

# 志賀原子力発電所 新耐震指針に照らした耐震安全性評価 (中間報告の概要)

地震随伴事象(津波に対する安全性評価)

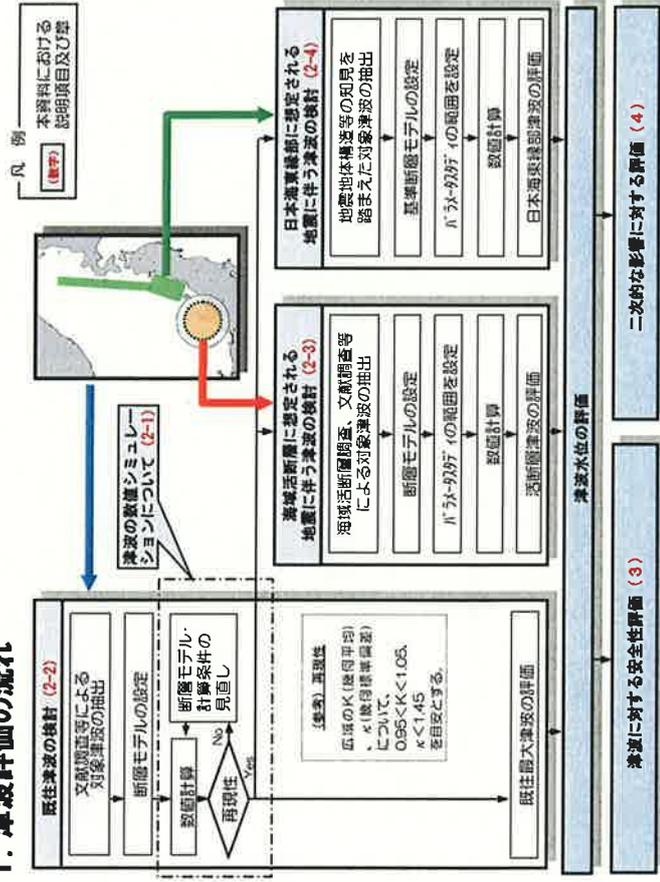
平成21年1月22日

北陸電力株式会社

## 目次

1. 津波評価の流れ
2. 津波の想定及び数値シミュレーション
  - 2-1 津波の数値シミュレーションについて
  - 2-2 既往津波の検討
  - 2-3 海域活断層に想定される地震に伴う津波の検討
  - 2-4 日本海東縁部に想定される地震に伴う津波の検討
3. 津波に対する安全性の評価
4. 二次的な影響に対する評価(砂移動の影響)
5. まとめ

## 1. 津波評価の流れ



## 2-1 津波の数値シミュレーションについて

### (1) 計算条件【その1】

項目		計算条件							
計算領域		日本海全域							
計算格子間隔 Δs		A領域 1.6km	B領域 800m	C領域 400m	D領域 200m	E領域 100m	F領域 50m	G領域 25m	H領域 12.5m

## 2-1 津波の数値シミュレーションについて

### (1) 計算条件 【その2】

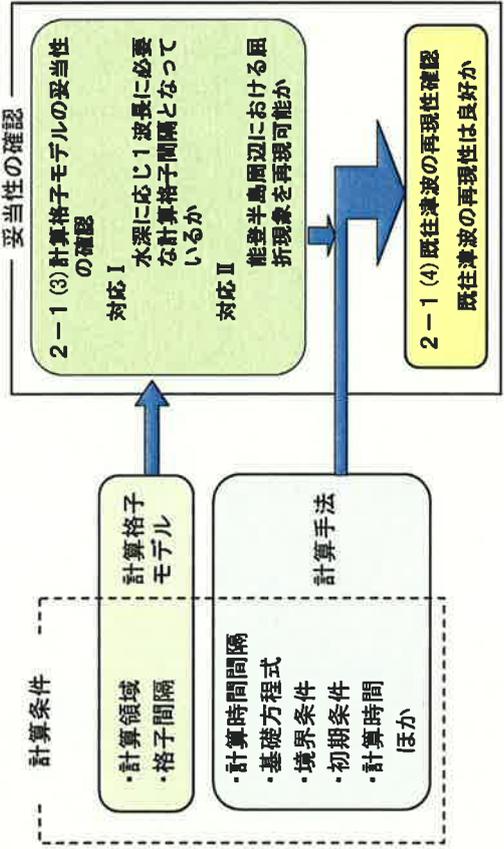
計算条件	
計算時間間隔 $\Delta t$	0.45秒
基礎方程式	非線形長波(浅水理論)の連続式及び運動方程式
沖側境界条件	・外側の大格子領域と水位・流速を接続 ・海城部は自由透過条件
陸側境界条件	・完全反射条件(計算格子間隔 $\Delta s$ : 1.6km~100m) ・小谷匠か(1998)の湖上境界条件(計算格子間隔 $\Delta s$ : 50m~12.5m)
初期条件	断層モデルを用いてMansinha and Smylie(1971)の方法により計算される海底面変位を初期水位として与えている
海底摩擦	マニングの粗度係数 $n=0.03m^{-1/3}$ (土木学会(2002))
水平渦動粘性係数	$10m^2/s$ (土木学会(2002))
計算時間	・能登半島周辺の海域活断層津波: 地震発生後3.0時間 ・日本海東縁部の津波: 地震発生後6.0時間

4

## 2-1 津波の数値シミュレーションについて

### (2) 妥当性の確認の流れ

数値シミュレーションに用いた計算格子モデルの妥当性について以下のとおり確認。



5

## 2-1 津波の数値シミュレーションについて

### (3) 計算格子モデルの妥当性の確認

能登半島周辺は津波を収斂させやすい海底地形を有していることに対して

収斂効果が適切に再現できる計算格子モデルとなっているか?

格子設定に関する知見

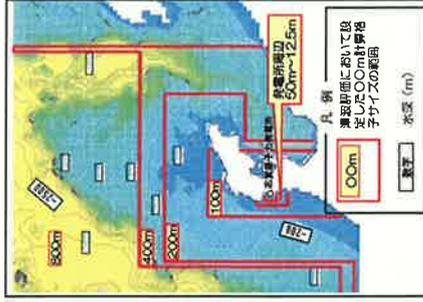
- 【今村・李(1998)】: 粗い格子間隔では実際の地形を十分表現できず、計算結果が大きく変化してしまうことが多い。
- 【長谷川・首藤ら(1987)】: 津波の空間波長の1/20以下を設定すればよい。
- 【佐山ら(1986)】: 格子が粗いと陸棚で浅い屈折を十分に表現できず、津波の真中度を過少に評価する。

知見①、②への対応

・水深に応じ1波長に必要な計算格子サイズに対し余裕をもって計算格子サイズを設定していることを確認。

知見③への対応

・設定した計算格子が能登半島周辺における屈折現象を十分に再現可能かについて、佐山らの式に基づき確認。



能登半島周辺の海底地形と計算格子

6

## 対応 I

今村・李(1998)及び長谷川・首藤ら(1987)の知見に対する適合性

【再掲】能登半島周辺の海底地形



水深に応じ1波長に必要な計算格子サイズと  
津波評価での計算格子の設定状況

水深に応じ1波長に必要な計算格子サイズは  
 $L (1波長) の 1/20 以下$   
 $L = \sqrt{gh} \times T$   
g: 重力加速度  
h: 水深  
T: 周期 (=5分)

計算例【上図及び右図の☆印の点】

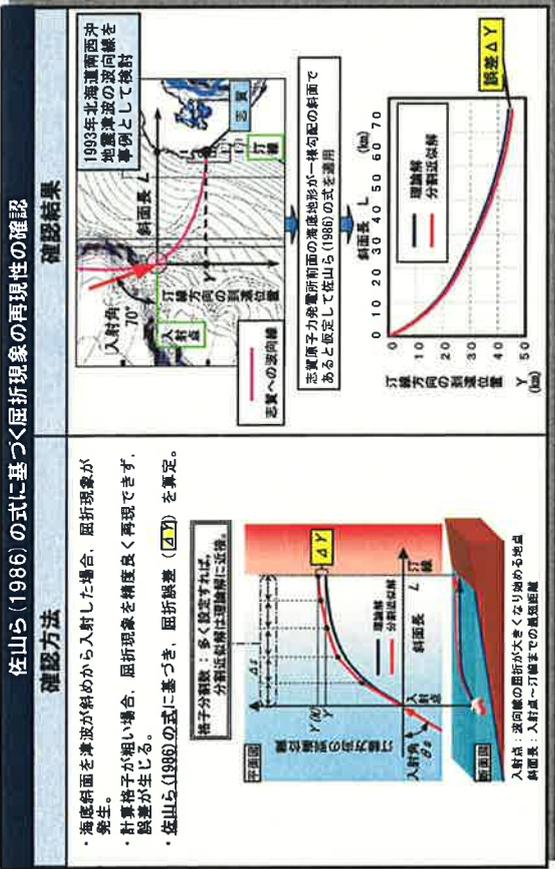
水深 (m)	上記式のL (m)	L/70 (m)	津波評価のL (m)	余裕
100	9391	470	100	余裕を持って設定

