

耐震安全性に関するIAEA国際ワークショップ

中越沖地震における柏崎刈羽原子力発電所での 地震・地震動の分析と設備健全性の検討

2008年6月19日
柏崎市民プラザ

独立行政法人 原子力安全基盤機構
蛸沢 勝三

発表内容

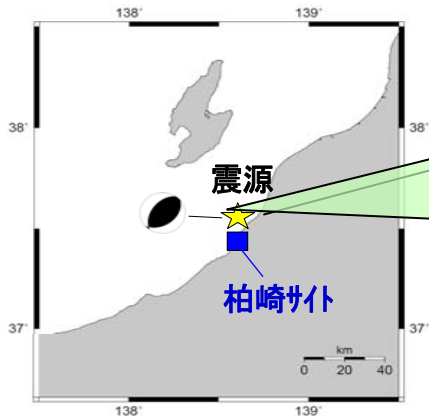
- I. 発電所及び地震動観測記録の概要
- II. 地震・地震動の分析
- III. 7号機の設備健全性の検討
- IV. 得られた知見の整理

参考資料:

- ・原子力安全・保安院 耐震・構造設計小委員会地震・津波、地質・地盤合同WG(第9回)(平成20年5月22日)資料
- ・原子力安全・保安院 設備健全性評価サブWG(第6、7、10回)(平成20年3月7日, 27日、6月5日)資料

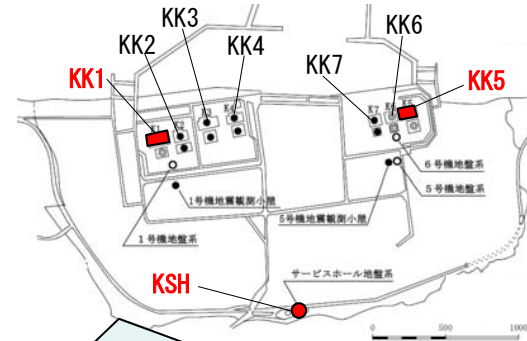
I. 発電所及び地震動観測記録の概要

■ 震源と地震の諸元



本震:
2007.7.16 10:13
Mj=6.8
Mo=9.3x10¹⁸ Nm (F-net)
深さ=10km
震央距離=14km

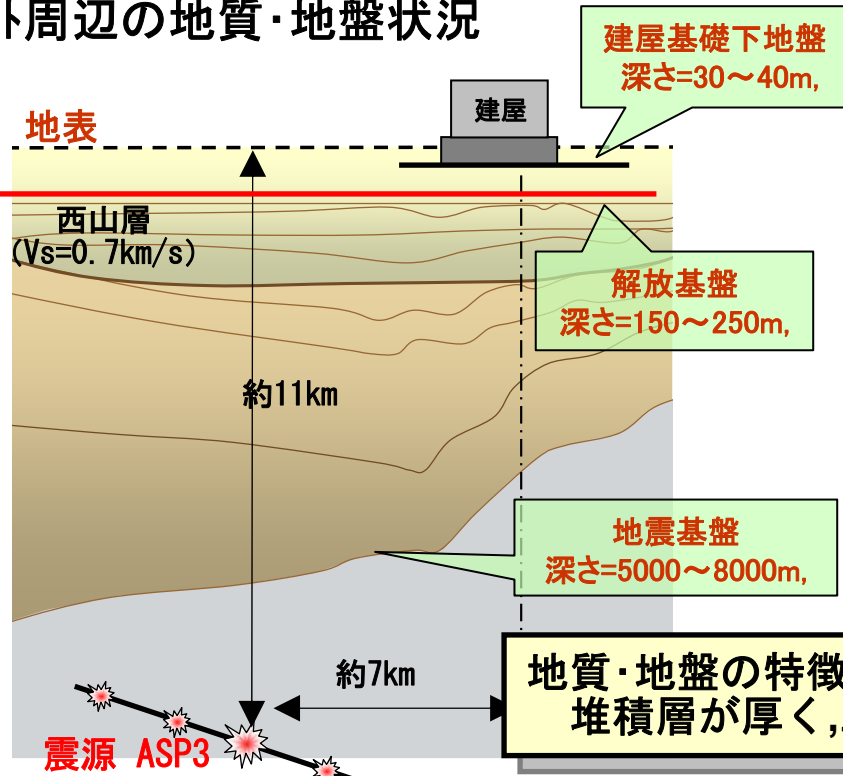
■ 1~7号機 (KK1~KK7) 位置関係



■ サイト周辺の地質・地盤状況

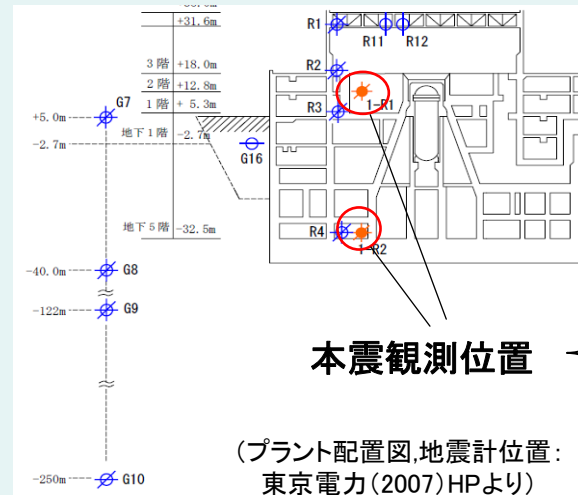
浅部地盤

深部地盤

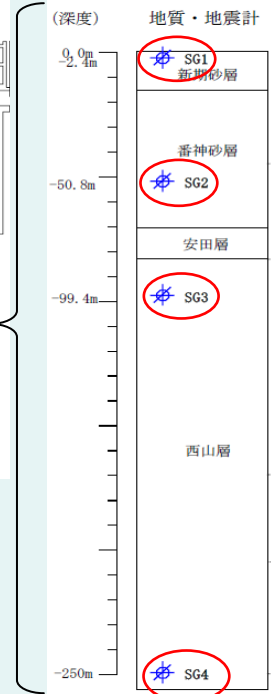


地質・地盤の特徴:
堆積層が厚く, 三次元的 不整形性を有す

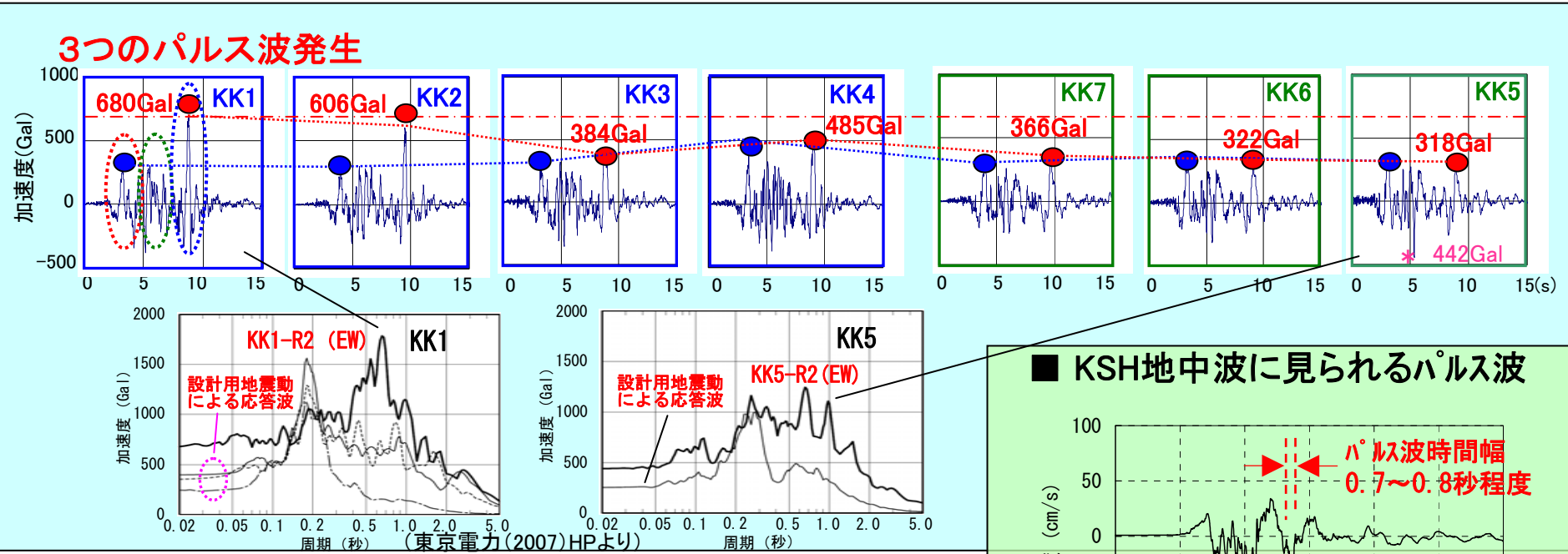
● KK1地震計設置位置



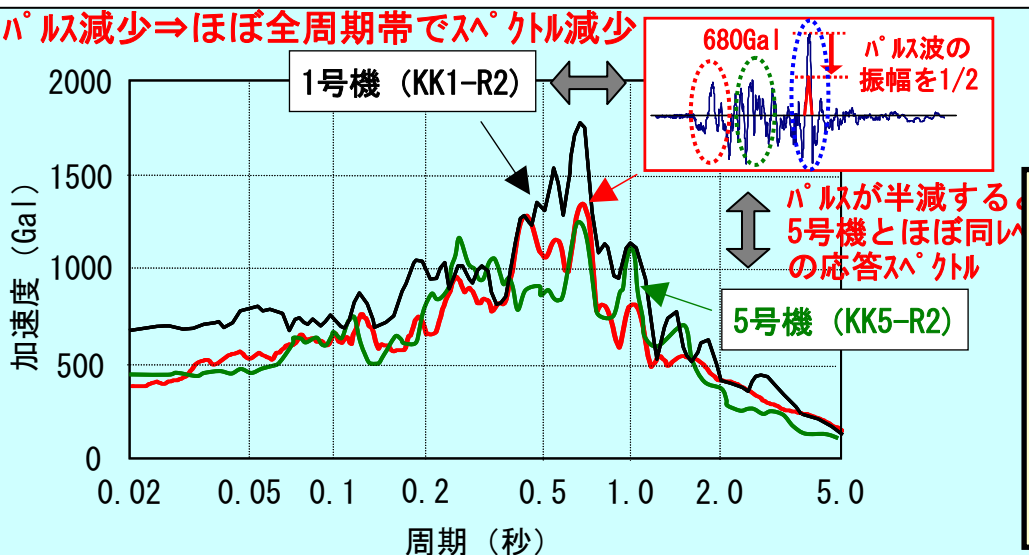
● サービスホール (KSH) 地震計設置位置



原子炉建屋基礎盤上の観測波形(EW方向)の特徴



第3パルス波の応答スペクトルに及ぼす影響の分析



- ### 観測地震動の特徴と設計地震動
- ① 観測記録には、3つのパルス波が発生。
 - ② KK1の観測波形では、3番目のパルス波が地震動全体のレベルを支配している。
 - ③ KK1~KK7の建屋基礎版上の観測地震動は、設計を上回っている。特に、KK1は最も大きく、KK5の約2倍。

