

# 建物・構築物の免震構造と 設計用地震動に対する意見

建物・構築物の免震構造に関する検討チーム  
(第2回会合)  
原子力規制委員会  
2020年6月18日(木)

久田嘉章  
(工学院大学建築学部)

# 概要

- **対象とする建物・構築物、耐震と免震のメリットとデメリット**
- **規制委員会からの要望**
  1. 免震設計用の基準地震動の設定の考え方について、国交省の技術的助言における基整促波の包絡（振幅、継続時間）に対する意見
  2. 基準地震動について、現行のSs策定プロセスに加え、免震設計用として新たに検討すべき事項があるか  
（建物・構築物の種類・用途・特性なども）
  3. 免震設計用の鉛直方向地震動の設定方法、地震動の3方向成分の同時性を考慮した設計を適用することに対する意見
  4. 地震後の免震装置の機能維持確認の方法、ヘルスマモニタリングの様なリアルタイムでの管理方法の発電所施設への適用性に対する意見

# 本WGで対象とする建物・構築物について

## 第1回会合付録【資料②-g】原子力発電所にある建屋の特徴について

建屋名称	原子炉建屋	緊急時対策所	SA 設備等の設置された建屋※
設置される主な設備	原子炉圧力容器 原子炉格納容器 原子炉冷却系の配管、ポンプ 等	通信連絡設備 換気空調設備 空気ポンプ 等	SA 設備（ポンプ、電源等） 等
内包する放射性物質の量	大	無	無
外部の施設・設備と接続する渡り配管、電源ケーブル等	高エネルギー配管（主蒸気管等） 低エネルギー配管（使用済燃料プール水補給系配管等） 電源ケーブル 等	電源ケーブル 等	低エネルギー配管 電源ケーブル 等 （SA 発生時に接続し、通常時は外部接続なしの場合もある）
建屋に要求される機能	①外部への放射線の遮蔽 ②放射性物質拡散防止のための気密性（換気空調設備による負圧維持と相まって確保） ③設備の間接支持	①外部からの放射線の遮蔽 ②放射性物質流入防止のための気密性（換気空調設備等による正圧維持と相まって確保） ③設備の間接支持	①波及的影響の防止 ②設備の間接支持
耐震構造の場合に建屋の部位に要求される性能（基準地震動 Ss に対する評価における許容限界）	RC 耐震壁： ①層せん断ひずみ 2000 $\mu$ ②ほぼ弾性範囲 基礎版： ③終局耐力に妥当な安全余裕	RC 耐震壁： ①層せん断ひずみ 2000 $\mu$ ②ほぼ弾性範囲 基礎版： ③終局耐力に妥当な安全余裕	RC 壁： ①終局耐力 基礎版： ②終局耐力に妥当な安全余裕

代替不可能(免震は慎重に)

代替可能/代替が望ましい(耐震・免震による多重化等)

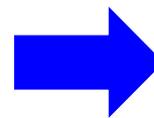
(要確認:本WGの主な対象の建物・構築物)

# 2011年東北地方太平洋沖地震時の福島第一原子力発電所における事務本館(耐震建築)と免震重要棟

- 2007年新潟県中越沖地震の発生時に、柏崎刈羽原子力発電所の緊急時対策室のある事務本館の建物内への入室が困難になったことなどをふまえ、災害発生時に対策活動の拠点となる**緊急時対策室や通信・電源などの重要設備を集合させた「免震重要棟」**を建設し、柏崎刈羽原子力発電所では2010年1月より、福島第一原子力発電所・福島第二原子力発電所では2010年7月より運用を開始しています(資料:東京電力, 原子力発電所の安全対策, 2010)



緊急時  
対策室・  
重要設備  
を移転  
(2010/7)



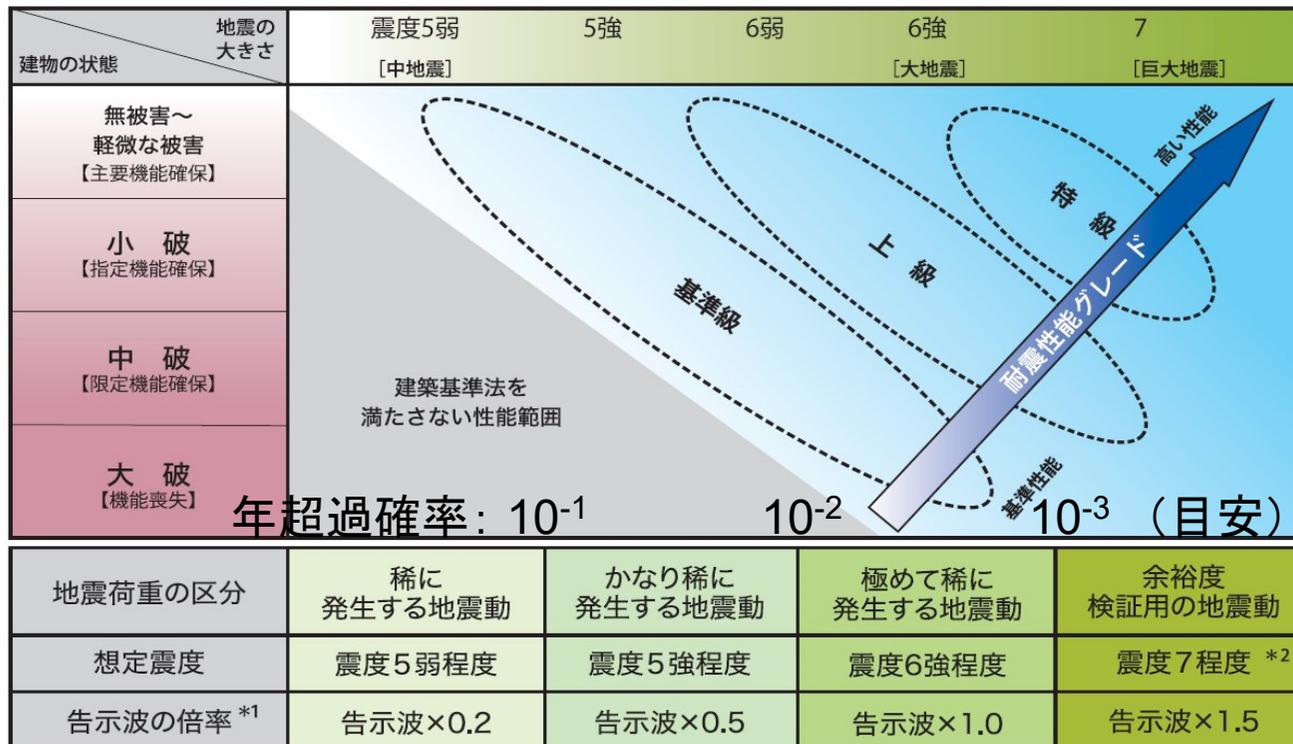
地震後の事務本館(耐震建築)の被害状況  
⇒建築構造はほぼ無被害だが、機能継続不能