右図のとおり、志賀では、水深に応じ1波長に必要な計算格子サイズに対し、余裕を持って計算格子サイズを設定。

水深に応じ1波長に必要な計算格子サイズと  
津波評価での計算格子の設定状況

7

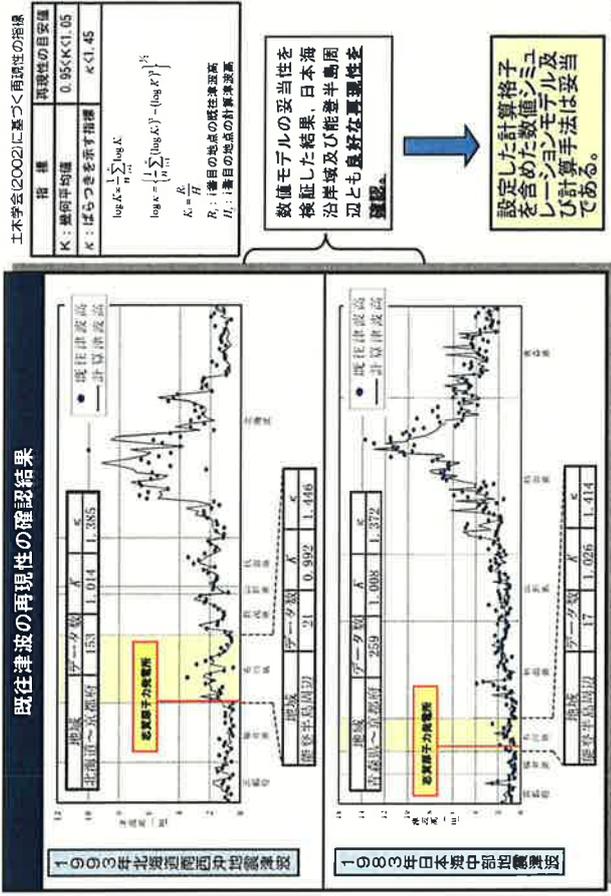
## 対応 II



屈折距離は小さく、設定した計算格子は能登半島周辺に十分に再現可能と考えられる。

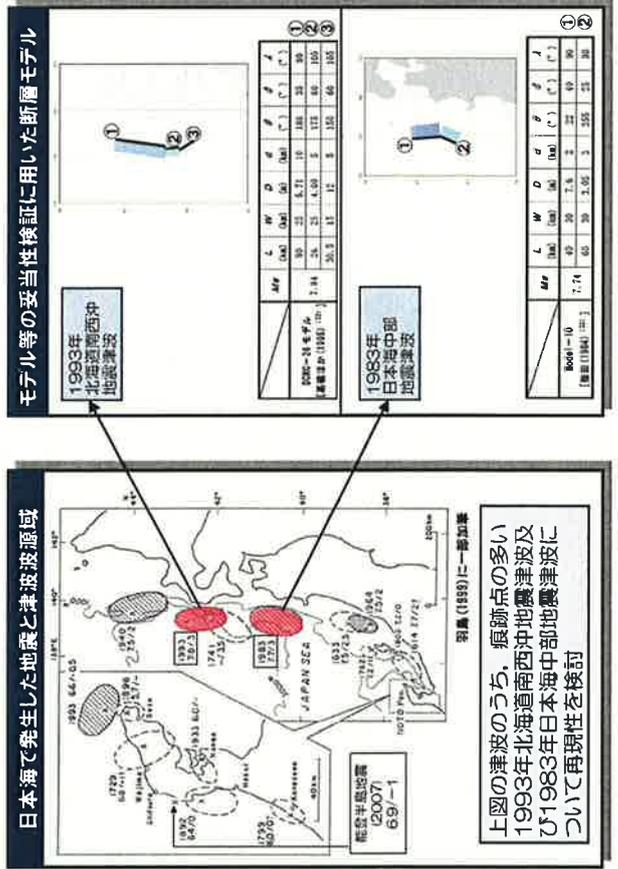
## 2-1 津波の数値シミュレーションについて

### (4) 既往津波の再現性の確認



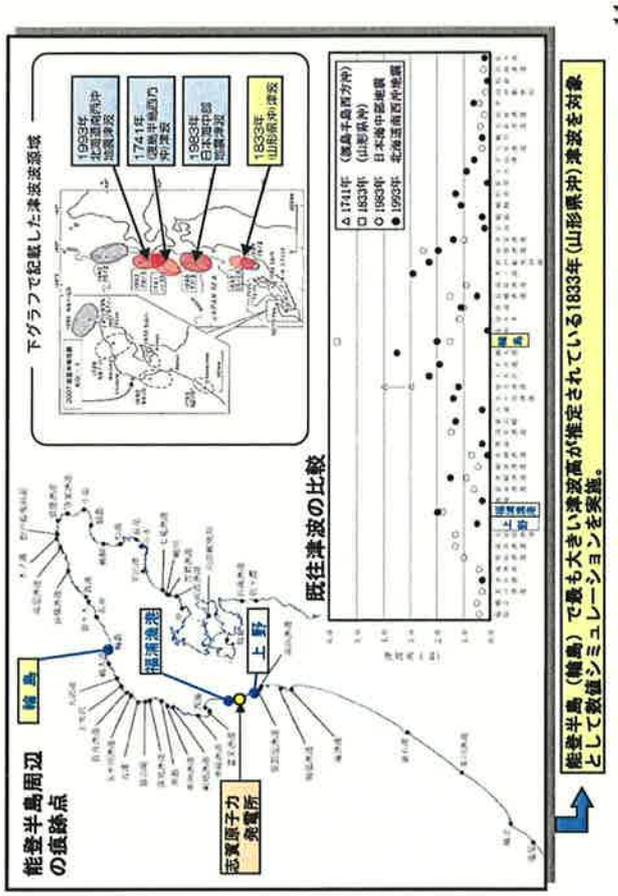
## 2-1 津波の数値シミュレーションについて

### (4) 既往津波の再現性確認



## 2-2 既往津波の検討

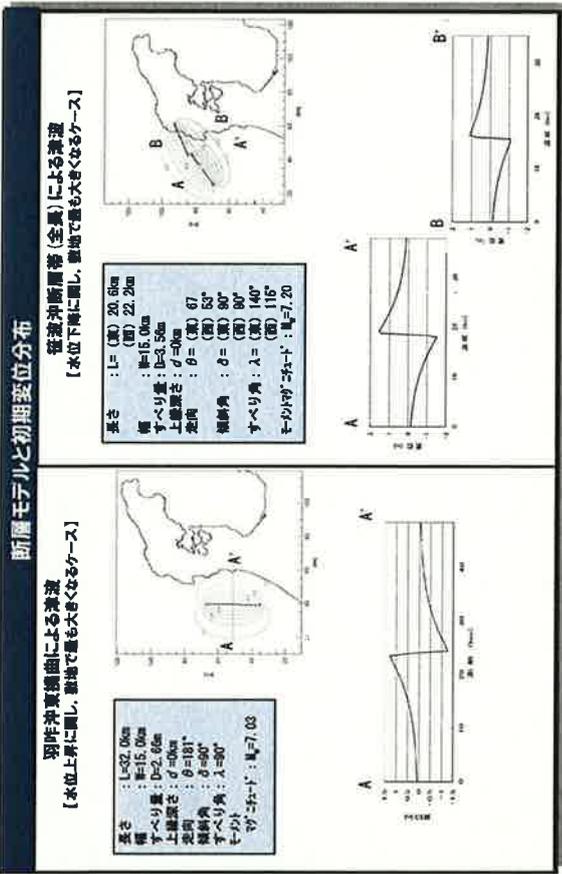
### (1) 能登半島における既往津波の比較





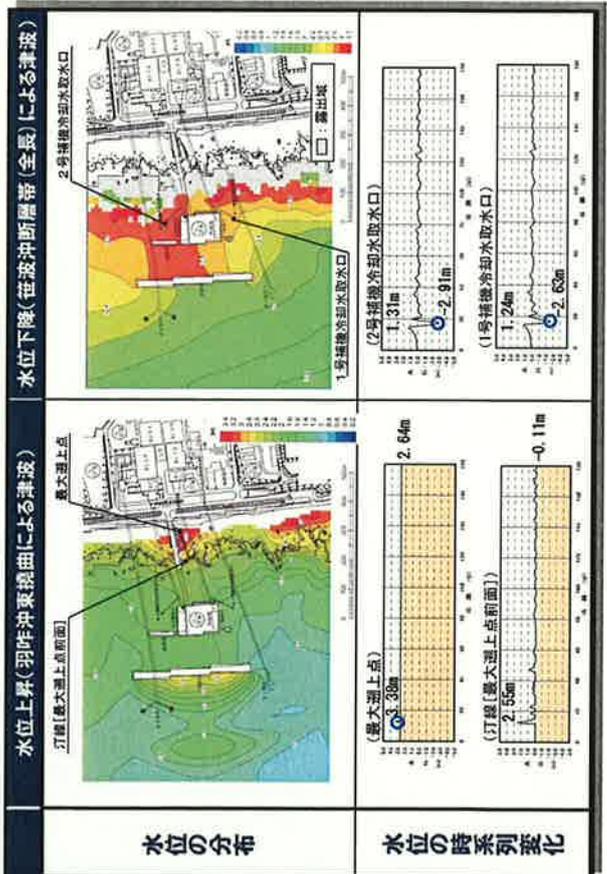
## 2-3 海域活断層に想定される地震に伴う津波の検討

### (2) 数値シミュレーションによる津波高の検討



## 2-3 海域活断層に想定される地震に伴う津波の検討

### (2) 数値シミュレーションによる津波高の検討【計算結果】



## 2-4 日本海東縁部に想定される地震に伴う津波の検討

### (1) 基準断層モデルの設定

日本海東縁部津波の「基準断層モデル」を土木学会(2002)に基づき以下のように設定。

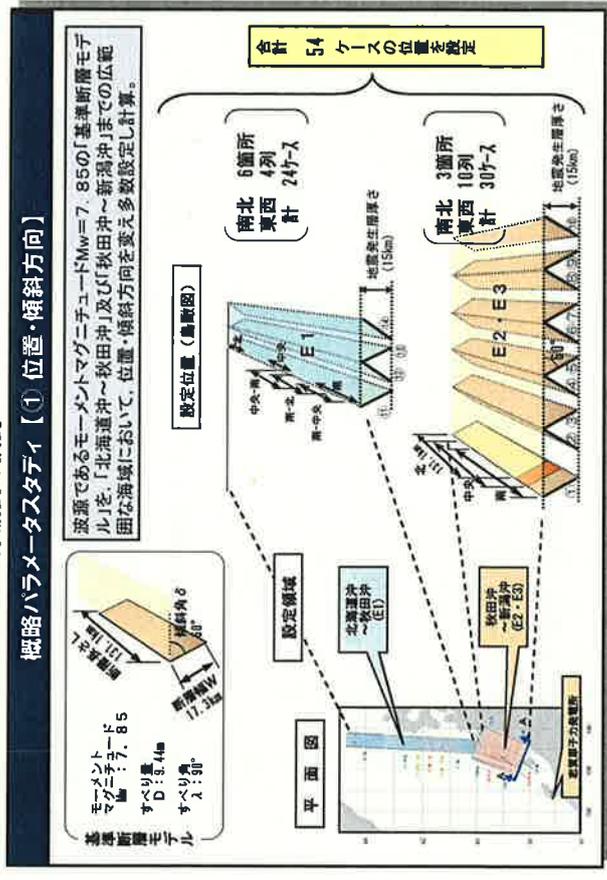
基準断層モデルのパラメータ	備考
モーメント・マグニチュード Mw	1993年北海道南西沖地震津波を再誘するモデルの Mw(7.84)を下回らないよう設定
断層長さ L	武村(1998)に基づきスケールリング則により設定
断層幅 W	地震発生層の厚さ(15km)と傾斜角(60°)により設定
すべり量 D	上記 Mw, L, W より設定 (なお、剛性率は $\mu=3.5 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ )
すべり角 λ	90°
走向 θ	北海道沖～秋田沖 183° 秋田沖～新潟沖 20°、200°
傾斜角 δ	60°

