

# 島根原子力発電所 2号炉 津波による損傷の防止

論点 1「防波堤が地震により損傷した場合の運用方針の妥当性、有効性」

---

(コメント回答)

令和 2 年 7 月  
中国電力株式会社

# 審査会合における指摘事項【論点 1】

## ■ 指摘事項（平成31年2月26日 第686回審査会合）

### 【No.1（論点1）防波堤が地震により損傷した場合の運用方針の妥当性、有効性】

先行炉の審査実績と同様に津波時の影響軽減効果を防波堤に期待しないで入力津波を設定しているものの、プラント停止、防波堤の補修等の運用方針で津波防護を達成している。これらの運用方針で津波防護を達成した審査実績がないことから、防波堤が地震により損傷した場合の運用方針の妥当性、有効性について説明すること。

この運用方針の妥当性、有効性については、検討プロセスや他の方針と比較した場合のメリット・デメリットを含めて整理して提示すること。

1. 防波堤の有無が入力津波の設定、津波影響評価に及ぼす影響の整理
2. 防波堤を損傷させる事象として事業者が想定している事象とその位置づけ
3. 防波堤の有無による影響を考慮した対応策の選定の考え方（設計対応・運用対応のメリット・デメリットを踏まえた対応策の選定の考え方）
4. 対応策の設計方針、運用方針の成立の見通し及び悪影響の評価

# 論点1に関連する審査会合における指摘事項

No.	審査会合日	コメント内容	回答頁
25	R元.5.21	防波堤の有無による影響を考慮した対応策の選定の考え方について、運用対応策のメリット及び設備対応策のデメリットが記載されていないため、提案する際に考えたメリット・デメリットを網羅的に提示した上で、対応策の選定の評価プロセスを説明すること。	P.4,20
26	R元.5.21	設備対応として1号炉取水槽の流路縮小工、2号炉取水槽の防水壁改造（嵩上げ）を選定していることについて、具体的な設置位置や構造仕様等の設計条件、構造成立性の見通し及び対応策の効果と悪影響を整理した上で、選定した対応策の妥当性を説明すること。	P.5～19, 27～39
48	H26.9.30 (確率論的リスク評価 (PRA))	基準津波に対する溢水防止壁の高さの妥当性について、定量的に説明すること。	P.5
80	R2.1.28 (本日回答)	流路縮小工の堰の設置位置について、漸拡ダクト縦抗部と除塵機エリア開口部の入力津波の水位低減効果を踏まえた上で、取水槽漸拡ダクト部の下流側に設置することを妥当とした根拠を説明すること。また、流路縮小工と1号炉取水槽の各部位について、基準適合上で果たすべき役割を持つ部位を明確にした上で、その部位に対する評価方針を説明すること。	P20, 34,35, 42～44
81	R2.1.28 (本日回答)	流路縮小工を評価する管路解析について、解析コードの機能概要、モデル化の考え方、入力条件等の計算条件及び水位評価方法を明確にした上で、解析結果の考察を含めて入力津波高さの低減効果が適切に評価されていることを説明すること。	P.21～26, 41
82	R2.1.28 (本日回答)	上記の流路縮小工による入力津波高さの低減効果の考察に加えて、1号炉取水槽の漸拡ダクト縦抗部に浸水防止蓋を設置する必要性がない根拠について、1号炉と2号炉取水槽の管路解析の評価を比較し、その差異を踏まえて、説明すること。	P.42～44
83	R2.1.28 (本日回答)	流路縮小工のエロージョン摩耗による健全性への影響が小さいと判断した評価について、水流に含まれる砂粒子等による影響を踏まえて説明すること。	P.30,33, 45～47

# 審査会合における指摘事項に対する回答【論点 1】

## ■ 回答まとめ

(1, 2号炉共通)

- 防波堤の有無が入力津波の設定, 津波評価に及ぼす影響を整理し, 防波堤の損傷を考慮した場合に2号炉取水槽及び1号炉取水槽の評価に影響があることを確認。(第715回審査会合にて説明)
- 防波堤を損傷させる事象としては, 設計基準対象施設に対して影響があると判断された外部事象から地震及び船舶の衝突を抽出。(第715回審査会合にて説明)
- 防波堤の有無による影響を考慮した対応策の選定の考え方については, 網羅的なメリット・デメリットの検討を踏まえ, 地震による防波堤損傷後の対応として時間的な制約のない設備対応策を以下のとおり選定。
  - 2号炉取水槽は, 防水壁の改造(嵩上げ)を選定。(P.4)
  - 1号炉取水槽は, 当初, 取水槽内への流路縮小工(堰)を選定していたが, 水位低減がより確実な取水管端部への流路縮小工(縮小板)へ見直し選定。(P.20)
- 設備対応の選定にあたり, 構造仕様等の設計条件, 構造成立性の見通し及び対応策の効果と悪影響を整理し, 基準津波に対する防水壁の高さ等, 対応策の妥当性を確認。(2号炉:P.5~19, 1号炉:P.27~39)

(1号炉)

- 1号炉取水槽の設備対応の選定にあたり, 解析コード, 管路解析モデル, 入力条件等の計算条件を整理し, 管路計算結果を示し, 基準津波に対する対策の妥当性を確認。(P.21~26, 41)
- 流路縮小工と1号炉取水槽の各部位について, 流路縮小工は縮小板, 取付板及び固定ボルトで構成する鋼製部材を取水管端部に設置することから当該箇所を津波防護施設とし, 取水管は取水槽北側壁を貫通して設置していることから取水槽北側壁を間接支持部材として各部位の要求機能に応じた評価方針を記載。(P.34, 35)
- 流路縮小工に生じるエロージョン摩耗について, 島根2号炉においては流水に砂がほとんど含まれないこと及び貝については定期的な清掃により貝を除去する保守管理方針とすることから, 流水に含まれる砂等による影響は小さいことを確認。(P.30, 33, 45~47)
- 1号炉取水槽への流路縮小工は, 取水管端部に設置することとするが, 当初選定していた取水槽内への堰設置による流路縮小工の入力津波高さ低減効果の妥当性を確認するため, 水理応答の観点から入力津波高さの低減効果を考察。また, 1号炉取水槽と2号炉取水槽の管路解析の評価を比較するとともに, 1号炉取水槽の漸拡ダクト部の取水管立入ピットへ閉止板等を設置する必要性がないことを確認。(P.42~44)

# 防波堤の有無による影響を考慮した対応策の選定（2号炉）

➤ 2号炉における防波堤の有無による影響を考慮した対応策の選定の考え方を下表に示す。

- 運用対応によるメリット及び設備対応によるデメリットを検討した上で、一定期間内※に対応する必要があることを踏まえ、時間的な制約のない防水壁の改造（嵩上げ）による設備対応を選定。

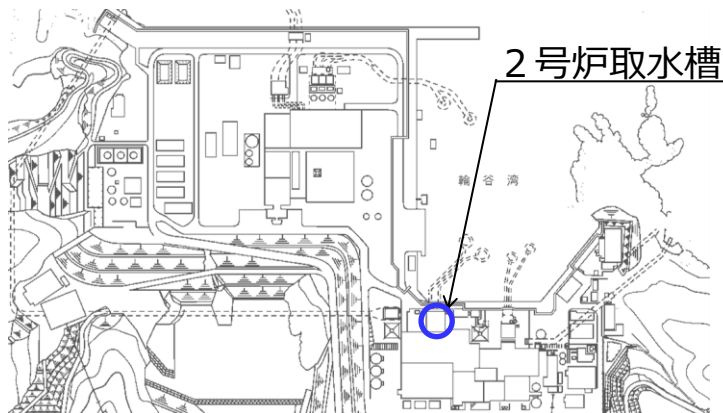
※：敷地近傍の地震による防波堤損傷後に日本海東縁部に想定される地震による津波が襲来するまでの期間内

表 2号炉における防波堤の有無による影響を考慮した対応策の選定の考え方等

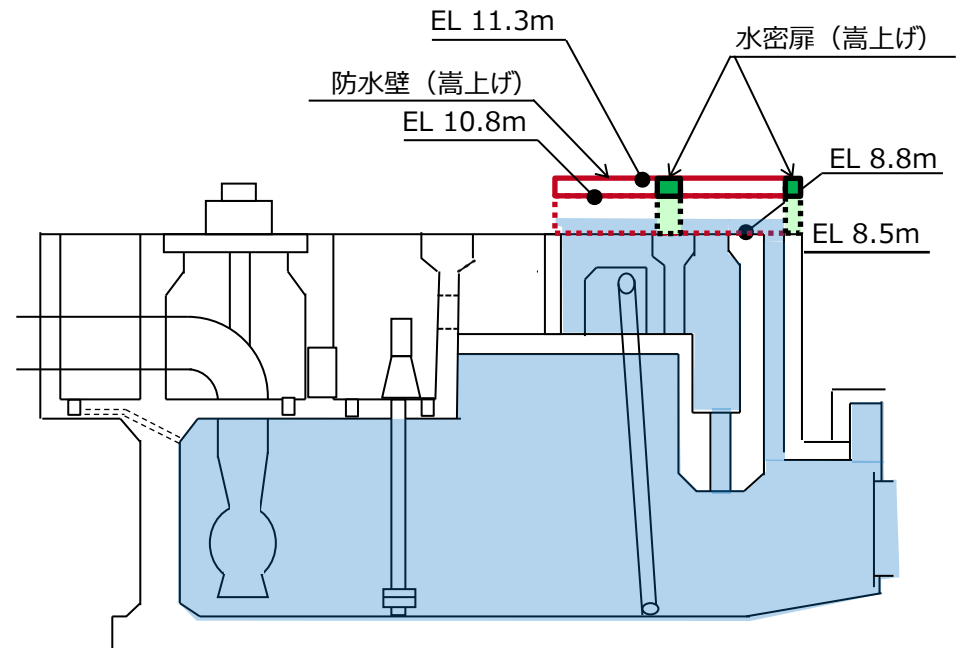
2号炉の経路からの津波の流入防止に対する対応		運用対応		設備対応
		防波堤の補修	取水槽への角落し設置	防水壁の改造（嵩上げ）
対応の効果		・入力津波高さの低減		・許容津波高さの向上
①	メリット	<ul style="list-style-type: none"> <li>・常設による設備対応が不要となる</li> <li>・入力津波高さが低減できる</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・定期的な訓練による技量の維持が不要</li> <li>・地震影響を受けた後にも常に耐津波設計方針が満足できる</li> </ul>
	デメリット	<ul style="list-style-type: none"> <li>・一定期間内に補修を完了する必要がある</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・一定期間内に角落しを設置する必要がある</li> <li>・定期的な訓練により技量の維持が必要となる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・設備の維持管理が必要となる</li> <li>・入力津波高さが低減できない</li> </ul>
②	成立性見通し	×	○	○
		<ul style="list-style-type: none"> <li>・損傷の程度により、一定期間内に補修を完了できない可能性がある</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・角落し設置に伴いプラントの運転を停止し、取水槽入口の開口率を4割程度とすることにより、入力津波高さを許容津波高さ以下とすることが可能</li> <li>・角落し耐震性の確保が可能</li> <li>・角落しは、汎用クレーンで設置可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・防水壁（改造後）の耐震性の確保が可能</li> </ul>
	悪影響	-（悪影響なし）	-（悪影響なし）	-（悪影響なし）
評価結果		×	○	◎
		<ul style="list-style-type: none"> <li>・一定期間内に防波堤の補修を完了できない可能性がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・一定期間内に角落しを設置する必要があるという条件付きではあるが、入力津波高さを敷地高さ以下とすることが可能である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・許容津波高さを上げるため、訓練による技量に抛らず、時間的制約がない設備対応として、入力津波高さを許容津波高さ以下とすることが可能である。</li> </ul>

## 2号炉取水槽防水壁の改造（嵩上げ）の概要とその効果

- 2号炉取水槽除じん機エリア防水壁及び水密扉の構造概要を以下に示す。
  - 2号炉取水槽除じん機エリア内の津波流入防止対策として、防水壁及び水密扉の嵩上げを実施する。
  - 防水壁及び水密扉の嵩上げにより、防波堤無しの入力津波（EL+10.60m）に対して裕度（0.64m）を考慮しても敷地への津波の流入防止が達成できることから、防水壁及び水密扉の高さをEL10.8mからEL11.3mに嵩上げする。
  - 防水壁及び水密扉は鋼構造物であり、地震荷重や津波荷重等に対して津波防護機能又は浸水防止機能を十分に保持する設計とする。



