

京都大学原子炉実験所研究用原子炉 (KUR)
「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の概要

1. はじめに

平成 18 年 12 月 21 日付けで文部科学省より、改訂された「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」(以下「新耐震指針」という。)に照らした耐震安全性の評価を実施するよう求める文書が出され、京都大学は、平成 19 年 7 月 2 日付けで文部科学省に「「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う既設試験研究用原子炉施設の耐震安全性の評価に係る実施計画書の報告について」(以下「実施計画書」という。)を報告した(平成 20 年 2 月 18 日一部補正)。その後、実施計画書に従った耐震安全性評価を行い、平成 21 年 6 月 30 日付けで文部科学省に「京都大学原子炉実験所研究用原子炉(KUR)の「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中間報告書」(以下、「中間報告書」という。)を提出した。その後、文部科学省における審議の結果を踏まえ、平成 22 年 7 月 28 日付けで文部科学省に「京都大学原子炉実験所研究用原子炉(KUR)の「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」(以下、「最終報告」と言う。)を提出した。

地質調査結果、基準地震動 S_s の策定結果、評価対象施設及び設備・機器の評価結果など、耐震安全性評価に関する最終報告の概要は以下のとおりです。

【最終報告のポイント】

- ① 中間報告書に対する審議の結果を踏まえ、敷地に最も影響を与える活断層(中央構造線断層帯)による地震の震源モデル(基本モデル及び不確かさを考慮したモデル)を修正しました。
- ② 上記震源モデルの修正に伴って、基準地震動 S_s を策定し直しました。
- ③ 解放基盤表面で策定された基準地震動 S_s に基づき、洪積地盤での地震波伝播特性を考慮して建屋基礎盤位置での入力地震動を評価しました。評価に当たっては、等価線形解析に加え、時刻歴非線形解析も併用しました。
- ④ 入力地震動に基づき、原子炉建屋や安全上重要な機能を有する全ての評価対象設備・機器(Sクラス相当と想定)の耐震解析を実施し、耐震安全性が確保されていることを確認しました。
- ⑤ 地震随件事象についても評価し、耐震安全上問題がないことを確認しました。

2. 新耐震指針に照らした耐震安全性評価の流れ

新耐震指針に照らした耐震安全性評価の流れは図 1 のとおりです。ここでは、「新潟県中越沖地震を踏まえた耐震安全性評価に反映すべき事項」(平成 19 年 12 月 27 日、原子力安全・保安院)も参考にした安全性評価も行いました。

