

8. 海水ポンプ室内水位に係る安全性評価

取水設備の水利特性を考慮し、津波による海水ポンプ室内の水位上昇及び水位下降に対する安全性を確認する。

8.1 取水設備の流動解析手法及び解析条件

本クロスチェック解析では取水設備の第1号機～3号機の内、1号機取水設備を対象とする。第1号機を対象とする理由は、海水ポンプ室内の水位上昇の事業者解析結果が、安全性判断基準値（海水ポンプ室天端高 O.P.+15.0m）に対して余裕が最も小さいこと、また、取水口前面での水位下降に対する事業者解析結果（図 6.11）が、いずれの号機においても取水口敷高を下回り、第1号機の水位低下継続時間（取水不能時間）が最長であることを考慮した。水位低下継続時間はそれぞれ、第1号機で約4分、第2号機で約2分、第3号機で約3分である。解析手法は、管路及び開水路の基礎方程式に基づく1次元非定常流をモデル化した数値解析手法を用いる。離散化スキームには、Total Variable Diminishing (TVD) スキームの一種である Flux Difference Splitting (FDS) 法を適用した。本解析で用いる計算領域等の解析条件を表 8.1 に示す。1号機取水設備の概要を図 8.1 に示す。また、解析モデルのメッシュ分割を図 8.2 に、解析モデルの諸元を表 8.2 に示す。これらの解析モデルとして、保安院より提供された事業者データを利用した。

入力条件は、1号機取水設備における最大水位上昇ケース及び最大水位下降ケースによる水位変動とする。JNES の津波水位解析結果（第6章の結果）を入力条件としたケースで、安全性を評価する。事業者が解析に用いた水位変動を入力条件としたケースで、事業者解析結果の妥当性を確認する。これらの入力条件のデータとして、保安院より提供された事業者データを利用した。

8.2 解析結果及び安全性評価結果

JNES の津波水位解析結果を入力条件として算出した1号機海水ポンプ室内の最大水位上昇量を表 8.3 に、最大水位下降量を表 8.4 に示す。図 8.3 及び図 8.4 に最大水位上昇ケース（JSCE01_High）の入力条件と解析結果、図 8.5 及び図 8.6 に最大水位下降ケース（JSCE08_Low）の入力条件と解析結果をそれぞれ示す。これらの解析結果から、1号機海水ポンプ室内の最大水位上昇量は、海水ポンプ室天端高（O.P.+15.0m）を超えないことを確認した。また、最大水位下降量は、第1号機的设计最低水位（O.P.-6.2m）を下回らないことを確認した。

8.3 解析結果及び事業者解析結果との比較

事業者解析結果の妥当性を確認するために、事業者が解析に用いた水位変動を入力条件として算出した1号機海水ポンプ室内の最大水位上昇量を表 8.5 に、最大水位下降量を表 8.6 に示す。同表には、事業者の解析結果も合わせて示した。図 8.7 及び図 8.8 に最大水位上昇ケースの入力

条件と解析結果、図 8.9 及び図 8.10 (1) に最大水位下降ケースの入力条件と解析結果を示す。JNES と事業者の解析結果を比較すると、最大水位上昇ケースの最大水位上昇量については、JNES の結果が O.P.+11.0m に対し、事業者は O.P.+11.3m となり、また、最大水位下降ケースの最大水位下降量については、JNES の結果が O.P.-3.5m に対し、事業者は O.P.-3.6m となり、いずれも概ね一致した。しかしながら、最大水位下降ケースの第 1 波（地震発生後約 53 分後）の海水ポンプ室水位上昇量において、図 8.10 (2) に示すように、2m 以上の差が見られた。

これらの要因を分析するために、当該時間帯の取水設備内の流動状況を整理する。当該時刻の直前においては、図 8.9 及び表 6.5 に示すように取水口付近の海水は完全に干上がり、取水設備から外海へと海水が流出し続ける。そのため、海水ポンプ室水位が循環水ポンプ停止水位を下回り、循環水ポンプが停止する。その後、取水口水位が急激に上昇するため、大量の海水が取水設備に流入する。事業者の解析結果との比較において、最高水位となる時刻以前では違いはほとんど見られないことから、最高水位における 2m 程度の水位差の原因は、循環水ポンプ停止後の海水ポンプ室への流入量の違いによるものと推定した。

そこで、地震発生後 40～60 分における海水ポンプ室入口の流量を比較した（図 8.11）。図 8.11 に示すように、循環水ポンプ停止から数分後までは流量の差は殆ど見られないが、51～52 分後の流量が急激に大きくなった後の挙動に違いが見られる。JNES の解析結果と比較すると、事業者の解析結果では流量の時間変化が大きく振動しており、最大流量も 3 割ほど大きくなっている。

開水路の 1 次元流動解析に関しては、跳水現象のような水位の不連続変化を過大な数値振動を生じることなく安定的に計算できるように TVD スキームなどの手法が採用されることが多い。本解析に対しては、JNES 及び事業者の両者とも Flux Difference Splitting (FDS) 法を採用しているため、原則として同じ方針で計算を行っているが、FDS 法の実装方法について両者の間に違いがあるものと考えられる。相違点の候補の 1 つとして、特性速度の局所平均量 \bar{c} の算出方法の違いが考えられる。JNES の手法では、円形断面やスロットモデルの影響を考慮して局所平均量等を算出しているが、事業者は水面幅を流路幅とみなして局所平均量を算出しているため、開水路から管路に変わる位置や断面形状が変わる位置においては数値的な振動が現れやすいものと考えられる。

JNES と事業者の解析結果を比較し、一部の解析ケースにおいて局所的に違いが見られた要因を分析した結果、事業者の解析結果において、取水口入口における流量の数値振動に起因する海水ポンプ室内の水位変動量の増幅が見られることを確認した。

表 8.1 取水設備の流動解析の計算条件一覧

項目	計算条件
計算対象	女川1号機
計算領域	取水口～取水路～海水ポンプ室
メッシュ数	565メッシュ
メッシュ幅	0.5m
計算時間間隔 Δt	0.0001秒
基礎方程式	非定常開水路の連続式及び運動方程式 ブライスマンのスロットモデルで管路流れに対応
境界条件	水位上昇側: ポンプ流量 循環水ポンプ停止時 3,860m ³ /hr 水位下降側: ポンプ流量 通常運転時 141,260m ³ /hr 循環水ポンプ停止時 3,860m ³ /hr
取水路の摩擦損失係数	マンニングの粗度係数n=0.018m ^{-1/3} s 取水路の貝代 0.10m
潮位条件	水位上昇側:朔望平均干潮位O.P.+1.43m 水位下降側:朔望平均干潮位O.P.-0.14m
地盤変動条件	地盤変動量を考慮
計算時間	地震発生後4時間

表 8.2 取水設備の流動解析モデルの諸元

最大水位上昇ケース

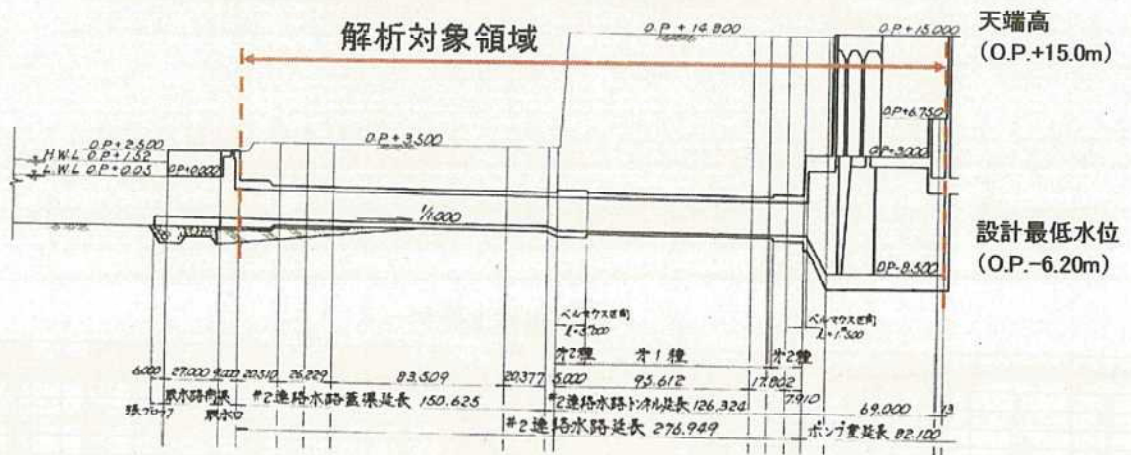
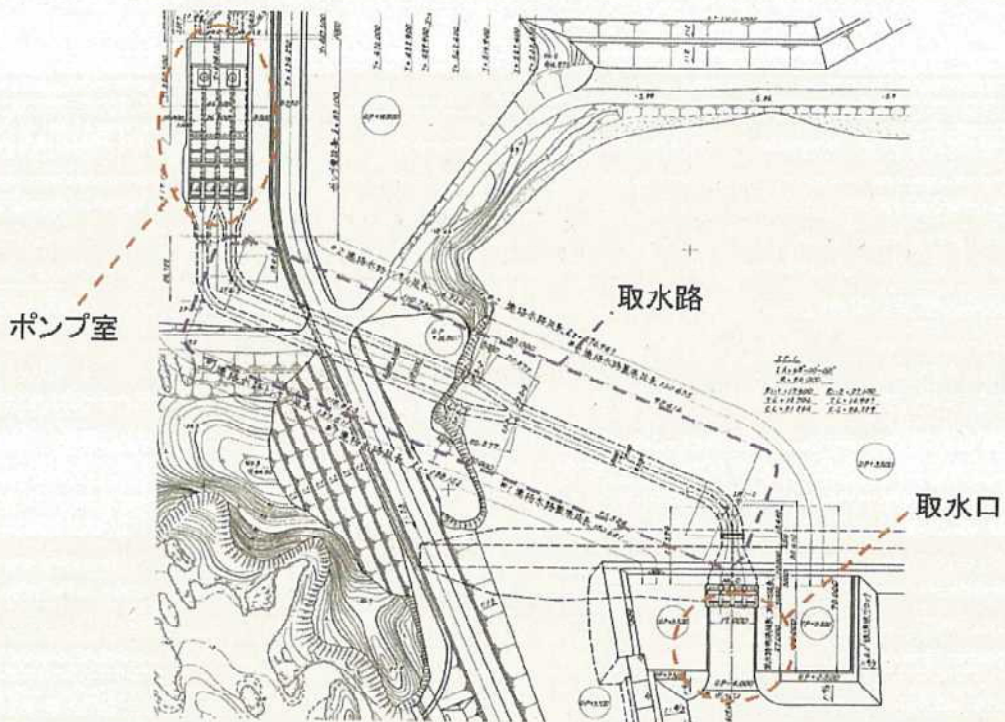
メッシュ数	区間長さ [m]	幅 [m]		粗度係数	圧力損失係数		損失係数		最大損失		初期水位 [m]	天井敷高 [m]		底面敷高 [m]		断面形状
		取水口側	ポンプ室側		順流時	逆流時	順流時	逆流時	順流時	逆流時		取水口側	ポンプ室側	取水口側	ポンプ室側	
6	3	8.80	8.80	0.018	0.500	0.500	0.00014	0.00000	0.053	0	1.43	-1.40	-3.90	-1.40	-3.90	0
26	13	8.80	3.50	0.018	0.004	0.050	0.00000	0.00000	0	0	1.43	-1.40	-3.90	-1.42	-3.92	0
9	4.5	3.50	3.50	0.018	0.000	0.000	0.00000	0.00000	0	0	1.43	-1.42	-3.92	-1.42	-3.92	0
47	23.5	3.50	3.50	0.018	0.080	0.080	0.00000	0.00000	0	0	1.43	-1.42	-3.92	-1.45	-3.95	0
213	106.5	3.50	3.50	0.018	0.000	0.000	0.00000	0.00000	0	0	1.43	-1.45	-3.95	-1.56	-4.06	0
10	5	3.50	3.50	0.018	0.000	0.000	0.00000	0.00000	0	0	1.43	-1.56	-4.06	-1.56	-4.56	0
182	91	1.55	1.55	0.018	0.000	0.000	0.00000	0.00000	0	0	1.43	-1.56	-4.56	-1.54	-4.64	1
36	18	1.55	1.55	0.018	0.072	0.072	0.00000	0.00000	0	0	1.43	-1.54	-4.64	-1.56	-4.66	1
35	17.5	1.55	1.55	0.018	0.000	0.000	0.00000	0.00000	0	0	1.43	-1.56	-4.66	-1.58	-4.68	1
1	0.5	1.55	1.55	0.018	1.000	1.000	0.00136	0.00136	0.523	0.523	1.43	-1.58	-4.68	-1.58	-4.68	1

1:円形
0:矩形

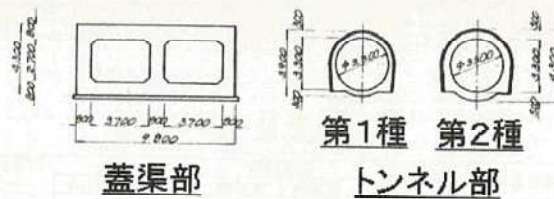
最大水位下降ケース

メッシュ数	区間長さ [m]	幅 [m]		粗度係数	圧力損失係数		損失係数		最大損失		初期水位 [m]	天井敷高 [m]		底面敷高 [m]		断面形状
		取水口側	ポンプ室側		順流時	逆流時	順流時	逆流時	順流時	逆流時		取水口側	ポンプ室側	取水口側	ポンプ室側	
6	3	8.80	8.80	0.018	0.500	0.500	0.00027	0.00000	0.105	0	-0.14	-1.40	-1.40	-3.90	-3.90	0
26	13	8.80	3.50	0.018	0.004	0.050	0.00000	0.00000	0	0	-0.14	-1.40	-1.42	-3.90	-3.92	0
9	4.5	3.50	3.50	0.018	0.000	0.000	0.00000	0.00000	0	0	-0.14	-1.42	-1.42	-3.92	-3.92	0
47	23.5	3.50	3.50	0.018	0.080	0.080	0.00000	0.00000	0	0	-0.14	-1.42	-1.45	-3.92	-3.95	0
213	106.5	3.50	3.50	0.018	0.000	0.000	0.00000	0.00000	0	0	-0.14	-1.45	-1.56	-3.95	-4.06	0
10	5	3.50	3.50	0.018	0.000	0.000	0.00000	0.00000	0	0	-0.14	-1.56	-1.56	-4.06	-4.56	0
182	91	1.55	1.55	0.018	0.000	0.000	0.00000	0.00000	0	0	-0.14	-1.56	-1.54	-4.56	-4.64	1
36	18	1.55	1.55	0.018	0.072	0.072	0.00000	0.00000	0	0	-0.14	-1.54	-1.56	-4.64	-4.66	1
35	17.5	1.55	1.55	0.018	0.000	0.000	0.00000	0.00000	0	0	-0.14	-1.56	-1.58	-4.66	-4.68	1
1	0.5	1.55	1.55	0.018	1.000	1.000	0.00168	0.00168	0.645	0.645	-0.14	-1.58	-1.58	-4.68	-4.68	1