**不確かさの考慮**

「基準断層モデル」を、  
①位置・傾斜方向、  
②走向・傾斜角の補間、  
③上縁深さを変化させ設定

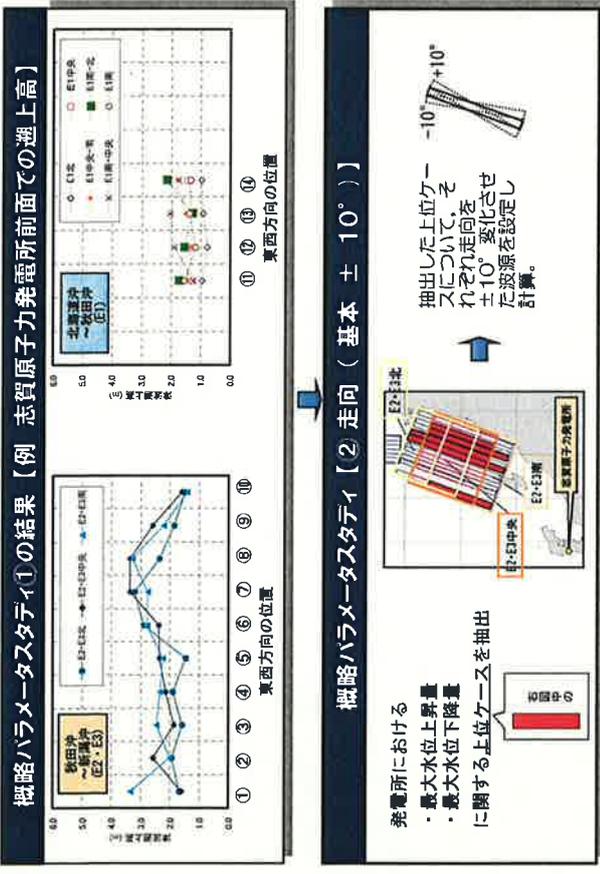
## 2-4 日本海東縁部に想定される地震に伴う津波の検討

### (2) 数値シミュレーションによる津波高の検討



## 2-4 日本海東縁部に想定される地震に伴う津波の検討

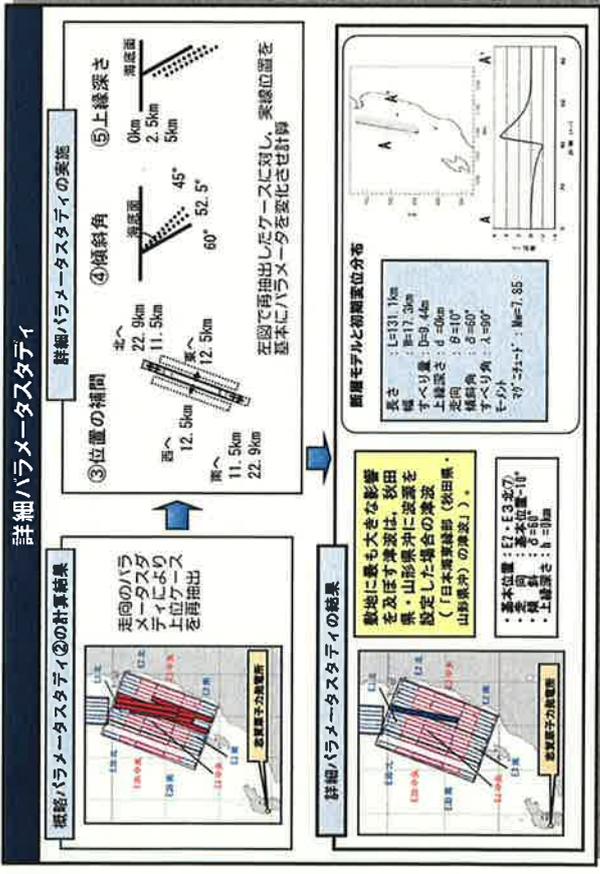
### (2) 数値シミュレーションによる津波高の検討



20

## 2-4 日本海東縁部に想定される地震に伴う津波の検討

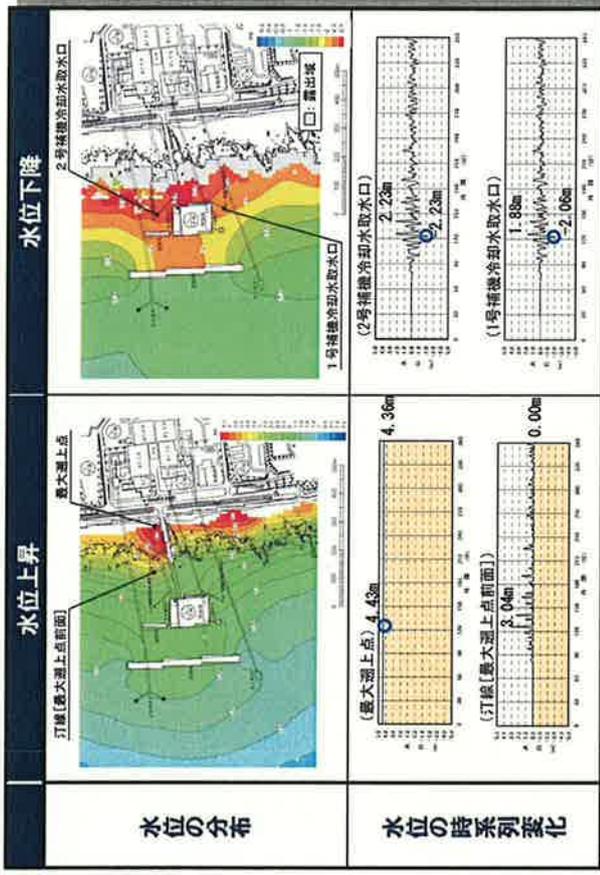
### (2) 数値シミュレーションによる津波高の検討



21

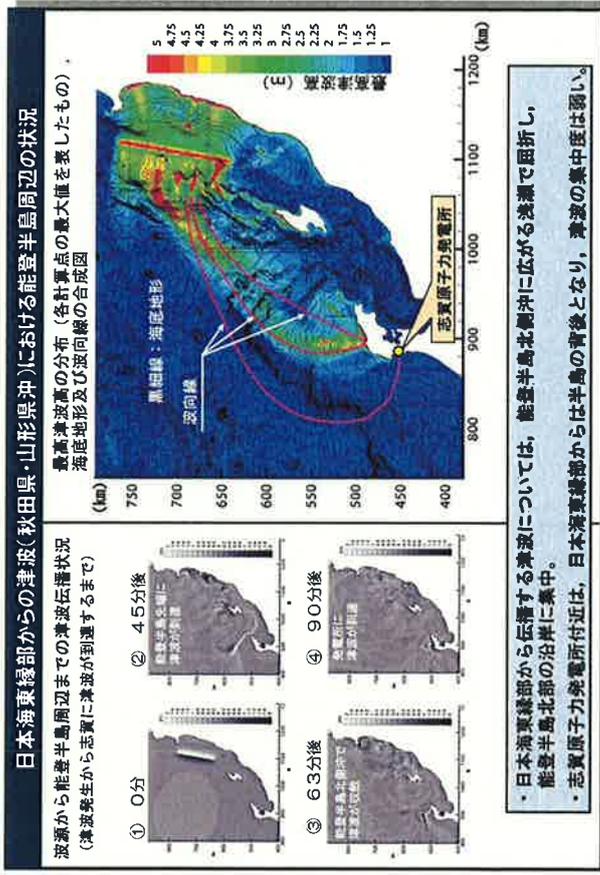
## 2-4 日本海東縁部に想定される地震に伴う津波の検討

### (2) 数値シミュレーションによる津波高の検討 【計算結果】



22

## (参考) 能登半島における津波の収斂効果について



23

### 3. 津波に対する安全性の評価



#### 原子炉施設の安全性評価の項目

- (1) 津波による水位上昇及び水位低下に対する安全性
- (2) 取水施設の水利特性による水位変動への影響

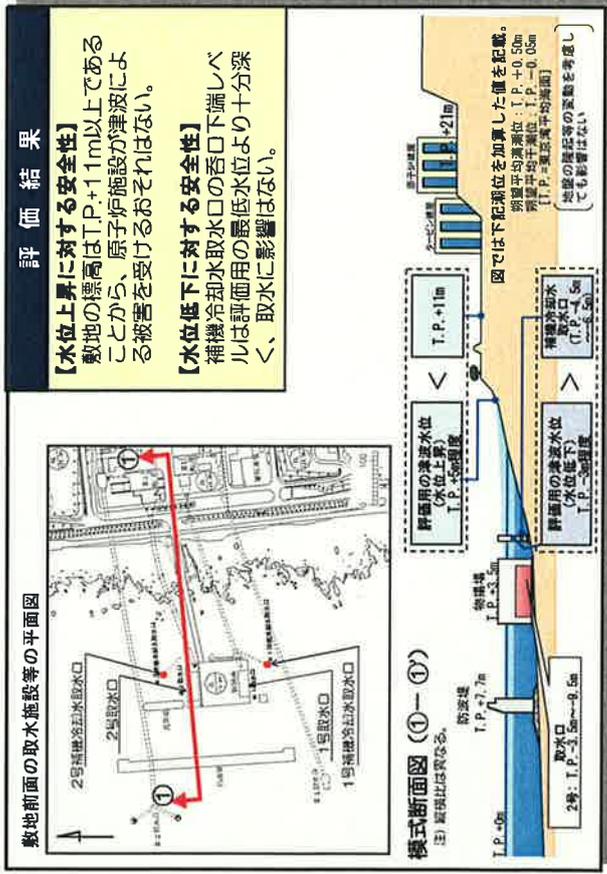
### 3. 津波に対する安全性の評価

#### (2) 取水施設の水利特性による水位変動への影響

項目	計算条件
計算領域	取水口～取水路(トンネル)～合流点 補機冷却水取水口～取水路(トンネル)～合流点 合流点～取水路(トンネル)～取水槽～海水熱交換器建屋海水ポンプ室
計算時間間隔	0.1秒
基礎方程式	非定常管路流の連続式及び運動方程式
取水槽側境界条件 (ポンプ取水量)	1号機通常運転時 : 40.0m <sup>3</sup> /s 1号機循環水ポンプ停止時 : 2.0m <sup>3</sup> /s 2号機通常運転時 : 93.0m <sup>3</sup> /s 2号機循環水ポンプ停止時 : 3.0m <sup>3</sup> /s
取水路の損失係数	流入・曲がり・摩擦等の損失水頭が実線及び計算を踏まえた以下の設計値となるようにマニングの粗度係数を設定 1号機 運転初期 : 1.1m, 終年時 : 4.8m 2号機 運転初期 : 0.9m, 終年時 : 3.3m
想定する潮位条件	水位上昇側 : 期望平均満潮位 T.P.+0.5m 水位下降側 : 期望平均干潮位 T.P.-0.05m
地震変動条件	地震変動量を考慮
計算時間	能登半島周辺の海域活断層津波 : 地震発生後3.0時間 日本海東縁部の津波 : 地震発生後6.0時間

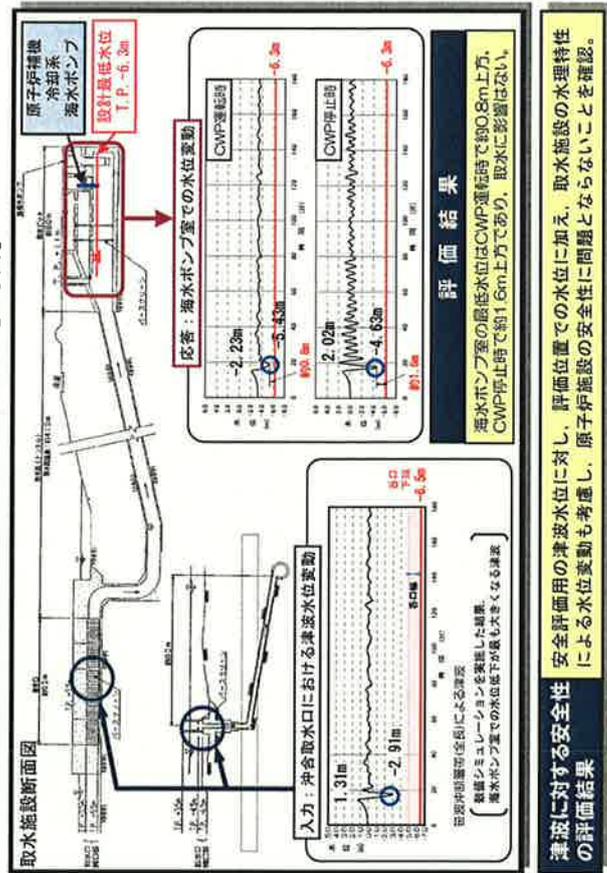
### 3. 津波に対する安全性の評価

#### (1) 津波による水位上昇及び水位低下に対する安全性



### 3. 津波に対する安全性の評価

#### (2) 取水施設の水利特性による水位変動への影響【2号機】



#### 4. 二次的な影響に対する評価 (砂移動の影響)

##### 数値シミュレーション解析の概要

敷地前面の条件：

- 敷地前面は岩礁海岸。
- なお、約700m沖合いの水深約20m以深からは砂が堆積。

細砂の諸元は、平成18年度に当社が実施した底質調査によれば以下のとおり。

〔密度：2.67g/cm<sup>3</sup>、粒径：0.141mm(中央粒径)〕

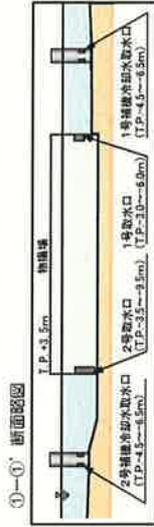
解析対象：下記2ケース

- 敷地前面において最高水位を与える「日本海東縁部(秋田県・山形県沖)の津波」
- 1,2号補機冷却水取水口において最低水位を与える「笹波沖断層帯(全長)による地震に伴う津波」

上記の1号、2号の取水口及び補機冷却水取水口位置において確認

解析手法：下記の2手法

- 藤井ほか(1998)及び高橋ほか(1999)の手法に基づいて実施。
- なお、浮遊砂体積濃度の上限値については、1%を基本とし、5%を参考として設定。



#### 4. 二次的な影響に対する評価 (砂移動の影響)

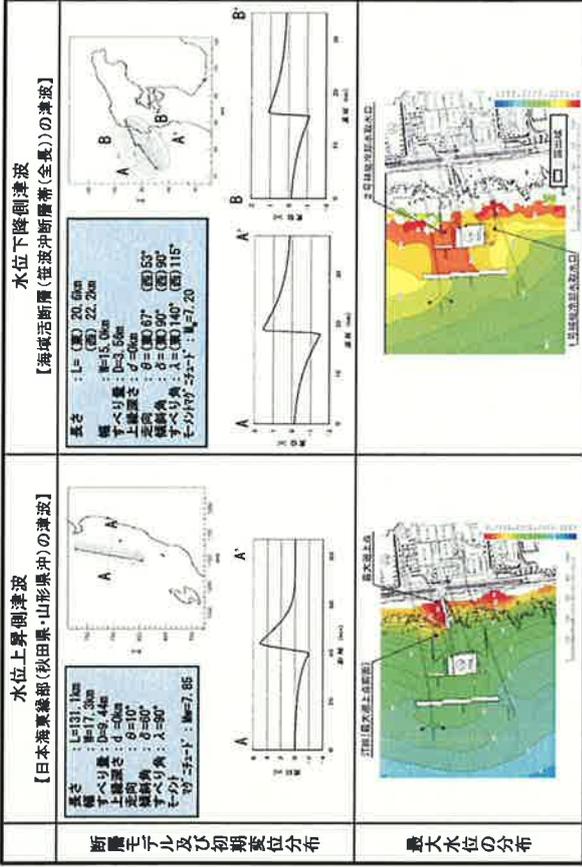
##### (1) 砂移動計算の手法

物理量	藤井ほか(1998)の手法	高橋ほか(1999)の手法
埋積率	$\frac{N}{N_0} = \frac{E - S}{E_0 - S_0}$	$\frac{Z}{Z_0} = \frac{1}{1 + \frac{E - S}{E_0 - S_0}}$
浮遊率	$\frac{Z}{Z_0} = \frac{E - S}{E_0 - S_0}$	$\frac{Z}{Z_0} = \frac{E - S}{E_0 - S_0}$
埋積率	$\frac{Z}{Z_0} = \frac{E - S}{E_0 - S_0}$	$\frac{Z}{Z_0} = \frac{E - S}{E_0 - S_0}$
砂移動量	$Q = \frac{1}{2} \rho_s \sqrt{g} \frac{E - S}{E_0 - S_0}$	$Q = \frac{1}{2} \rho_s \sqrt{g} \frac{E - S}{E_0 - S_0}$
砂体積	$V = \frac{1}{2} \rho_s \sqrt{g} \frac{E - S}{E_0 - S_0} \frac{L}{U}$	$V = \frac{1}{2} \rho_s \sqrt{g} \frac{E - S}{E_0 - S_0} \frac{L}{U}$
埋積率	$\frac{Z}{Z_0} = \frac{E - S}{E_0 - S_0}$	$\frac{Z}{Z_0} = \frac{E - S}{E_0 - S_0}$
埋積率	$\frac{Z}{Z_0} = \frac{E - S}{E_0 - S_0}$	$\frac{Z}{Z_0} = \frac{E - S}{E_0 - S_0}$
埋積率	$\frac{Z}{Z_0} = \frac{E - S}{E_0 - S_0}$	$\frac{Z}{Z_0} = \frac{E - S}{E_0 - S_0}$



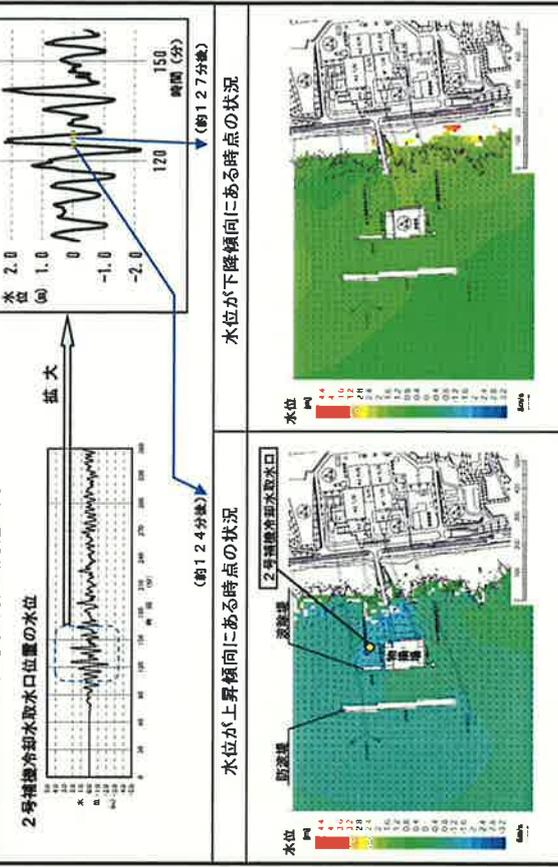
#### 4. 二次的な影響に対する評価 (砂移動の影響)

