

平成 15 年 12 月 22 日

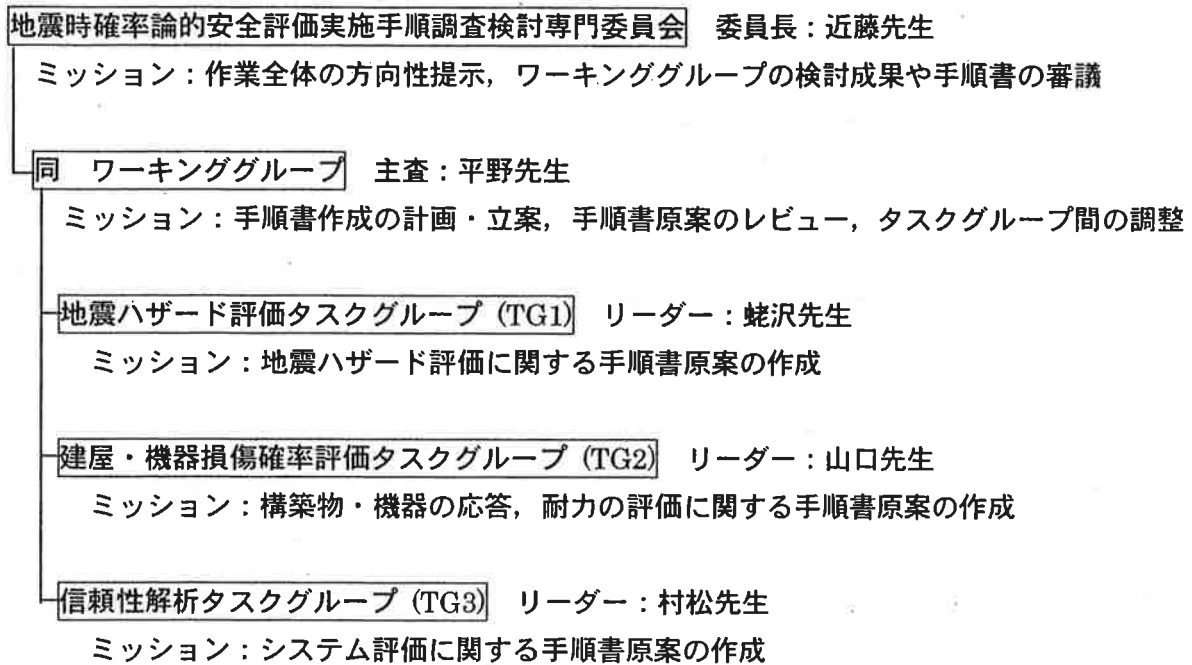
原安協・地震 PSA 手順作成委員会の概要

1. 目的

軽水炉を対象とした地震 PSA を実施するための知見をとりまとめた手順書を作成する。作成にあたっては、基本的に現在のプラクティスを記載し、複数の手法がとり得る場合には、評価実施者の選定に供するようそれらを並記することとした。また、技術的に解決が困難な課題については今後の課題として整理する。

2. 会議体・委員構成

以下の会議体で構成されている。委員構成は別紙-1 参照。



3. 進捗状況（これまでの委員会開催状況は別紙-2 参照）

産業界のプラクティスと JNES のプラクティスの比較検討を通じ、手順書作成方針の決定、手順書骨子と目次案のとりまとめの後、手順原案の作成に着手。第 2 回専門委員会（11 月 12 日開催）にて、実施手順書原案を審議。

現在は、タスクグループ間にわたる記載内容の調整等を行いつつ、記載の充実を図っているところ。

4. その他

本手順書は平成 16 年 3 月に完成予定。完成後は、原子力学会標準委員会に諮り、所定の手続きに則って標準化を図る予定。

以 上

地震時確率論的安全評価実施手順調査検討専門委員会
委員構成平成 15 年 6 月現在
(敬称略・順不同)

委員長	近藤 駿介	東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻教授
委員	亀田 弘行	防災科学技術研究所地震防災フロンティア研究センター長
”	藤田 聡	東京電機大学工学部機械工学科教授
”	高田 毅士	東京大学大学院工学系研究科建築学専攻助教授
”	中村 晋	日本大学工学部土木工学科助教授
”	平野 光將	財団法人原子力発電技術機構理事・原子力安全解析所長
”	坂上 正治	財団法人原子力発電技術機構原子力安全解析所調査役
”	蛭沢 勝三	財団法人原子力発電技術機構原子力安全解析所耐震解析室長
”	村松 健	日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター 原子炉安全工学部安全評価研究室長
”	山口 彰	核燃料サイクル開発機構大洗工学センター要素技術開発部 流体計算工学グループリーダー
”	平田 和太	財団法人電力中央研究所我孫子研究所地盤耐震部上席研究員
”	山下 利夫	東京電力株式会社原子力技術部建築技術グループマネージャー
”	山崎 広美	中部電力株式会社原子力計画部建設グループ部長 (グループ長)
”	中村 隆夫	関西電力株式会社原子力事業本部 プラント技術グループマネージャー
”	津久井 豊	日本原子力発電株式会社 理事・発電管理室室長代理(発電技術部長)

地震時確率論的安全評価実施手順調査検討専門委員会・ワーキンググループ
委員構成

平成15年6月現在
(敬称略・順不同)

主査	平野 光將	財団法人原子力発電技術機構理事・原子力安全解析所長
委員	村松 健	日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター 原子炉安全工学部安全評価研究室長
〃	山口 彰	核燃料サイクル開発機構大洗工学センター 要素技術開発部流体計算工学グループリーダー
〃	蛭沢 勝三	財団法人原子力発電技術機構原子力安全解析所耐震解析室室長
〃	坂上 正治	財団法人原子力発電技術機構原子力安全解析所調査役
〃	福島誠一郎	東電設計株式会社技術開発本部技術企画部課長
〃	武田 正紀	清水建設株式会社エンジニアリング事業本部 電力エネルギー本部主査
〃	武村 雅之	株式会社小堀鐸二研究所統括部長
〃	植木 孝	株式会社東芝電力・社会システム社原子力機器設計部 耐震・強度技術担当主査
〃	織田 伸吾	株式会社日立製作所電力・電機グループ原子力事業部 原子力生産本部原子力計画部原子炉計画グループ主任技師
〃	益田 福三	三菱重工業株式会社原子力事業本部原子力技術センター 軽水炉プラント技術部部長代理
〃	黒岩 克也	三菱重工業株式会社原子力事業本部原子力技術センター 原子炉安全技術部信頼性技術課主席技師
〃	寺津 邦信	東京電力株式会社原子力技術部安全グループマネージャー
〃	加藤 千詞	中部電力株式会社原子力計画部計画グループ副長
〃	成宮 祥介	関西電力株式会社原子力事業本部安全技術グループマネージャー
〃	森田 毅	日本原子力発電株式会社発電管理室安全グループマネージャー

地震時確率論的安全評価実施手順調査検討専門委員会
・地震ハザード評価タスクグループ(TG1)
委員構成

平成15年6月現在
(敬称略・順不同)

リーダー	蛭沢 勝三	財団法人原子力発電技術機構原子力安全解析所耐震解析室長
委員	福島誠一郎	東電設計株式会社技術開発本部技術企画部課長
”	奥村 俊彦	株式会社大崎総合研究所研究部長
”	石田 寛	鹿島建設株式会社技術研究所上席研究員
”	酒井隆太郎	応用地質株式会社エネルギー事業部技術部課長
”	野田 静男	東京電力株式会社原子力技術部建築耐震グループマネージャー
”	尾崎 昌彦	関西電力株式会社土木建築室 原子力建築グループチーフマネージャー

地震時確率論的安全評価実施手順調査検討専門委員会
 ・ 建屋・機器損傷確率評価タスクグループ(TG2)
 委員構成

平成15年6月現在
 (敬称略・順不同)

リーダー	山口 彰	核燃料サイクル開発機構大洗工学センター 要素技術開発部流体計算工学グループリーダー
委員	蛭沢 勝三	財団法人原子力発電技術機構原子力安全解析所耐震解析室長
〃	泉 端郎	財団法人原子力発電技術機構原子力安全解析所構造解析室長
〃	甲斐 芳郎	清水建設株式会社エンジニアリング事業本部 電力エネルギー本部課長
〃	今塚 善勝	株式会社大林組東京支社原子力本部技術部技術課長
〃	水野 淳	鹿島建設株式会社原子力部原子力設計室長
〃	宇賀田 健	大成建設株式会社原子力部設計室シニア・エンジニア
〃	大宮 幸男	株式会社竹中工務店技術研究所先端研究開発部主席研究員
〃	植木 孝	株式会社東芝電力・社会システム社原子力機器設計部 耐震・強度技術担当主査
〃	福士 直己	株式会社日立製作所電力・電機グループ原子力事業部 日立生産本部原子力計画部総合計画グループ主任技師
〃	益田 福三	三菱重工業株式会社原子力事業本部原子力技術センター 軽水炉プラント技術部部長代理
〃	野田 静男	東京電力株式会社原子力技術部建築耐震グループマネージャー
〃	佐藤 隆	東京電力株式会社原子力技術部設備技術グループ副長
〃	小江 秀保	関西電力株式会社原子力事業本部プラント技術グループリーダー
〃	村上 洋介	関西電力株式会社土木建築室原子力建築グループマネージャー

地震時確率論的安全評価実施手順調査検討専門委員会
・信頼性解析タスクグループ(TG3)
委員構成

平成15年6月現在
(敬称略・順不同)

リーダー	村松 健	日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター 原子炉安全工学安全評価研究室長
委員	坂上 正治	財団法人原子力発電技術機構原子力安全解析所調査役
”	福田 護	財団法人原子力発電技術機構原子力安全解析所 安全解析第二室長
”	藤井 正彦	株式会社東芝磯子エンジニアリングセンター 原子力システム設計部安全設計担当主務
”	織田 伸吾	株式会社日立製作所電力・電機グループ原子力事業部 原子力生産本部原子力計画部原子炉計画グループ主任技師
”	黒岩 克也	三菱重工業株式会社原子力事業本部原子力技術センター 原子炉安全技術部信頼性技術課主席技師
”	寺津 邦信	東京電力株式会社原子力技術部安全グループマネージャー
”	成宮 祥介	関西電力株式会社原子力事業本部安全技術グループマネージャー