Ⅱ. 地震・地震動の分析

Ⅱ-1 分析の観点及び前提条件

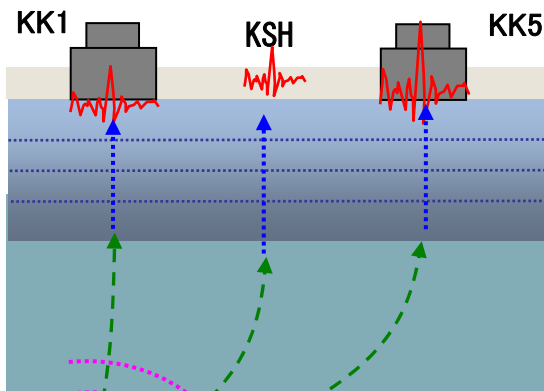
■ 分析の観点

- ・各号機側の地震動(パルス波)が大きく増幅した原因と、号機間の増幅の違いに着目

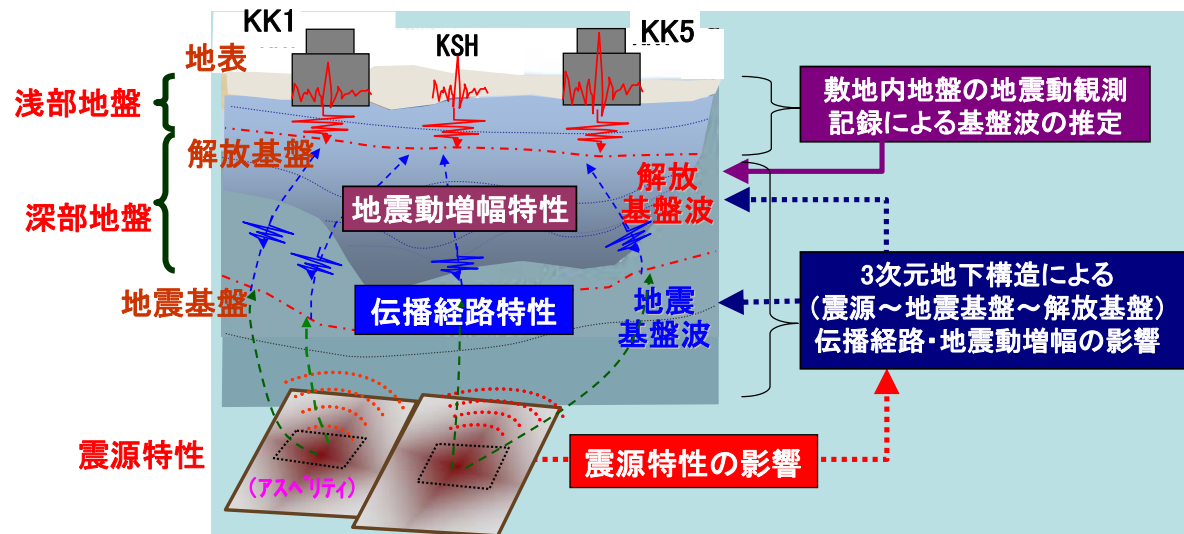
■ 分析の前提条件

- ① 現時点の公開情報の範囲で実施。
(地震後に東京電力等で実施の敷地及び周辺の浅部地盤の詳細な調査情報は未公開のため、地盤モデルに未反映。今後、公開次第に逐次反映・検討の予定)
- ② 震源特性と深部地盤の影響に重点を置き、地震動(パルス波)の成長・増幅過程を中心に解析
⇒ 深部地盤は不整形構造であるが、成層構造であると仮定し、両者の比較から影響をみる

● 成層地盤モデル



● 3次元地下構造モデル

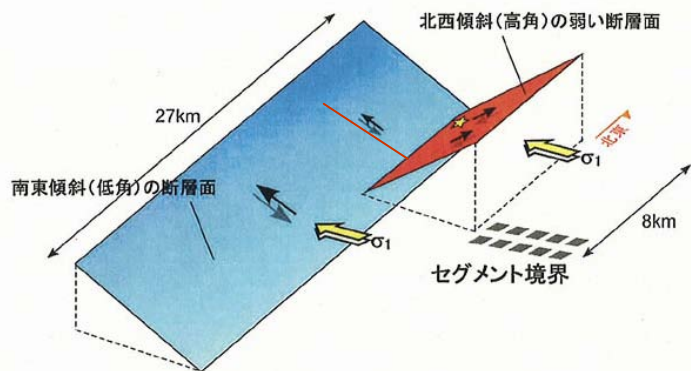


Ⅱ-2 震源特性の地震動への影響の分析

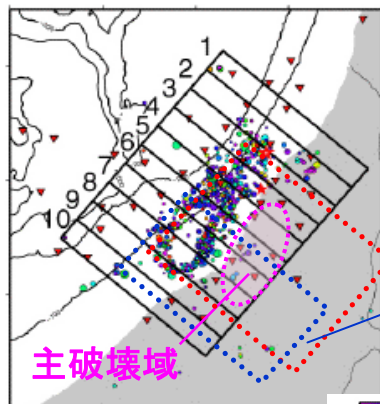
■ 分析の前提条件

- ① 震源断層は、余震分布等に基づく南東傾斜で、3つのアスペリティが破壊したとの説を採用。
- ② 上記震源断層のモデル化は、入倉や釜江等の断層モデルに基づいて実施。
同モデルの検証は、発電所及び周辺地域での観測地震動を経験的グリーン関数法で解析して、観測記録との整合性によって確認。

● 断層の傾斜：南東傾斜



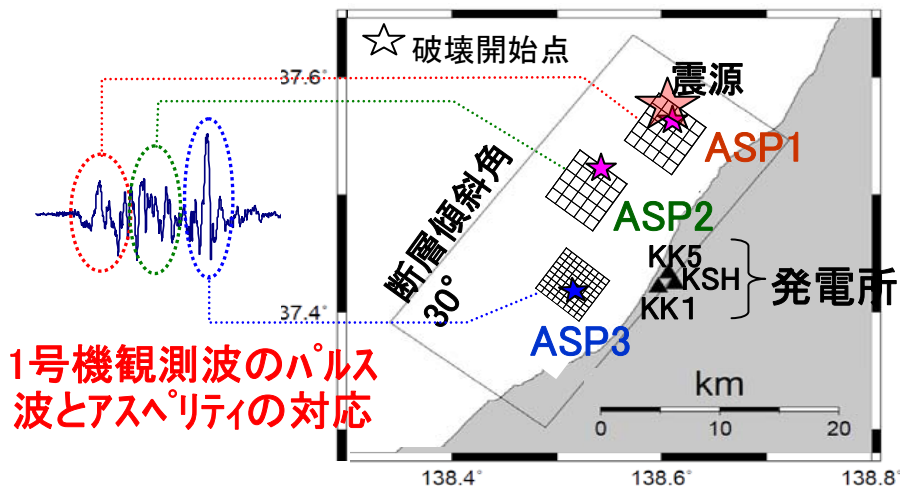
(2008.1/11 地震調査委員会資料に加筆)



震源の色は発生した時間
Date
7/26 8/5 8/15 8/25

(東京大学地震研究所・ほか(2007)に加筆)

● 震源断層モデル



震源断層モデル諸元

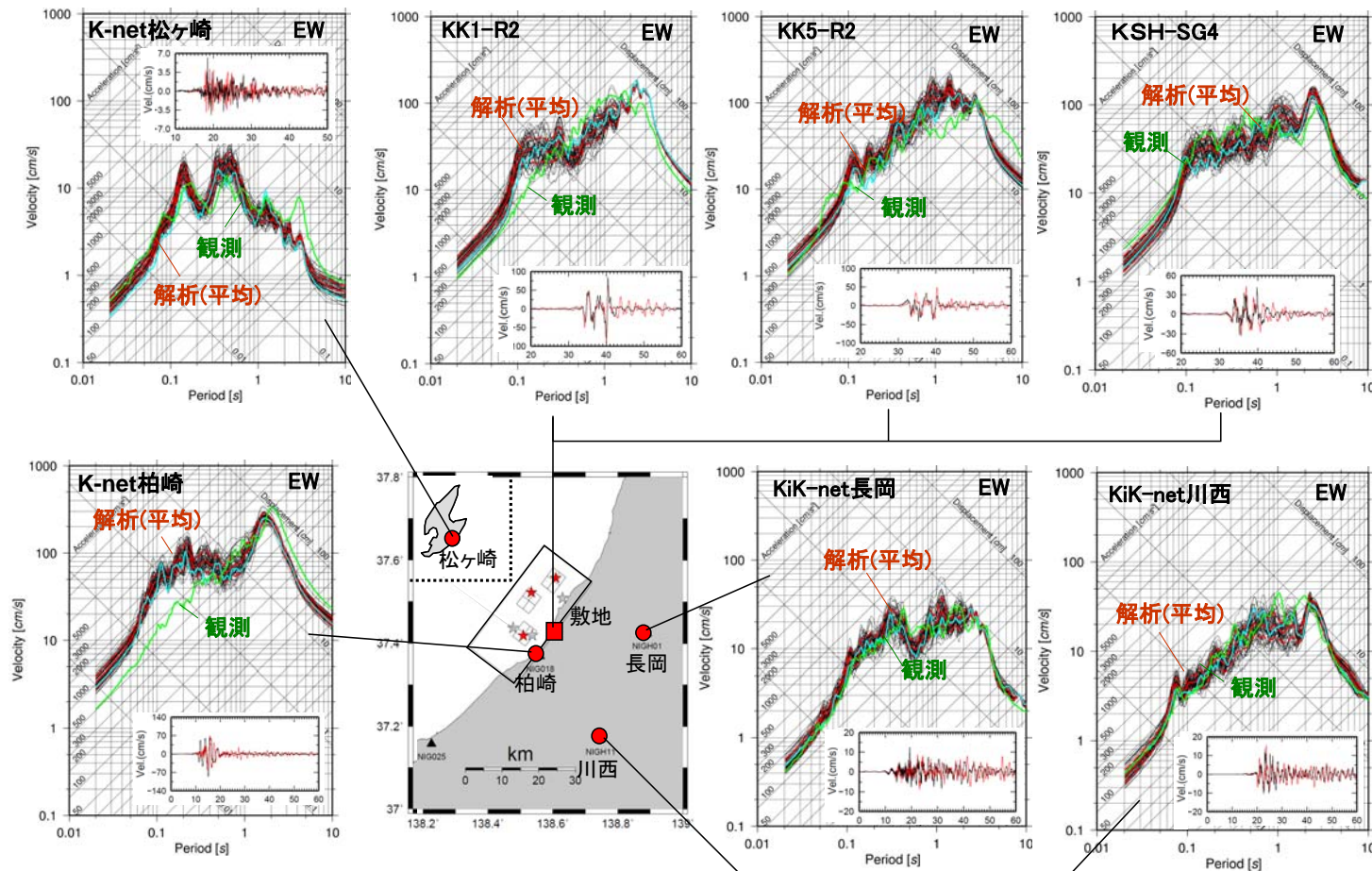
ASP	断層パラメータ	
	Mo (Nm)	$\Delta\sigma$ (Mpa)
1, 2	1.69×10^{18}	23.7
3	1.02×10^{18}	19.8

ASP:アスペリティ
Mo:地震モーメント
 $\Delta\sigma$:応力降下量

(入倉他HP(2008)の震源断層モデル)

震源モデルの検証

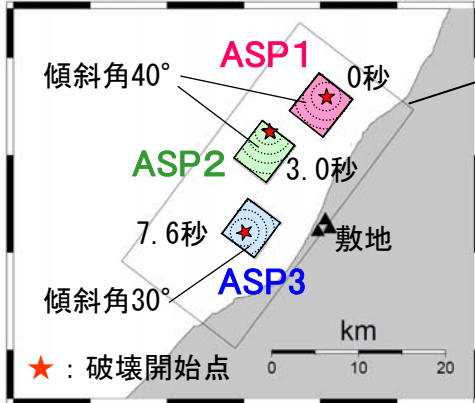
・検証方法： 震源モデルの不確かさを考慮した解析による速度スペクトルと観測記録によるものとの比較