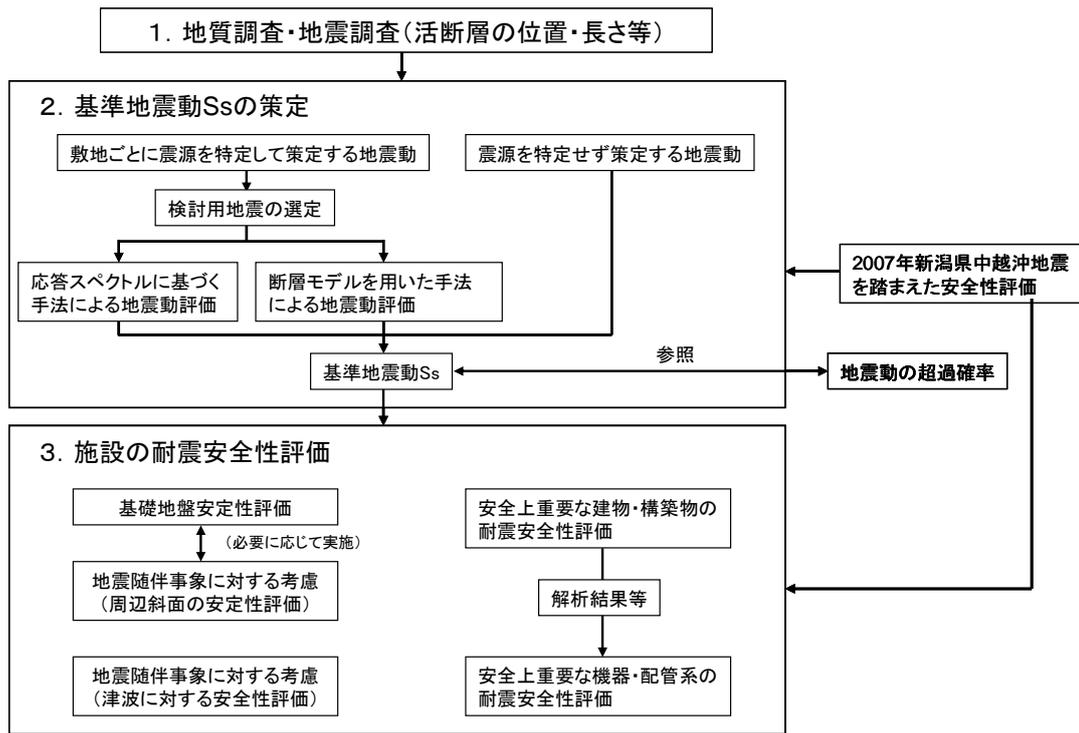


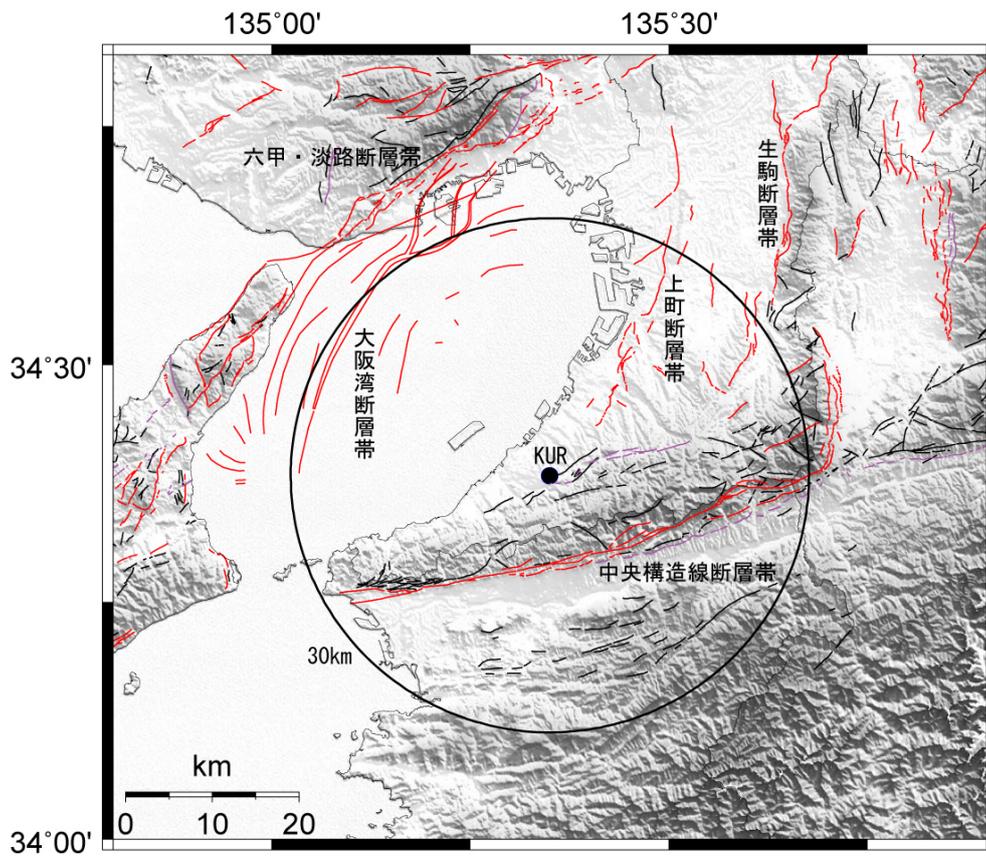
図 1 耐震安全性評価の流れ

3. 耐震安全性評価（最終報告）の概要

(1) 地質調査・地震調査結果の概要

敷地は大阪平野南部に位置し、大阪平野周縁や直下に存在する活断層については、多機関による数多くの調査が実施され、関連する文献が豊富にあります。また、大都市圏（大阪市）が存在するため、地震防災を目的とした地震動予測や被害予測に供するための活断層の調査及び評価が地震調査研究推進本部、中央防災会議及び大阪府等によって実施されています。従って、それらを参照して活断層を評価することは、新耐震指針に照らしても技術的に整合するものと考えられ、また文部科学省からの「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う既設試験研究用原子炉施設の耐震安全性の評価の実施について（平成 18 年 12 月 21 日）における既設炉の耐震性の確認における考え方に照らしても妥当であると考えました。その結果等を以下に示します。

- ① 敷地を中心とする半径 30km の範囲内の陸域には、主要な断層帯として生駒断層帯、上町断層帯、中央構造線断層帯があり、海域には大阪湾断層帯があります（図 2、表 1）。なお、中間報告書に対する審議を踏まえ、敷地への影響が最も大きい中央構造線断層帯の震源モデル(基本モデル及び不確かさを考慮したモデル)を修正しました。具体的には基本モデルの断層傾斜角を地震調査研究推進本部のモデル⁽³⁾を参考に北西傾斜 43 度としました。
- ② 敷地近傍（敷地から半径 5km 程度の範囲内）には新耐震指針に従って認定される活断層は存在しないことを確認しました。
- ③ 敷地内（原子炉建屋ごく近傍）における地盤調査結果から、解放基盤表面を-181m の基盤岩（花崗岩）位置としました。（図 3）



— 活断層 (30万年前以降にも活動した活断層)
 — 断層 (30万年前以前にのみ活動した活断層)
 — 断層組織地形 (リニアメント)
 活断層、断層、断層組織地形は岡田・東郷(2000)⁽¹⁾による分類

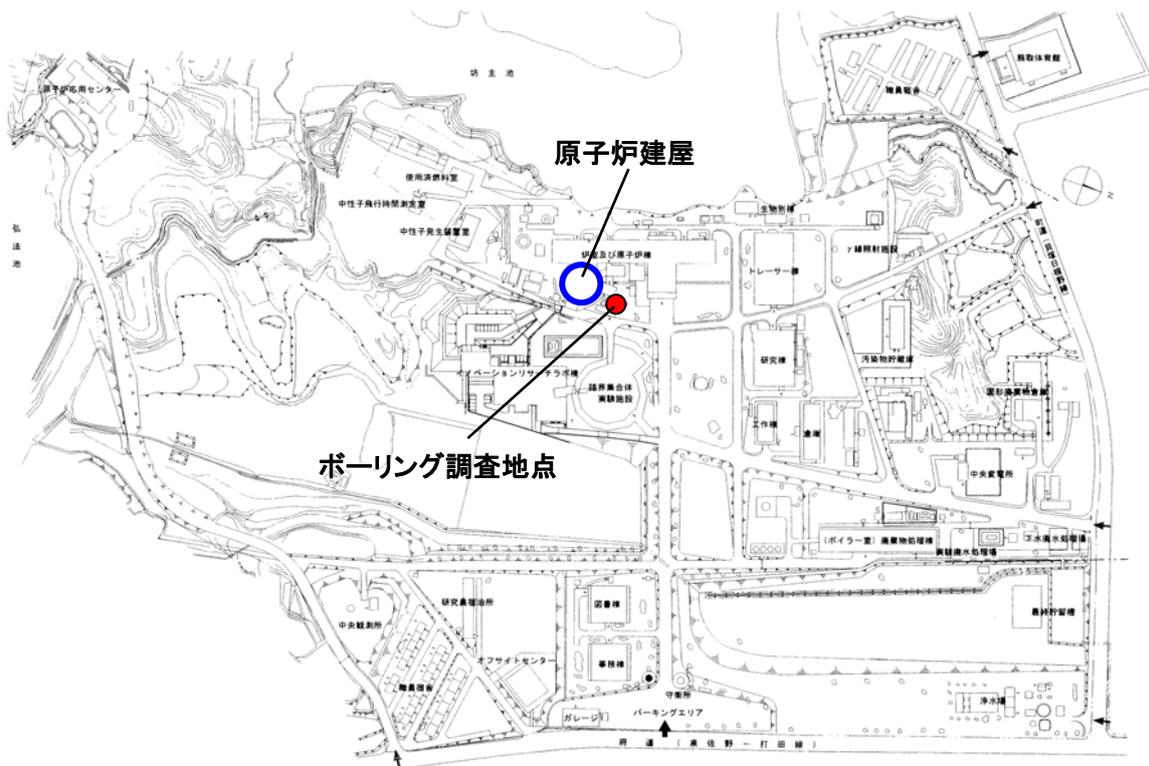
図2 敷地を中心とした半径30kmの範囲内に存在する活断層帯
 (陸域は岡田・東郷(2000)⁽¹⁾, 海域は横倉・他(1998)⁽²⁾による)