地震時確率論的安全評価実施手順調査検討専門委員会
開催及び検討状況について

地震時確率論的安全評価実施手順調査検討専門委員会は、専門委員会とともに 1WG、3TG を設置し、手順書作成を実施している。

現在までの実施状況（予定を含む）は以下の通りである。

	専委	WG	TG1	TG2	TG3
6月	12日(第1回)				
7月		1日(第1回) 31日(第2回)	28日(第1回)	17日(第1回)	22日(第1回)
8月		29日(打合せ会)	6日(第2回)	19日(第2回)	5日(第2回)
9月			17日(第3回) 25日(第4回)	17日(第3回)	
10月		31日(第3回)	15日(第5回) 28日(第6回)	14日(第4回)	2日(第3回) 20日(第4回)
11月	12日(第2回)			10日(第5回) 26日(第6回)	18日(第5回)

TG1：地震ハザード評価タスクグループ
 TG2：建屋・機器損傷確率評価タスクグループ
 TG3：信頼性解析タスクグループ

原子力施設の耐震設計に内在する裕度について

1. まえがき

原子力施設の耐震設計には、地震動の作成から施設の機能確認までの各段階にそれぞれ裕度が存在し、施設は十分な耐震裕度をもっている。この耐震裕度は、不確定性が大きい自然現象に対する設計体系を確定論的に構築する上で重要なものであり、把握しておく必要がある。本資料は、耐震設計審査指針に適合するよう設計された原子力施設に対して、特に、機器・建屋・土木構造物の耐震設計の各段階に内在する裕度に着目して検討したものである。

2. 耐震設計に内在する裕度の評価方針

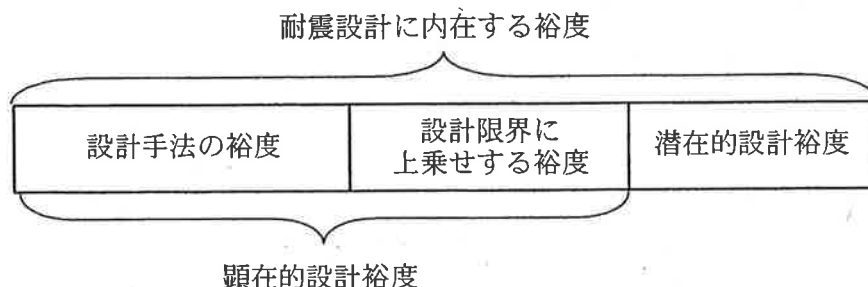
2. 1 耐震設計に内在する裕度

原子力施設の耐震設計に内在する裕度は、設計入力と施設の限界耐力の比で表されるものであり、各設計段階の裕度を総合的に表すものである。この総合的な裕度を評価するにあたり、本検討では便宜上、複数の裕度に区分し検討を行う。

具体的には、まず、解析等により定量評価が可能な“顕在的設計裕度”と定量評価が不可能な“潜在的設計裕度”の2つに分けて検討を行う。

さらに、顕在的設計裕度は、“設計手法の裕度”と“設計限界に上乗せする裕度”に分ける。このうち後者は、設計者の意図やプラントメーカーの標準設計に依存するため、耐震設計に内在する裕度を評価する場合は排除するべきとの考えもあるが、これまでの設計実績から明らかに存在するものであり、本検討では、設計に内在する裕度として加えることとする。

以下に本検討において考慮する裕度のイメージを図示する。



2. 2 顕在的デザイン裕度の評価

(1) 評価方針

原子力施設の建屋および機器・配管系の顕在的デザイン裕度については、過去にPWR・BWR電力共研「原子力施設の総合的耐震安全性に関する評価」（平成5年度最終報告書）を実施し、この研究成果を基に、原子力発電耐震設計特別調査委員会で審議され、「原子力プラントシステムの総合的耐震安全性評価法に関する調査報告書（以下、「総合耐震評価」）（平成6年3月）がまとめられている。本検討では、この調査結果を基に、最近の知見等を加味して裕度を再整理し、PWR・BWRの代表プラントについてデザイン裕度の評価を行う。

また、総合耐震評価において土木構築物の評価は行われていなかったため、本検討では、同様の考え方にに基づき屋外重要土木構造物のデザイン裕度の評価を行う。

(2) 総合耐震評価

「総合耐震評価」では、各設計段階の裕度を以下のとおり分類し、定量的評価を行っており、本評価においても同様の方針により評価を行う。

M1：設計応答評価法のもつ裕度

M2：設計手法による応答計算値と許容限界の間の裕度

M3：設計許容限界のもつ裕度

$$\frac{\text{現実の安全限界}}{\text{現実的応答}} (M) = \frac{\text{設計手法による応答}}{\text{現実的応答}} (M1) \times \frac{\text{設計許容限界}}{\text{設計手法による応答}} (M2) \times \frac{\text{現実の安全限界}}{\text{設計許容限界}} (M3)$$

2. 3 潜在的デザイン裕度の評価

潜在的デザイン裕度を明確に定量化することは難しいが、機器・配管系、建屋および土木構築物のそれぞれについて裕度を生むと考えられる要因を定性的に抽出する。

3. 顕在的デザイン裕度

3. 1 機器・配管系

機器・配管系の顕在的デザイン裕度は、前述の評価方針のとおり総合耐震評価結果を基に、最近の知見及び試験結果を加味して裕度を再整理し、PWR・BWRの代表プラントについて定量的に評価した。

なお、本評価では設計用入力地震動の設定までに内在する裕度を評価対象外としている。

(1) 評価対象プラントおよび想定地震動

a. 対象プラント

BWR : 1100MWe Mark II (改) 現行指針適合の代表プラント

PWR : 1100MWe 4-Loop 現行指針適合の代表プラント

b. 入力地震波

BWR : 低地震帯用遠距離S2地震動 (改良標準化委員会作成)

PWR : 高地震帯用遠距離S2地震動 (改良標準化委員会作成)

(2) M1の評価

(a) 評価内容

現行の耐震設計では、現実的には分布するパラメータを、保守性のある単一パラメータで代表させたり、応答の多次元性を簡易に評価する保守的な設計手法が用いられている。ここではこれら評価法の裕度を以下のとおりM1_{DMP}、M1_M、M1_{FRS}に分類して評価した。なお、この分類は「総合耐震評価 (機器編)」と同様である。

$$M1 = M1_{DMP} \times M1_M \times M1_{FRS}$$

M1_{DMP} : 減衰定数による裕度

M1_M : 応答解析手法による裕度

M1_{FRS} : 床応答スペクトルの拡幅による裕度

ここで、M1に関するパラメータ設定法を表3-1示す。また、M1を構成する各裕度 (M1_{DMP}、M1_M、M1_{FRS}) の算出にあたり実施した解析ケース (パラメータの組合せ) を表3-2に示す。これら解析ケースは対象設備毎に評価し、各裕度を算出している。以下に、配管 (区分1保温材有り) の評価例を記す

(例) 配管 (区分1保温材有り) の評価例

○M1_{DMP}

解析ケースA : 減衰定数 2.5%の時刻歴応答解析

解析ケースB : 減衰定数 8.0%の時刻歴応答解析

○M1_M

解析ケースA : 減衰定数 2.5%のスペクトルモーダル解析(拡幅なし)

解析ケースB : 減衰定数 2.5%の時刻歴応答解析

○M1_{FRS}

解析ケースA : 減衰定数 2.5%のスペクトルモーダル解析(10%拡幅)

解析ケースB : 減衰定数 2.5%のスペクトルモーダル解析(拡幅なし)

表 3-1 各種評価法に設定したパラメータ

項目	パラメータの設定	
	現行設計手法	現実的手法
設計用減衰定数	現行設計手法として用いられる減衰定数を用いる 配管 区分1 保温材有 :2.5% 保温材無 :2.0% 区分2 保温材有 :1.5% 保温材無 :1.0% 区分3 保温材有 :1.0% 保温材無 :0.5% 機器 電気盤 :4.0% ケーブルトレイ :5.0% 電線管 :3.0% 1次冷却材ループ(PWR) :3.0% 制御棒駆動装置(PWR) :5.0% 制御棒駆動機構(BWR) :3.5% 燃料集合体(BWR) :7.0% 燃料集合体(PWR) :10~15%	試験データ等に基づき設定された減衰定数を用いる 配管 区分1 保温材有 :8.0% 保温材無 :7.5% 区分2 保温材有 :5.5% 保温材無 :5.0% 区分3 保温材有 :4.5% 保温材無 :4.0% 機器 電気盤 :7.5% ケーブルトレイ :6.8% 電線管 :7.6% 1次冷却材ループ(PWR) :4.8% 制御棒駆動装置(PWR) :5.0% 制御棒駆動機構(BWR) :3.5% 燃料集合体(BWR) :8.5% 燃料集合体(PWR) :10~15%
応答解析手法	現行設計手法の以下の方法を用いる ・時刻歴応答解析 ・スペクトルモーダル解析(SRSS)	時刻歴応答解析を用いる
設計用床応答スペクトル拡幅法	現行設計手法の以下の10%拡幅の床応答スペクトルを用いる	拡幅無し of 床応答スペクトルを用いる

表 3-2 解析ケース

パラメータ		設計用減衰定数に含まれる裕度 (M_{1DMP})		応答解析手法に含まれる裕度 (M_{1M})		応答スペクトルの拡幅に含まれる裕度 (M_{1FRS})	
		A	B	A	B	A	B
応答解析手法	現実的手法 (時刻歴応答解析)	○	○		●		
	現行設計手法 (スペクトルモーダル解析等)			●		○	○
減衰定数	現実的値		●				
	設計値	●		○	○	○	○
床応答スペクトル拡幅率	0%	-	-	○	-		●
	10%	-	-		-	●	

注) *1:各裕度は、解析A、Bの応答比により求める
 *2:○および●は各パラメータの選択枝でうち●は評価対象を示し、-はそのパラメータが無関係であることを示す。

(b) 評価結果

M1DMP、M1M、M1FRS およびトータルのM1の評価結果を表3-3に示す。

表3-3 M1評価結果

裕度分類	スペクトルモデル解析を用いる設備 (配管、剛ではない設備)		時刻歴解析を用いる設備		静的解析を用いる設備 (剛な設備)	
	PWR	BWR	PWR	BWR	PWR	BWR
M1DMP	配管: 1.47 機器: 1.09	配管: 1.19 機器: 1.10	1.01	1.07	-	-
M1M	配管: 1.20 機器: 1.20	配管: 1.29 機器: 1.04	-	-	-	-
M1FRS	配管: 1.37 機器: 1.15	配管: 1.16 機器: 1.10	-	-	-	-
M1合計	配管: 2.42 機器: 1.50	配管: 1.78 機器: 1.26	1.01	1.07	1.00	1.00