2号炉取水槽位置図

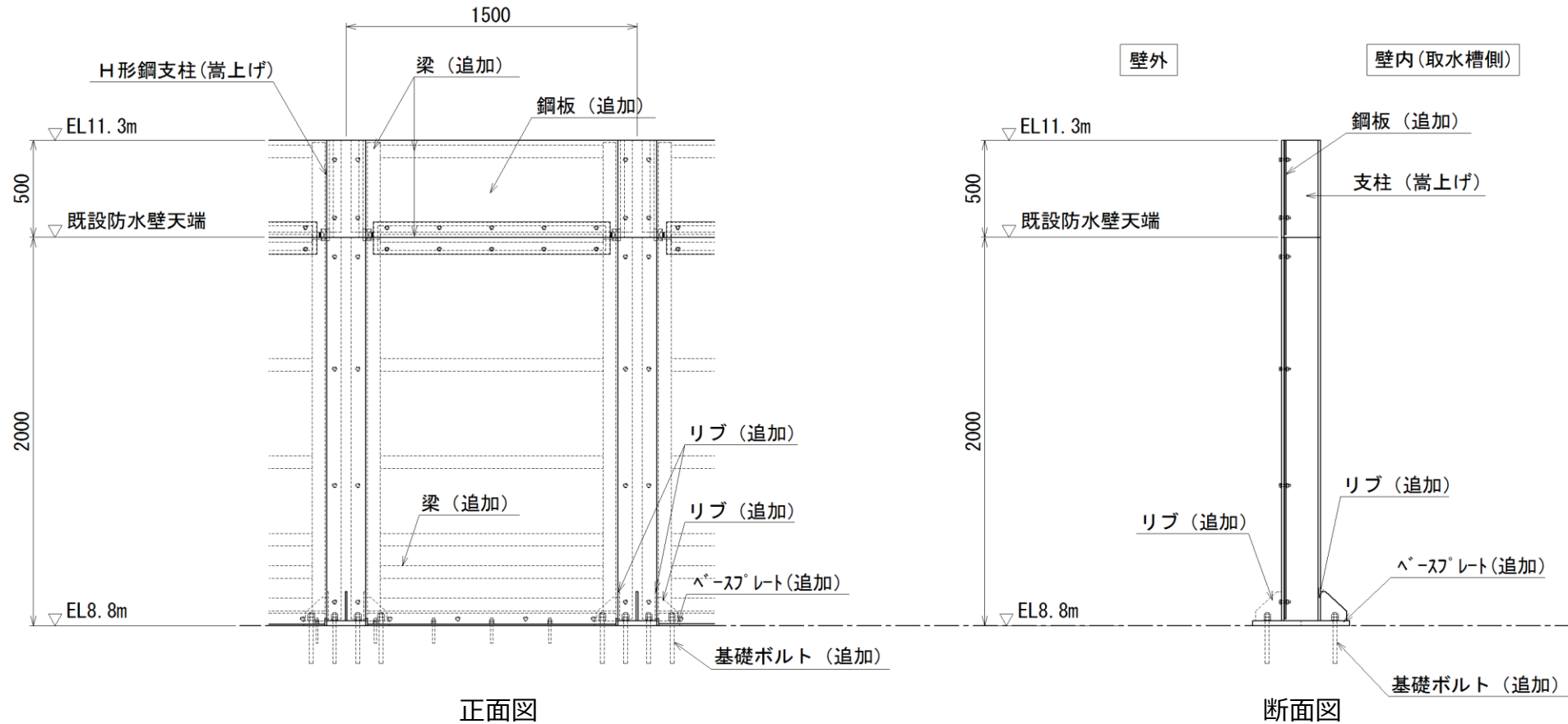


2号炉取水槽除じん機エリア防水壁及び水密扉  
嵩上げ断面イメージ図



# 2号炉取水槽除じん機エリア防水壁及び水密扉の構造概要（1/2）

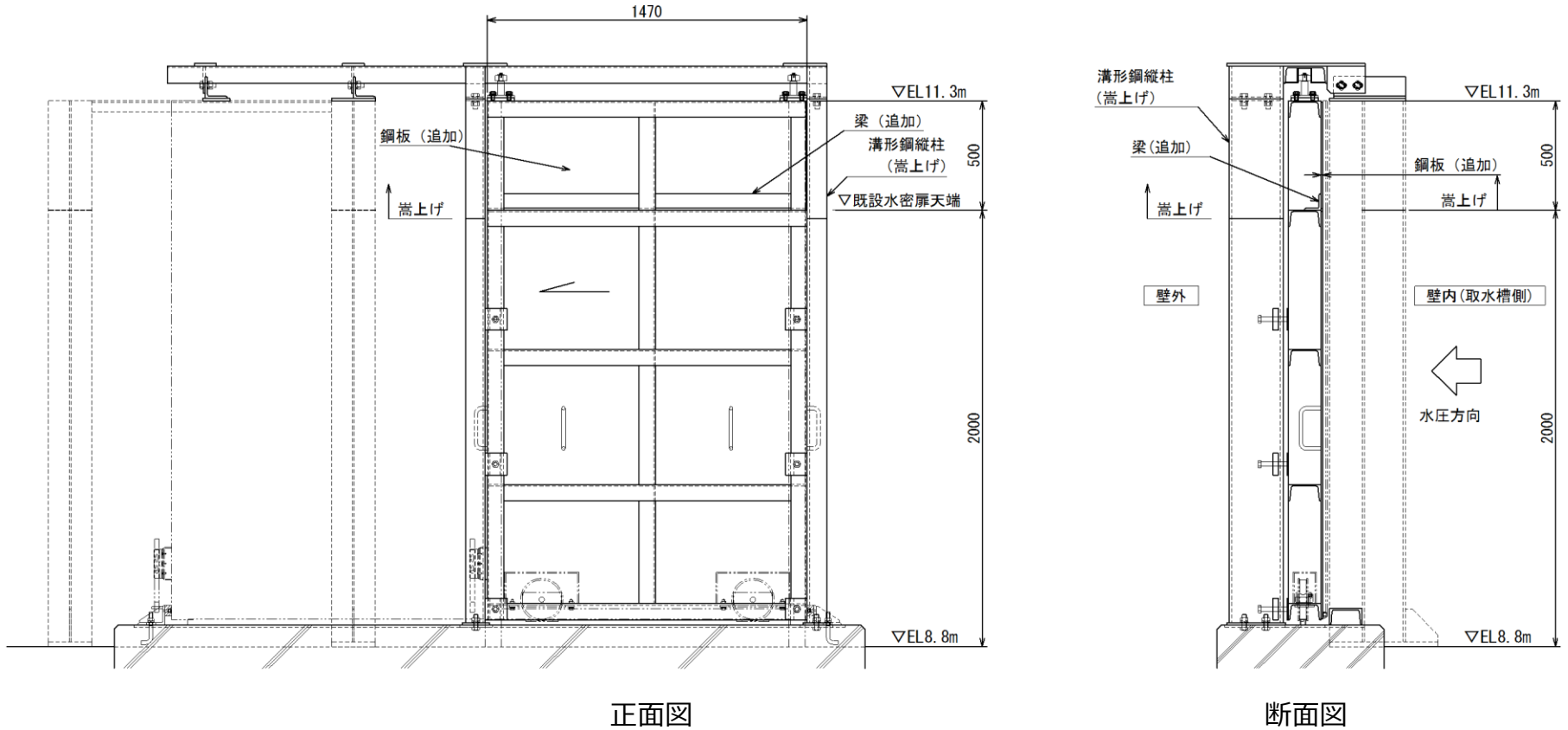
■ 防水壁の構造概要を以下に示す。



2号炉取水槽除じん機エリア防水壁 構造概要図

# 2号炉取水槽除じん機エリア防水壁及び水密扉の構造概要 (2/2)

■ 水密扉の構造概要を以下に示す。



2号炉取水槽除じん機エリア水密扉 構造概要図



# 防水壁及び水密扉の設計方針及び構造成立性の見通し（1/12）

➤ 2号炉取水槽除じん機エリア防水壁及び水密扉の設計方針及び構造成立性の見通しについて以下に示す。

## 1. はじめに

### （1）防水壁及び水密扉に要求される機能

- 浸水防止設備として防水壁及び水密扉に求められる要求機能は、取水口から流入する津波の敷地への浸水を防止すること、基準地震動  $S_s$  に対し要求される機能を損なうおそれがないよう、構造物全体として十分な構造強度を有することである。
- 上記の機能を確保するため、入力津波に対し余裕を考慮した防水壁及び水密扉の高さを確保するとともに、構造体の境界部等の止水性を維持し、基準地震動  $S_s$  に対し止水性を損なわない構造強度を有した構造物とする。

### （2）防水壁及び水密扉の設計の基本的考え方

- 防水壁及び水密扉は、地震荷重や津波荷重に対して十分な耐震性・遮水性が要求されるため、高強度で軽量かつ十分に遮水性のある鋼板を用い、取水槽に固定した鋼製支柱により支持される構造とする。
- また、取水槽の管理用出入口である水密扉は、人力で容易に開閉作業が可能な鋼製の扉構造とするとともに、常時閉運用とする。

# 防水壁及び水密扉の設計方針及び構造成立性の見通し（2/12）

## 2. 防水壁及び水密扉の概要

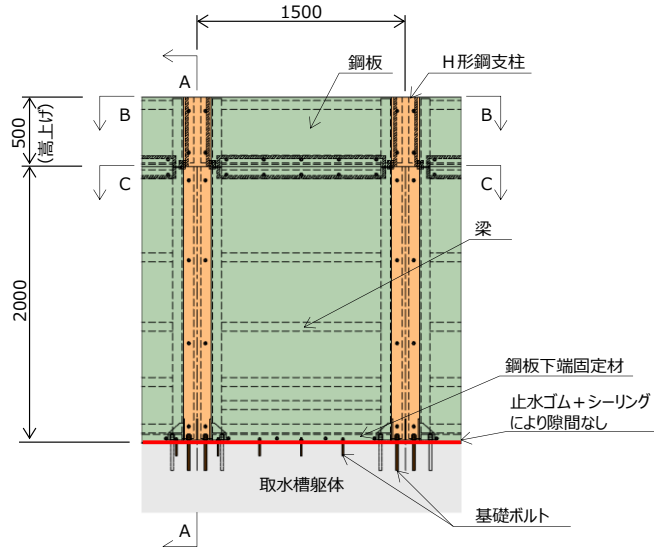
### （1）防水壁

- 防水壁は、高強度で軽量かつ十分に遮水性のある鋼板を、取水槽に設置したH形鋼支柱にボルト接合により設置する構造とし、H形鋼支柱と鋼板との間に止水ゴムを設置して止水性を確保する。
- 嵩上げ箇所は、H形鋼支柱を溶接接合にて嵩上げし、既設部同様、鋼板を支柱にボルト接合により設置する構造とし、支柱と鋼板との間は止水ゴムを設置して止水性を確保するとともに、シーリングを施工して止水性を高める。また、鋼板と鋼板の隙間は鋼板を追加してボルト接合するとともに、止水ゴムを隙間に設置して止水性を確保する。
- また、H形鋼支柱下端のベースプレート及び鋼板下端固定材（等辺山形鋼）と取水槽の間には止水ゴムを設置することで止水性を確保する。さらに、ベースプレートを含めた鋼板下端全長にシーリングを施すことで止水性を高める。
- 防水壁の各部位の役割を以下に、構造例を次頁に示す。

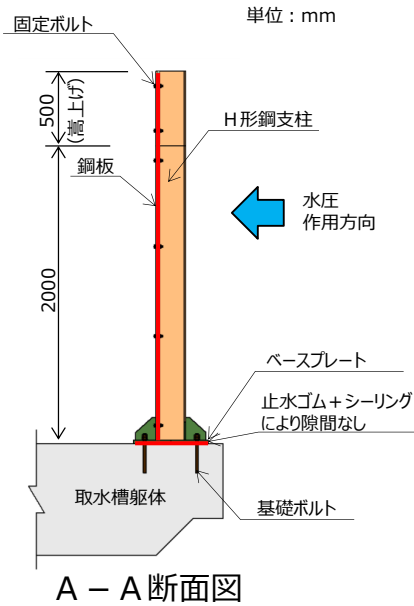
防水壁の各部位の役割

部位	役割
鋼板	止水機能の保持
梁・H形鋼支柱・固定ボルト	鋼板等の支持
ベースプレート	H形鋼支柱の支持
基礎ボルト	鋼板及びベースプレートの支持
止水ゴム	止水機能の保持（鋼板とH形鋼支柱間等）

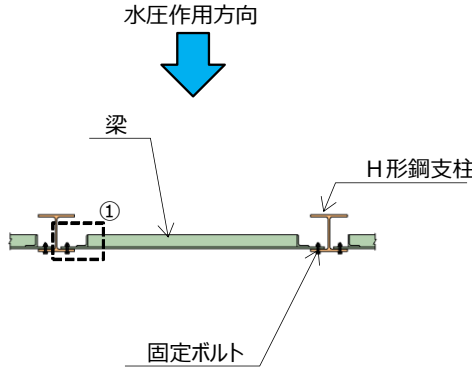
# 防水壁及び水密扉の設計方針及び構造成立性の見通し (3/12)



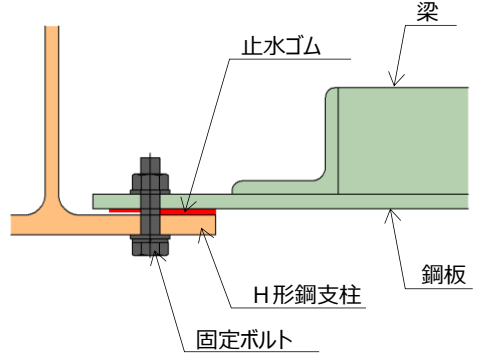
正面図



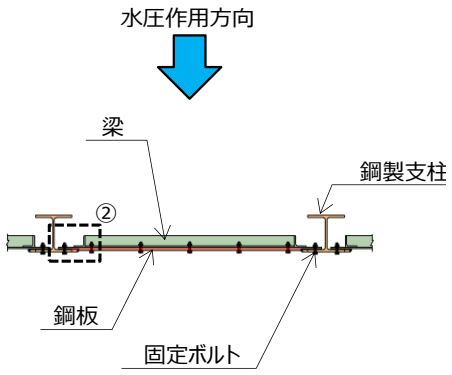
A - A 断面図



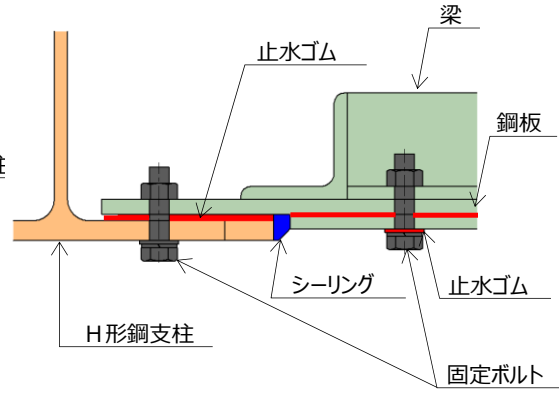
B - B 断面図



①部詳細イメージ



C - C 断面図



②部詳細イメージ

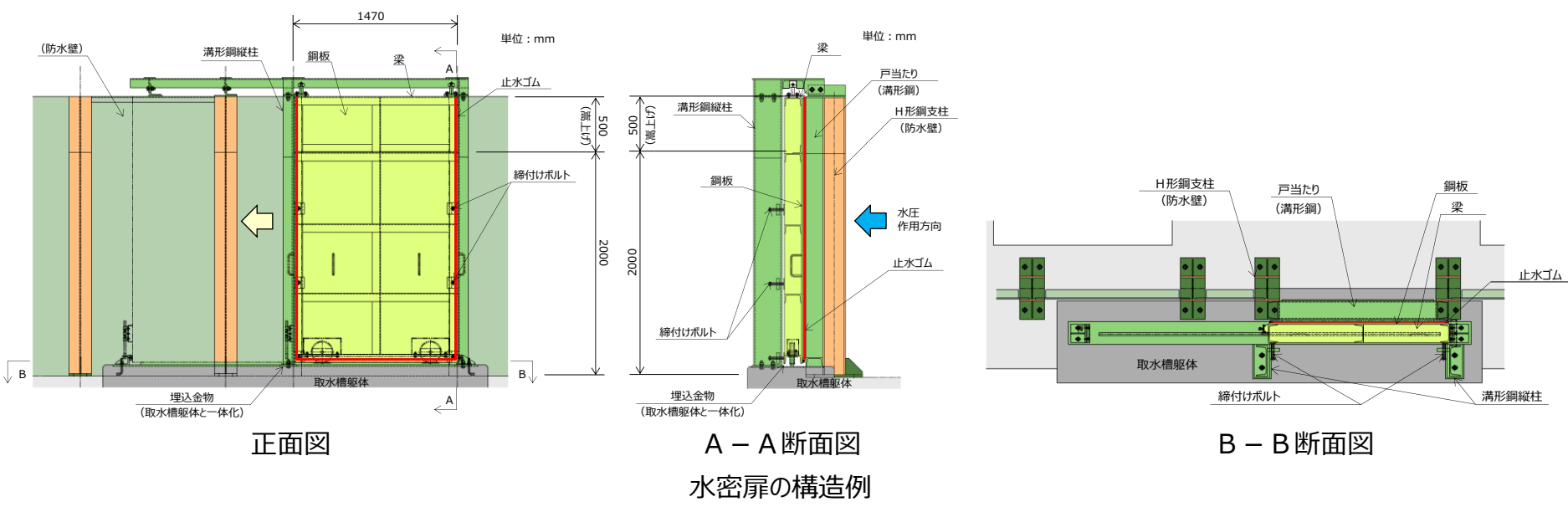
# 防水壁及び水密扉の設計方針及び構造成立性の見通し（4/12）

## （2）水密扉

- 取水槽の管理用出入口として、鋼製扉を用いた開閉可能な構造とする。
- 取水槽に溝形鋼の縦柱を設置した上で、鋼板と梁を溶接接合して構成する鋼製扉を取り付ける。また、鋼製扉周囲に止水ゴムを設置し、別途設置する戸当たり（溝形鋼）との接触面で閉時の止水性を確保する。
- 高上げ箇所は、鋼製扉（鋼板及び梁）、溝形鋼縦柱及び戸当たり（溝形鋼）をそれぞれ溶接接合して高上げる。
- 水密扉の各部位の役割及び構造例を以下に示す。

水密扉の各部位の役割

部位	役割
鋼製扉（鋼板・梁・鋼板補強リブ）	止水機能の保持
縦柱・締付けボルト・戸当たり（溝形鋼）	鋼製扉の支持
止水ゴム	止水機能の保持（鋼製扉と戸当たり間）



水密扉の構造例

# 防水壁及び水密扉の設計方針及び構造成立性の見通し（5/12）

## 3. 防水壁及び水密扉の設計方針及び構造成立性の見通し

### （1）検討ケース及び荷重の組合せ

- 防水壁及び水密扉における検討ケース及び荷重の組合せは、以下のとおりとする。

①地震時：常時荷重＋地震荷重＋風荷重

②津波時：常時荷重＋津波荷重

- なお、防水壁及び水密扉の設計において考慮する荷重は、以下のとおり設定する。

①常時荷重

自重を考慮する。

②地震荷重

基準地震動  $S_s$  を考慮する。

③風荷重

「第6条 外部からの衝撃による損傷の防止」において規定する設計基準風速に伴う荷重を地震時に考慮する。津波時は、水圧作用側が海面下にあることから、風荷重は考慮しない。

④津波荷重

入力津波高さに基づき算定される静水圧を考慮する。

⑤余震荷重

海域活断層に想定される地震による入力津波高さは、2号炉取水槽において最大でもEL+4.9mであり、防水壁及び水密扉の設置標高がEL+8.8mであるため、海域活断層に想定される地震による津波の影響を受けないことから、余震荷重を考慮しない。

# 防水壁及び水密扉の設計方針及び構造成立性の見通し（6/12）

## （2）損傷モードの抽出と許容限界（1/2）

- 地震時及び津波時に防水壁及び水密扉が維持すべき機能を喪失してしまう事象（損傷モード）を仮定し、その損傷モードに対しての設計・施工上の配慮を整理した。
- また、損傷モードの整理結果を踏まえ、構造成立性の見通しの確認における主要な照査項目と許容限界を整理した。
- 防水壁に関する損傷モード及び構造成立性の見通しに関する許容限界を以下に示す。

防水壁に関する損傷モード

部位の名称	要求機能を喪失する事象	設計・施工上の配慮	構造成立性の見通しの確認における照査
鋼板	・鋼板に作用する地震荷重や津波荷重により、鋼板が曲げ破壊又はせん断破壊することで止水機能を喪失する。	・鋼板に生じる断面力による応力度が、許容限界以下であることを確認する。	○
	・H形鋼支柱間の応答差や地盤条件変化部における相対変位により、鋼板にねじれが発生し損傷することで止水機能を喪失する。	・支柱は取水槽に固定し、取水槽は十分な支持性能を有する岩盤に設置されていることから、支柱間の応答差や地盤条件変化部による影響は小さいと判断する。	-
H形鋼支柱	・鋼板から伝達する荷重及び支柱自体に作用する荷重により、鋼製支柱が曲げ・軸力による破壊又はせん断破壊し、鋼板の支持性能を喪失する。	・鋼製支柱に生じる断面力による応力度が、許容限界以下であることを確認する。	○
梁	・鋼板から伝達する荷重により、梁が曲げ破壊又はせん断破壊することで鋼板の支持性能を喪失する。	・梁に生じる断面力による応力度が、許容限界以下であることを確認する。	○
固定ボルト	・鋼板から伝達する荷重により、固定ボルトがせん断破壊し、鋼板の支持性能を喪失する。	・固定ボルトに生じる断面力による応力度が、許容限界以下となるよう、固定ボルトの仕様を詳細設計段階で決定する。	-
ベースプレート	・H形鋼支柱から伝達する荷重により、ベースプレートが曲げ破壊又はせん断破壊することでH形鋼支柱の支持機能を喪失する。	・ベースプレートに生じる断面力による応力度が、許容限界以下となるよう、ベースプレートの仕様を詳細設計段階で決定する。	-
基礎ボルト	・ベースプレートから伝達する荷重により、ボルトが引抜き又はせん断破壊し、防水壁全体の支持機能を喪失する。	・基礎ボルトに生じる断面力による応力度が、許容限界以下となるよう、基礎ボルトの仕様を詳細設計段階で決定する。	-

防水壁の構造成立性の見通しに関する許容限界

評価対象部位	役割	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
鋼板	止水機能の保持	曲げ せん断	曲げ：短期許容応力度以下 せん断：短期許容応力度以下	鋼構造設計規準
H形鋼支柱・梁	鋼板の支持	曲げ せん断	曲げ：短期許容応力度以下 せん断：短期許容応力度以下	鋼構造設計規準