表1 敷地周辺の主な活断層の諸元

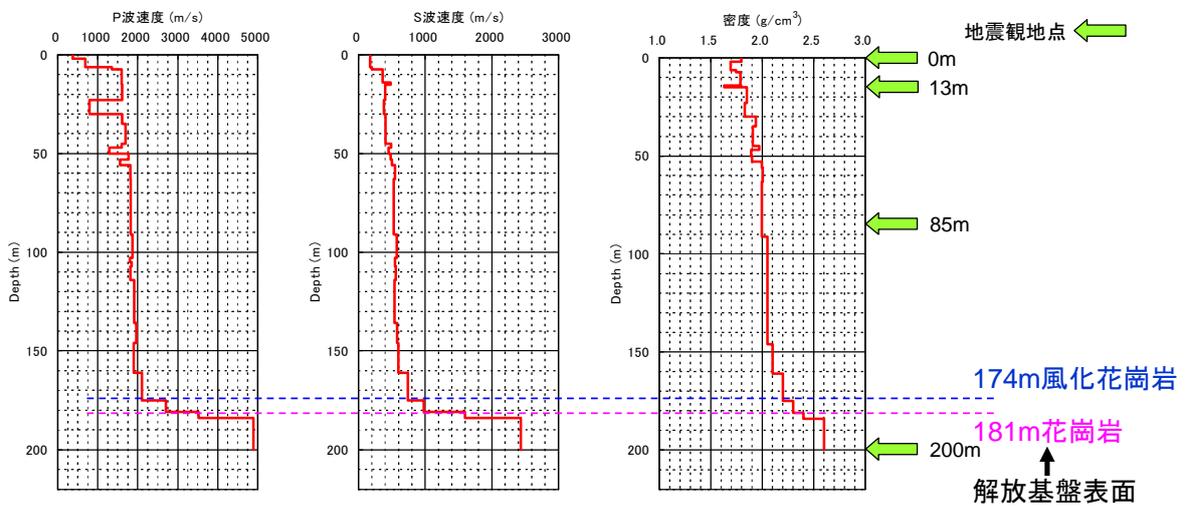
検討用地震	断層長さ	マグニチュード※ ¹
中央構造線断層帯	60km※ ²	7.8
上町断層帯	46km	7.6
生駒断層帯	42km	7.5
大阪湾断層帯	42km	7.5

※1 松田(1975)⁽⁴⁾により断層長さから算出

※2 地震調査研究推進本部による断層モデル⁽³⁾を参考に、断層の傾斜角を43度とし、金剛断層と五条谷断層は断層面を共有するため五条谷断層、根来断層、磯ノ浦断層の断層長さを中央構造線断層帯とする



(a) 敷地内ボーリング調査位置



(b) PS 検層結果

図3 敷地内におけるボーリング調査位置及びPS検層結果

(2) 基準地震動 S_s の策定

① 敷地への影響を考慮した「検討用地震」の選定

検討用地震としては、以下の3つのタイプの地震を考慮しています。なお、内陸地殻内地震としては、想定される地震の規模と敷地からの距離に基づき、敷地への影響を考慮して選定しました。

- ・ 内陸地殻内地震 : 中央構造線断層帯 (金剛山地東縁—和泉山脈南縁)
: 上町断層帯
- ・ プレート間地震 : 想定南海地震(M8.4)、想定東南海地震(M8.1)、想定東南海・南海地震の連動(M8.5)、(すべて地震調査研究推進本部による想定地震^⑤である)
- ・ 海洋プレート内地震 : 沈み込んだ海洋プレート (スラブ) 内地震及び沈み込む海洋プレート内地震 (M7.4) (地震調査研究推進本部^⑥に基づいた 2004 年東海道沖の地震と同規模の想定地震)

② 震源を特定して策定する地震動

- ・ 応答スペクトルに基づく地震動評価

検討用地震に対する Noda et al.(2002)^⑦に基づく応答スペクトルを図 4 に示します。図から中央構造線断層帯 (M7.8) による地震動が最も大きくなり、基準地震動 Ss-1 として設定しました。なお、Ss-1 の応答スペクトルは、震源モデルの不確かさを考慮して評価しました。また、中央構造線断層帯は、震源が敷地に近く、その破壊過程が地震動に大きな影響を与えると考えられることから、次に示す断層モデルを用いた手法による評価結果を重視しました。

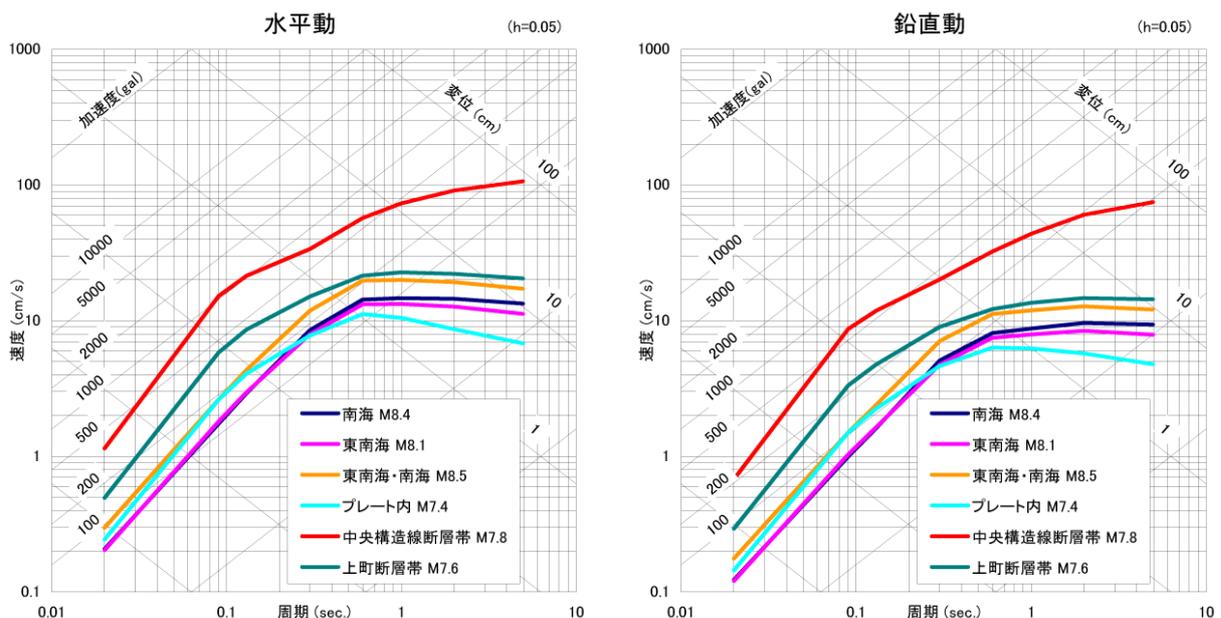


図 4 解放基盤表面における検討用地震の応答スペクトル

- ・ 断層モデルに基づく地震動評価

地震動評価は、短周期成分を統計的グリーン関数法により、長周期成分を理論的手法 (3次元差分法) により計算するハイブリッド法を用いました。大阪堆積盆地の 3次元地下構造モデルは文献^⑧を参考に構築し、特に重要な大阪南部域のモデルの妥当性は敷地及び敷地近傍における微動探査などによって検証^⑨しました。敷地への影響が大きい中央構造線断層帯や上町断層帯による地震動評価においては、アスペリティ (震源断層面上で地震動強く放出する場所) の位置を敷地に近づける等、表 2 及び図 5 に示すように震源断層モデルの不確かさについても考慮しました。また、破壊開始点は敷地への影響が最も