(3) M2の評価について

(a) 評価内容

M2について、強度に対しては算出された応力と許容応力、動的機能に対しては応答加速度と機能確認済み加速度を比較する。なお、応力は地震により発生する応力を用い、許容応力は地震による発生応力に対して許容できる応力値を用いており、一般的に工認等の耐震計算書に示された応力や許容応力とは異なることに注意が必要である。

(b) 評価結果

M2の範囲および平均値を表3-4に示す。

表3-4 M2評価結果

	範囲	平均値
PWR	1.44~66.08	6.45
BWR	2.47~124.3	13.43

(4) M3の評価について

(a) 評価内容

「総合耐震評価」では、M3として設計基準強度の有する裕度(M3D)を評価するとともに、動的機器については、過去の加振試験の結果に基づき、個別機器毎に機能維持確認済み加速度に対する裕度(M3ACT)を評価している(詳細は表3-5参照)。本検討では新たに得られた知見を基に以下の3項目を追加した。

M3μ: 塑性エネルギー吸収を考慮した裕度

M3PPG: 配管の許容応力に含まれる裕度

M3STR: 支持構造物の許容応力に含まれる裕度

表3-5 総合耐震評価（機器編）M3のまとめ

調査項目	調査文献	M3評価		備考	
		考察	M3		
機能確認済み加 速度値との比較	1) 動的機器の地震時機能維持に関する 研究 最終報告書(別冊No1) ～立型ポンプ～ -電力共研- 2) 動的機器の地震時機能維持に関する 研究 最終報告書(別冊No2) ～横型ポンプ～ -電力共研- 3) 動的機器の地震時機能維持に関する 研究 最終報告書(別冊No3) ～ポンプ駆動用タービン～ -電力共研- 4) 動的機器の地震時機能維持に関する 研究 最終報告書(別冊No4) ～電動機～ -電力共研- 5) 動的機器の地震時機能維持に関する 研究 最終報告書(別冊No6) ～弁～ -電力共研- 6) 原子力発電施設信頼性実証試験の現 状(平成3年)(1.4非常用ディーゼル 発電機システム耐震実証試験)	1) 軸受面圧については、地震時許容値 が規定されていないため常時の値を準用 しており、一般に短期高重に対する許容 値割増が可能なることを考慮すると、6割 以上の裕度があると推定される。	1.6以上	各部応答の評価基準より設定	
		2) 軸継手の伝達荷重算定には加振試験 結果の応答倍率の平均値を用いており、 試験結果に多少のばらつきがある。これ を考慮すると裕度は6割以下と推定され る。	1.6以下		
		3) HPCIタービンは、リップル現象 の進展による影響が不明であり、裕度の 推定困難。RCICタービンはヨーク部 応力より、約2倍の裕度、AFWPター ビンはボルト応力より約2割の裕度があ ると推定される。	RCIC:約2.0 (ヨーク部応力) AFWP:約1.2 (ボルト応力)		
		4) 各型式ともに電動機車体としては、 最小3.6倍程度の裕度があるが、被動 機側との軸継手部の評価が被動機側で実 施されるため、個々に裕度評価が必要と なる。	3.6程度		
		5) 弁型式ごとに分けた基準値とすれ ば、玉形弁8G、仕切弁7G、バタフ ライ弁10Gとすることが可能と考えられ る。	玉型弁:1.33 仕切弁:1.17 バタフライ弁:1.6 7		駆動部応答加速度6Gを基準と して裕度を設定する
		6) 限界加振試験におけるDG機関軸心 レベルの応答加速度1249Gal (1.27G)を限界加速度とみなす。	1.15		JEAG 4601-1981 追加版に示される現行評価法に おける摺付位置入力加速度1. 1Gを基準として裕度を設定す る。
加振実験(盤及 び器具)試験 データ	1) 原子力発電用計装制御装置の耐震 性に関する試験研究 - (社)日本電気協会- 2) BWR6電力及び日立・東芝による 電気品加振試験 3) 盤ラック耐震試験報告書及び耐震 計算書 4) 電気・計装機器の耐震実証試験に關 する共同研究最終報告書 -P電力共研-	(BWR) リレー類及び計装制御品類については、 水平3G、上下1Gの入力に対する健全 性が現状設計の目安値となっており、 2)によれば2倍以上の裕度があると考 えられる。一方、筐体(電気盤)は現状 Aスクラスを20Hz以上(例)の設計 としており、BWRプラントのZPAと して最大1G程度であることから、器具 類の設計条件を十分満足している。 (PWR) 耐震設計を行う際には、今後計画されて いる各プラントの床応答曲線を包絡した 床応答曲線を作成し、この床応答曲線か ら工学的判断に基づき要求加速度値を決定 する。そしてこの要求加速度値を越える 加速度値での機能維持確認試験を行う ことにより、盤及び器具の耐震性を確認 している。したがって、この時に確認さ れた加速度値が許容値となる。しかしな がら、実験により確認されている加速度 は、加振台の性能等の限界のため、必ず しも現実の安全限界の値が得られていな いが現状である。	(BWR) 限界耐力に対して現状 設計目安値は筐体(電 気盤)では2倍以上、 リレー類及び計装制御 品類(器具)では、1 ～3倍程度の裕度があ ると考えられる。 (PWR) 米国の地震PSAで品 質保証試験レベルの 2倍のレベルを中央値 としていることを参考 にして、この値を用い る。	(BWR) 左記の(社)日本電気協会による 試験及びメーカー社内試験を 参照し、現状目安値を下記として 裕度を設定する。 制御盤:1.02G(JEA G) 電源盤:1.0G(メーカー) リレー他器具:3G(メ ーカー) 計装ラック:1.0～1.5G 程度(メーカー) (PWR) 左記の試験により確認されてい る機能確認済加速度は、以下の ようになる。 制御盤:1.44～2.25G 電源盤:1.35～1.85G リレー他器具:5～10G 計装ラック:2G程度	
許容限界	原子力発電所の耐震設計技術指針(JE AG4601補-1984)許容応力編 - (社)日本電気協会-	(容器) 許容応力の基になったデータが、ASM E, Sec IIIのデータなので、現在、地 震PSA等で用いられる値を流用する。 (配管) 地震PSA等で用いられている値を流用 する。	容器) M3=1.25* (配管) M3=1.25*	*ZION Probabilisti c Safety Study, Commonwealth Edison Company, Chicago, Illinois, 1981	

(b) 評価結果

M3の評価結果を表3-6に示す。

表3-6 M3評価結果

裕度分類	機器			配管	動的機器
	耐圧部、 炉心支持構造物	1~3種支持構造物 その他の支持構造物 (主機サポート含む)	基礎ボルト	耐圧部	
M3D	1.25	1.25	-	-	-
M3μ	-	-	1.82	-	-
M3PPG	-	-	-	(3.0~)	-
M3STR	-	1.25	-	-	-
M3ACT	-	-	-	-	PWR:1.0~1.6 BWR:1.0~2.0
M3合計	1.25	1.56	1.82	(3.0~)	1.0~2.0

M3μ : 基礎ボルトについては、文献より荷重低減係数 $D_s=0.458$ が得られていることから、裕度を $1/0.458=2.18$ とした。ただし、基礎ボルトの許容応力はS2地震時 $1.2S_y$ を用いているため $2.18/1.2=1.82$ とし、総合耐震評価(機器編)にあるM3D=1.25についてはM3μに含まれるため考慮しないこととした。

M3PPG : 電共研において配管要素試験体に対する慣性加振試験が行われているが、10Sm程度でも崩壊による損傷が発生していないことから、安全余裕を3以上とした。ただしこの結果は試験結果に基づくため、M3D=1.25も含んでいることからこれは考慮しないこととした。

M3STR : ASME SecIIIのでは $1.5S_y$ を許容値として用いていることから、JEAGの $1.2S_y$ に対する安全率として $1.5S_y/1.2S_y=1.25$ を用いた。

(5) 総合評価

設計手法の裕度(M1×M3)と設計限界に上乘せする裕度(M2)と分類し、表3-7に示す。

表3-7 M1×M3およびM2

	M1×M3	M2
PWR	1.25以上	6.45 (平均)
BWR		13.43 (平均)

表3-7から、設計手法の裕度（ $M1 \times M3$ ）として1.25以上の裕度が確保され、さらに $M2$ を見込むことで顕在的設計裕度として表3-8に示す範囲の裕度が得られることが確認された。

表3-8は M の範囲（個別機器毎に算出された $\text{Min}(M1 \times M2 \times M3) \sim \text{Max}(M1 \times M2 \times M3)$ ）を示したものである。

表3-8 個別機器で算出された M の範囲

	M の範囲
PWR	2.90～95.8
BWR	5.05～186.4

$M2$ を設計裕度として見込むことに対しては議論となるところであると思われるため、 $M2$ について考察を加えることとする。実際の機器の設計においては地震以外による発生応力（内圧や自重）が支配的な要因で設計されているものが多いが、このような場合（ α が小さい場合）下式の関係から、設計者の判断でとられる裕度 β に対し $M2$ は大きくなる傾向にある。

例えば、設計者がある機器を2割の裕度をもたせて耐震設計したとすると β は1.2となるが、その機器における地震による発生応力が総発生応力に対し $1/4$ （ $\alpha=1/4$ ）であった場合、 $M2$ は1.8確保されることとなる。

$$M2 = (\beta - (1 - \alpha)) / \alpha$$

α ：地震による発生応力／総発生応力

β ：許容応力／総発生応力

また、地震が支配的な要因として設計されるような支持構造物や電気品等については、通常はその部材や機器の選定において裕度をもたせて選定されるため、 $M2$ が1.0となるようなことはないと考えられる。

以上より、 $M2$ は、通常の設計でそれなりに確保されるものであり、結果論ではあるが、あるプラントの場合、表3-8に示す値程度は確保されていることが実績として示されたものと考えられる。