# 防水壁及び水密扉の設計方針及び構造成立性の見通し（7/12）

## （2）損傷モードの抽出と許容限界（2/2）

- 水密扉に関する損傷モード及び構造成立性の見通しに関する許容限界を以下に示す。

### 水密扉に関する損傷モード

部位の名称	要求機能を喪失する事象	設計・施工上の配慮	構造成立性の見通しの確認における照査
鋼製扉 (鋼板, 梁)	・鋼製扉に作用する地震荷重や津波荷重により、鋼製扉が曲げ破壊又はせん断破壊することで止水機能を喪失する。	・鋼製扉に生じる断面力による応力度が、許容限界以下であることを確認する。	○
溝形鋼縦柱	・鋼製扉から伝達する荷重及び縦柱自体に作用する荷重により縦柱が曲げ破壊またはせん断破壊し、鋼製扉の支持性能を喪失する。	・溝形鋼縦柱に生じる断面力による応力度が、許容限界以下であることを確認する。	○
締付けボルト	・鋼製扉から伝達する荷重により、締付けボルトが破断し、鋼製扉の支持性能を喪失する。	・締付けボルトに生じる断面力による応力度が、許容限界以下となるよう、締付けボルトの仕様を詳細設計段階で決定する。	-
戸当たり (溝形鋼)	・鋼製扉から伝達する荷重、戸当たり自体に作用する荷重及び防水壁から伝達する荷重により、戸当たりが曲げ破壊又はせん断破壊し、鋼製扉の支持性能を喪失する。	・戸当たりが生じる断面力による応力度が、許容限界以下であることを詳細設計段階で確認する。 ・戸当たりは、防水壁のH形鋼支柱に溶接接合して剛性を高めることから、構造成立性の確認においては、防水壁のH形鋼支柱の評価に代表させる。	-
止水ゴム	・津波時の水圧が作用することにより、止水ゴムが損傷し、止水機能を喪失する。	・止水ゴムに生じる水圧が、メーカー規格及び基準並びに必要なに応じて実施する性能試験を参考に定めた許容水圧以下となるよう、止水ゴムの仕様を詳細設計段階で決定する。	-

### 水密扉の構造成立性の見通しに関する許容限界

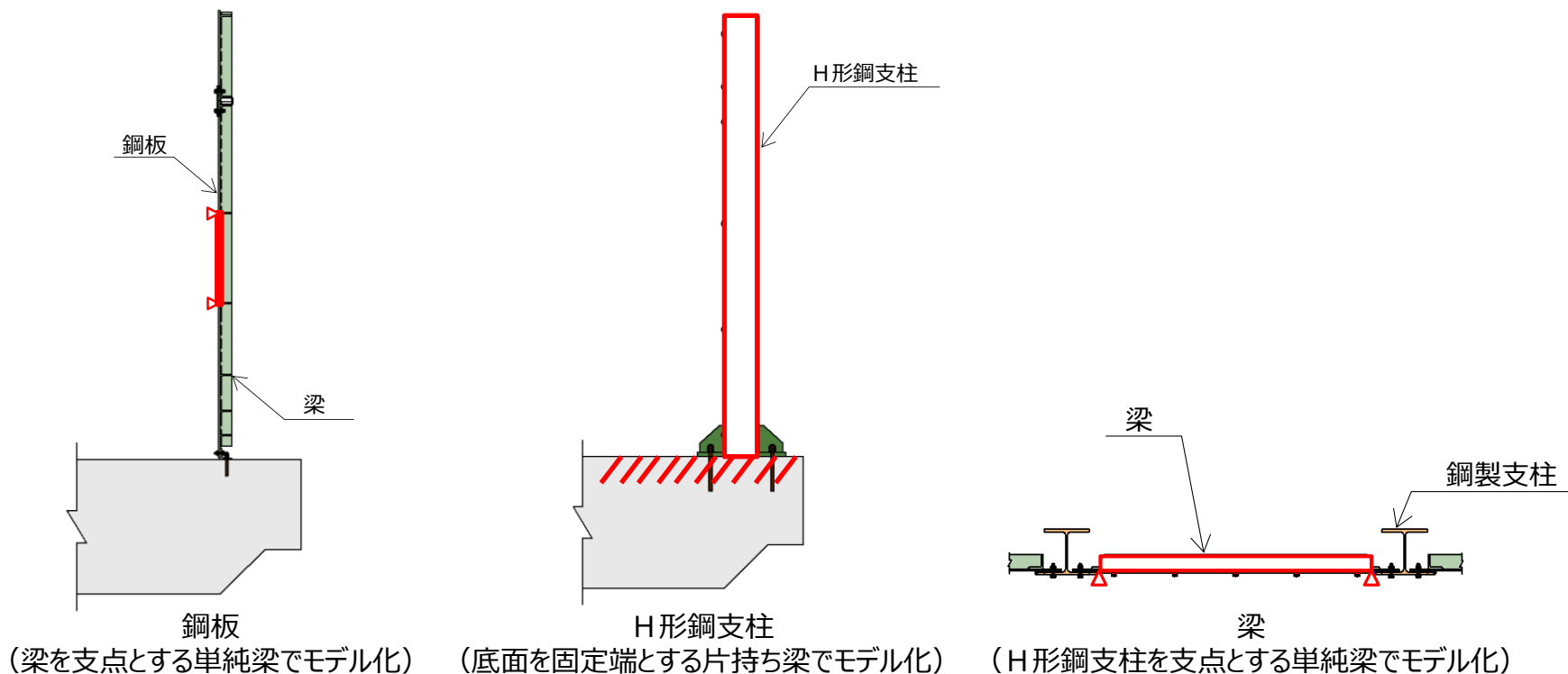
評価対象部位	役割	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
鋼製扉（鋼板，梁）	止水機能の保持	曲げ せん断	曲げ：短期許容応力度以下 せん断：短期許容応力度以下	鋼構造設計規準
溝形鋼縦柱	鋼板の支持	曲げ せん断	曲げ：短期許容応力度以下 せん断：短期許容応力度以下	鋼構造設計規準



# 防水壁及び水密扉の設計方針及び構造成立性の見通し（8/12）

## （3）防水壁のモデル化方針

- 防水壁は、高強度で軽量かつ十分に遮水性のある鋼板を、基礎ボルトにて取水槽に固定したH形鋼支柱とボルト接合し、鋼板と取水槽を分離させた構造とする。
- よって、防水壁の挙動としては、剛性と質量が異なる鋼板やH形鋼支柱等の鋼製部材が地震動により一体的に応答するモードとなることから、以下に示す梁のモデルにより、その挙動を適切に評価することが可能である。

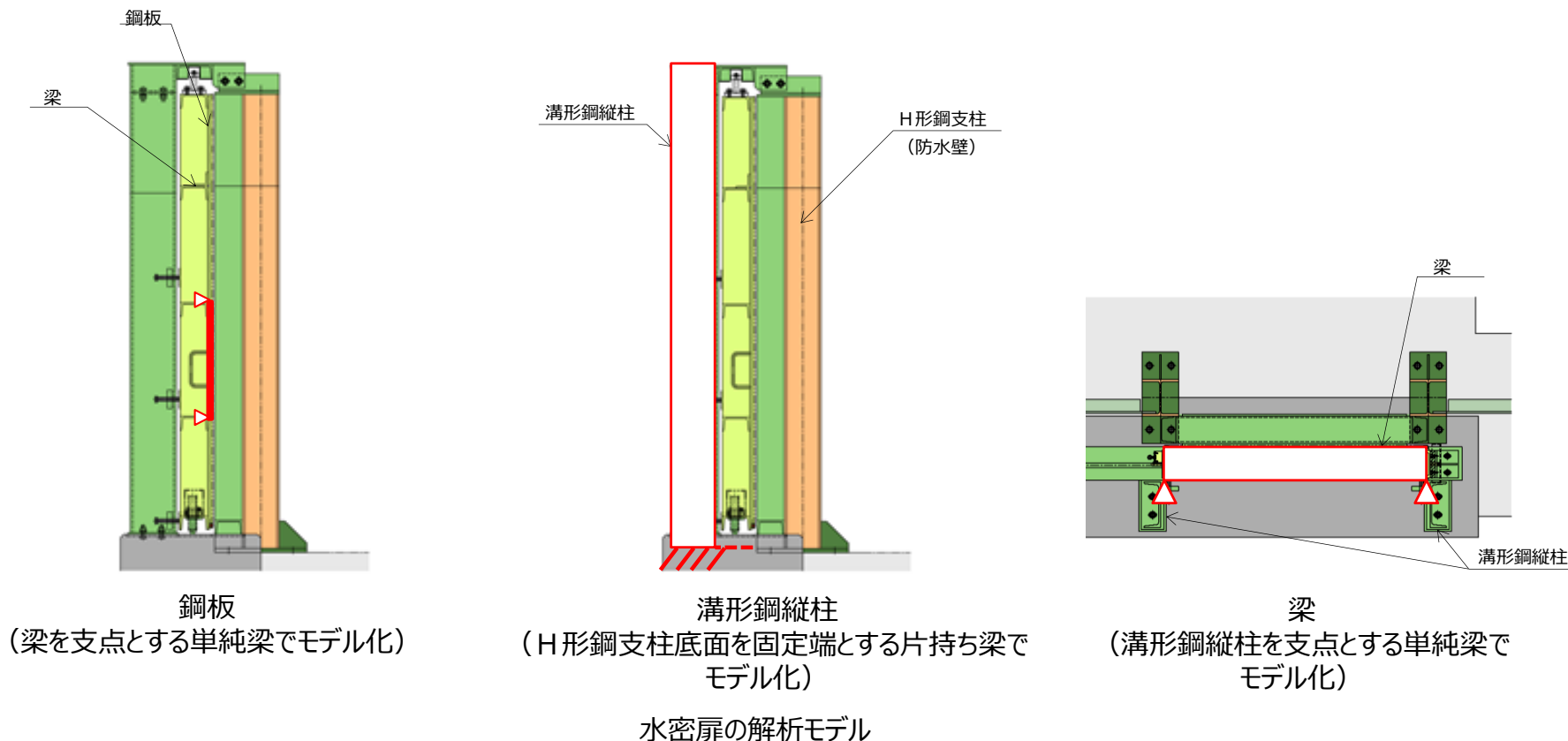


防水壁の解析モデル

# 防水壁及び水密扉の設計方針及び構造成立性の見通し（9/12）

## （4）水密扉のモデル化方針

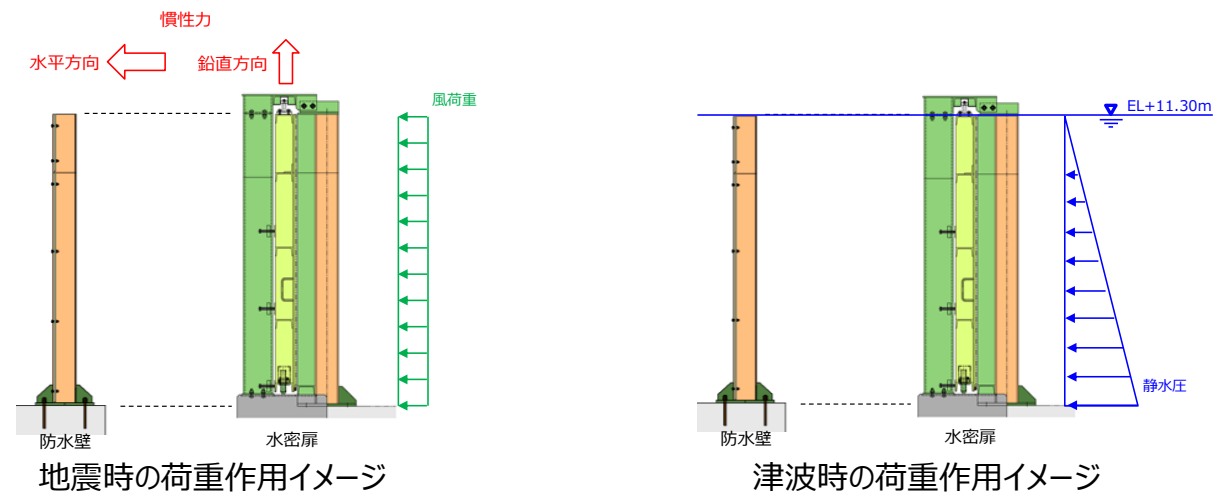
- 水密扉について、鋼製扉は鋼板を溝形鋼に溶接接合した一体構造とし、戸当たりは取水槽にボルトで固定するとともに、防水壁のH形鋼支柱に溶接接合して剛性を高めた構造とする。
- 鋼製扉及び戸当りは、取水槽に基礎ボルトで固定した縦柱と締付けボルトにて接合する。
- よって、水密扉の挙動についても、地震動により一体的に応答するモードとなることから、下図に示す梁や版のモデルにより、その挙動を適切に評価することが可能である。



# 防水壁及び水密扉の設計方針及び構造成立性の見通し (10/12)

## (5) 評価方法

- 地震時の検討では、基準地震動  $S_s$  に対し、部材の発生応力度が許容限界を超えないことを確認する。防水壁及び水密扉の構造成立性の見通しの確認においては、下図に示すイメージのとおり、基準地震動  $S_s$  に対する2号炉取水槽の地震応答解析から得られた取水槽上端の最大応答加速度を静的に防水壁及び水密扉に作用させて評価する。
- 津波時の検討では、**入力津波**に対し、部材の発生応力度が許容限界を超えないことを確認する。構造成立性の見通しの確認においては、下図に示すイメージのとおり、2号炉取水槽の最大入力津波高さ (EL+10.60m) に参照する裕度 (0.64m) を考慮した水位EL+11.3mによる静水圧を防水壁及び水密扉に作用させて評価する。
- 地震時及び津波時における作用荷重を比較すると、下表に示すとおり、津波時の作用荷重の方が大きいことから、構造成立性の見通しの確認においては、津波時について評価を行う。



地震時と津波時の作用荷重比較

浸水防止壁 概算重量	地震時					津波時			評価
	設計震度	荷重		荷重 (水平慣性力 + 風荷重)	下端 モーメント	設計水位	荷重 (静水圧合力)	下端 モーメント	
		慣性力	風荷重 合力						
5.5 kN	$K_h=1.30$ $K_v=0.69$	Ph=7.15 kN Pv=3.80 kN	6.41 kN	13.56 kN	16.95 kN・m	EL+11.30m	47.34 kN	39.45 kN・m	地震時荷重 < 津波時荷重

# 防水壁及び水密扉の設計方針及び構造成立性の見通し（11/12）

## （6）評価式

- 防水壁及び水密扉の評価は、前述のとおり、「鋼構造設計規準－許容応力度設計法－（（社）日本建築学会，2005改定）」に基づき行う。評価式の概要を以下に示す。

### ・曲げに対する評価式

防水壁及び水密扉の各部位に生じる曲げ応力度を下式から算定し、右表に示す鋼材の短期許容応力度以下であることを確認する。

$$\sigma = \frac{M}{Z}$$

ここに、 $\sigma$ ：曲げ応力度、 $M$ ：曲げモーメント、 $Z$ ：断面係数

### ・せん断に対する評価式

防水壁及び水密扉の各部位に生じるせん断応力度を下式から算定し、右表に示す短期許容応力度以下であることを確認する。

$$\tau = \frac{Q}{A}$$

ここに、 $\tau$ ：せん断応力度、 $Q$ ：せん断力、 $A$ ：断面積

### ・応力度の組合せに対する評価式

防水壁及び水密扉の各部位に生じる曲げ応力度及びせん断応力度から、組合せ応力度を下式から算定し、右表に示す短期許容応力度以下であることを確認する。

$$\sigma_x = \sqrt{\left(\frac{M}{Z}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{Q}{A}\right)^2}$$

ここに、 $\sigma_x$ ：組合せ応力度

曲げに対する短期許容応力度

防水壁及び水密扉の使用材料	短期許容応力度 (N/mm <sup>2</sup> )
	曲げ
SS400 (板厚t≤40mm)	235

せん断に対する短期許容応力度

防水壁及び水密扉の使用材料	短期許容応力度 (N/mm <sup>2</sup> )
	せん断
SS400 (板厚t≤40mm)	135

組合せ応力度に対する短期許容応力度

防水壁及び水密扉の使用材料	短期許容応力度 (N/mm <sup>2</sup> )
	組合せ
SS400 (板厚t≤40mm)	235

# 防水壁及び水密扉の設計方針及び構造成立性の見通し（12/12）

## （7）評価結果

- 防水壁及び水密扉は、以下に示すとおり、地震荷重より大きい津波荷重に対して十分な安定性を有しており、構造成立性の見通しがあることを確認した。
- なお、本評価結果は暫定条件を用いた評価結果であることから、正式条件を用いた評価結果は詳細設計段階で示す。

### 評価結果

評価対象部位		仕様（案）	照査結果				
			照査項目	最大発生値 (N/mm <sup>2</sup> )	許容値 (N/mm <sup>2</sup> )	照査値（発生値）/ （許容値）	判定 (照査値<1.00)
防水壁	鋼板	PL-9	曲げ	32.2	235	0.14	OK
			せん断	0.4	135	0.01	OK
	梁	L-65×65×8	曲げ	158.1	235	0.68	OK
			せん断	1.4	135	0.02	OK
			組合せ	158.1	235	0.68	OK
	H形鋼支柱	H-200×200×8×12	曲げ	83.6	235	0.36	OK
			せん断	33.6	135	0.25	OK
			組合せ	101.9	235	0.44	OK
	水密扉	鋼板	PL-9	曲げ	74.4	235	0.32
せん断				0.8	135	0.01	OK
梁		[-150×75×6.5×10	曲げ	31.7	235	0.14	OK
			せん断	11.5	135	0.09	OK
			組合せ	37.5	235	0.16	OK
溝形鋼縦柱		[-250×90×9×13	曲げ	59.1	235	0.26	OK
			せん断	11.7	135	0.09	OK
			組合せ	62.5	235	0.27	OK