1:円形
0:矩形



縦断面図



横断面図

図 8.1 1号機取水設備の概要

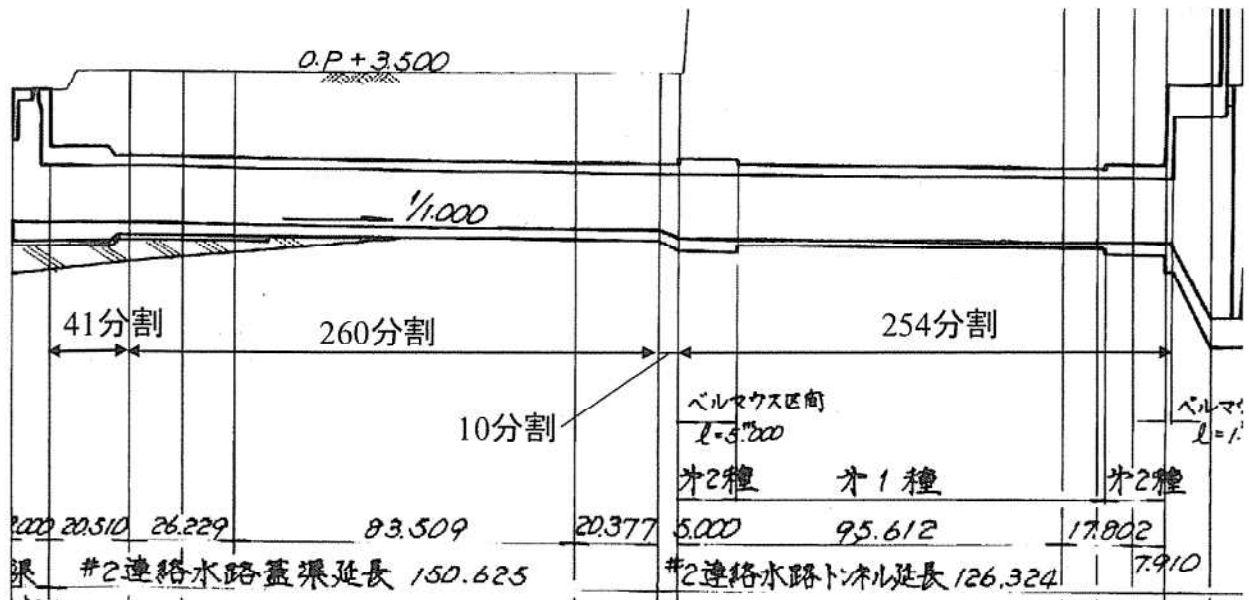


図 8.2 取水設備の流動解析モデルのメッシュ分割

表 8.3 第1号機海水ポンプ室の最大水位上昇量
 (波源：JSCE01_High、入力条件：JNES の津波水位解析結果)

	JNES 解析結果	海水ポンプ室天端高
最大水位上昇量 (m)	O.P. +11.3m	O.P. +15.0m

表 8.4 第1号機海水ポンプ室の最大水位下降量
 (波源：JSCE08_Low、入力条件：JNES の津波水位解析結果)

	JNES 解析結果	第1号機的设计最低水位
最大水位下降量 (m)	O.P. -3.5m	O.P. -6.2m

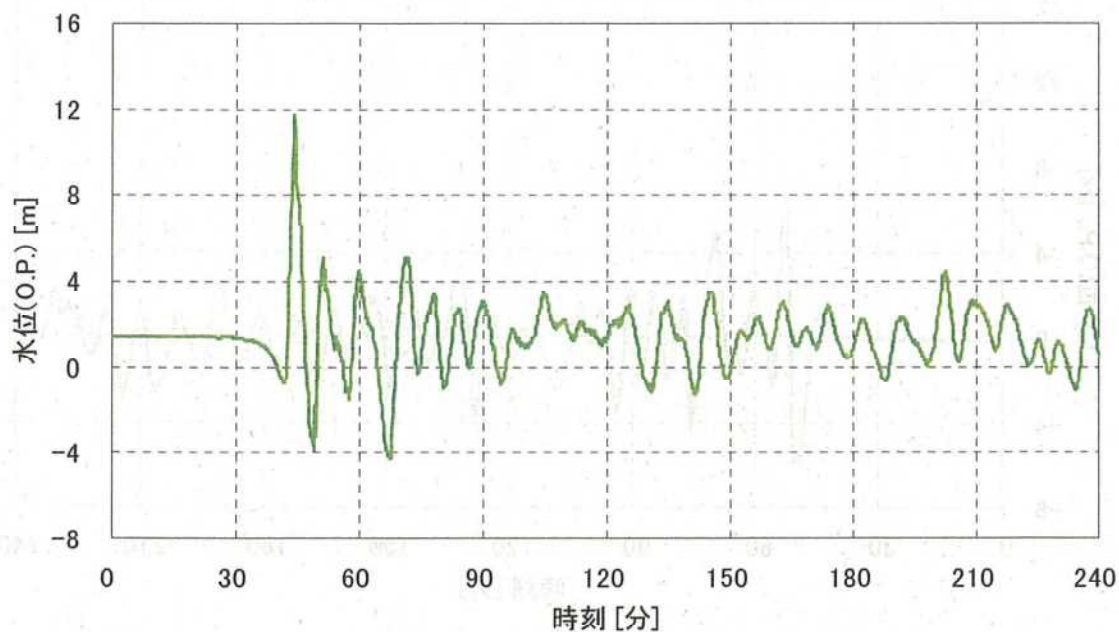


図 8.3 1号機取水設備の流動解析の入力波形
 (波源：JSCE01_High、入力条件：JNES の津波水位解析結果)

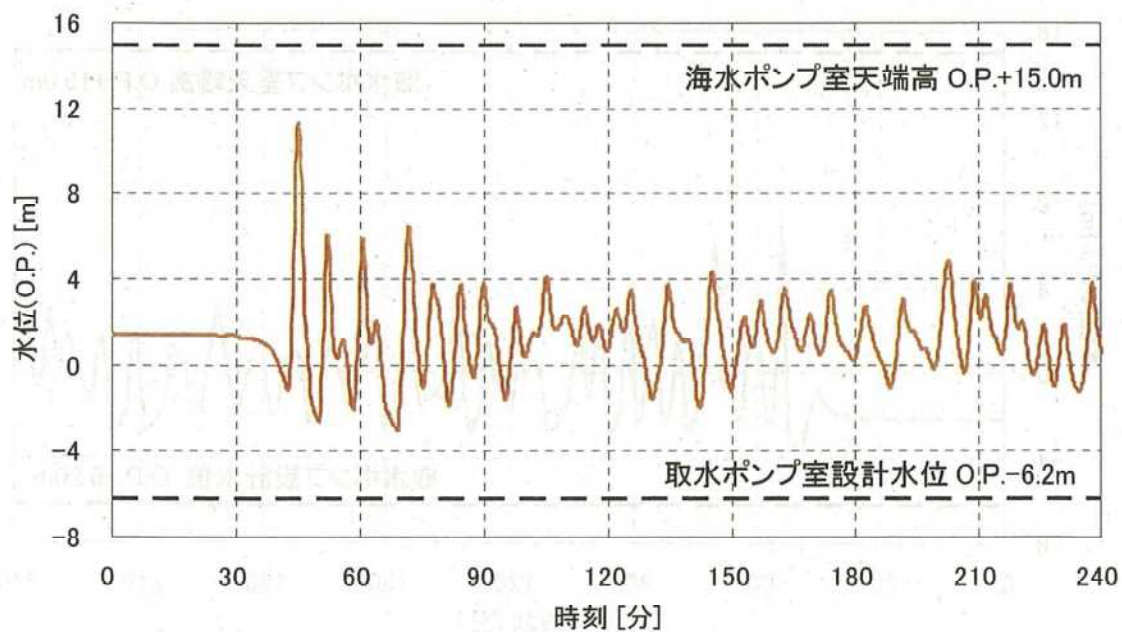


図 8.4 1号機海水ポンプ室の水位変動
 (波源：JSCE01_High、入力条件：JNES の津波水位解析結果)

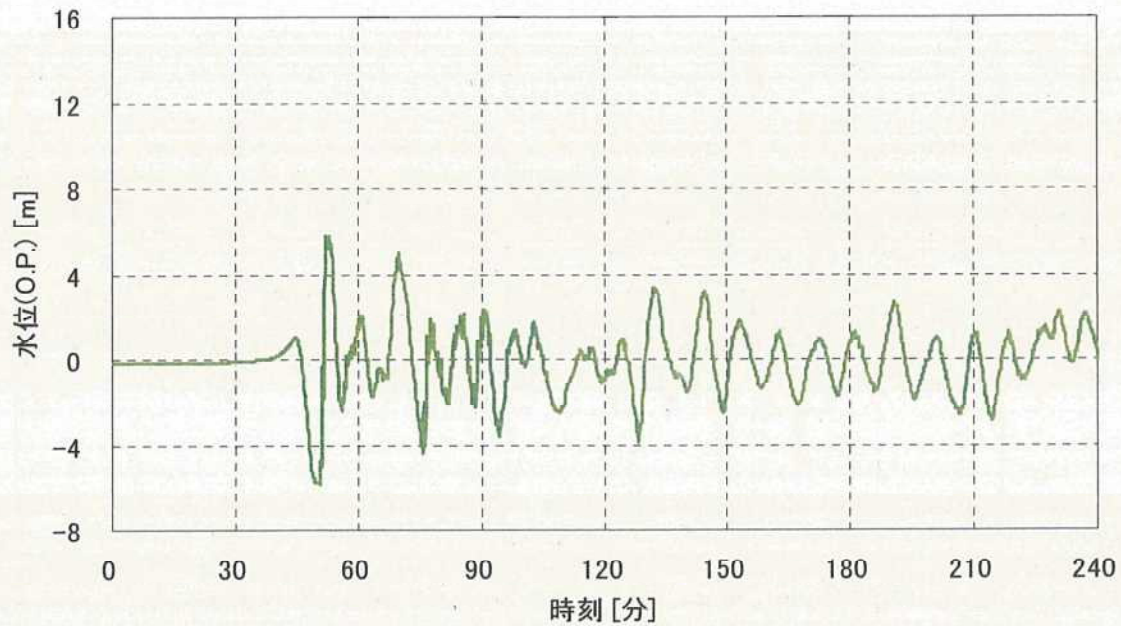


図 8.5 1号機取水設備の流動解析の入力波形
 (波源：JSCE08_Low、入力条件：JNES の津波水位解析結果)

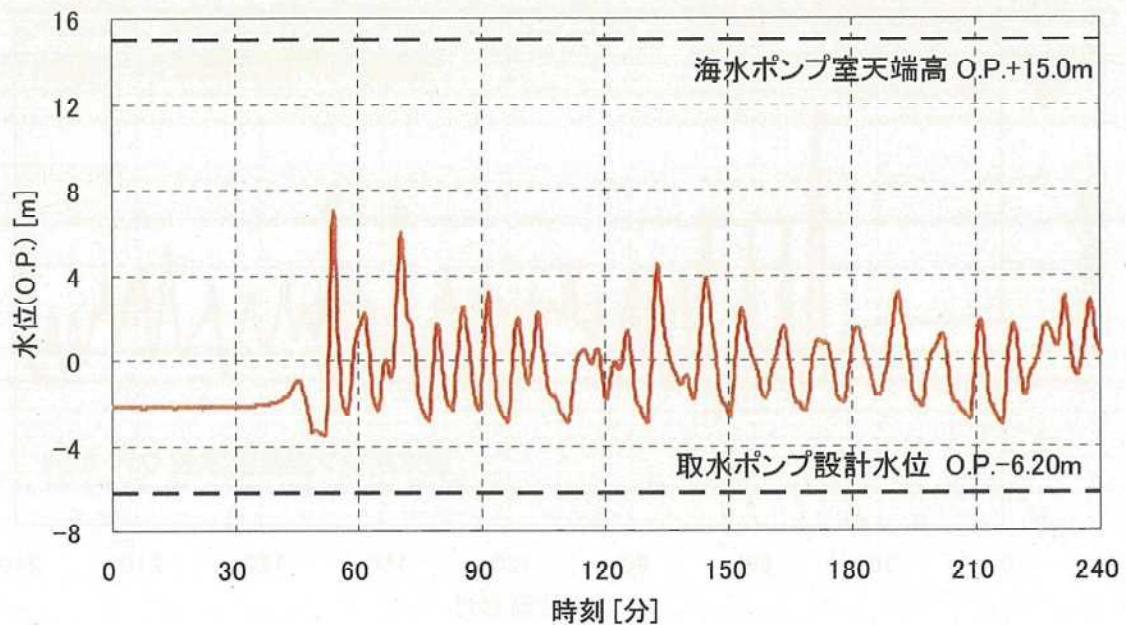


図 8.6 1号機海水ポンプ室の水位変動
 (波源：JSCE08_Low、入力条件：JNES の津波水位解析結果)

表 8.5 第 1 号機海水ポンプ室の最大水位上昇量

(波源：JSCE01_High、入力条件：事業者が解析に用いた水位変動)

	JNES 解析結果	事業者解析結果	海水ポンプ室天端高
最大水位上昇量 (m)	O.P. +11.0m	O.P. +11.3m	O.P. +15.0m

表 8.6 第 1 号機海水ポンプ室の最大水位下降量

(波源：JSCE08_Low、入力条件：事業者が解析に用いた水位変動)

