

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、研究用原子炉(KUR)に対し、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指示されました。
- ・京都大学は、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。)を提出しました。
- ・京都大学は、中間報告に対する文部科学省のサブワーキンググループ等による審議を踏まえ、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、「最終報告書」という。)を提出しました。
- ・評価結果について各サブワーキンググループにおける妥当性の確認はなされているが、平成 22 年 8 月 4 日に開催された文部科学省におけるワーキンググループにおいて、最終報告書の内容が確認され、一部修正(追加説明や図の追加)することで了承されました。
- ・以下に、新耐震指針に従った地質・地盤調査、検討用地震の選定、基準地震動 S_s の策定、評価対象施設及び設備・機器の耐震解析結果など、耐震安全性評価に関する概要を示します。

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。

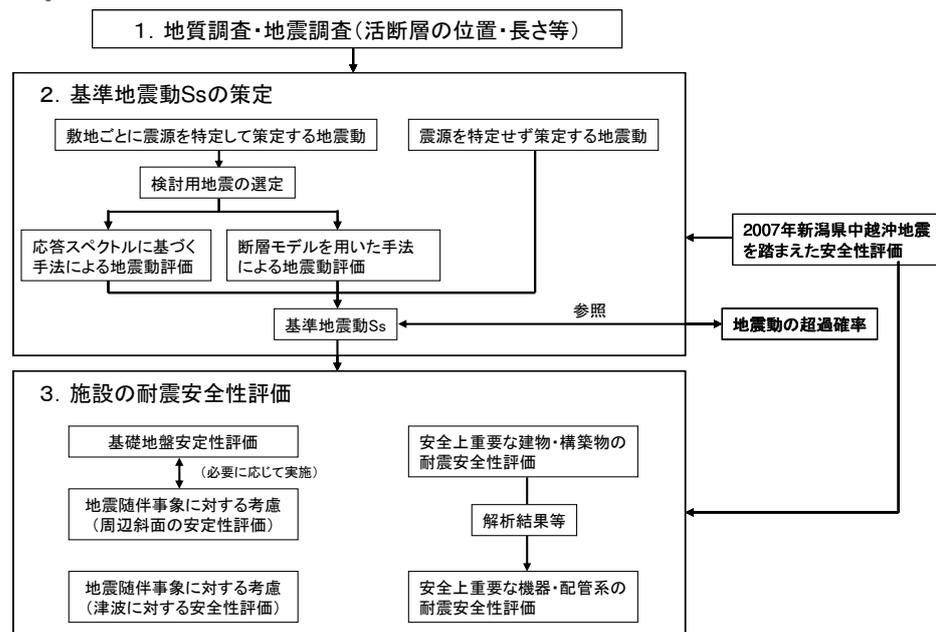


図 1 耐震安全性評価の流れ

3. 耐震安全性評価結果の概要

3. 1 地質調査・地盤調査結果の概要

(1) 活断層の評価

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、それらを参照して耐震設計上考慮すべき活断層を以下のように評価しました。

- 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）。
- ② 敷地近傍（敷地から半径 5km 程度の範囲内）には地震を起こさない古い断層はありますが、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。

(2) 敷地内における地盤調査結果

敷地内（原子炉建屋ごく近傍）におけるボーリングによる地盤調査結果から、解放基盤表面を -181m の基盤岩（花崗岩）に設定しました（図 3）。また、このボーリング孔を利用して 4 カ所で地震観測を実施しており、得られたデータは今回の評価にも活用しています。なお、解放基盤表面とは、新耐震指針によって、「基準地震動を策定するため、基盤面上の表層や構造物が無いものとして仮想的に設定する自由表面であって、著しい高低差がなく、ほぼ水平で相当な拡がりを持って想定される基盤表面を言う。基盤とは概ねせん断波（S 波）速度 $V_s=700\text{m/s}$ 以上の硬質地盤であって、著しい風化を受けていないものとする。」と定義されています。ここで設定された解放基盤表面はこの条件を満足しています。