大きくなると考えられる場所に設定しました。図 6 から、敷地への影響が大きい中央構造線断層帯 ケース 3 による地震動を基準地震動 Ss-2、中央構造線断層帯 ケース 4 による地震動を基準地震動 Ss-3 として設定しました。

表 2 震源の不確かさの検討

中央構造線断層帯の震源の不確かさの考え方			
モデル名	傾斜角	アスペリティ	応力降下量
ケース 1 (基本モデル1)	43°	推本モデル ^{※1} と同様のアスペリティ配置	レシビ ^{※2}
ケース 2 (基本モデル2)	43°	推本モデル ^{※1} と同様のアスペリティ配置	レシビ ^{※2}
ケース 3 (アスペリティ位置の不確かさを考慮したモデル)	43°	敷地の近くに大きいアスペリティを配置	レシビ ^{※2}
ケース 4 (応力降下量の不確かさを考慮したモデル)	43°	推本モデル ^{※1} と同様のアスペリティ配置	レシビ ^{※2} × 1.5 倍
上町断層帯の震源の不確かさの考え方			
モデル名	傾斜角	アスペリティ	応力降下量
ケース 1 (基本モデル)	65°	北側セグメントに大きいアスペリティを配置	レシビ ^{※2}
ケース 2 (アスペリティ位置の不確かさを考慮したモデル)	65°	南側セグメントに大きいアスペリティを配置	レシビ ^{※2}
ケース 3 (応力降下量の不確かさを考慮したモデル)	65°	北側セグメントに大きいアスペリティを配置	レシビ ^{※2} × 1.5 倍

■ 不確かさを考慮したパラメータ

※1 地震調査研究推進本部の強震動評価⁽³⁾のモデル

※2 強震動予測レシビ⁽¹⁰⁾

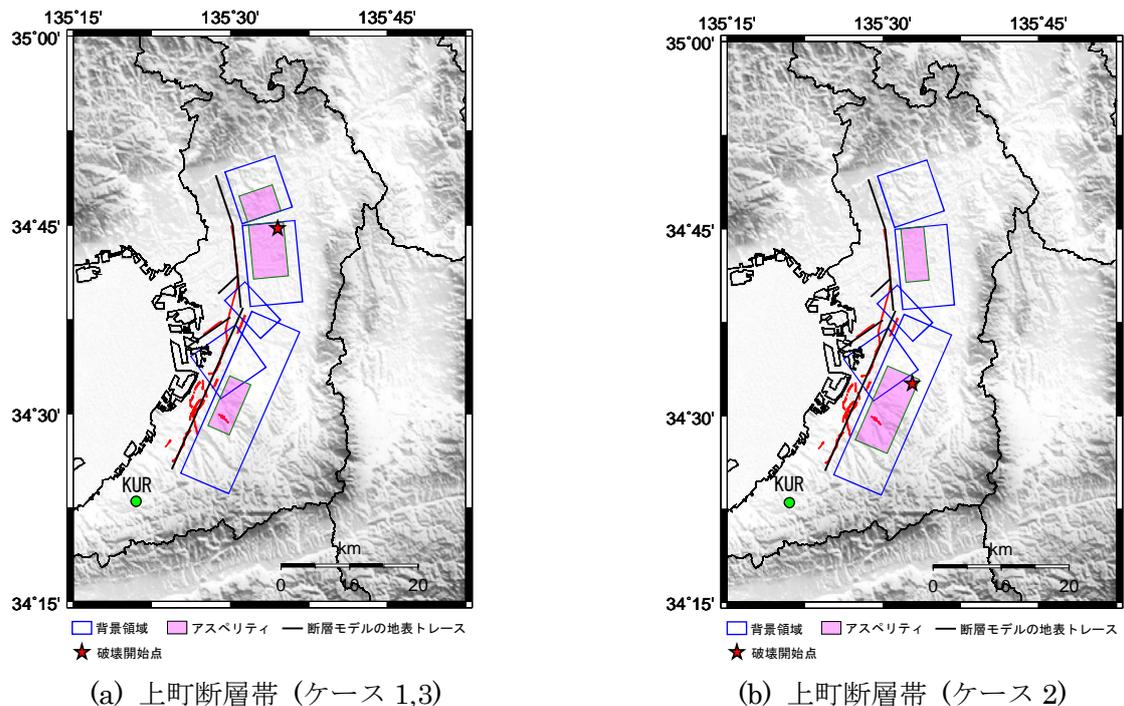
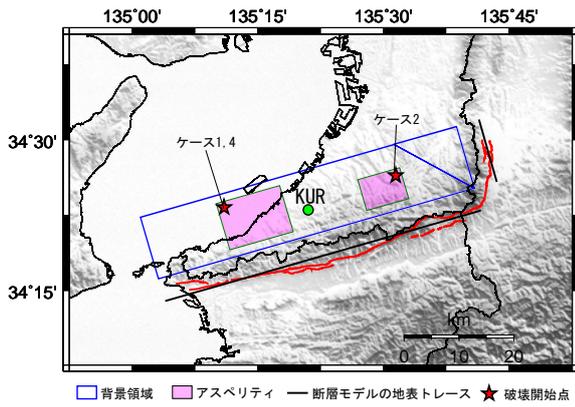
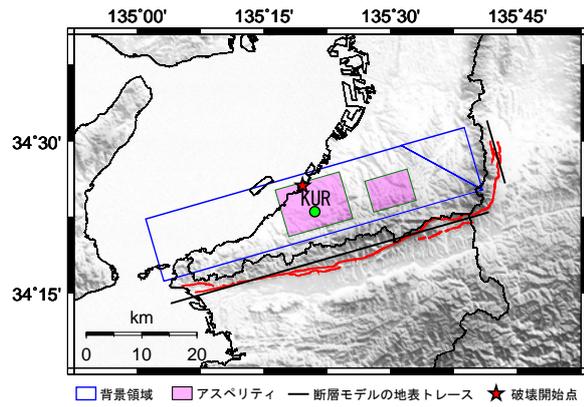


