流路縮小工付近等の鉛直方向の急激な断面変化部における管路解析において、当該管路解析で使用している一次元不定流解析の解析条件及び損失水頭算定公式の適用性及び妥当性について、以下の2つの項目を行い、検証する方針とする（今回は方針の説明を行い、結果は今後説明予定）。</p> <p>I. 損失係数の確認</p> <ul style="list-style-type: none"> ・三次元解析が、実現象を模擬した水理模型実験と整合しているか損失係数の比較により確認 ・実機スケールによる損失係数を算出 <p>II. 三次元解析と一次元解析の水位比較による検証</p> <ul style="list-style-type: none"> ・三次元解析と電力土木技術協会（1995）及び千秋（1967）に基づいた損失係数を適用した一次元解析における放水ピット内の水位を比較 	<p>P.5 ~20</p>

1. 入力津波の設定に係る指摘事項回答

1.7 3号炉放水ピット流路縮小工への一次元解析適用の妥当性 (1/15)

【概要】

3号炉放水ピット流路縮小工付近等の鉛直方向の急激な断面変化部における管路解析について、当該管路解析で使用している一次元不定流解析の解析条件及び損失水頭等の適用性及び妥当性を確認する。

【検討方針】

○ 3号炉放水ピット流路縮小工の管路解析で使用している一次元解析の解析条件及び損失水頭等の適用性及び妥当性については、以下の2つの項目を行い、検証する方針とする。

I. 損失係数の確認

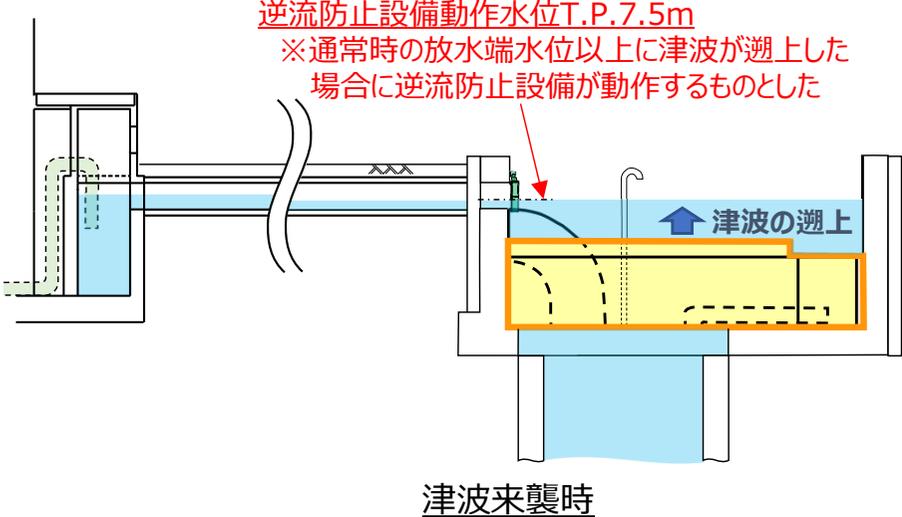
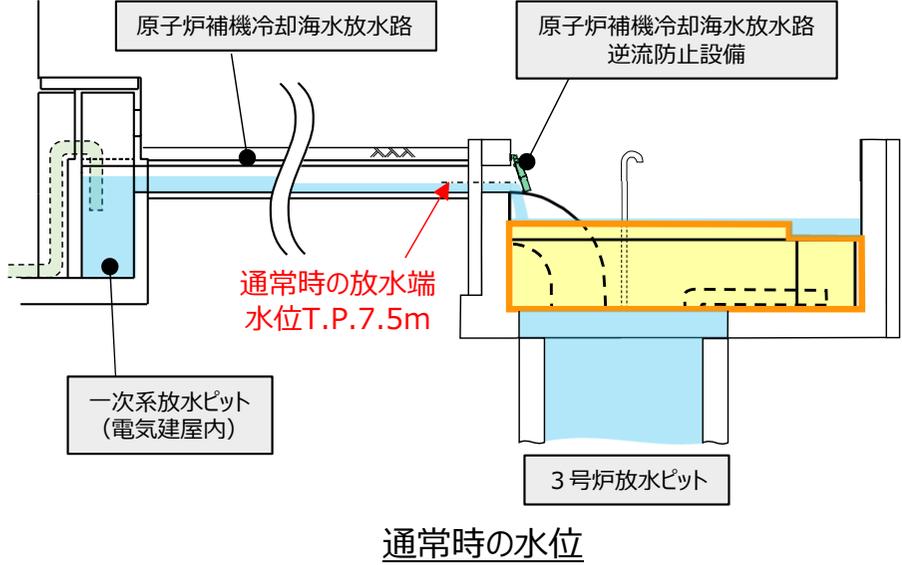
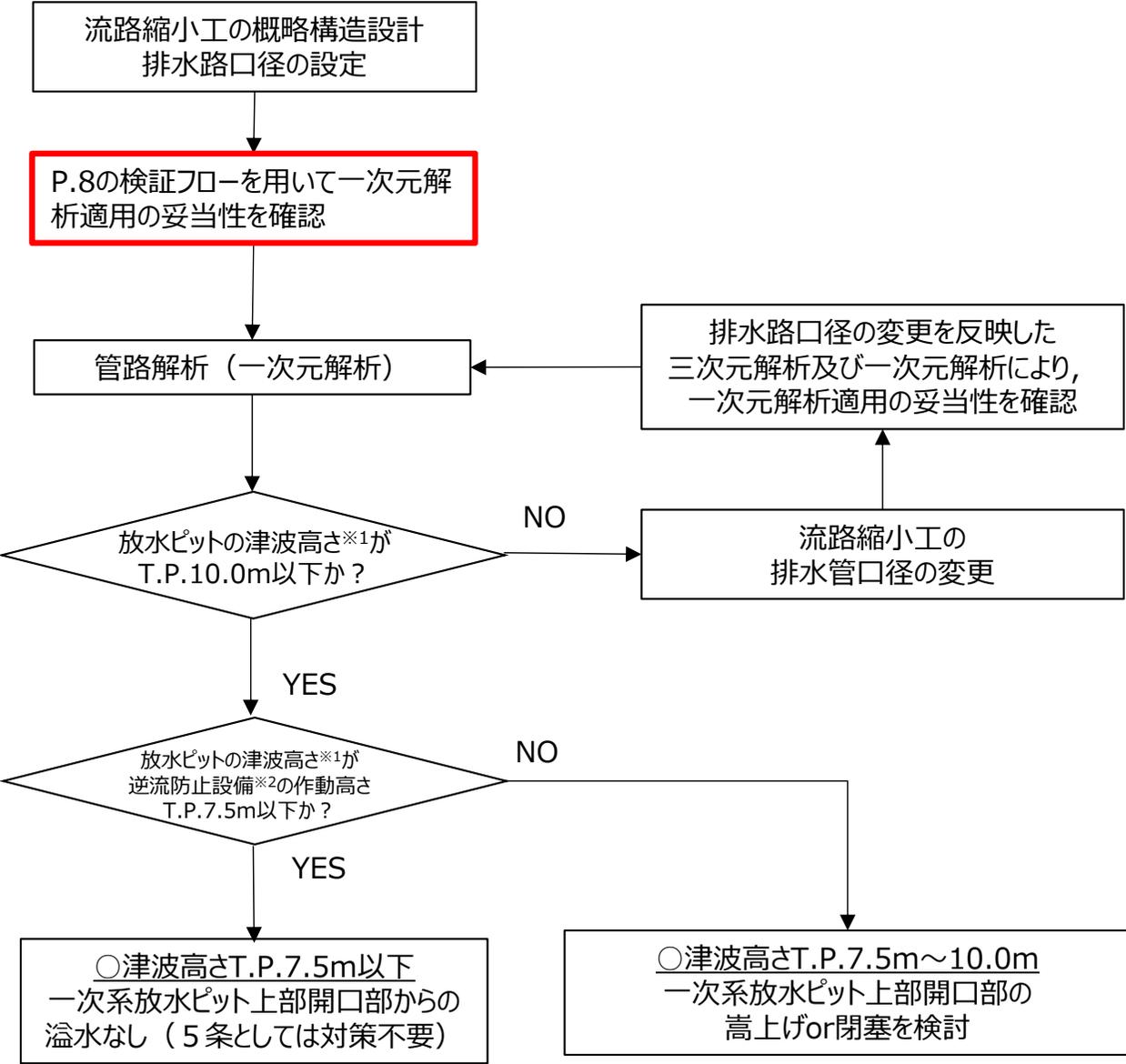
- ・三次元解析が、実現象を模擬した水理模型実験と整合しているか損失係数の比較を用いて確認
- ・実機スケールによる損失係数を算出

II. 三次元解析と一次元解析の水位比較による検証

- ・三次元解析と電力土木技術協会（1995）及び千秋（1967）に基づいた損失係数を適用した一次元解析における放水ピット内の水位を比較
- 今回は、検討方針のみを示すが、解析及び実験の結果については、設置許可段階で今後お示しする。
- なお、3号炉放水ピット流路縮小工への一次元解析適用の妥当性の検証を行った後に、次頁に示す3号炉放水ピット流路縮小工の設計評価フローを踏まえて、溢水等の評価を行っていく。

1. 入力津波の設定に係る指摘事項回答

1.7 3号炉放水ピット流路縮小工への一次元解析適用の妥当性 (2/15)



※1 「1.5 水位変動・地殻変動の考慮」で示す参照する裕度 (0.62m) を考慮した高さ
 ※2 3号炉原子炉補機冷却海水放水路逆流防止設備を示す。

【津波来襲により逆流防止設備が動作する水位について】

1. 入力津波の設定に係る指摘事項回答

1.7 3号炉放水ピット流路縮小工への一次元解析適用の妥当性 (3/15)