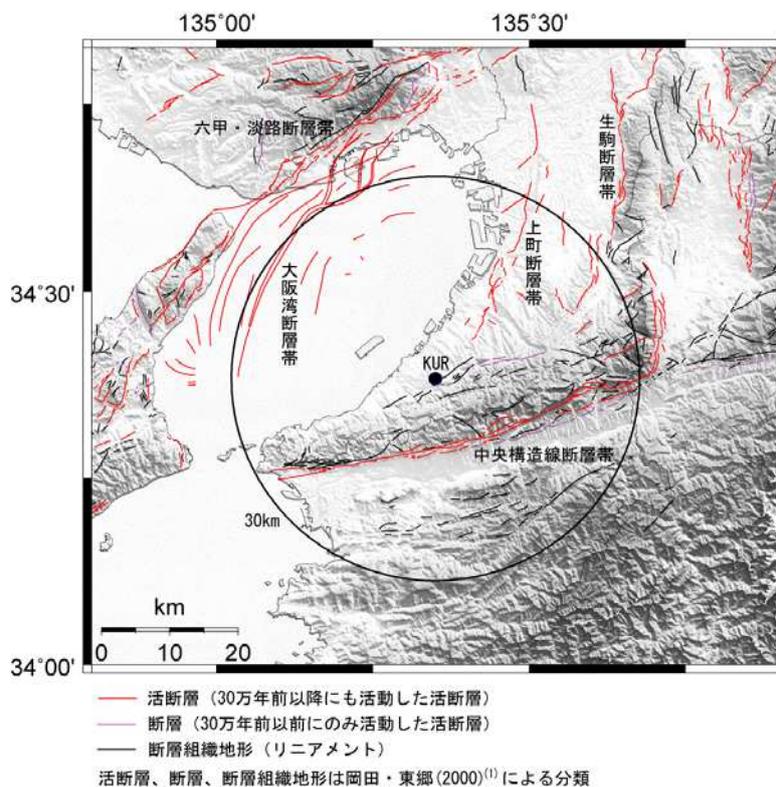


図 2 敷地を中心とした半径 30km の範囲内に存在する活断層帯（陸域は岡田・東郷(2000)⁽¹⁾，海域は横倉・他(1998)⁽²⁾による）

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⁽⁵⁾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

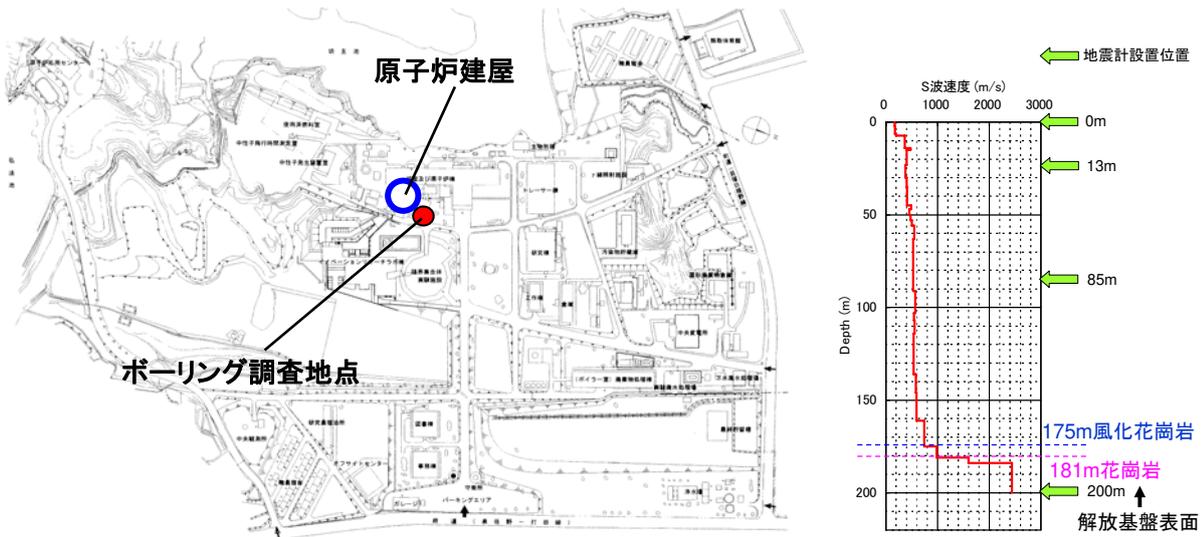


図 3 敷地内におけるボーリング調査位置及び PS 検層結果

3. 2 基準地震動 Ss の策定

(1) 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

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、図4に示す地震の発生場所に基づく3つのタイプの地震を考慮しています。まず、活断層によって起こる内陸地殻内地震として、中央構造線断層帯（金剛山地東縁ー和泉山脈南縁）及び上町断層帯による地震、プレート間地震として、想定南海地震(M8.4)、想定東南海地震(M8.1)及び想定東南海と南海地震が連動した場合の地震(M8.5)、海洋プレート内地震（スラブ内地震）として、敷地直下に M7.4 の地震をそれぞれ選定しました。