##### (2) 砂移動計算の対象とした津波の諸元

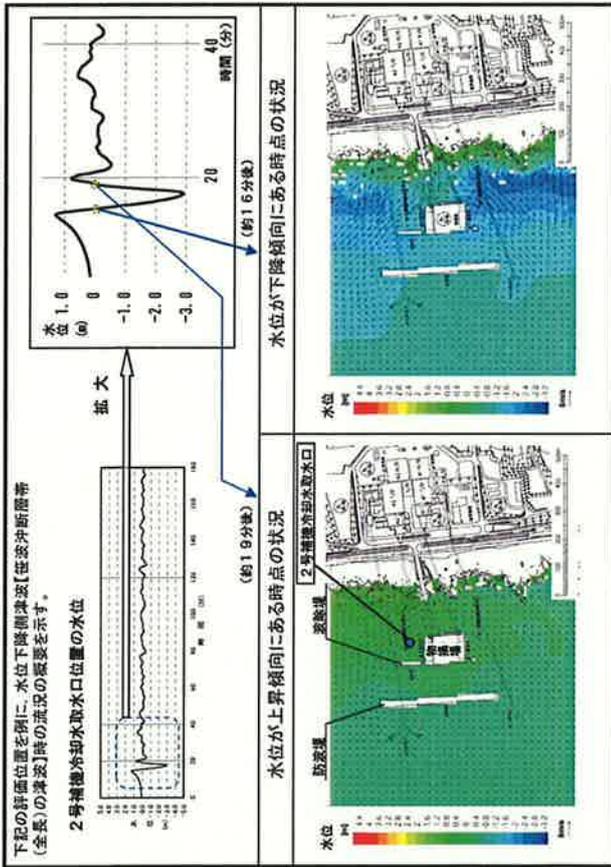


#### (参考①) 敷地前面の津波水位及び流速の状況【水位上昇側津波】

下記の経度位置を例に、水位上昇側津波(日本海東縁部(秋田県・山形県沖)の津波)時の流速の概要を示す。

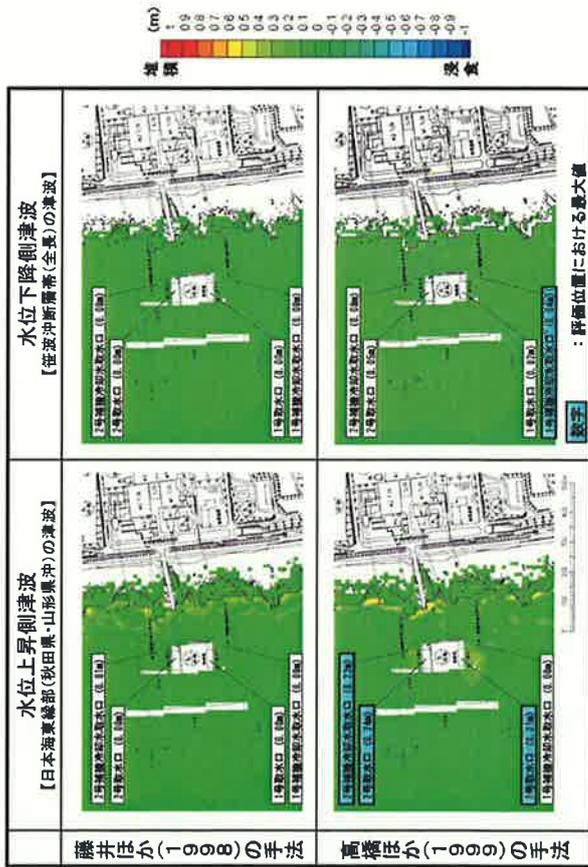


② 敷地前面の津波水位及び流速の状況【水位下降側津波】

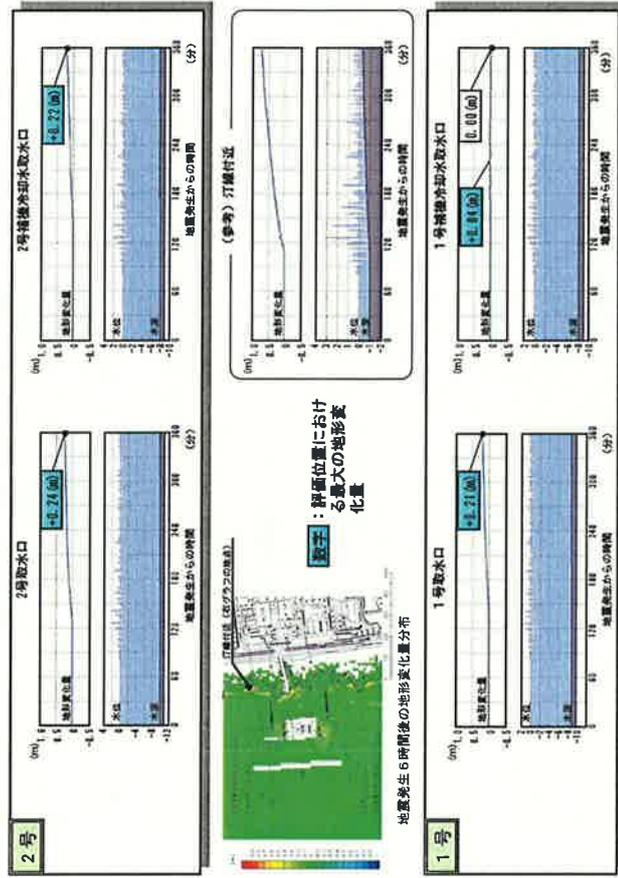


4. 二次的な影響に対する評価 (砂移動の影響)

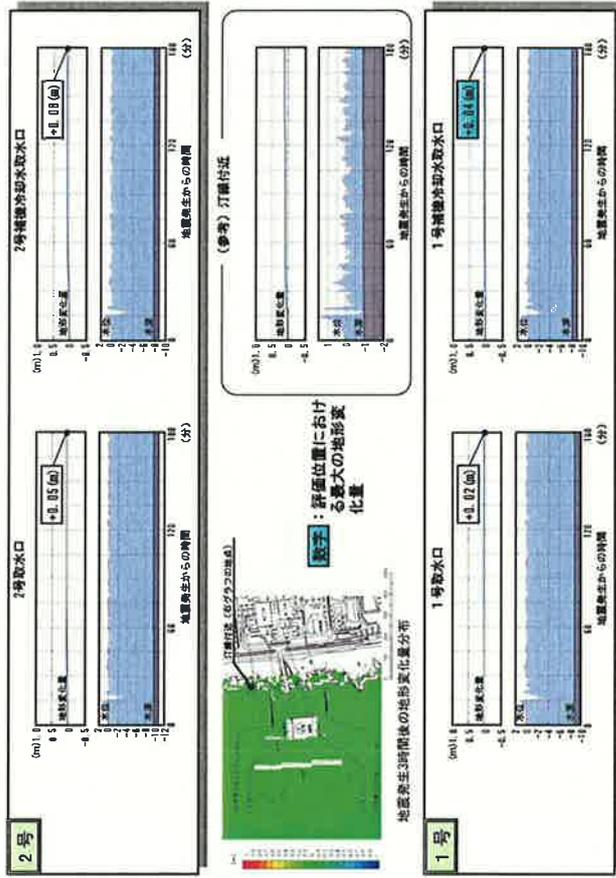
(3) 砂移動計算の結果 ①最終地形変化量の分布



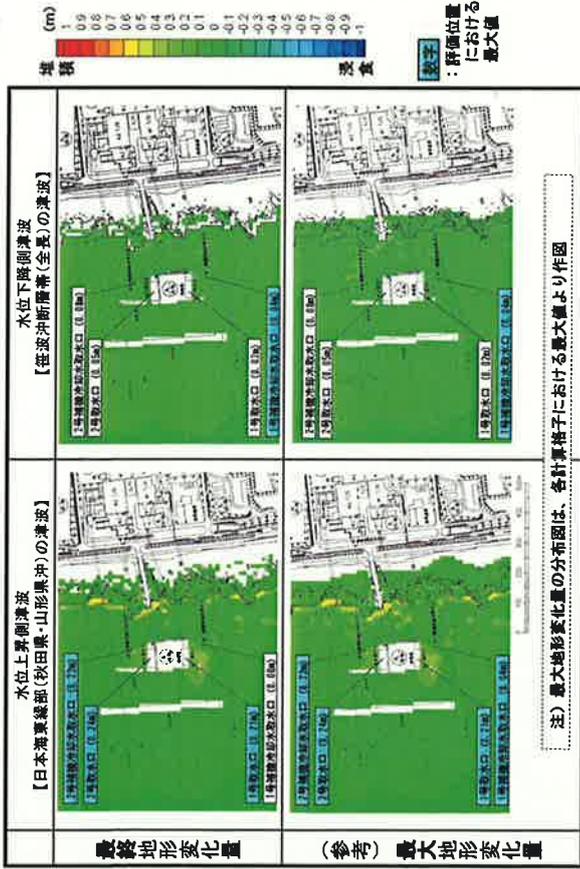
② 評価位置における地形変化【水位上昇側津波, 高橋ほか(1999)の手法】



③ 評価位置における地形変化【水位下降側津波, 高橋ほか(1999)の手法】



(参考)最終地形変化量と最大地形変化量の分布の差異について【高橋ほか(1999)】



上記の2つのケースを並べれば、取水口地点における最終地形変化量と最大地形変化量は等しい。

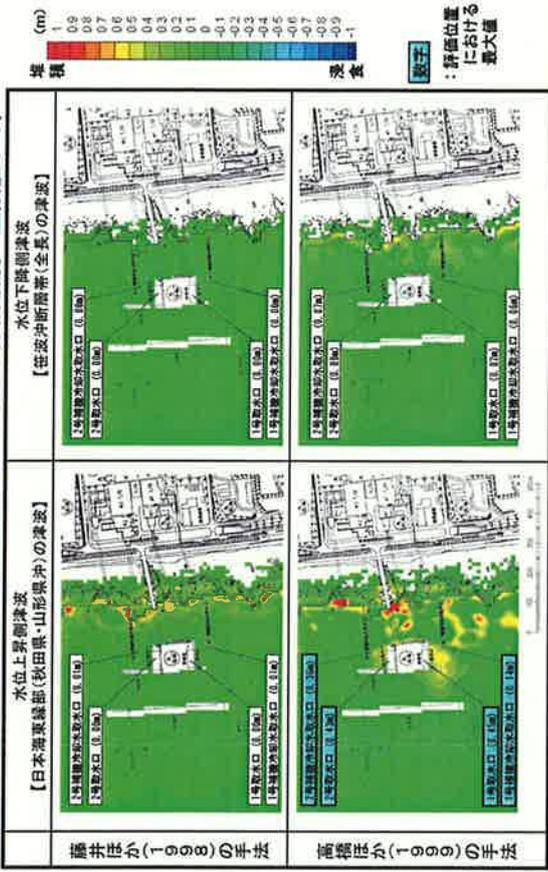
4. 二次的な影響に対する評価 (砂移動の影響)

(4) 砂移動計算による評価結果【評価位置における地形変化の状況】



取水口付近における堆積は最大でも24cm程度であり、砂移動により原子炉補給冷却水系の取水に支障が生じることはない。

(参考)砂移動に伴う地形変化量の分布 (浮遊砂体積濃度の上限値5%)



仮に、浮遊砂体積濃度の上限値を5%とし計算したとしても、取水口付近では最大でも45cm程度の堆積量であり、砂移動により原子炉補給冷却水系の取水に支障が生じることはない。

5. まとめ

評価用の津波水位による水位上昇及び水位低下に対して、原子炉施設の安全性に問題とならないことを確認するとともに、取水設備の水理特性による水位変動への影響、ならびに、津波による二次的な影響に対する評価 (土砂移動) を検討し、志賀原子力発電所の原子炉施設の安全性に問題とはならないことを確認した。

## 参考文献 (1)

### 【津波計算】

- ・土木学会原子力土木委員会津波評価部会 (2002) : 『原子力発電所の津波評価技術』, 321p.
- ・小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫 (1998) : GISを利用した津波選上計算と被害推定法, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 356-360.
- ・Mansinha, L. and D.E. Saylor (1971) : The Displacement Fields of Inclined Faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 61, No. 5, pp. 1433-1440.
- ・今村文彦・孝 真哉 (1998) : 津波発生・伝播の数値モデルの現状と課題, 沿岸海洋研究, 第36巻, 第1号, pp. 91-101.
- ・佐山順二・後藤智明・首藤伸夫 (1986) : 屈折に関する津波数値計算の誤差, 海岸工学講演会論文集, 第33回, pp. 204-108
- ・長谷川寛一・鈴木孝夫・稲垣和男・首藤伸夫 (1987) : 津波の数値実験における格子間隔と時間積分間隔に関する研究, 土木学会論文集, No. 381/II-7, pp. 111-120.
- ・羽鳥徳太郎 (1999) : 能登半島における津波の屈折効果, 地震第2輯, 第57巻, pp. 43-50.
- ・高橋智幸・首藤伸夫 (1995) : 津波数値計算による北海道西沖地帯の検討, 地球惑星科学関連学会1995年合同大会予稿集, F31-06.
- ・相田 勇 (1984) : 1983年日本海中部地震津波の波源数値モデル, 東京大学地震研究所彙報, Vol. 59, pp. 93-104.
- ・羽鳥徳太郎 (1984) : 日本海の歴史津波, 月刊海洋科学, Vol. 16, No. 9, pp. 538-545.
- ・森辺傳夫 (1998) : 『日本被害津波総覧 (第2版)』, 東京大学出版会, 238p.
- ・東北大学工学部津波防災実験所 (1984) : 昭和58年5月26日 日本海中部地震津波に関する論文及び調査報告, 東北大学工学部津波防災実験所研究報告, 第1号, 267p.