図 5 断層モデルのアスペリティ及び破壊開始点の位置

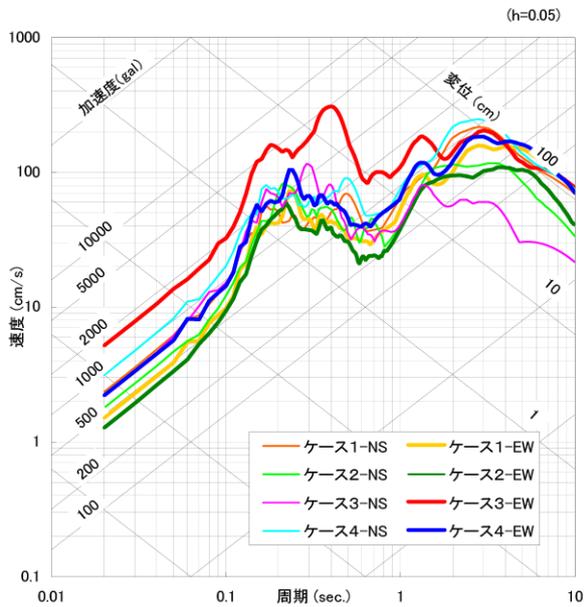


(c) 中央構造線断層帯 (ケース 1,2,4)

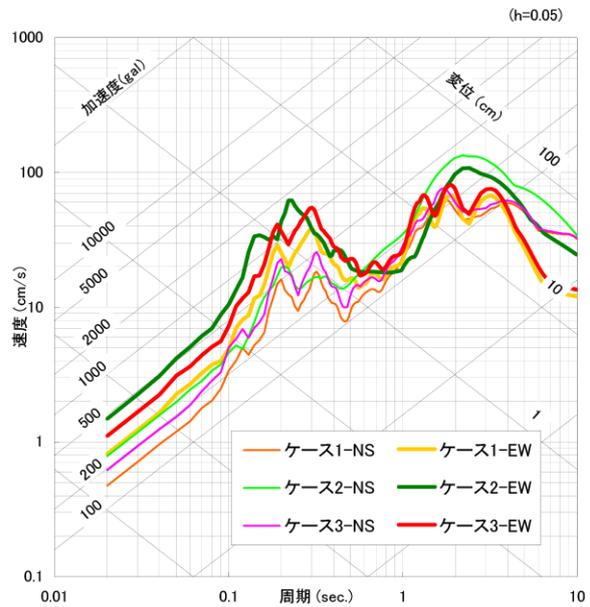


(d) 中央構造線断層帯 (ケース 3)

図 5 続き



(a) 中央構造線断層帯



(b) 上町断層帯

図 6 断層モデルを用いた手法による地震動評価結果 (水平動の応答スペクトル)

③ 震源を特定せず策定する地震動評価

敷地周辺の詳細な調査によっても、なお敷地近傍において発生する可能性のある内陸地殻内の地震の全てを事前に評価しうるとは言い切れないことから、そのような地震の最大規模を敷地ごとに検討し、敷地における地震動レベル (応答スペクトル) を評価することが要求されています。

前述したように、敷地近傍には中央構造線断層帯(M7.8)が存在し、敷地直下にまで広がる震源断層面を想定した地震動評価が行われ、基準地震動 S_s が策定されています。中央構造線断層帯による地震の規模 (M7.8) は、地震調査研究推進本部⁽¹¹⁾による震源を特定しにくい地震の規模(M6.8)や敷地周辺の地震発生層の厚さから推定される地震規模 (M6.7 程度) を大きく上回るものであり、震源を特定せず策定する地震動は本敷地にとって施設の耐震安全性評価に影響を及ぼさないと判断しました。

④ 基準地震動 Ss のまとめ

応答スペクトルに基づく手法及び断層モデルに基づく手法によって評価した基準地震動をまとめて図 7 及び図 8 に示しました。それぞれの最大加速度は、水平方向で Ss-1 (362 ガル)、Ss-2 (678 ガル、1586 ガル)、Ss-3 (972 ガル、688 ガル) となっています。