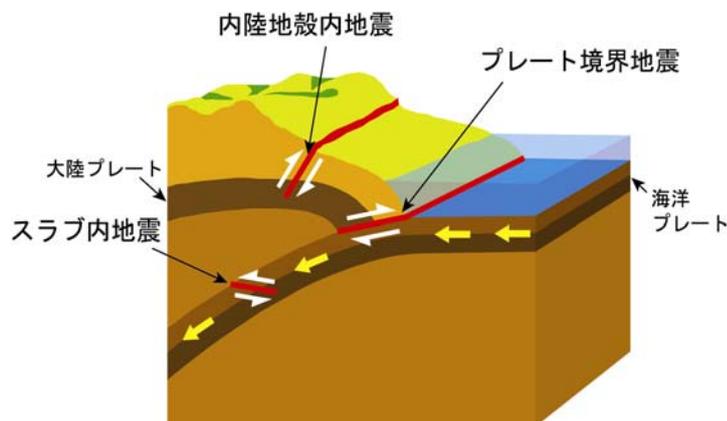


図 4 地震の発生場所に基づく3つのタイプの地震

② 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)⁽⁶⁾に基づく応答スペクトルを図 5 に示します。図から前述した検討用地震の中で中央構造線断層帯 (M7.8) による地震動が最も大きくなるため、基準地震動 Ss-1 として設定しました。なお、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。

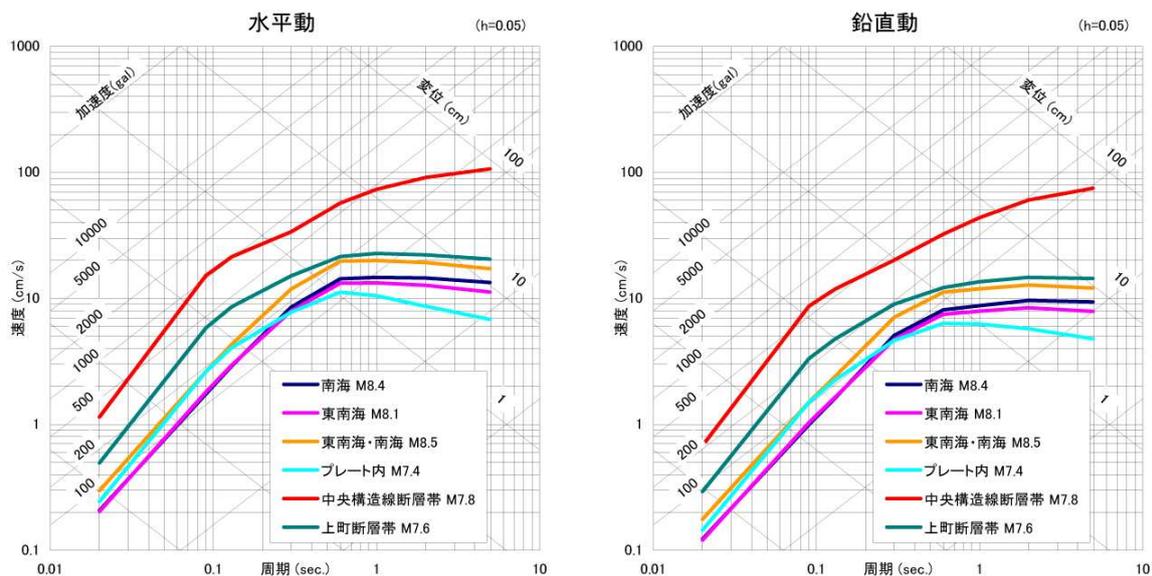


図 5 解放基盤表面における検討用地震の応答スペクトル

③ 断層モデルに基づく地震動評価

断層モデルによって地震動を評価するため、中央構造線断層帯に対して図 6 に示す震源モデルを設定しました。図中のピンク色で示す矩形領域はアスペリティと呼ばれ、断層面上の他の領域よりも大きな地震動を放出する領域です。震源モデルの設定においては、図に示すようにアスペリティを敷地直下に配置する等、安全側に考慮しました。表 2 に示した震源の不確かさも考慮して評価した地震動を Ss-2 (表 2 におけるケース 3) 及び Ss-3 (表 2 におけるケース 4) としました。