## 参考文献 (2)

### 【津波計算】

- ・首藤伸夫・明田定満・都司嘉直・松置英夫 (1997) : 4. 津波, 1993年北海道西沖地帯地震調査報告, 土木学会, pp. 76-106.
- ・阿部純征 (1988) : 地震と津波のマグニチュードに基づく津波高の予測, 東京大学地震研究所彙報, Vol. 64, pp. 51-69.
- ・政村雅之 (1998) : 日本列島における地殻内地震のスケーリング則—地震断層の影響および地震被害との関連—, 地震第2輯, 第51巻, pp. 211-228.
- ・地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2003) : 『日本海東縁部の地震活動の長期評価』, 35p.
- ・土木学会 (1999) : 『水理公式集 (平成11年版)』, 713p.
- ・電力土木技術協会編 (1995) : 『火力・原子力発電所土木構造物の設計—増補改訂版—』, 1102p.

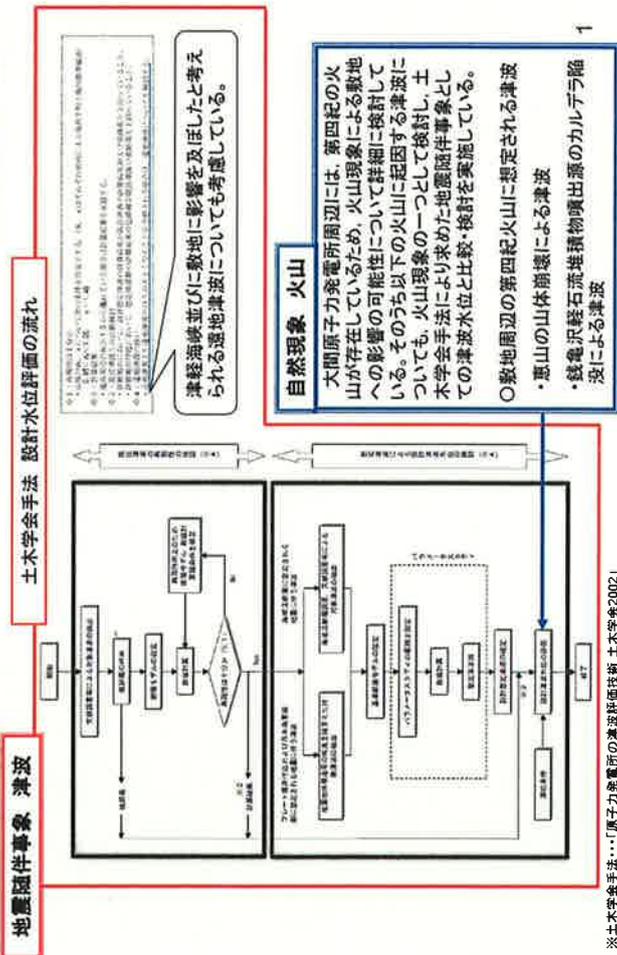
### 【砂移動の影響】

- ・石川県 (1997) : 『1:33,000 津波環境因「富来・志賀・羽咋海城」, 石川県.
- ・北陸電力株式会社 (1997) : 『志賀原子力発電所(2号機) 修正環境影響調査書環境影響評価書』.
- ・藤井直樹・大森政則・高尾 誠・金山 進・大谷英夫 (1998) : 津波による海底地形変化に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 376-380.
- ・高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・浅井大輔 (1999) : 潮流砂層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波移動底モデルの開発, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 606-610.
- ・小林昭男・織田幸伸・東江隆夫・高尾 誠・藤井直樹 (1996) : 津波による砂移動に関する研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 681-695.

# 大間原子力発電所における 設置許可時の津波に関する評価について

平成23年9月13日  
電源開発株式会社

## 津波検討の概要



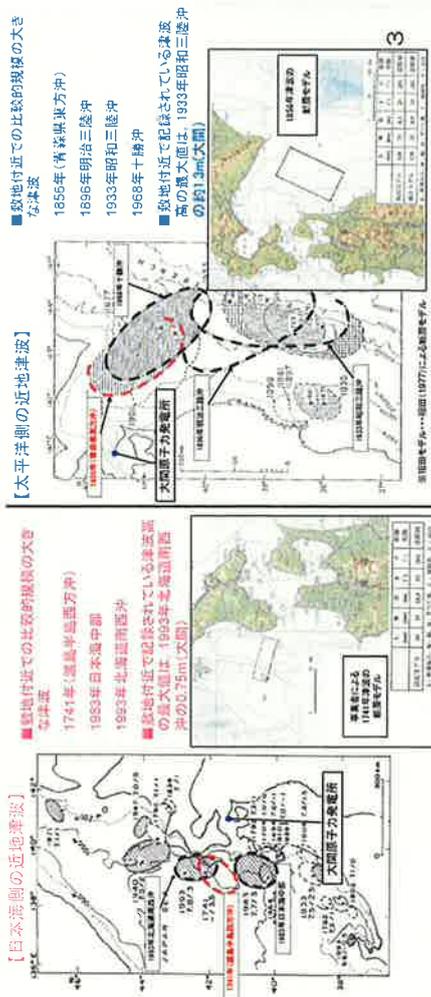
# 1. 大間原子力発電所における 既往津波・想定津波について

## 既往津波について

### ● 既往津波(近地津波)の検討(原子炉設置許可:平成20年4月23日)

文献調査等により、津軽海峡並びに敷地に最も影響を及ぼしたと考えられる津波として海域別に以下の津波を抽出し、それぞれの既往津波の数値シミュレーションにより得られる敷地における最大水位上昇および取入口スクリーン前面上における最大水位下降量を算出した。

- ・日本海側の近地津波 1741年(渡島半島西方沖)津波、 最大水位上昇 約2.0m 最大水位下降量 約1.9m
- ・太平洋側の近地津波 1856年(青森県東方沖)津波、 最大水位上昇 約1.9m 最大水位下降量 約1.3m



## 既往津波について

### ● 既往津波(遠地津波)の検討(原子炉設置許可:平成20年4月23日)

文献調査等により、津軽海峡並びに敷地に最も影響を及ぼしたと考えられる津波として以下の津波を抽出し、既往津波の数値シミュレーションにより得られる敷地における最大水位上昇量および取水口スクリーン前面における最大水位下降量を算出した。

1960年チリ地震津波、

最大水位上昇量 約2.6m  
最大水位下降量 約2.6m

#### 【遠地津波】

敷地付近での比較的規模の大きい津波

1868年チリ・アメリカ沖

1877年チリ・イキケ沖

1952年カムチャツカ

1960年チリ

敷地付近で記録されている津波  
高の最大値は、1960年チリの  
TP+2.0m(大間波)

大間周辺で記録されている  
既往津波高の最大値

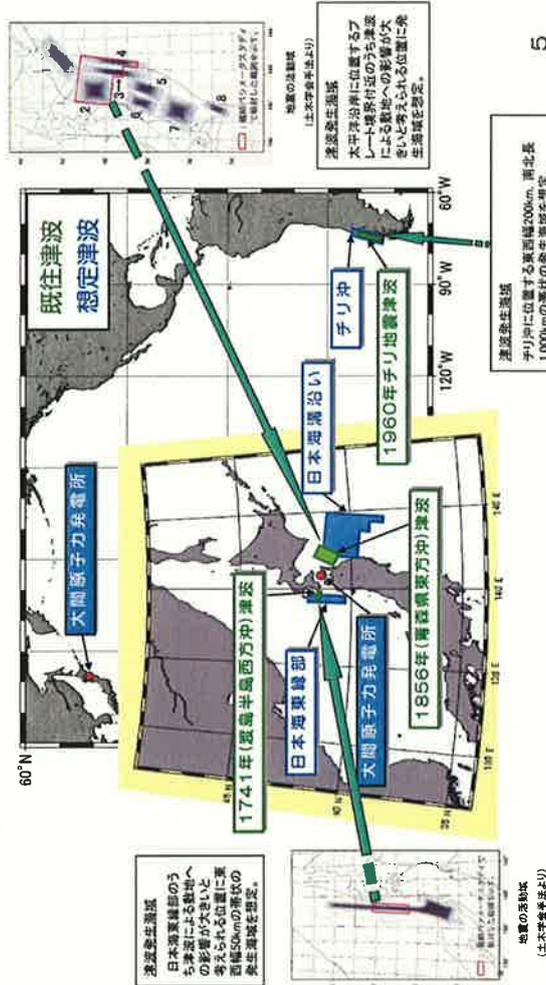


4

※土木学会手法...「原子力発電所の津波評価技術 土木学会2002」

## 想定津波について

### ● 検討対象とした津波(原子炉設置許可:平成20年4月23日)



5

※土木学会手法...「原子力発電所の津波評価技術 土木学会2002」

## 想定津波について

### ● 想定津波高さ(原子炉設置許可:平成20年4月23日)・土木学会手法)

最高水位: TP.+4.4m程度

各海域(領域)について、既往津波の痕跡を説明できる波源モデルのMwと同等以上の値を用いて、基準断面モデルを設定。

各海域(領域)を対象とし、土木学会手法により、波源、数値シミュレーションの誤差等の不確かさを考慮してパラメータスタディを実施し、最も発電所に大きな影響を与える想定津波を策定して評価。

日本海東縁部に波源を設定した津波の数値シミュレーションにより得られる敷地前面の最大水位上昇量(約3.8m)に期望平均満潮位(T.P.+0.63m)を考慮し、津波による敷地前面における最高水位(T.P.+4.4m程度)を評価。

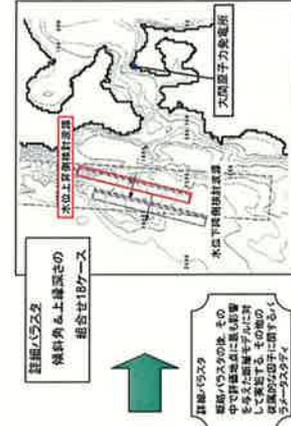
#### 【パラメータスタディ】



日本海東縁部 福岡ハラススタ新層モデル位置

6

※土木学会手法...「原子力発電所の津波評価技術 土木学会2002」



日本海東縁部 詳細ハラススタ新層モデル位置

## 想定津波について

### ● 想定津波高さ(原子炉設置許可:平成20年4月23日)・土木学会手法)

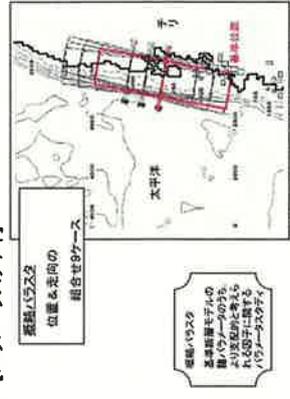
最低水位: TP.-3.8m程度

各海域(領域)について、既往津波の痕跡を説明できる波源モデルのMwと同等以上の値を用いて、基準断面モデルを設定。

各海域(領域)を対象とし、土木学会手法により、波源、数値シミュレーションの誤差等の不確かさを考慮してパラメータスタディを実施し、最も発電所に大きな影響を与える想定津波を策定して評価。

チリ沖に波源を設定した津波の数値シミュレーションにより得られる取水口スクリーン前面の最大水位下降量(約3.5m)に期望平均干潮位(T.P.-0.29m)を考慮し、津波による取水口スクリーン前面における最低水位(T.P.-3.8m程度)を評価。

#### 【パラメータスタディ】



チリ沖 福岡ハラススタ新層モデル位置

7

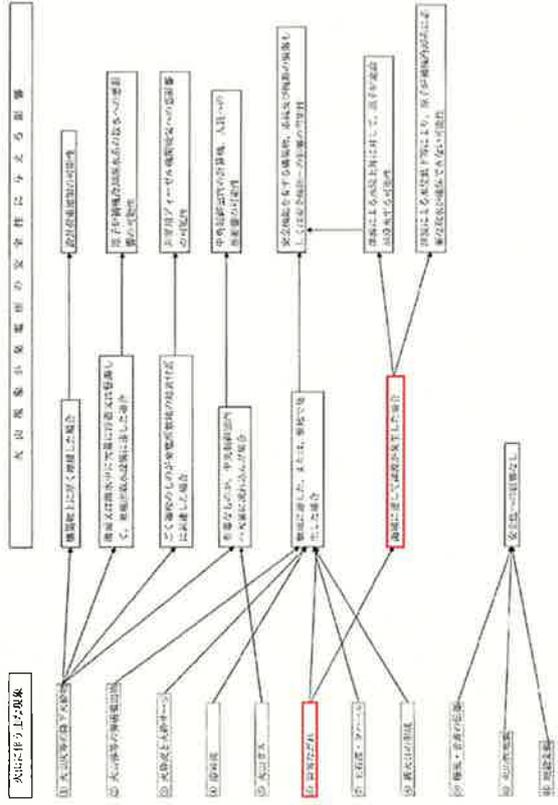
※土木学会手法...「原子力発電所の津波評価技術 土木学会2002」



## 火山について

POWER

### ●火山現象と発電所の安全性に与える影響との関係 (原子炉設置許可：平成20年4月23日)



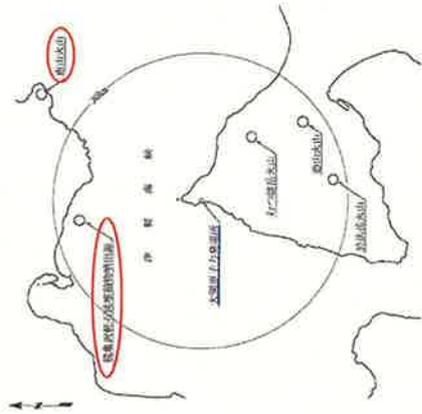
12

## 火山性津波について

POWER

### ●検討対象とした火山性津波(原子炉設置許可：平成20年4月23日)

- ▶ 既往津波のうち火山性の津波 ⇒ 1741年渡島大島の山体崩壊による津波
- ▶ 敷地周辺の第四紀火山に起因する津波 ⇒ 大間原子力発電所周辺に位置する、第四紀に活動した火山のうち、海岸近く及び海底に位置する火山に起因する以下の津波の影響について検討を実施した。