	JNES 解析結果	事業者解析結果	第 1 号機の設計最低水位
最大水位下降量 (m)	O.P. -3.5m	O.P. -3.6m	O.P. -6.2m

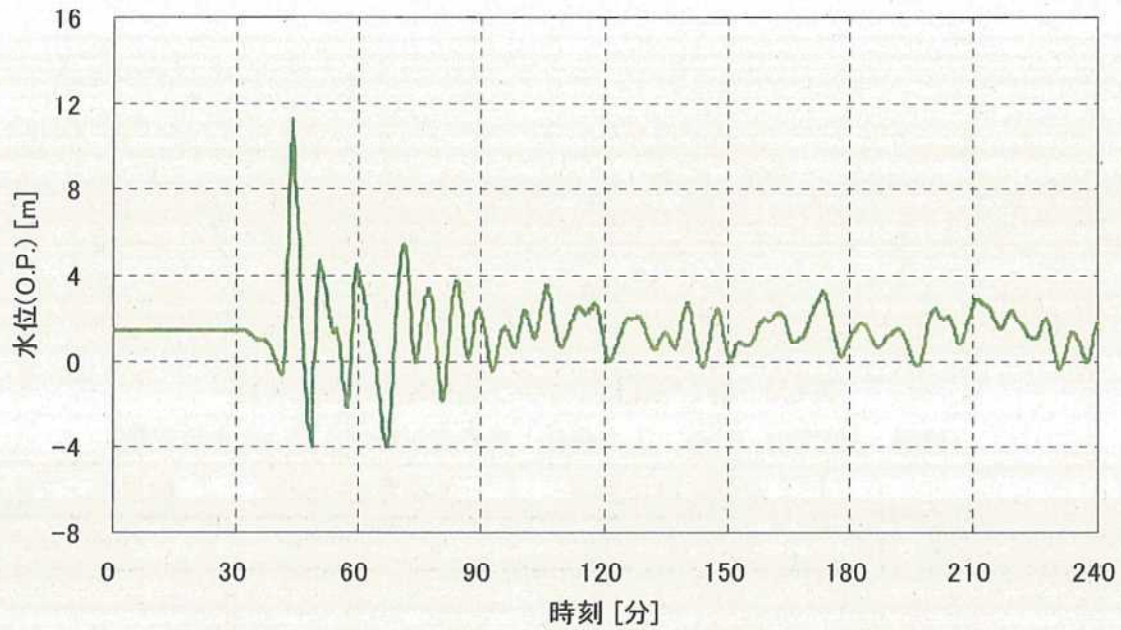


図 8.7 1号機取水設備の流動解析の入力波形
 (波源：JSCE01_High、入力条件：事業者が解析に用いた水位変動)

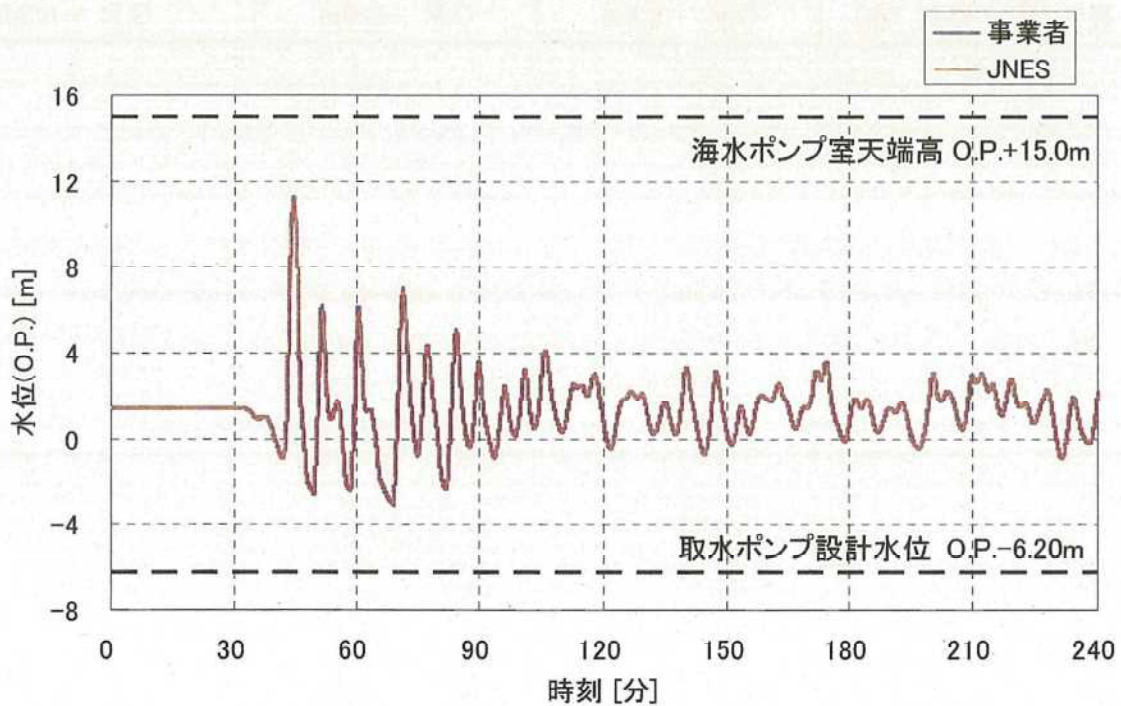


図 8.8 1号機海水ポンプ室の水位変動における事業者結果との比較
 (波源：JSCE01_High、入力条件：事業者が解析に用いた水位変動)

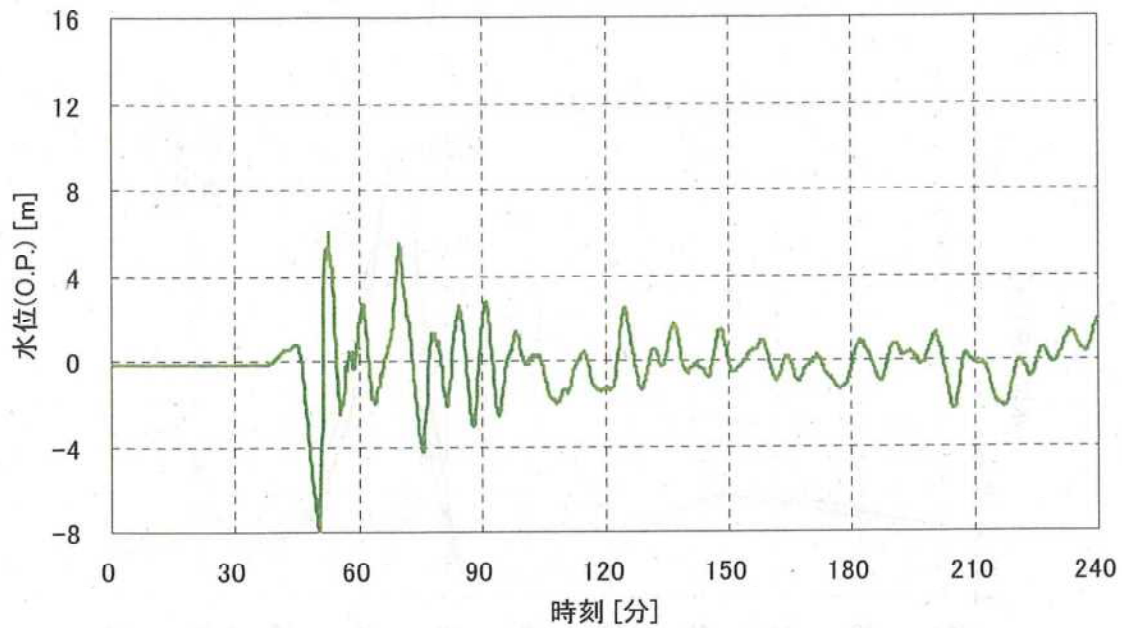


図 8.9 1号機取水設備の流動解析の入力波形
 (波源：JSCE08_Low、入力条件：事業者が解析に用いた水位変動)

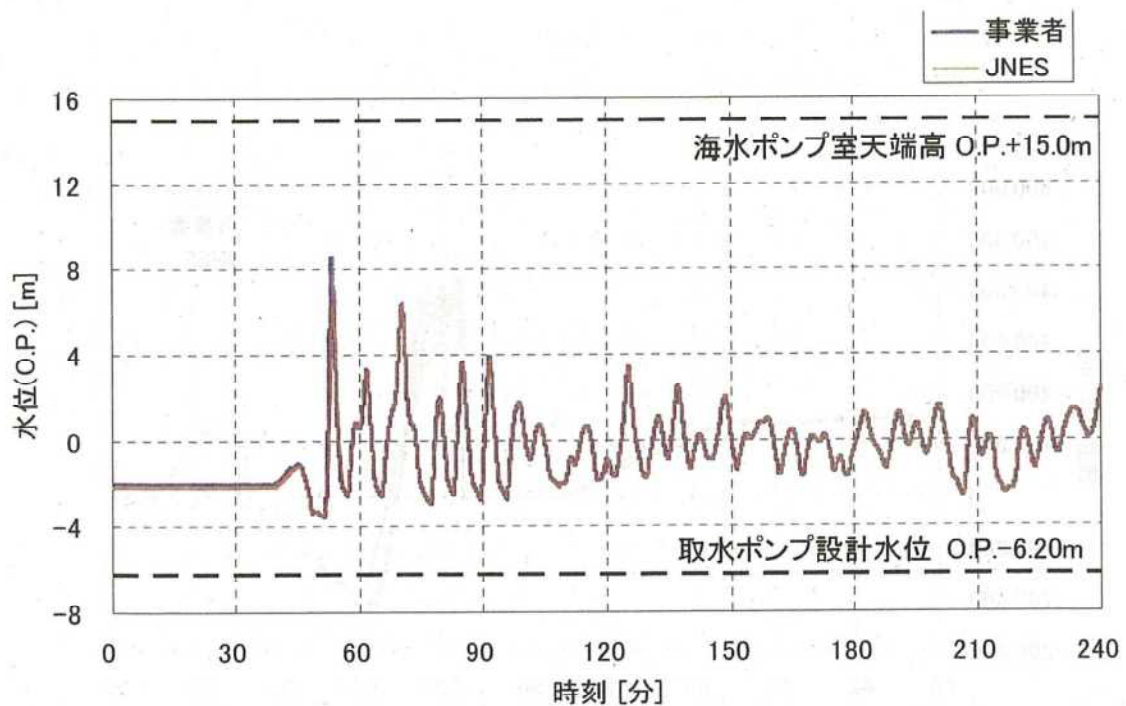


図 8.10(1) 1号機海水ポンプ室の水位変動における事業者結果との比較
 (波源：JSCE08_Low、入力条件：事業者が解析に用いた水位変動)

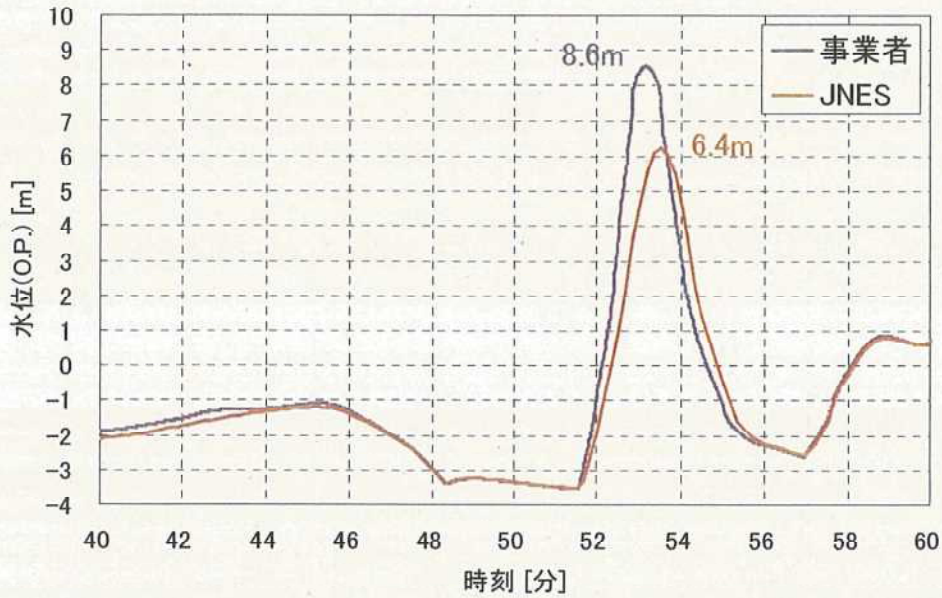


図 8.10(2) 1号機海水ポンプ室の水位変動における事業者結果との比較
 (波源：JSCE08_Low、入力条件：事業者が解析に用いた水位変動)

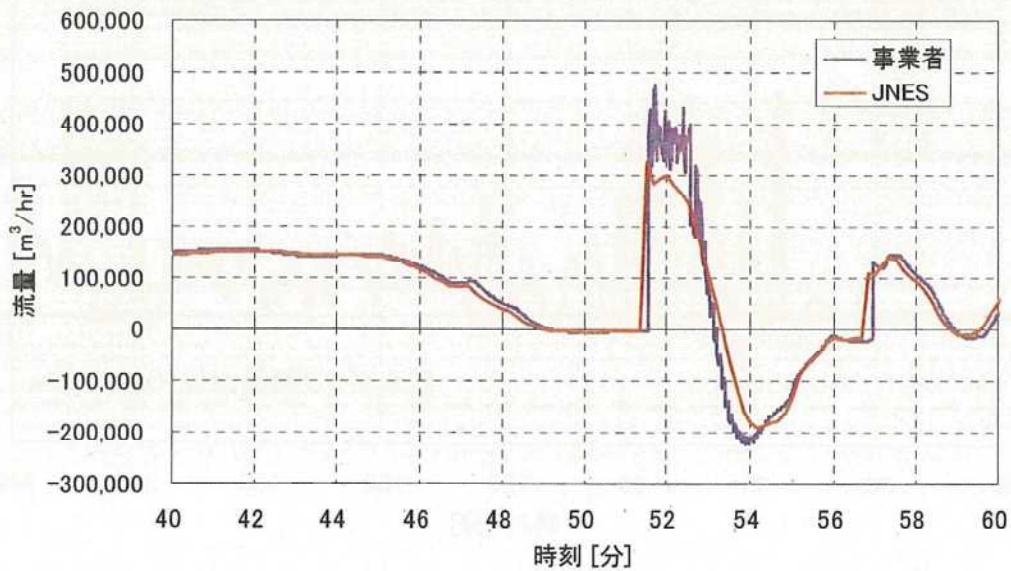


図 8.11 1号機海水ポンプ室入口の流量における事業者結果との比較
 (波源：JSCE08_Low、入力条件：事業者が解析に用いた水位変動)