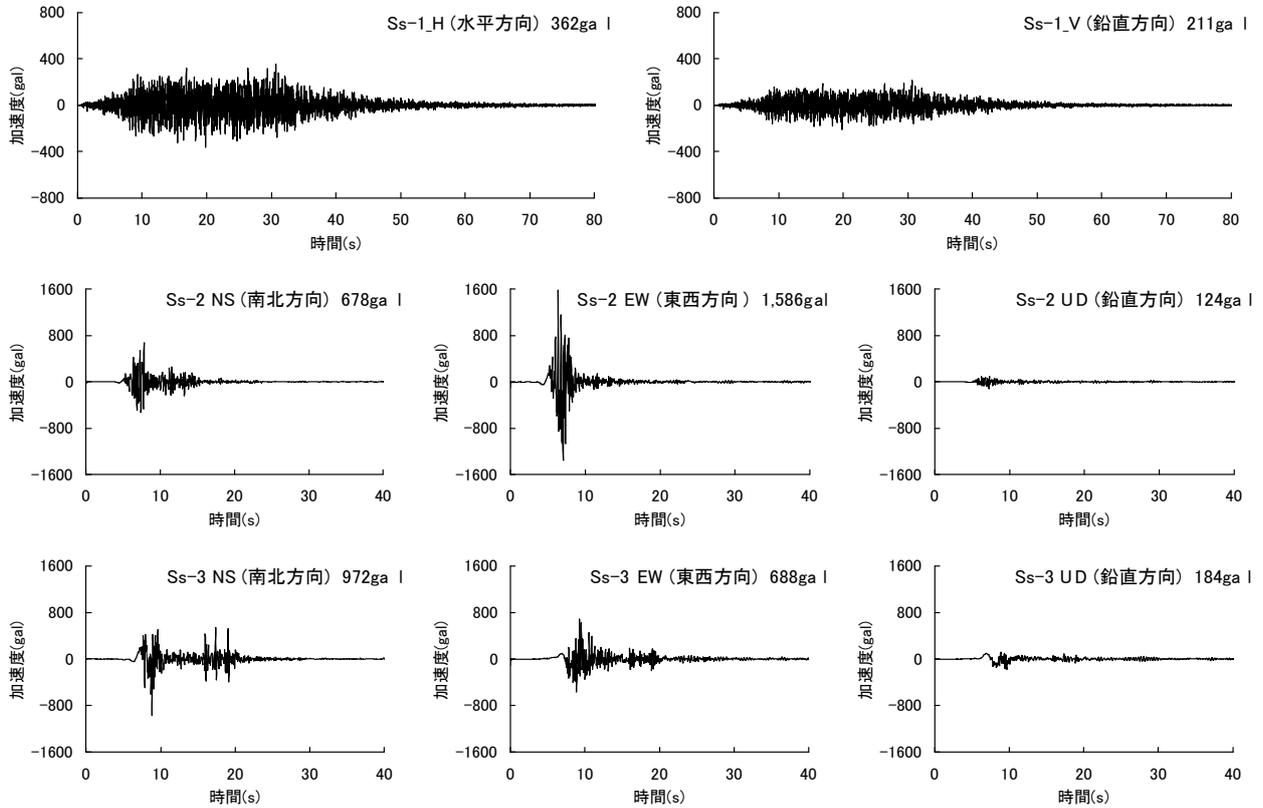


図 7 基準地震動 Ss の加速度時刻歴波形

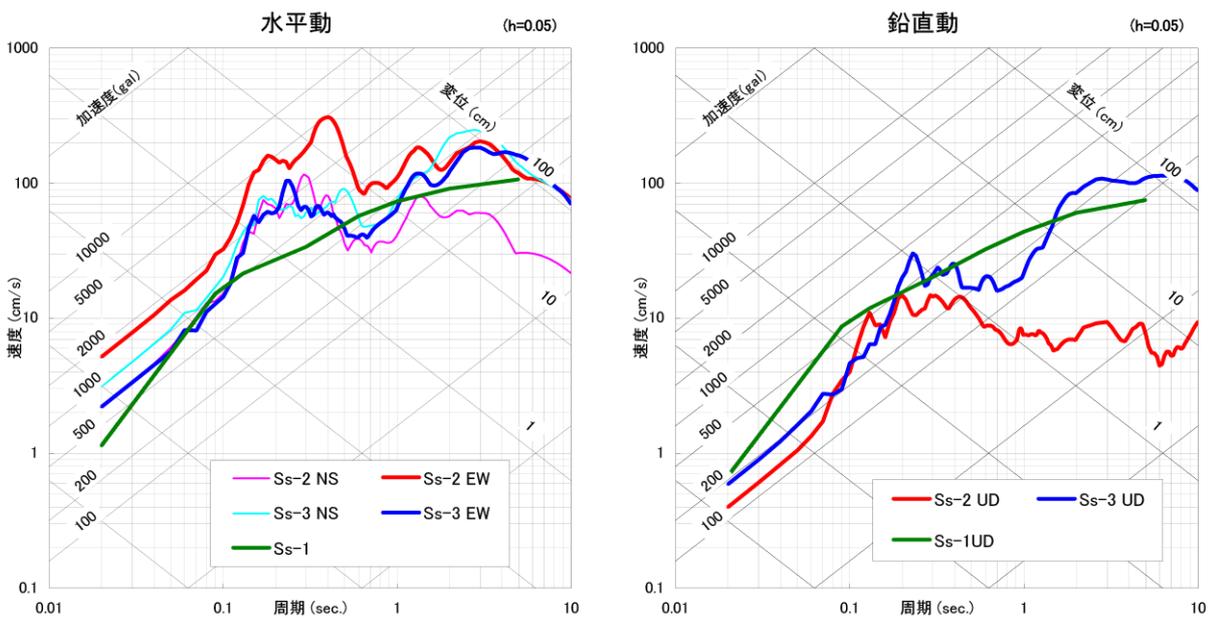


図 8 基準地震動 Ss の応答スペクトル

⑤ 入力地震動の評価

原子炉建屋の地震応答解析のための入力地震動を評価しました。具体的には地質調査結果で述べた解放基盤表面 (-181m) から建屋基礎盤位置 (-7.3m) までの 1 次元地盤構造モデルを用いた非線形応答解析によって水平方向の入力地震動を評価しました。地盤の非線形地震応答解析手法としては、中間報告時点における等価線形解析に加え、時刻歴非線形応答解析も併用しました。入力地震動の評価結果を図 9 に示しました。ここで、NS 成分は基準地震動 Ss-2 による等価線形解析結果を、EW 成分は基準地震動 Ss-2 による時刻歴非線形応答解析結果を示します。

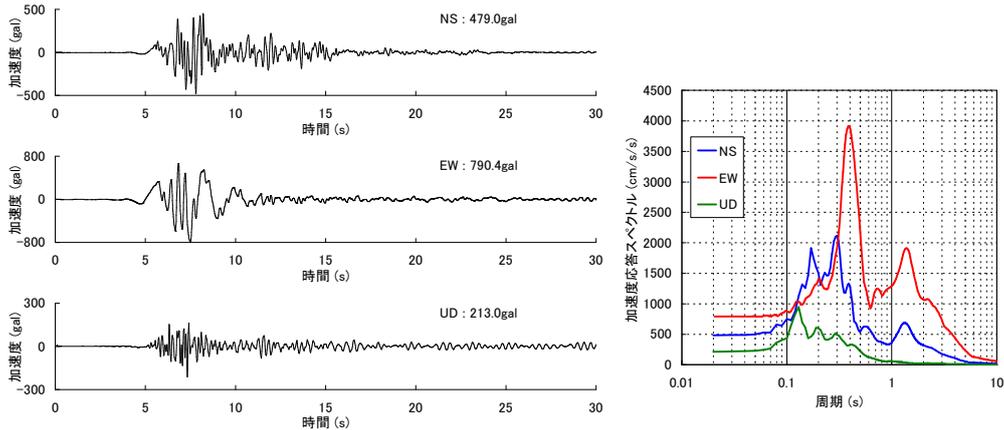


図 9 入力地震動の加速度時刻歴波形と応答スペクトル

(3) 施設等の耐震安全性評価

① 原子炉建屋

原子炉建屋の耐震安全性評価は、図 10 に示す原子炉建屋モデルを用い、基準地震動 Ss-2 に基づいて評価した入力地震動による地震応答解析によって行いました。要求される耐震性能の観点から、耐震安全上重要な機器・配管系（耐震 S クラスに相当する設備・機器）に波及的影響が及ばないことを確認するため、建屋に生じる層せん断力及びせん断ひずみ、屋根版に生じる曲げ応力および基礎地盤の支持力について行いました。

評価の結果を以下に示します。表 3 および図 11 に示すように建屋の最大層せん断力は各階共に評価基準値（保有水平耐力）以下となり、またせん断ひずみは評価基準値(2×10^{-3})以下となっており、原子炉建屋の耐震安全性が確保されていることを確認しました。