解析結果と観測記録は、良く一致しており、モデルの妥当性を確認

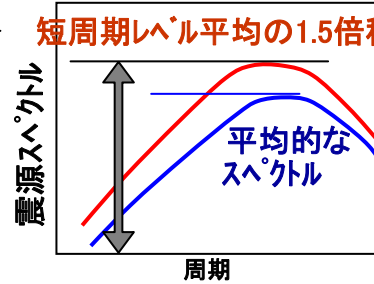
震源特性の影響の分析

3つのアスペリティの破壊によりパルス波が発生

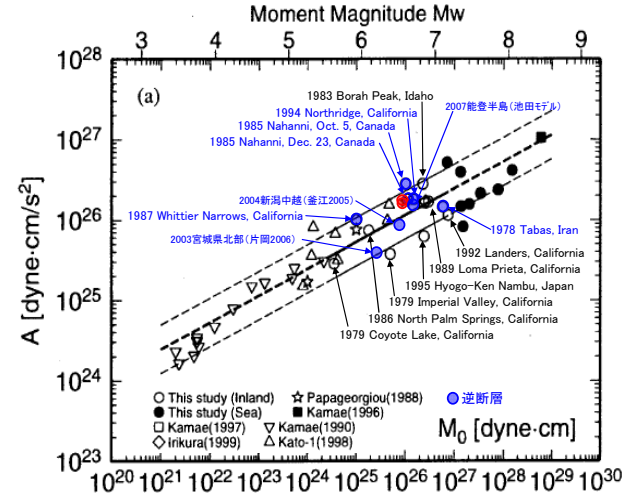


同規模の地震と比べ短周期側の地震動が大きい

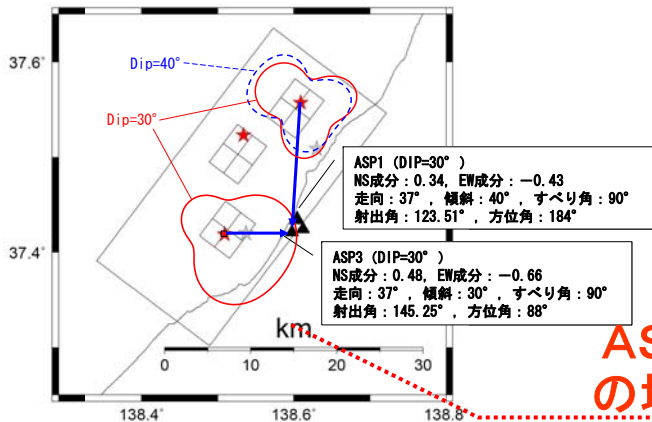
短周期レベル平均の1.5倍程度



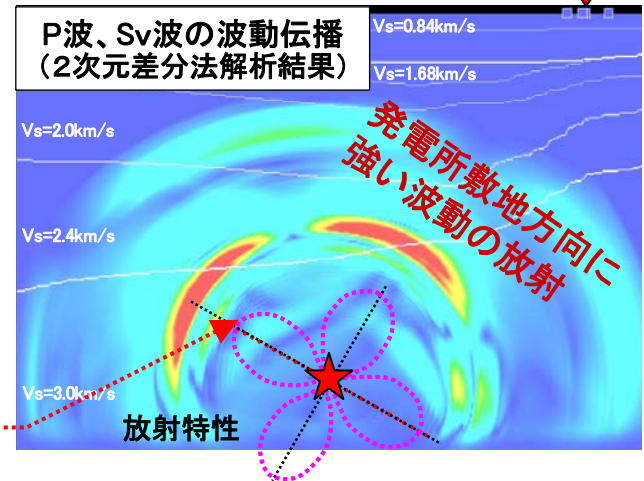
ASP3による敷地への放射大



敷地



ASP3のEW成分の地震動の放射大



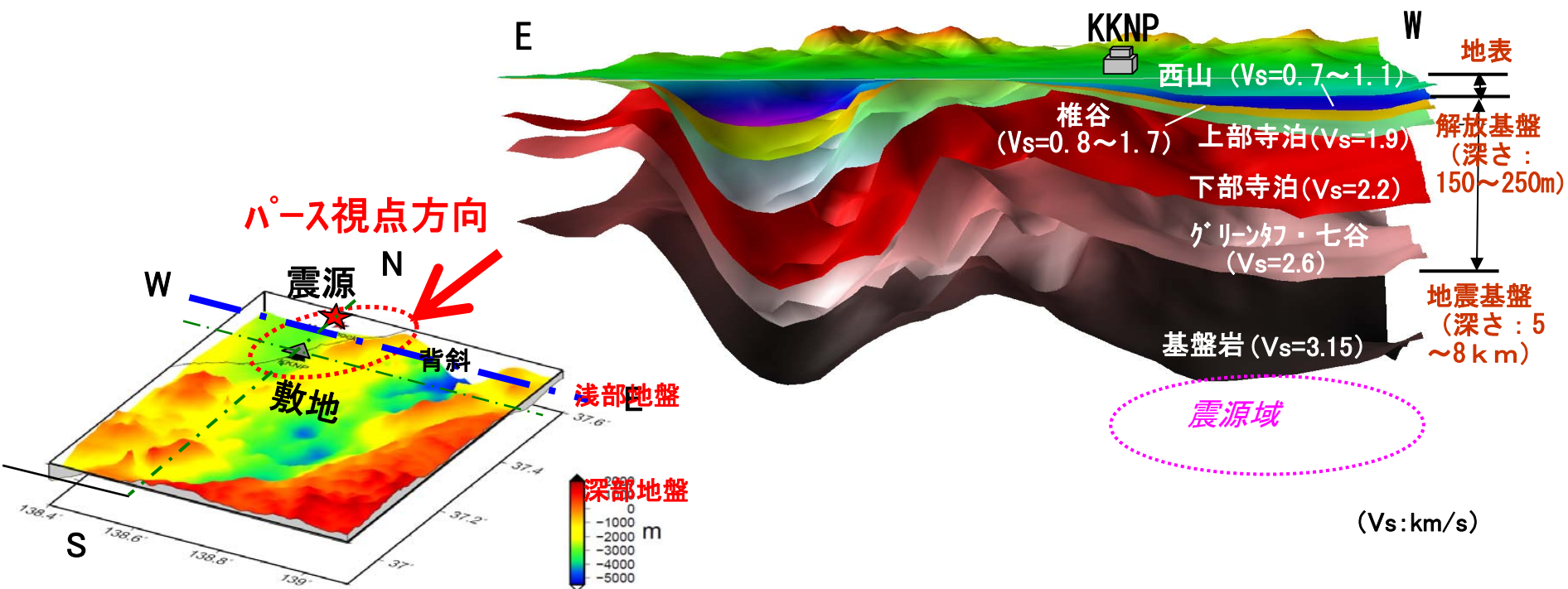
- ① 震源断層モデルから推定される短周期レベルは、同規模の地震(Mj6.8)の平均より1.5倍程度高い
- ② 各アスペリティの破壊形式(破壊開始点、開始時間、破壊伝播方向)がパルス波増幅の一要因
- ③ アスペリティ3は敷地に極近く、発電所に強い地震動を放射

Ⅱ-3 深部地盤構造の影響の分析

■ 3次元深部地盤構造モデル作成とその特徴

- ① 使用データ: 旧石油公団の基礎試錐、反射法探査、ボーリング調査、地質図等
- ② 作成方法 : 地質構造—上記データ使用。速度構造—中越沖地震の余震記録を用いて同定。

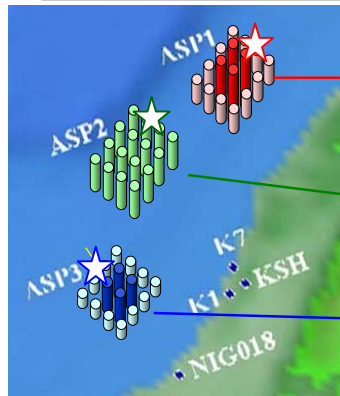
〔地層断面パース(各層上面を表示)〕



- ① 深部地盤構造は、敷地直下の深部地盤が急峻で、地震動の伝播経路に不整形な構造有り
- ② 敷地周辺では、地震基盤が約5~8kmと非常に深く、上部に堆積岩が厚く堆積

■地盤モデル・解析手法の検証

・検証方法：解放基盤での解析波形と建屋基礎盤上の観測波形との形状の傾向で確認

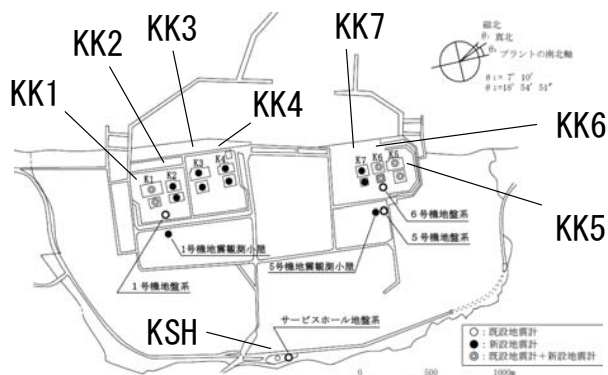


ASP1: 傾斜角40度
 $M_0 = 1.69 \times 10^{18}$ Nm
 (分布=中央2:周辺1)

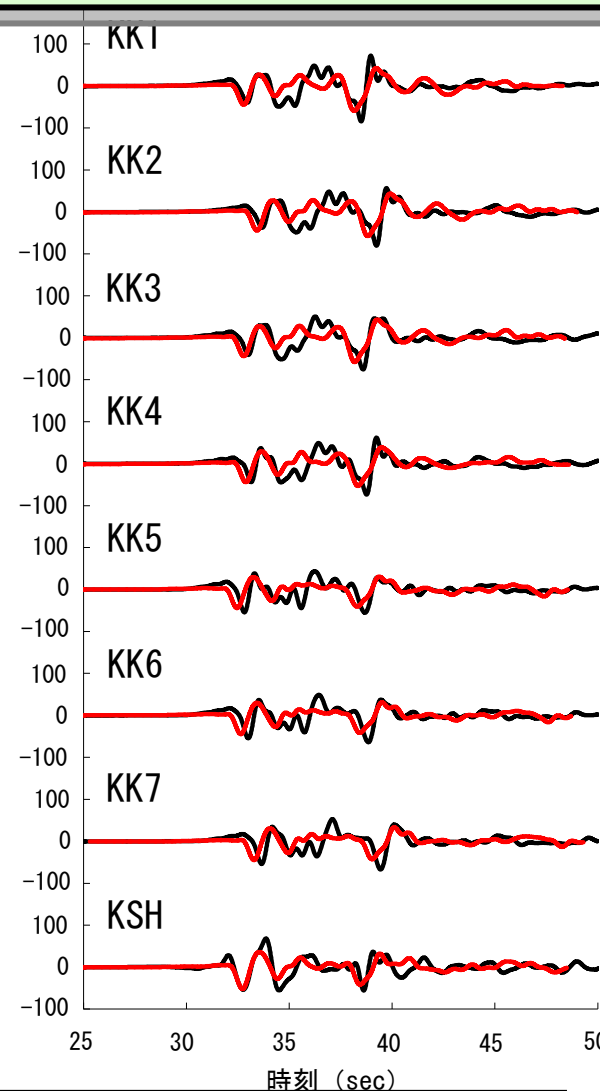
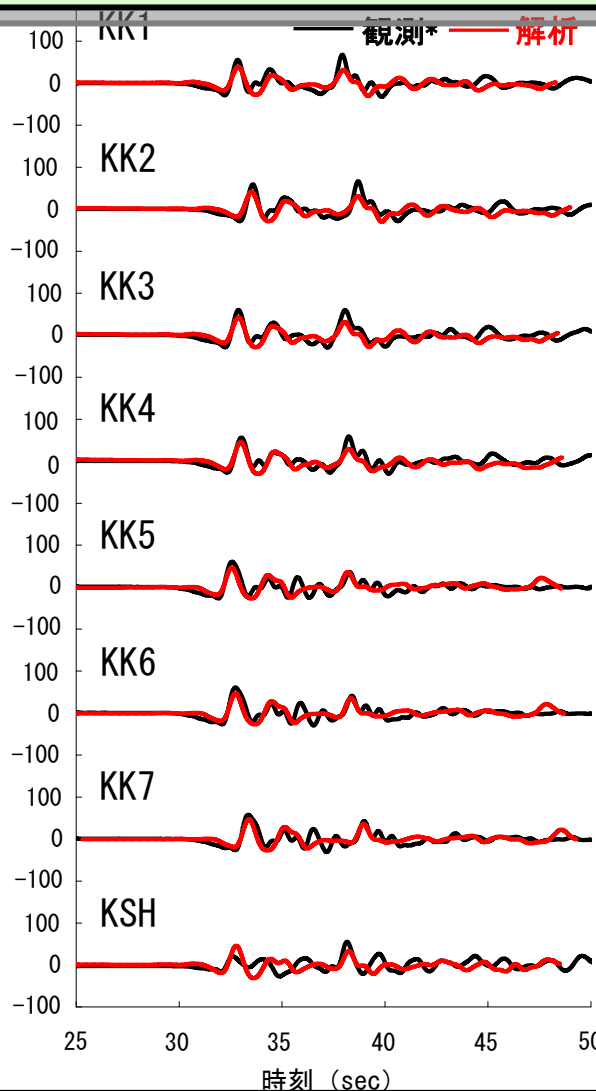
ASP2: 傾斜角40度
 $M_0 = 1.69 \times 10^{18}$ Nm
 (分布:一定)