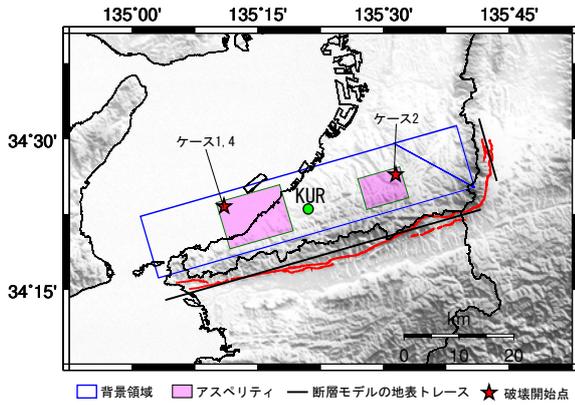
表 2 震源断層モデルの不確かさの考慮

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

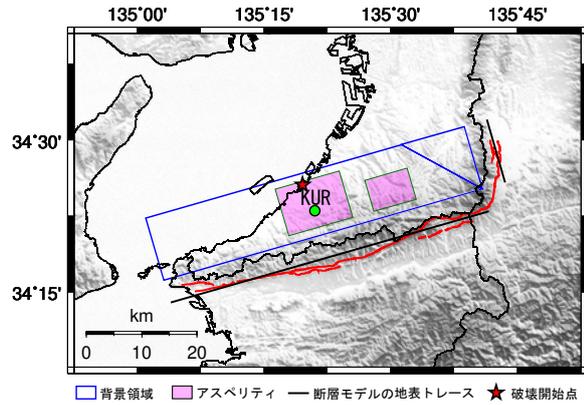
■ 不確かさを考慮したパラメータ

※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⁽⁶⁾



中央構造線断層帯 (ケース 1,2,4)



中央構造線断層帯 (ケース 3)

図 6 断層モデルのアスペリティ及び破壊開始点の位置

(2) 震源を特定せず策定する地震動

敷地周辺の詳細な活断層調査によっても、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ず、伏在断層の活動によって敷地に影響を与える可能性が否定できないことから、震源を特定せず策定する地震動を評価することが要求されています。

本敷地については、地震調査委員会（文部科学省）による「震源を予め特定しにくい地震」の規模が $M6.8$ であること、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ていることから、震源を特定せず策定する地震動は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。

(3) 基準地震動 S_s 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 S_s-1 (362 ガル)、 S_s-2 (678 ガル、1586 ガル)、 S_s-3 (972 ガル、688 ガル) となっています。