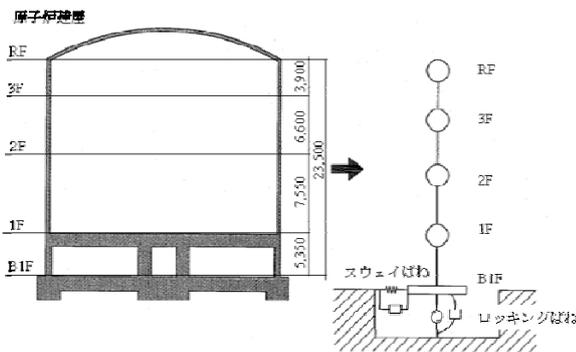


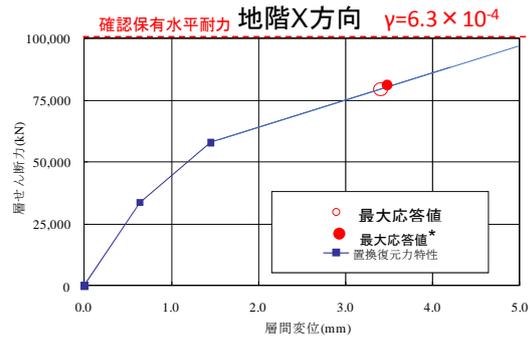
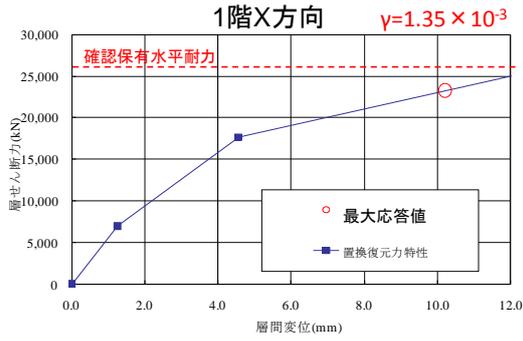
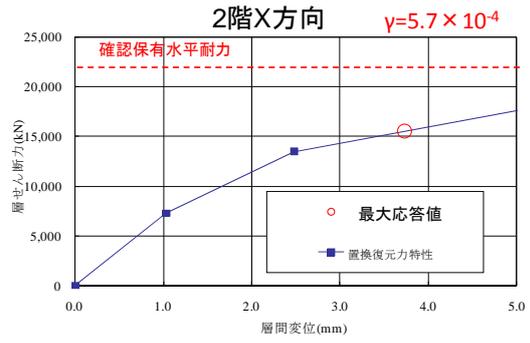
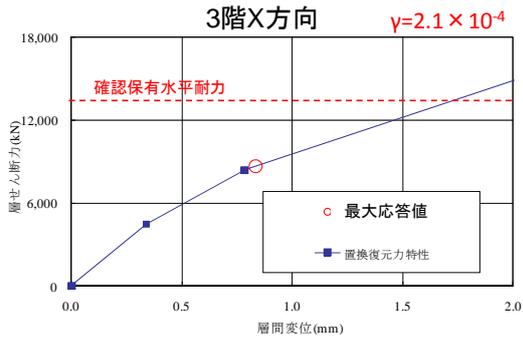
図 10 建屋断面と地震応答解析モデル

表 3 建屋の安全性評価結果

階	X方向			Y方向		
	最大応答層せん断力 $Q_{max}(kN)$	確認保有水平耐力 $Q_u(kN)$	Q_u/Q_{max}	最大応答層せん断力 $Q_{max}(kN)$	確認保有水平耐力 $Q_u(kN)$	Q_u/Q_{max}
RF						
3F	8,651	> 13,212 ※1	> 1.52	7,518	> 14,711 ※1	> 1.95
2F	15,550	22,453	1.44	13,234	25,609	1.94
1F	23,272	26,512	1.14	19,950	31,302	1.57
B1F	82,853 ※2 (79,653+3,200)	100,459	1.21	76,041 ※2 (73,241+2,800)	81,544	1.07

※1 3階の保有水平耐力については、3階より下層階の壁が先にせん断耐力に達したため、漸増弾塑性解析の最終ステップの水平力の値を記載している。

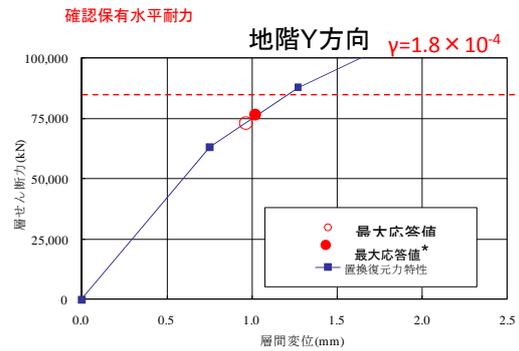
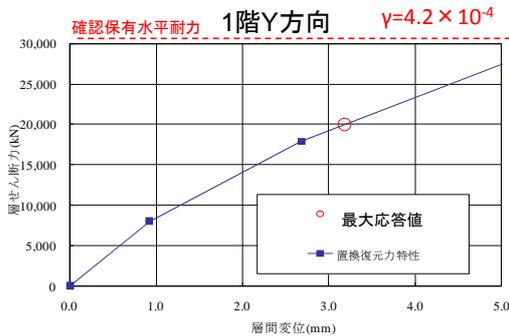
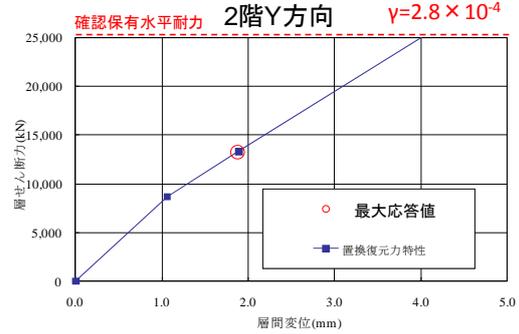
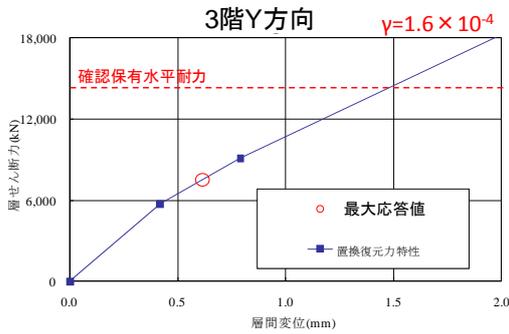
※2 原子炉棟(補助建屋)の地震応答解析による原子炉建屋基礎(地下1階部分)への付加せん断力を加算している



(グラフ上の値は最大応答時のせん断歪みを表す)