ASP3: 傾斜角30°
 $M_0 = 1.02 \times 10^{18}$ Nm
 (分布=中央2:周辺1)

柏崎刈羽サイトとプラント位置の関係



* 観測：KK1～KK7は建屋基礎版上観測波、
 KSHの解放基盤波



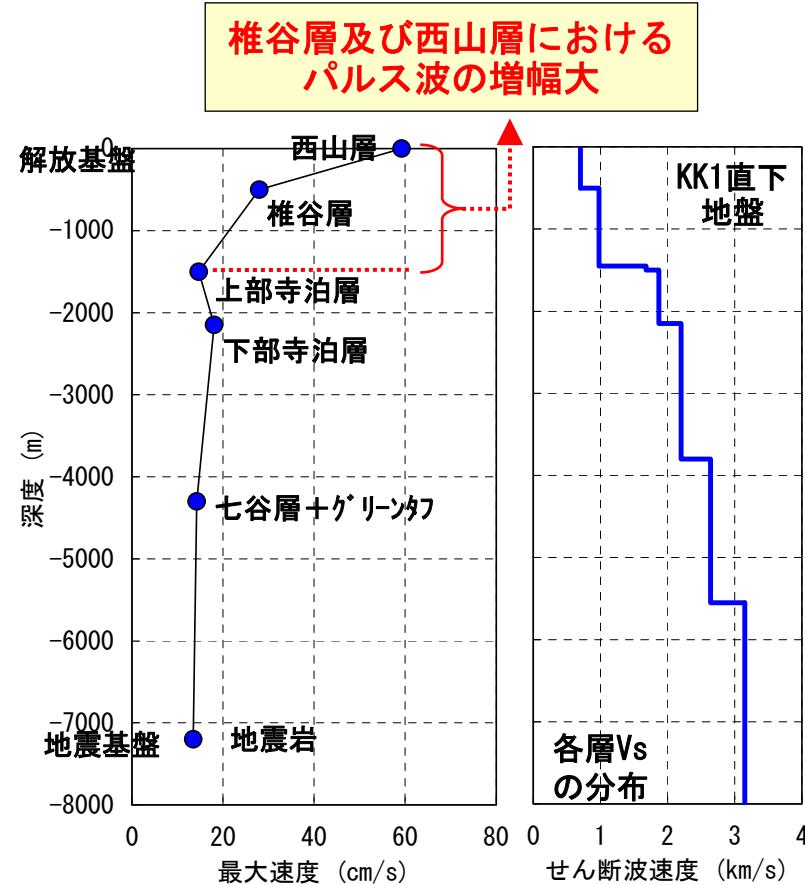
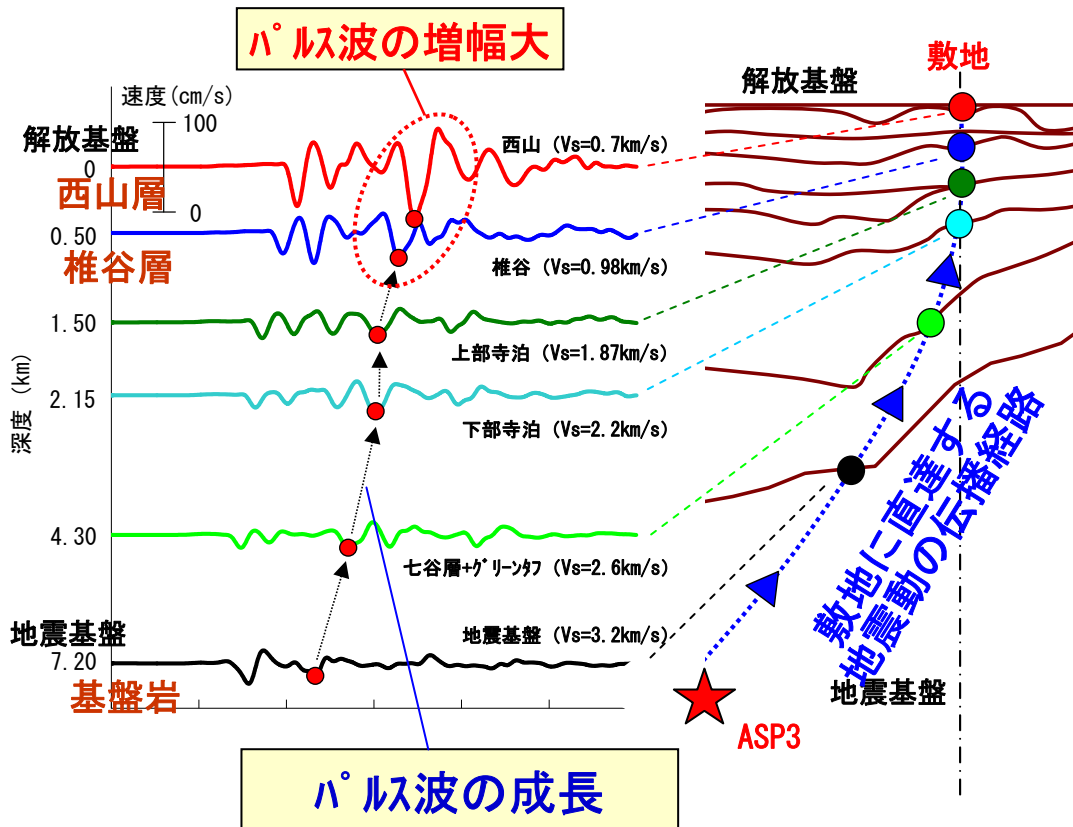
解析波形と観測波形の形状は調和的であり、地盤モデル・解析方法は妥当と考える。

■各号機での地震動(パルス波)の増幅特性の分析

●KK1でのパルス波の成長過程

●速度波評価位置

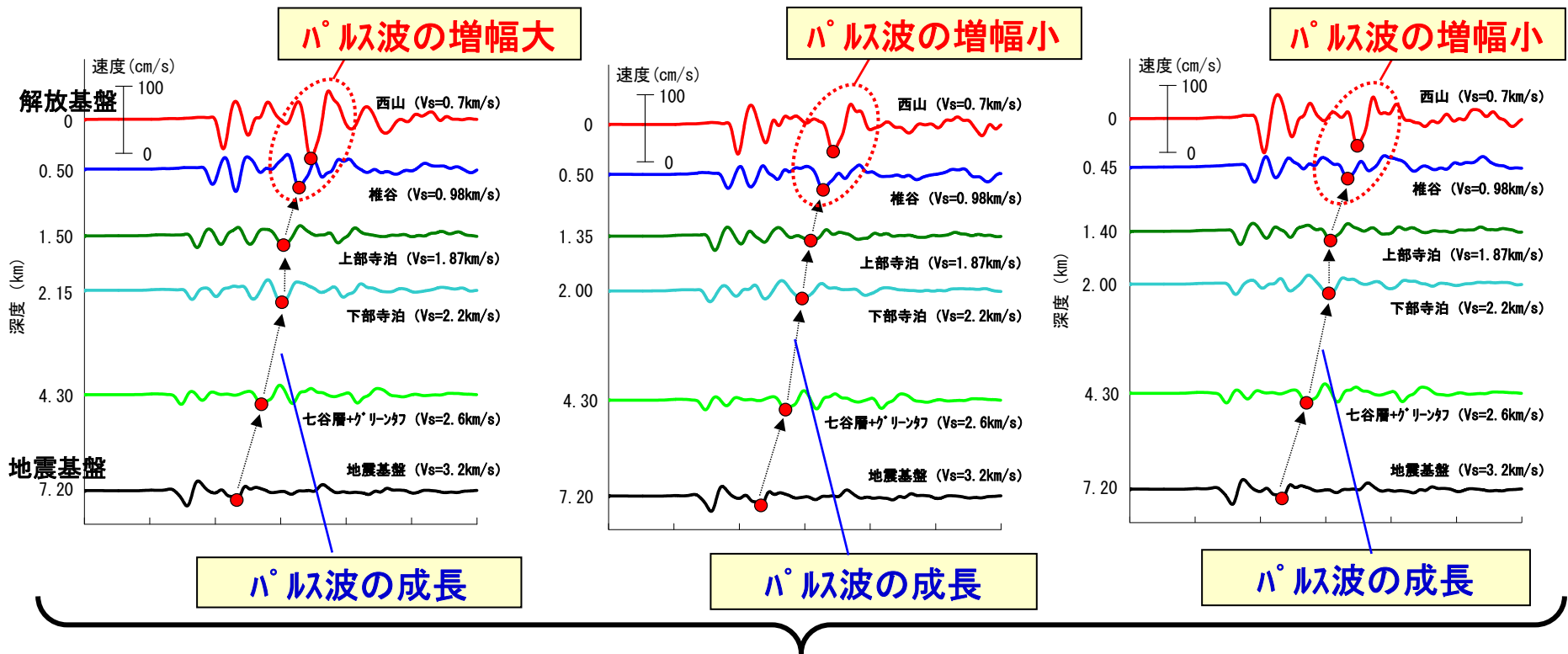
●地層毎の最大速度(EW)の比較



- ① 深部地盤の不整形部は、地震動のエネルギーを集中・滞留させると共に、地震動を敷地方向に向かわせる構造となっている。
- ② せん断波速度の低下幅の大きな椎谷・西山層でのインピーダンス比が大きく、地震動が大きく増幅。
- ③ 地震基盤～解放基盤間で3～4倍増幅し、特に、椎谷・西山層での増幅が大きい。

■号機間の地震動(パルス波)の増幅特性の違いの分析(1/2)

●KK1での速度波形(EW成分) ●KK5での速度波形(EW成分) ●KSHでの速度波形(EW成分)



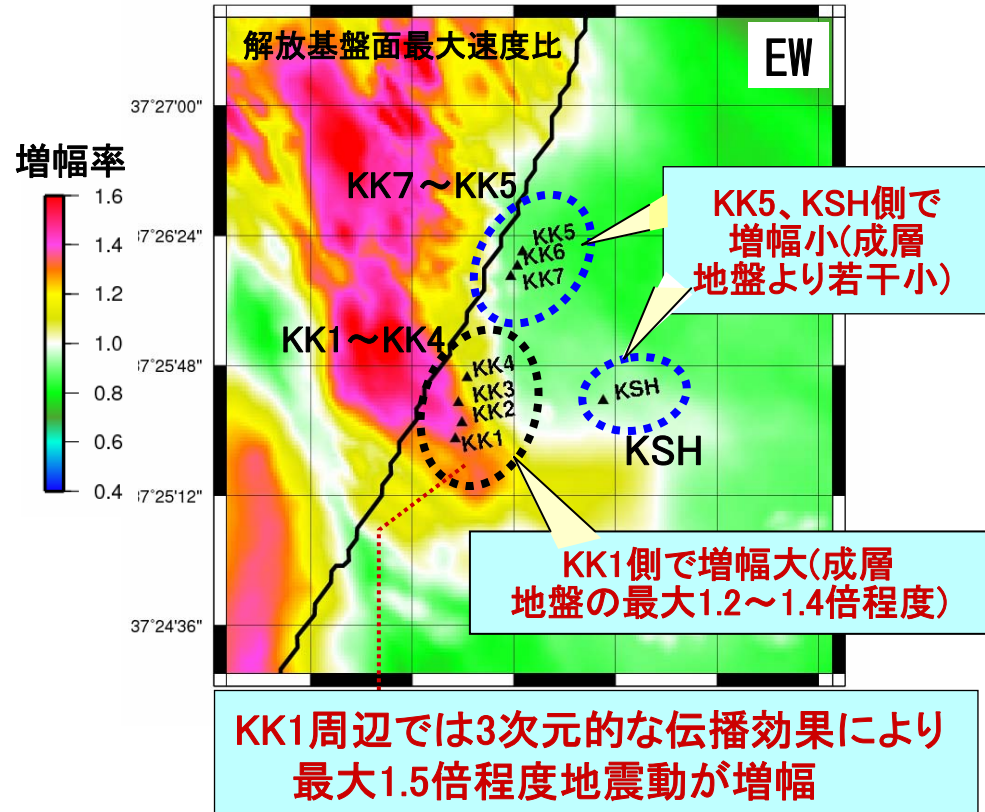
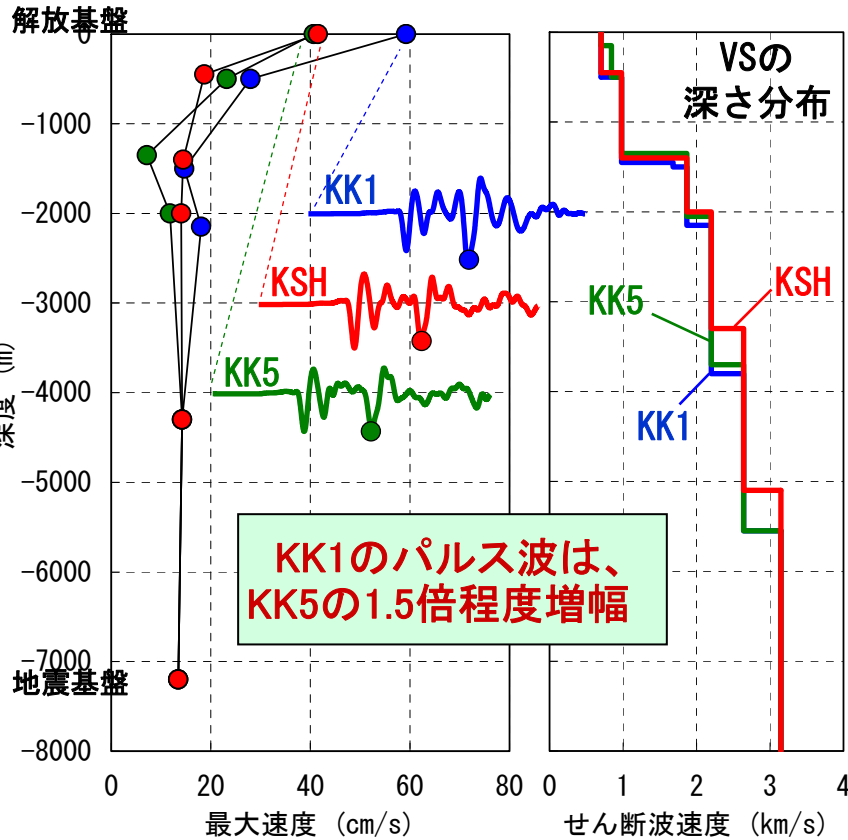
KK1=KK5, KSHの1.2~1.4倍程度