3.2 建屋

建屋の顕在的設計裕度は、前述の評価方針のとおり総合耐震評価結果に基づき、耐震設計に内在する裕度を整理した。

(1) 評価対象プラントおよび想定地震動

評価対象プラント、支持地盤及び想定地震動を表3-9に示す。

S2 地震時の建屋の健全性を保つために重要な構造要素は、鉄筋コンクリート造耐

震壁（以下、「RC耐震壁」と記す）であるため、建屋の限界は耐震壁の構造限界とし、個々のRC耐震壁について評価を行っている。また、RC耐震壁の構造限界は、現行設計におけるS2地震時機能維持検討法に従い、終局状態におけるせん断ひずみとする。したがって、ここでの検討においては、応答値及び限界値は、せん断ひずみ度で定義している。

想定地震動は、S1地震動にほぼ弾性限度となるように設計された原子炉建屋を想定して検討を実施するために用いる地震動であり、耐震設計上のマージンを含まないことを考慮して、S1地震時に最大応答を示す耐震壁のせん断応力度（せん断ひずみ度）が復元力特性の骨格曲線の第一折点付近となるように、表3-9に示すS2地震動を係数倍して用いている。

表3-9 評価対象プラント及び支持地盤、S2地震動

建屋	支持地盤のせん断波速度	S2地震動（改良標準化委員会作成）
BWR型Mark-I建屋	1000 m/s	高地震地帯用遠距離波
BWR型Mark-II建屋	500 m/s	低地震地帯用遠距離波
PWR型3-Loop建屋	2000 m/s	高地震地帯用遠距離波
PWR型4-Loop建屋	1500 m/s	高地震地帯用遠距離波

(2) M1の評価

M1（応答の裕度）は、現実的応答のせん断ひずみ度と、設計モデルによる応答せん断ひずみ度の比としている。

現実的応答は、現在の知見の範囲内で、可能な限り影響因子の変動を考慮し、かつ、その影響因子に内在する安全率をできるだけ排除して評価したS2地震時応答としている。影響因子としては、現実的応答の評価に対する影響が大きいと考えられる因子に対して感度解析を行った結果、以下の3因子を選定している。

- ① コンクリート強度
- ② 支持地盤のせん断波速度（地盤ばねへの反映）
- ③ RC造耐震壁の復元力特性（ τ - γ 関係スケルトンカーブ）

これらの影響因子を変動させ、非線形地震応答解析により現実的応答を評価し、その中央値と設計モデルによる応答せん断ひずみ度の比を、M1とした。

$$M1 = \text{設計応答せん断ひずみ度} / \text{現実的応答せん断ひずみ度}$$

(3) M2の評価

M2（設計裕度）は、設計モデルにより評価される応答せん断ひずみ度と、設計

用許容せん断ひずみ度 (2×10^{-3}) の比としている。

$$M2 = \text{設計用許容せん断ひずみ度} / \text{設計応答せん断ひずみ度}$$

(4) M3の評価

M3 (限界の裕度) は、現実的限界 (終局せん断ひずみ度) と設計用許容せん断ひずみ度 (2×10^{-3}) の比としている。

現実的限界は、過去に実施された RC 耐震壁を対象とした 4 4 体の模型試験体の静的水平加力実験結果から得られた終局せん断ひずみ度の中央値としている。また、終局せん断ひずみ度は、ボックス壁と円筒壁に分類して評価した。表 3-10 に実験結果から得られた終局せん断ひずみ度を示す。

$$M3 = \text{終局せん断ひずみ度の中央値} / \text{設計用許容せん断ひずみ度}$$

表 3-10 RC 耐震壁の終局せん断ひずみ度

	中央値
ボックス壁 (Mark-I, II)	5.21×10^{-3}
円筒壁 (3-, 4-Loop)	9.30×10^{-3}

(5) 総合評価

表 3-11 に安全裕度の評価結果を示す。建屋のせん断ひずみ度を評価尺度とした耐震安全性指標 (M) は、15.2~22.4 である。

なお、評価結果は、各建屋部材の中で M の中央値が最小となる部材について示している。

表 3-11 評価結果

建屋	M1 応答の裕度	M2 設計裕度	M3 限界の裕度	M 全体での裕度
	設計応答 / 現実的応答	設計限界 / 設計応答	現実的限界 / 設計限界	現実的限界 / 現実的応答
MARK-I	2.05	3.21	2.60	17.1
MARK-II	1.52	3.86	2.60	15.2
3-LOOP	1.50	3.18	4.65	22.2
4-LOOP	1.71	2.82	4.65	22.4

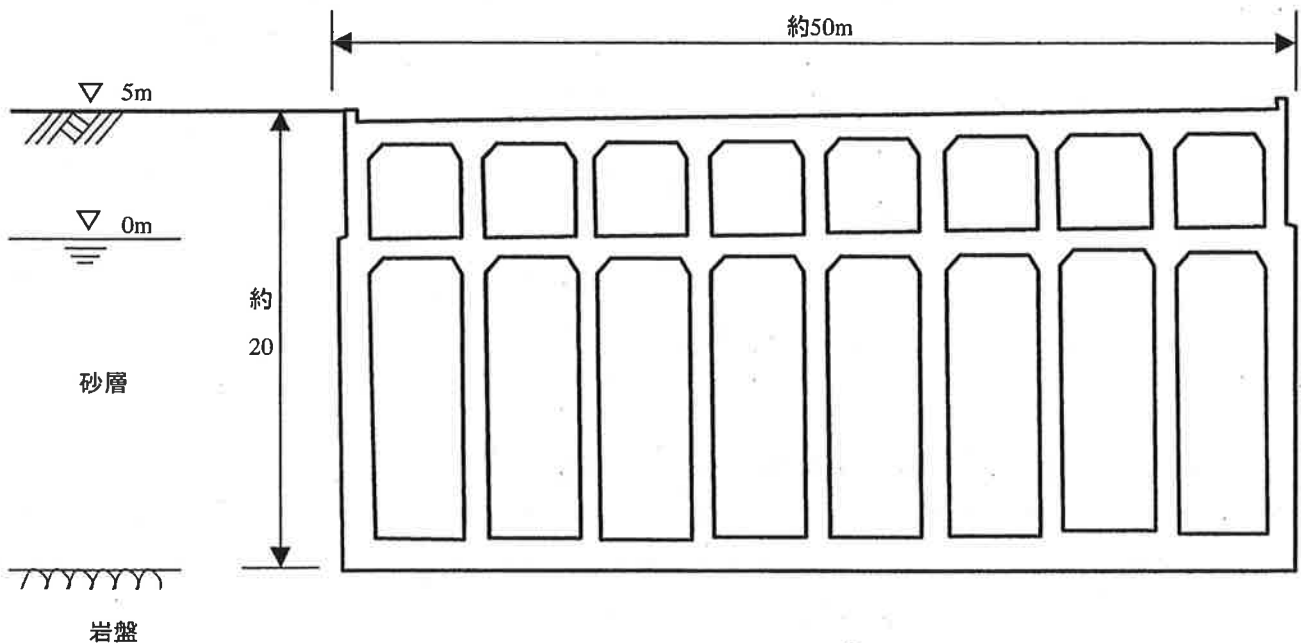
3.3 土木構築物

土木構築物については、「原子力プラントシステムの総合耐震安全性評価法に関する調査報告書」では検討対象となっていないことから、同報告書（建築編）を参考に検討を行った。

(1) 検討対象構築物および検討用地震動

土木構築物は、各サイト毎に地形・地質状況、構築物配置などが異なるため、標準的な安全裕度を定量的に把握することは困難であることから、下に示す標準的なモデルを対象に検討を実施した。

a. 検討対象構築物・・・・・・・・・・取水ピット



b. 検討用地震動・・・・・・・・・・最大加速度が 300gal 程度の地震動

最大加速度が 600gal 程度の地震動

(2) M1 の評価

応答の裕度 (M1) は、設計時に与える条件 (地盤物性やコンクリート強度など) の裕度といえる。設計で与える条件に関しては、建築で扱う構築物も土木で扱う構築物も大きな差はないと考えられる。しかし、土木構築物は一般に地中構築物であり、その地震時応答は地盤の応答に支配されると考えられ、設計時に与える条件による裕度が建築で扱う構築物より小さい可能性がある。

そこで、ここでの評価としては、原子力発電耐震設計特別調査委員会「(建築編) 調査報告書」に示されている最小値を参考に以下のとおりと考える。

$$M1 = 1.0 \sim 1.5$$

(3) M2の評価

設計の裕度 (M2) は、合理的な設計を実施すれば1に近い値になると考えられる。実際の設計では若干の裕度を考慮するものと考え、ここでの評価としては以下のとおりと考える。

$$M2 = 1.1$$

(4) M3の評価

土木構造物の耐震設計手法については、従来、許容応力度手法により設計されてきたが、現在では、構造物の変形性能に着目して性能照査型の設計体系へ移行されてきている。コンクリート標準示方書がよい例である。

構造物の現実の安全限界については、大型振動台を用いた実験および数値解析により検討してきたが、現状では限界の裕度 (M3) すなわち現実の安全限界を評価するのは難しいと考えられる。

したがって、ここでは各設計手法 (①許容応力度設計 [線形解析], ②耐力照査設計 [等価線形解析], ③変形性能照査設計 [非線形解析]) の間にある裕度を把握し、限界の裕度 (M3) として評価することとした。

a. ①許容応力度設計と②耐力照査設計の間の裕度

両設計手法の比較は、「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全性照査マニュアル」(土木学会 原子力土木委員会 1992.9) に記載がある。取水ピットについて同一地震動を用いて両手法により設計した場合、耐力照査設計によれば許容応力度設計に比べて断面力が低減し、鉄筋量を20%程度減らすことができるとしている。

したがって、①許容応力度設計と②耐力照査設計の間には、若干の裕度(2割程度)があると考えることができる。

b. ②耐力照査設計と③変形性能照査設計の間の裕度

最大加速度300gal程度の地震動を用いて耐力照査設計した取水ピット構造物に、最大加速度600gal程度の地震動を与えて、変形性能照査設計(「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・同マニュアル」(土木学会 原子力土木委員会 2002.5)に記載の手法)で照査することで両設計手法間の裕度を把握した。この結果、最大加速度600gal程度の地震動を与えても耐震安全性を有することを確認した。