- ・恵山火山について、山体崩壊による津波の影響について検討した。
- ・銭亀沢軽石流堆積物の噴出源が今後大規模な噴火を起こす可能性は低いと考えられるが、念のため、銭亀沢軽石流堆積物噴出源カルデラ陥没による津波の影響について検討した。

敷地周辺の第四紀火山位置図

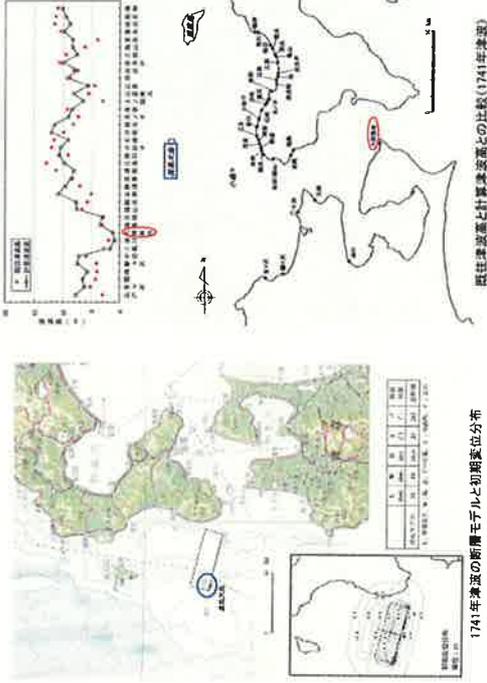
13

## 火山性津波について

POWER

### ●1741年渡島大島の山体崩壊による津波(原子炉設置許可：平成20年4月23日)

- ▶ 1741年(渡島半島西方沖)津波については、文献調査の結果、津波地震、火山噴火に伴う津波、海底地滑りによる津波等の説もあり、津波の発生原因には定説がないことから、工学的に既往津波高を良好に再現する断層モデルを用いて検討している。



・この検討結果より、 $K=0.88$ 、 $K=1.44$ が得られたことから、1741年津波に対する数値シミュレーション結果は良好な再現性が確認できた。

・この断層モデルによる数値シミュレーションから得られた敷地における最大水位上昇量および取水口スクリーン前面における最大水位下降量は、それぞれ約2.0m、約1.9mであった。(前述のとおり。)

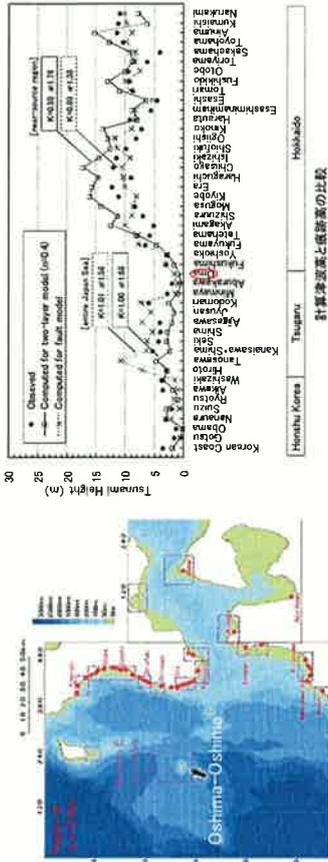
14

## 火山性津波について

POWER

### ●1741年渡島大島の山体崩壊による津波(安全審査資料に記載の参考文献)

- ▶ パワー一他<sup>\*</sup>では、二層流モデルおよび断層モデルの二つの手法を用いて、1741年に発生した渡島大島の山体崩壊による津波の再現を試みた。
- ▶ これによると、二層流モデルおよび断層モデルの両手法による痕跡高の再現性については、一部バラツキが認められるとしているものの、共にほぼ良好な結果であると考えられる。
- ▶ なお、両手法によって実施された再現計算における大間の津波高は、共に北海道や本州日本海沿岸部の津波高に比べて小さくなる傾向を示している。



※パワー一他<sup>\*</sup>：Kawamura et al.(2005)  
解折領域(空海近傍)

15

# 火山性津波について



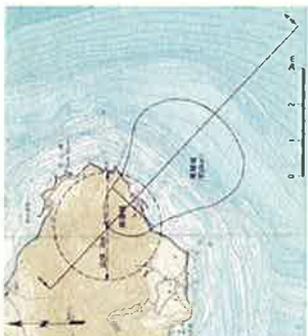
## ● 恵山の山体崩壊による津波(原子炉設置許可:平成20年4月23日)(計算条件の設定)

- ◆過去の山体崩壊
  - ・過去に発生した恵山の山体崩壊は、約4万年前、約2万年前、約2500年前に起こったとされており、その崩壊体積を概ね0.01km<sup>3</sup>~0.05km<sup>3</sup>と推定した。
- ◆山体崩壊量及び海域への流入量の設定
  - ・崩壊体積を既往最大の約2万年前の崩壊と同程度の0.05km<sup>3</sup>に設定
  - ・検討対象の斜面を、現地形において比較的斜面勾配が急で海に面した斜面であり、大間原子力発電所からの距離が近い南東側斜面に設定
  - ・津波の発生源となる海域への崩壊物の流入量を、安全側を考慮し崩壊物の全量である0.05km<sup>3</sup>に設定
  - ・崩壊物の分布範囲を1792年島原眉山の事例を参考に8km<sup>2</sup>に設定



過去の山体崩壊※

※出典:恵山火山防災協議会編(2001)



推定山体崩壊域及び津波源域

# 火山性津波について



## ● 恵山の山体崩壊による津波(原子炉設置許可:平成20年4月23日)(波源モデル)

恵山の山体崩壊による津波については、以下に示す3つの波源モデルにより、それぞれ検討を実施している。

- 1. Kinematic landslide model**  
(佐竹・加藤(2002)による)  
山体崩壊による地形変化を比高変化として、「位置エネルギー」により与えるモデル。  
計算条件  
・比高変化:6m  
・崩壊土砂速度U:70m/s  
・比高変化継続時間T:60秒  
U:25m/s, 70m/s, 100m/s, 150m/s, 200秒, 60秒, 120秒と変化させるパラメータを計算し、パラメータ値による崩壊物からの津波の発生位置・高さ・到達時刻を算出している。
- 2. 流量モデル**  
(相田(1975), Nishimura and Sakai(1993)による)  
海嶺への崩壊物の流入量を相当する流量を海岸線から「運動エネルギー」として一定時間与えるモデル。  
計算条件  
・継続時間S:120秒  
・流量Q:0.00042km<sup>3</sup>/s (0.05km<sup>3</sup>/120秒)  
S:60秒と120秒について4種計算を実施し、本報告書が算出するパラメータを計算し、パラメータ値による崩壊物からの津波の発生位置・高さ・到達時刻を算出している。
- 3. 二層流モデル**  
(Kawamura et al.(2005)による)  
崩壊物が海底斜面を滑り降りる過程とそのため海面に起こる波を同時に計算する相互作業モデル。  
【位置エネルギー+「運動エネルギー」】  
計算条件  
・二層流モデルの計算に用いるパラメータは、1741年に発生した津波大島の山体崩壊による津波を良好に再現するKawamura et al.(2005)の検討結果に基づき設定

# 火山性津波について



## ● 恵山の山体崩壊による津波(原子炉設置許可:平成20年4月23日)(計算結果)

- 1. Kinematic landslide model**  
最大水位上昇量の分布  
最大水位上昇量 約1.9m (標準水位)<sup>(1)</sup> (TP+2.6m程度)  
最大水位下降量 約1.6m (最低水位)<sup>(2)</sup> (TP-1.8m程度)
- 2. 流量モデル**  
最大水位上昇量の分布  
最大水位上昇量 約2.1m (標準水位)<sup>(1)</sup> (TP+2.7m程度)  
最大水位下降量 約1.6m (最低水位)<sup>(2)</sup> (TP-1.9m程度)
- 3. 二層流モデル**  
最大水位上昇量の分布  
最大水位上昇量 約2.7m (標準水位)<sup>(1)</sup> (TP+3.4m程度)  
最大水位下降量 約2.5m (最低水位)<sup>(2)</sup> (TP-2.8m程度)

Kinematic landslide model, 蒸着モデル及び二層流モデルによる水位は同程度であり、いずれの計算結果も、大間原子力発電所の想定津波による最高水位(T.P.+4.4m程度)を上回らず、最低水位(T.P.-3.8m程度)を下回るものではない。

(1)最高水位=最大水位上昇量+崩壊平均深水位(T.P.+0.63m), (2)最低水位=最大水位下降量+崩壊平均深水位(T.P.-0.29m)

# 火山性津波について



## ● 恵山の山体崩壊による津波(原子炉設置許可:平成20年4月23日)(比較検討)

Kinematic landslide modelを用いた恵山の山体崩壊による津波について、前述の検討を基本ケースと定め、火山活動の不確実性を考慮して、念のため、以下の比較・検討を実施している。

- ① 既往最大の恵山の崩壊量を超える崩壊物が海域に流入する場合**  
基本ケースからの変更条件  
・海嶺への崩壊物の流入量:0.075km<sup>3</sup> (基本ケース:0.05km<sup>3</sup>)  
・比高変化:9m (基本ケース:6m)  
・崩壊土砂速度U:70m/s  
・比高変化継続時間T:60秒  
計算結果  
最大水位上昇量 約2.4m (標準水位)<sup>(1)</sup> (TP+3.0m程度)  
最大水位下降量 約2.1m (最低水位)<sup>(2)</sup> (TP-2.4m程度)
- ② 崩壊物の流入方向を約20° 大間原子力発電所の敷地側へ向ける場合**  
基本ケースからの変更条件  
・流入方向以外は、①と同じ  
計算結果  
最大水位上昇量 約2.4m (標準水位)<sup>(1)</sup> (TP+3.1m程度)  
最大水位下降量 約2.2m (最低水位)<sup>(2)</sup> (TP-2.5m程度)

いずれの計算結果も、大間原子力発電所の想定津波による最高水位(T.P.+4.4m程度)を上回らず、最低水位(T.P.-3.8m程度)を下回るものではない。

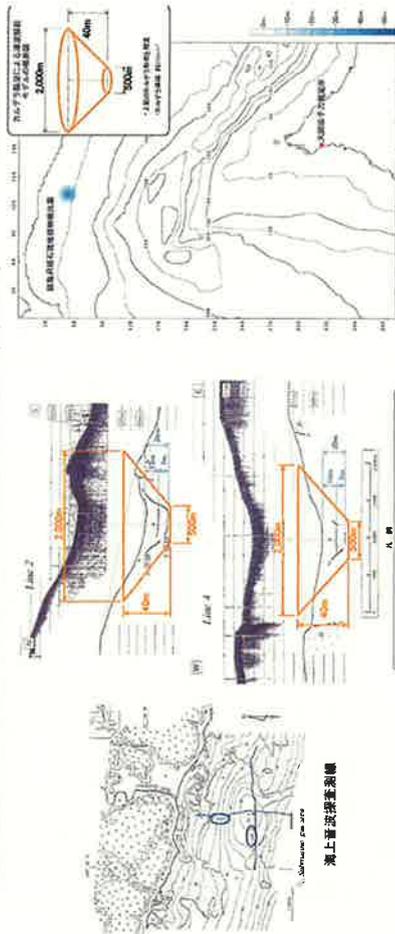
(1)最高水位=最大水位上昇量+崩壊平均深水位(T.P.+0.63m), (2)最低水位=最大水位下降量+崩壊平均深水位(T.P.-0.29m)

# 火山性津波について



## ● 銭亀沢軽石流堆積物噴出源カルデラ陥没による津波 (原子炉設置許可:平成20年4月23日) (カルデラ形状の設定)

- ・銭亀沢軽石流堆積物の噴出年代は、約5万年前の可能性が高く、その前後の活動は知られていないことより、5万年前の活動の際に形成されたカルデラと同程度の陥没が生じた場合の津波について検討した。
- ・カルデラ形状は、北海道立地質研究所(2000)による海上音波探査記録等を参考に、上端の直径2.0km、下端の直径0.5km、深さ40mの約0.06km<sup>2</sup>の円錐台の形状として設定した。



カルデラ形状の設定及び波源モデルの概要 20

【北海道立地質研究所(2000)に追加】

# 火山性津波について



## ● 銭亀沢軽石流堆積物噴出源カルデラ陥没による津波 (原子炉設置許可:平成20年4月23日) (計算条件&結果)

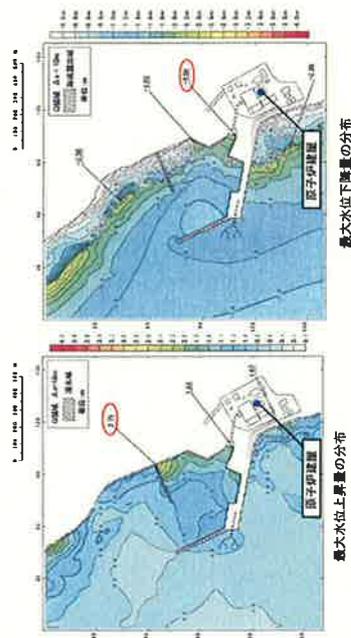
### ◆ 計算条件

- ・現場地形からカルデラ陥没が時間Sで終了すると仮定した波源モデルを用いて検討を実施した。
- ・カルデラ陥没時間SIについてはデータがないため、10秒、30秒、60秒、120秒、180秒、240秒、300秒と変えたパラメータスタディを実施した。