妥当性検証方法の概要

【妥当性検証方法の概要】

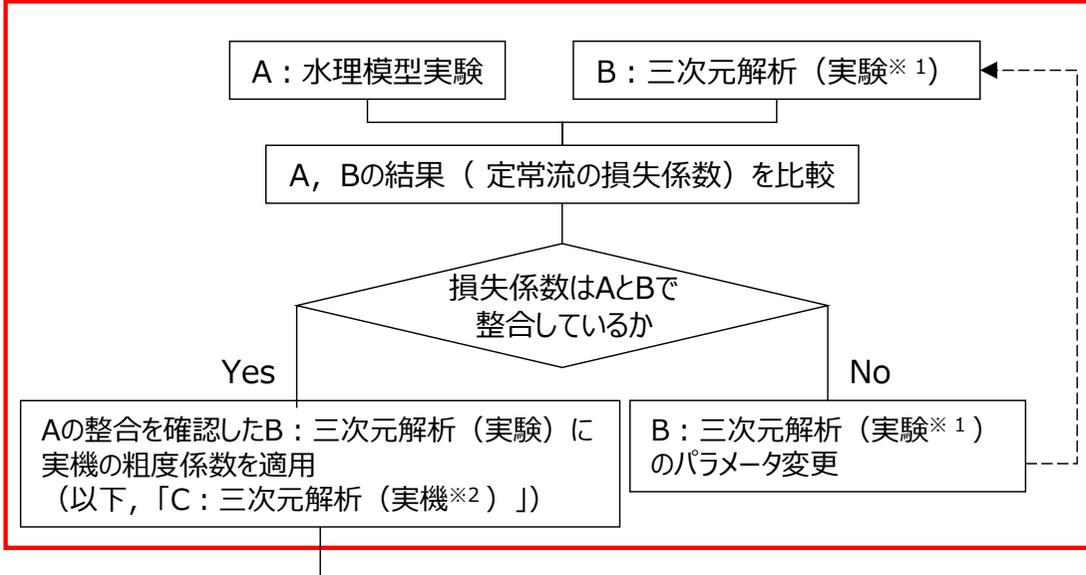
- 3号炉放水ピット流路縮小工への一次元解析適用の妥当性の検証については、水理模型実験及び三次元解析を行い、実機の粗度係数を踏まえた損失係数を算出した上で、三次元解析と電力土木技術協会（1995）及び千秋（1967）に基づいた損失係数を設定した一次元解析における放水ピット内の水位を比較する方法とする。
- 以下示す特徴を有する三次元解析及び水理模型実験を組み合わせることで、実現象を模擬した上で実機スケールの損失係数を示すことが可能となる。
 - ・水理模型実験の特徴：実現象を模擬でき、複雑な三次元構造に対する実際の流況を確認できる一方で、水位や圧力の測定位置及びスケールの大きさが制限される。
 - ・三次元解析の特徴：実機スケールで実施でき、複雑な三次元構造に対する流況を再現できる。実験では測定できない地点における水位や圧力についても算定ができる。

【検証フロー】

- 検証は、下図のとおり三次元解析（実験）と水理模型実験の比較により「Ⅰ．損失係数の確認」を行った後に、三次元解析（実機）と一次元解析（管路解析損失係数）の比較により「Ⅱ．三次元解析と一次元解析の比較水位による検証」を行う。

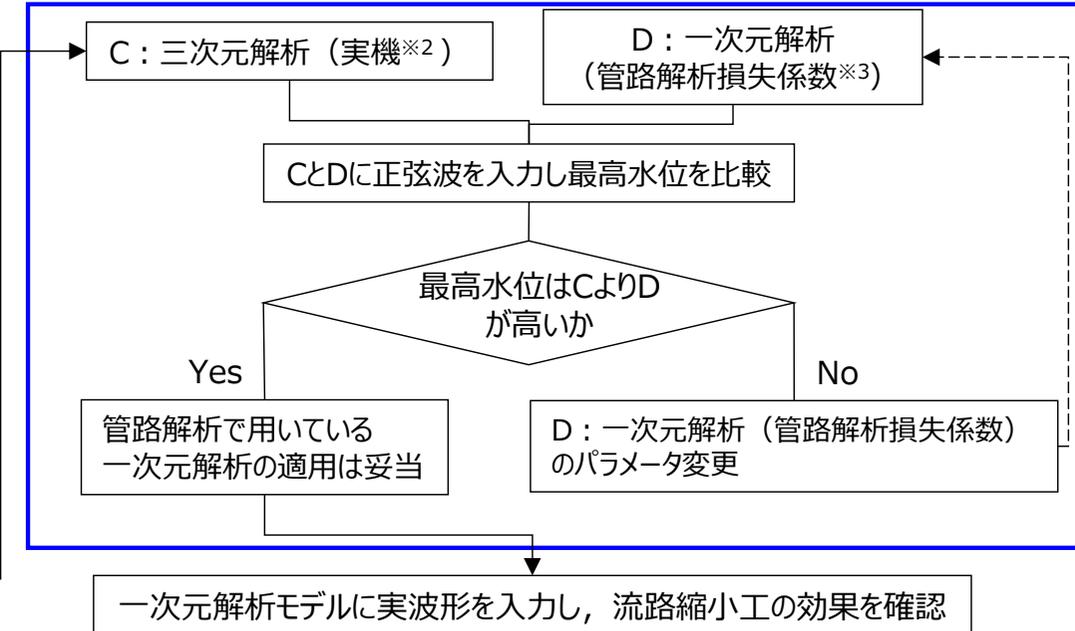
Ⅰ．損失係数の確認

（目的） ・水理模型実験と三次元解析の損失係数が整合しているか確認



Ⅱ．三次元解析と一次元解析の水位比較による検証

（目的） ・放水ピット内水位の比較により一次元解析の適用性を確認



※1：実験（アクリル相当）の粗度係数を設定

※2：実機の粗度係数を設定

※3：電力土木技術協会（1995）及び千秋（1967）により、形状損失（急縮損失，急拡損失及び屈折損失）及び摩擦損失を設定

1. 入力津波の設定に係る指摘事項回答

1.7 3号炉放水ピット流路縮小工への一次元解析適用の妥当性 (4/15)

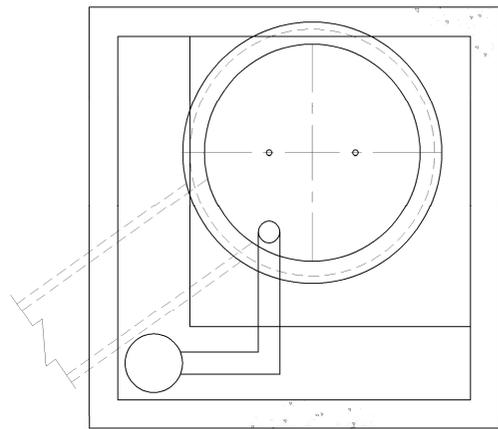
妥当性検証の対象範囲及びモデル化の考え方

【妥当性検証の対象範囲】

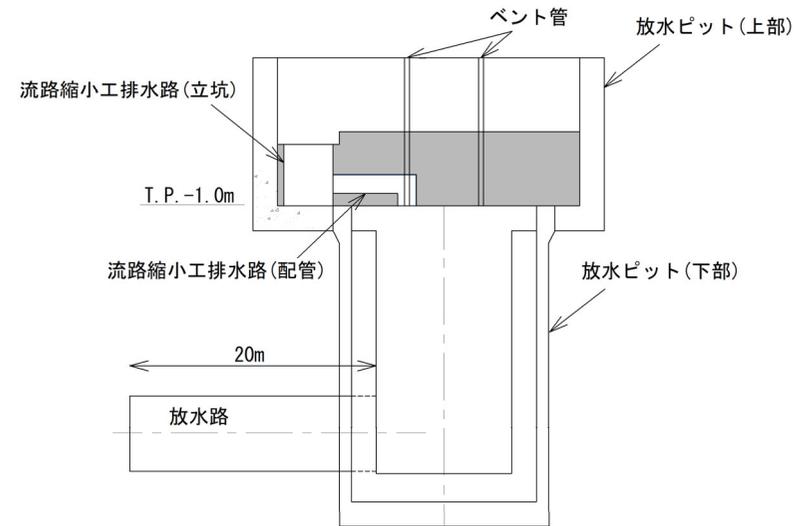
- 検証の対象範囲は、下図に示す放水路、放水ピット（上部・下部）及び流路縮小工とし、複雑な三次元構造を有する3号炉放水ピット流路縮小工周辺を対象に損失係数を確認する。

【モデル化の考え方】

- モデル化に当たっては、3号炉放水ピット流路縮小工周辺の排水路の形状は複雑な三次元構造を有しているため、実際の構造を模擬する必要があるものの、その他の放水路延長及び放水ピット（上部）高さについては、三次元解析、水理模型実験及び一次元解析が同一の条件であれば損失係数及び放水ピット内水位の結果の比較が可能となる。
- そのため、放水路から放水口については、同一断面が続き流路縮小工のような複雑な構造ではないことから放水ピット端部から20mの範囲を、放水ピット（上部）は水位上昇を測定できるように実際の放水ピット（上部）より高くなるようにモデル化した。



(平面図)



(断面図)