免震重要棟における災害対応(2011.4.1)  
⇒被害はほぼ無く、機能継続可能

# 日本建築構造技術者協会による 耐震・免震と耐震性能の考え方(JSCA、2018)



地震の大きさと建物の状態の関係(概念図)



\* 1) 告示波とは、平12建告第1461号の極めて稀に発生する地震動の加速度応答スペクトルに適合した模擬地震波とし、建設地の表層地盤による増幅を考慮します。 \* 2) 震度7程度の地震動は、1995年兵庫県南部地震程度を想定しています。

# 免震と耐震：メリットとデメリット

## 耐震構造

- ・大地震での十分な実績あり
- ・大地震でも構造躯体の被害はほぼ抑えられる
- ・大加速度が発生
- ・非構造・設備機器
- ・OA機器などの被害低減は困難
- ・機能継続性の確保は容易でない

⇒長周期地震動に有利

## 免震構造

- ・大地震も実績あり
- ・想定内の地震動では、構造・非構造・設備・機器などの被害はほぼ抑えられ、機能継続可能
- ・想定外の地震動には脆弱性があり、フェールセーフ機能、施設の多重化などの対策が必要

⇒短周期地震動に有利

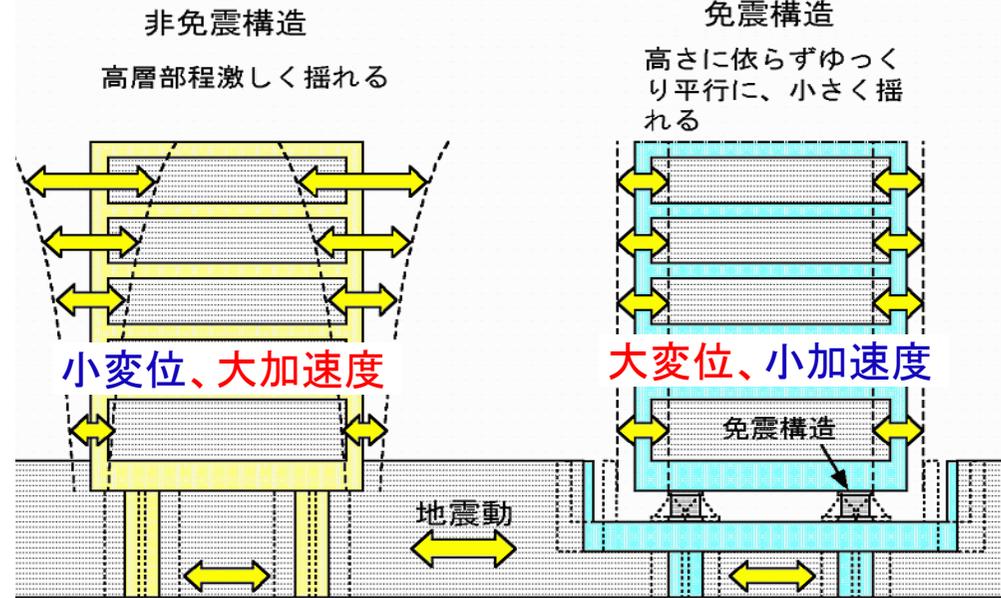
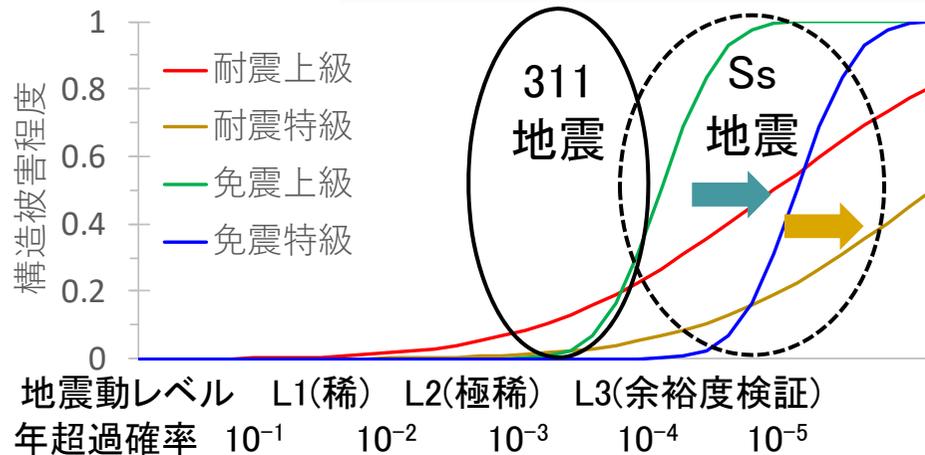
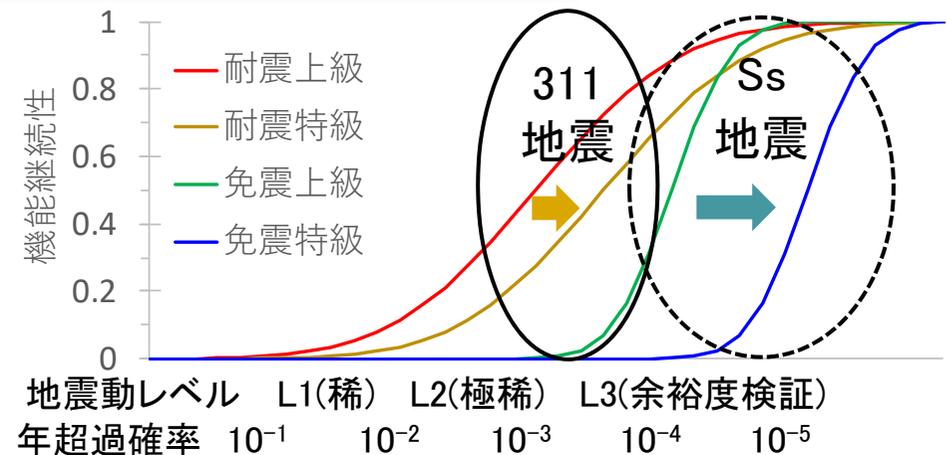


図5 非免震・免震構造の応答挙動の概念

[資料提供] 日本原子力研究所(現 日本原子力研究開発機構)