9. まとめ

本クロスチェック解析の結果を以下にまとめる。

- (1) 女川発電所の津波に対する安全性を評価するとともに、一部解析ケースについて、事業者の解析結果の妥当性について検討した。津波評価は、基本的に土木学会（2002）に基づき実施し、敷地への影響が大きい日本海溝沿いのプレート境界付近に想定される地震に伴う津波及びチリ沖に想定される地震に伴う津波を評価対象波源とした。また、当該発電所と同じ海域の津波評価を行なっている東京電力株式会社東通発電所について、保安院の審議を終えた平成22年1月第66回地盤耐震意見聴取会の報告資料（06-東通設C-54、地震随件事象に対する考慮（津波に対する安全性））を参考とした。日本海溝沿いのプレート境界付近に想定される地震としては、土木学会（2002）及び中央防災会議（2006）、津波堆積物による最新知見を参照して波源モデルを設定した。土木学会（2002）に基づく波源については、事業者の抽出した波源モデルが敷地沿岸に対して最も厳しいものであるかを確かめるため、断層位置、走向、傾斜角、すべり角、上縁深さについてパラメータスタディを実施した。中央防災会議の波源モデルについては、中央防災会議の津波解析結果を参照し、女川町への影響が相対的に大きいとされる波源モデルを対象とした。津波堆積物から推定される波源モデルとしては、近年の調査研究の成果である代表的な波源モデルを複数考慮することで不確かさを考慮した。チリ沖に想定される地震については、既往最大規模の地震である1960年チリ地震津波を対象とし、断層位置を変更した波源モデルを設定した。
- (2) 上記（1）の津波解析の結果から、水位上昇側で敷地に対して最大水位上昇量を与える波源は、土木学会（2002）に基づく日本海溝沿いのプレート境界付近に想定される地震のJSCE01_Highであり、朔望平均満潮位（O.P.+1.43m）を考慮した最大遡上高は約O.P.+14.4mとなった。当該施設の重要機器が設置されている敷地レベルはO.P.+14.8mであり、津波による最大遡上高は、敷地レベルを下回ることを確認した。これらの結果から、津波による水位上昇に対する安全性評価として、第1号機取水設備を対象に、海水ポンプ室の水位変動を評価した。その結果、朔望平均満潮位（O.P.+1.43m）を考慮した最大水位上昇量は、O.P.+11.3mであり、第1号機の海水ポンプ室天端高（O.P.+15.0m）を超えることがないことを確認した。
- (3) 上記（1）の津波解析の結果から、水位下降側で敷地に対して最大水位下降量を与える波源は、土木学会（2002）に基づく日本海溝沿いのプレート境界付近に想定される地震のJSCE08_Lowであり、第1号機取水口、第2号機取水口、第3号機取水口における最大水位下降量は、朔望平均満潮位（O.P.-0.14m）を考慮すると、1号機O.P.-5.8m、2号機O.P.-7.3m、3号機O.P.-7.3mとなった。これらの結果から、津波による水位

低下に対する安全性評価として、第1号機取水設備を対象に、海水ポンプ室の水位変動を評価した。その結果、朔望平均干潮位 (O.P.-0.14m) を考慮した最大水位下降量は、O.P. -3.5m であり、第1号機の設計最低水位を下回ることがないことを確認した。

- (4) 取水口前面における堆砂高は、第1号機で最大 23cm、第2号機で最大 8 cm、第3号機で最大 1 cm であり、取水口の開口部高さ (第1号機：270cm、第2号機：300cm、第3号機：300cm) に対して十分な余裕があることから、安全性判断基準を満足する結果となった。
- (5) 波源条件が同じ土木学会 (2002) に基づく日本海溝沿いのプレート境界付近の想定地震による津波解析結果について、JNES と事業者の結果を比較した。事業者の結果は、最大波高とその発生位置、最大水位上昇の分布、各号機の取水口の水位時系列において JNES の結果とほぼ一致した。よって、事業者の解析結果は妥当である。
- (6) 第1号機を対象とした取水設備の流動解析について JNES と事業者の結果を比較したところ、概ね一致するものの、一部の解析ケースにおいて局所的に違いが見られた。事業者の解析結果を詳細に分析したところ、取水口入口における流量の数値振動に起因すると思われる海水ポンプ室内の水位変動量の増幅が見られることを確認した。
- (7) 土砂移動解析について JNES と事業者の結果を比較したところ、港内における最大堆積量分布及び4時間後の地形変化量分布は、全体的にはほぼ同様の堆積/侵食傾向を示した。また、両者の第1号機取水口前面における堆砂高はほぼ同程度となった。第2号機及び第3号機では、事業者の結果が JNES の倍程度となった。
- (8) 土砂移動解析について、JNES と事業者の結果の差について分析し、主な要因は陸域の流砂計算の有無、Manning 粗度係数、流水計算の打ち切り水深、計算時間間隔であることを確認した。なお、Manning 粗度係数、流水計算の打ち切り水深については、JNES と事業者の設定値に幅があるが、いずれも許容されている。
- (9) 陸域の流砂計算の有無の設定については、高橋他 (1999) の土砂移動モデルは、海域を対象としたものであるため、このモデルを用いて陸上遡上域への流砂計算を行なうことは、このモデルの適用範囲外と考える。流砂計算の陸域への適用については、今後の研究課題として手法開発及び検証を行なっていく。

参考文献

- [1]相田勇(1977):三陸沖の古い津波のシミュレーション, 東京大学地震研究所彙報, Vol.52, pp.71-101.
- [2]岩崎敏夫・真野明(1979):オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算, 海岸工学論文集, 第26巻, pp.70-74.
- [3]気象庁(2010):第6回津波予測技術に関する勉強会資料
<http://www.jma.go.jp/jma/press/1005/07a/tsunami_6th.html>
- [4]国土交通省港湾局及び港湾空港技術研究所(2010):
チリ中部沿岸で発生した地震による津波のGPS波浪計による観測結果について, 平成22年3月12日 <<http://www.pari.go.jp/information/news/h21d/p0312/p0312.html>>
- [5]小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫(1998):GISを利用した津波遡上計算と被害推定法, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.356-360.
- [6]後藤智明・佐藤一央(1993):三陸海岸を対象とした津波計算システムの開発, 港湾技術研究所報告, 第32巻, 第2号, pp.3-44.
- [7]佐竹健治他(2008):石巻・仙台平野における869年貞観津波の数値シミュレーション, 活断層・古地震研究報告, 8, pp.71-89.
- [8]佐藤良輔他(1989):日本の地震断層パラメーター・ハンドブック, 鹿島出版会, 390p.
- [9]高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・浅井大輔(1999):掃流砂層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.606-610.
- [10]中央気象台(1933):昭和八年三月三日三陸沖強震及津浪報告1933.6 駿震時報, 第七巻, 第二号別冊, 260p.
- [11]中央防災会議(2006):「日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会」資料
- [12]東北電力株式会社:女川発電所1号機, 2号機及び3号機「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う耐震安全性評価結果報告書
- [13]東北大学災害制御研究センター津波工学研究室(2010):
Modeling the Tsunami of 27 February 2010 in Chile
<http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/chile_100227/chile_100227.html>
- [14]東京電力株式会社東通発電所の平成22年1月第66回地盤耐震意見聴取会の報告資料(06-東通設C-54, 地震随件事象に対する考慮(津波に対する安全性))
- [15]土木学会原子力土木委員会津波評価部会(2002):原子力発電所の津波評価技術, 平成14年2月.
- [16]地震研究所(1934):昭和8年3月3日三陸地方津浪に関する論文及報告, 東京帝国大学地震研究所彙報別冊, 第1編.
- [17]Kanamori, H. and J. J. Cipar(1974): Focal process of the great Chilean earthquake

- May 22, 1960, Phys. Earth Planet. Interiors, Vol.9, pp.128-136.
- [18]Mansinha,L. and D.E.Smylie(1971) : The displacement field of inclined faults, Bulletin of the Seismological Society of America,Vol.61, No.5, pp.1433-1440.
- [19]Sugawara et al (2010): Sediment distribution and inundation area by the AD 869 Jogan tsunami in Sendai Plain, Northeast Japan, The 3rd International Tsunami Field Symposium.

- JNESのコメント
- 事業者報告書記載内容

1. 分析の主なポイント

事業者の耐震バックチェック報告書を分析する際の主なポイントを以下に示す。

- 津波に対する施設の安全性を評価するための項目は十分か。
- 想定津波の設定は適切か。
- 解析方法や解析モデル等の評価方法は、適切か。(最新知見の反映、既往津波の再現)

2. 事業者報告書の分析

■評価方針

- 施設の供用期間中に可能性のある津波を想定する。
 - 想定津波による水位変化を評価する。
 - 想定津波による2次的影響として海底の砂移動を評価する。
- 以上により、施設の安全性に問題がないことを確認する。

■評価方法

- 想定津波として、以下を対象とする。
 - 日本海溝沿いに想定される地震に伴う津波
 - 海域活断層に想定される地震に伴う津波
 - 連動型宮城県沖地震に伴う津波

上記の想定津波を対象とした、数値解析を行い水位変動を評価する。

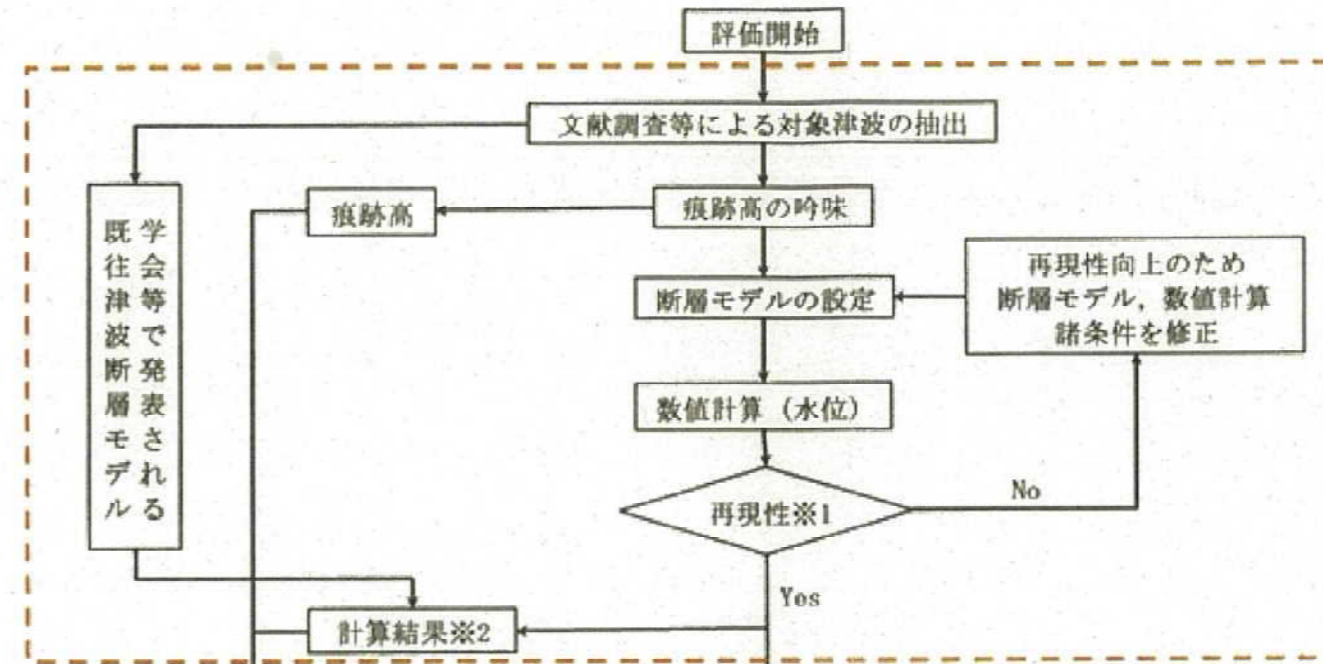
- 取水設備の水理特性を考慮した管路解析を行い、海水ポンプ室内の水位変動を評価する。
- 想定津波による海底の砂移動解析を行い、取水口前面の地形変化を評価する。