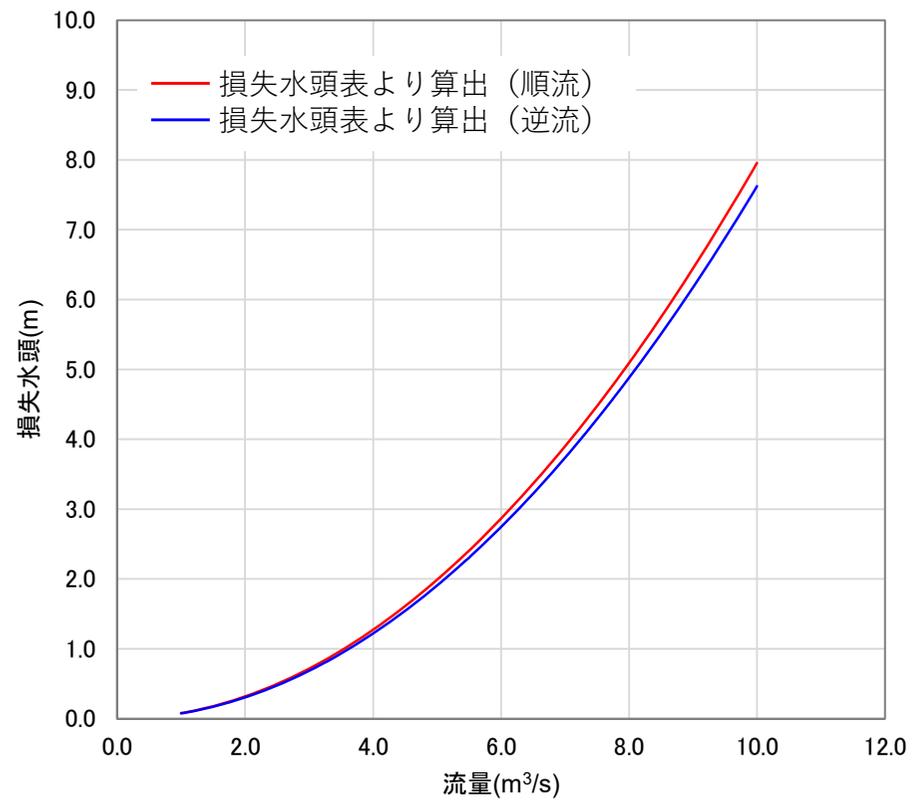
妥当性検証の対象範囲

1. 入力津波の設定に係る指摘事項回答

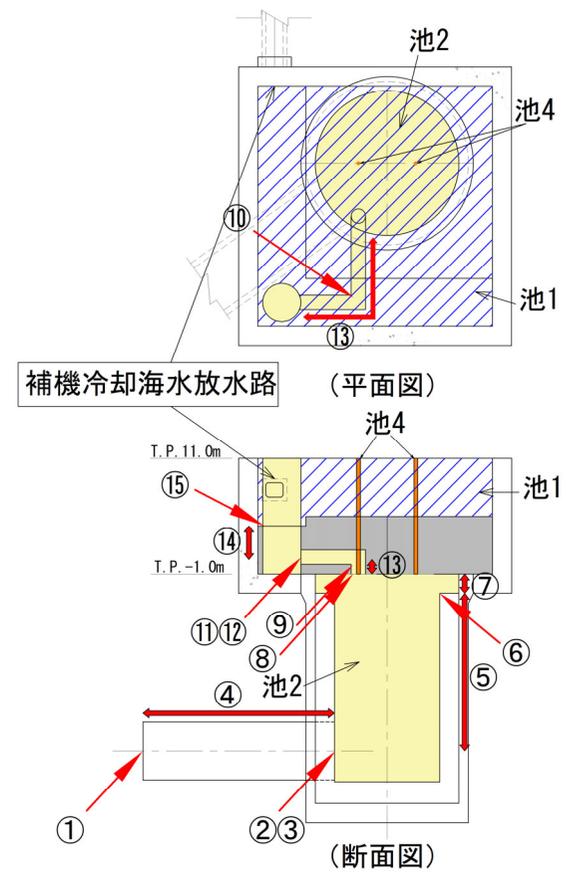
1.7 3号炉放水ピット流路縮小工への一次元解析適用の妥当性 (5/15)

I. 損失係数の確認 (1) 確認方法 (1/3)

- 【確認方法】
- 損失係数の確認については、定常流を用いて行う。
 - 定常流の解析及び実験は、放水路、放水ピット（上部・下部）及び流路縮小工で生じる損失水頭から、損失係数を算出するために行う。
 - 3号炉放水ピット流路縮小工の形状損失及び摩擦損失の発生箇所を右下図に、三次元解析と電力土木技術協会（1995）及び千秋（1967）に基づいた損失係数から算出した流量と損失水頭の関係を示す。
 - 損失水頭は、左下図のように流量により変化することから、流路縮小工を通過する流量の大小の影響も踏まえた検討を行う。
 - なお、損失水頭算定公式をP.11に、算定した結果のうち $2\text{m}^3/\text{s}$ の結果を代表としてP.12に示す。



流量と損失水頭の関係



形状損失及び摩擦損失の発生箇所

1. 入力津波の設定に係る指摘事項回答

1.7 3号炉放水ピット流路縮小工への一次元解析適用の妥当性 (6/15)

I. 損失係数の確認 (1) 確認方法 (2/3)

損失水頭算定公式

	公式	係数	根拠
流入損失	$h_e = f_e \frac{V^2}{2g}$	f_e : 流入損失係数 (管路断面による値) V : 管内流速(m/s)	土木学会(1999) p.374-375
流出損失	$h_o = f_o \frac{V^2}{2g}$	f_o : 流出損失係数 = 1.0 V : 管内流速(m/s)	土木学会(1999) p.375
摩擦損失	$h_f = n^2 \cdot V^2 \frac{L}{R^{4/3}}$	V : 平均流速(m/s) L : 水路の長さ(m) R : 水路の径深(m) n : 粗度係数(m ^{-1/3} · s)	電力土木技術協会 (1995) p.788 , 806 , 829
急拡損失	$h_{se} = f_{se} \frac{V_1^2}{2g}$ $f_{se} = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2$	f_{se} : 急拡損失係数 V_1 : 急拡前の平均流速 (m/s) A_1 : 急拡前の管断面積 (m ²) A_2 : 急拡後の管断面積 (m ²)	電力土木技術協会 (1995) p.829
急縮損失	$h_{sc} = f_{sc} \frac{V_2^2}{2g}$	f_{sc} : 急縮損失係数 (管路断面による値) V_2 : 急縮後の平均流速 (m/s)	電力土木技術協会 (1995) p.829-830

	公式	係数	根拠
漸拡損失	$h_{ge} = f_{ge} \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \frac{V_1^2}{2g}$	f_{ge} : 漸拡損失係数 (管路断面による値) A_1 : 漸拡前の管断面積(m ²) A_2 : 漸拡後の管断面積(m ²) V_1 : 漸拡前の平均流速(m/s)	電力土木技術協会 (1995) p.830
漸縮損失	$h_{gc} = f_{gc} \frac{V_2^2}{2g}$	f_{gc} : 漸縮損失係数 (管路断面積による値) V_2 : 漸縮後の平均流速(m/s)	千秋(1967) p.83-84
屈折損失	$h_{be} = f_{be} \frac{V^2}{2g}$ $f_{be} = 0.946 \sin^2 \frac{\theta}{2} + 2.05 \sin^4 \frac{\theta}{2}$	f_{be} : 屈折損失係数 V : 管内流速(m/s) θ : 屈折角(°)	千秋(1967) p.88
曲がり損失	$h_b = f_{b1} \cdot f_{b2} \frac{V^2}{2g}$ $f_{b1} = 0.131 + 0.1632 \left(\frac{D}{\rho}\right)^{7/2}$ $f_{b2} = \left(\frac{\theta}{90}\right)^{1/2}$	f_{b1} : 曲がりの曲率半径 ρ と管 径 D との比によって決まる 損失係数 (90° の場合) f_{b2} : 任意の曲がり中心角 θ の 場合の損失と中心角90° の 場合の損失との比 V : 管内平均流速(m/s) θ : 曲がり中心角(°)	千秋(1967) p.86-87
可動式スクリーン損失	$h_{ec} = f_{ec} \frac{V_0^2}{2g}$	f_{ec} : 管内オリフィスの損失係 数 V_0 : オリフィス通過流速(m/s)	電力土木技術協会 (1995) p.833

1. 入力津波の設定に係る指摘事項回答

1.7 3号炉放水ピット流路縮小工への一次元解析適用の妥当性 (7/15)

I. 損失係数の確認 (1) 確認方法 (3/3)

流量と損失水頭の関係を算出した損失水頭表 (2m³/s 順流)

場所	流量 ^{※1} (m ³ /s)	種類	係数		断面積 (m ²)	損失水頭 (m)	モデル化
放水路	2.000	①流出 ^{※2}	F	1.000	22.902	0.00039	節点4
		②急縮 ^{※2}	F	0.433	22.902	0.00017	節点3
		③屈折	F	0.986	22.902	0.00038	節点3
		④摩擦	粗度係数(m ^{-1/3} ・s)	0.019	22.902	0.00004	管路1
長さ(m)	20.000						
径深(m)	1.350						
放水ピット	2.000	⑤摩擦	粗度係数(m ^{-1/3} ・s)	0.019	95.033	0.00000	池2
			長さ(m)	16.400			
			径深(m)	2.750			
		⑥急縮 ^{※2}	F	0.254	95.033	0.00001	池2
		⑦摩擦	粗度係数(m ^{-1/3} ・s)	0.019	176.715	0.00000	池2
			長さ(m)	2.000			
	径深(m)		3.750				
	2.000	⑧急縮 ^{※2}	F	0.980	1.767	0.06406	池2
		⑨屈折	F	0.986	1.767	0.06445	池2
		⑩屈折	F	0.986	1.767	0.06445	池2
		⑪急縮 ^{※2}	F	0.468	1.767	0.03059	池2
		⑫屈折	F	0.986	1.767	0.06445	池2
⑬摩擦		粗度係数(m ^{-1/3} ・s)	0.019	1.767	0.02865	池2	
		長さ(m)	16.750				
		径深(m)	0.375				
⑭摩擦		粗度係数(m ^{-1/3} ・s)	0.019	12.566	0.00003	池2	
	長さ(m)	3.250					
	径深(m)	1.000					
⑮急縮 ^{※2}	F	0.490	12.566	0.00063	節点2		
合計						0.31830	

流量と損失水頭の関係を算出した損失水頭表 (2m³/s 逆流)