耐震と免震の構造被害程度の概念

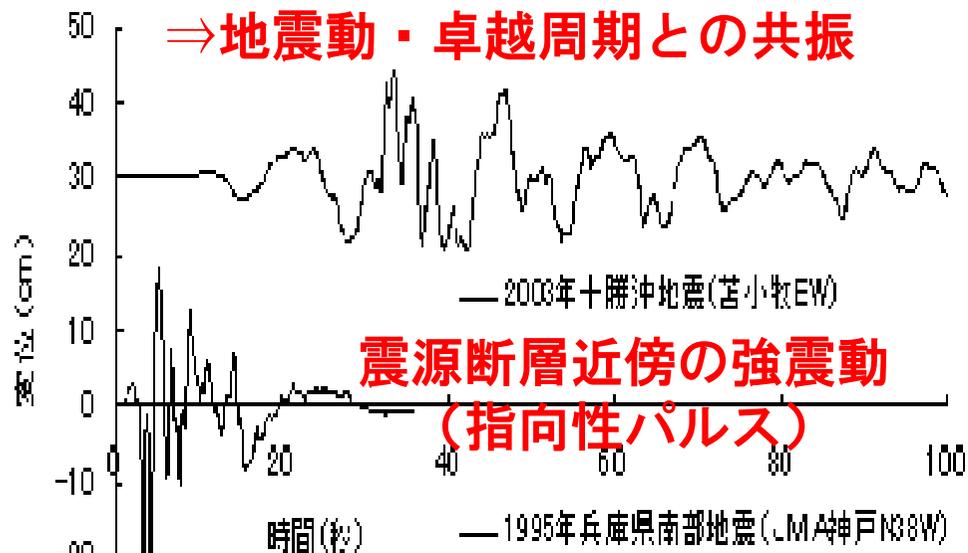


耐震と免震の機能継続性能の概念

# 活断層や海溝型巨大地震による特徴的な長周期地震動 免震において特別な配慮が必要となる地震動・地盤変状

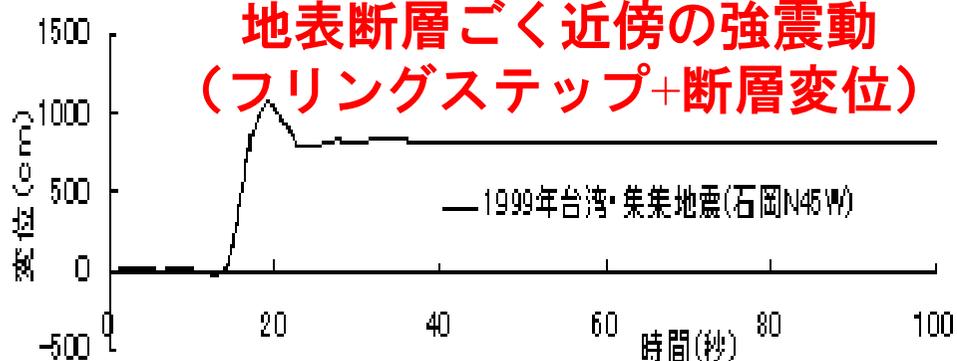
長周期・長時間地震動（堆積層表面波）

⇒地震動・卓越周期との共振



震源断層近傍の強震動  
(指向性パルス)

地表断層ごく近傍の強震動  
(フリグステップ+断層変位)



⇒敷地調査と「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」により想定可能



2003年十勝沖地震  
の苫小牧市にお  
けるナフサタン  
クの全面火災  
→卓越周期・長い  
継続時間



1995年兵庫県南部  
地震における神  
戸市の木造家屋  
の倒壊  
→震度7、なぎ倒す

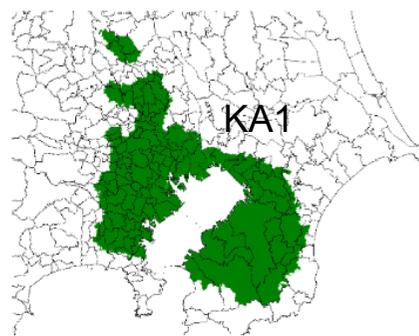


1999年台湾・集集  
地震による地表  
断層上のRC建物  
の傾斜  
→長周期パルス  
断層変位

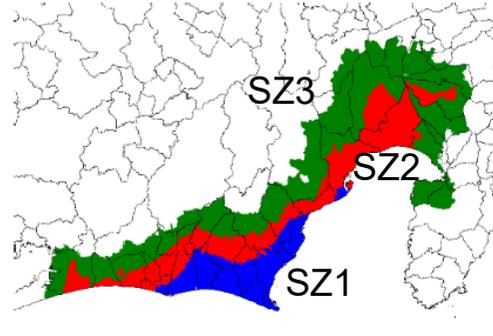
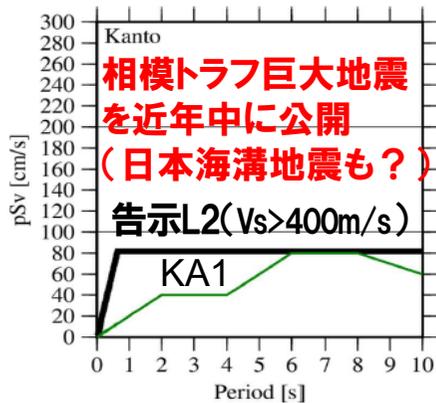
# 超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策について(技術的助言:国土交通省、2016/6/24)

(国交省通知:技術的助言における基整促波 ⇒ 告示ではない)

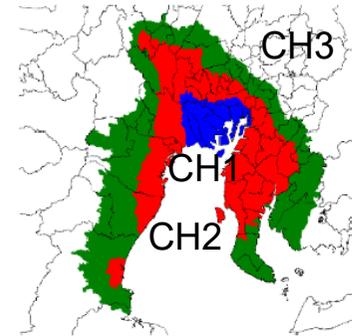
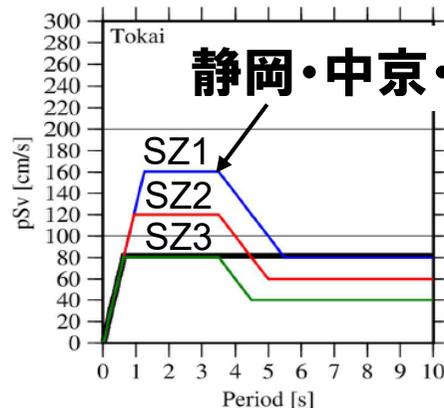
- ・対象地震:1854年安政東海(M8.4)と1707年宝永地震(M8.6)
- ・対象地域:静岡・中京・大阪・関東の各地域
- ・手法:距離減衰式(経験式)
- ・対象建物:平成29年4月1日以降、大臣認定による新築の超高層建築・免震建築など
- ・主な対策:耐震設計、家具の転倒・移動防止、長時間繰返し累積変形の影響(500秒以上)



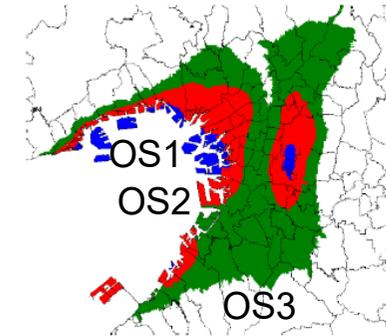
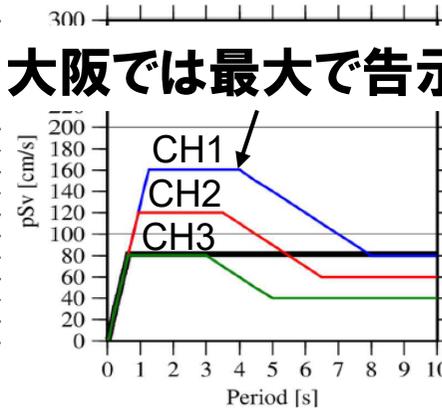
関東地域