# 防波堤の有無による影響を考慮した対応策の選定 (1号炉)

- 1号炉における防波堤の有無による影響を考慮した対応策の選定の考え方を下表に示す。
  - 運用対応によるメリット及び設備対応によるデメリットを検討した上で、一定期間内※に対応する必要があることを踏まえ、防波堤損傷後の対応として時間的な制約がない、設備対応を選定。 ※：敷地近傍の地震による防波堤損傷後に日本海東縁部に想定される地震による津波が襲来するまでの期間内
  - 設備対応のうち、第828回審査会合においては、取水槽漸拡ダクト部の下流側への流路縮小工の設置を選定していたが、より確実に入力津波高さを敷地高さ以下に低減可能かつ施工品質の確保が可能な取水管端部への流路縮小工の設置へ見直し選定。なお、上記に伴い、取水槽漸拡ダクト部の下流側への流路縮小工の設置を取止め。

表 1号炉における防波堤の有無による影響を考慮した対応策の選定の考え方等

1号炉の経路からの津波の流入防止に対する対応	運用対応		設備対応				
	防波堤の補修	角落とし設置	取水槽への防水壁の設置	取水槽への流路縮小工の設置	取水管内への流路縮小工の設置	取水管端部への流路縮小工の設置	
対応の効果	・入力津波高さの低減		・許容津波高さの向上	・入力津波高さの低減			
①	メリット	・入力津波高さが敷地高さ以下となる ・通常時、循環水ポンプの運転可能 ・常設による設備対応が不要となる		・定期的な訓練による技量の維持が不要かつ時間的制約がない			
	デメリット	・一定期間内に補修を完了する必要がある	・一定期間内に角落としを設置する必要がある ・定期的な訓練により技量の維持が必要となる	・地上で施工可能	・気中で施工可能	・開口部上流での設置となるため、確実な水位低減効果が見込める	
②	成立性見通し	×	○	○	○	△	○
		・損傷の程度により、一定期間内に補修を完了できない可能性がある	・開口率を3割程度とすることにより、入力津波高さを敷地高さ以下とすることが可能 ・角落し時の耐震性の確保が可能 ・角落としは、汎用クレーンで設置可能	・入力津波高さが敷地高さを超える	・開口部(取水槽漸拡ダクト部)下流での設置となり、水位低減効果の確実性が課題	・取水管(鋼管)内への縮小工の設置困難 ・水中施工のため品質確保が課題	・水中施工のため品質確保が課題
	悪影響	- (悪影響なし)	- (悪影響なし)	- (悪影響なし)	- (悪影響なし)	- (悪影響なし)	- (悪影響なし)
評価結果	×	○	○	○	△	◎	
	・一定期間内に防波堤の補修を完了できない可能性がある。	・一定期間内に角落としを設置する必要があるという条件付きではあるが、入力津波高さを敷地高さ以下とすることが可能である。	・入力津波高さが敷地高さを超えるというデメリットはあるが、1号炉取水槽からの流入防止が可能である。	・開口部(取水槽漸拡ダクト部)下流での設置となり水位低減効果の確実性にデメリットはあるが、入力津波高さを敷地高さ以下とすることが可能である。	・開口部上流での設置となるため、水位低減効果にメリットがあり、確実に入力津波高さを敷地高さ以下とすることが可能である。 ・取水管(鋼管)内への流路縮小工の設置が困難という課題がある。	・開口部上流での設置となるため、水位低減効果にメリットがあり、確実に入力津波高さを敷地高さ以下とすることが可能である。 ・流路縮小工の位置、構造及び取付方法を工夫することにより水中施工での品質確保が可能である。	

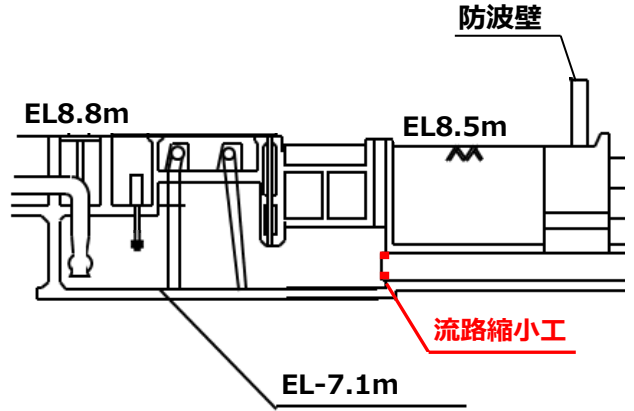
# 1号炉取水槽流路縮小工設置の概要とその効果 (1/2)

- 1号炉取水管端部への流路縮小工設置による入力津波高さ低減効果の成立性を以下の通り確認した。
  - 影響検討の結果、開口率を7割程度以下とすることで溢水防止対策の成立性見通しを確認したことから、保守的に開口率を5割に設定する。
  - 流路縮小工を設置することから、循環水ポンプの運転は行わない。

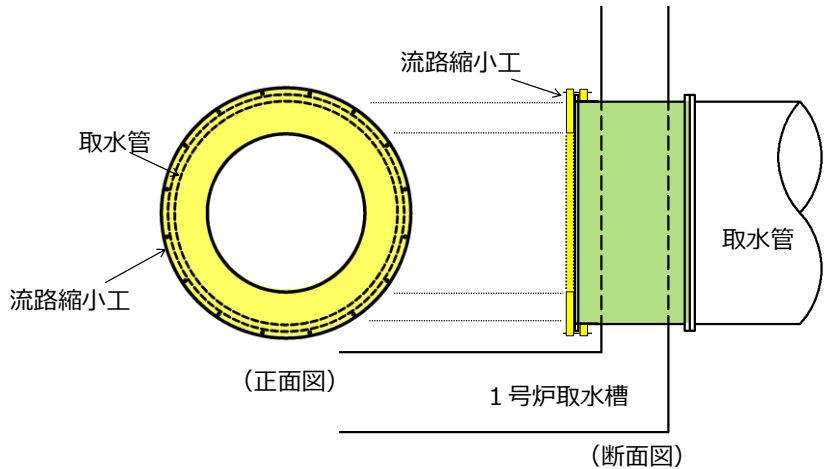
計算条件

波源	基準津波 1
地形変化	防波堤無し (防波堤の損傷状態を考慮)
潮位変動	+0.72m (潮位のばらつきを含む)
地殻変動	無し
貝付着	無し
循環水ポンプ状態	停止

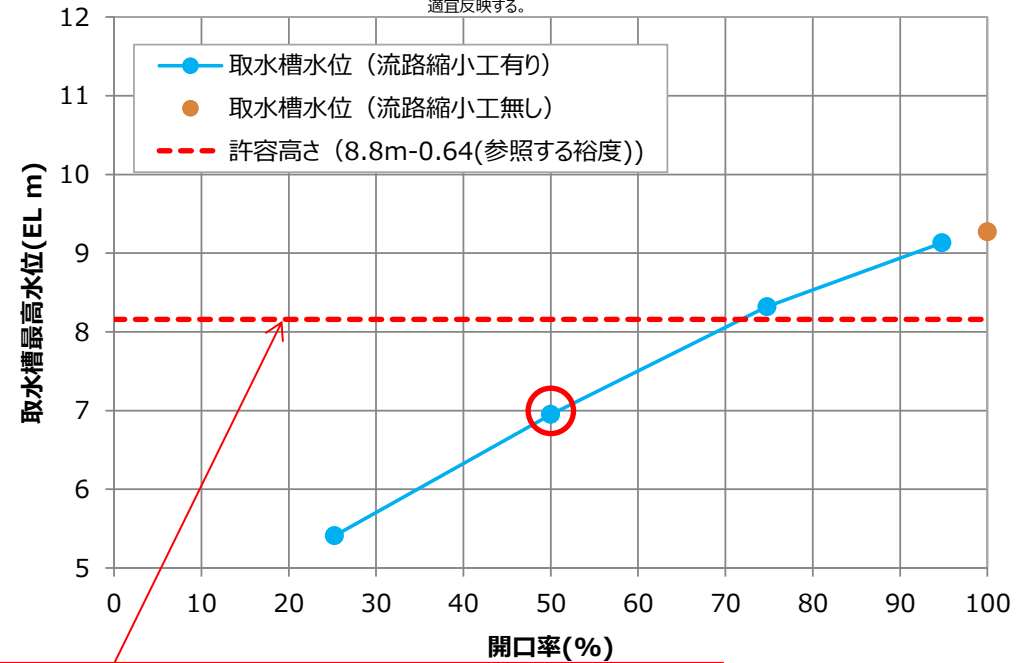
※ 潮位については、「島根原子力発電所2号炉 津波による損傷の防止 論点7 「入力津波の設定プロセス及び結果の妥当性」(現在、審議中)の審査結果を適宜反映する。



1号炉取水槽への流路縮小工設置イメージ



流路縮小工 構造イメージ



天端高さ8.8m-外郭防護の裕度評価0.64m≒8.1m以下

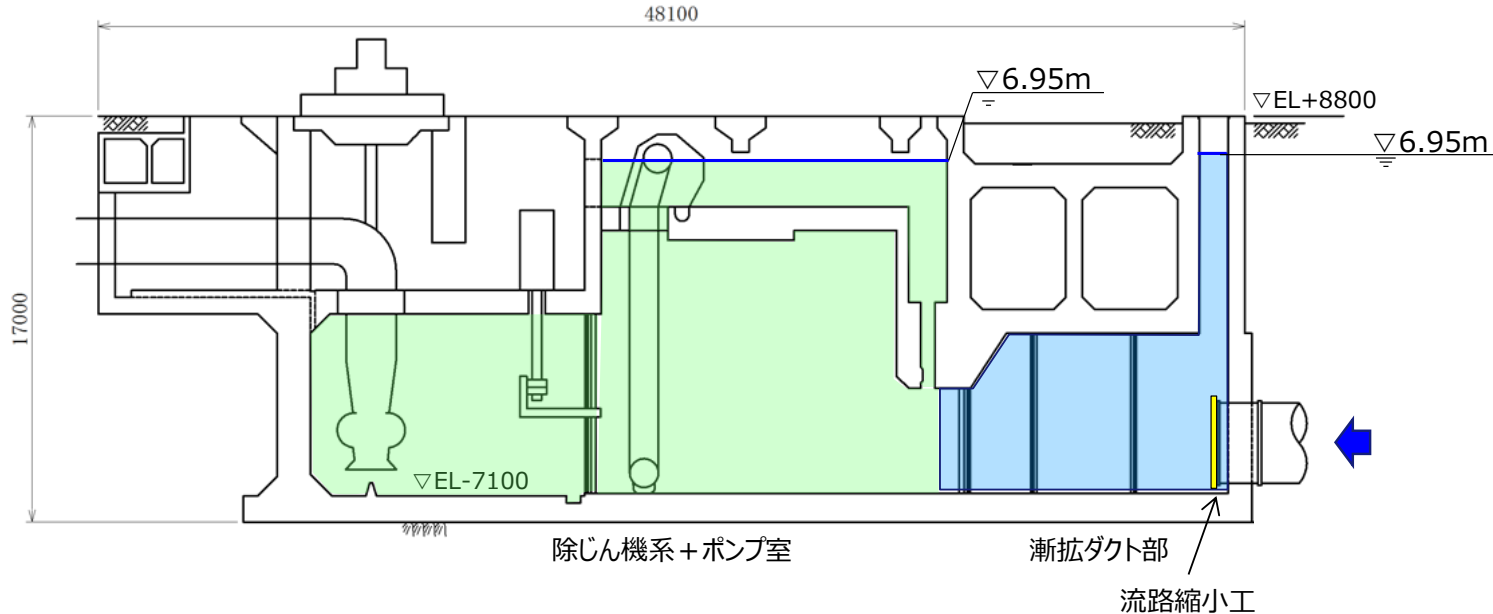
開口率変化に伴う入力津波高さ低減効果



# 1号炉取水槽流路縮小工設置の概要とその効果（2/2）

- 1号炉取水槽流路縮小工設置による入力津波高さ低減効果を以下に示す。
- 流路縮小工設置による浸水範囲を以下に示す。漸拡ダクト部及び除じん機系+ポンプ室の水位はともにEL+7.0mとなり、流路縮小工の設置により入力津波高さが低減され、取水槽の天端高さを越えないことを確認した。
  - 管路計算に関するモデル化の考え方、計算条件等を次頁以降に示す（コメントNo.81に対する回答）。

	1号炉取水槽における 入力津波高さ	1号炉取水槽 津波許容高さ	評価結果
対策前	EL+9.2m	EL+8.8m (取水槽天端高さ)	取水槽天端高さを越えて敷地に津波が流入する。
対策後	EL+7.0m (EL+6.95m)		参照する裕度(0.64m)を考慮した場合においても、敷地へ津波が流入しない。



1号炉取水槽流路縮小工による浸水範囲※

※ 漸拡ダクト部、除じん機系+ポンプ室の最大水位上昇量を図に示す。（計算条件：基準津波1 防波堤無し 貝付着無し 循環水ポンプ停止 開口率50%）

# 流路縮小工を考慮した管路計算（基礎方程式及び解析コード）

- 流路縮小工による入力津波高さの低減効果を確認するため、流路縮小工を考慮した管路計算を実施する。
- 基礎方程式等の数値計算手法は、「原子力発電所の津波評価技術2016（土木学会原子力土木委員会津波評価部会，2016）」に基づき下表のとおりとする。取水経路は開水路区間と管路区間が混在するため、微小区間に分割した水路の各部分が、開水路状態か管路状態かを逐次判定し、管路区間はその上下流端の開水路区間の水位（自由水面の水位）を境界条件として流量計算を行い、開水路区間は、開水路の一次元不定流の式により流量・水位を計算する。また、水槽及び立坑部は、水面面積を鉛直方向に積算した水位-容積関係を用いて、水槽及び立坑部に接続する水路の流量合計値から水位を算定する。なお、解析コードは、先行審査で実績のある「SURGE」を使用する。
- 解析モデルについて、管路は管路延長・管路勾配・管径を考慮したモデルとし、各管路モデルで摩擦による損失を考慮する。摩擦損失以外の損失は次頁以降の解析モデルに示す各節点において考慮する。また、水槽及び立坑部は、水槽及び立坑部の面積を鉛直方向の分布に応じて考慮し、次頁以降の解析モデル図に示す池としてモデル化を行い、池モデル内においては、保守的に損失水頭は生じないこととする。
- 管路計算に当たっては、取水口における水位の時刻歴波形を入力条件、取水槽におけるポンプ取水量を境界条件とする。

## 基礎方程式

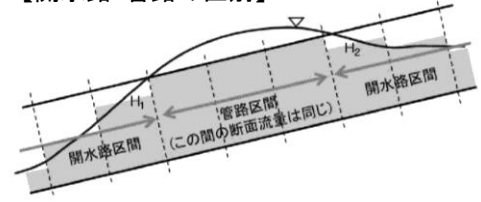
開水路	管路	水槽及び立坑部
<b>運動方程式</b> $\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gA \left( \frac{n^2  v v}{R^{4/3}} + \frac{1}{\Delta x} f \frac{ v v}{2g} \right) = 0$ <b>連続式</b> $\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$	<b>運動方程式</b> $\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gA \left( \frac{n^2  v v}{R^{4/3}} + \frac{1}{\Delta x} f \frac{ v v}{2g} \right) = 0$ <b>連続式</b> $\frac{\partial Q}{\partial x} = 0$	<b>連続式</b> $A_p \frac{dH_p}{dt} = Q_s$ ここに $A_p$ : 水槽の平面積（水位の関数となる） $Q_s$ : 水槽へ流入する流量の総和 $H_p$ : 水槽水位 $t$ : 時間

$t$ : 時間,  $Q$ : 流量,  $v$ : 流速,  $x$ : 管底に沿った座標,  $A$ : 流水断面積,  $z$ : 管底高,  $g$ : 重力加速度,  $n$ : マニングの粗度係数,  $R$ : 径深  
 $H$ : 圧力水頭+位置水頭（管路の場合）, 位置水頭（開水路の場合）,  $\Delta x$ : 水路の流れ方向の長さ,  $f$ : 局所損失係数