●最大応答値*は原子炉棟からのせん断力を付加した値)

(a) X 方向



(グラフ上の値は最大応答時のせん断歪みを表す)

●最大応答値*は原子炉棟からのせん断力を付加した値)

(b) Y 方向

図 11 建屋の地震応答解析結果

一方、屋根版に生じる短期垂直応力度は円周端部の一部を除き、コンクリートのみを考慮した評価基準値(コンクリートの短期許容応力度)以下となりました。このコンクリートのみを考慮した評価基準値を超えた部分については、発生応力度が図 12 に示すように鉄筋も考慮した軸力-曲げモーメントによる許容応力度閉曲線内に入っており弾性範囲内に応答値があることを確認し、原子炉建屋屋根版の耐震安全性が確保されていることを確認しました。

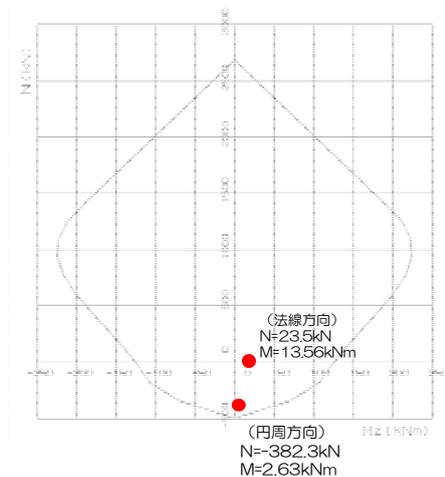


図 12 屋根版の軸力-曲げモーメント相関曲線

基礎地盤に生じる接地圧は表 4 に示すように評価基準値(許容支持力)以下となりました。また、一部基礎版底面に生じる引張力は基礎根入部側面摩擦抵抗から求めた評価基準値以下となりました。以上のことから、原子炉建屋基礎および支持地盤の耐震安全性が確保されていることを確認しました。

表 4 基礎地盤の応力度の評価

		発生値(kN/m ²)	評価基準値(kN/m ²)	評価
長期荷重時		336	800	○
短期荷重時	引張時*	52	150	○
	圧縮時	871	1500	○

* 基礎浮上力を基礎根入部側面摩擦抵抗として検討

② 安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価

中間報告書に記載された原子炉を「止める」、「冷やす」、放射性物質を「閉じ込める」ための安全上重要な機能を有する設備・機器に加え、実施計画書に記載されたすべての設備・機器を評価対象としました。また、設備・機器によっては略算モデルに加え、精算モデルによる検討も追加しました。なお、KUR では地震時における自動停止の設定値を約 20 ガル（上下又は水平）としており、制御棒の全挿入に要する時間は約 0.6 秒であることから、地震時には初期微動の段階で原子炉は停止できる構造となっています。

当該設備・機器に生じる応力の発生値は表 5 に示すように、評価基準値以下となっており、耐震安全性が確保されることを確認しました。

(4) 地震随件事象に対する評価

① 周辺斜面の安定性

原子炉建屋は丘陵部切土の堅固な地盤上に建設されており、原子炉建屋周囲には崖や傾斜地は存在しないため、地震時における周辺斜面の崩落等によって、施設の安全機能が重大な影響を受けるおそれはありません。

② 津波に対する安全性

敷地は大阪湾から約 4.5km 離れ、標高約 60m の位置にあるため、津波によって施設の安全機能が重大な影響を受けるおそれはありません。

表 5 機器・配管の構造強度評価結果

評価設備・機器	評価部位/応力度の種類		発生値(N/mm ²)		評価基準値 (N/mm ²)	評価
			略算モデル	精算モデル		
制御棒	制御棒駆動装置 (案内管)	垂直	44.0	19.2	65.0	○
		せん断	1.80	0.30	37.5	○
	粗調整用制御棒 (取付ボルト)	垂直	180		210	○
		せん断	0.79		121	○
	微調整用制御棒 (取付金具)	垂直	3.90		42.0	○
		せん断	0.11		24.0	○
燃料要素	ノズル	垂直	3.10		16.0	○
		せん断	0.12		8.50	○
一次冷却系配管 (炉心直下)	入口配管	垂直	5.70	2.65	126	○
		せん断	0.60	0.69	31.0	○
	出口配管	垂直	6.40	2.69	126	○
		せん断	1.40	0.83	31.0	○
炉心支持構造物	炉心タンクとの接合部	垂直	2.33		60.0	○
		せん断	1.36		34.6	○
生体遮へい体 (炉心タンクと一体化)	構築物基部	垂直	1.21		1.4	○
		せん断	0.52		1.05	○
使用済燃料プール室プール (使用済燃料貯蔵ラックと一体化)	プール側壁	せん断	0.44		0.9	○

参考文献

- (1) 岡田篤正, 東郷正美 : 近畿の活断層, 東京大学出版会, 2000.
- (2) 横倉隆伸・加野直巳・山口和雄・宮崎光旗・井川猛・太田陽一・川中卓・阿部進 : 大阪湾における反射法深部構造探査, 地質調査所月報, 49, 11, p.571-590, 1998.
- (3) 地震調査研究推進本部 : 中央構造線断層帯(金剛山地東縁-和泉山脈南縁)の地震を想定した強震動評価について, 2005.
- (4) 松田時彦 : 活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震第2輯, 第28巻, pp.269-283, 1975.
- (5) 地震調査研究推進本部 : 南海トラフの地震の長期評価について, 2001.
- (6) 地震調査研究推進本部 : 「全国を概観した地震動予測地図」報告書 2006年版, 2006.
- (7) Noda, S., K. Yashiro, K. Takahashi, M. Takenura, S. Ohno, M. Tohdo and T. Watanabe : RESPONSE SPECTRA FOR DESIGN PURPOSE OF STIFF STRUCTURES ON ROCK SITES, OECD-NEA Workshop on the Relations between Seismological DATA and Seismic Engineering, Istanbul, pp.399-408, Oct. 16-18, 2002.
- (8) 堀川晴央, 他 : 断層による不連続構造を考慮した大阪堆積盆地の3次元地盤構造モデル, 活断層・古地震研究報告, No.3, pp.225-259, 2003.
- (9) 上林宏敏, 川辺秀憲, 釜江克宏, 宮腰研, 堀家正則 : 傾斜基盤構造推定における微動 H/V スペクトルの頑健性とそれをういた大阪平野南部の盆地構造モデルの改良, 日本建築学会構造系論文集, No.642, 2009.
- (10) 地震調査研究推進本部 : 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」), 2008.
- (11) 地震調査研究推進本部 : 「全国地震動予測地図」2009年版, 2009.