場所	流量 ^{※1} (m ³ /s)	種類	係数		断面積 (m ²)	損失水頭 (m)	モデル化
放水路	2.000	①流入 ^{※2}	F	0.500	22.902	0.00019	節点4
		②急拡 ^{※2}	F	0.576	22.902	0.00022	節点3
		③屈折	F	0.986	22.902	0.00038	節点3
		④摩擦	粗度係数(m ^{-1/3} ・s)	0.019	22.902	0.00004	管路1
長さ(m)	20.000						
径深(m)	1.350						
放水ピット	2.000	⑤摩擦	粗度係数(m ^{-1/3} ・s)	0.019	95.033	0.00000	池2
			長さ(m)	16.400			
			径深(m)	2.750			
		⑥急拡 ^{※2}	F	0.213	95.033	0.00000	池2
		⑦摩擦	粗度係数(m ^{-1/3} ・s)	0.019	176.715	0.00000	池2
			長さ(m)	2.000			
	径深(m)		3.750				
	2.000	⑧急縮 ^{※2}	F	0.500	1.767	0.03268	池2
		⑨屈折	F	0.986	1.767	0.06445	池2
		⑩屈折	F	0.986	1.767	0.06445	池2
		⑪急拡 ^{※2}	F	0.738	1.767	0.04824	池2
		⑫屈折	F	0.986	1.767	0.06445	池2
⑬摩擦		粗度係数(m ^{-1/3} ・s)	0.019	1.767	0.02865	池2	
		長さ(m)	16.750				
		径深(m)	0.375				
⑭摩擦		粗度係数(m ^{-1/3} ・s)	0.019	12.566	0.00003	池2	
	長さ(m)	3.250					
	径深(m)	1.000					
⑮急拡 ^{※2}	F	0.891	12.566	0.00115	節点2		
合計						0.30493	

※1：放水ピットから放水口へ流れる方向を順流，放水口から放水ピットへ流れる方向を逆流とし，ポンプ流量を用いて損失水頭を算出
 ※2：流入・流出損失，急拡・急縮損失は，時々刻々の流れの方向に応じた損失を考慮

1. 入力津波の設定に係る指摘事項回答

1.7 3号炉放水ピット流路縮小工への一次元解析適用の妥当性 (8/15)

I. 損失係数の確認 (2) 解析及び実験に用いる流量及び流向の条件

【定常流の流量及び流向】

- 定常流の水力模型実験及び三次元解析では、流量が変化することによる損失水頭への影響を確認するため、以下の流量・流向のケースを実施する。
 - ・ 流量については、流量が多い場合における損失水頭を確認するため、流路縮小工下端 (T.P.-1.0m) を津波が通過する際の最大流量相当である 10.0m³/sを、流量が少ない場合における損失水頭を確認するため、原子炉補機冷却海水ポンプ流量と同等の2.0m³/sを設定した。
 - ・ 流向については、実際の津波における津波の流入時及び流出時の影響を確認するため順流 (放水ピット→放水口) ・逆流 (放水口→放水ピット) を実施する。
- 以上より、定常流では、下表に示す4ケース実施する。

定常流の基本ケース

ケース	流量 (m ³ /s)	流向	備考
定常流①	2.0	順流 (放水ピット→放水口)	津波流出時流量：小
定常流②		逆流 (放水口→放水ピット)	津波流入時流量：小
定常流③	10.0	順流 (放水ピット→放水口)	津波流出時流量：大
定常流④		逆流 (放水口→放水ピット)	津波流入時流量：大

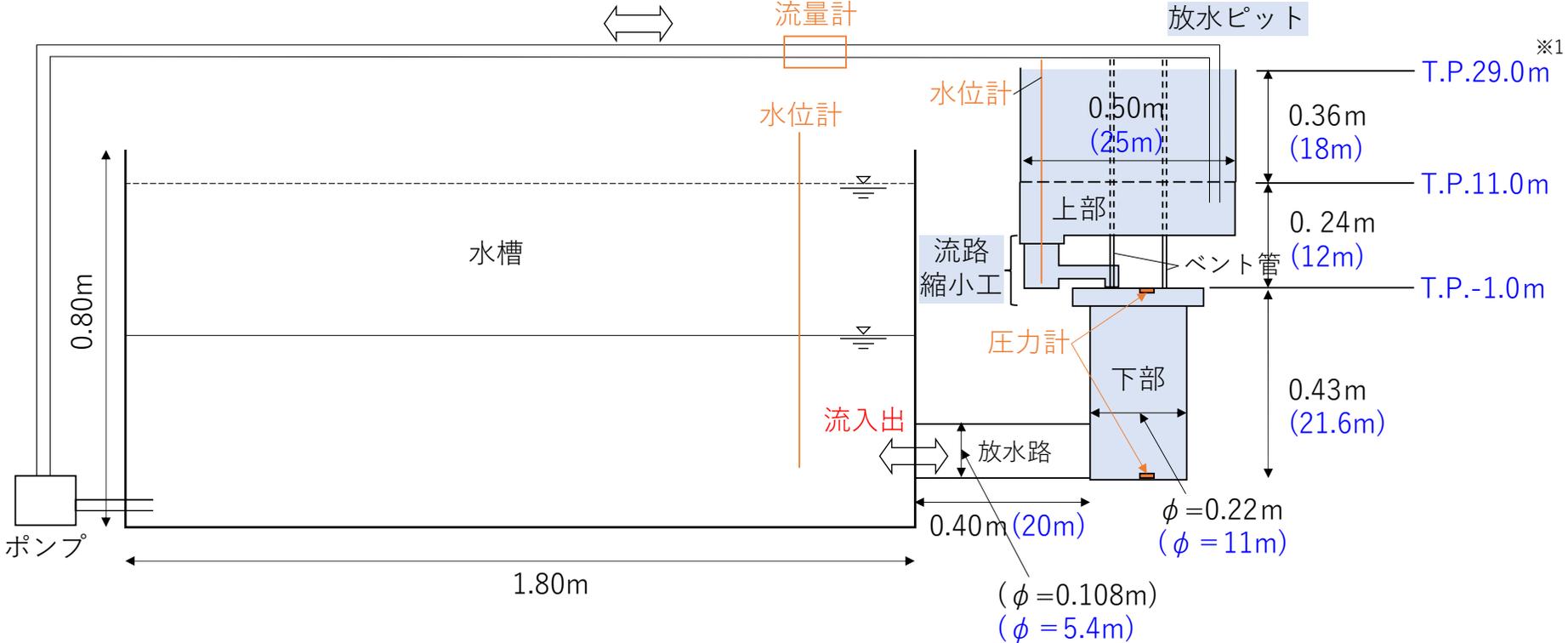
1. 入力津波の設定に係る指摘事項回答

1.7 3号炉放水ピット流路縮小工への一次元解析適用の妥当性 (9/15)

I. 損失係数の確認 (3) 水理模型実験 (1/2)

- 【目的】
- 水理模型実験は、1/50スケールの条件下において実現象を模擬し、損失係数を確認するために行う。

- 【概要】
- 損失係数は、ポンプ及び流量計を用いて流量を制御し、水槽から一定の流量の入力を行い、得られた損失水頭から算出する。
 - 水理模型実験イメージを下図に示す。
 - 水槽内の水位と放水ピット（上部）の水位を測定し全体の損失水頭を確認する。また、放水ピット（下部）の2箇所に圧力計を設置し、放水ピット（下部）における損失水頭を参考として測定する。



※1：損失水頭を確認するため放水ピット天端高さ（T.P.11.0m）より高く設定
 ※2：青字は実機寸法

水理模型実験イメージ図

1. 入力津波の設定に係る指摘事項回答

1.7 3号炉放水ピット流路縮小工への一次元解析適用の妥当性 (10/15)

I. 損失係数の確認 (3) 水理模型実験 (2/2)

【条件】

- 水理模型実験はフルード相似則を適用し、実験縮尺（幾何縮尺）を1/50とする。
- 設定した実験条件を下表に示す。
- 模型に使用する材料はアクリルとし、粗度係数は0.010（土木学会（1999）より、同等の素材である強化プラスチックの粗度係数を選定）とする。
- 水理模型実験では、三次元解析と同様、流量及び流向の影響を確認するために、下表に示す4ケースを実施する。
- 模型の再現範囲は、三次元解析と同じ範囲とする。

実機とフルード相似則により設定した実験条件

	実機	模型
流量 (m ³ /s)	2.0	0.11×10 ⁻³
	10.0	0.57×10 ⁻³
放水ピット内径 (m)	11.0	0.220
流路縮小工排水路（立坑）内径 (m)	4.0	0.080
流路縮小工排水路（配管）内径 (m)	1.5	0.030

水理模型実験の実施ケース

ケース	流量（実機） (m ³ /s)	流量（模型） (m ³ /s)	流向
定常流①	2.0	0.11×10 ⁻³	順流
定常流②			逆流
定常流③	10.0	0.57×10 ⁻³	順流
定常流④			逆流