① 地震動(パルス波)の成長・伝播過程は、各号機共に同様である。

■号機間の地震動(パルス波)の増幅特性の違いの分析(2/2)

● KK1・KK5・KSHでの地震動の増幅特性の比較

● 3次元地盤での最大速度と成層地盤での最大速度の比

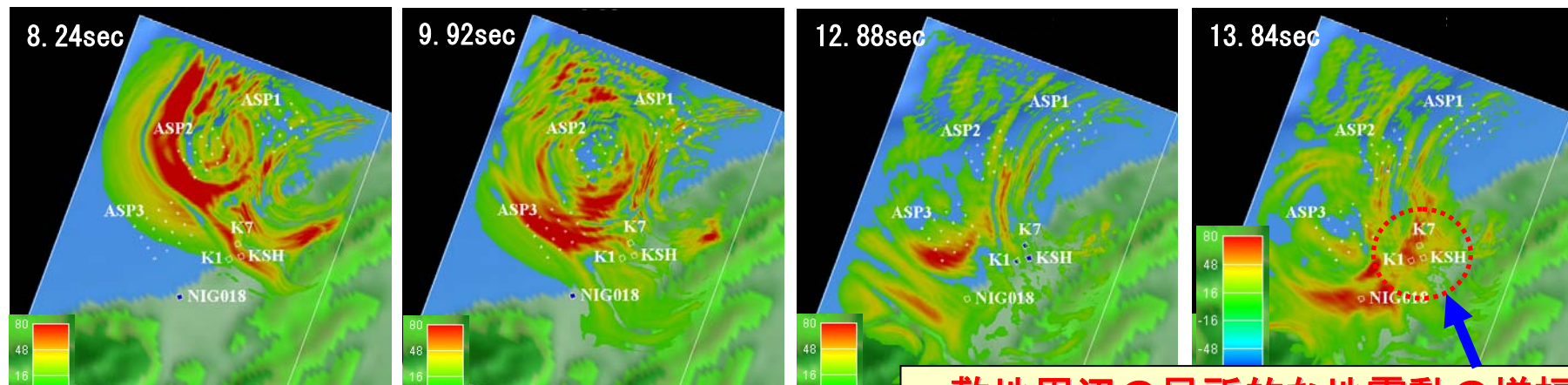


- ① 深部地盤での増幅(地震基盤～解放基盤)は、1号機と5号機間で約1.5倍異なる。
この違いは、地盤の不整形構造、地盤物性値(せん断波速度等)、アスペリティ3からの距離が想定。
- ② 地盤の不整形構造の影響を見るために、深部地盤が成層構造であると仮定し、成層地盤との増幅の比を求めたところ、5号機側の増幅比が小さく、比較的成層構造に近いと推定。
- ③ 1号機と5号機での増幅の違いは、両号機の深部地盤不整形性の程度の違いによると推定される。

断層破壊による地震動の伝播性状のスナップショット

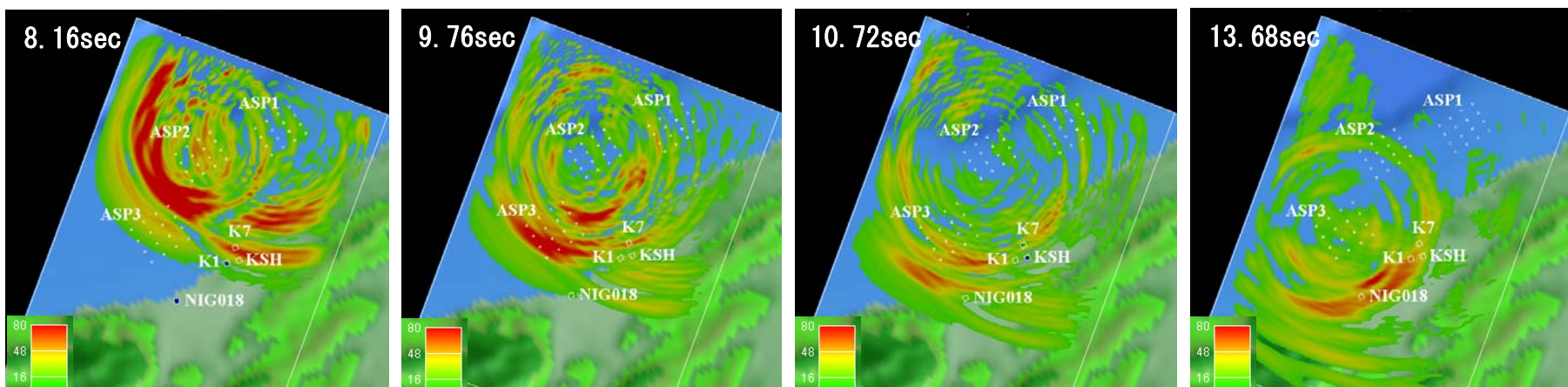
⇒ 解放基盤面の地震動の伝播性状(成層地盤との比較)

● 3次元地下構造モデル・速度波(NS・EW合成)



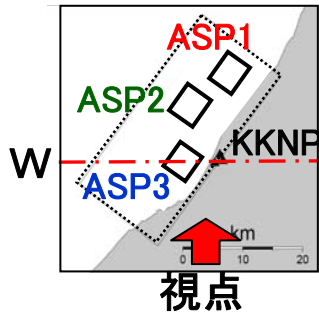
敷地周辺の局所的な地震動の増幅

● 1号機地盤による成層地盤モデル・速度波(NS・EW合成)

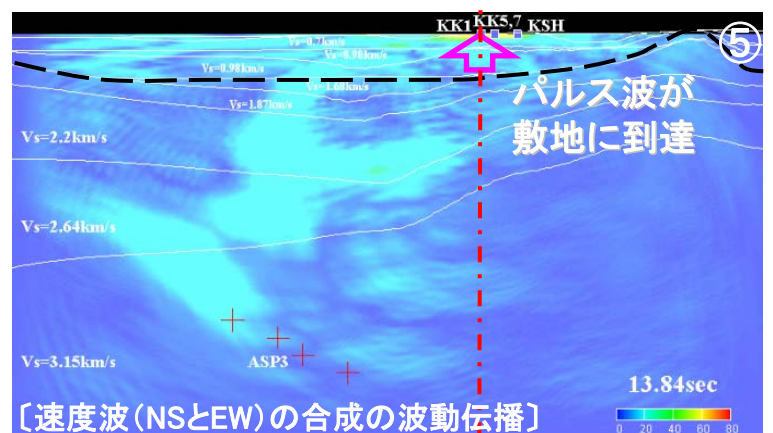
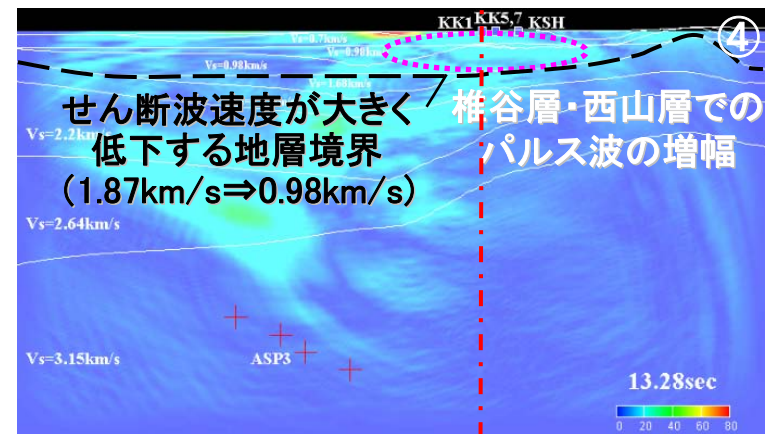
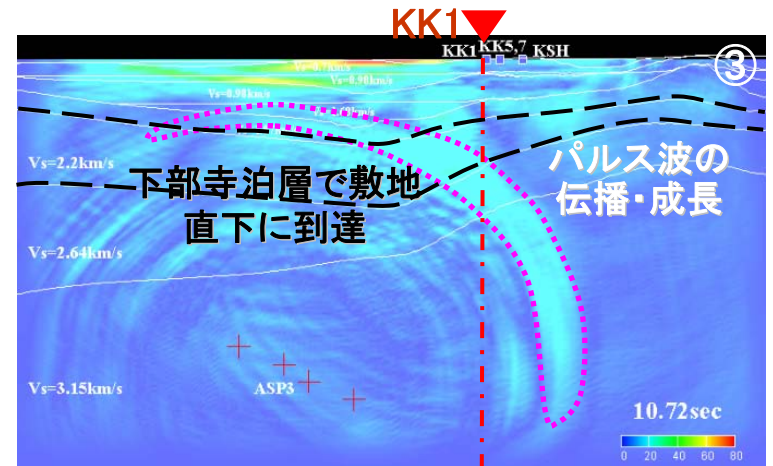
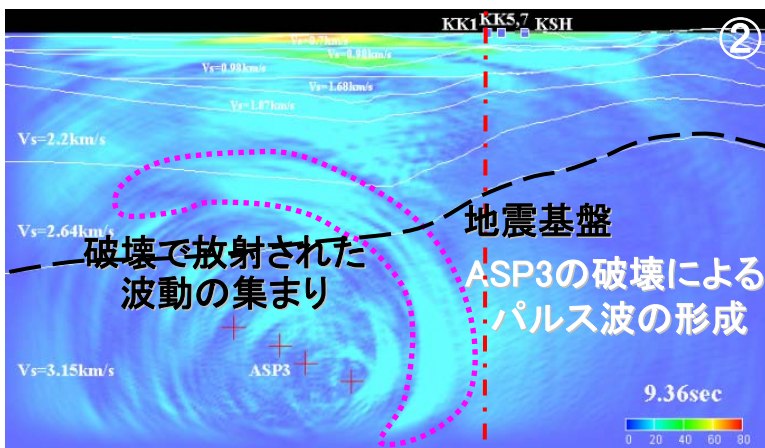
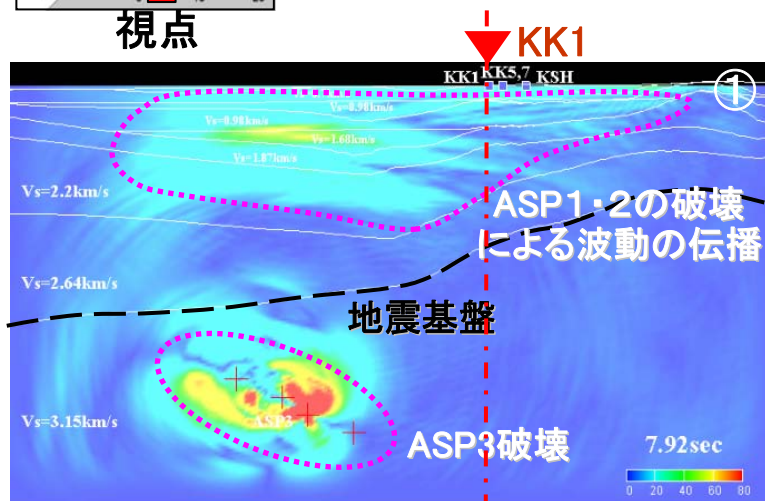