- 津波に対する施設の安全性を評価する上で、事業者の評価方針は妥当である。
- 評価方法は、想定津波として遠地津波も対象とすべきである。

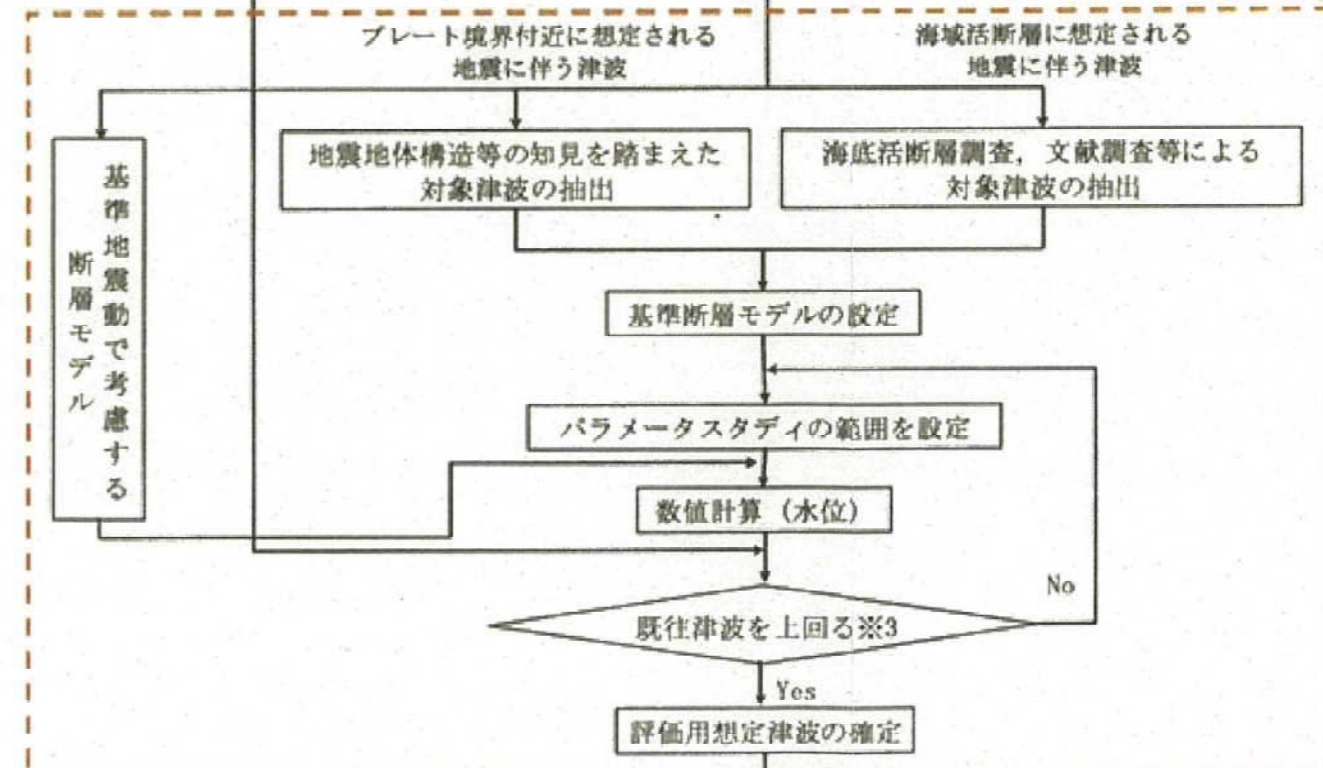
■検討フロー

・土木学会の「原子力発電所の津波評価技術2002」に従い検討を行なっている。

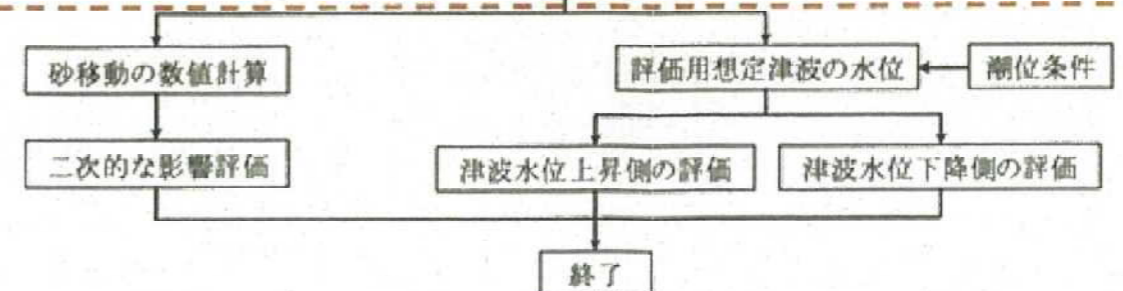
既往津波の再現性の確認



想定津波による設計津波水位の検討



評価

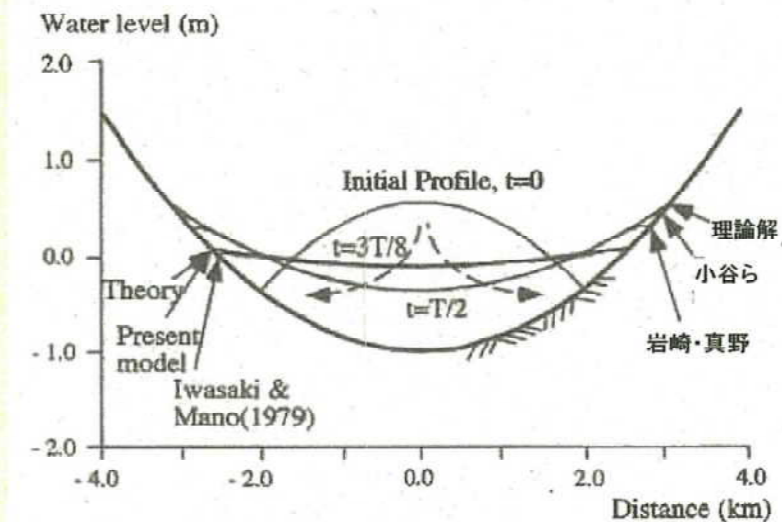


事業者の耐震バックチェック報告書の分析－女川発電所(2/9)－

■津波解析の計算条件

項目 \ 領域	B領域	C領域	D領域	E領域	F領域	G領域	H領域
空間格子間隔 Δs	2.5 km	833m (2500/3)	278m (2500/9)	93m (2500/27)	31m (2500/81)	10m (2500/243)	5m (2500/486)
時間格子間隔 Δt	0.1 秒						
基礎方程式	線形 長波式	非線形長波式					
沖側境界条件	自由透過	外側の格子領域と、水位・流量を接続					
陸側境界条件	完全反射	完全反射 (海底露出は考慮)	岩崎・真野(1979)の遡上境界条件				
初期海面変動	地震断層モデルを用いて Mansinha and Smylie(1971)の方法により計算される鉛直変位を海面上に与える						
海底摩擦	考慮しない	マンニングの粗度係数 $n=0.03\text{m}^{-1/3}/\text{s}$ (土木学会(2002)より)					
計算再現時間	再現性の計算：地震発生後3時間 予測計算：地震発生後4時間						
計算区分	既往津波による再現性の計算			予測計算			

岩崎・真野(1979)の方法は、広く利用されてきたが、最近ではこの方法を見直した小谷ら(1998)の方法が提案されている。小谷らの方法で検討しておく必要がある。(SANNAMIIは、小谷らの方法を基本とする。)



マンニングの粗度係数は、値が大きいほど水位変動は小さくなる。感度解析として、 $n=0.025$ の場合を検討しておく必要がある。

港内の水位変動の共振も考えられるため、地震発生後4時間の計算では短い。計算時間を延長し、港内の水位変動が十分に減衰していることを確認する必要がある。

基礎方程式：非線形長波 [浅水理論] の連続式及び運動方程式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_x Q_y}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} Q_x \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x Q_y}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_y^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} Q_y \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} = 0$$

ここに、 x, y : 水平座標

h : 静水深

g : 重力加速度

D : 全水深 (= 静水深 + 水位)

η : 静水面からの水位

n : マニングの粗度係数

Q_x, Q_y : x, y 方向の単位幅当たりの流量 (= 流速 × 全水深)

水平渦動粘性は考慮していない。

計算スキーム: スタッガード・リープフロッグ法(後藤・小川の方法)

JNESのコメント
 事業者報告書記載内容

■ 既往津波の検討

(1) 敷地における既往最大の津波

敷地に影響を及ぼしたと考えられる既往津波について、文献調査を実施し、検討を行なっている。

	津波規模	
近地津波	869年(貞観11年)の津波	m=4
	1611年(慶長16年)三陸沖の津波	m=4
	1793年(寛政5年)宮城県沖の津波	m=2
	1896年(明治29年)明治三陸地震津波	m=4
	1933年(昭和8年)昭和三陸地震津波	m=3
遠地津波	1960年チリ地震津波*	

既往最大

- ✓ 宮城県においては、869年を除き1611年の津波が敷地における既往最大の津波である。
- ✓ 1960年チリ地震津波における敷地への影響は、既往最大の近地津波である1611年の津波を上回るものではないと評価。

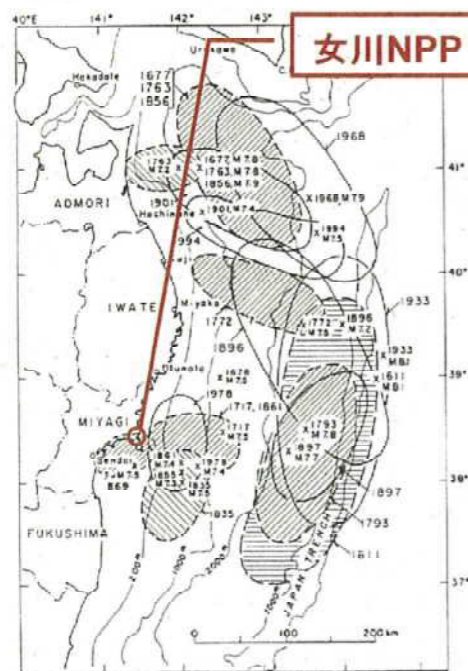


図1 三陸沖における津波の推定波源域(羽鳥、2000)

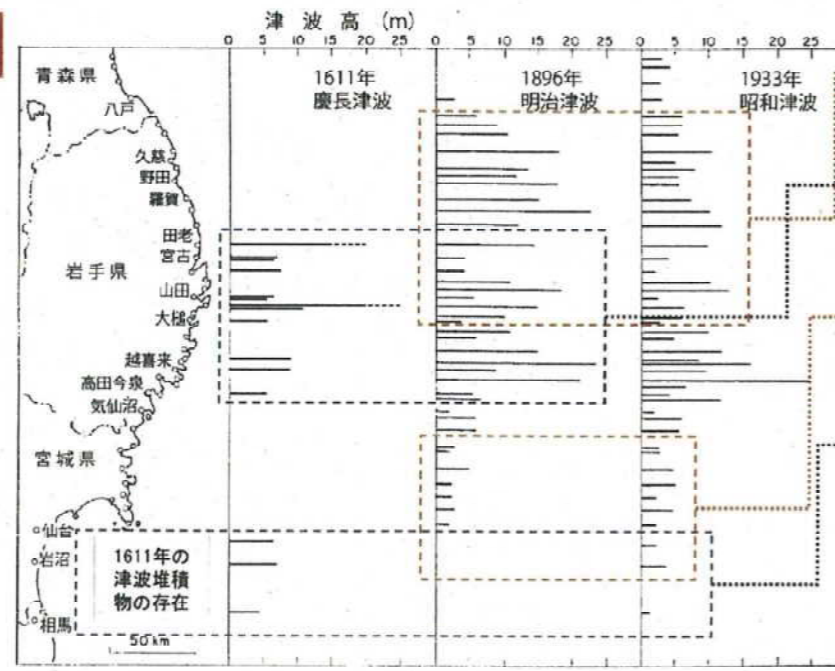


図2 1611年慶長の津波、1896年明治三陸津波、1933年昭和三陸津波の津波高比較(羽鳥、2000)

(2) 既往津波の敷地における予測計算結果

津波名称	敷地前面最大水位上昇量	取水口前面最大水位下降量		
		1号機	2号機	3号機
1896年明治三陸地震津波	6.24m	3.80m	3.85m	3.84m
1933年昭和三陸地震津波	5.69m	5.05m	4.99m	4.97m
1611年〔慶長16年〕の津波(津波地震)	7.11m	4.26m	4.37m	4.33m
1611年〔慶長16年〕の津波(正断層地震)	7.78m	8.01m	7.90m	7.91m
【参考】869年〔貞観11年〕の津波	5.5m	5.3m	5.2m	5.2m

1611年の津波

- ✓ 「津波地震」と考えられるが(推本2002)、「正断層地震」の断層モデル(相田1977)も提案されていることから2通りについて、いずれも土木学会(2002)の断層モデルを用いて再現解析を実施。

869年の津波

- ✓ 仙台平野や石巻平野で現在の海岸から数km内陸において津波堆積物が確認されているものの、明確な記録がなく、他の既往津波と比較することができない。
- ✓ 佐竹ら(2008)が検討した10つのモデルの内、3モデルで津波解析を実施。

869年貞観津波の取扱

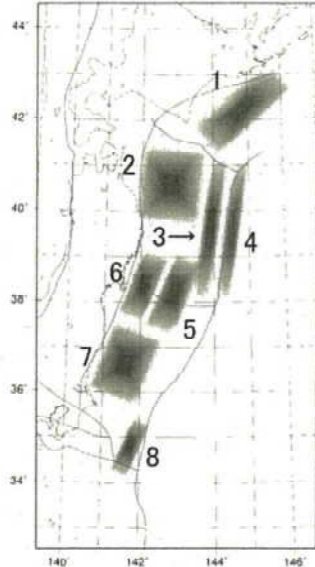
- ✓ 近年の津波堆積物調査などから、浸水域や波源の検討モデルが推定されつつあるが、土木学会(2002)や地震調査研究推進本部(2009)では、当該地震を評価の対象としていない。
- ✓ 事業者報告書では、評価における貞観津波の解析の位置づけが明確でない。(参考として解析を実施しているが、想定津波としては考慮されていない。)

■想定津波の検討 (1)日本海溝沿いに想定される地震に伴う津波

JNESのコメント

事業者報告書記載内容

(a) 基準断層モデルの設定



土木学会(2002)において既往最大とされている M_w として、領域3、4にそれぞれ $M_w=8.3$ 、 8.6 の基準断層モデルを設定し、概略パラスタ、詳細パラスタを実施している。

領域	既往最大 M_w	対応する既往津波
1	8.2	1952年
2	8.4	1968年
3	8.3	1896年
4	8.6	1611年
5	8.2	1793年
6	7.7	1978年
7	7.9	1938年
8	8.2	1677年



図4 基準とする波源位置

図3 地震の活動域(土木学会2002)

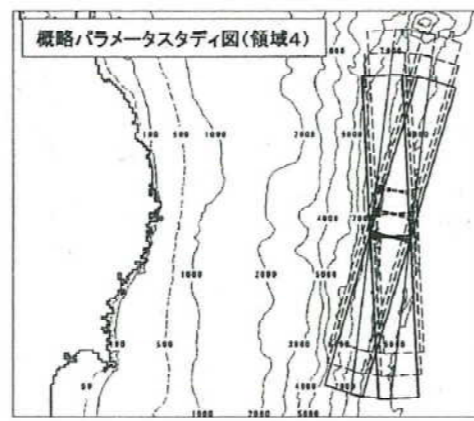
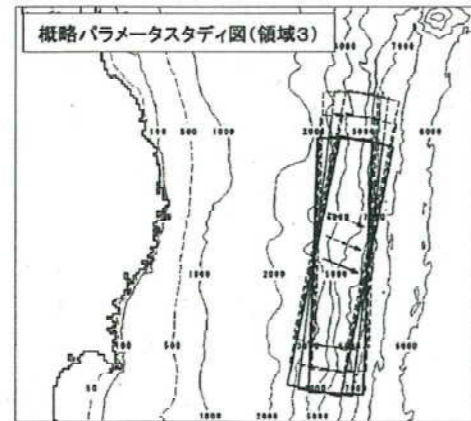
領域1～8の内、領域3、4の波源が、当該地域への影響が最も大きいことを説明する必要がある。