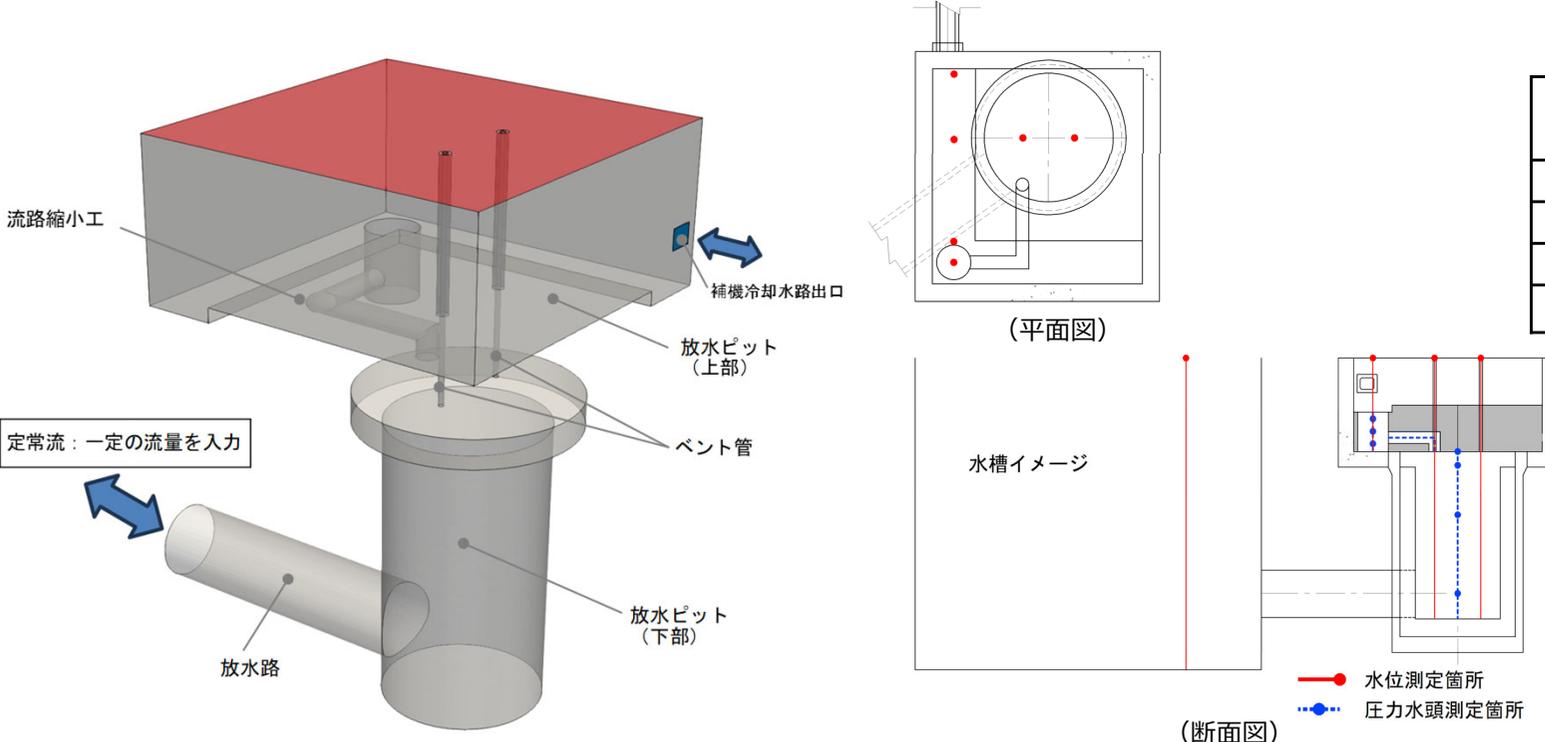
※フルード相似則より、 $Q_m = Q_p / 50^{5/2} \approx Q_p / 17,700$ (Q_m : 模型の流量, Q_p : 実機の流量)

1. 入力津波の設定に係る指摘事項回答

1.7 3号炉放水ピット流路縮小工への一次元解析適用の妥当性 (11/15)

I. 損失係数の確認 (4) 三次元解析

- 【目的】
- 三次元解析は、実現象を模擬した水理模型実験が1/50スケールの条件下であることを踏まえ、実スケールを再現した解析により損失係数を算出するために行う。
- 【概要】
- 損失係数については、放水路端部に水槽を設置し、水槽から一定の流量の入力を行い、得られた損失水頭から算出する。
 - 三次元解析に用いる解析モデルイメージ、水位測定箇所及び圧力水頭測定箇所を下図に示す。
 - 定常流を用いた解析では、水槽内の水位と放水ピット（上部）の水位差により全体の損失水頭を算出する。また、水理模型実験では損失水頭の測定ができない下図の圧力水頭測定箇所に測定点を設け損失水頭を参考として測定する。
- 【条件】
- 損失係数の算出では、流量及び流向の影響を確認するために、下表の4ケースを実施する。
 - 水理模型実験と同条件での比較をするために、実験の粗度係数（アクリル相当）を実機スケールに換算した粗度係数（0.019）として入力する。
 - 解析コードは、OpenFOAM (Ver.2.4.0) を用いる。



定常流の基本ケース

ケース	流量 (m ³ /s)	流向
定常流①	2.0	順流
定常流②		逆流
定常流③	10.0	順流
定常流④		逆流

三次元解析モデルイメージ図

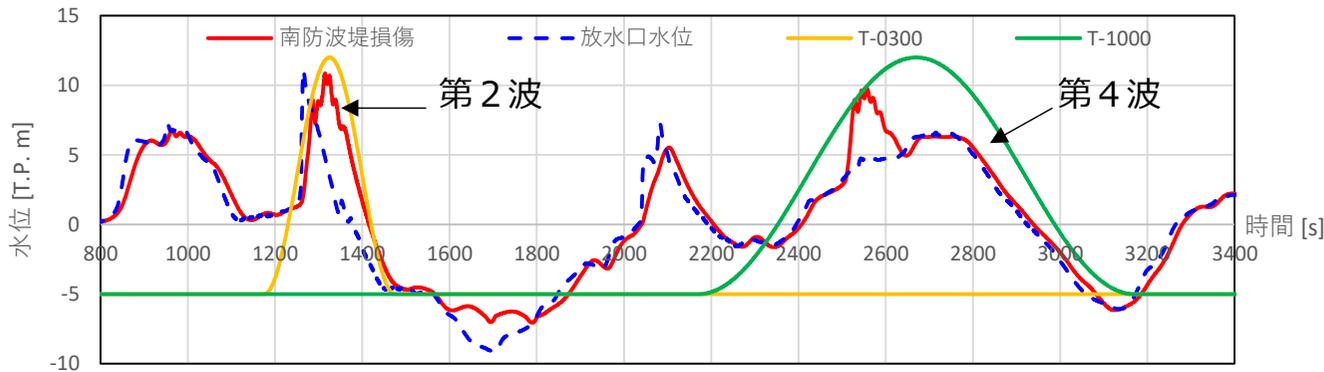
水位・圧力水頭測定箇所

1. 入力津波の設定に係る指摘事項回答

1.7 3号炉放水ピット流路縮小工への一次元解析適用の妥当性 (12/15)

II. 三次元解析と一次元解析の水位比較による検証 (1) 検証方法, 入力波形の条件

- 【検証方法】
- 三次元解析と一次元解析の水位比較による検証については、正弦波を用いて行う。
 - 正弦波の解析は、実機の粗度係数を適用した三次元解析と、電力土木技術協会（1995）及び千秋（1967）に基づいた損失係数を設定した一次元解析の放水ピット水位を比較するために行う。
- 【正弦波の波形, 周期及び振幅】
- 三次元解析と一次元解析の放水ピット水位の比較における入力波形は、一次元解析結果で放水ピット水位が最大となった波源D（南防波堤損傷）を参考とした波形を模擬した正弦波とする。
 - 検証に用いる波形の周期及び振幅は、実波形の再現性及び保守性を考慮し以下のとおりとする。
 - ・ 入力波形は、周期の短い第2波及び周期の長い第4波を参考とする。
 - ・ 周期は、第2波と概ね合うように300秒、第4波と概ね合うように1000秒とする。
 - ・ 振幅は、第2波及び第4波の波形の最大振幅が概ねT.P.-5.0mからT.P.12.0mとなっているため、片振幅8.5m（全振幅17.0m）とする。
 - なお、今回の検証では正弦波を用いるが、一次元解析の妥当性を検証した後に入力津波の実波形を入力した一次元解析により流路縮小工効果を確認する。



入力波形選定に用いた波形「波源D（南防波堤損傷）」

正弦波の実施ケース

ケース	周期 (s)	片振幅 (m)
正弦波①	300	8.5
正弦波②	1000	8.5

1. 入力津波の設定に係る指摘事項回答

1.7 3号炉放水ピット流路縮小工への一次元解析適用の妥当性 (13/15)

II. 三次元解析と一次元解析の水位比較による検証 (2) 三次元解析

【目的】

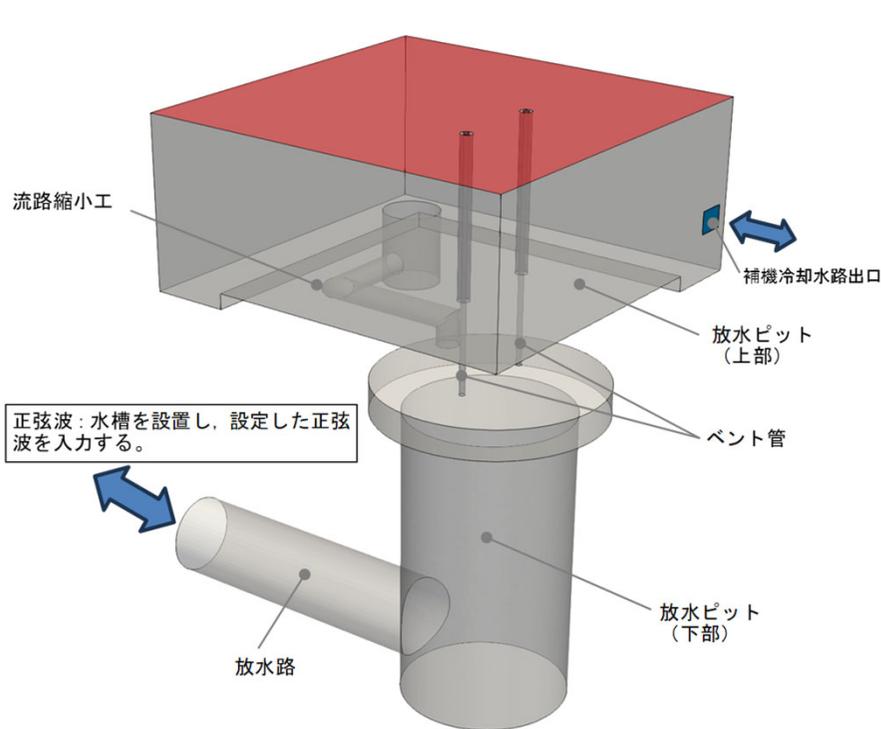
- 三次元解析は、実機の粗度係数を考慮した上で、電力土木技術協会（1995）及び千秋（1967）に基づいた、損失係数を適用した一次元解析における放水ピット内の水位を比較し、一次元解析の妥当性を検証するために行う。