### 【管路計算モデルイメージ】

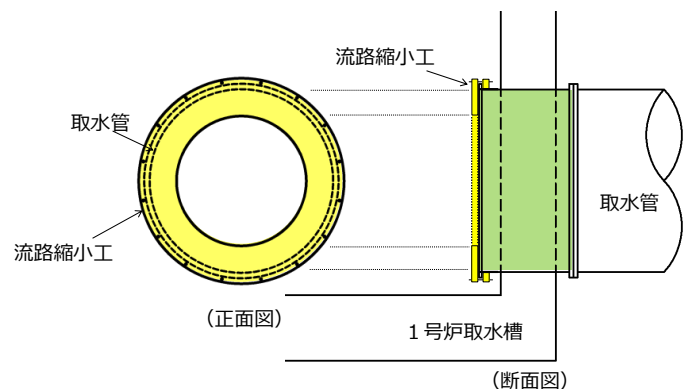
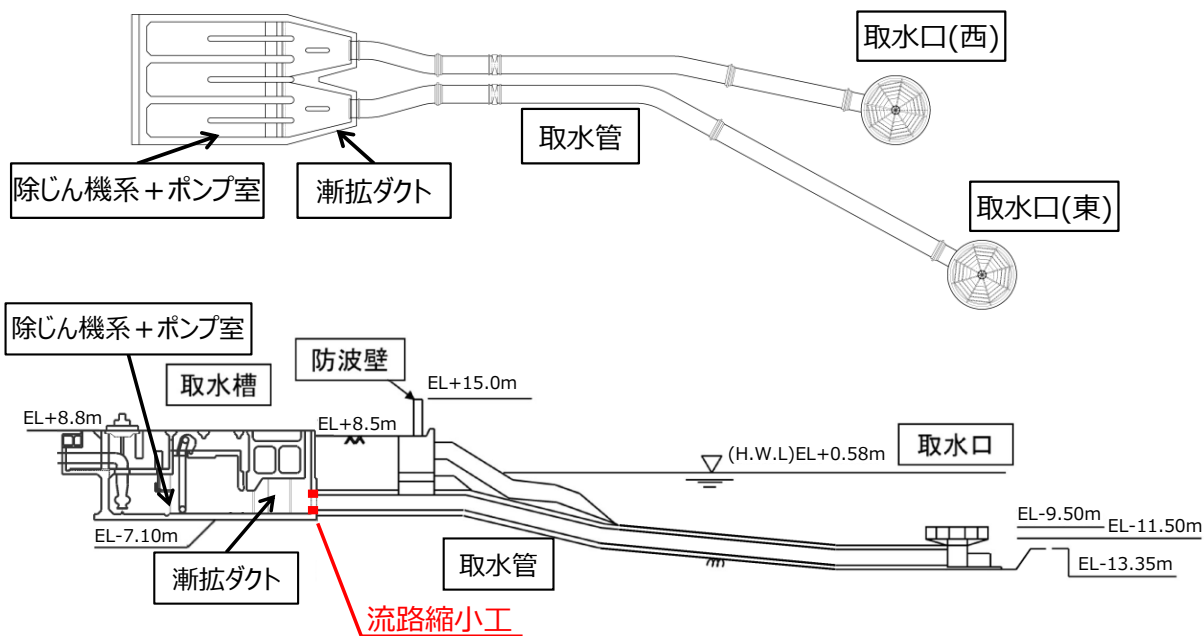


### 【開水路・管路の区別】

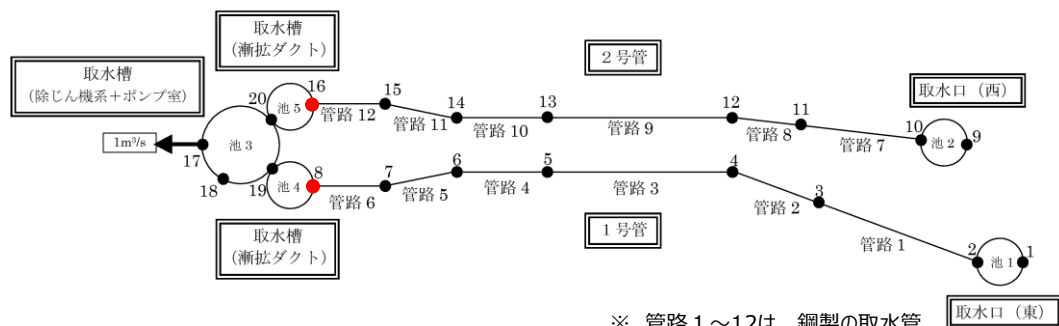


# 流路縮小工を考慮した管路計算（管路解析モデル）

- 1号炉取水槽の平面図，断面図及び管路解析モデルを以下に示す。
- 取水管端部へ設置する流路縮小工の損失については，節点8及び節点16において考慮する。

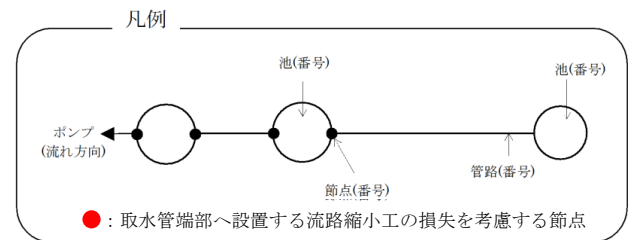


流路縮小工 構造イメージ



※ 管路1～12は，鋼製の取水管

1号炉取水槽の平面図，断面図及び管路解析モデル



# 流路縮小工を考慮した管路計算（計算条件）

- 1号炉取水管端部の流路縮小工を考慮した管路計算に当たっては、以下に示す条件を基に解析を実施した。

## 管路計算における計算条件

項目	計算条件
計算領域	取水口 ~ 取水管 ~ 取水槽
計算時間間隔	0.01秒
取水槽側境界条件 (ポンプ取水量)	循環水ポンプ停止時：1.0m <sup>3</sup> /s (流路縮小工を設置することから、循環水ポンプの運転は行わない。)
摩擦損失係数 (マンングの粗度係数)	(貝付着なし) 取水口※1, 取水管※1 : 0.014m <sup>-1/3</sup> ・s 取水槽※2 : 0.015m <sup>-1/3</sup> ・s (貝付着あり) 取水口, 取水管, 取水槽 : 0.02 m <sup>-1/3</sup> ・s
貝の付着代	点検結果を踏まえ5cmを考慮
想定する潮位条件	朔望平均満潮位EL+0.58mに潮位のばらつき+0.14mを考慮※3
計算時間	日本海東縁部に想定される地震による津波は地震発生後6時間まで 海域活断層から想定される地震による津波は地震発生後3時間まで

※1 鋼製 ※2 コンクリート製

※3 潮位については、「島根原子力発電所2号炉 津波による損傷の防止 論点7「入力津波の設定プロセス及び結果の妥当性」(現在、審議中)の審査結果を適宜反映する。

# 流路縮小工を考慮した管路計算（損失係数）

➤ 1号炉取水管端部へ流路縮小工を設置するため、解析モデルに以下のとおり反映する。

■ 流路縮小工は、漸拡ダクトと取水路の境界において、急縮・急拡損失として考慮する。

## ● 急縮損失係数

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- に基づき、下表により設定する。

急縮損失係数  $f_{sc}$

$D_2 / D_1$	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

$D_2 / D_1 = \text{約}2.4\text{m} / 3.4\text{m} \approx 0.71$  ( $D_1$  : 急縮前の管の径 (3.4m) ,  $D_2$  : 急縮後の管の径 (約2.4m) )

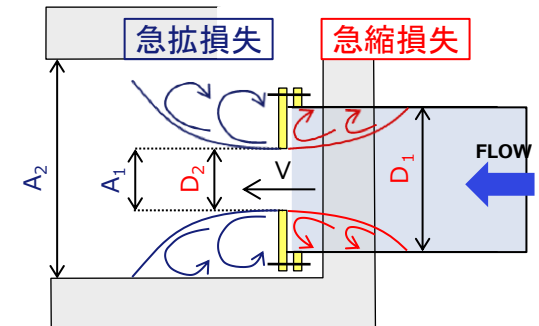
$f_{sc}$ は上表を踏まえ、内挿し0.282とする。

## ● 急拡損失係数

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- に基づき、下式により設定する。

$$f_{se} = \left\{ 1 - \left( \frac{A_1}{A_2} \right) \right\}^2 = \left\{ 1 - \left( \frac{4.4}{33.5} \right) \right\}^2 \approx 0.754 \quad (A_1 : \text{急拡前の管断面積 (4.4m}^2\text{)} , A_2 : \text{急拡後の管断面積 (33.5m}^2\text{)})$$

考慮する損失	損失水頭算定公式	損失係数 ( $f$ )
急縮	$h_{sc} = f_{sc} \frac{V^2}{2g}$	0.282
急拡	$h_{se} = f_{se} \frac{V^2}{2g}$	0.754



急縮・急拡のイメージ

# 1号炉取水槽流路縮小工設置による取水機能への影響

➤ 1号炉取水槽流路縮小工設置による取水機能への影響がないことを以下のとおり確認した。なお、1号炉に貯蔵中の使用済燃料の冷却は十分進んでおり、崩壊熱による発熱量は小さいため、使用済燃料プールの冷却が停止しても、その水温の上昇は緩やかな状況である。

■ 流路縮小工設置による流路の断面積縮小に伴い、流速が変化するが、対策後は1号炉循環水ポンプは全台停止する運用とすることから、流速は小さくなり、損失水頭は低下するため、流路縮小工設置後に取水槽内の水位が低下することはない。

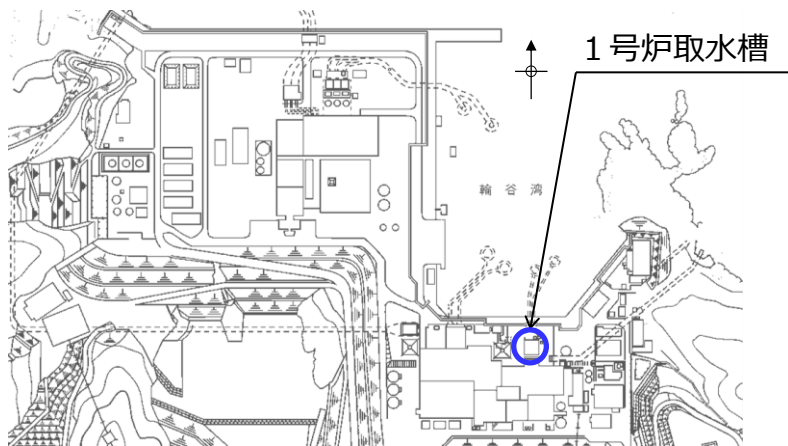
	流量	断面積	流速
対策前	28m <sup>3</sup> /s (循環水ポンプ運転)	約17.63m <sup>2</sup>	約1.59m/s
対策後	1m <sup>3</sup> /s (循環水ポンプ停止)	約8.81m <sup>2</sup>	約0.11m/s

■ 流路縮小工の開口部は、1箇所あたり直径約2.4mであり、これまでの点検結果から、海生生物の付着代は5cm以下であることを確認していることから、海生生物付着による閉塞の可能性はない。

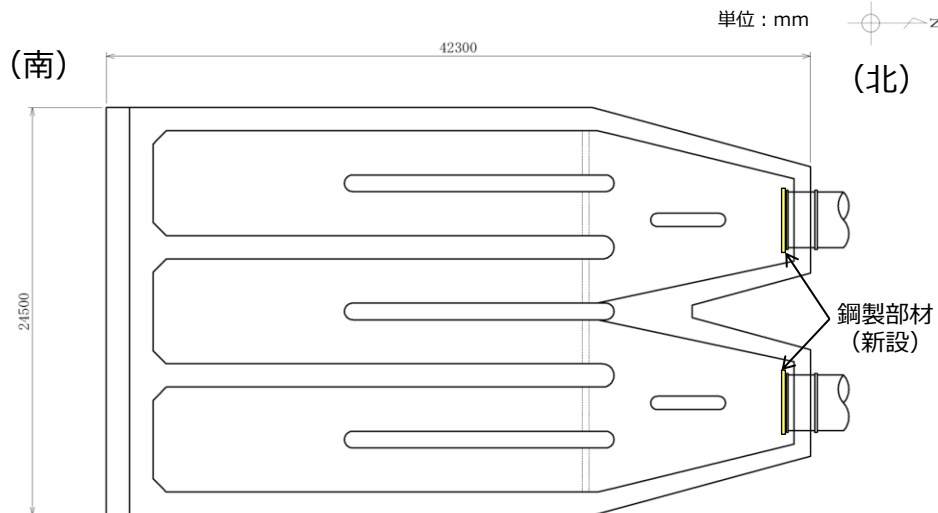
# 1号炉取水槽流路縮小工の構造概要

➤ 1号炉取水槽流路縮小工の構造概要を以下に示す。

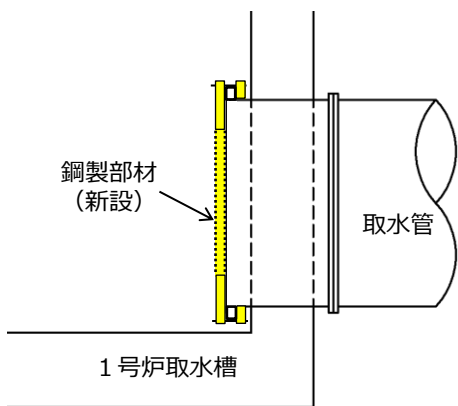
- 1号炉取水槽内の津波流入防止対策として、以下に示すとおり、取水管端部に流路を縮小する鋼製部材を設置する。



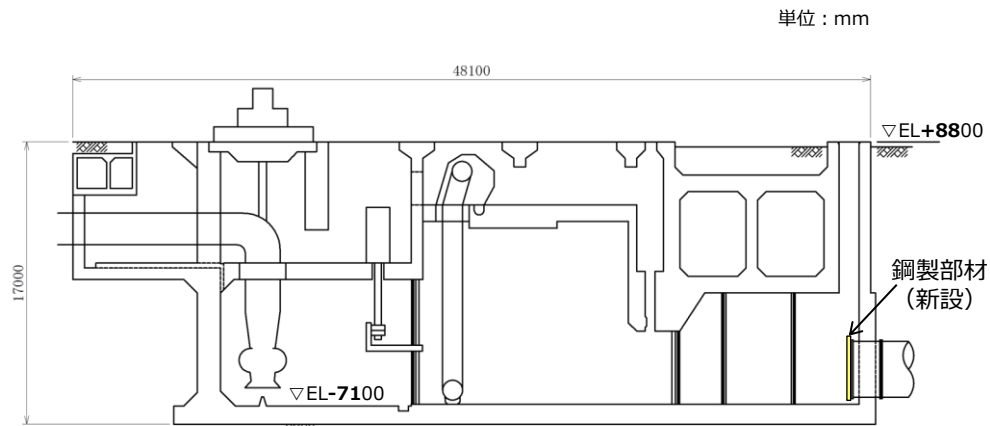
1号炉取水槽位置図



1号炉取水槽 平面図



1号炉取水槽流路縮小工 拡大イメージ図



1号炉取水槽 縦断面図



# 流路縮小工の設計方針及び構造成立性の見通し（1/11）

➤ 1号炉取水槽流路縮小工の設計方針及び構造成立性の見通しについて以下に示す。

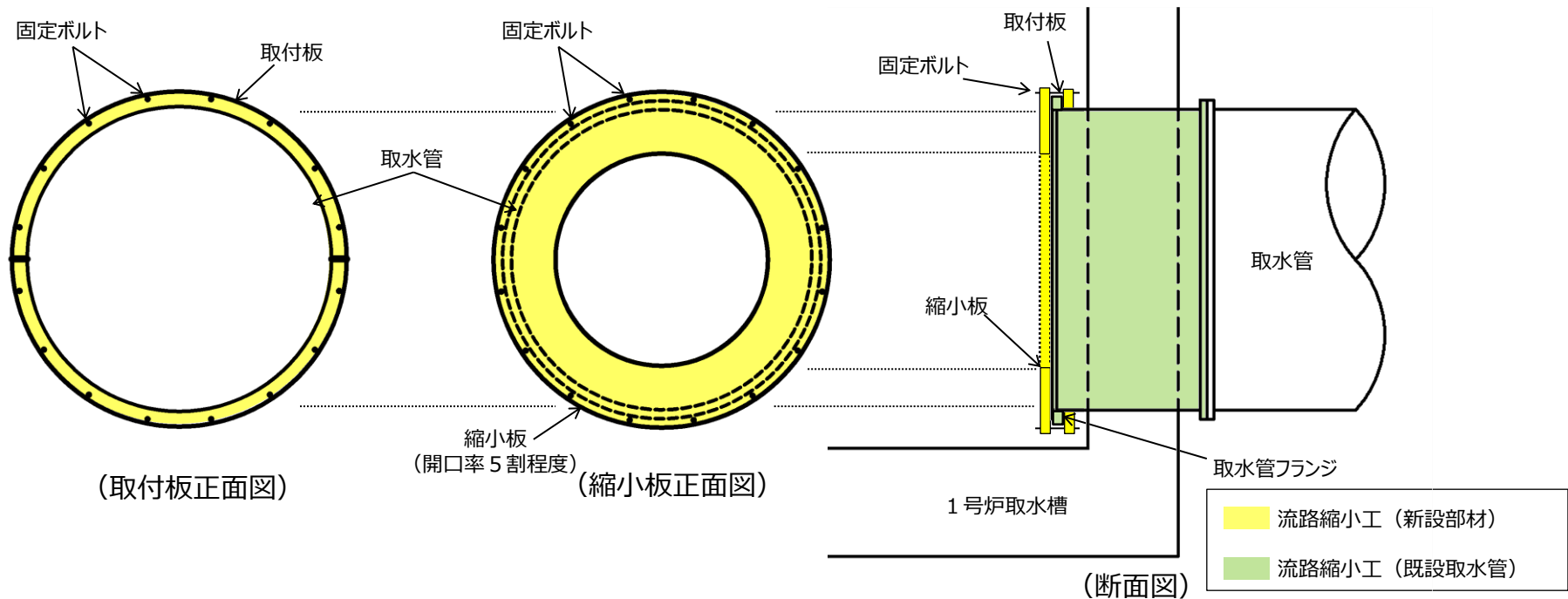
1. 1号炉取水槽流路縮小工に要求される機能及び設計の基本的考え方

■ 1号炉取水槽流路縮小工（以下、「流路縮小工」と記す）は津波防護施設であることから、基準地震動 $S_s$ による地震荷重や入力津波による津波荷重に対し、構成する部材が概ね弾性域内に収まるよう設計する。