パルス波の増幅特性の検討

⇒ 震源からの地震動伝播性状のスナップショット



ASP3~KK1断面の
速度波の伝播



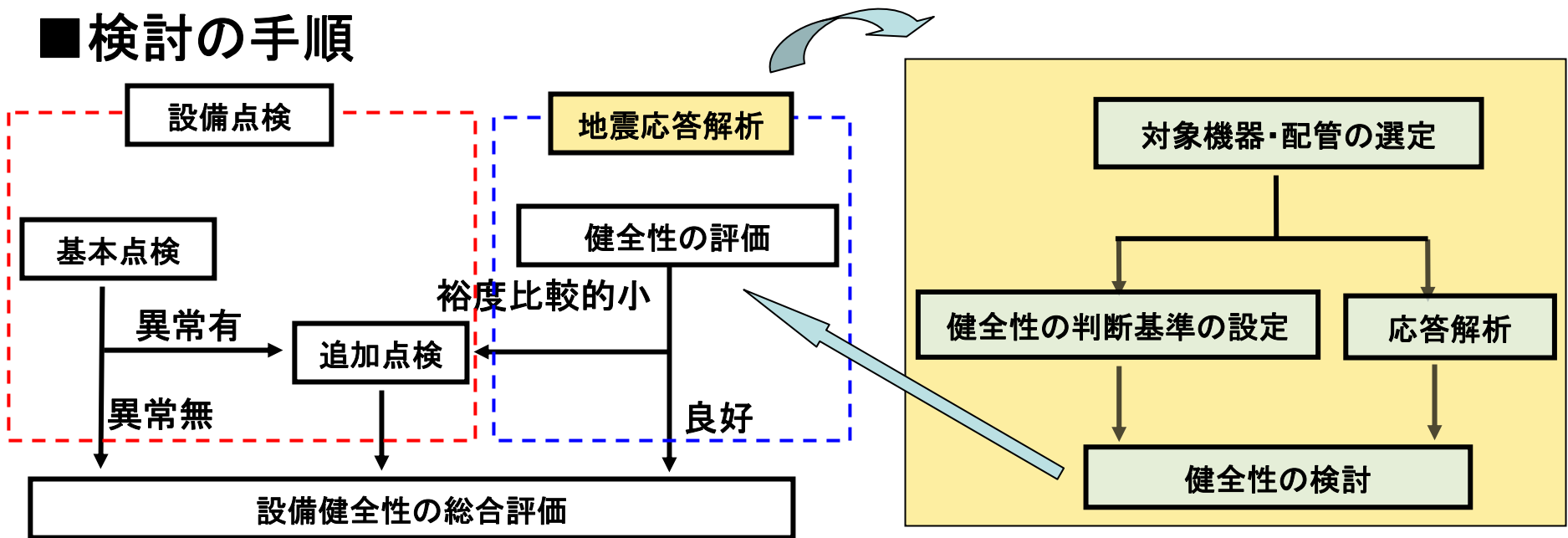
Ⅲ. 7号機の設備健全性の検討

Ⅲ-1 検討の目的・手順

■ 検討の目的

- ・ 機器・配管の健全性検討のため、検討対象範囲・部位の設定
- ・ 中越沖地震の特徴を踏まえた応答解析手法，健全性判断基準の設定
- ・ 今回の中越沖地震に対する機器・配管の健全性について概略評価

■ 検討の手順



Ⅲ-2 対象機器・配管の選定

対象機器・配管の選定基準

耐震安全上重要な機器・配管 (As, Aクラス機器・配管)

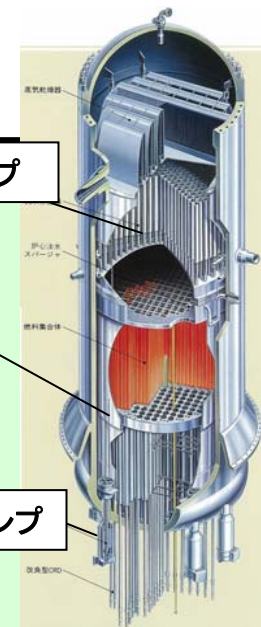
検討対象機器・配管

● 機器 (77機器、99部位)

- ・ 原子炉圧力容器、原子炉格納容器
- ・ 炉内構造物
(シュラウド、スタンドパイプ、インターナルポンプ 等)
- ・ ポンプ、熱交換器、タンク
- ・ 燃料取替機、天井クレーン
- ・ 他

● 配管 (13系統)

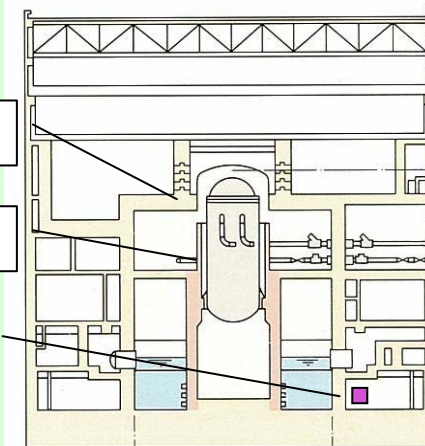
- ・ 主蒸気系配管、残留熱除去系配管 他



インターナルポンプ

シュラウド

スタンドパイプ



原子炉格納容器

原子炉圧力容器

ポンプ 等

図は株式会社 東芝のパフレットから抜粋して作成した

「冷やす」「止める」「閉じ込める」ための機器・配管を網羅した健全性の検討

Ⅲ-3 健全性の判断基準の設定

■ 判断方法・判断基準の考え方

- ・判断方法： 中越沖地震に対する機器・配管の応答と下記判断基準とを比較
- ・判断基準： ポンプ等のような**動的機能維持**に係わるものと、
タンク・配管等のような**構造強度**に係わるものに大別する。

■ 判断基準

● 動的機能維持に係わる機器

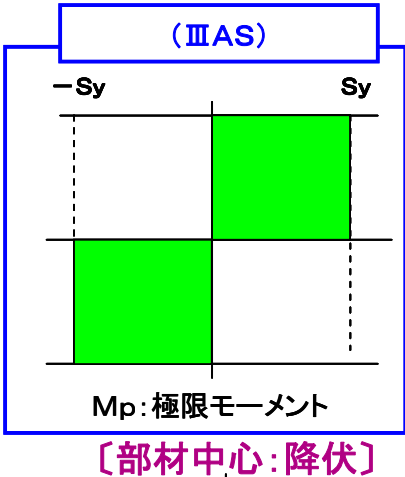
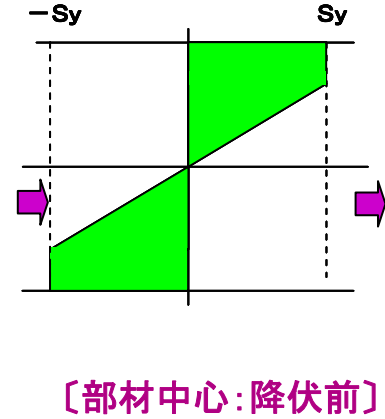
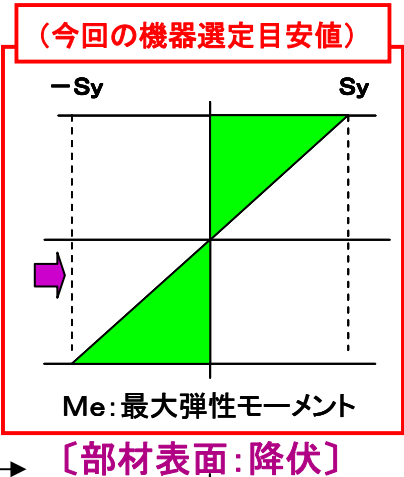
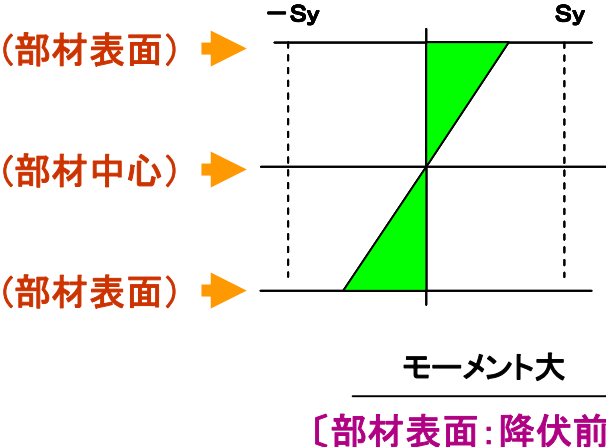
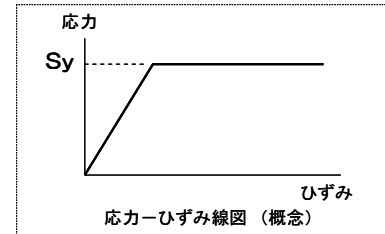
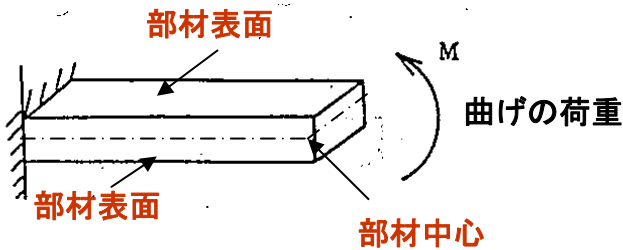
- ・日本電気協会 原子力発電所耐震設計技術基準 (JEAG4601-1991 追補版)

● 構造強度に係わる機器・配管

- ・次の2つの基準を設定
 - ・許容応力状態ⅢASによる許容応力を基本とするが、
 - ・一層の安全確保の観点から、保守的な目安値も設定 (次ページ参照)
- ・判断部位：設計時応力の許容値に対する裕度が小さい複数の部位を検討し、最も小さい部位とする

構造強度に係わる判断基準の詳細

- ・許容応力状態ⅢASでの許容応力は、降伏応力(S_y)の1.5倍の場合もある。
- ・当該機器・配管の応答が、許容応力($1.5S_y$)に近い場合(裕度が小さい場合)、一層の安全性確保の観点から、応答が降伏応力(S_y)に達したか否かの判断も重要である。
- ・そこで、**降伏応力(S_y)を追加点検対象機器の選定目安値とする。**



矩形断面の場合: $M_p = 1.5M_e$

Ⅲ-4 応答解析

■ 解析条件

- ・解析手法等は、原則として、現行の耐震設計手法(JEAG等)に準じる。
- ・設備に加わる地震荷重の算定にあたっては、JNESが必要と判断する、**下記多方向成分**を考慮する。
- ・設備への入力地震動については、JNESで検討中であるが、今回の検討では事業者の床応答スペクトルを用いる。

地震荷重の多方向成分の考慮

- ・地震動の入力は、3次元入力とする。
- ・建屋に設置の地震計がNS, EW両水平方向の地震動を記録している。
- ・**水平方向の地震荷重算定では、NS, EW両方向の地震荷重の影響を勘案する。**

(方法1)

$$\text{水平地震荷重} = \left(\sqrt{\text{NS方向の最大水平地震荷重}^2 + \text{EW方向の最大水平地震荷重}^2} \right)$$