【概要】

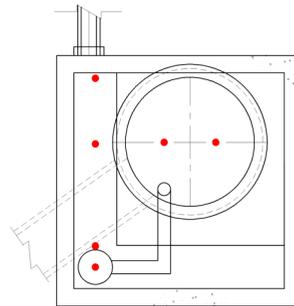
- 放水ピット内水位は、放水路端部に水槽を設置し、設定した正弦波となるように水槽より波形の入力を行い比較する。
- 三次元解析に用いる解析モデルイメージ、水位測定箇所を下図に示す。

【条件】

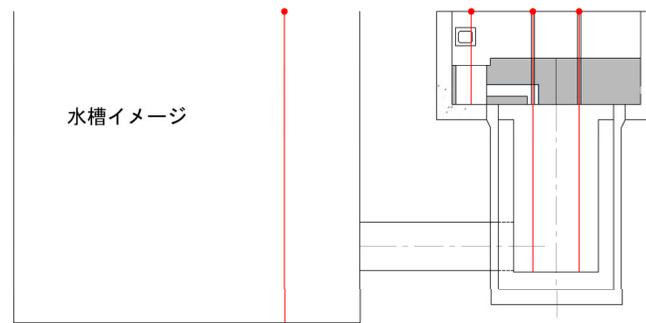
- 正弦波を用いた放水ピット内の水位の確認については、周期の影響を確認するため、下表に示す。2ケースを行う。
- 一次元解析と同条件で比較するため、実機の粗度係数（0.014）とする。
- 解析コードは、OpenFOAM（Ver.2.4.0）を用いる。



三次元解析モデルイメージ図



(平面図)



(断面図)

三次元解析水位測定箇所

正弦波の実施ケース

ケース	周期 (s)	片振幅 (m)
正弦波①	300	8.5
正弦波②	1000	8.5

● 水位測定箇所

1. 入力津波の設定に係る指摘事項回答

1.7 3号炉放水ピット流路縮小工への一次元解析適用の妥当性 (14/15)

II. 三次元解析と一次元解析の水位比較による検証 (3) 一次元解析

【目的】

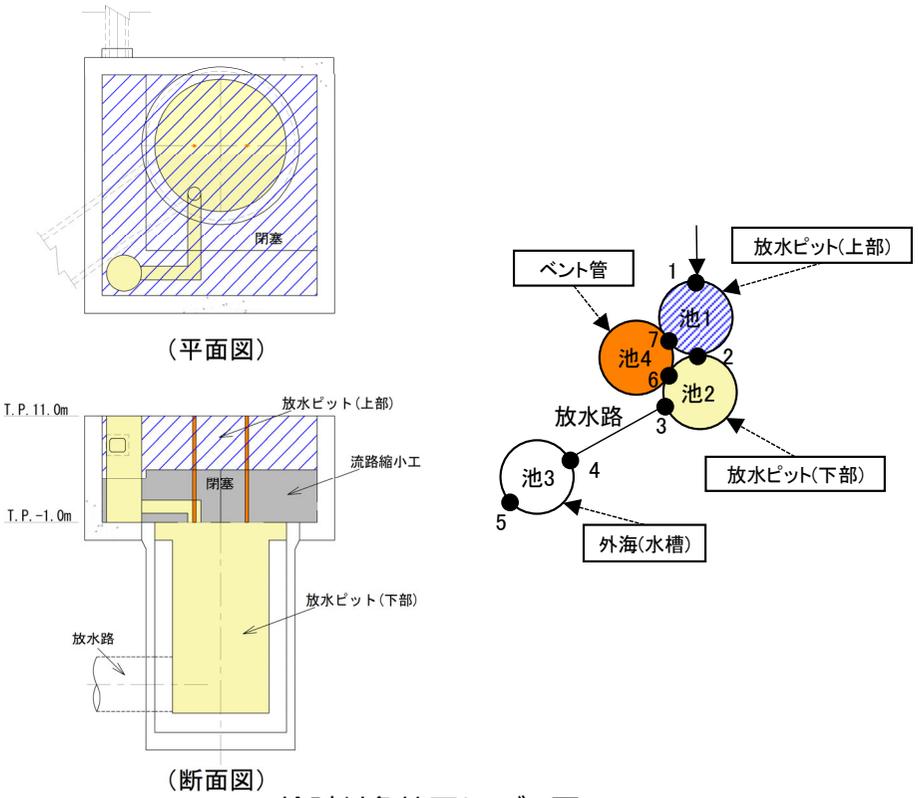
- 一次元解析は、水理模型実験と整合を確認した上で、実機の粗度係数を考慮した三次元解析と放水ピット内の水位を比較し、一次元解析の妥当性を検証するために行う。
- 一次元解析に用いる検討対象範囲とモデル図を下図に示す。

【概要】

- 解析は、放水路端部に池モデルを設置し、正弦波を入力し、池モデル内の水位を算出する。

【条件】

- 実施ケースは、三次元解析と同様に、周期の影響を確認するため、下表の2ケースを行う。
- モデル化範囲は、三次元解析と同じ範囲とする。
- 解析コードは、SURGE (Ver.2.8.7) を用いる。



検討対象範囲とモデル図

正弦波の実施ケース

ケース	周期 (s)	片振幅 (m)
正弦波①	300	8.5
正弦波②	1000	8.5

1. 入力津波の設定に係る指摘事項回答

1.7 3号炉放水ピット流路縮小工への一次元解析適用の妥当性 (15/15)

まとめ

- 3号炉放水ピット流路縮小工の管路解析で使用している一次元解析の解析条件及び損失水頭等の適用性及び妥当性については、以下の2つの項目を行い、検証する方針である。

I. 損失係数の確認

II. 三次元解析と一次元解析の水位比較による検証

- I. 損失係数の確認では、三次元解析及び水理模型実験の比較を行い、現地における3号炉放水ピット流路縮小工の粗度係数を踏まえた損失係数を算出する。
- II. 三次元解析と一次元解析の水位比較による検証では、三次元解析と電力土木技術協会（1995）及び千秋（1967）に基づいた損失係数を設定した一次元解析における放水ピット内の水位を比較する。
- 上記の結果については、設置許可段階で今後お示しする。

1. 入力津波の設定に係る指摘事項回答

1.8 損失係数設定の妥当性について

「1.1 審査会合における指摘事項と回答概要」の該当箇所(P.8)を再掲

ID	指摘事項	回答概要	回答頁
23 10 31 - 01	<p>令和5年10月31日審査会合</p> <p>① 以下に示す箇所に用いている損失水頭の算定方法について、当該算定方法の引用元の文献における実験又は理論の前提条件を踏まえ、適用性又は妥当性を説明すること。</p> <p>✓ 急縮後の断面の長さが短いなど、引用文献の実験の前提条件と異なっている可能性が否定できない、オリフィスのような形状をしている1号及び2号炉取水路流路縮小工。</p> <p>✓ 鉛直方向の水流であって自由水面を持つなど、引用文献の理論の前提条件と異なっている可能性が否定できない、1号及び2号並びに3号炉取水施設の取水槽の中間スラブ及び天端開口部。</p>	<p>以下に示す箇所に用いている損失水頭の算定方法について、当該算定方法の引用元の文献における実験又は理論の前提条件を踏まえ、適用性又は妥当性を説明する。</p> <p>✓ 1号及び2号炉取水路流路縮小工について、損失係数の算出式の適用条件について検討した結果、スリーブ長さによって損失係数算は変わるものの、押し波時にプラント側へ流入する流量を大きく評価するために損失係数を小さく設定する方針であることから、1号及び2号炉取水路流路縮小工の損失水頭の評価においては、急縮と急拡のみを考慮した損失係数を設定することは妥当である。</p> <p>1号及び2号炉取水路流路縮小工の損失係数計測のために水理模型実験を実施し、実験により得られた損失係数を用いた管路解析よりも、急縮及び急拡のみの損失係数を考慮したほうが保守的な結果となることを確認する（今回は方針の説明を行い、結果は今後説明予定）。</p> <p>✓ 取水ピット内部の中間スラブ及び天端開口部の損失水頭について、鉛直方向に自由水面を有する水流が生じる構造物の損失係数に関する既往文献の実験である川崎ほか(2005)を確認し、泊発電所に適用している電力土木技術協会(1995)による急縮・急拡の損失係数と比較した結果、泊発電所に適用している電力土木技術協会(1995)が保守的な設定となったことから妥当であることを確認した。</p>	<p>P.62 ~69</p>

1. 入力津波の設定に係る指摘事項回答

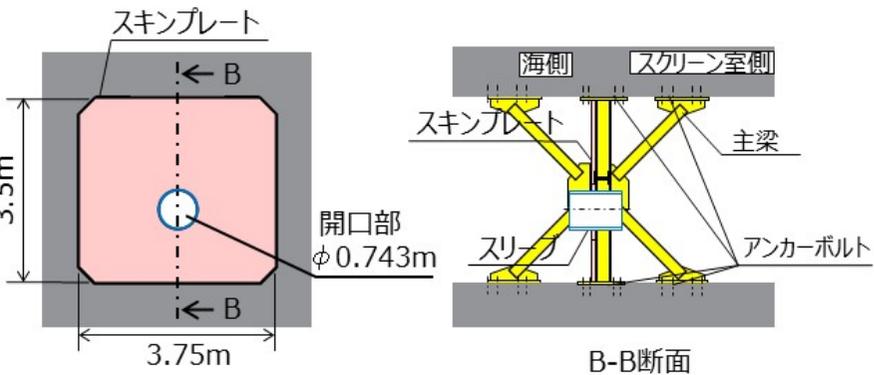
1.8.1 1号及び2号炉取水路流路縮小工の損失係数設定の妥当性について (1/5)