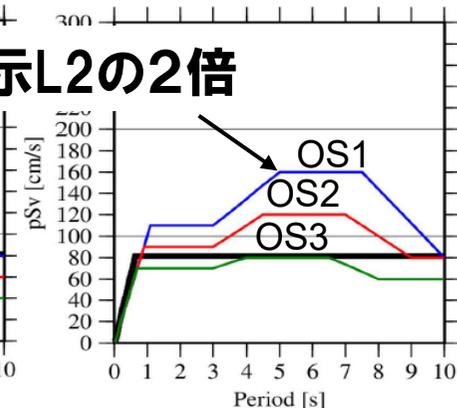
静岡地域



中京地域



大阪地域

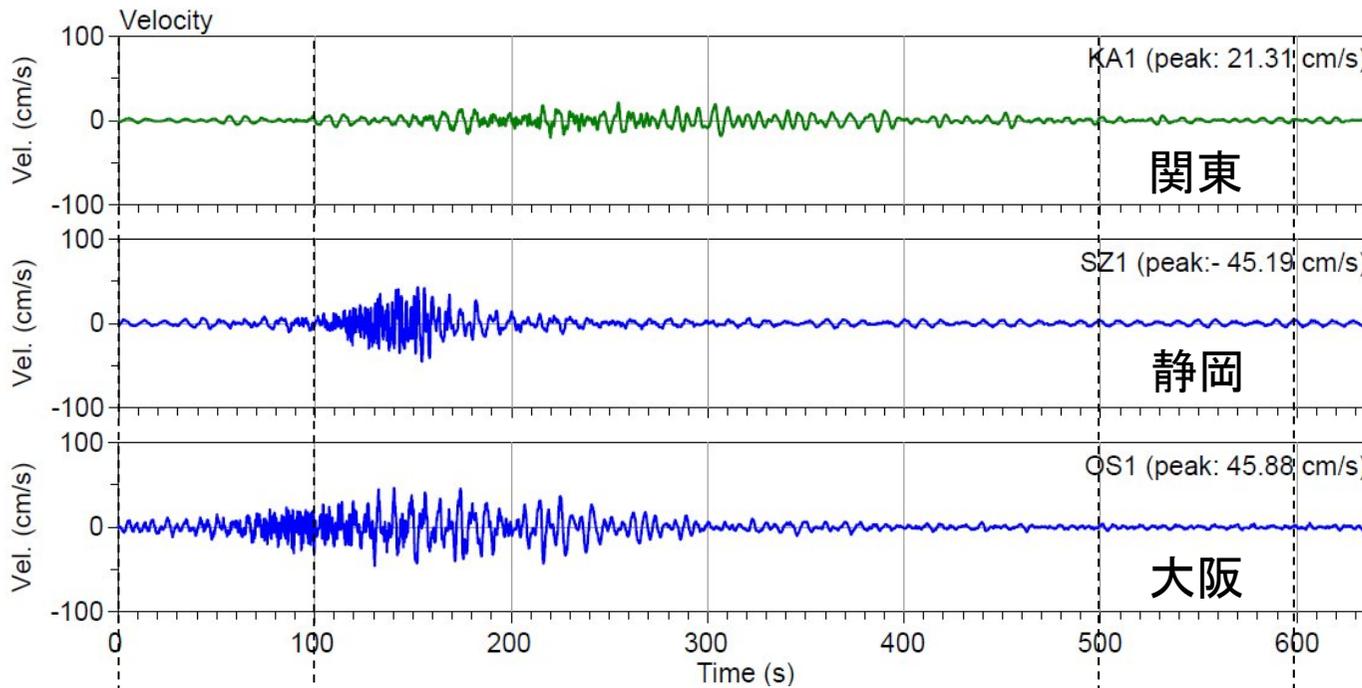


想定南海トラフ巨大地震に対する3大都市圏(堆積盆地)の超高層建築等が主要な対象 8  
本来は個別のサイト波策定が望ましいが、一般設計者には困難であるため、簡易法を提示

# 超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策における 設計用長周期地震動の作成方法について (建築研究所・参考資料、2019/11/20更新)

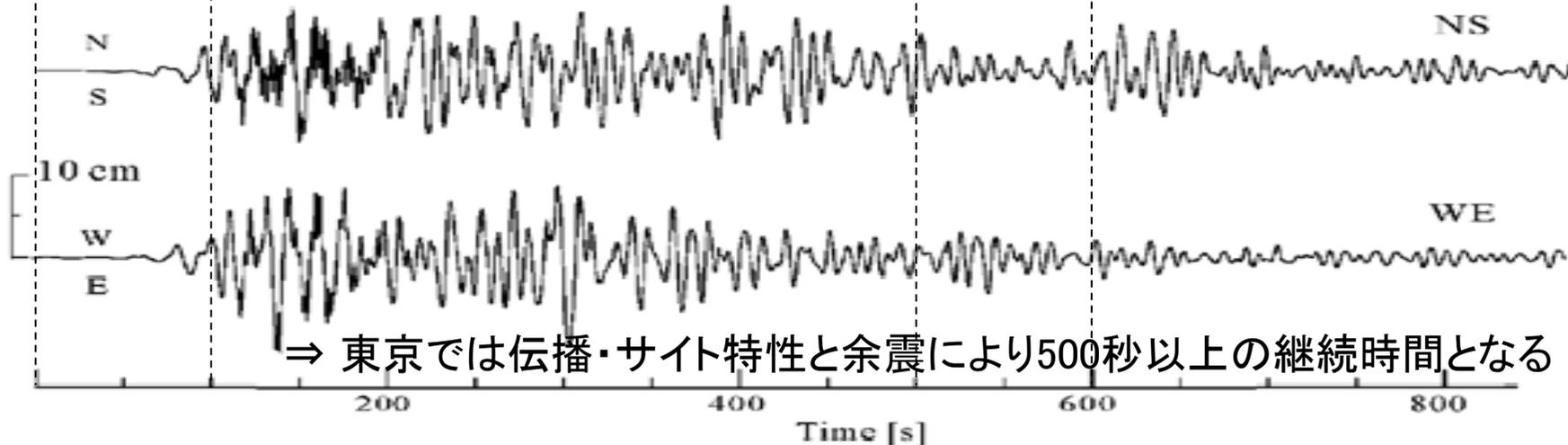
- (1) 基整促波(次のいずれかの方法により策定した波形⇒指定された距離減衰式)
- ① 長周期通知別紙に示す10区域ごとに示した加速度波形及び速度波形
  - ② 長周期通知別紙に示す10区域ごとに示した擬似速度応答スペクトルをもとに、基整促波の方法により、適切に位相を設定して算定した加速度波形及び速度波形
  - ③ 各地点の観測データをもとに、基整促波の方法により、二乗和平方根法(SRSS法)により算出した 擬似速度応答スペクトルを1.1で除して平均的な擬似速度応答スペクトルを求めたうえで、適切に位相を設定して算定した加速度波形及び速度波形
- (2) 基整促波以外(原則として、次の①～④の全てに該当する波形)
- ① 当該方法が、一般社団法人日本建築学会の指針や政府の報告書等において認められたものであること
  - ② 当該方法の計算過程において、位相の選択等にあたり、恣意的な操作が行われていないこと
  - ③ 超高層建築物等の一次固有周期付近の擬似速度応答スペクトル及びエネルギースペクトルが、(1)①から③までのいずれかの基整促波と同等以上であること
  - ④ 0.1～10秒の周期成分を含み、継続時間が500秒以上の加速度波形及び速度波形であること(⇒関東・大阪平野等における長時間地震動を想定、余震への配慮も)
- ⇒ 対象は南海トラフ地震による3大都市圏・静岡地域のみ(距離減衰式は他地域でも有用)。対象地域内での「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」における「やや長周期が卓越する検討用地震動」は、上記「(2)基整促波以外」に対応する。一方、対象地域外ではサイト固有の「やや長周期が卓越する検討用地震動」で対応すべき。 9