2. 流路縮小工の概要

■ 流路縮小工は開口率5割程度とした縮小板、取付板及び固定ボルトで構成する鋼製部材を取水管端部に設置することから、下図に示す対象部位を津波防護施設とする。

■ 新設部材の設置は、取水管フランジの両側に取り付けた縮小板と取付板を固定ボルトで固定する。



1号炉取水槽流路縮小工 構造例

# 流路縮小工の設計方針及び構造成立性の見通し（2/11）

## 3. 流路縮小工の設計方針及び構造成立性の見通し

### （1）流路縮小工における構造成立性の見通しの確認に関する概要

- ここでは、地震荷重や流水圧等の津波荷重により流路縮小工を構成する部材が曲げやせん断等により損傷する以外に、津波時流速が作用した場合の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、流路縮小工各部位が損傷により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縮小部の流速により躯体安定性が確保できない等）を整理する。これらの損傷モードの発生可能性を評価し、設計・施工上の配慮事項を整理した上で、構造成立性を示す。

### （2）津波時流速が作用した場合の構造成立性に関する既往知見の整理

流路縮小工の各部位が損傷して要求機能を喪失しうる事象の抽出にあたり、津波時流速が作用した場合の構造成立性に関する既往知見を整理した結果を以下に示す。

- 津波時には、流路縮小工による開口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。
- 「建設省河川砂防技術基準（案）同解説 設計編[ I ]」によれば、ダム放水の放水設備について、流水に接する構造物の表面は、流水による洗掘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、渦や流水による摩耗や浸食の対策を考える必要があるとしている。島根2号炉の津波時に流入する海水については、参考資料に示すとおり、輪谷湾の底質は岩及び砂礫で構成されており、島根2号炉の基準津波における砂移動の検討結果から取水口及び取水槽付近の砂の最大堆積厚さが小さく、砂の流入は少ないことから、海水に含まれる砂等による影響は小さいと判断する。
- 流路縮小工は、流路断面が縮小されることから、流路縮小工前面と流路縮小工による開口部の間で津波流速の変化が生じる。「ダム・堰施設技術基準（案）平成23年版（（社）ダム・堰施設技術協会）」によれば、高流速の水が流れる放流管内では、管路の湾曲や壁面の凹凸によって局所的に圧力降下が生じ、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著しい損傷を与えるとしている。

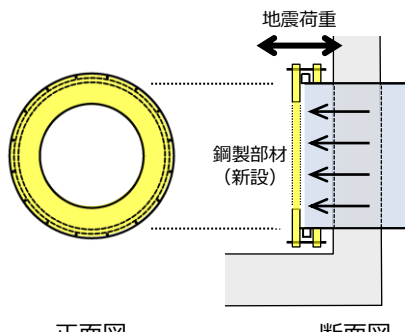
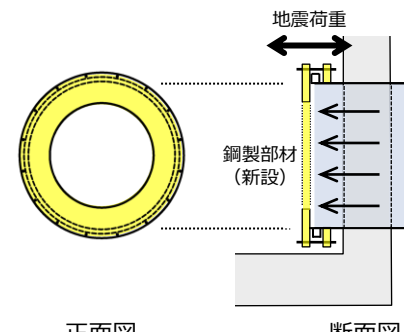
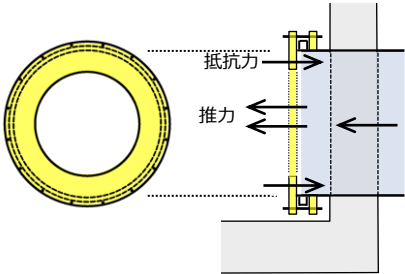
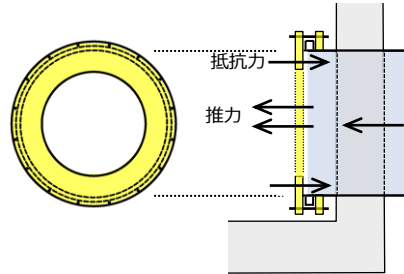
以上を踏まえ、流路縮小工各部位が損傷し要求機能を喪失しうる事象を抽出し、これに対する設計・施工上の配慮事項を整理した。

# 流路縮小工の設計方針及び構造成立性の見通し (3/11)

## (3) 要求機能を喪失しうる事象の抽出 (1/3)

前述を踏まえ、流路縮小工が損傷により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。整理結果を以下に示す。

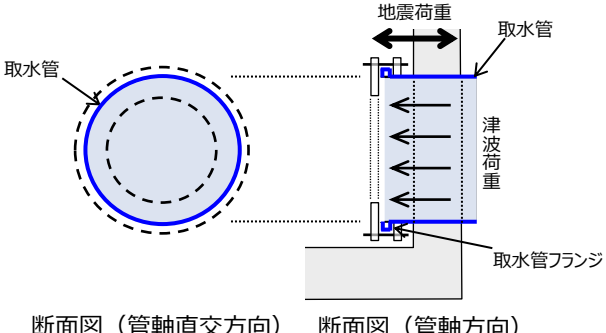
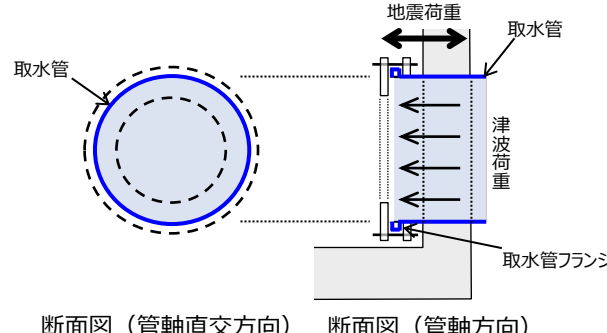
### 地震荷重や津波荷重により要求機能を喪失しうる事象と設計・施工上の配慮事項 (新設の鋼製部材)

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
新設の鋼製部材	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震荷重や津波荷重により、縮小板が曲げ破壊又はせん断破壊することで津波防護機能を喪失する。</li> <li>縮小板から伝達する荷重により、取付板及び固定ボルトが破断し、津波防護機能を喪失する。</li> </ul>  <p style="text-align: center;">正面図                      断面図</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>縮小板に生じる断面力による応力度が、許容限界以下であることを確認する。</li> <li>取付板及び固定ボルトについては、各部位に生じる断面力による応力度が、許容限界以下となるように詳細設計段階で設計する。</li> </ul>  <p style="text-align: center;">正面図                      断面図</p>	<p>○ (構造成立性 の見通し の確認 においては縮 小板を評 価対象と する)</p>
新設の鋼製部材	<ul style="list-style-type: none"> <li>開口部における流水の摩擦により推力が生じ、縮小板が曲げ破壊又はせん断破壊することで津波防護機能を喪失する。</li> <li>縮小板から伝達する荷重により、取付板及び固定ボルトが破断し、津波防護機能を喪失する。</li> </ul>  <p style="text-align: center;">正面図                      断面図</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>津波時及び重畳時の津波荷重として、流水の摩擦による推力を考慮する。</li> </ul>  <p style="text-align: center;">正面図                      断面図</p>	<p>○ (構造成立性 の見通し の確認 においては縮 小板を評 価対象と する)</p>

# 流路縮小工の設計方針及び構造成立性の見通し (4/11)

## (3) 要求機能を喪失しうる事象の抽出 (2/3)

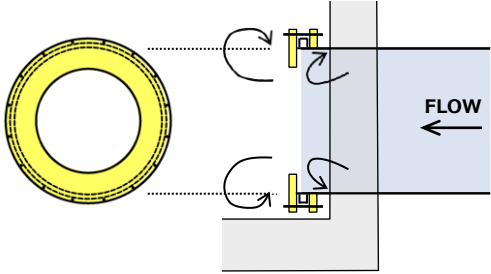
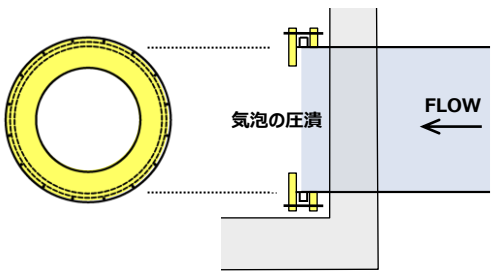
地震荷重や津波荷重により要求機能を喪失しうる事象と設計・施工上の配慮事項 (取水管)

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
取水管	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震荷重や新設の鋼製部材から伝達する津波荷重により、取水管が曲げ破壊、せん断破壊又は引張破壊することで、津波防護機能を喪失する。</li> <li>地震荷重や新設の鋼製部材から伝達する津波荷重により、取水管フランジが曲げ破壊又はせん断破壊することで、津波防護機能を喪失する。</li> </ul>  <p>断面図 (管軸直交方向)    断面図 (管軸方向)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>取水管に生じる断面力による応力度が、許容限界以下であることを確認する。</li> </ul>  <p>断面図 (管軸直交方向)    断面図 (管軸方向)</p>	○

# 流路縮小工の設計方針及び構造成立性の見通し（5/11）

## （3）要求機能を喪失しうる事象の抽出（3/3）

### 津波時流速により要求機能を喪失しうる事象と設計・施工上の配慮事項（流路縮小工全体）

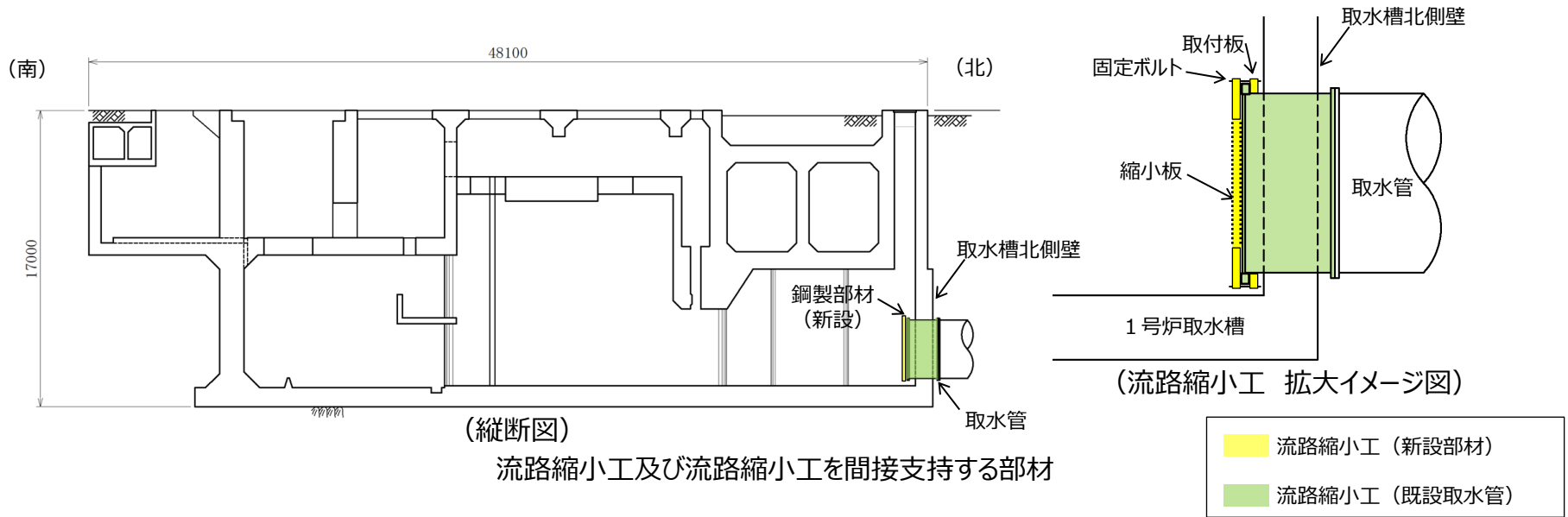
設備の名称	要求機能を喪失しうる事象	設計・施工上の配慮	照査
流路縮小工全体	<p>・急縮部・急拡部で発生する砂や貝を含んだ渦や流水による摩耗(エロージョン摩耗※<sup>1</sup>)によって形状に変化が生じ、津波防護機能を喪失する。</p>  <p>正面図                      断面図</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・「建設省河川砂防技術基準（案）同解説 設計編[ I ]」によれば、渦や流水による摩耗は経年劣化による損傷である。常時の流路縮小工による開口部の流速が0.11m/sと遅いこと、前述のとおり流水に砂がほとんど含まれないこと及び貝については定期的な清掃により貝を除去する保守管理方針とすることから、摩耗による流路縮小工の健全性への影響は小さいと判断する。</li> <li>・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。「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、管の摩耗による板厚の減少に対して余裕厚を確保する方法が用いられていることから、新設の鋼製部材に対して適切な余裕厚を詳細設計段階で設定する。</li> </ul>	-
流路縮小工全体	<p>・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、流路縮小性能を喪失する(ピッチング損傷)。</p>  <p>正面図                      断面図</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・「ダム・堰施設技術基準（案）平成23年版（社）ダム・堰施設技術協会」によれば、円形断面で出口面積が3～4 m<sup>2</sup>未満の放流管を「小容量放流管」とし、小断面で管内流速が10m/sを超える場合は圧力降下を生じる可能性があるとしている。一方で、流路縮小工は円形断面で出口面積が4.5m<sup>2</sup>程度を確保し、管路解析の結果から1号炉取水槽における津波時の流速が最大でも9.4m/sであることから、圧力降下が生じる可能性は小さく、キャビテーションによる流路縮小工の健全性への影響は小さいと判断する。</li> </ul>	-

※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物体表面に衝突することで生じる摩耗である。

# 流路縮小工の設計方針及び構造成立性の見通し (6/11)

## (4) 流路縮小工の評価方針及び許容限界 (1/2)

- ・流路縮小工は、津波防護施設であり、津波時及び地震時において開口面積を確保する必要があるため、部材が降伏しないことが求められる。流路縮小工は開口率 5 割程度とした縮小板、取付板及び固定ボルトで構成する鋼製部材を取水管端部に設置し、取水管は取水槽北側壁を貫通して設置していることから、取水槽北側壁が間接支持部材となり、部材が終局状態に至らないことが求められる。
- ・なお、流路縮小工は鋼材で構成することから、部材の許容限界は「鋼構造設計規準－許容応力度設計法－（（社）日本建築学会，2005改定）」に基づき設定し、取水槽北側壁は鉄筋コンクリート部材で構成されていることから、部材の許容限界は「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（土木学会，2005）」に基づき設定する。
- ・以上のことから、構造成立性の見通しの確認における、各部位に必要な性能に係る許容限界は、表に示すとおり設定する。



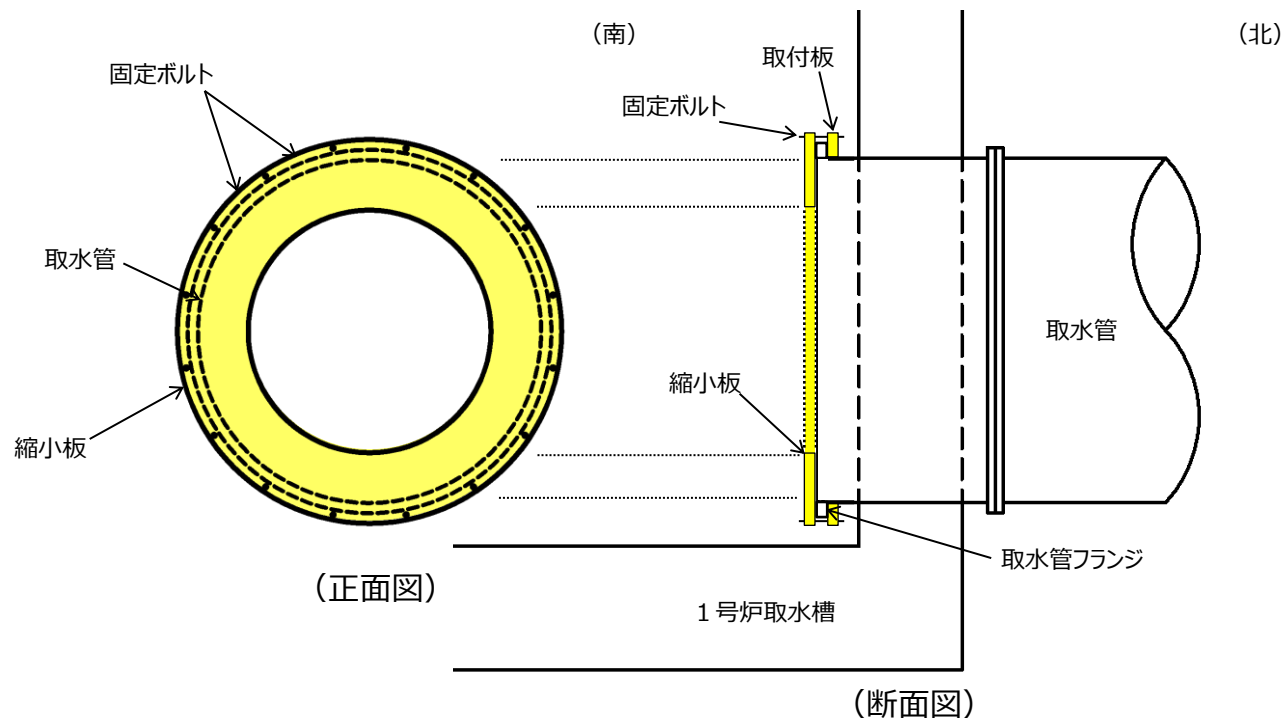
構造成立性の見通しの確認における要求機能に応じた許容限界

評価対象設備 (部位)	要求性能に対する 目標性能	許容限界			適用基準
		曲げ	せん断	引張	
流路縮小工 (縮小板)	部材が降伏しない	許容応力度	許容応力度	-	鋼構造設計規準
流路縮小工 (取水管)	部材が降伏しない	許容応力度	許容応力度	許容応力度	鋼構造設計規準