したがって、②耐力照査設計と③変形性能照査設計の間には、地震動で少なくとも2倍程度の裕度があると考えることができる。

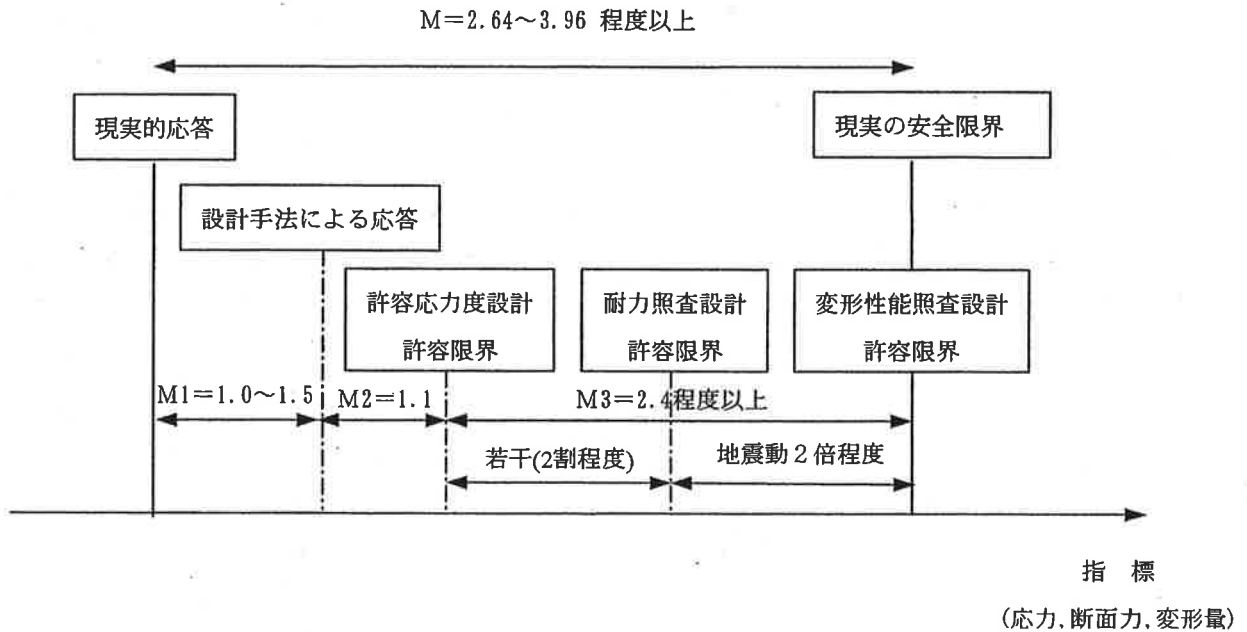
以上のことから、限界の裕度 (M3) の評価としては以下のとおりと考える。

M3 = 2.4 程度

(5) 総合評価

(2) ~ (4) の評価結果から、土木構造物の顕在的デザイン裕度は少なくとも以下のとおりと評価することができる。

M = 2.64 ~ 3.96 程度以上



4. 潜在的デザイン裕度

本項において、現状では明確に定量化することは難しいが、潜在的に保持しているものと考えられる裕度について考察する。

4.1 機器・配管系

(1) M1に関する潜在的デザイン裕度

「総合耐震評価」で考慮した現実的減衰値は、既往試験事例から平均値的発想で一律で定めたものであるが、減衰のメカニズムに立ち返ると、応答変位に依存しないものと、変位の増大に伴い増減するものに区別できる。ここで、応答変位が大きくなるにつれ減衰値が増すような構造のものについては、S2相当の地震動に対して潜在的デザイン裕度を有しているものと考えられることができる。

また、一般の床置機器で配管が設置されている場合等、付属物の影響（例えば、

タンクに接続されている配管や水位計等)で付加される減衰が期待でき、水中に設置されている構造物等は、流体による付加減衰が期待できるものと考えられる。

2(3)cにおいて今回新たにM3として、材料が一部塑性変形することによりエネルギーが吸収されることによる効果について、文献により知見の得られた基礎ボルトにのみ取り込んでいるが、他の構造物についても同様な応答低減効果があるものと考えられる。

他に一般論として展開できるものではないが、個々の設備のモデル化において多くの場合安全側に設定される強度負担断面、モーメントアーム、境界条件、接合条件、内包流体の水位等による影響についても潜在的裕度のひとつとして考えられる。

(2) M3に関する潜在的設計裕度

M3に関連するものとして、機器・配管系の損傷モードは、地震による振動の一回の慣性力で崩壊するようなものではなく、交番荷重であるがゆえ、負荷は変位制御的に作用し最終的には疲労モードで破壊に至るといふ、最近得られつつある知見がある。

したがって疲労に対する裕度がクリティカルと仮定し、疲労評価における裕度に着目した場合、現行の耐震設計の疲労評価に用いられる設計用疲労曲線はベストフィット疲労曲線から、応力で2倍と回数で20倍の安全率が設けられていることを裕度として考えることができる。さらに、設計で考慮する最大発生応力の等価繰返し回数においても、耐震設計用に作成する人工地震波が自然地震波と比較して総エネルギーが大きく設定される傾向にあることに加え、全原子力プラントの全床レベルで一律に使用できるように包絡し、かつ余裕を持たせて回数が設定されることに裕度があるものと考えられる。

4.2 建屋

建屋における潜在的設計裕度としては、M3に関連して、定量化が困難ではあるが、設計では耐震要素として考慮していない間仕切壁による耐力を現実的限界に加算できると考えられる。

4.3 土木構築物

(1) M1に関する潜在的設計裕度

土木構築物は、実際には三次元の構造であるが、保守的に二次元でモデル化して応答計算を実施することが多い。この三次元効果が潜在的な裕度と考えることができる。

(2) M3に関する潜在設計裕度

現実の限界については、数多くの実験を実施して把握するのがよいと考えられるが、現実には困難である。このため、設計のための限界値は安全側に設定せざるを得ない。

今回の検討では、各設計限界値間の裕度を評価したが、実際には現実の限界までの裕度が存在している。

5. (財) 原子力発電技術機構 耐震実証試験を踏まえた裕度の考察

これまでの検討において、顕在的設計裕度は「総合耐震評価」を基にした定量的評価を、潜在的設計裕度は定性的に考察を行うことで、耐震設計に内在する裕度を検討してきた。本項では、原子力施設の重要な設備の振動試験を行ってきた耐震実証試験結果を基に耐震設計に内在する裕度を検討する。

耐震実証試験は昭和57年から(財)原子力発電技術機構(以下、NUPEC)によって行われており、表5-1のとおり設計想定を超える入力に対し、機器が損傷しないことを確認してきた。

5. 1 耐震実証試験

耐震実証試験において、試験体の破損まで加振すれば、潜在的設計裕度も含めた耐震設計に内在する設計裕度を定量的に把握することが可能となる。当初の耐震実証試験における加振レベルは、振動台の加振限界等から設計想定 1.5 倍程度の加振に止まっており、破損に至ってない。一方、近年の耐震実証試験(コンクリート製原子炉格納容器および配管系終局強度)では、終局状態の把握を目的に試験体の破壊試験を実施しており、本検討に有用な試験結果が得られている。

表5-1 NUPEC 耐震信頼性実証試験で確認された耐震裕度

実証試験名称	縮尺	試験体重量	主要構成	確認された耐震裕度
PWR原子炉格納容器	1/3.7	350t	鋼製格納容器（機器搬入口、エアロック、ポーラクレーン等を含む）	1. 5×S2水平・上下同時入力にて耐震設計上の裕度を確保
BWR再循環系配管	1/1	665t	1ループ（配管、ポンプ、バルブ、サポートを含む）、支持構造物等	1. 1×S2水平・上下同時入力にて耐震設計上の裕度を確保
PWR炉内構造物	1/1	555t	燃料集合体一式、炉内構造物一式、制御棒駆動装置2基、支持構造物等	1. 5×S2水平・上下同時入力にて耐震設計上の裕度を確保
BWR炉内構造物	1/1	750t	燃料集合体一式、炉内構造物一式、制御棒駆動装置1基、支持構造物等	1. 7×S2水平・上下同時入力にて耐震設計上の裕度を確保
BWR原子炉格納容器	1/3.2	350t	MARK-II改良型鋼製格納容器（機器搬入口、所員用エアロック等を含む）	1. 4×S2水平・上下同時入力にて耐震設計上の裕度を確保
PWR一次冷却設備	1/2.5	525t	1ループ（一次冷却材管、蒸気発生器、一次冷却材ポンプ、サポートを含む）、支持構造物等	1. 5×S2水平・上下同時入力にて耐震設計上の裕度を確保
PWR原子炉容器	1/1.5	700t	4ループ用原子炉容器（ノズル、原子炉容器、支持構造物、全体サポート等を含む）	1. 6×S2水平・上下同時入力にて耐震設計上の裕度を確保
BWR原子炉圧力容器	1/2	600t	原子炉容器（ノズル、支持構造物、スタビライザ等を含む）	1. 7×S2水平・上下同時入力にて耐震設計上の裕度を確保
非常用ディーゼル発電機システム	1/1	450t	ディーゼル機関、発電機、付属設備、コンクリート基盤	1. 3×S2水平・上下同時入力にて耐震設計上の裕度を確保
電算機システム	1/1	81t	計算機システム、中操表示盤、オペレータコンソール、免震装置	水平・上下同時入力にて耐震設計上の裕度を確保
原子炉停止時冷却系等	1/1	294t	計装、計装盤、制御盤、電源盤系統、機器系統設備	1. 5×S2水平・上下同時入力にて耐震設計上の裕度を確保
主蒸気系等	約1/2.5	約190t	主蒸気配管、主給水配管、支持構造物等	1. 5×S2水平・上下同時入力にて耐震設計上の裕度を確保
コンクリート製原子炉格納容器	約1/10	約760t	プレストレスコンクリート製原子炉格納容器（PCCV）（機器搬入口、エアロック、ライナ等を含む）	S2の3～8倍の水平加振実験・解析の結果からS2の約5倍の耐震設計上の裕度を確保
	約1/8	約560t	鉄筋コンクリート製原子炉格納容器（RCCV）（アクセストンネル、ライナ等を含む）	S2の2～9倍の水平加振実験・解析の結果からS2の約7倍の耐震設計上の裕度を確保

5.2 破壊試験を踏まえた裕度の考察

NUPEC耐震実証試験では、コンクリート原子炉格納容器および配管設備の破壊試験が行われた。

コンクリート原子炉格納容器については、平成11年度原子炉発電施設耐震信頼性実証試験に関する報告書にその成果がとりまとめられており、破壊試験結果を踏まえた解析の結果、PCCV、RCCVのS2地震動に対する耐震裕度がそれぞれ約5倍、約7倍であ