今回説明する事項

【概要】

- 押し波時と引き波時の損失係数が同等となるように、1号及び2号炉取水路流路縮小工のスリーブ形状を対称とする計画であり、その構造を踏まえても適用する算出式が適切であることを確認する。
- 検討の結果、スリーブ長さによって損失係数は変わるものの、押し波時にプラント側へ流入する流量を大きく評価するために損失係数を小さく設定する方針であることから、1号及び2号炉取水路流路縮小工の損失水頭の評価においては、急縮と急拡のみを考慮した損失係数※1を設定することは妥当である。
- 1号及び2号炉取水路流路縮小工を模擬した水理模型実験を行い、文献に基づき設定した損失係数が実験結果よりも小さくなることを確認する。（今回は実験の計画のみ説明）
- 水理模型実験で得られた損失係数を用いた管路解析を行い、急縮と急拡のみを考慮した損失係数※1を用いた評価が保守的となることを確認する。（次回説明予定）

※1：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-増補改訂版-に基づき算出



流路縮小工 構造概要

流路縮小工の損失係数

(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-増補改訂版-を適用)

	算出式	設定値
急拡損失	$h_{se} = f_{se} \frac{V_1^2}{2g}$ $f_{se} = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2$	$f_{se} = 0.934$
急縮損失	$h_{sc} = f_{sc} \frac{V_2^2}{2g}$	$f_{sc} = 0.492$

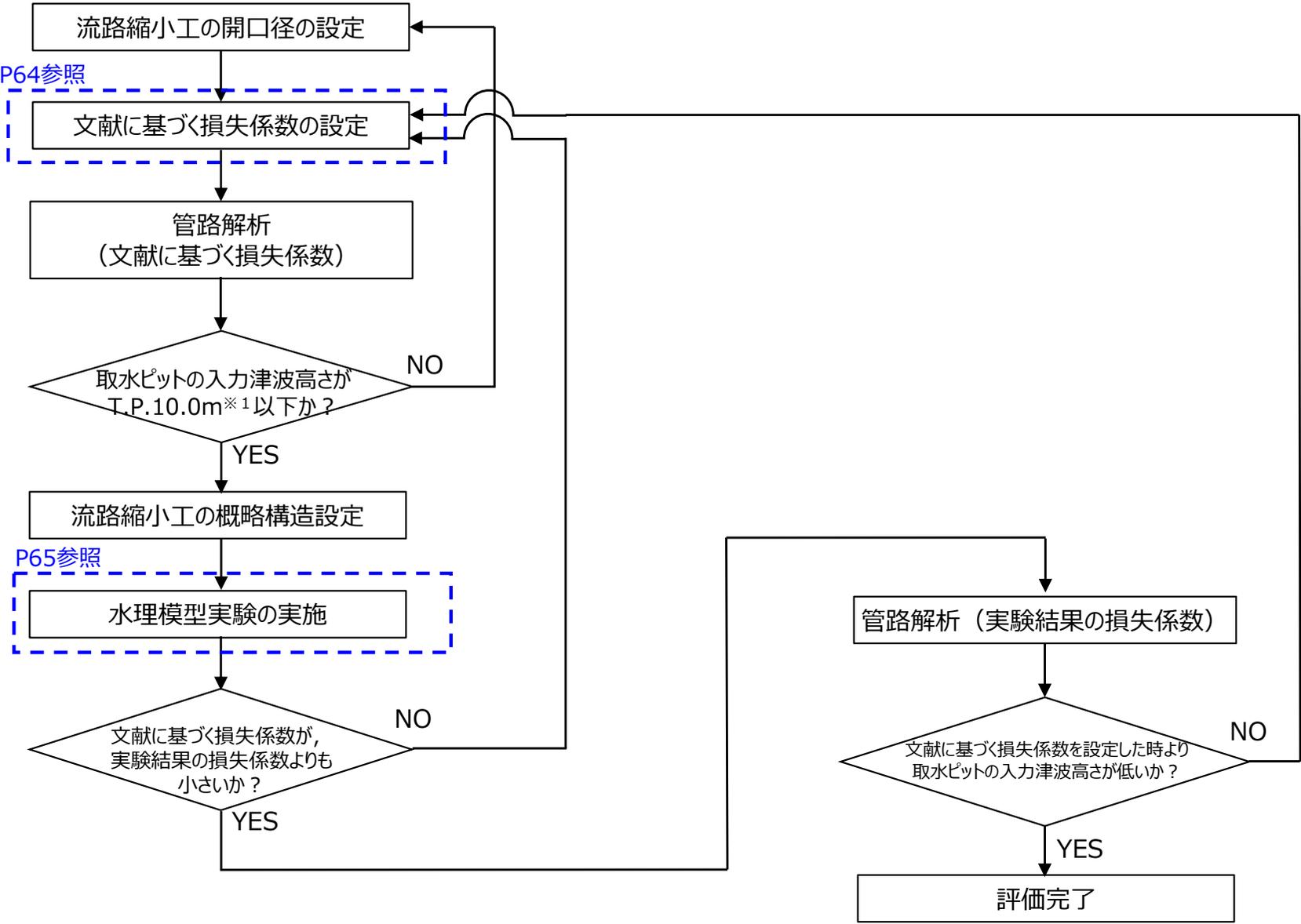
急縮損失係数

D_2/D_1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
f_{sc}	0.50	0.50	0.49	0.49	0.46	0.43	0.38	0.29	0.18	0.07	0

D_1, D_2 : 急縮前後の管路の径(m)

1. 入力津波の設定に係る指摘事項回答

1.8.1 1号及び2号炉取水路流路縮小工の損失係数設定の妥当性について (2/5)



1号及び2号炉取水路流路縮小工の設計評価フロー

※1 「1.5 水位変動・地殻変動の考慮」で示した参照する裕度 (0.62m) を踏まえた高さとして

1. 入力津波の設定に係る指摘事項回答

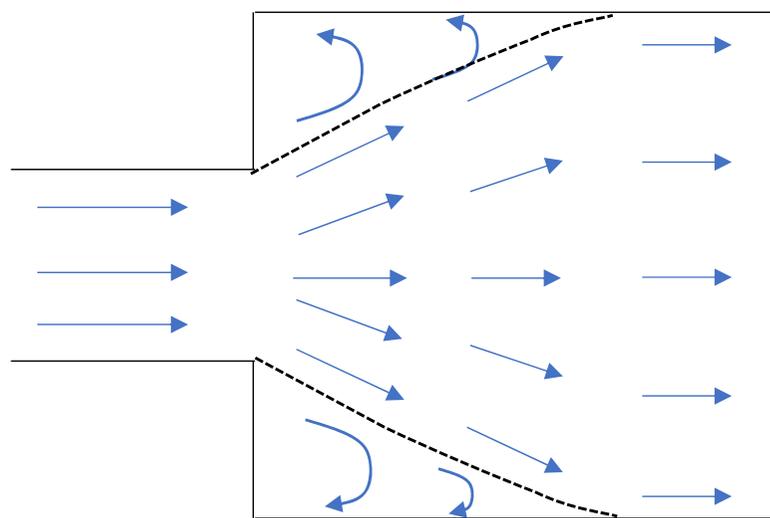
1.8.1 1号及び2号炉取水路流路縮小工の損失係数設定の妥当性について (3/5)

【損失係数算出式の適用条件について】

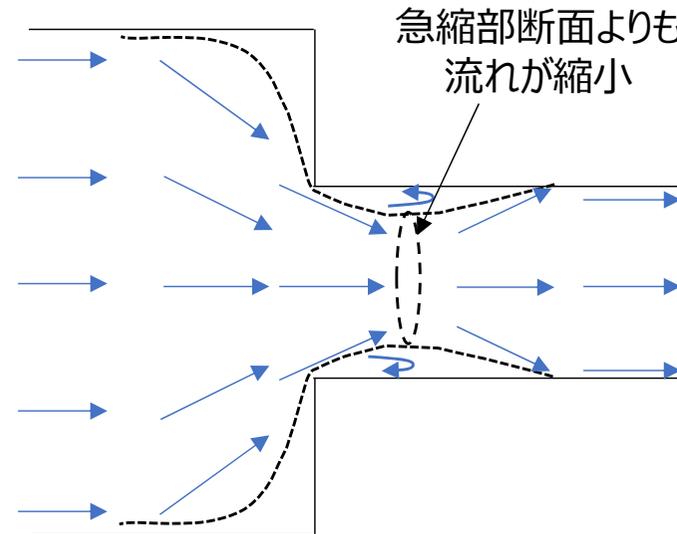
- 急拡による損失係数の算出式^{※1}は、文献中には明確な適用条件の記載はないものの、断面が急拡することで生じる損失水頭をベルヌーイの定理と運動量方程式から求めたものであることから、急拡前後の流れが「一様流となること」が考えられる。
- 急縮による損失係数の算出式^{※1}は、文献中には明確な適用条件の記載はないものの、急縮部で流れが収縮することによる損失水頭はほとんどなく、流れがいったん急縮部の断面よりも縮小したのちに急縮部の断面に拡大することで損失水頭が生じており、急拡と同様に「一様流となること」が考えられる。
- 流路縮小工の上流側及び下流側は十分長い直線の水路となっていることから、急縮の上流側及び急拡の下流側は一様流の状態となっている。
- スリーブの長さが短いと一様流ではない状態で急拡部に達することが考えられることから、スリーブの長さの影響を考慮した損失係数の算出式^{※2}と比較することで、その影響について考察する。

※1：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-増補改訂版-に基づき算出

※2：Handbook of Hydraulic Resistance に基づき算出



急拡部の流れのイメージ



急縮部の流れのイメージ

1. 入力津波の設定に係る指摘事項回答

1.8.1 1号及び2号炉取水路流路縮小工の損失係数設定の妥当性について (4/5)