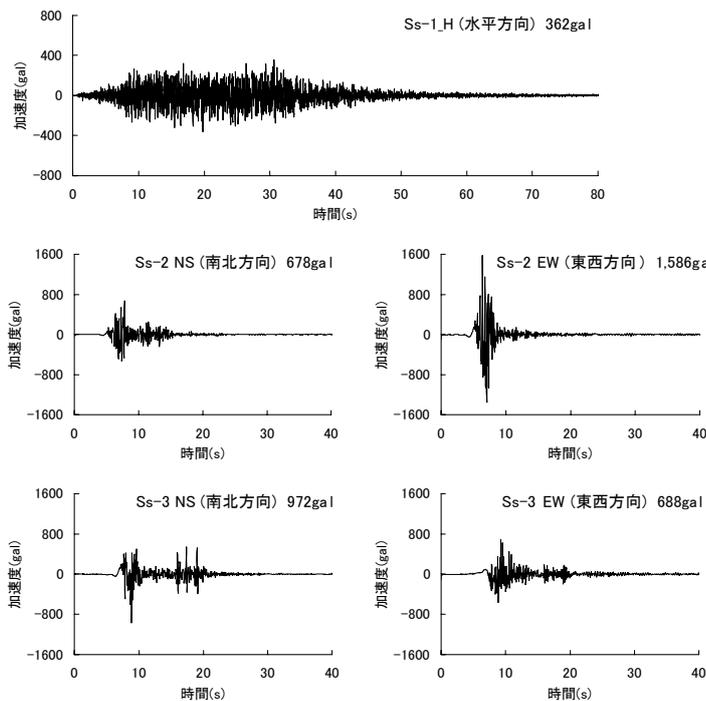


図 7 基準地震動 S_s の加速度時刻歴波形

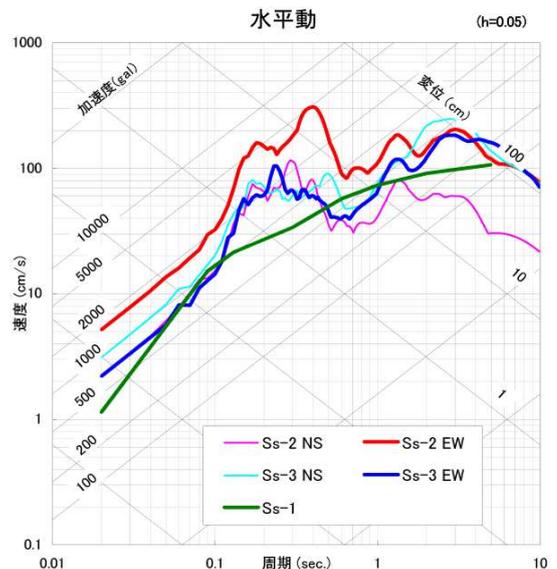


図 8 基準地震動 S_s の応答スペクトル

3. 3 施設等の耐震安全性評価

(1) 原子炉建屋

- 最新の知見を踏まえて設定した図 9 に示す地震応答解析モデルを用い、基準地震動 Ss-2 に基づいて評価した入力地震動（原子炉建屋基礎位置での地震動）による地震応答解析を行いました。
- 耐震安全性評価は、耐震安全上重要な機器・配管系に波及的影響が及ばないことを確認するため、建屋の強度やせん断ひずみ等について行いました。
- 評価の結果を図 10 に示します。図 10 は建屋各階の荷重と変形との関係を示す図で、図中の○が地震時に作用する荷重、破線は建屋が保有する強度です。どの階においても強度の方が大きくなっています。これらを数値で示したものが表 3 です。この表から建屋強度の安全率は 1.0 を上回っていることがわかります。一方、せん断ひずみ（図 10 右上朱書き）も評価基準値(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。また、基礎地盤も十分な支持力を有していることを確認しました。

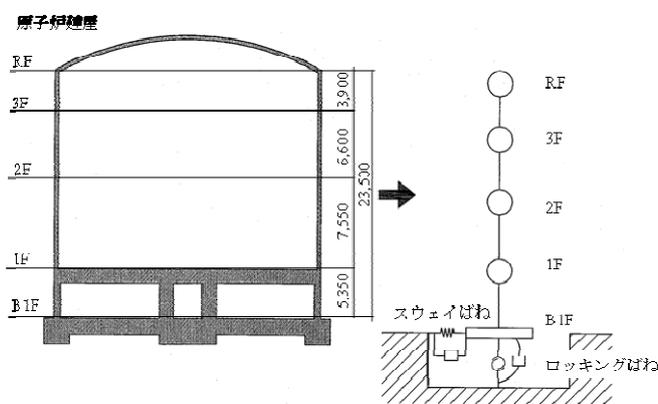
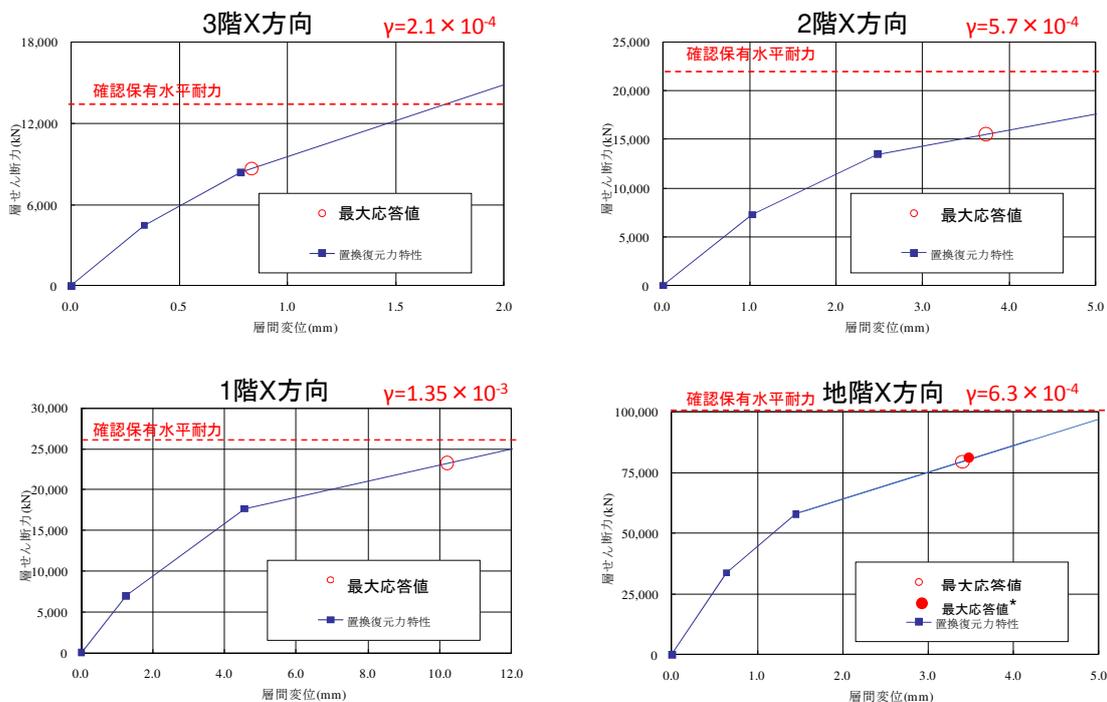