### ◆ 計算結果

No.	カルデラ陥没時間 (S)	最大水位上昇量 (最大水位) (m)	最大水位下降量 (最低水位) (m)	備考
1	10	2.29m (T.P.+2.93m)	-2.02m (T.P.-2.32m)	
2	30	2.29m (T.P.+2.93m)	-2.06m (T.P.-2.35m)	
3	60	2.29m (T.P.+2.93m)	-2.08m (T.P.-2.37m)	
4	120	2.29m (T.P.+2.93m)	-1.64m (T.P.-1.94m)	
5	180	2.29m (T.P.+2.93m)	-1.29m (T.P.-1.59m)	
6	240	1.86m (T.P.+2.49m)	-1.16m (T.P.-1.46m)	
7	300	1.31m (T.P.+1.94m)	-0.81m (T.P.-1.11m)	

(注) 最大水位・最大水位上昇量・最大水位下降量は、観測平均値 (T.P.+4.6m)  
(注) 最低水位・最大水位下降量は、観測平均値 (T.P.-6.29m)



銭亀沢軽石流堆積物噴出源が陥没しカルデラを形成する際に発生する津波の水位は、大間原子力発電所の想定津波による最高水位 (T.P.+4.4m程度)を上回らず、最低水位 (T.P.-3.6m程度)を下回るものではない。

# 1. 女川原子力発電所における津波評価と対策の経緯

時期	項目	津波評価の概要	津波の高さ※1	津波対策
昭和45年 5月	1号機 設置許可申請	・文献調査や聞き込み調査による評価 ・専門家による委員会での津波対策等を議論 (昭和43年～昭和55年)	3m程度	・敷地高さ (O.P.+14.8m) ・重要建造物の配置 (O.P.+15.0m) ・常時水位用瀬水位計
昭和62年 4月	2号機 設置許可申請	・869年貞観津波の現地調査 ・数値シミュレーションによる津波評価	0.P.+0.1m	・敷地高さ (O.P.+14.8m) ・重要建造物の配置 (O.P.+15.0m) ・法面防壁工 (O.P.+9.7m)
平成6年 5月	3号機 設置許可申請	・数値シミュレーションによる津波評価	0.P.+0.1m	・敷地高さ以下である ことを確認。
平成14年 2月	土木学会より「原子 力発電所の津波評価 技術」刊行	・土木学会による評価技術に基づいて津波評価 を実施	0.P.+13.0m	—
平成18年 9月	「発電用原子炉施設 に関する耐震設計審 査指針」の改訂	・新耐震指針に照らした既設発電用原子炉施設 の耐震安全性評価の指示(平成18年9月20 日)に基づき、津波評価を実施中。	評価中	—
平成22年 3月	観測装置の二重化	・欠測防止のために、潮位計を増設	—	・バックアップ用潮 位計
平成23年 3月	東北地方太平洋沖地 震による津波	・女川に発生した津波の再現解析を実施 (参考資料)	0.P.+約13m (潮位計)	・プーンタ中継装置 (常時水位用瀬水位計 )の高所への移動 (検討中)

※1:O.P.は女川原子力発電所工事用基準面であり、O.P.+0.0mは東京湾平均海面(T.P.)から-0.74mの高さである。



Tohoku Electric Power

## 目次

- 1. 女川原子力発電所における津波評価と対策の経緯 . . . 3
- 2. 女川1号機における津波評価 . . . 4
- 3. 女川2号機における津波評価 . . . 7
- 4. 女川3号機における津波評価 . . . 12
- 5. 土木学会手法による津波評価 . . . 13
- 6. 土木学会手法について . . . 28
- 7. 耐震バックチェックの状況 . . . 29
- 8. 津波対策 . . . 30



Tohoku Electric Power

# 2. 女川1号機における津波評価 (原子炉設置許可申請:昭和45年5月)

## (1) 文献調査(※1)による過去の主な津波の抽出

※1:仙台管区気象台「チリ地震津波調査報告」、中央気象台「観震時報第7巻第2号」

津波の種類		主な津波	
近地地震津波	1611年貞観、1896年明治三陸、1933年昭和三陸	869年貞観、1611年貞観、1896年明治三陸、1933年昭和三陸	1952年カムチャッカ沖、1960年チリ
遠地地震津波	1952年カムチャッカ沖、1960年チリ	(869年貞観、1611年貞観については、敷地付近での津波高記録は無し。)	

## ・宮城県内および発電所敷地付近での最大津波高

1896年	14.3m(歌津町石浜)	3.1m(女川町野々浜、杜鹿町藪ノ浦)
1933年	10.4m(唐桑町荻浜)	5.2m(杜鹿町大谷川)
1960年	5.4m(杜鹿町大谷川)	5.4m(杜鹿町大谷川)

## (2) 小屋取での聞き込み調査等

1896年	被害なし(聞き込み調査)
1933年	約3.6m程度(聞き込み調査)
1960年	2.7m(小屋取)、3.3m(鳴浜) ※2

※2:東北大学理学部報告による。

本発電所敷地は津波のある地域ではあるが、その高さはせいぜい3m程度である。



Tohoku Electric Power

## 2.女川1号機における津波評価

### 社内委員会（海岸施設研究委員会）による議論

#### ■設置の経緯

- ・女川1号機は、当社初の原子力発電所であり、専用港湾の建設を伴う発電所としても当社初。
- ・社内での比較検討の結果、敷地レベル案としてO.P.+15m程度が最適と考えたが、津波に対する安全性等について専門的な視点で議論いただくために設置。

#### ■委員会の構成

- ・本間 仁 東洋大学教授・東京大学名誉教授を委員長として、土木工学や地球物理学等の専門家により構成(計9名)

#### ■委員会の設置期間

・昭和43年7月～昭和55年8月



Tohoku Electric Power

## 2.女川1号機における津波評価

### 社内委員会（東北電力原子力地点海岸施設研究委員会）

#### ■主な議論 ※当時の関係者からの聞き取り等による

- ・明治三陸津波や昭和三陸津波よりも震源が南にある地震、例えば貞観や慶長等の地震による津波の波高はもっと大きくなることもある。
- ・当時の水理公式集(津波高さの経験式)や、研究論文などについても議論された。

以上のような議論の結果、以下のとおり集約された。

- ・敷地高さによって、津波対策とする。
- ・敷地高さは、O.P.+15m程度でよい。

⇒委員会での議論を踏まえ、屋外重要土木構造物の地上高さと主要建屋1階の高さをO.P.+15.0m、敷地高さをO.P.+14.8m、と社内決定。



Tohoku Electric Power

## 3.女川2号機における津波評価（原子炉設置許可申請・昭和62年4月）

### (1)女川1号機設置許可以降の知見の反映

#### ①考古学や堆積学の津波痕跡調査への応用(後述)

⇒869年貞観津波の痕跡調査を実施（昭和58年～）

痕跡高<sup>※1</sup>の比較から、女川地点では、1611年慶長津波が大きかったと推定。

#### ②津波の数値シミュレーション技術の適用(後述)

⇒痕跡高の比較により、1611年慶長津波を既往最大の津波と評価し、数値シミュレーションを実施。

⇒敷地での津波の最高水位をO.P.+9.1mと評価。

※1:当社の痕跡調査では、869年貞観津波は仙台平野で2.5～3m、1611年慶長津波の痕跡高として、仙台市の南にある岩沼で6～8mの記録がある(羽鳥(1975))。



Tohoku Electric Power

## 3.女川2号機における津波評価 貞観11年の津波の痕跡調査

・貞観11年の津波については、「日本三代実録」にしか記録がなく、津波高を定量的に把握することは非常に困難であるとされていた。



新たな手法の採用

#### ①考古学的所見に基づく手法

・故伊藤信雄東北大学名誉教授の助言に基づき、遺跡発掘調査の所見からその場所への津波の侵入の有無を判断する手法。

※地質調査所琴川氏により「地震考古学」が1988年頃から提唱されていた。

#### ②堆積学的検討に基づく手法

・箕浦他により提案された、堆積物の堆積相、物理特性、化学組成等の分析によって津波の痕跡の有無を判断する手法。(箕浦 他「湖沼底質堆積物中に記録された地震津波の痕跡—青森県市浦村十三付近の湖沼系の例—」,地震 第2輯第40巻(1987)183-196頁)

調査結果は、阿部・菅野・千釜「仙台平野における貞観11年(869年)三陸津波の痕跡高の推定」(地震 第2輯第43巻(1990)513-525頁)等で公表



Tohoku Electric Power

### 3. 女川2号機における津波評価 貞観11年の津波の痕跡調査

#### ① 考古学的所見に基づく手法



■仙台平野の遺跡(8箇所、左図の○)の発掘所見および条里跡の保全状況から、磯田新田(海岸から約3km、標高2.6m)より内陸には侵入していない。



(阿部他(1990)Fig.2より)

### 3. 女川2号機における津波評価 貞観11年の津波の痕跡調査

#### ② 堆積学的検討に基づく手法

■ 評価調査(SD-1~3)およびこれを補完するための検土杖による簡易土壌観察(122箇所)を実施。

SD-1の分析結果例

堆積相	砂層(SEI-1, SEI-2)のうち, SEI-1は火山灰層の直下に存在。
物理特性	粒度組成試験の結果, SEI-1, SEI-2とも砂と砂の層を呈す。
化学組成	SEI-1, SEI-2でCa <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , Co <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> が相対的に大きく、濁水流入の可能性がある。
砂層の年代	<sup>14</sup> C法および火山灰層の年代と地質図の対比によると, SEI-1は慶長年間, SEI-2は延宝年間に対応。

→SEI-1は慶長津波, SEI-2は貞観津波の痕跡と判断。

■津波浸水範囲の推定

貞観11年の津波痕跡は, SD-1, SD-2と、簡易土壌観察の測点50番付近(= 磯田新田の真南)まで追跡できた。

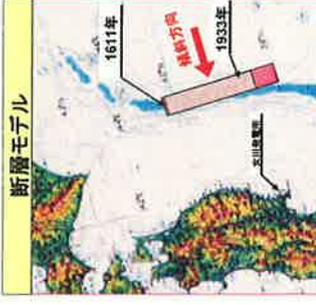
考古学的所見とも整合

#### 結論

- ・河川から離れた一般の平野部の痕跡高は2.5~3m、浸水域は海岸線から3kmぐらい。
- ・浜堤列を越えて広範囲に浸水したと考えられ、周囲の長い津波であったと推定。

### 3. 女川2号機における津波評価 津波の数値シミュレーション

- ・東北大学 首藤教授による数値シミュレーションプログラムを使用。
- ・慶長津波の断層モデルは、相田(1977)のKC-3モデルを使用。
- ・なお、数値シミュレーションの妥当性を検証するため、昭和三陸津波の数値シミュレーションも実施。



断層パラメータ	1933年昭和	1611年慶長
断層モデル	SY-3	KC-3
長さ(km)	185	245
幅(km)	50	50
すべり量(m)	6.6	8
傾斜角(°)	45	45
断層形態	正断層	正断層
走向	NS	NS

・敷地での水位上昇量は、SY-3で5.0m程度、KC-3で7.7m程度。これに期望平均高潮位を考慮。

・検証計算の結果: SY-3 ⇒ K=0.95, K=1.39  
KC-3 ⇒ K=0.97~1.22, K=1.37

シミュレーションの結果、敷地での最高水位をO.P.+9.1m程度と推定。

### 4. 女川3号機における津波評価 (原子炉設置許可申請:平成6年5月)

#### (1) 女川2号機と同様の数値シミュレーションを実施

- ・海底地形は最新のものを使用。
- ⇒敷地での最高水位をO.P.+9.1m程度と推定。(断層モデルは、相田(1977)のKC-3モデルを使用。)

#### (2) 女川2号機設置許可以降の知見の反映

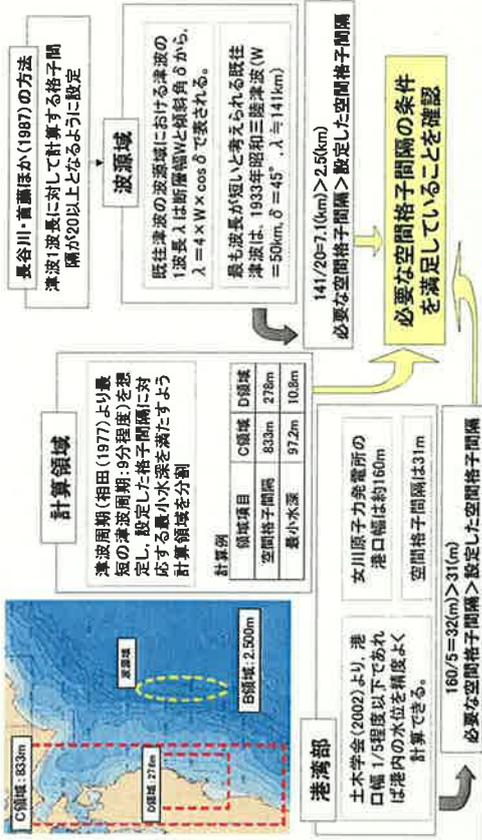
- ・遠地津波(チリ地震津波)の数値シミュレーションを実施。  
後藤他(1993)による、津波の外洋伝播計算により求めた沖合波形を検証計算によって修正し、これを用いて予測計算を行なう手法により検討。
- ・敷地での水位は慶長津波よりも4m程度低いが、周期が長い(慶長=10分程度 ⇔ チリ=80分程度)。