【文献に基づく損失係数の設定の考え方】

- スリーブの長さを考慮したオリフィスによる損失係数の算出式※1, 2 (算出方法は下表参照) では, スリーブの長さが短いと損失係数は大きく ($l/D_h=0$ の時, 損失係数 $\zeta=2.85$), 長くなるほど一定値 ($\zeta=1.55$) に近づく。これは, スリーブの長さが短いと入口側で急縮した流れがスリーブ内で一様流となる前に出口から噴出するためである。
- 1/2号機の流路縮小工のスリーブ形状 ($l/D_h=1.35$) では損失係数 $\zeta=1.63$ となる。
- 押し波時にプラント側へ流入する海水量が多い程, 厳しい評価となるため, 損失係数を小さく設定することで保守的に評価できる。
- 急縮・急拡による損失係数の合計値 (1.426) ※3と比較した結果, スリーブ長さによる影響は小さく, スリーブ長さの影響を考慮すると損失係数を大きく見込むこととなることから, 急縮と急拡のみを考慮した損失係数※3を設定することは妥当である。
- 流路縮小工設置によって発生する損失係数として, 急縮及び急拡以外に構造体の抵抗等が想定されることから, 水理模型実験を行い, 損失係数を計測する。

※1 : Handbook of Hydraulic Resistance に基づき算出
 ※2 : 水路径が十分大きい場合を対象としたスリーブの損失係数を求めた試験結果 (適用条件は $Re \geq 10^4$)
 ※3 : 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-増補改訂版-に基づき算出

Orifice edges	Configuration	Resistance coefficient																												
Thick-walled (deep orifice) $l/D_h > 0.015$	<p>流路縮小工の仕様 Dh (開口径) : 0.743m l (オリフィス長さ) : 1.0m</p>	<p> $Re \geq 10^4 \quad \zeta = \zeta_0 + \lambda(l/D_h)$, where $\zeta_0 = f(l)$ or $\zeta = 1.5 + (2.4 - \bar{l}) \times 10^{-\phi(\bar{l})} + \lambda l/D_h$, $\phi(\bar{l}) = 0.25 + 0.535 \bar{l}^8 / (0.05 + \bar{l}^7)$, for λ, see Chapter 2. </p> <table border="1"> <tr> <td>$\bar{l} \equiv l/D_h$</td> <td>0</td> <td>0.2</td> <td>0.4</td> <td>0.6</td> <td>0.8</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>ζ_0</td> <td>2.85</td> <td>2.72</td> <td>2.60</td> <td>2.34</td> <td>1.95</td> <td>1.76</td> </tr> <tr> <td>$\bar{l} \equiv l/D_h$</td> <td>1.2</td> <td>1.4</td> <td>1.6</td> <td>1.8</td> <td>2.0</td> <td>4.0</td> </tr> <tr> <td>ζ_0</td> <td>1.67</td> <td>1.62</td> <td>1.60</td> <td>1.58</td> <td>1.55</td> <td>1.55</td> </tr> </table>	$\bar{l} \equiv l/D_h$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	ζ_0	2.85	2.72	2.60	2.34	1.95	1.76	$\bar{l} \equiv l/D_h$	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	4.0	ζ_0	1.67	1.62	1.60	1.58	1.55	1.55
$\bar{l} \equiv l/D_h$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0																								
ζ_0	2.85	2.72	2.60	2.34	1.95	1.76																								
$\bar{l} \equiv l/D_h$	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	4.0																								
ζ_0	1.67	1.62	1.60	1.58	1.55	1.55																								

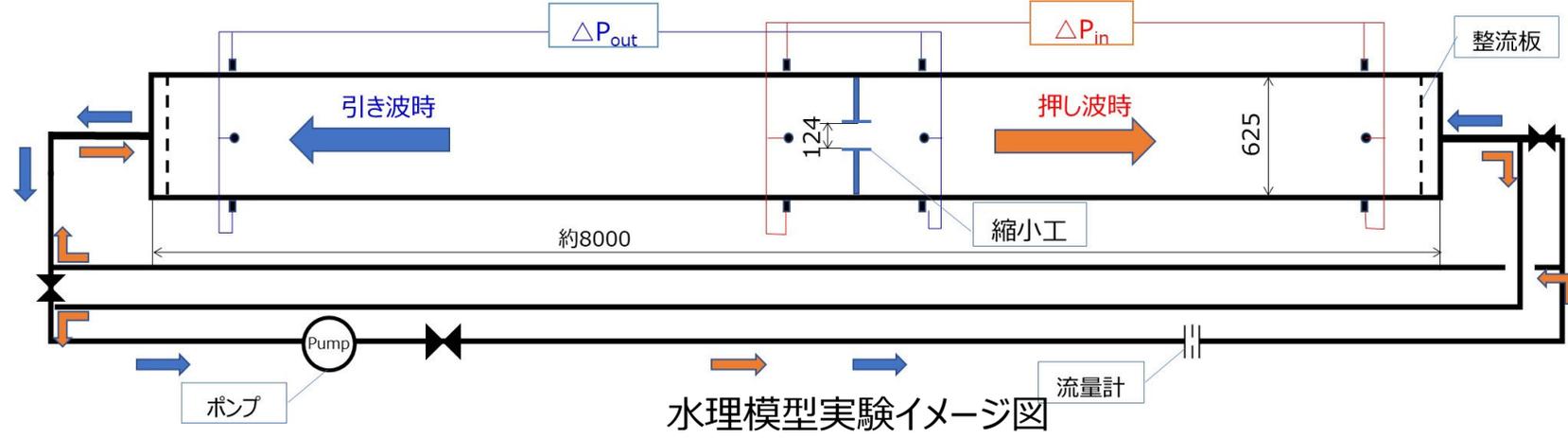
スリーブ形状オリフィスの損失係数算出方法
 出典 : Handbook of Hydraulic Resistance

1. 入力津波の設定に係る指摘事項回答

1.8.1 1号及び2号炉取水路流路縮小工の損失係数設定の妥当性について (5/5)

【水理模型実験の概要及び条件】

- 【目的】
- 流路縮小工の損失係数の計測
- 【概要】
- 模型の再現範囲は、取水路及び流路縮小工とし、水理模型実験のイメージ図を下図に示す。
 - ポンプ及び流量計を用いて流量の制御を行い、定常流を生じさせた状態で、前後差圧から損失係数を計測する。
- 【条件】
- 水理模型実験の相似則は、フルード則を適用し、実験縮尺（幾何縮尺）は1/6程度とし、設定した実験条件を下表に示す。
 - 下表のとおり、流量（通常取水流量、津波時流量）、流れ方向、構造体影響の有無を考慮した試験ケースを実施する。



実験条件

試験ケース

項目	実機	模型
流量 (m ³ /s)	5.5	0.06*
取水路の材質	コンクリート	炭素鋼
取水路サイズ (m)	幅 : 3.75 高さ : 3.5	幅 : 0.625 高さ : 0.58
流路縮小工の材質	炭素鋼	炭素鋼
流路縮小工開口径 (m)	φ0.743	φ0.124

縮小部の設定流速 [m/s]	流れ方向	構造体影響*
0.99 (通常取水流量)	押し波方向 / 引き波方向	有 / なし
4.14 (津波時流量0.8倍)		
5.18 (津波時流量)		
6.21 (津波時流量1.2倍)		

*フルード則より、 $Q_m = Q_p / 6^{5/2} = Q_p / 88$ (Q_m : 模型の流量, Q_p : 実機の流量)

*: 流路縮小工の主梁を模擬した構造体を設置して影響を確認する。

- 1)土木学会(2016)：原子力発電所の津波評価技術2016，公益社団法人土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会
- 2)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-増補改訂版-
- 3)千秋(1967)：発電水力演習
- 4)土木学会(1999)：水理公式集(平成11年版)
- 5)原子力安全基盤機構(2014)：確率論的手法に基づく基準津波算定手引き，P.84，独立行政法人原子力安全基盤機構
- 6)国土交通省ほか(2012)：津波浸水想定の設定の手引き，P.31，国土交通省水管理・国土保全局海岸室ほか

追而とする項目と今後の説明予定時期

○2023.10.31の審査会合時点で追而とした項目について、対応状況及び今後の説明予定時期は、以下のとおり。

No.	追而とする項目	対応状況	記載箇所	追而の解消予定時期 (審査会合時期)
1	下降側の基準津波の波源及び「貯留堰を下回る時間」の評価値 また、下降側津波に関連した入力津波の設定	現時点の設定を 反映済	PPT・まとめ資料全般	2024年4月
2	地山斜面の基準地震動及び基準津波に対する健全性評価結果	今後反映予定	PPT P.23 5条-別添1-添付3-110,111	2024年4月
3	地滑り地形②の基準地震動による健全性評価	今後反映予定	5条-別添1-添付3-117	2024年4月
4	地滑り地形③の崩壊範囲の設定及びその根拠の説明	反映済	5条-別添1-添付3-118,559～569	2024年4月
5	基準津波の検討を踏まえた地殻変動量の設定	現時点の設定を反 映済	PPT P.67～72,76～78 5条-別添1-Ⅱ-1-58～67	2024年4月
6	海域の洗掘における入力津波への影響評価	反映済	PPT P.22 5条-別添1-添付3-128,551～555	2024年4月
7	放水施設の入力津波の設定において考慮する放水池からの流入による影響が大きい評価項目の具体化	反映済	5条-別添1-添付2-28～30	2024年4月
8	茶津入構トンネル・アクセスルートトンネルに対し大きな影響を及ぼす波源及びその評価値。 また、これらの津波に関連した影響評価	今後反映予定	PPT・まとめ資料全般	2024年4月
9	管路解析結果及び管路解析を踏まえた入力津波の設定及びその結果	一部反映済	PPT P.69～72,76～78 5条-別添1-Ⅱ-1-70,71,73～79 5条-別添1-添付5-29～39	2024年4月
10	敷地地盤の洗掘において考慮する基準津波の代表ケースの整理	反映済	5条-別添1-Ⅱ-1-26～29	2024年4月
11	津波による港湾内の局所的な海面の固有振動の励起に関する説明	反映済	5条-別添1-Ⅱ-1-39 5条-別添1-添付4全般	2024年4月
12	1号及び2号炉放水施設の管路解析モデル・解析条件の説明	反映済	PPT P.47 5条-別添1-添付5-8,9,13,25,26	2024年4月
13	津波高さ以外の入力津波の評価結果の記載 (該当資料の呼び込みを含む)	一部反映済	5条-別添1-Ⅱ-1-80～86	2024年4月