# サイト別の基整促波と東京の長周期観測の記録例



## 基整促波の例 (速度波形)

関東平野や大阪盆地など軟弱で厚い堆積層があるサイトの長周期地震動は非常に長い継続時間となるが、静岡の主要動は100(～200)秒程度



⇒ 東京では伝播・サイト特性と余震により500秒以上の継続時間となる

# 南海トラフ巨大地震の長期評価の場合

## 「固有地震」から防災上の**最大級地震を含む**

## 「多様性ある地震」の評価へ→地震ハザード評価値の増大



**東日本大震災以前**  
海溝型巨大地震は固有地震説により予測しやすい地震と思われた

**東日本大震災以後**  
全くの想定外だった超巨大地震(M9地震)を受け、防災目的より最大級地震も考慮

# 南海トラフ巨大地震と超高層建築等の長周期地震動対策 (2015年内閣府の報告と2016年国交省の対策)

## ○内閣府における「南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告」(2015年12月17日)

(最大級地震も考慮、防災・減災対策を推進:リスク配慮)

⇒現状では不明な点は多いが、現在の知見で最大級の南海トラフ巨大地震の長周期地震動を推定し、防災・減災対策を推進:耐震設計は対象外、地震動は上限値に近い

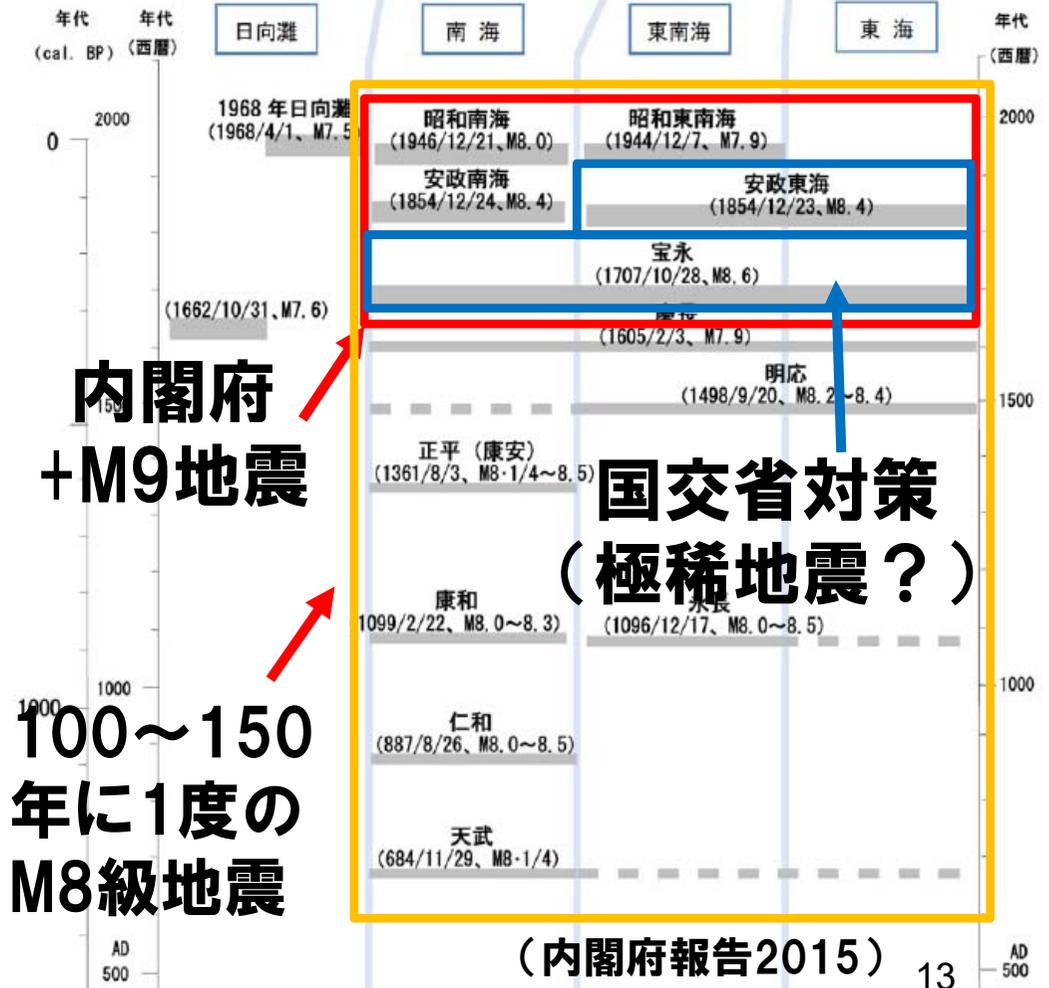
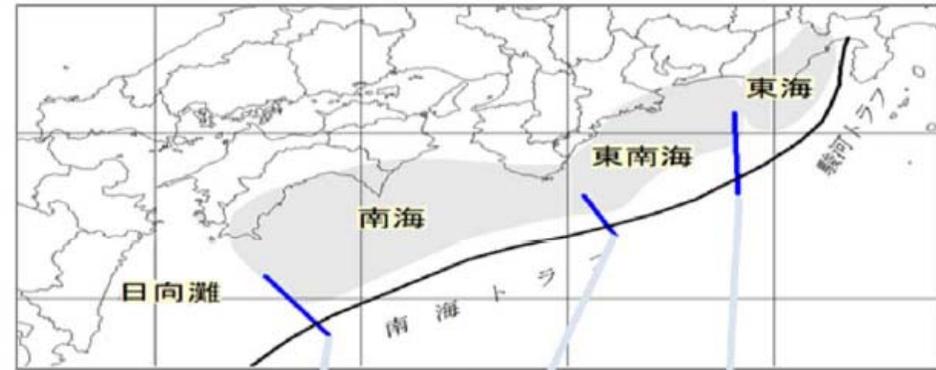
## ○国土交通省「超高層建築物における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策」(2016年6月24日)