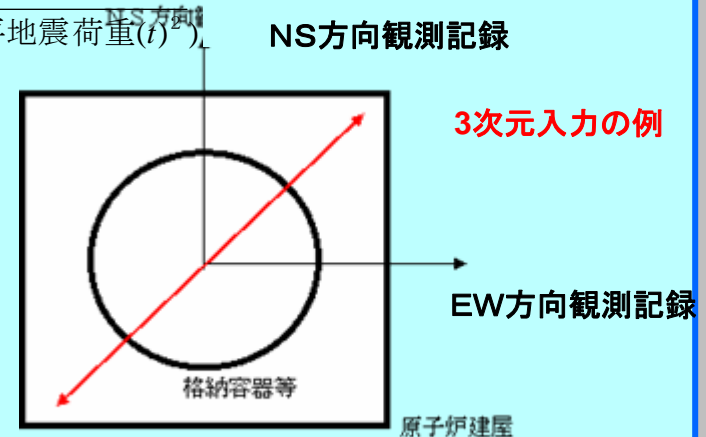
(方法2)

$$\text{水平地震荷重} = \max(\sqrt{\text{NS方向の水平地震荷重}(t)^2 + \text{EW方向の水平地震荷重}(t)^2})$$

t: 地震の継続時間

(方法3)

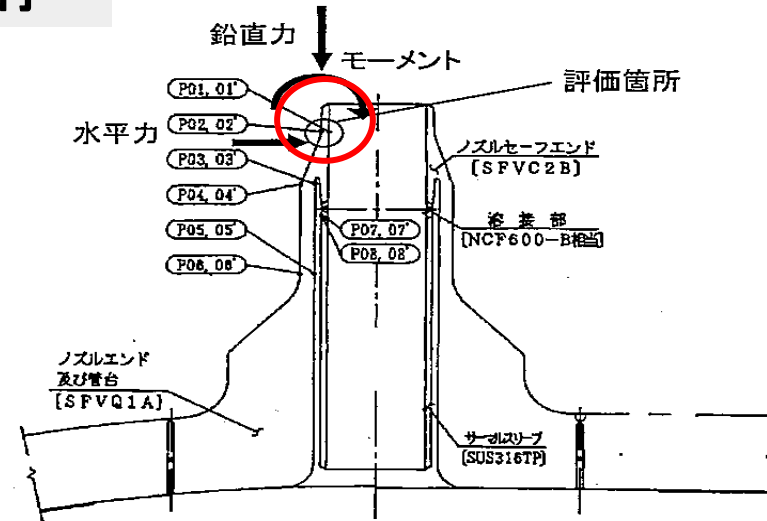
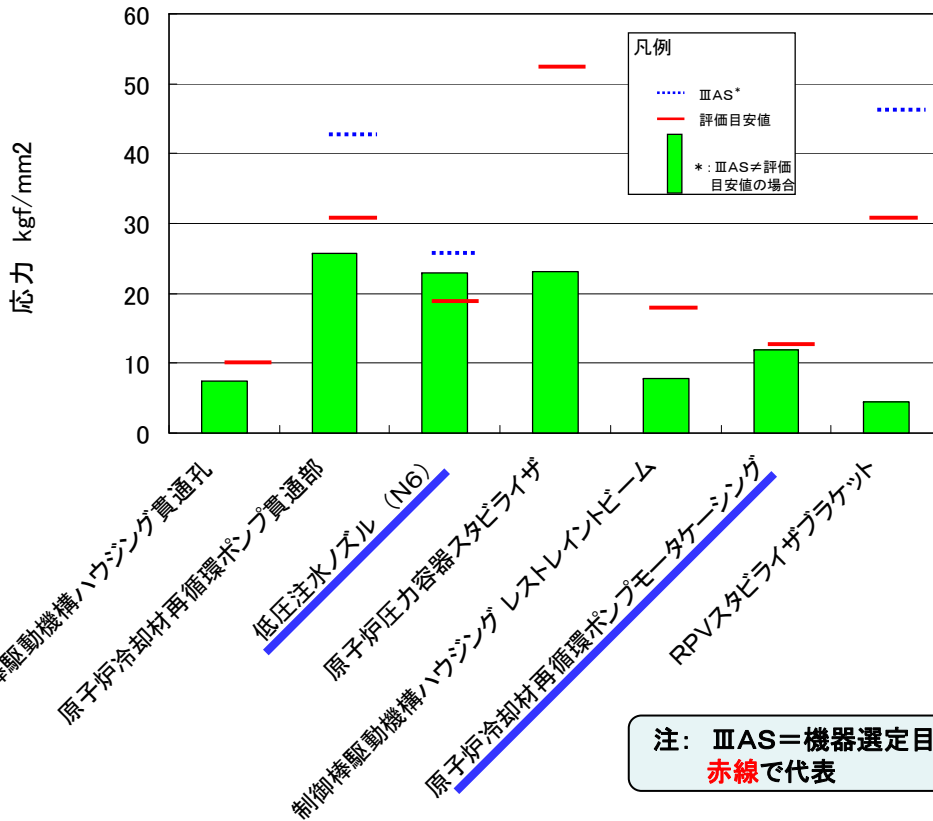
多方向入力を考慮した詳細解析
(応答スペクトル法または時刻歴解析法)



原子炉建屋平面概念図

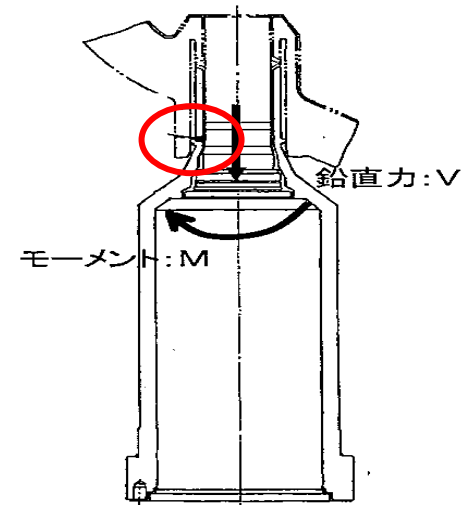
Ⅲ-5 健全性の検討

■ 原子炉圧力容器関連機器 (1/4)



低圧注水ノズル評価点

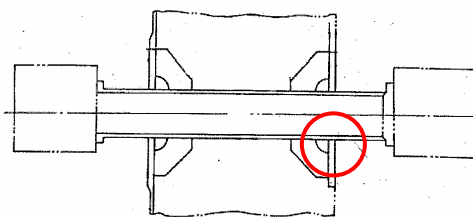
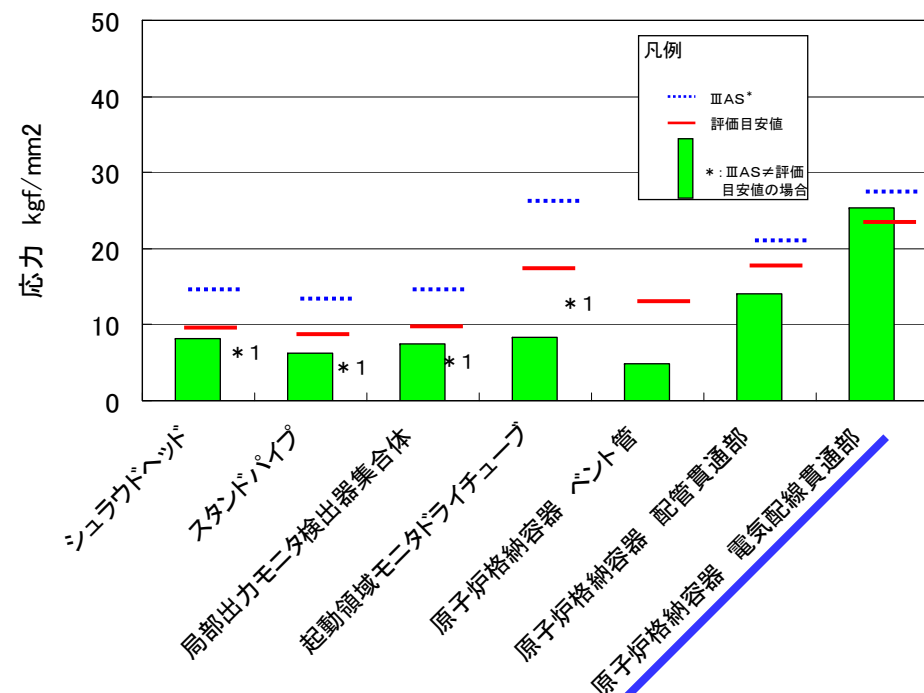
○: 評価点



原子炉再循環ポンプモータケーシング評価点

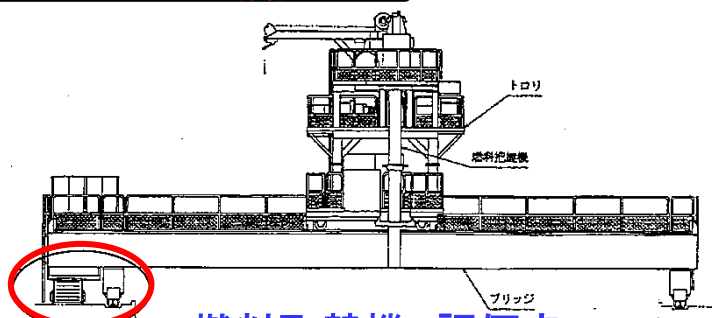
- ① 原子炉圧力容器ノズルの応答値は、許容応力状態ⅢASの許容応力を満足するものの、選定目安値以上の値となった。
- ② 原子炉再循環ポンプモータケーシングは、選定目安値 (=ⅢAS) に近い応答値となった。

■ 炉内構造物・原子炉格納容器関連機器及びその他の機器 (2/4)