## 5.土木学会手法による津波評価

① 既往津波の再現性の確認

### 空間格子間隔の設定

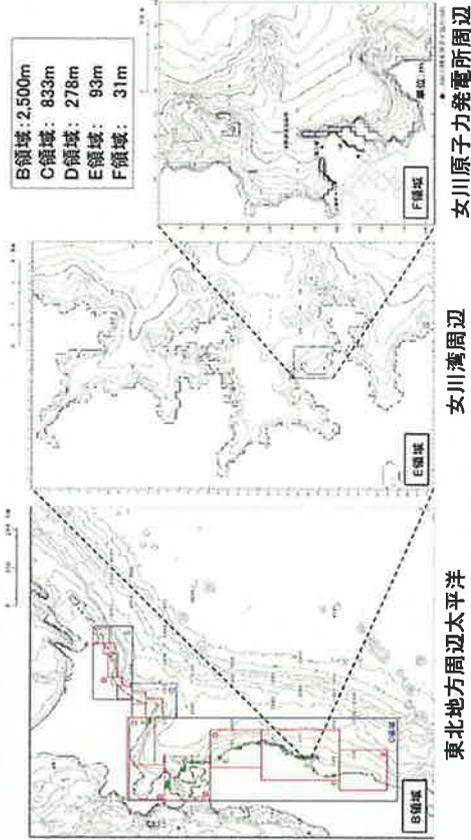


Tohoku Electric Power

## 5.土木学会手法による津波評価

① 既往津波の再現性の確認

### 空間格子間隔の設定



Tohoku Electric Power

## 5.土木学会手法による津波評価

① 既往津波の再現性の確認

### 数値シミュレーションにおける主な計算条件

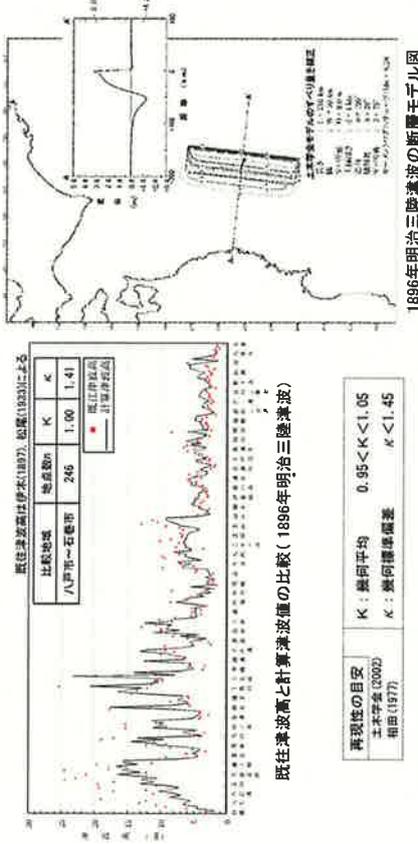
領域項目	B領域	C領域	D領域	E領域	F領域
空間格子間隔 $\Delta s$	2.5 km	833 m (2500/3)	278 m (2500/9)	93 m (2500/27)	31 m (2500/81)
時間格子間隔 $\Delta t$	1秒				
基礎方程式	非線形浅波式				
沖側境界条件	自由透過	外側の大格子領域と、水位・流量を接続			
陸側境界条件	完全反射	完全反射 (海底露出は考慮)			
初期海面変動	地震断層モデルを用いてMansinha and Smylie(1971)の方法により計算される断面変位を海面上に与える				
海底摩擦	考慮しない マニングの粗度係数 $n = 0.03\text{m}^{1/3}/\text{s}$ (土木学会(2002))				
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				

Tohoku Electric Power

## 5.土木学会手法による津波評価

① 既往津波の再現性の確認

### 1896年明治三陸津波の再現性

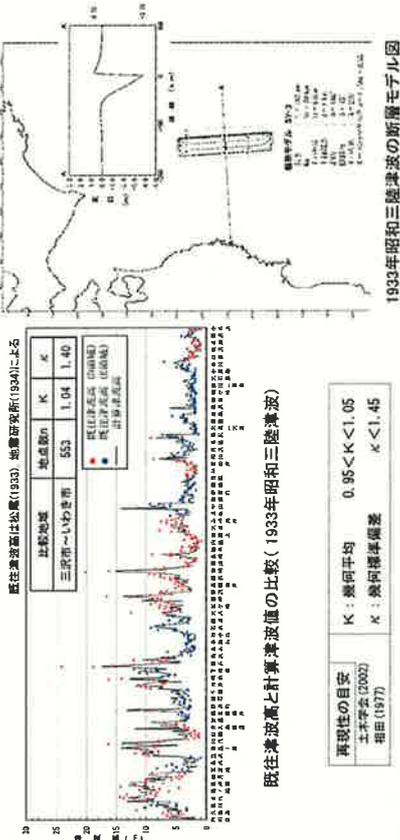


Tohoku Electric Power

## 5.土木学会手法による津波評価

①既往津波の再現性の確認

### 1933年昭和三陸津波の再現性



既往津波高と計算津波値の比較 (1933年昭和三陸津波)

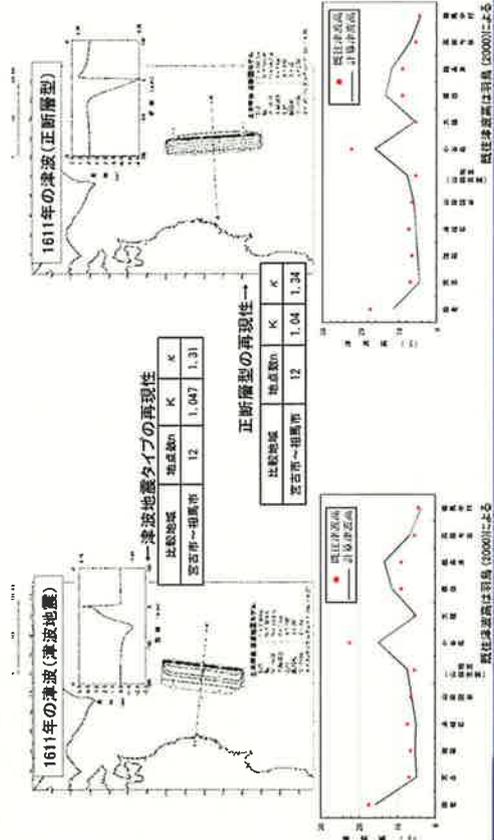
再現性の目安  
土木学会(2002)  
相田(1977)  
K : 幾何平均  
κ : 幾何標準偏差  
0.95 < K < 1.05  
κ < 1.45

Tohoku Electric Power

## 5.土木学会手法による津波評価

①既往津波の再現性の確認

### 1611年慶長三陸津波の再現性



既往津波高は引風(2000)による

Tohoku Electric Power

## 5.土木学会手法による津波評価

①既往津波の再現性の確認

対象津波	比較地域	地点数n	K	κ
1611年の津波(津波地震)	宮古市~相馬市	12	1.047	1.31
1611年の津波(正断層型)	宮古市~相馬市	12	1.04	1.34
1933年昭和三陸津波	三沢市~いわき市	553	1.04	1.40
1896年明治三陸津波	八戸市~石巻市	246	1.00	1.41

断層モデルの再現性

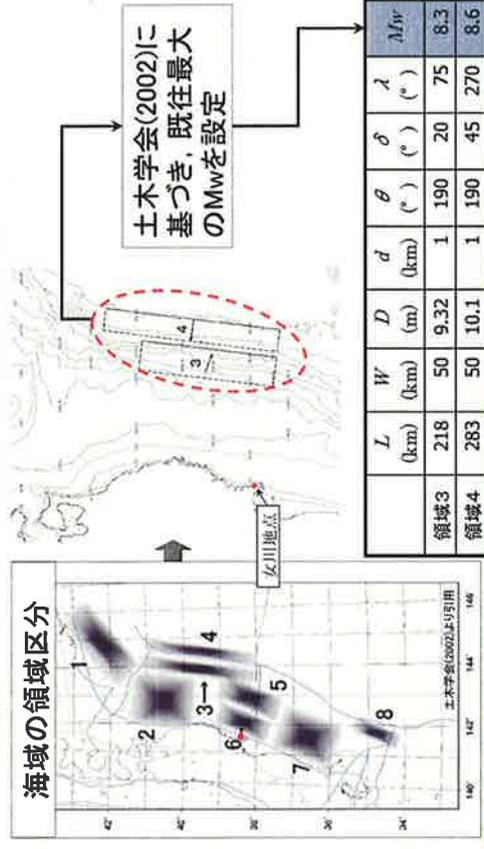
断層モデルの再現性・数値計算方法等の妥当性は確認された

Tohoku Electric Power

## 5.土木学会手法による津波評価

②想定津波による設計津波  
水位の検討

日本海溝沿いに想定される地震に伴う津波の検討



Tohoku Electric Power

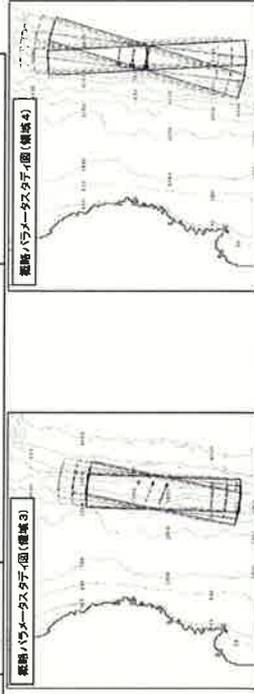
## 5.土木学会手法による津波評価

②想定津波による設計津波  
水位の検討

日本海溝沿いに想定される地震に伴う津波の検討

【概略パラメータスタディ】

領域	パラメータ項目	パラメータ変動範囲	計算水位 (m)
3	a) 位置	基準, 北へ20km, 40km移動	+11.1
	b) 走向 $\theta$	基準, 基準 $\pm 5^\circ$	
4	a) 位置	基準, 北へ20km, 40km移動	+7.7
	b) 走向 $\theta$	基準, 基準 $\pm 10^\circ$	



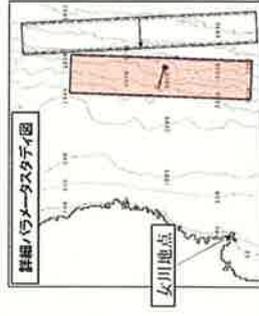
## 5.土木学会手法による津波評価

②想定津波による設計津波  
水位の検討

日本海溝沿いに想定される地震に伴う津波の検討

【詳細パラメータスタディ】

区分	領域	パラメータ項目	パラメータ変動範囲	計算水位 (m)
概略 最大ケース	3	a) 傾斜角 $\delta$	基準 $\pm 5^\circ$	+12.1
		b) すべり角 $\lambda$	基準 $\pm 10^\circ$	
		最大ケースのパラメータ	最南端, 走向 $\theta = 185^\circ$ , 傾斜角 $\delta = 25^\circ$ , すべり角 $\lambda = 80^\circ$	



最大ケースの断層パラメータ(まとめ)

	L (km)	W (km)	D (m)	d (km)	$\theta$ ( $^\circ$ )	$\delta$ ( $^\circ$ )	$\lambda$ ( $^\circ$ )	Mw
領域3	218	50	9.32	1	185	25	80	8.3

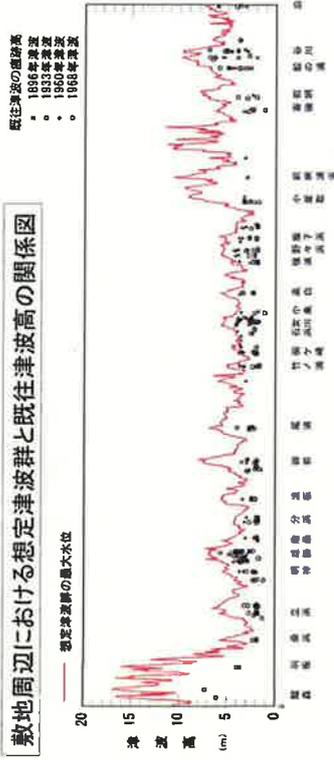
➡ 計算水位(+12.1m)に、期望平均満潮位(O.P.+1.43m)を考慮し、O.P.約+13.6mと評価

## 5.土木学会手法による津波評価

②想定津波による設計津波  
水位の検討

日本海溝沿いに想定される地震に伴う津波の検討

敷地周辺における想定津波群と既往津波高の関係図



パラメータスタディを実施した想定津波群の敷地周辺における計算水位は、既往津波の痕跡高をすべての地点で上回っている

## 6.土木学会手法について

■ 以上のとおり、土木学会手法によって、女川原子力発電所での津波高をO.P.+13.6mと評価した。

■ 東北地方太平洋沖地震の津波は、これまで日本周辺で発生した津波としては最大級とされているが、女川原子力発電所では、津波が敷地を越えず安全性を確保できた。潮位計で観測された津波高さはO.P.+約13mであり、土木学会手法による評価高さ(O.P.+13.6m)は遜色のないものとなっている。