るとの結果が得られている。

配管設備の破壊試験は、平成15年2月に行われ今後解析等により終局強度の検討がなされる予定である。試験では、S2地震動に対する許容限界の約8.5倍の応答変位を与えた加振でも健全性が確認されている。この裕度には、M2の裕度が含まれていないため、実際の配管設備には更に裕度があるものと考えられる。

6. まとめ

本検討では、耐震設計審査指針に適合するよう設計された原子力施設の耐震設計に内在する裕度について評価を行った。その結果、顕在的裕度として最低でも約3倍の裕度があることが確認した。また、全ての施設に有すると考えられる潜在的設計裕度を加味すれば、耐震設計に内在する裕度は、それ以上を見込むことが可能であり、一部の施設について行われたNUPERC耐震実証試験における破壊試験からも確認できる。

以上

設計用基準地震動策定に係る確率論的手法の導入について

1. まえがき

本資料は、国内外の確率論的設計手法の動向と我が国の原子力施設を対象にした確率論的設計手法に係る調査・検討状況について展望したのち、我が国の原子力施設の耐震設計において採用すべき確率論的設計手法について考察し、克服すべき課題について整理の上、設計用基準地震動の策定に係る確率論的手法の導入の見通しについてまとめたものである。

2. 海外における確率論的設計手法の事例

(1) IAEA Nuclear Safety Standards Series

IAEAのメンバー国を対象に、個々の国が設計体系を構築する場合の標準的な設計方法を示している。確率論的手法に関連した記載を以下に示す。

- ・ DS 305(委員会審議中): Safety Requirements – Site Evaluation (安全要求—立地評価) は、地震ハザードは確率論的アプローチにより検討することを推奨し、地震ハザード評価に基づき設計用地震動を設定することが述べられている。
- ・ DS 302(発行済): Seismic Hazard Evaluation for Nuclear Power Plants (原子力発電所における地震ハザード評価)は、設計用地震動 SL2 および SL1 のレベルとして、それぞれ 10^{-3} ~ 10^{-4} および 10^{-2} の年超過頻度の地震動に相当するとの例を挙げている。

(2) 米国の立地基準の改定

米国 NRC は 1996 年 12 月に立地基準を改定した。この中で、安全停止地震 SSE の評価方法が規制指針 RG1.165 にまとめられた。

この手法の策定の背景としては、ロッキー山脈以東の歴史地震データや活断層データの少ない地域において、確定論的手法による設計用地震の設定を国民に合理的に理解してもらうことは難しいと判断し提案されたものである。適用地域としては、ロッキー山脈以東はもとより以西にも適用できるものの、関連データが十分整備されている地域の場合、他の手法を用いても良いとされている。

同手法は、地震ハザード評価を実施し、参照確率(10^{-5} /年)における寄与地震の平均マグニチュード M と平均震央距離 X を算出し、 (M, X) に対する応答スペクトルを設計用地震動 SSE の策定に使用する、というものである。また、耐震設計要求は、耐震カテゴリー設備は SSE に対し所用の機能を維持することが求められる。

(3) ISO

(原子力)

ISOの Nuclear power plants-Design against seismic hazards (原子力プラントの耐震設計) では、地震ハザード評価を実施し、プラント寿命中の超過頻度が受容できる程度に低い地震動のレベルおよびスペクトルを決定することが述べられている。また、これを実施する際には、地震記録が十分にあり地震発生確率モデルが作成できることが必要であるとしている。

(原子力以外)

Bases for design of structures-Seismic actions for designing geotechnical works (ISO/WD23469 1st draft) — 構造物の設計の基本—地盤基礎構造物への地震作用—

これは第1ドラフトであり、2005年6月の公開にむけ作業が進められている。

以下に「要求性能」と「基準地震動」について述べる。

- ・ 要求性能は、使用限界状態（使用性が確保される限界の変位で定義され、地震時及び地震後の使用性を満足する限界）と安全限界状態（終局限界状態で定義され、地震時及び地震後の安全性を満足する限界）に大別される。
- ・ 基準地震動は、2つの要求性能に対し、使用性照査用地震動（対象構造物の供用期間に発生するであろう地震動）と安全性照査用地震動（発生する確率は低いが非常に大きな強度を持つ地震動）に大別される。これらの地震動は、地震ハザード解析によって求められ、2つの方法（確定論的地震ハザード解析、確率論的地震ハザード解析）が併記されている。

確定論的地震ハザード解析では、震源位置、断層規模、メカニズム等の地震シナリオを選定した上で、そのような地震が発生した場合の地震動を評価する。この解析では、地震の発生確率を考慮しないが、地震発生確率以外のパラメータ設定に係わる不確実さについては適宜考慮することが示されている。

これに対し、確率論的地震ハザード解析は、構造物の供用期間中の発生確率を設定し、その発生確率に対応した地震動を評価する。評価において不確実さは考慮されている。

これ以外としては次のものがある。

- ・ ISO 2394 :1998, General principles on reliability for structures
構造物の信頼性に関する一般原則

- ・ ISO 3010 : 2001, Bases for design of structures-seismic actions on structure
構造物の設計の基本—構造物への地震作用
- ・ ICC Performance Code for Buildings and Facilities (ICC, 2000)
建築物と設備のための ICC 性能コード

3. 我が国における確率論的設計手法の事例

我が国は WTO/TBT 協定に 1996 年に加盟し、「仕様規定に基づく規定ではなく、性能に基づく規定」というコンセプトを承認し、国際社会と同一歩調をとることとした。

3.1 各分野の動向

(1) 建築分野

平成 12 年 6 月施行の建築基準法では、従来の許容応力度設計法に加えて、限界耐力計算による設計が追加され、設計者の判断によりいずれの設計法も適用可能となっている。限界耐力計算では損傷限界と安全限界が定義され、従来の「仕様」に基づく規定から「性能」に基づく規定への改定となっている。

しかし、決定論的に断面設計を行い、保有耐力確保を確認する設計法となっており、一般に言われている性能規定化とはかなり異なったものとなっている。

建築分野における確率論的設計手法を扱ったものとしては、以下がある。

- | | |
|--------|--------------------|
| 日本建築学会 | 「建築物荷重指針・同解説」 |
| 同 | 「鋼構造物限界状態設計指針・同解説」 |
| 同 | 「建築物の限界状態設計指針」 |

これらの中で、確率論的設計法の略算法として「荷重・耐力係数法」が採用されている。これは、荷重効果の基本値に安全係数（荷重係数）を乗じたものと、耐力に安全係数（耐力係数）を乗じたものの対比によって、目標信頼性指標（ β_T ）を確保しようとするものである。また、設計用の限界状態として使用限界状態と終局限界状態（安全限界）を定めている。終局限界状態における地震荷重については、暫定的に 50 年再現期待値（地動最大加速度 200Gal、加速度応答スペクトルフラット部分 500Gal）に対して荷重係数 2.0 とすると、現行の建築基準法（決定論的設計手法）での二次設計の地震荷重（ $C_0=1.0$ ）に相当し、このときの信頼性指標（ β_T ）は 1.5（キャリブレーションした結果）に相当するとされている。

ただし、現行法では建築基準法に従って設計しなくてはならないので、この手法を実際の建築物の設計に適用した実績はまだない。

(2) 土木分野

土木分野における確率論的設計手法を扱ったものとしては、以下がある。

「LNG 地下タンク 躯体の構造性能照査指針」

「鉄道構造物等設計標準・同解説」

「コンクリート標準示方書」

いずれも性能照査型設計体系が導入され、その手法として「部分安全係数法」が採用されている。これは、照査用応答値（荷重効果）と照査用限界値（耐力）のそれぞれの各要素に安全係数を導入し、その積み重ねとして構造物の安全を確保しようとするものである。また、構造物の耐震性能レベルとしては、耐震性能 1（健全、地震後補修せずに機能を保持）、耐震性能 2（機能維持、地震後早期に補修可能）、耐震性能 3（崩壊せず）を定めている。照査用地震動レベルはレベル 1 地震動（耐震性能 1 に対応）とレベル 2 地震動（重要度に応じ耐震性能 2、3 に対応）を定めている。レベル 1 地震動は供用期間中に 1、2 回程度遭遇すると考えられる地震動であり、レベル 2 地震動は供用期間中に発生する確率は小さいが起こり得る強い地震動と定義している。

なお、これらの地震動については現在土木学会において、レベル 1 地震動は確率論的に、レベル 2 地震動は確率論及び確定論併用（シナリオ地震の不確定性及び供用期間中の発生確率を考慮した地震動）により評価する方向で検討されている。

また、土木分野でも以上の確率論的設計手法を実際の構築物の設計に適用した実績はまだない。

土木学会では、平成 13 年度から 2 年計画で、「性能設計体系における合意形成・評価手法に関する研究小委員会」にて、土木構造物の性能目標の設定も含めた設計体系に関する検討を進めている。

(3) 機械分野

機械分野では確率論的設計手法を設計指針の形でまとめられたものは無い。

(4) 原子力分野

土木学会原子力土木委員会から「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針（案）及びマニュアル」が発行されている。概要については、4章(3)で述べる。

3. 2 原子力施設の耐震要求レベルと留意点

(1) 原子力施設の耐震要求レベル

確率論的設計手法の特徴は、構造物の性能を確保し目標とする安全性（目標信頼性指標）を実現するための設計手法として位置付けられる。従って、目標とする安全性をどこに定めるかによって、構造物の耐震グレードが違ってくる。

例えば、一般建築に適用される建築学会の「建築物の限界状態設計指針」では、50年再現期待値の地震荷重（地動最大加速度 200Gal、加速度応答スペクトルフラット部分 500Gal）の信頼性指標（ β_T ）1.5 (6.68×10^{-2})としている。一方、代表的原子力施設を対象とした試解析例では、40年再現期待値で信頼性指標（ β_T ）が 3.0 (1.35×10^{-3})程度以上（一部、2.3 (1.07×10^{-2})程度もある）が得られており、原子力施設は一般建築より格段に高い耐震安全性を有していることがうかがえる。

このことは、放射性物質を多く含む原子力施設の損傷が起因する放射線災害を防止するため、一般建築が破壊するような大きな地震が起きた場合でも、その健全性を維持するとの考え方が反映されているものと考えられる。

また、IAEA の INSAG-5 が提案する地震時の安全目標は、新設炉で 10^{-5} /炉年（既設炉 10^{-4} /炉年）とし、世界的にみても同様に大きな安全性を要求している。