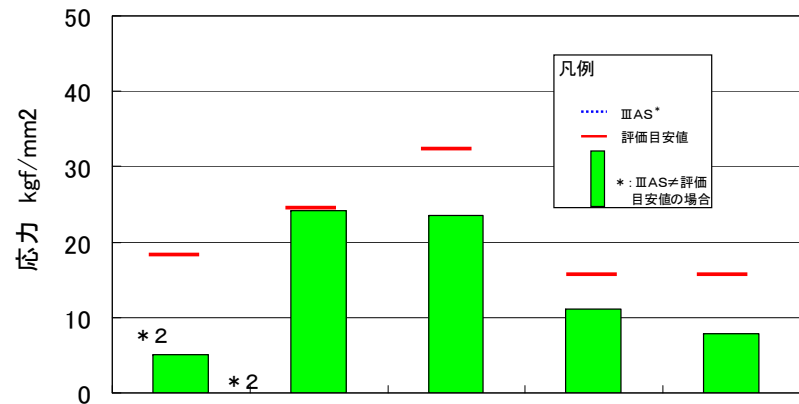


原子炉格納容器電線管貫通部 評価点

注: IIIAS=機器選定目安値の場合、赤線で代表



燃料取替機 評価点

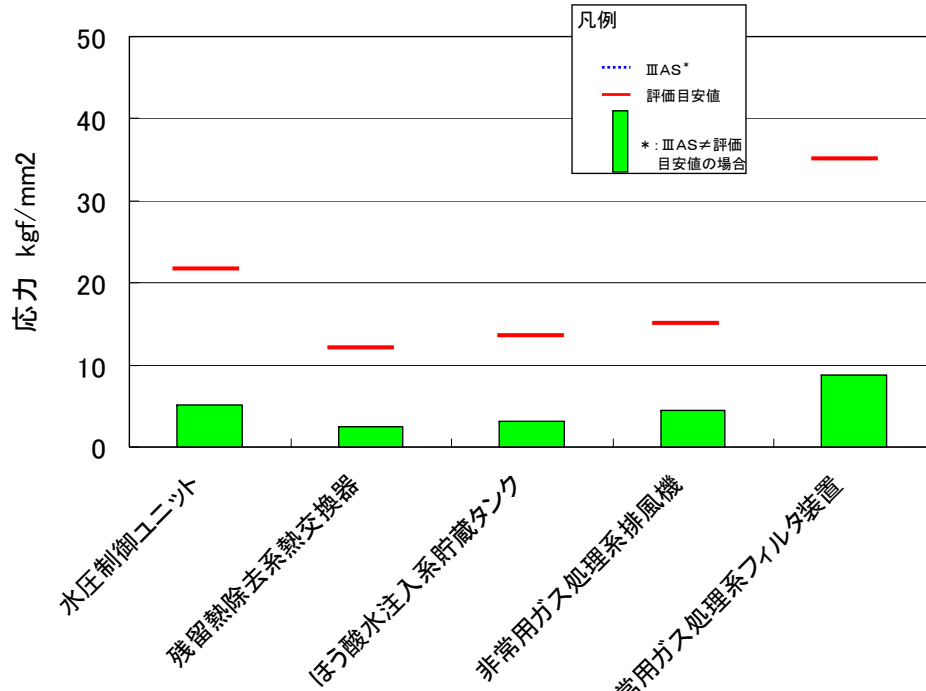


注: IIIAS=機器選定目安値の場合、赤線で代表

- ① 格納容器 電線管貫通部は、IIIASを満足するものの、選定目安値以上の値となった。
- ② 燃料取替機は、機器選定目安値に近い値となった。

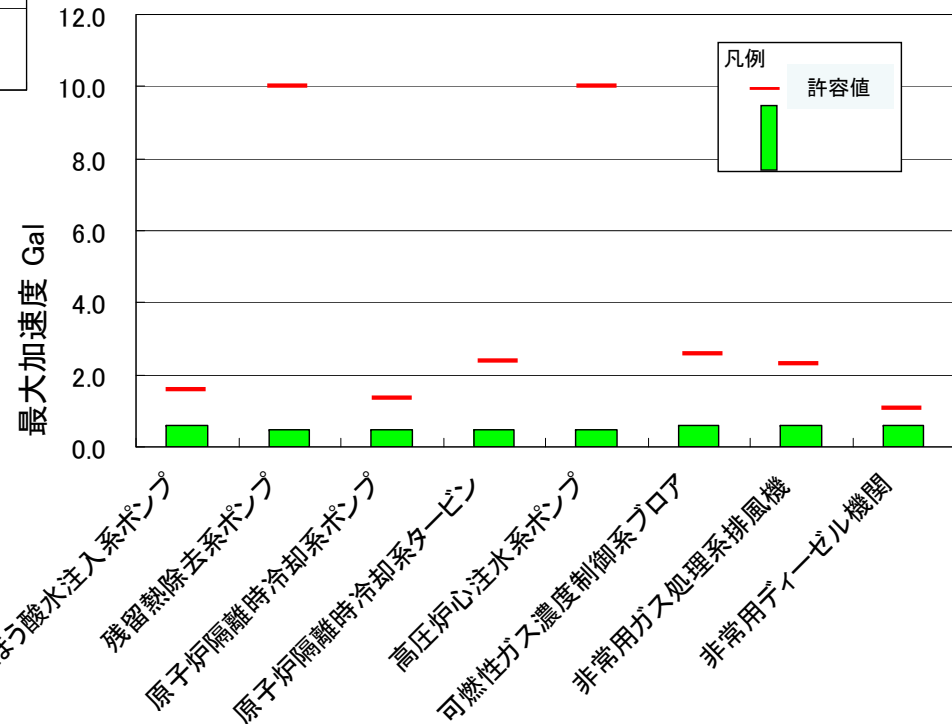
■タンク・熱交換器等・ポンプ等 (3/4)

●タンク・熱交換器等構造強度に係わる機器



注: IIIAS=機器選定目安値の場合、赤線で代表

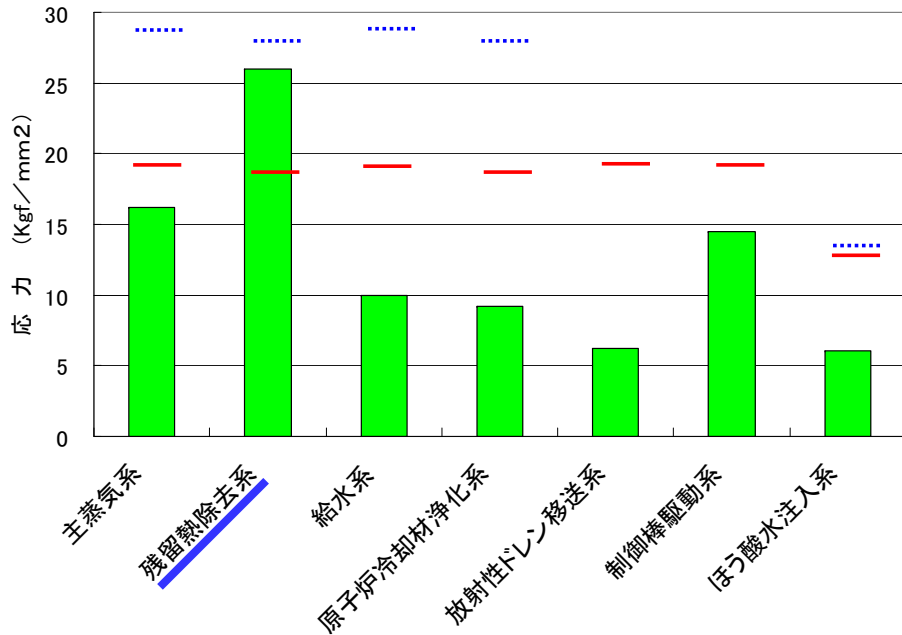
●ポンプ等動的機能維持に係わる機器



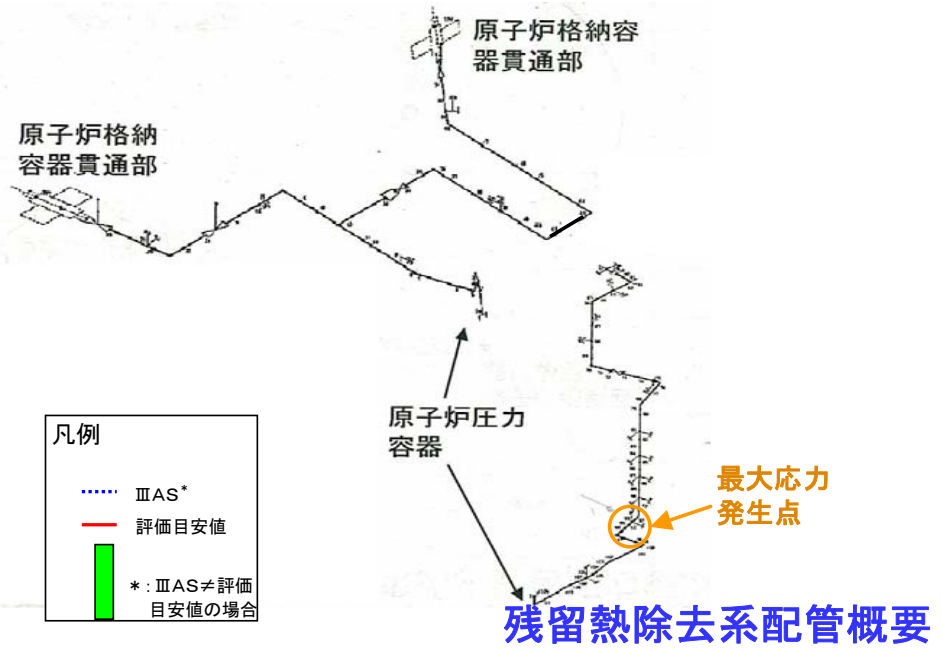
タンク・熱交換器等構造強度
許容応力状態IIIASの許容応力及び選
定目安値とも満足した。

ポンプ等動的機能維持
JEAG4601-1991追補版に定まる許容
値を満足した。

配管 (4/4)



注: IIIAS=機器選定目安値の場合、赤線で代表



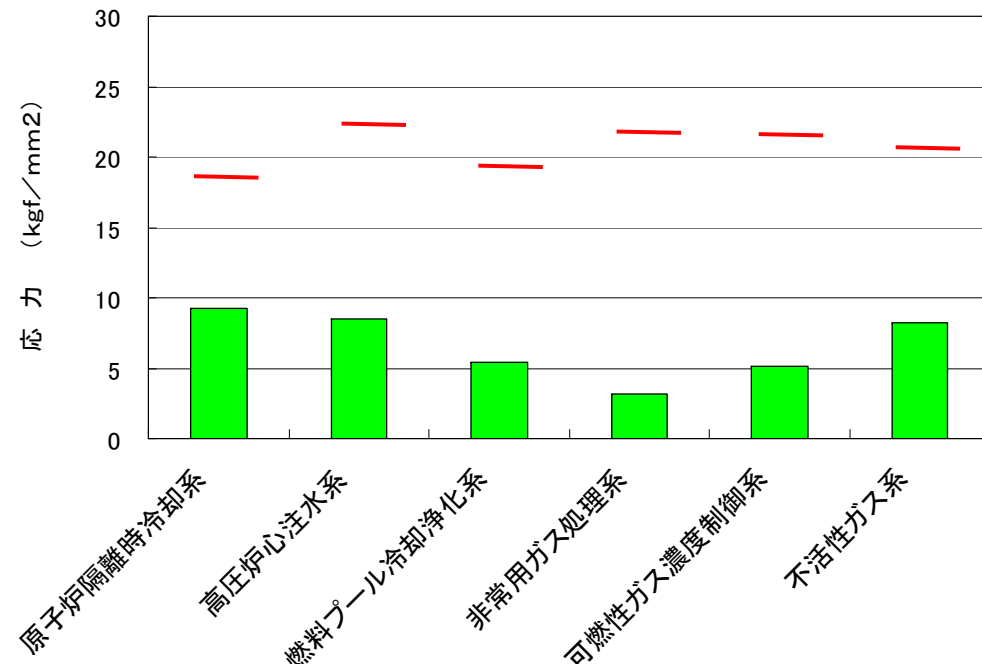
凡例
 IIIAS*
 — 評価目安値
 ■ 実測値
 *: IIIAS≠評価目安値の場合

残留熱除去系配管

許容応力状態IIIASの許容応力を満足するものの、選定目安値以上となった。

残留熱除去系配管以外の配管

許容応力状態IIIASの許容応力及び選定目安値とも満足した。



注: IIIAS=機器選定目安値の場合、赤線で代表

IV. 得られた知見の整理

IV-1 地震・地震動の分析

■ 震源特性の影響

- ① 震源断層モデルから推定される短周期レベルは、同規模の地震の平均的な値と比べ、1.5倍程度大きかったものと推定される。
- ② 3つのアスペリティが破壊し、敷地で強い地震動が発生した。
特に、アスペリティ3は、敷地に極近く、発電所に強い地震動を放射したと推定される。

■ 深部地盤(地震基盤～解放基盤)の影響

● 各号機側の観測地震動が設計を大きく上回った理由(震源特性の影響も含む)

- ① 深部地盤の不整形部は、地震動のエネルギーを集中・滞留させると共に、地震動を敷地方向に向かわせる構造となっている。
- ② 解放基盤近傍の椎谷・西山層のせん断波速度の低下幅が大きく、インピーダンス比が大きくなるため、地震動が大きく増幅したと推定される。
- ③ 地震基盤～解放基盤間で3～4倍増幅し、特に、椎谷・西山層での増幅が大きい。

● 1号機側と5号機側で観測地震動が異なる理由(震源特性の影響も含む)

- ① 深部地盤(地震基盤～解放基盤)での増幅は、1号機と5号機間で約1.5倍異なる。
この違いは、地盤不整形構造、地盤物性値(せん断波速度等)、アスペリティ3からの距離が想定。
- ② 地盤の不整形構造の影響を見るために、深部地盤が成層構造であると仮定し、成層地盤との増幅の比を求めたところ、1号機側は約1.5倍であり、①の値とほぼ一致した。
 - ・5号機側での増幅比は1に近く、比較的成層構造に近いと推定される。
 - ・1号機と5号機での増幅の違いは、両号機の深部地盤不整形性の程度の違いによると推定される。

IV-2 設備健全性の検討

- (1) 検討対象機器は、許容応力状態ⅢASによる許容応力を満足した。
- (2) 機器選定目安値(選定目安値 \leq ⅢAS)に対しては下記の結果となった。
 - ① 検討対象機器の内、下記機器の応答値は選定目安値以上の値となった。
 - ・ (原子炉圧力容器の)低圧注水ノズル(N6)
 - ・ (原子炉格納容器の)電気配線貫通部
 - ・ 残留熱除去系配管
 - ② 検討対象機器の内、下記の応答値は選定目安値(=ⅢAS)に近い値となった。
 - ・ 原子炉再循環ポンプモータケーシング
 - ・ 燃料取替機