基準断層モデル

断層パラメータ	領域3	領域4	備考
モントマギニョット M_w	8.3	8.6	既往最大津波の M_w
断層長さL	218km	283km	既往津波を再現できる断層モデルにスケールリング則を適用して設定。スケールリング則は断層幅に限界がある場合。
断層幅W	50km	50km	
すべり量D	9.32m	10.1m	
断層上縁深さd	1km	1km	既往津波を再現できる断層モデルの値。
走向 θ	190°	190°	等深線(海溝軸)に合わせて設定。
傾斜角 δ	20°	45°	既往津波を再現できる断層モデルの値。
すべり角 λ	75°	270°	領域3: 走向とすべり方向に基づき設定。 領域4: 既往津波を再現できる断層モデルの値。

領域3: プレート間津波地震(逆断層)
領域4: プレート内正断層

(b) 概略パラメータスタディ



(c) 詳細パラメータスタディ

区分	パラメータ項目	パラメータ変動範囲	ケース数	計算水位(m)	
				最大水位上昇	最大水位下降
概略最大水位 上昇ケース(領域3)	a) 傾斜角 δ	基準 $\pm 5^\circ$	3	+13.0	-5.7
	b) すべり角 λ	基準 $\pm 10^\circ$	3		
概略最大水位 下降ケース(領域4)	a) 傾斜角 δ	基準 $\pm 5^\circ$	3	+8.6	-8.1
	b) 断層面上縁深さd	0, 1, 2km	3		



図5 敷地に最も影響の大きい津波の断層(赤: 最大水位上昇ケース、青: 最大水位下降ケース)

—: 最大水位上昇ケース
—: 最大水位下降ケース

最大水位上昇ケース(最南端)

	L (km)	W (km)	D (m)	d (km)	θ (°)	δ (°)	λ (°)	M_w
領域3	218	50	9.32	1	185	25	80	8.3

最大水位下降ケース(最南端)

	L (km)	W (km)	D (m)	d (km)	θ (°)	δ (°)	λ (°)	M_w
領域4	283	50	10.1	2	180	40	270	8.6



図6 最大水位上昇量分布

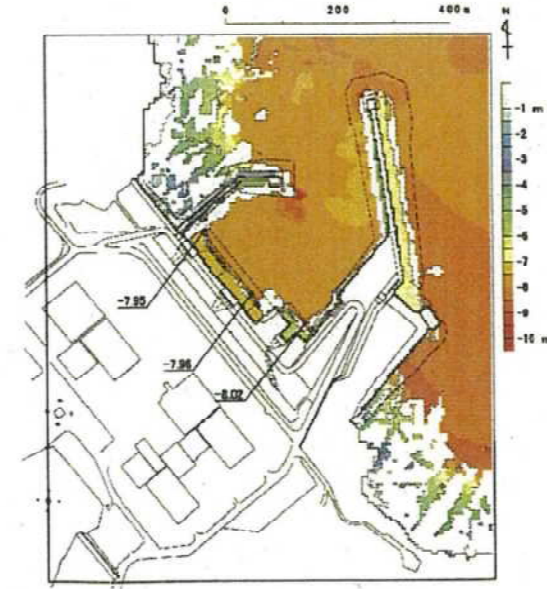


図7 最大水位下降量分布

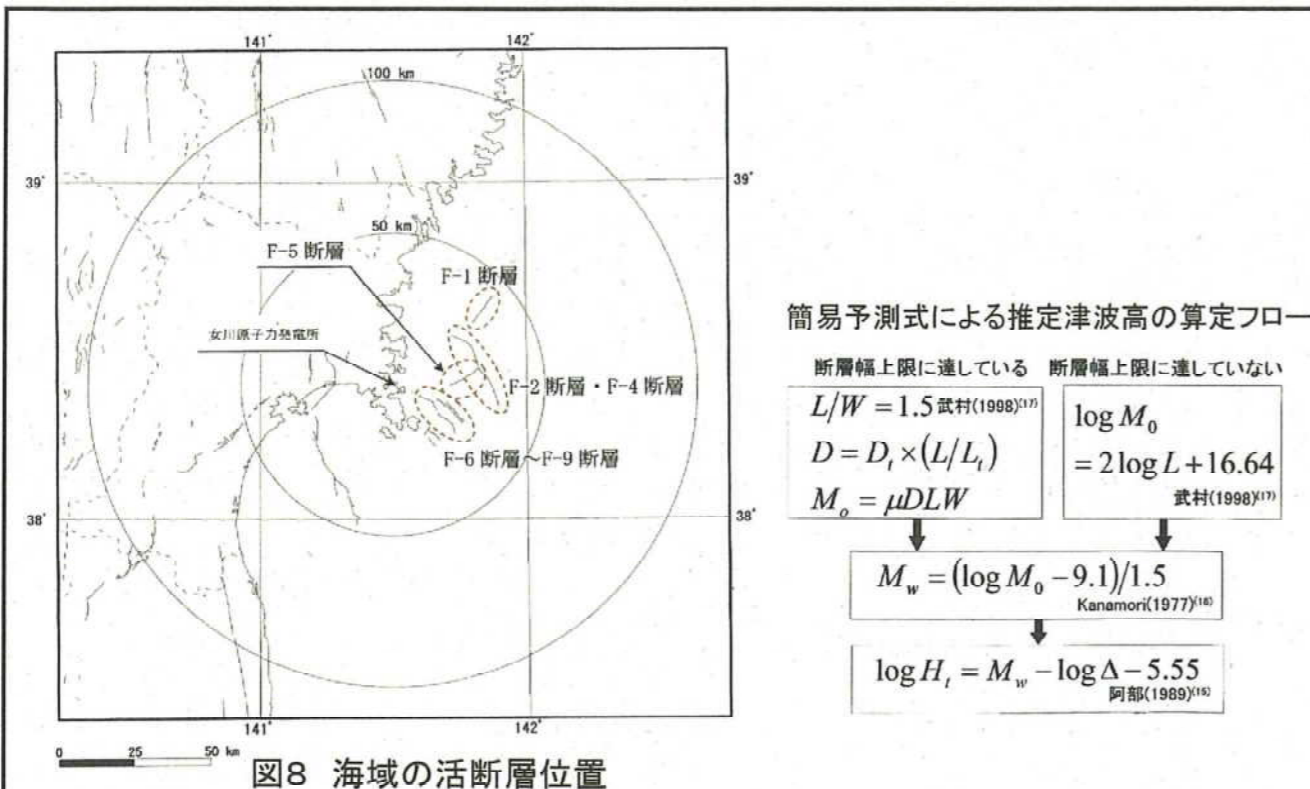
津波名称	敷地前面 最大水位上昇量	取水口前面最大水位下降量		
		1号機	2号機	3号機
設計想定津波(水位上昇側)	12.96m	5.68m	5.49m	5.49m
設計想定津波(水位下降側)	7.74m	8.02m	7.96m	7.95m

- ✓ 敷地前面における最大水位・最小水位を与える評価用の想定津波は、日本海溝沿いに想定される地震に伴う津波である。
- ✓ 最大水位上昇量は、朔望平均満潮位を考慮しても、敷地高を超えることはない。
- ✓ 最大水位下降量は、朔望平均干潮位を考慮して、取水口敷高を4分間程度下回る。非常用系の冷却海水ポンプに必要な海水が、取水路に41分間程度確保されるため、安全性に問題とならない。

領域	パラメータ項目	パラメータ変動範囲	ケース数	計算水位(m)	
				最大水位上昇	最大水位下降
3	a) 位置	基準, 北へ20km, 40km移動	3	+11.8	-5.1
	b) 走向 θ	基準, 基準 $\pm 5^\circ$	3		
4	a) 位置	基準, 北へ20km, 40km移動	3	+9.0	-8.0
	b) 走向 θ	基準, 基準 $\pm 10^\circ$	3		

■想定津波の検討

(2) 海域活断層に想定される地震に伴う津波



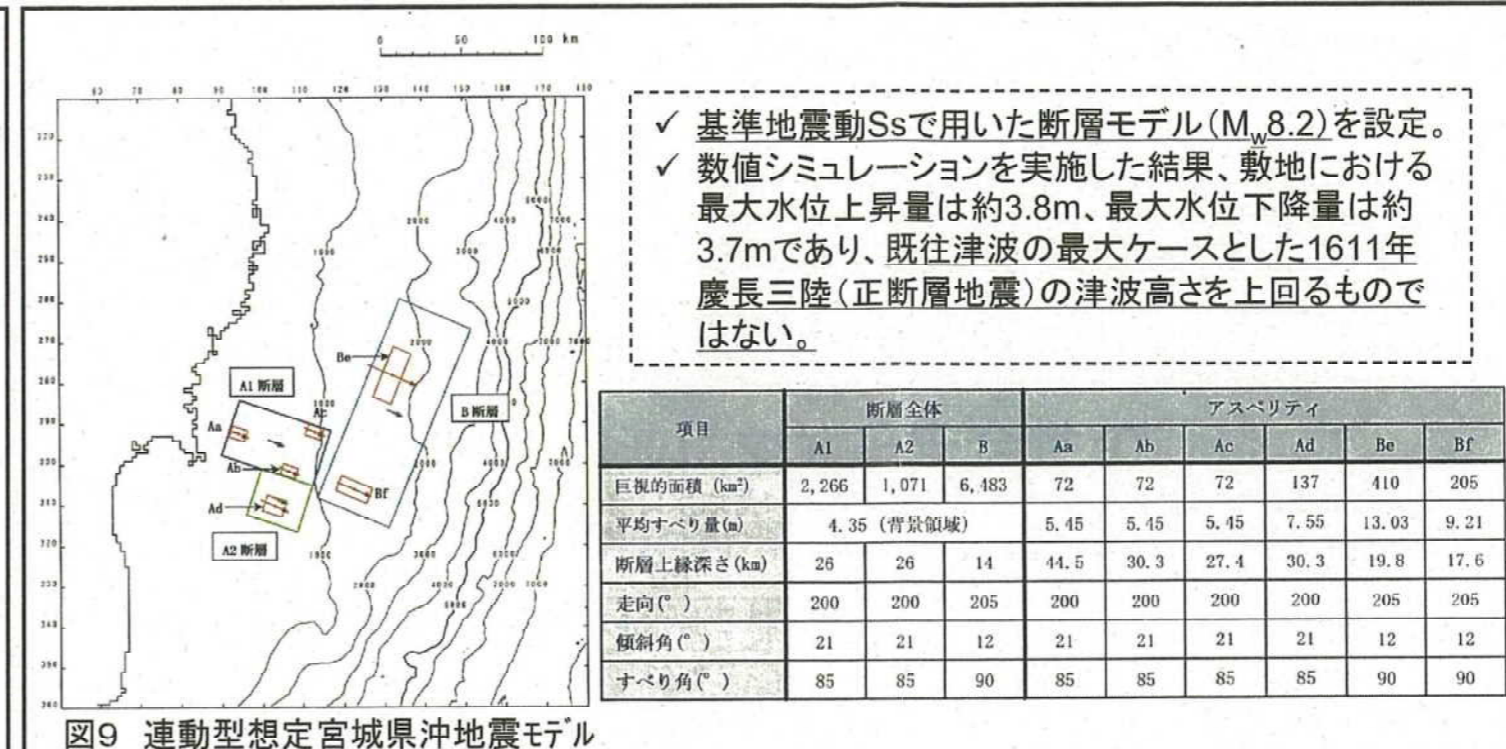
- ✓ 簡易予測式による津波の推定波高は、阿部(1989)の簡易予測式により検討し、推定津波高は最大でも約1.2m。
- ✓ 1611年の慶長の津波を正断層地震と考えたケースでは、敷地前面における最大水位上昇量が7.51m。
- ✓ 海域の活断層による津波の推定津波高は、既往津波の高さを上回るものではない。

海域活断層による津波の敷地における推定津波高

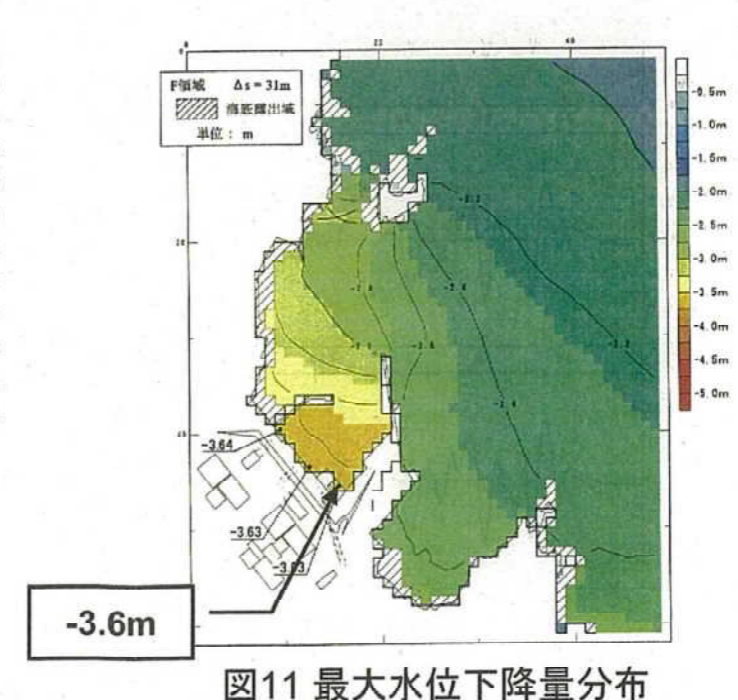
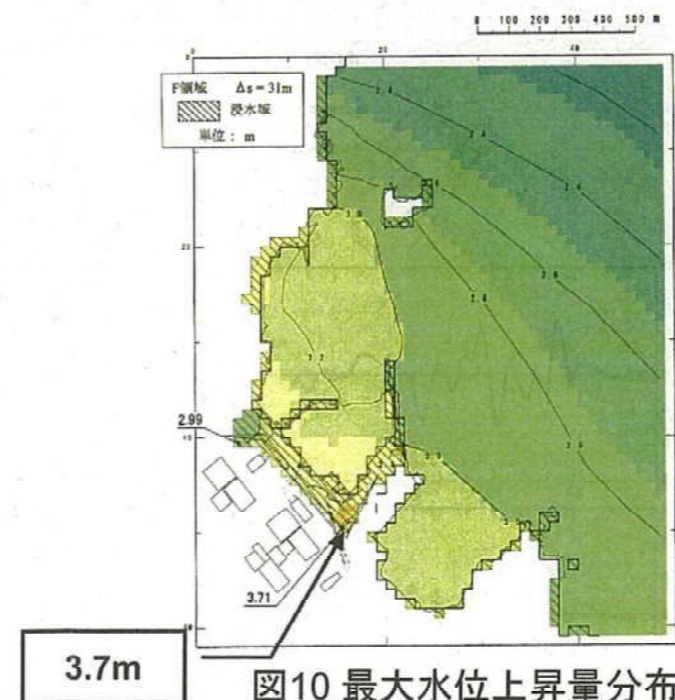
海域断層	断層長 L (km)	断層幅 W (km)	すべり量 D (km)	地震モーメント Mo (km)	モーメント マグニチュード Mw	津波の伝播距離 Δ (km)	推定津波高 Ht (m)
F-1	11.1	7.4	0.92	2.65×10^{18}	6.2	37.5	0.2
F-2, F-4	27.9	15.0	2.32	3.40×10^{19}	7.0	21.7	1.2
F-5	11.2	7.5	0.93	2.73×10^{18}	6.2	20.7	0.3
F-6~F-9 (F-6 北西延長部付近の1測線でのみ認められる断層, F-6, F-7, F-8, F-9, f-12)	22.0	14.7	1.83	2.07×10^{19}	6.8	15.2	1.2