(2) 留意点

地震時の合理的な安全余裕の評価に確率論的方法を導入する場合は、その信頼性を高めるために、地震・地震動データの収集・整備や、地盤、建屋、機器・設備及び土木構造物の材料や耐力データの収集・整備はもとより、設計用地震動の評価手法や地震応答解析法等の精度の向上にもつとめる必要がある。

4. 我が国における原子力発電施設の確率論的設計手法の調査・検討状況

NUPEC、原研及び土木学会原子力土木委員会で検討された確率論的設計手法の概要を以下に示す。

(1) NUPEC「確率論に基づく基準地震動の検討」

設計用の基準地震動を確率論的に評価する手法について委員会を通して検討された。さらに、それにもとづく耐震設計体系の暫定案を検討している。この暫定案はNUPECの事務局案であり、委員会で未審議の内容である。今後、審議の予定とされている。概要を付録-1に示す。

(2) 原研「確率論的地震危険度評価に基づく設計用想定地震の設定法」

米国の立地基準(NRC,1996 改訂)と同等の手法である。地震に対する確率論的安全性評価手法を構成する評価項目の一つである確率論的地震危険度解析を拡張し、将来サイトに影響を及ぼす可能性のある地震の諸元(規模、距離)及び地震動を評価する手法の、耐震設計への有用性を見通しを示している。

考察として、原子力プラントサイトを対象として、評価条件の設定に伴う不確実さを考慮して確率論的に設計用想定地震を設定するための評価技術として有用であることが述べられている。

(3) 土木学会原子力土木委員会による指針

土木学会より「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針(案)及びマニュアル」が発行されている。ここでは構造物の耐力については性能設計を指向したものとなっているが、地震動については現行の「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」のS1、S2地震をそのまま採用することとなっている。

耐震性能照査フローを付録-2の付図-3に示す。

5. 我が国の原子力施設の耐震設計において採用すべき確率論的設計手法

原子力施設の個々の機器・設備の重要度を損傷確率の観点で差別化した設計法が望ましい。また、材料強度、外力、応答及び限界の評価等における不確実性を考慮した合理的な損傷確率(信頼性)を確保すべきである。

これらを考慮すると、現在において最も実用的な設計法は「限界状態設計法」であると考えられる。以下、我が国の原子力施設の耐震設計において採用すべき確率論的設計手法として、限界状態設計法を採用した場合の各段階での考え方を以下に示す。(図-1参照)

① 目標性能の設定

地震時に確保すべき原子力施設の性能を明示する。次に、種々の不確実性を考慮したときの性能を確保するための Safety Goal の考え方を示すとともに、具体的な指標を示す。限界状態設計法では指標として信頼性指標 β で示すが、 β は損傷確率 Pf に換算できるため、この設計法では性能を損傷確率で示すことができる。

② 設計用地震動の評価

原子力発電所の安全性評価において影響の大きな要因の一つとして地震動があり、合理的に設計用地震動を評価する必要がある。

原子力施設が立地されるサイト近傍の地震活動度を詳細に調査し、歴史地震データや活断層データを用いてサイトに発生する地震動の発生確率を評価する地震ハザード解析手法に基づく方法が考えられる。この手法では最大加速度距離減衰式に基づく方法と、加速度応答スペクトルに対する距離減衰式方法がある。

最大加速度距離減衰式による地震ハザード解析結果は設計用地震動の最大加速度の評価に適用できる。一方、加速度応答スペクトル距離減衰式による地震ハザード解析結果は一様ハザードスペクトルとして評価できるため、設計用地震動のターゲットスペクトルの設定に用いることができる。地震動の継続時間や包絡関数の評価にはマグニチュード M と震央距離 Δ が必要であるが、地震域の貢献度に基づき確率論的な手法で設定する方法が提案されている。

性能を満足するための設計用地震動として、具体的には、荷重耐力設計法の概念を適用した確率論的評価方法の導入も有効であると考えられる。即ち、地震動のばらつきを荷重項とし、要求性能に対するプラント脆弱性曲線を耐力項として信頼性指標 β を確保しようとする方法である。

③ 限界状態設計(断面設計)

設計に考慮すべき地震動が入力するときの原子力発電施設の耐震性能を確保するための各コンポーネントの限界状態を明示し、要求性能に関する事故シーケンス解析を考慮した断面設計法である。要求性能を確保するために各コンポーネントが保持すべき条件付損傷確率(信頼性指標 β)の算定方法を併せて示すことにより、限界状態設計に基づく断面設計が可能となる。

各コンポーネントの限界状態は原子力発電施設に要求される性能に係るものとして設定する。即ち、それぞれの支配的な損傷モードにもとづき、応力、ひずみ、加速度、変位等の限界を試験データに基づき設定する。

従来 of S1 地震を対象とした弾性設計は、S2 地震時の要求機能の維持に係る安全余裕を確保することに対し大変に有効であると言えることができる。しかし、限界状態に対して直接的に安全性を確保する設計では、必ずしもそのステップを踏む必要がない。

限界状態設計用地震動に対する建屋、機器・設備・配管系の応答解析では、相互作用ばね(基礎浮上り含む)や耐震壁等の耐震要素の非線形特性等について最新の知見を反映して評価することは従前の設計法と同じである。しかし、それらに不確実性があると判断される場合は、感度解析等を実施して影響の大きなパラメータを抽出した上で、適切な変動解析により応答のばらつきを評価する。建屋応答に係る不確実性としては、地盤物性、コンクリート強度、減衰定数等が考えられる。

現行耐震設計審査指針で考慮している荷重組合せも、各荷重のばらつきを考慮して確率論的に扱うことが求められる。

6. 確率論的手法の各項目毎の検討状況と残された課題

5章で示した確率論的基準地震動を用いた設計体系において、課題となる項目を以下に示す。なお、課題は確率論的手法における技術的な成熟度合や、説明性の観点から抽出した。なお、課題の一部は現行の確定論的手法に共通のものもある。

(1) 目標性能の設定

① 性能の明示

原子力施設の地震時の目標性能(安全を確保すべき状態)を明示することにより、一般公衆に対する説明責任が容易となるとともに、合理的な設計体系が構築可能となる。

目標性能として、炉心損傷という工学的な性能とするか、事故が起きた場合の公衆に対する影響度で評価するか等、明示する必要がある。

② 地震事象を含む適切な安全余裕の確保

安全余裕の指標としては、従来は確定的に評価される応答と耐力の比としての安全率(安全余裕度)を用いている。この方法では種々の不確定要因によるばらつきの大小が考慮されていないため、応答が耐力を超える可能性が評価できない。

一方、限界状態設計法のような確率論的手法に基づく耐震設計法においては、安全余裕の指標として不確定要因によるばらつきを考慮した信頼性指標 β を適用している。信頼性指標 β が同じであれば損傷の可能性は同じと評価される。不確定要因によるばらつきには、避けられないランダムなばらつき(Randomness)と、評価誤差に起因するばらつき(Uncertainty)が存在する。

安全余裕の目標値(信頼性指標 β 等)は、所謂「安全目標」との整合が必須であるが、その決定には多くの検討が必要とされている。

(2) 設計用地震動の評価

① 地震データの整備

地震観測記録データには大きな振幅の記録が含まれていないため、距離減衰式を回帰分析から評価する場合、データの範囲外は外挿して評価することになる。この結果、地震ハザード解析において大振幅領域の評価結果の信頼性が課題となる。そのため、観測データや活断層データの蓄積が必要である。活断層については断層パラメータが次第に明らかにされてき

ている。一方、地震観測記録データについてはいつ得られるか分からないため、距離減衰式の精度向上は飛躍的には望めない。

② 地震動の評価法の改善案

1) 地震ハザード評価法

従来の距離減衰式による地震動のばらつき(評価誤差)は、地震動レベルによらず一定としているため、地震動が大きい領域で地震ハザード解析結果の不確実さに大きく影響する。

距離減衰式(観測記録の回帰式)の検討は、大きな地震による大きな振幅の観測記録が特に必要となっている。これまでの10年間で、地震の発生メカニズム毎の距離減衰式が提案され、また振幅が大きいと距離減衰式のばらつきは小さくなるとの知見が得られる等、距離減衰式の不確定さの評価は大きく進展してきている。

サイト近傍の断層から発生する地震動の評価法として断層モデルによる評価法が近年急速に進歩してきた。しかし、深部地盤構造や破壊メカニズムが事前に評価できないため設計手法としては実用に至っていない。

2) 確率論的基準地震動の最大加速度レベルに対応する地震動波形の評価法

設計用地震を最大加速度の地震ハザード解析から評価する場合、その最大加速度に対応する地震動波形を作成する必要がある。最大加速度の発生確率と同じ発生確率の一樣ハザードスペクトルをターゲットスペクトルとし、 M と Δ を適切な方法により設定して、継続時間や包絡関数を評価する方法が考えられるが、まだ評価法は確立されていない。

(3) 限界状態設計(断面設計)

① 耐力データベースの整備

地震PSAが近年数多く実施され、建物・構築物、機器・設備・配管系の耐力データが、試験結果等により合理的に評価されるようになってきた。しかし、その多くは米国データを適用したり、確証試験データに基づくなど十分ではない。我が国ではNUPECにおいて、改良標準化以後の代表的プラントにおける安全上重要な機器を対象に試験が実施されているが、さらに改良標準化以前のプラントにおける重要機器やローカルな重要機器を含め、逐次データを整備し、客観的に見て合理的な耐力の評価法が確立される必要がある。

② 他の荷重との組合せ

通常時運転時荷重、事故時荷重、温度荷重、施工荷重、試験荷重等の各荷重の確率論的な扱い方と、荷重組合せ時の限界の設定等について体系化する必要がある。荷重の確率論的な扱いとは、各荷重の分布形状、発生頻度、継続時間を考慮して、同時発生確率をベースに荷重組合せ方法を決定することである。また、荷重組合せが異なれば損傷モードも違ったものになることが考えられ、荷重組合せ毎の限界状態の定義が必要である。

③ 個々のコンポーネントが保持すべき信頼性の評価法

限界状態設計用地震動に対するプラント全体の保有すべき炉心損傷確率が与えられたとき、個々のコンポーネントが保持すべき損傷確率の評価法が確立されていない。炉心損傷確率等の評価は事故シーケンス解析により評価されるため、この解析プロセスを考慮して評価する必要がある。

(4) 性能照査設計

限界状態設計用の地震動により個々のコンポーネントの安全性を確保した場合でも、大きな地震入力により目標性能を維持するための安全システムが影響を受けると考えられる場合は、性能照査を別途行う必要がある。また、コンポーネントが損傷を受けてもシステムで安全性をカバーできる場合は、それを考慮して性能を確認する必要がある。