# 流路縮小工の設計方針及び構造成立性の見通し（7/11）

## （4）流路縮小工の評価方針及び許容限界（2/2）

- 流路縮小工の縮小板は、取水管端部のフランジを挟んで取付板とボルト接合し、鋼製部材が地震荷重や津波荷重により一体的に応答するモードとなることから、有孔円の固定板としてモデル化する。



縮小板のモデル化方針



# 流路縮小工の設計方針及び構造成立性の見通し（8/11）

## （5）検討ケース及び荷重の組合せ

・流路縮小工の設計においては、以下のとおり、常時荷重、地震荷重、及び津波荷重を適切に組合せて設計を行う。

- ①地震時：常時荷重＋地震荷重
- ②津波時：常時荷重＋津波荷重
- ③重畳時：常時荷重＋津波荷重＋余震荷重

・流路縮小工の設計において考慮する荷重は、以下のように設定する。

### （a）常時荷重

自重を考慮する。

### （b）地震荷重

基準地震動  $S_s$  を考慮する。構造成立性の見通しの確認においては、取水槽底版の水平方向 1 次固有周期における加速度応答スペクトルが最も大きい基準地震動  $S_s - D$  を用いる。

### （c）津波荷重

津波時の静水圧、流水圧及び流水の摩擦による推力を考慮する。

静水圧は、津波時及び重畳時において、以下の管路計算により算定された流路縮小工の上流側と下流側の水位差から算定し、上流側と下流側の水位差が最大となる時の水位差から求める。なお、重畳時は、管路計算における流路縮小工上流側の水位が最大となる時の水位差からも算定する。

・津波時（対象：日本海東縁部に想定される地震による津波（基準津波 1, 2, 3, 5, 及び 6））

流路縮小工上流側EL+7.51m、流路縮小工下流側EL-0.75m

・重畳時（対象：海域活断層に想定される地震による津波（基準津波 4））

流路縮小工上流側EL+1.64m、流路縮小工下流側EL+1.63m

流水圧は、流路縮小工が水中又は水面付近の部材で構成されることから、「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（次頁参照）により算定する。なお、津波の流速は、管路計算による流路縮小工地点の最大流速に基づき、津波時は9.5m/s、重畳時は5.5m/sと設定する。

流水の摩擦による推力は、「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）」に基づく評価式により算定する。

### （d）余震荷重

海域活断層に想定される地震による津波荷重に組み合わせる余震荷重として弾性設計用地震動  $S_d$  による荷重を設定する。

# 流路縮小工の設計方針及び構造成立性の見通し（9/11）

## 【参考】 港湾基準における流水圧の適用性について

- 「港湾の施設の技術上の基準・同解説（日本港湾協会）」によると、「水中又は水面付近の部材及び施設に作用する流れによる力は、流速の2乗に比例する力であり、流れの方向に作用する抗力がある」としている。また、「流れによる抗力は、粘性による表面抵抗と圧力による形状抵抗の和として表され、抗力係数は物体の形状、粗度、流れの方向、レイノルズ数などによって異なり、レイノルズ数が $10^3$ 程度より大きい場合は、物体の形状に応じて0.2～2.01の値を標準値として用いることができる」としている。
- 以下の観点から、流路縮小工は同基準における流水圧の適用性があると判断する。
  - ・ 流路縮小工は、水中に設置する構造物である。
  - ・ 管路計算による流路縮小工地点の最大流速発生時における縮小板付近のレイノルズ数が $10^6$ ～ $10^7$ のオーダーであり同基準に示す抗力係数の適用範囲（レイノルズ数が $10^3$ 程度より大きいこと）である。
- なお、流水圧の算定に当たっては、保守的に抗力係数の最大値である2.01を採用する。

### 流水圧の算定式

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

$F_D$  : 物体に作用する流れの方向の抗力(kN)

$C_D$  : 抗力係数(保守的に最大値2.01を採用する)

$\rho_0$  : 水の密度( $t/m^3$ )

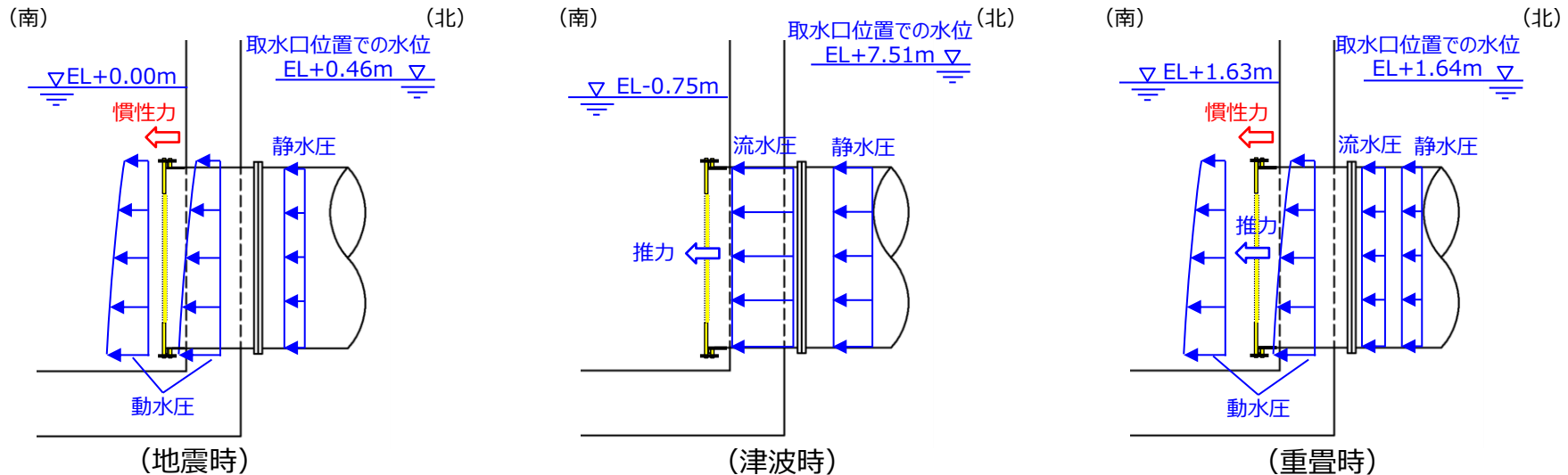
$A$  : 流れの方向の物体の投影面積( $m^2$ )

$U$  : 流速(m/s)

# 流路縮小工の設計方針及び構造成立性の見通し (10/11)

## (6) 評価方法

- 地震時、津波時及び重畳時の各検討において、地震荷重や津波荷重により部材の発生応力度が許容限界を超えないことを確認する。
- 流路縮小工の縮小板に作用する地震時、津波時及び重畳時の荷重について、水平方向の荷重を比較すると、以下に示すとおり、津波時の作用荷重が大きいことから、構造成立性の見通しの確認においては、津波時について評価を行うとともに、南北方向を評価対象断面に設定する。



流路縮小工の縮小板に作用する水平方向荷重イメージ

地震時、津波時及び重畳時における流路縮小工の縮小板に作用する水平方向荷重比較

流路縮小工 縮小板 概算重量	地震時					津波時			重畳時					荷重 評価	
	設計 震度	荷重内訳			荷重 合計	荷重内訳		荷重 合計	設計 震度	荷重内訳			荷重 合計		
		水平 慣性力	動水圧	静水圧		静水圧	流水圧*			水平 慣性力	動水圧	静水圧			流水圧*
25kN	Kh=0.71	18 kN	634 kN	34 kN	686 kN	609 kN	682 kN	1291 kN	Kh=0.36	9 kN	391 kN	1 kN	229 kN	630 kN	重畳時 < 地震時 < 津波時

\*流水の摩擦による推力は、津波時で0.06kN、重畳時で0.02kNであり、流水圧等に比べて十分小さいことから、流水圧に含めて整理した。

# 流路縮小工の設計方針及び構造成立性の見通し（11/11）

## （7）評価結果

- ・流路縮小工は、下表に示すとおり、地震荷重より大きい津波荷重に対して十分な安定性を有しており、構造成立性を見通しがあることを確認した。
- ・なお、本評価結果は、暫定条件を用いた評価結果であることから、正式条件を用いた評価結果は詳細設計段階で示す。

流路縮小工に関する評価結果（津波時）

評価対象 部位	仕様（案）	照査結果				
		照査項目	最大発生値 (N/mm <sup>2</sup> )	許容値 (N/mm <sup>2</sup> )	照査値（発生値）/ （許容値）	判定 （照査値<1.00）
縮小板	SS400 （板厚 t=40mm）	曲げ	137	235	0.59	OK
		せん断	3	135	0.03	OK
取水管	SS400 （板厚 t=24mm）	引張	5	235	0.03	OK

# 流路縮小工の保守管理方針

- 流路縮小工については、津波防護施設としての機能及び1号炉取水機能を維持していくため、別途定める保全計画に基づき、適切に管理していく。流路縮小工の具体的な保守管理方針について以下に示す。
- 流路縮小工の縮小板・取付板は腐食代を確保するとともに、縮小板・取付板・固定ボルトは腐食防止のため塗装を行う。
- 固定ボルト及び固定ボルト近傍部材の腐食による固定ボルトの脱落を防止するため、固定ボルトの径を大きくする、本数を増やす等の対応を実施することとし、対応方法は詳細設計段階において決定する。
- 潜水土により取水槽内の定期的な点検・清掃を行い、縮小板や固定ボルト等の流路縮小工の各部位を確認する。固定ボルトに塗装の劣化や腐食等の傾向が確認された場合には、当該ボルトを交換する。

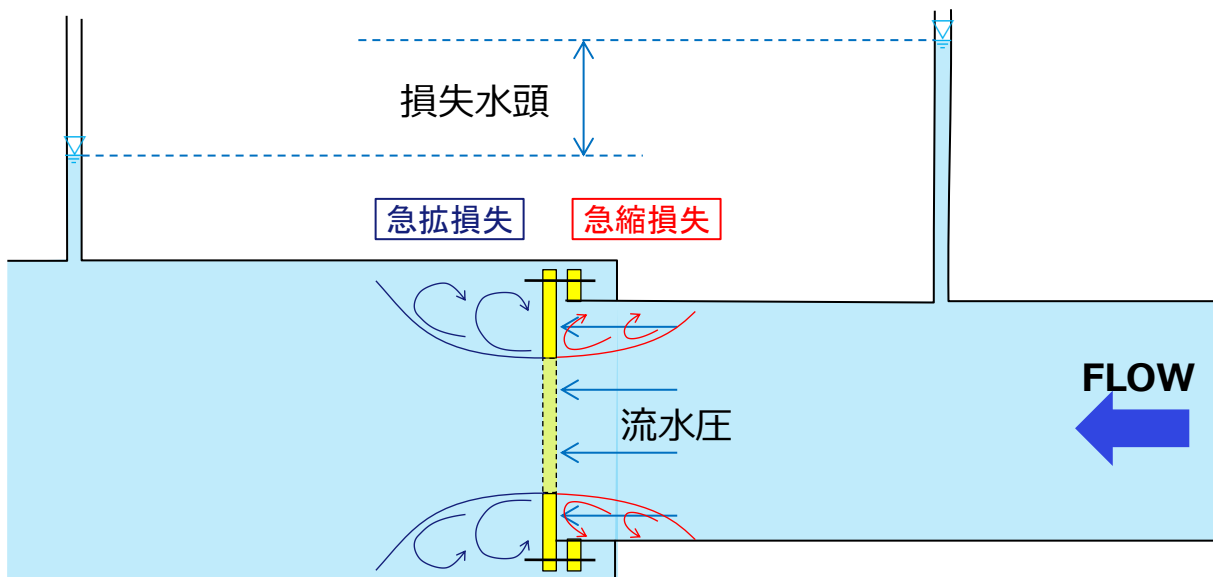
# 1号炉取水槽に設置する流路縮小工に関する水理模型実験の実施について

## 【実験目的】

- 1号炉取水槽に設置する流路縮小工により生じる損失は、火力・原子力発電所土木構造物の設計（電力土木技術協会）に基づき設定しており、当該損失の妥当性を詳細設計段階において水理模型実験により確認する。
- 1号炉取水槽に設置する流路縮小工へ作用する流水圧は、港湾の施設の技術上の基準・同解説（日本港湾協会）に基づき設定しており、当該流水圧の妥当性を詳細設計段階において水理模型実験により確認する。

## 【実験概要】

- 模型実験における流れの状態は、津波による最大水位上昇時は満管状態の流れによるものであることから、実験においても満管状態の流れを想定する。
- 模型実験の相似則はフルード則を用い、縮尺の詳細については、実験装置の性能等を踏まえて設定する。



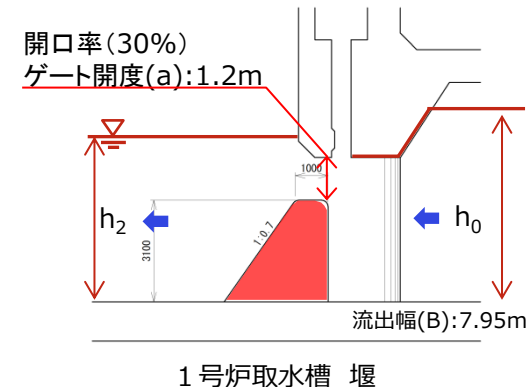
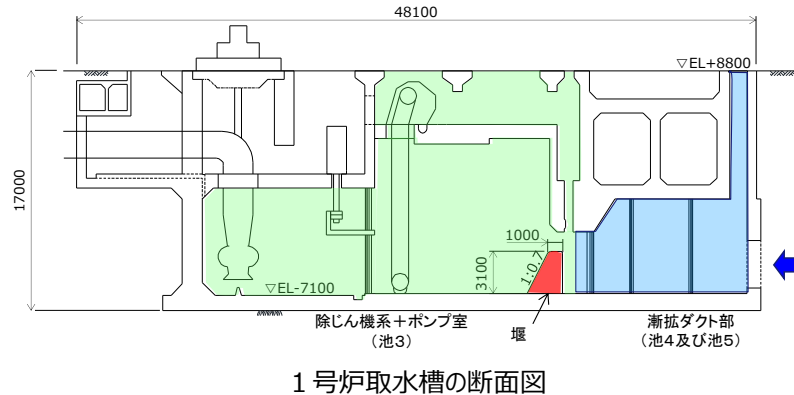
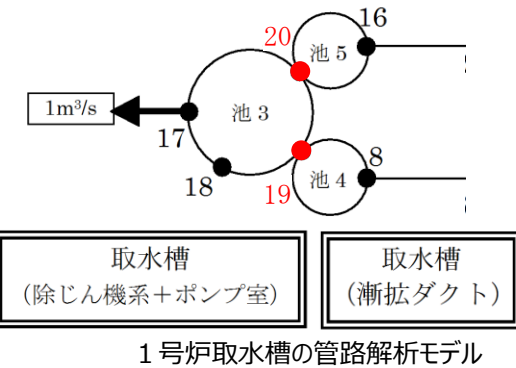
模型実験概要図

## 実験条件の概要

実験条件	内容
計測項目	・損失水頭 ・流水圧
流れ状態	管路流れ (満管状態の流れ)
相似則	フルード則
模型縮尺	1/10程度

# 1号取水槽へ堰を考慮したことによる基準津波に対する効果 (1 / 3)

- 1号炉取水槽への流路縮小工は、取水管端部に設置することとするが、当初選定していた取水槽内に堰を設置することによる入力津波高さ低減効果の妥当性を以下のとおり確認した。
  - 堰を設置によることに伴う損失として、漸拡ダクトと除じん機系+ポンプ室の境界（節点19及び20）に、下表に示す損失水頭を考慮する。
  - 管路計算のモデル化の考え方、計算条件等については、P.23～25に示すとおり。
  - 堰を考慮した管路計算の結果、開口率を3割程度とすることで、除じん系+ポンプ室及び漸拡ダクト部の最大水位が許容高さ以下となることを確認した。（計算結果の詳細を次頁へ示す。）

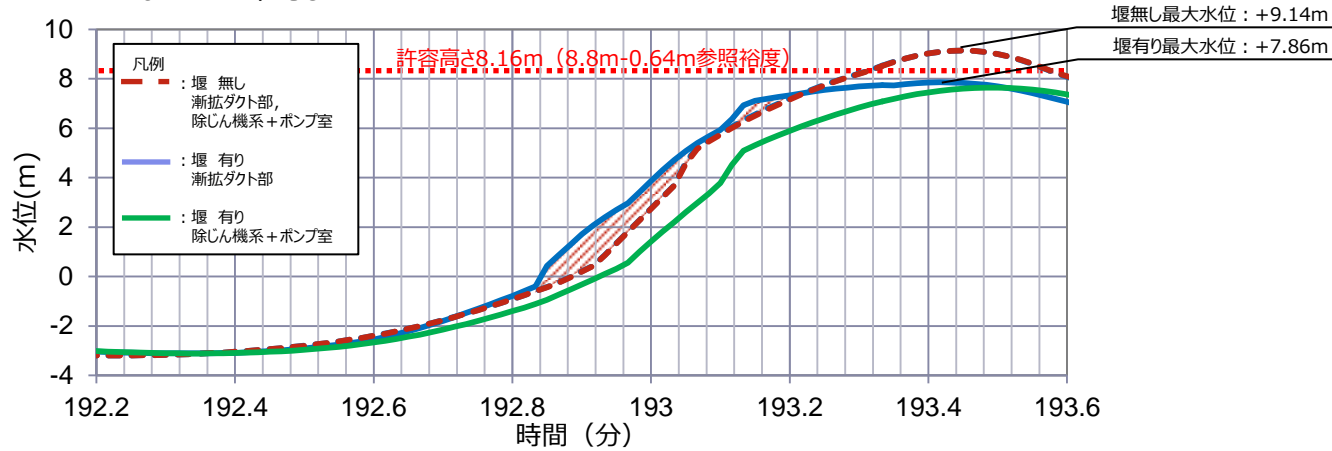


節点No.	考慮する損失	損失水頭算定公式	損失係数	開口断面積
19, 20	スルースゲート (もがり流出)	$\Delta h = h_0 - h_2 = \frac{1}{C'^2} \frac{v^2}{2g}$ $Q = C_1 a B \sqrt{2gh_0}$ $C' = C_1 \sqrt{h_0 / (h_0 - h_2)}$	流量の関数として、 左式により時刻毎に算出	9.54m <sup>2</sup> (開口率を30%として算出)