断層長さや地震の規模が、既往の地震などと比較して非常に小さいため、女川サイトへの影響は小さいと考えられる。

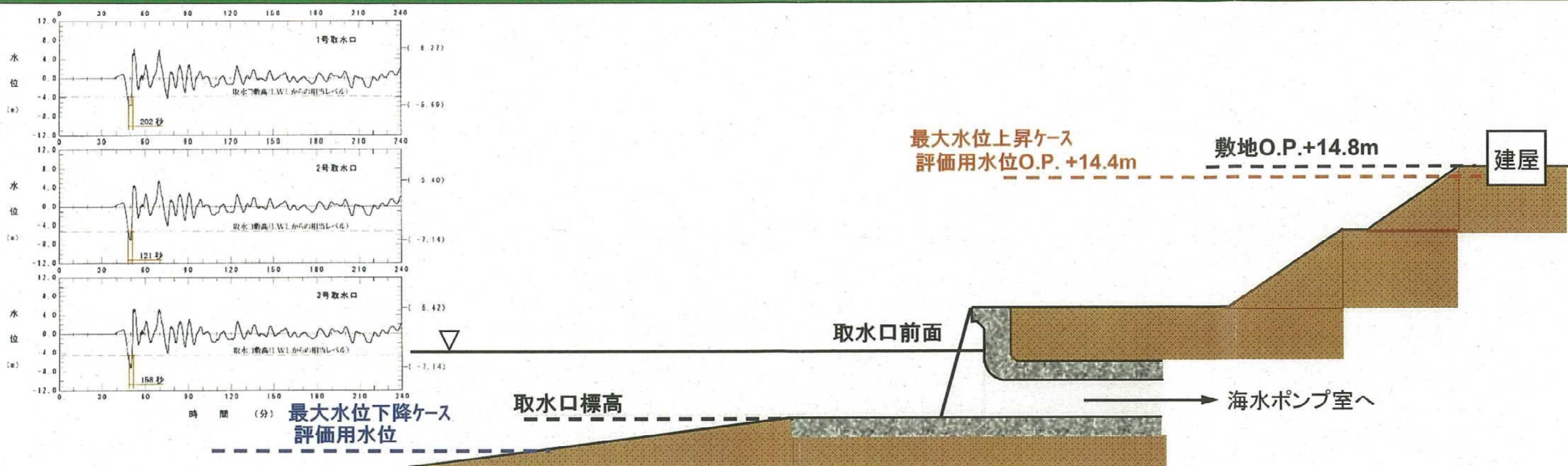
(3) 連動型宮城県沖地震に伴う津波



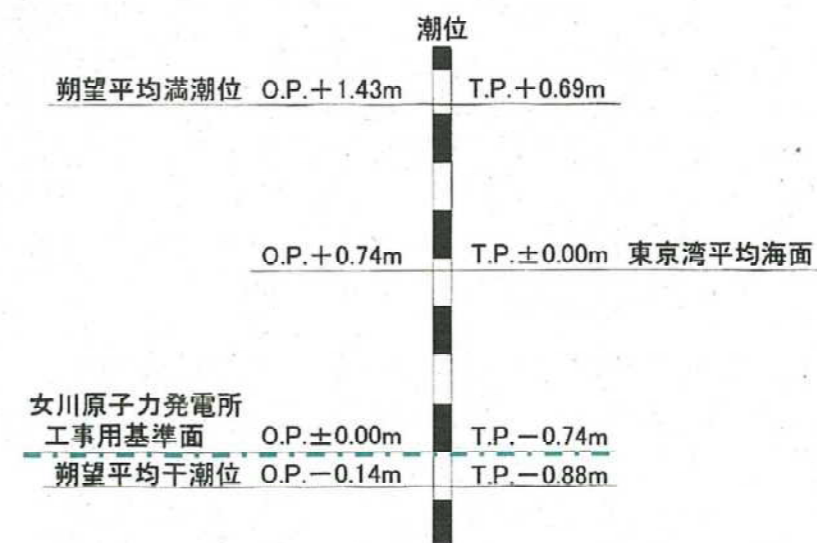
津波名称	敷地前面 最大水位上昇量	取水口前面最大水位下降量		
		1号機	2号機	3号機
1611年〔慶長16年〕の津波(正断層地震)	7.78m	8.01m	7.90m	7.91m
設計想定津波(水位上昇側)	12.96m	5.68m	5.49m	5.49m
設計想定津波(水位下降側)	7.74m	8.02m	7.96m	7.95m
【参考】連動型想定宮城県沖地震津波(Ss-F)	4.1m	3.6m	3.6m	3.6m



事業者の耐震バックチェック報告書の分析－女川発電所(6/9)－



現象	安全性判断基準値		事業者の結果		
水位上昇	敷地レベル		O.P. +14.8m	O.P. +14.4m	解析値12.96m、朔望平均満潮位O.P.+1.43m
水位下降	取水口敷高	1号機	O.P. -4.0m	O.P. -8.2m	解析値-8.02m、朔望平均干潮位O.P.-0.14m
	取水口敷高	2号機	O.P. -5.3m	O.P. -8.1m	解析値-7.96m、朔望平均干潮位O.P.-0.14m
	取水口敷高	3号機	O.P. -4.7m	O.P. -8.1m	解析値-7.95m、朔望平均干潮位O.P.-0.14m



(1). 水位上昇側の評価結果

女川原子力発電所の想定津波による水位上昇量は12.96mであり、評価用の最高水位は朔望平均満潮位 (O.P. +1.43m) を考慮すると O.P. +14.4m 程度 である。原子炉施設等の主要施設が O.P. +14.8m の敷地に設置されていることから、原子炉施設の安全性に問題とならないことを確認した。

(2). 水位下降側の評価結果

女川原子力発電所の想定津波による水位低下に関する評価を実施した。

その結果、津波時の水位は各号機の取水口敷高を数分間程度下回るが、その間、非常用補機冷却海水ポンプに必要な海水が取水路内に確保されていること、取水路内の水位変動が生じてこの設計最低水位 (取水不能水位) を下回らないことから、原子炉施設の安全性に問題とならないことを確認した。

ユニット	取水可能水量	非常用海水ポンプ取水量	取水可能時間	取水不能時間
1号機	約 2,600m ³	3,860m ³ /h	約 40分	約 4分
2号機	約 5,100m ³	7,850m ³ /h	約 38分	約 2分
3号機	約 5,000m ³	7,850m ³ /h	約 38分	約 3分

後述の「取水設備の水理特性による水位変動への影響」にて検討

■二次的な影響(津波に伴う海底の砂移動)に対する評価

事業者報告書の要約

想定津波を対象とした砂移動の数値シミュレーションを実施した結果、各号機前面に多少の砂が堆積することが確認されたが、取水口を閉塞するほどではないことから、非常用補機冷却系の取水に支障が生じることはない。

主な解析条件

解析手法	高橋他(1999)、藤井他(1998)
事業者の検討波源	①津波解析結果の最大水位上昇ケース ②津波解析結果の最大水位下降ケース

	砂移動解析領域	
	G領域	H領域
計算格子間隔 (Δs)	5m (2500/486)	
計算時間間隔 (Δt)	0.05 秒	
沖側境界条件	津波解析の計算結果におけるG領域の計算結果を境界条件として入力	
陸側境界条件	岩崎・真野(1979)の遡上境界条件	
初期海面変動	考慮しない	
海底摩擦	マンニングの粗度係数 $n=0.03\text{m}^{-1/3}/\text{s}$ (土木学会(2002)より)	
計算再現時間	地震発生後4時間	

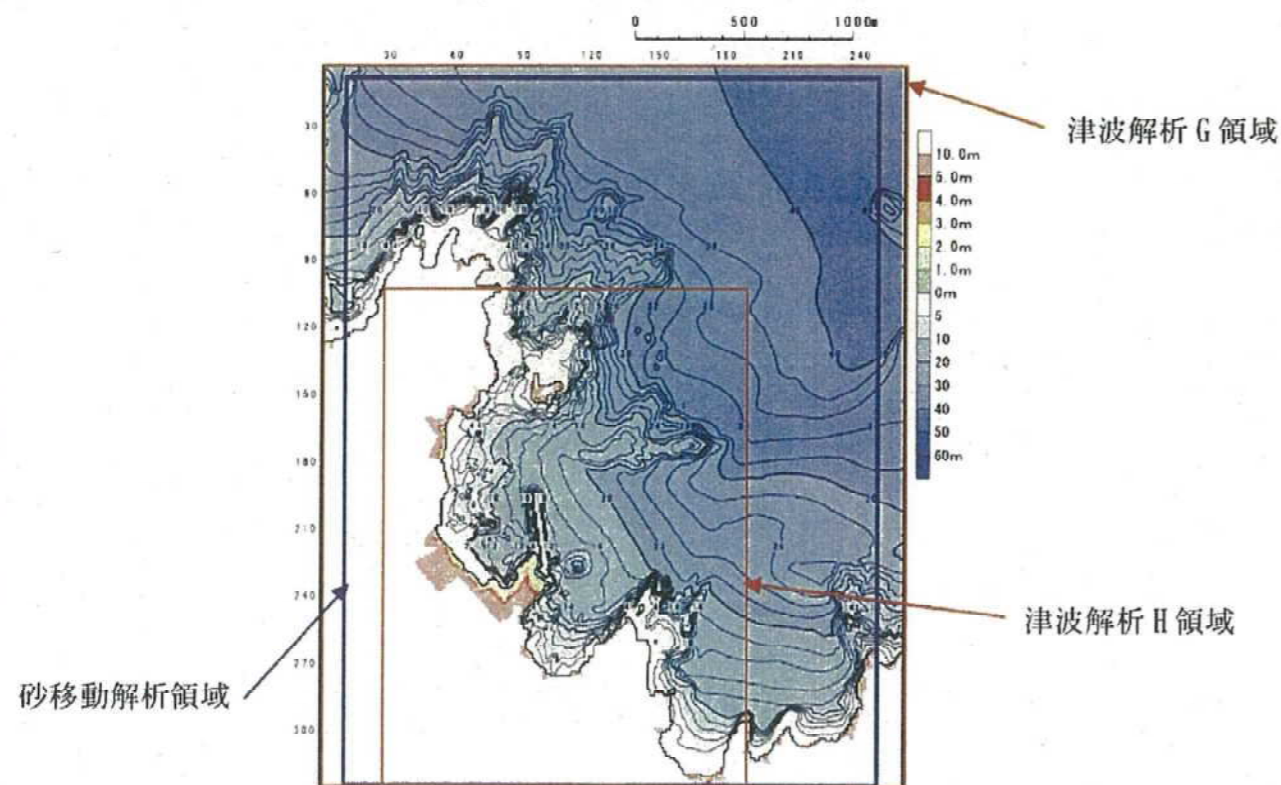


図12 海底土砂移動解析の解析領域

解析結果

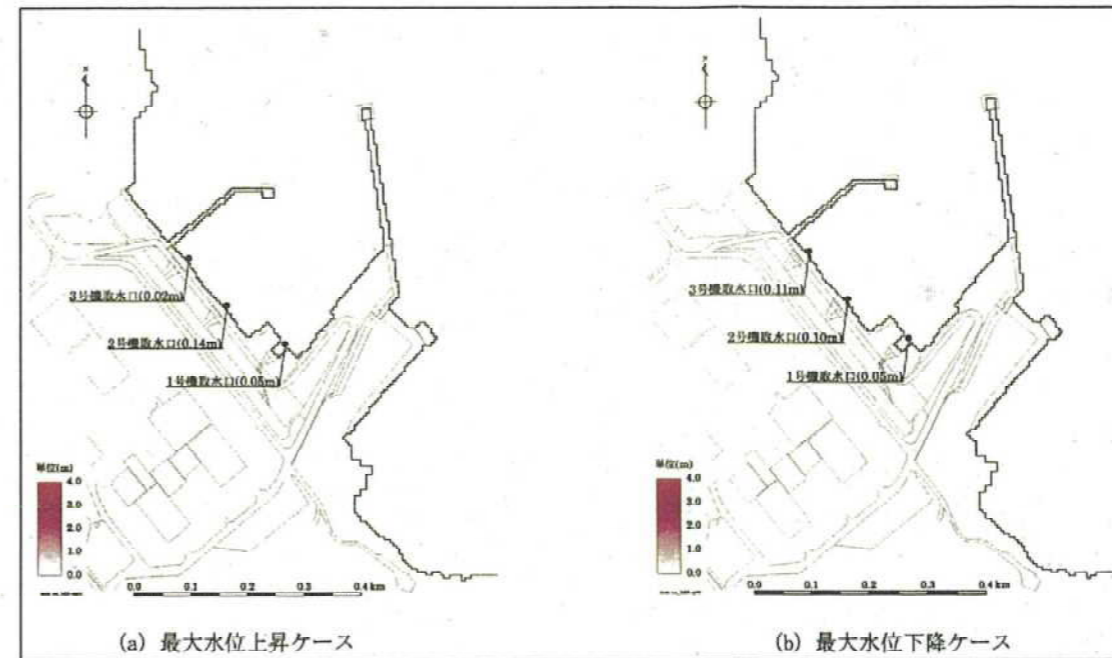


図13 砂移動に伴う地形変化量の最大堆積量分布(高橋他、1999)