図 9 建屋断面と地震応答解析モデル

表 3 建屋の安全性評価結果

	最大応答 層せん断力 Q_{max} (kN)	確認保有 水平耐力 Q_u (kN)	安全率 (Q_u / Q_{max})
RF			
3F	8,651	13,212	1.52
2F	15,550	22,453	1.44
1F	23,272	26,512	1.14
B1F	81,735	100,459	1.23



(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)

図 10 建屋の地震応答解析結果

(2) 安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価

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(図11)に対して評価を行いました。評価の結果をまとめて表5に示します。全ての設備・機器について、評価値は評価基準値以下であり、耐震安全性が確保されていることを確認しました。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。

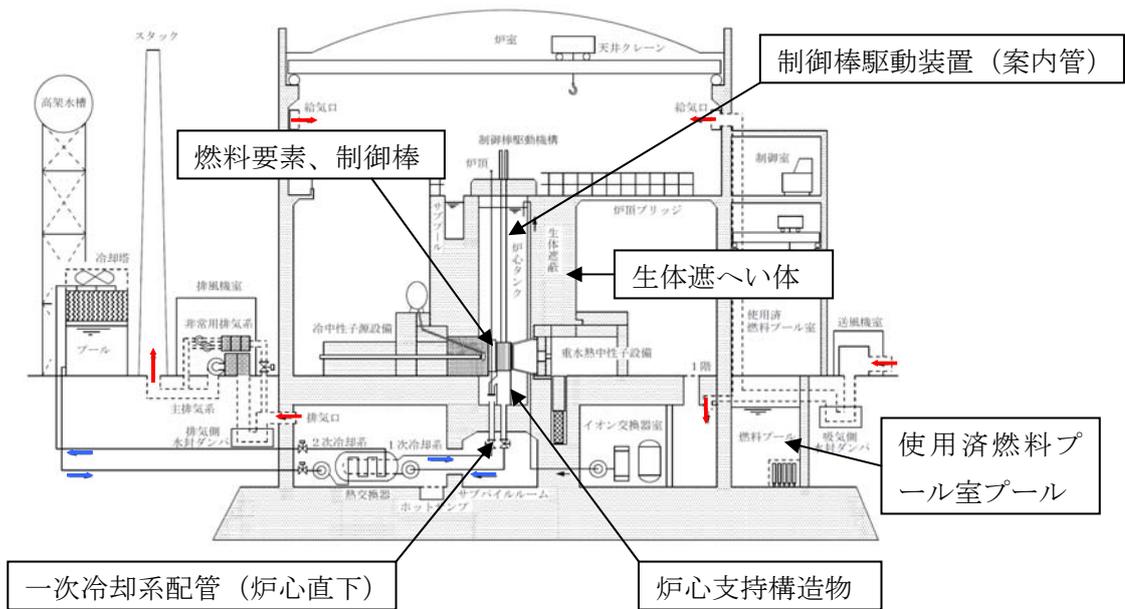


図11 研究用原子炉(KUR)の安全上重要な設備・機器・配管

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	○

3. 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。

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 卷, pp.269-283, 1975.
- (5) 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.
- (6) 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.