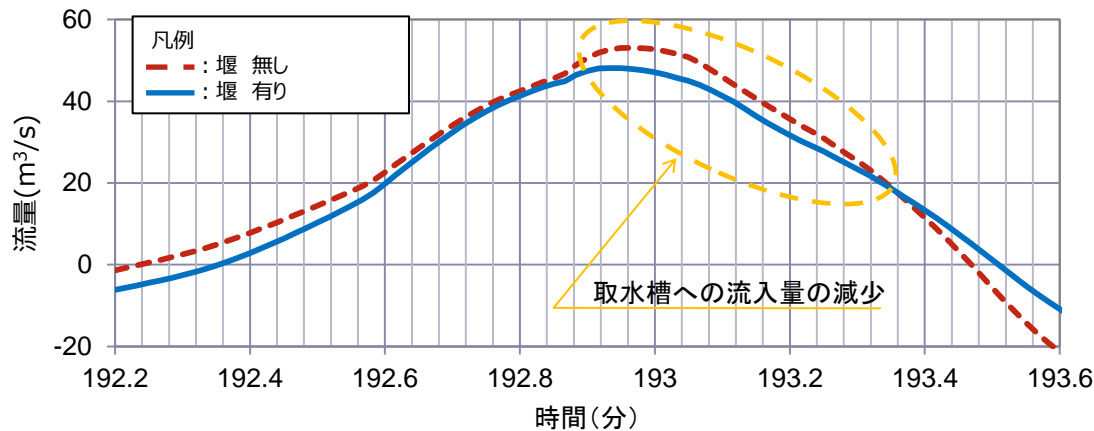


# 1号取水槽へ堰を考慮したことによる基準津波に対する効果 (2 / 3)

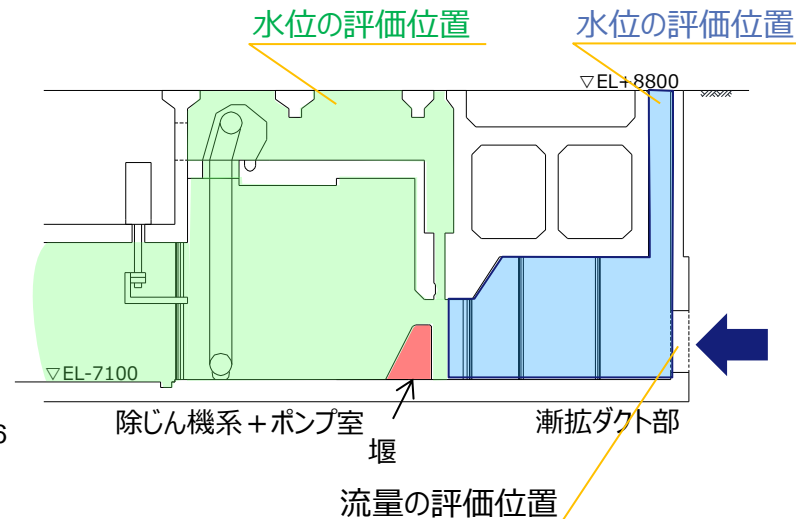
- 1号炉取水槽へ堰を設置することによる入力津波高さ低減効果を示し、漸拡ダクト部の取水槽ピットへ閉止板等の対策工の必要性を確認する。
  - 管路計算の結果、下図に示すとおり、1号取水槽へ堰を設置することにより、漸拡ダクト部の水位は堰を設置しない場合に比較し、一時的に水位が上昇し、その影響により、取水槽への津波の流入量は減少することを確認した。
  - 堰を設置した場合の除じん系+ポンプ室及び漸拡ダクト部の最大水位 (+7.86m) は、取水槽への津波の流入量の減少及び堰の設置による損失から、堰を設置しない場合の最大水位 (+9.14m) に比較し、低減することを確認した。
  - 1号炉取水槽へ堰を設置した場合において、漸拡ダクト部にて入力津波高さは許容値以下であり、取水槽ピットへ閉止板等の対策工を設置する必要はないことを確認した。



取水槽水位最大となる押し波 1 波あたりの水位 (漸拡ダクト部, 除じん機系+ポンプ室)



取水槽水位が最大となる押し波 1 波あたりの流量 (取水管部)

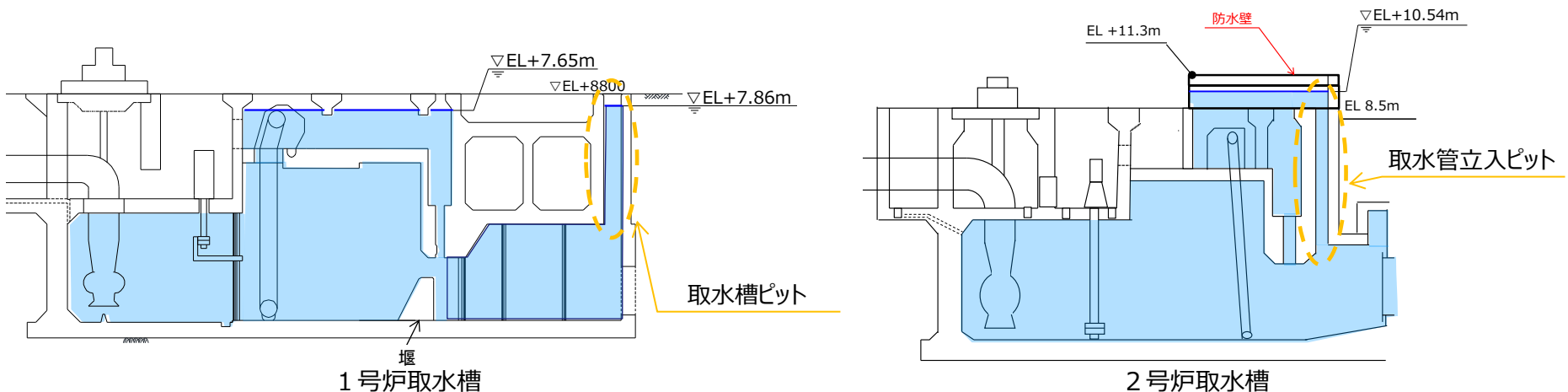


# (参考) 1号取水槽へ堰を考慮したことによる基準津波に対する効果 (3 / 3)

- 1号取水槽の漸拡ダクト部の取水槽ピット及び2号炉取水槽の漸拡ダクト部の取水管立入ピットについて、許容高さを入力津波高さを比較し、閉止板設置等の必要性を確認する。
  - 管路計算の結果、下表に示すとおり、1号炉取水槽については取水槽における入力津波高さが漸拡ダクト部の取水槽ピットの参照する裕度を踏まえた許容高さ以下であった。一方、2号炉取水槽については取水槽における入力津波高さが漸拡ダクト部の取水管立入ピットの参照する裕度を踏まえた許容高さを上回った。
  - 以上のことから、1号炉取水槽の漸拡ダクト部の取水槽ピットについては、閉止板等を設置する必要はなく、2号炉取水槽の漸拡ダクト部の取水管立入ピットについては、防水壁を設置する。

取水槽における入力津波高さとの許容高さの比較

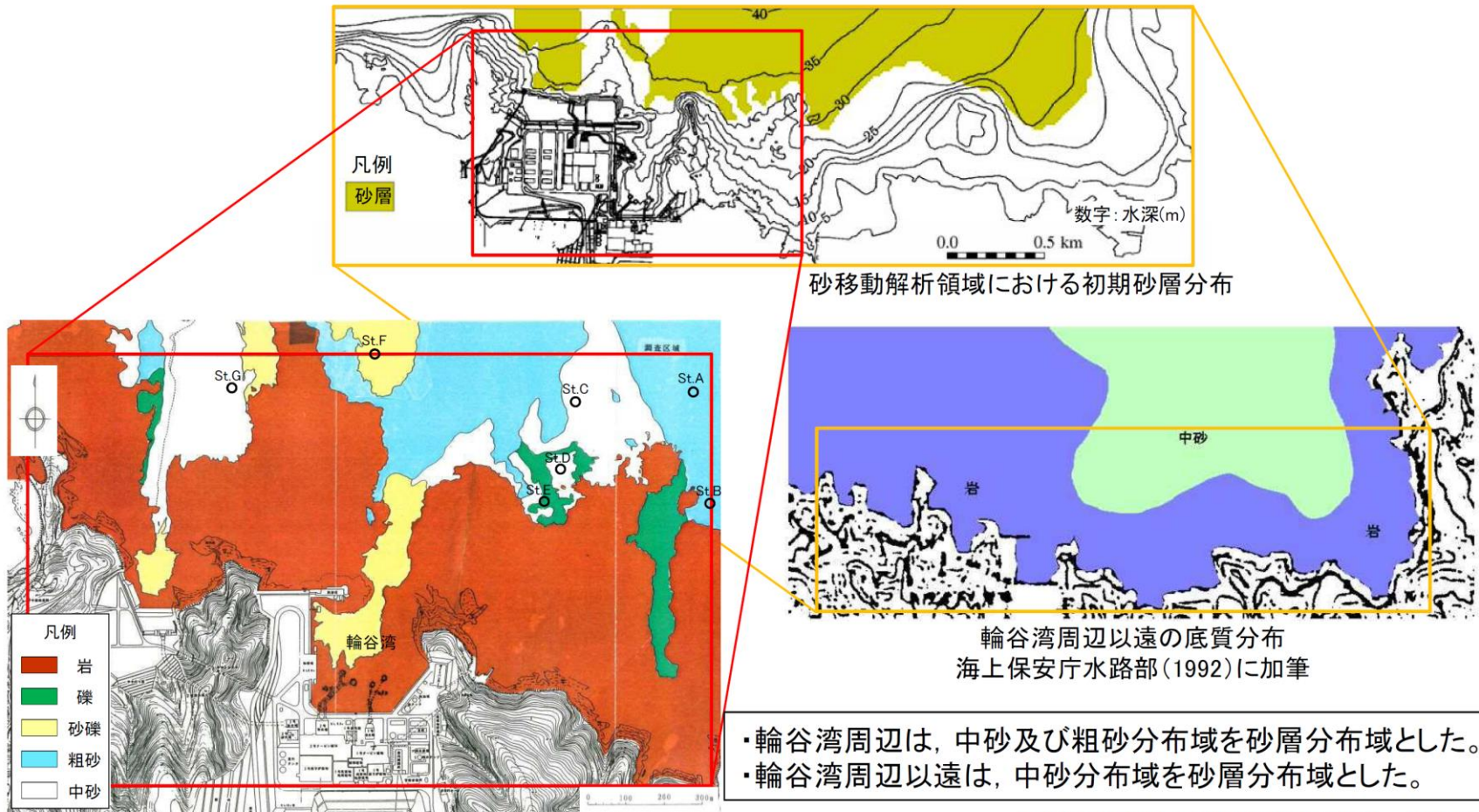
	1号炉取水槽 (取水槽へ堰を設置)	2号炉取水槽	(参考) 1号炉取水槽 (取水管端部へ流路縮小工設置)
取水槽における入力津波高さ	EL 7.9m	EL 10.6m	EL 7.0m
漸拡ダクト部の 参照する裕度を踏まえた許容高さ	EL 8.1m	EL 8.1m	EL 8.1m
判定	入力津波高さが許容高さ以下のため、 取水槽ピットへ閉止板等の設置は不要	入力津波高さが許容高さを上回るため、 防水壁の設置が必要	入力津波高さが許容高さ以下のため、 取水槽ピットへ閉止板等の設置は不要



# (参考) 基準津波に伴う取水槽及び取水口周辺の砂移動評価 (1/3)

第662回審査会合資料2-1 P.6 再掲

・砂移動解析領域における初期砂層分布は、輪谷湾周辺は当社による底質調査結果、輪谷湾周辺以遠は海上保安庁水路部(1992)<sup>(8)</sup>による底質調査結果を参照し設定した。



下図の地形は3号炉造成前であり、上図の現在の地形とは土地形状が異なる。



# (参考) 基準津波に伴う取水槽及び取水口周辺の砂移動評価 (2/3)

第662回審査会合資料2-1 P.8 再掲

・基準津波を評価対象として、砂移動の数値シミュレーションを実施した結果のうち、取水口位置における最大堆積厚さを下表に示す。

基準津波	波源	防波堤の有無	砂移動モデル	浮遊砂上限濃度	取水口堆積層厚さ(m) <sup>※1</sup>		評価結果図	
					2号炉取水口(東)	2号炉取水口(西)	堆積浸食分布図等	時刻歴波形
基準津波1	地方自治体独自の波源モデルに基づく検討(鳥取県(2012))	有	藤井ほか(1998)	1%	0.00	0.00	P9	P25
				5%	0.00	0.00	P9	P26
			高橋ほか(1999)	1%	0.02[0.020]	0.02[0.011]	P10	P27
		無	藤井ほか(1998)	1%	0.00	0.00	P11	P28
				5%	0.00	0.00	P11	P29
			高橋ほか(1999)	1%	0.00	0.00	P12	P30
基準津波2	地震発生領域の連動を考慮した検討(断層長さ350km)	有	藤井ほか(1998)	1%	0.00	0.00	P13	P31
				5%	0.00	0.00	P13	P32
			高橋ほか(1999)	1%	0.01	0.00	P14	P33
基準津波3	地震発生領域の連動を考慮した検討(断層長さ350km)	有	藤井ほか(1998)	1%	0.00	0.00	P15	P34
				5%	0.00	0.00	P15	P35
			高橋ほか(1999)	1%	0.00	0.00	P16	P36
基準津波4	土木学会に基づく検討(F-Ⅲ~F-V断層)	有	藤井ほか(1998)	1%	0.00	0.00	P17	P37
				5%	0.00	0.00	P17	P38
			高橋ほか(1999)	1%	0.00	0.00	P18	P39
		無	藤井ほか(1998)	1%	0.00	0.00	P19	P40
				5%	0.00	0.00	P19	P41
			高橋ほか(1999)	1%	0.00	0.00	P20	P42
基準津波5	地震発生領域の連動を考慮した検討(断層長さ350km)	無	藤井ほか(1998)	1%	0.00	0.00	P21	P43
				5%	0.00	0.00	P21	P44
			高橋ほか(1999)	1%	0.00	0.00	P22	P45
基準津波6	地震発生領域の連動を考慮した検討(断層長さ350km)	無	藤井ほか(1998)	1%	0.00	0.00	P23	P46
				5%	0.00	0.00	P23	P47
			高橋ほか(1999)	1%	0.00	0.00	P24	P48

※1 計算結果は小数第3位で切り上げて示す。

・取水口位置における最大堆積厚さは、基準津波1での高橋ほか(1999)の浮遊砂上限濃度1%の2号炉取水口(東)において0.02mであり、海底面から取水口呑口下端までの高さ(5.50m)<sup>※2</sup>に対して十分に小さく、取水への影響はないことを確認した。

※2 海底面:T.P.-18.00m, 取水口呑口下端:T.P.-12.50m (P2参照)

# (参考) 基準津波に伴う取水槽及び取水口周辺の砂移動評価 (3 / 3)

第662回審査会合資料2-1 P.52 再掲

・基準津波を評価対象として、高橋ほか(1999)の手法に基づき数値シミュレーションを実施し、取水槽における砂の堆積厚さを算定した。

波源	上昇側・下降側	防波堤の有無	ポンプ 運転状況	砂移動モデル	浮遊砂 上限濃度	取水槽における 砂の堆積厚さ(m) <sup>※1</sup>	評価結果図
							時刻歴波形
基準津波1	上昇側	有	運転	高橋ほか (1999)	1%	0.02[0.0161]	P53
			停止			0.00	P53
		無	運転			0.01	P54
			停止			0.00	P54
	下降側	有	運転			0.02[0.0162]	P55
			停止			0.00	P55
		無	運転			0.01	P56
			停止			0.00	P56
基準津波2	上昇側	有	運転	0.01	P57		
			停止	0.00	P57		
基準津波3	下降側	有	運転	0.01	P58		
			停止	0.00	P58		
基準津波4	下降側	有	運転	0.00	P59		
			停止	0.00	P59		
		無	運転	0.00	P60		
			停止	0.00	P60		
基準津波5	上昇側	無	運転	0.00	P61		
			停止	0.00	P61		
基準津波6	下降側	無	運転	0.00	P62		
			停止	0.00	P62		

※1 計算結果は小数第3位で切り上げて示す。

・取水槽における最大堆積厚さは、基準津波1(水位下降側)で0.02mとなり、取水槽底面から補機海水ポンプ下端までの高さ(0.50m)  
※2に対して十分に小さく、取水への影響はないことを確認した。

※2 取水槽底面高さ:T.P.-9.80m, 補機海水ポンプ下端:T.P.-9.30m(P2参照)