(リスク・リターン両面から総合判断し、最低基準を設定)

⇒内閣府報告の最大級地震動(1707年宝永地震、1854年安政東海地震)から設計用地震動を設定(最低基準)

# 南海トラフの歴史地震と対策用の地震

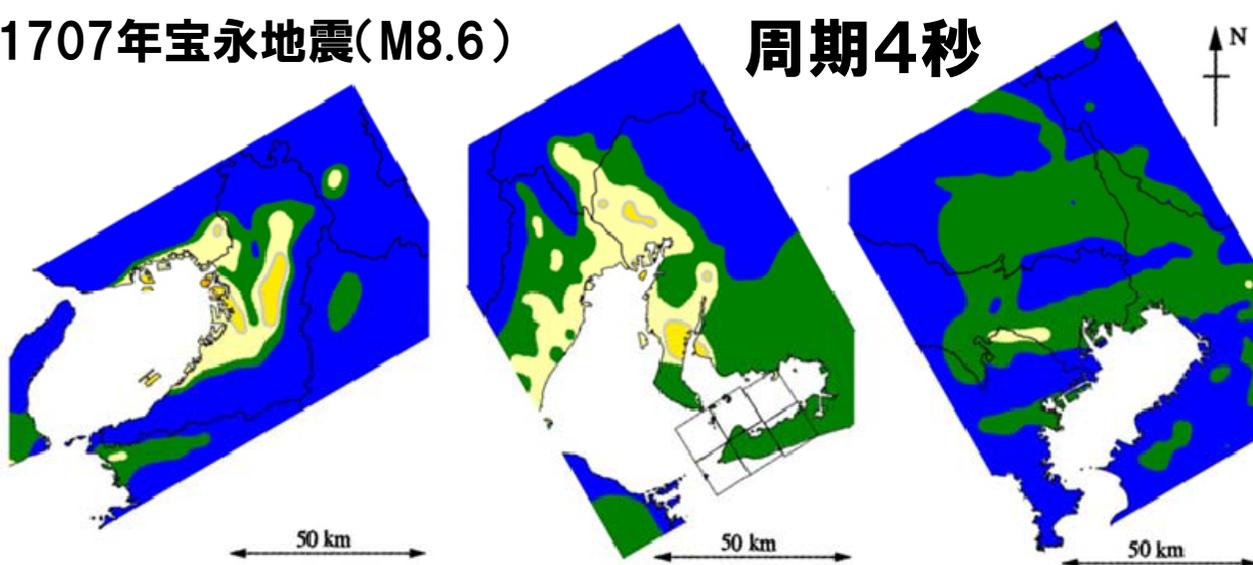
- 南海地震が最も活動的
- 東海地震は単独では起きず、東南海地震と連動
- 1854年安政東海地震は東海・東南海連動の超巨大地震 (M8.4)。歴史上明確には1度しか知られていない
- 1498年明応地震の震源域は諸説あり(銭州断層?)
- 東海・東南海・南海地震が全て同時発生した1707年宝永地震 (M8.6) も歴史上明確には1度しか知られていない
- 1605年慶長地震は津波地震



# 内閣府(2015):歴史地震による長周期地震動 (数値シミュレーションによるpSVの推定値)

1707年宝永地震(M8.6)

周期4秒



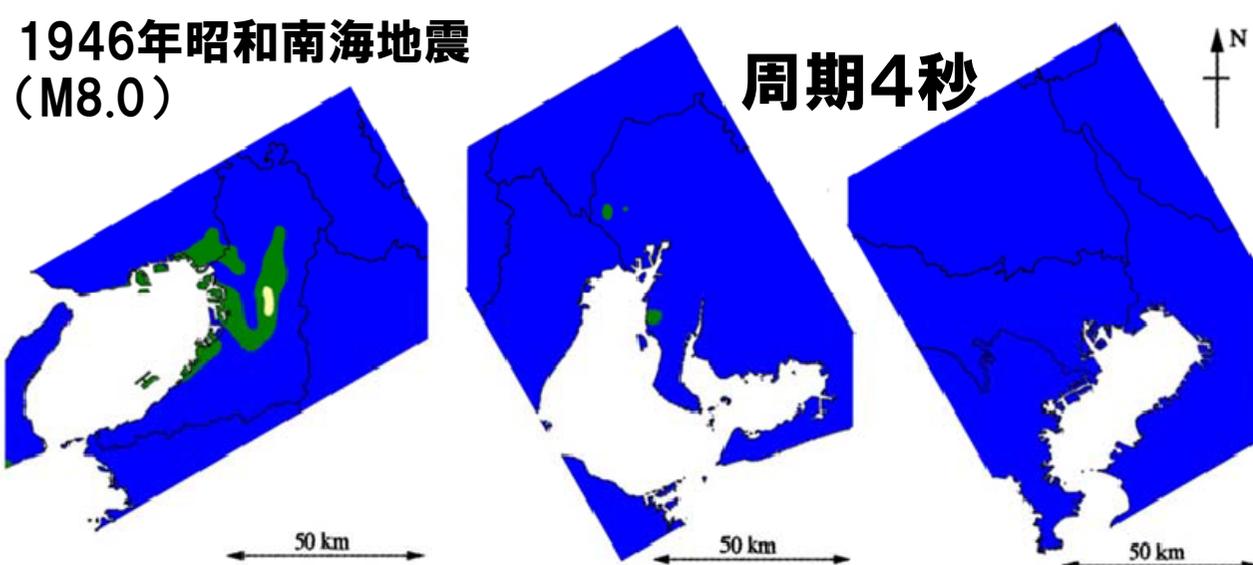
南海トラフでの  
歴史上最大地震  
(千年に1度)

pSv (cm/s)

建築基準法(告示)  
→ 安全限界レベル  
(L2地震動)  
→ 損傷限界レベル  
(L1地震動)

1946年昭和南海地震  
(M8.0)

周期4秒



南海トラフでの  
M8級地震  
(百年に1度)

pSv (cm/s)

建築基準法(告示)  
→ 安全限界レベル  
(L2地震動)  
→ 損傷限界レベル  
(L1地震動)