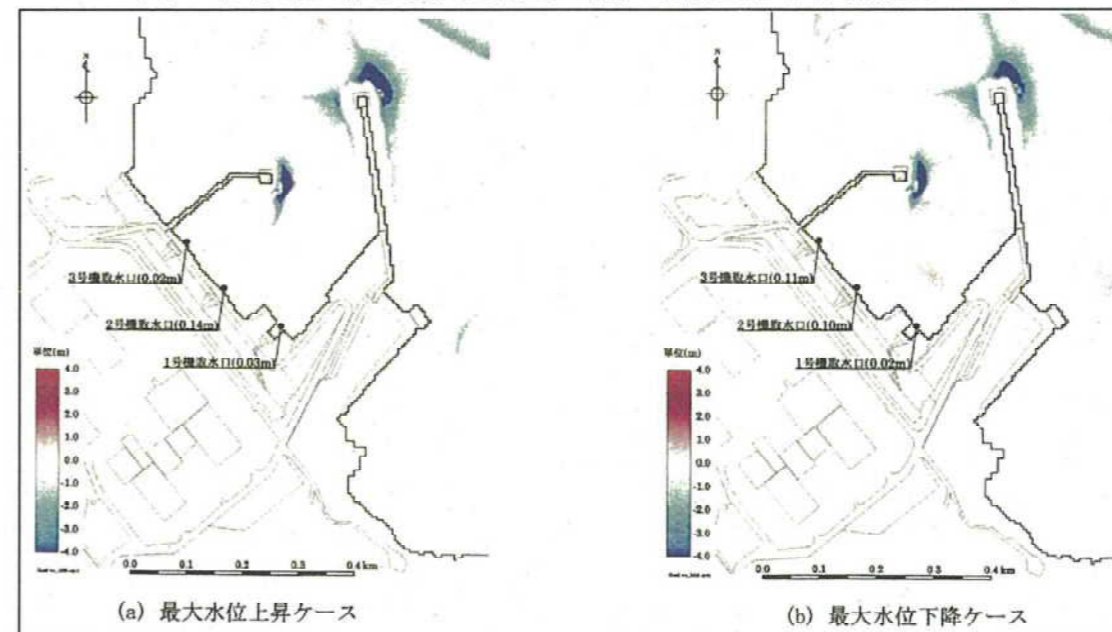
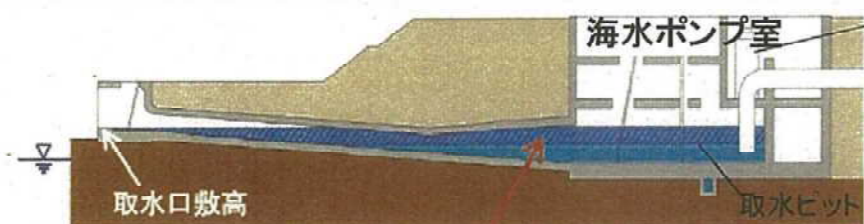


図14 砂移動に伴う地形変化(地震発生から240分後)の分布(高橋他、1999)

現象	安全性判断基準値	事業者の結果	
		1号機	2号機
砂の堆積	取水口の開口高	270 cm	5cm程度
		300 cm	14cm程度
		300 cm	11cm程度

・各号機の取水口開口高が数十cmであるため、開口部が閉塞する可能性は低い。

■取水設備の水理特性による水位変動への影響



事業者報告書の要約

- ✓ 想定津波を対象とした取水設備の水理特性による水位変動について数値シミュレーションを実施した。
- ✓ 水位上昇に対して各設備から溢水することはない。
- ✓ 水位低下に対して取水できなくなることはない。
- ✓ 原子炉施設の安全性に問題とならない。

主な解析条件

計算範囲	取水口～海水ポンプ室
基礎方程式	非定常管路流・開水路の連続式および運動方程式



図15 第1号機取水設備の断面図

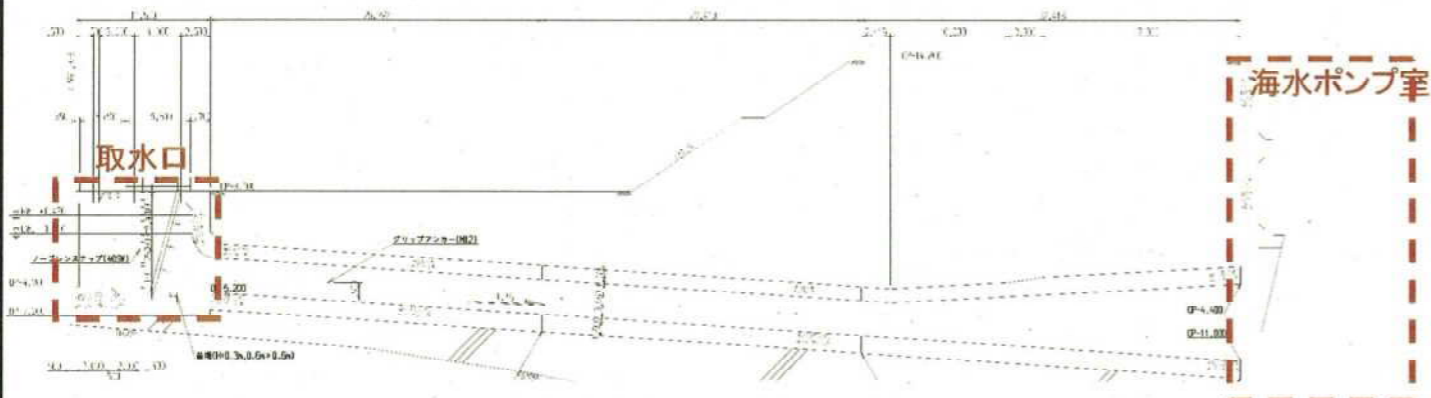


図16 第3号機取水設備の断面図

安全性判断基準値

①水位上昇側

O.P. +15.00m (全号機の海水ポンプ室天端高であり、主要設備が設置されている
O.P. +14.80m に溢水しないレベル)

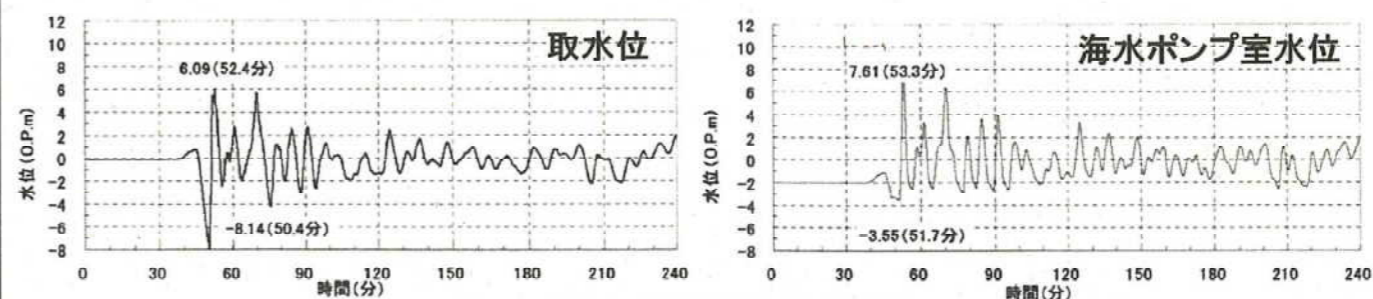
②水位下降側

第9表 非常用系海水ポンプ設計最低水位

1号機	O.P. -6.20m
2号機	O.P. -7.95m
3号機	O.P. -7.80m

1号機海水ポンプ室の解析結果

現象	安全性判断基準値		事業者の結果 (海水ポンプ室の水位)	
水位上昇	敷地レベル	O.P. +14.8m	O.P. +12.11m	余裕2.69m
水位下降	取水不能水位 (海水ポンプ設計最低水位)	O.P. -6.20m	O.P. -3.55m	余裕2.65m

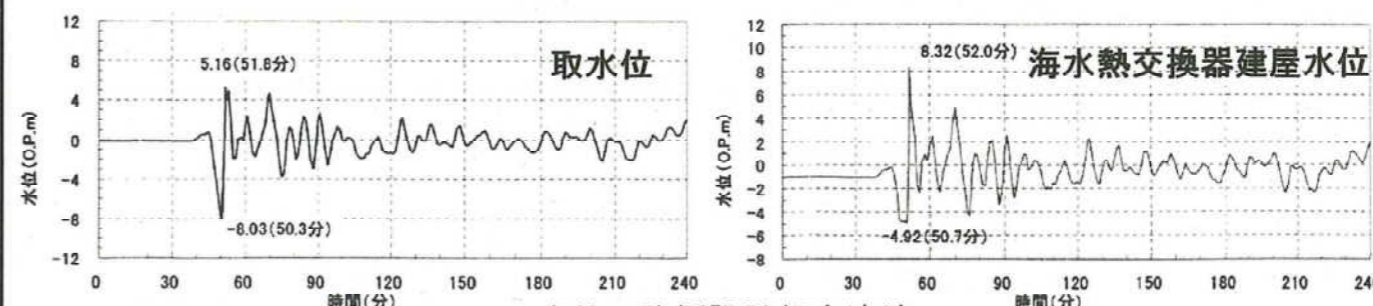


水位下降側設計想定津波

ユニット	取水可能水量	非常用海水ポンプ取水量	取水可能時間	取水不能時間
1号機	約 2,600m ³	3,860m ³ /h	約 40分	約 4分

3号機海水ポンプ室の解析結果

現象	安全性判断基準値		事業者の結果 (海水ポンプ室の水位)	
水位上昇	敷地レベル	O.P. +14.8m	O.P. +10.79m	余裕4.01m
水位下降	取水不能水位 (海水ポンプ設計最低水位)	O.P. -7.80m	O.P. -4.92m	余裕2.88m



水位下降側設計想定津波

ユニット	取水可能水量	非常用海水ポンプ取水量	取水可能時間	取水不能時間
3号機	約 5,000m ³	7,850m ³ /h	約 38分	約 3分

3. 分析結果のまとめ

■津波に対する施設の安全性を評価するための項目は適切か。

- ✓ 事業者は、施設の供用期間中に可能性のある津波を想定し、敷地沿岸部および海水ポンプ内における水位変動や海底の土砂移動を項目として挙げており、津波に対する施設の安全性評価の項目は適切である。

■想定津波の設定は適切か。

- ✓ 事業者が敷地前面海域に想定した、日本海溝沿い、海域活断層および連動型宮城県沖地震に伴う津波の他に当該施設に影響を及ぼす津波は考えにくく、想定津波の設定として適切である。

(日本海溝沿いに想定される地震に伴う津波について)

- ✓ 土木学会(2002)の基準断層モデルの設定領域1～8のうち、領域3および4のみを対象として検討を行なっている。よりサイトに近い領域5、6について、検討対象から除外する理由について説明が必要である。
- ✓ 領域5、6には、津波堆積物から推定された869年貞観津波(最大 M_w 8.4)の波源域が存在するが、土木学会(2002)の基準断層モデルでは、領域5に $M_w=8.2$ 、領域6に $M_w=7.7$ と設定している。869年貞観津波を、想定津波の1つとして検討する必要がある。
- ✓ 中央防災会議(2006)では、日本海溝沿いにアスペリティを考慮した断層モデルを設定し、①明治三陸タイプ地震(M_w 8.6)、②宮城県沖の地震(M_w 8.2)、③三陸沖北部の地震(M_w 8.4)について検討しており、これらのモデルでも評価する必要がある。

(海域活断層に想定される地震に伴う津波について)

- ✓ 事業者は、海域の活断層による津波の推定津波高は、既往津波の高さを上回るものではない、としている。断層長さや地震の規模が、既往の地震などと比較して非常に小さいため、女川サイトへの影響は小さいと考えられる。

(連動型宮城県沖地震に伴う津波について)

- ✓ 宮城県が公開する宮城県沖(連動)を対象に実施した数値シミュレーションによる津波評価において、女川発電所の前面における水位は4～5mであり、1611年慶長三陸(正断層地震)の津波高さを上回るものでない。

■解析方法や解析モデル等の評価方法は適切か。

(津波解析の計算条件について)

- ✓ 事業者は、陸側境界条件として岩崎・真野(1979)の方法を採用しているが、最近ではこの方法を見直した小谷ら(1998)の方法が提案されている。最新知見の反映という意味でも、小谷らの方法を用いた検討が必要である。(なお、小谷らの方法を用いた場合には、岩崎・真野の方法に比べて水位が大きくなる傾向にある。)
- ✓ 地形モデルの計算格子間隔について、他サイトの審査ではあるが、合同WGの委員から5m程度でも検討するようコメントがあった。当該サイトでは、計算格子間隔が31mであり、より詳細な計算格子間隔での検討が必要である。
- ✓ 津波来襲時には、港内の水位変動の共振も考えられるため、計算時間が地震発生後4時間では十分ではない。計算時間を延長して、港内の水位変動が十分減衰することを確認する必要がある。

(既往津波の再現性について)

- ✓ 事業者は、数値解析手法および地形モデルの検証のため、1896年明治三陸津波および1933年昭和三陸津波を対象に、再現計算を行っている。
- ✓ 事業者の結果は、再現性の評価指標として、相田(1977)の幾何平均値 K と幾何標準偏差 κ を用いると、1896年明治三陸津波の広域で $K=1.00$ 、 $\kappa=1.41$ 、1933年昭和三陸津波の広域で $K=1.04$ 、 $\kappa=1.40$ と報告されている。
- ✓ 土木学会(2002)では、再現性の目安として、下記の条件を設定しており、事業者の結果は、この条件を広域では満たしているが、サイト近傍については示されていない。

$$0.95 < K < 1.05, \quad \kappa < 1.45$$

■懸念事項

- ✓ 土木学会(2002)や中央防災会議(2006)では、869年貞観津波を対象とした津波評価を行っていないが、最近の津波堆積物調査により波源域や地震規模などが明らかとなりつつある。日本海溝沿いの想定津波の基準断層モデルを設定する際の考え方について、専門家へのヒアリング調査が必要である。