# 基整促波で設計した免震建築の応答計算例

## (中澤・久田ほか、2016年日本建築学会大会)

### 仮想9階建てRC造建物の免震建築

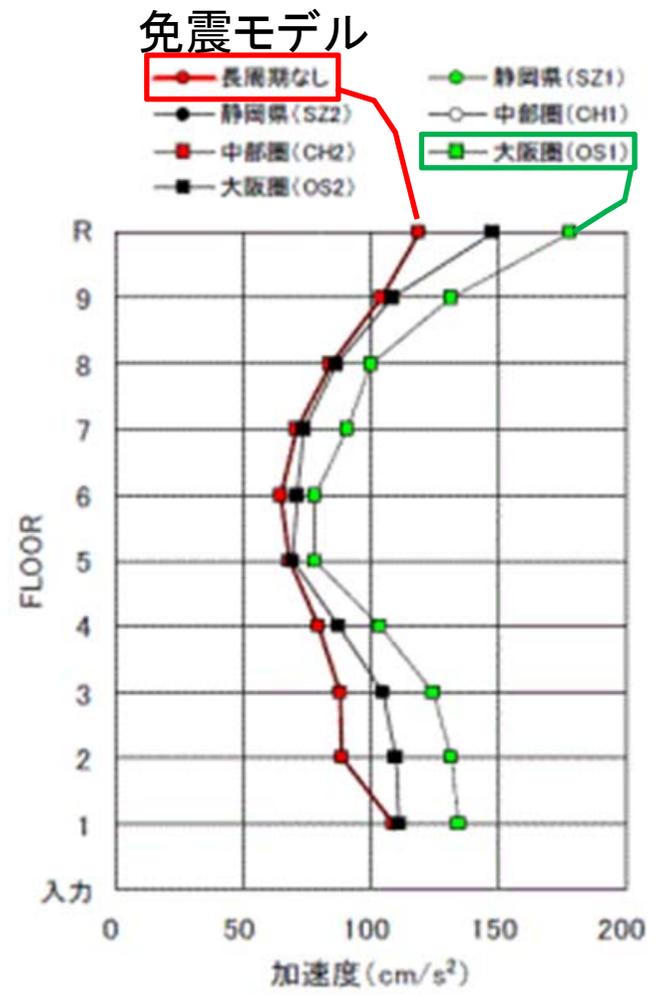
- ・通常の告示L1・L2地震動(長周期なし)と、基整促波(SZ1・2、CH1・2、OS1・2)をL2地震として、下表クライテリアを満足する免震モデルを構築
  - ・LRB+弾性すべり支承で等価固有周期は4.5-5秒
  - ・大きな地震動では減衰の付加等で最大変位抑制
- ⇒耐震性能目標は全て満足することは可能。

但し、L1告示波に対して、OS1対応モデルでは応答加速度が約1.5倍まで増加する(右図)

⇒可能性の極めて低い、大きな入力地震動で免震設計すると、可能性の高い地震動時に耐震性能を悪化させる可能性あり

表3 耐震性能目標

入力レベル	稀に発生する地震動	極めて稀に発生する地震動
上部構造(RC造)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・層間変形角 1/1000 以下</li> <li>・居住階の応答加速度 200cm/s<sup>2</sup> 以下</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・層間変形角 1/500 以下</li> <li>・居住階の応答加速度 200cm/s<sup>2</sup> 以下</li> </ul>
免震層	200mm 以内	600mm 以内



各免震モデルの告示L1地震波による最大加速度分布 15

# 基準地震動について、現行のSs策定プロセスに加え、 免震設計用として新たに検討すべき事項があるか (建物・構築物の種類・用途・特性なども)

## ○やや長周期地震動の策定(震源・伝播・サイト特性)

⇒「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」で対応可能

## ○一般建築の免震用入力地震動(年超過確率のオーダー)

告示L1(稀)地震動( $10^{-1}$ )、告示L2(極稀)地震( $10^{-2}$ )⇒建築基準法

L3(余裕度)地震動( $10^{-3}$ オーダー)⇒任意(告示L2の1.5~2倍程度)

## ○Ss地震動(現状では年超過確率 $10^{-4}$ ~ $10^{-5}$ 程度の結果が多い)

- ・過去のデータは無く、認識論的不確実性が大きい
- ・保守性への配慮で過度に大きな地震動を想定すると免震設計の自由度が失われ、発生頻度の高い地震時に免震の優位性が損なわれる。

## ○施設の用途や構造特性を考慮した安全対策の推進

- ・代替が不可能な施設(原子炉建屋)⇒免震は慎重に検討
- ・代替可能/望ましい施設(緊急時対策所、SA設備等建屋)⇒地震応答特性が異なる耐震と免震の多重化により、リスクは大きく低減。

# 免震設計用の鉛直方向地震動の設定方法、 地震動の3方向成分の同時性を考慮した設計を適用

## ・経験式による上下動(長周期地震動を考慮した距離減衰式)

例: 超高層建築物等へ長周期地震動の影響に関する検討—長周期地震動作成のための改良経験式の提案と南海トラフ3連動地震による超高層・免震建物の応答解析—、建築研究資料、第 144号、(独)建築研究所、平成25年8月

## ・「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」で3成分考慮

・理論的手法(活断層など震源近傍など)や数値解析手法(差分法、有限要素法など、遠地巨大地震など)による長周期地震動の数値シミュレーションによる下記諸特性への配慮可能

震源特性(水平・上下成分の放射特性、長周期パルスなど)

伝播特性(P・SV波、表面波など)

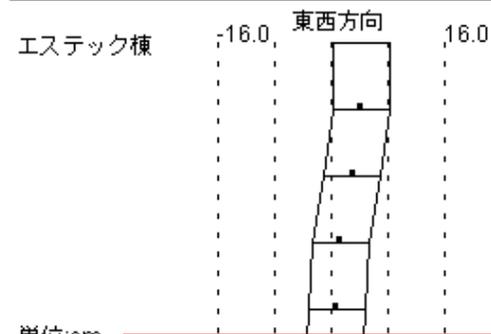
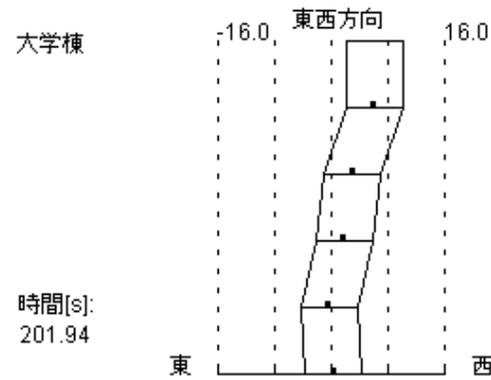
サイト特性(盆地端部効果、3次元地盤による焦点・増幅効果、地形効果など)

・500秒以上の長い継続時間は主に関東平野など堆積盆地での長周期地震動。震源が近い硬質地盤であれば、より短い継続時間になる。但し、連動地震や余震への配慮は必要(免震装置の経時劣化等)

# 工学院大学新宿校舎（28階S造）と被災度判定システム

## ●東日本大震災による建物の即時被災度判定システム結果

2011/03/11 14:46:00 建物振動状況



単位:cm

色	簡易震度	層間変形角	説明
赤	6弱以上	1/100以上	被害が出ている可能性があります
黄	5弱～5強	1/200～1/100	軽微な被害が出ている可能性があります
青	0～4	1/200以下	大きな被害は出ていないと思われます

2011/03/11 14:46:00 簡易震度と層間変形



簡易震度:  
最大加速度と最大速度から計算

層間変形角:  
センサー設置階の変位とセンサー間の階高から算出

簡易震度と層間変形の説明

色	簡易震度	層間変形角	説明
赤	6強以上	1/50以上	被害が出ている可能性があります
黄	5弱～6弱	1/200～1/50	軽微な被害が出ている可能性があります
青	0～4	1/200以下	大きな被害は出ていないと思われます

# 2011年東日本大震災における 工学院大学の被害状況と対応(新宿:震度5弱)



28F (天井パネルの落下)



24F(本棚の転倒、間仕切り壁の大変形)



2F (災害対策本部の立上げ)



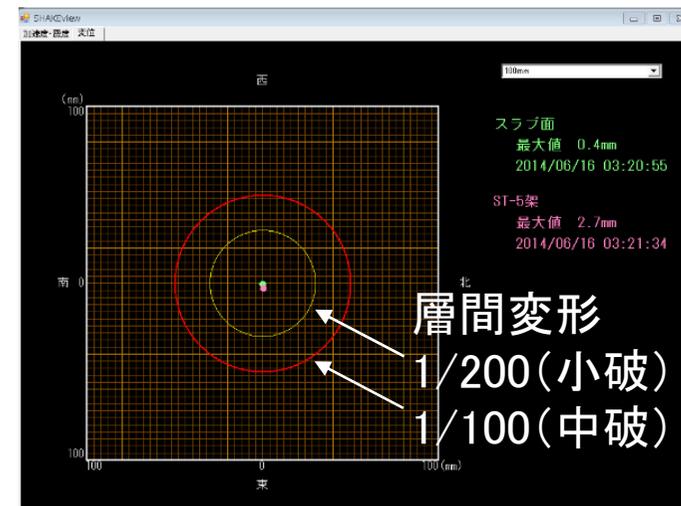
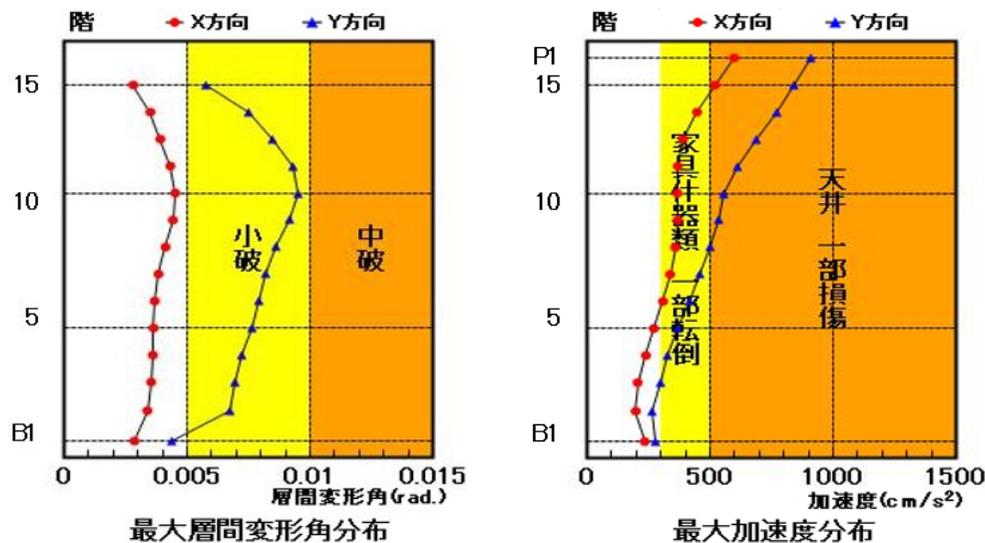
新宿駅周辺の混乱



帰宅困難者の受入(約700名)

# ヘルスマモニタリング等のリアルタイムでの 管理方法の発電所施設への適用性

- ・強震計(震度計)によるヘルスマモニタリング(被災度判定システムなど)の  
利活用 ⇒ 即時の構造被害・機能継続性の判定によるクライシスマネジ  
メントにおける速やかな初動対応が可能
- ・観測記録は構造・免震装置の経時劣化の判断(メンテナンス)、
- ・経験的グリーン関数(伝播特性)・サイト特性のデータベース、建物・地盤  
系の動的相互作用、免震の耐震性能等の評価等に利活用
- ・モニタリングには各種あり、施設の重要度や緊急時対応計画、費用対効  
果などを検討し、柔軟な対応が必要。



構造被害(左)と室内被害(右)の被害判定の表示例

上階・下階の平面軌跡の表示例 20

# まとめ

1. 免震設計用の基準地震動の設定の考え方、国交省の技術的助言における基整促波の包絡(振幅、継続時間)について
2. 現行のSs策定プロセスに加え、免震設計用として新たに検討すべき事項(建物・構築物の種類・用途・特性なども)
3. 免震設計用の鉛直方向地震動の設定方法、地震動の3方向成分の同時性を考慮した設計を適用することに対する意見
4. 地震後の免震装置の機能維持確認の方法、ヘルスマモニタリングの様なりアルタイムでの管理方法の適用性について
  - ・本WGの対象は、原子炉建屋ではなく、代替可能/望ましい建築・構築物(緊急時対策所、SA設備等の設置された建屋)(⇒要確認)
  - ・2011年東北地方太平洋沖地震時の免震重要棟における緊急時対策室における教訓より、機能継続性を要求される緊急時対策所などの施設には免震構造の有効性は実証済み⇒積極的に推進すべき
  - ・基整促波は指定地区(3大都市圏・静岡)において、南海トラフ地震による地震動策定が困難な一般建築が主な対象。

# まとめ

- ・長い継続時間(500秒以上)も3大都市圏などサイト特性に依存。
- ・従って、サイト固有の「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の「やや長周期が卓越する検討用地震動」を主として対応すべき。
- ・但し、想定を超える地震動や、地盤変状(活断層変位や液状化・地すべり)には耐震性能を失う可能性があり、免震は万能ではない。
- ・一方、発生頻度が非常に低く、過度に大きな長周期地震動を入力地震動として用いると免震の優位性が損なわれる。
- ・従って、長周期地震動を含むSs地震動(震源・伝播・サイト特性による3成分を考慮)を策定し、上級・特級免震が原則(設計用地震動としては年超過確率は $10^{-3}$ ~ $10^{-4}$ 程度か)。想定を超える地震動( $10^{-5}$ 程度以下)に対しては、フェールセーフ機能の付加や、代替施設として耐震構造の併用による多重化でリスクは低減可能。
- ・強震計によるモニタリングはクライシスマネジメントだけでなく、メンテナンスやサイト固有の地震動評価等に有効。但し、多様なシステムがあり、施設の重要度や費用対効果などから適宜選択する。<sup>22</sup>