7. 結論

確率論的手法による耐震設計体系の構築にあたっては、目標性能の設定と安全余裕の具体的評価法、地震動評価に係る大振幅の観測データ不足や評価誤差の扱い、プラント全体の安全性の確保に必要な個々のコンポーネントの重要度を考慮した損傷確率の評価法、断面設計結果をうけたプラント全体の目標性能が確保されていることの照査方法等において、合理的な手法を構築するための課題は多く残されている。

地震外力のみを確率論的手法に基づいて決定する場合であっても、地震ハザードを実用設計に適用していくためには、今後、数年に及ぶ検討期間が必要と考えられる。

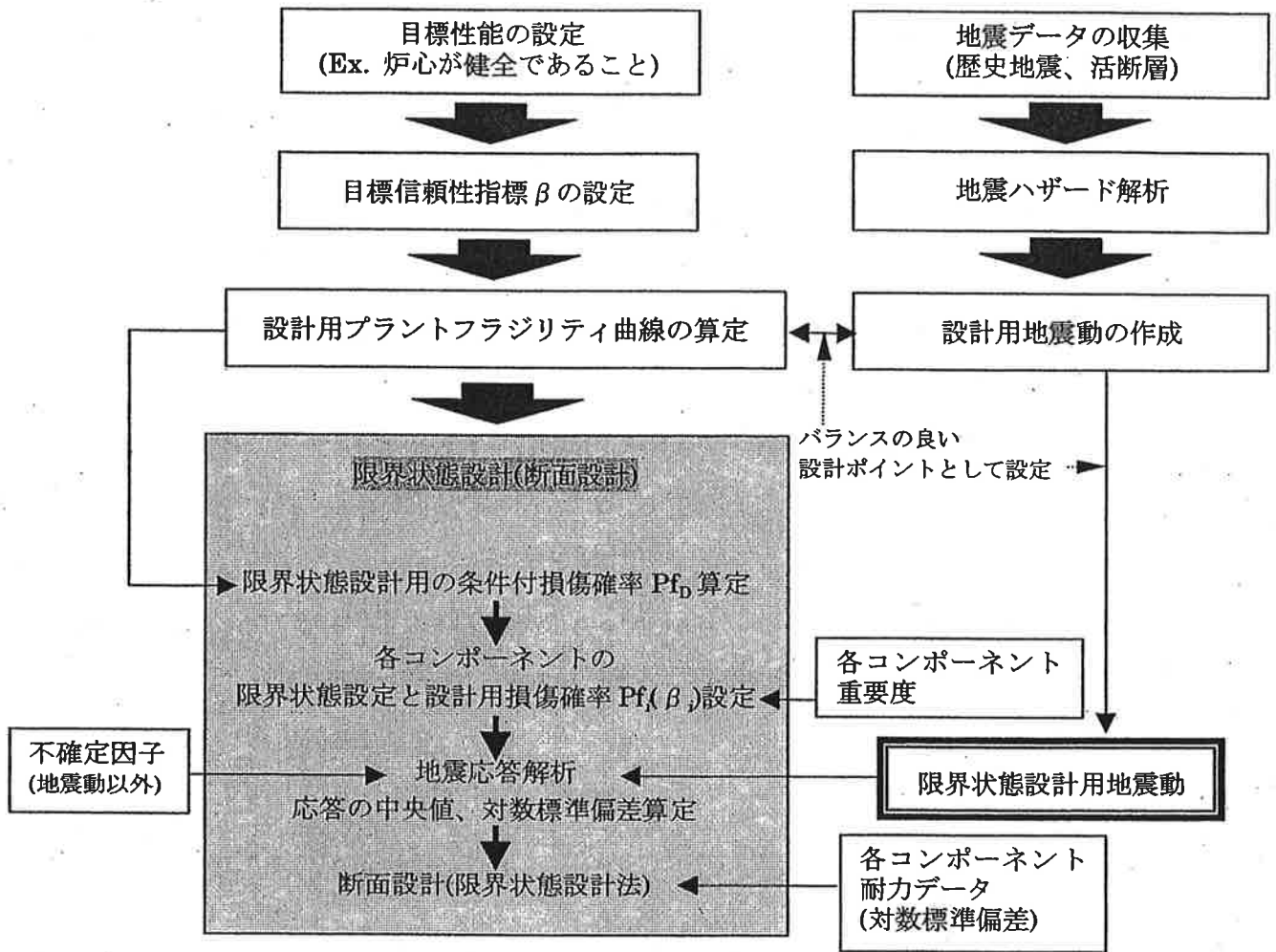


図-1 確率論的設計手法を導入した設計フローの概要

付録－1 NUPEC で検討された確率論的基準地震動と設計法

1. 確率論的基準地震動の設定方法と試算

限界状態設計法で採用される荷重耐力係数法概念を用いて確率論的基準地震動の評価方法を提案し、試算を行った。地震時の安全余裕を示す尺度として信頼性指標 β を採用し、 β は安全目標レベルを満たすように設定する。確率論的基準地震動の評価フローを付図－1 に示す。

試算例では、安全目標レベルとして IAEA の INSAG-3 の推奨値(新規プラントに対しては 10^{-5} /炉年、既存プラントに対しては 10^{-4} /炉年)を用い、プラント供用期間を 40 年に設定している。確率論的基準地震動の最大加速度は、荷重項を地震ハザード曲線、耐力項を炉心損傷を対象としたプラント脆弱性曲線として、それぞれ対数正規分布を仮定して、荷重耐力係数法の設計ポイントとして評価している。

これらの条件で 3 サイトのプラントを対象に確率論的基準地震動を試算している。地震動の波形の目標スペクトルは最大応答加速度と発生確率が同じ一様ハザードスペクトルとし、継続時間や包絡関数はマグニチュード M と震央距離 Δ を確率論的手法で評価し、位相は一様乱数としている。

2. 確率論的基準地震動に基づく建屋、機器・設備・配管系の設計体系(事務局暫定案)

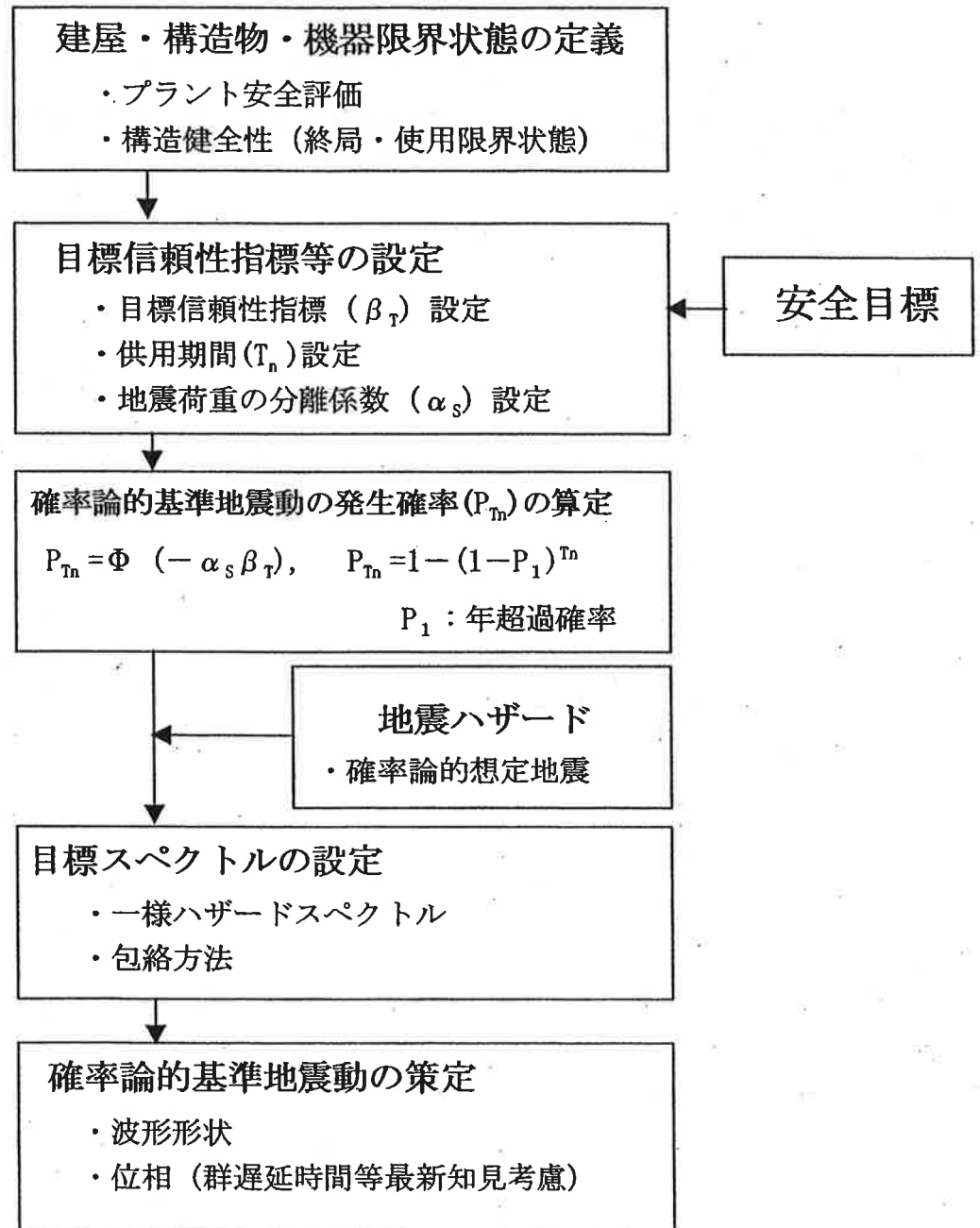
暫定案を付図－2 に示す。暫定案ではまず、地震ハザード曲線と分離係数からプラントとして必要な炉心損傷を対象とした設計用プラント脆弱性曲線を求め、これに対応する確率論的基準地震動を算定する。設計用プラント脆弱性曲線をターゲットに各コンポーネントを設計する。

設計は 2 段階に大別される。第 1 段階は、確率論的基準地震動を用いた各コンポーネントの断面設計を行う。第 2 段階は、性能照査用地震動を基本的に炉心損傷頻度に大きな影響を及ぼす限界付近の地震入力レベルで設定し、これを用いて性能確認を行う。

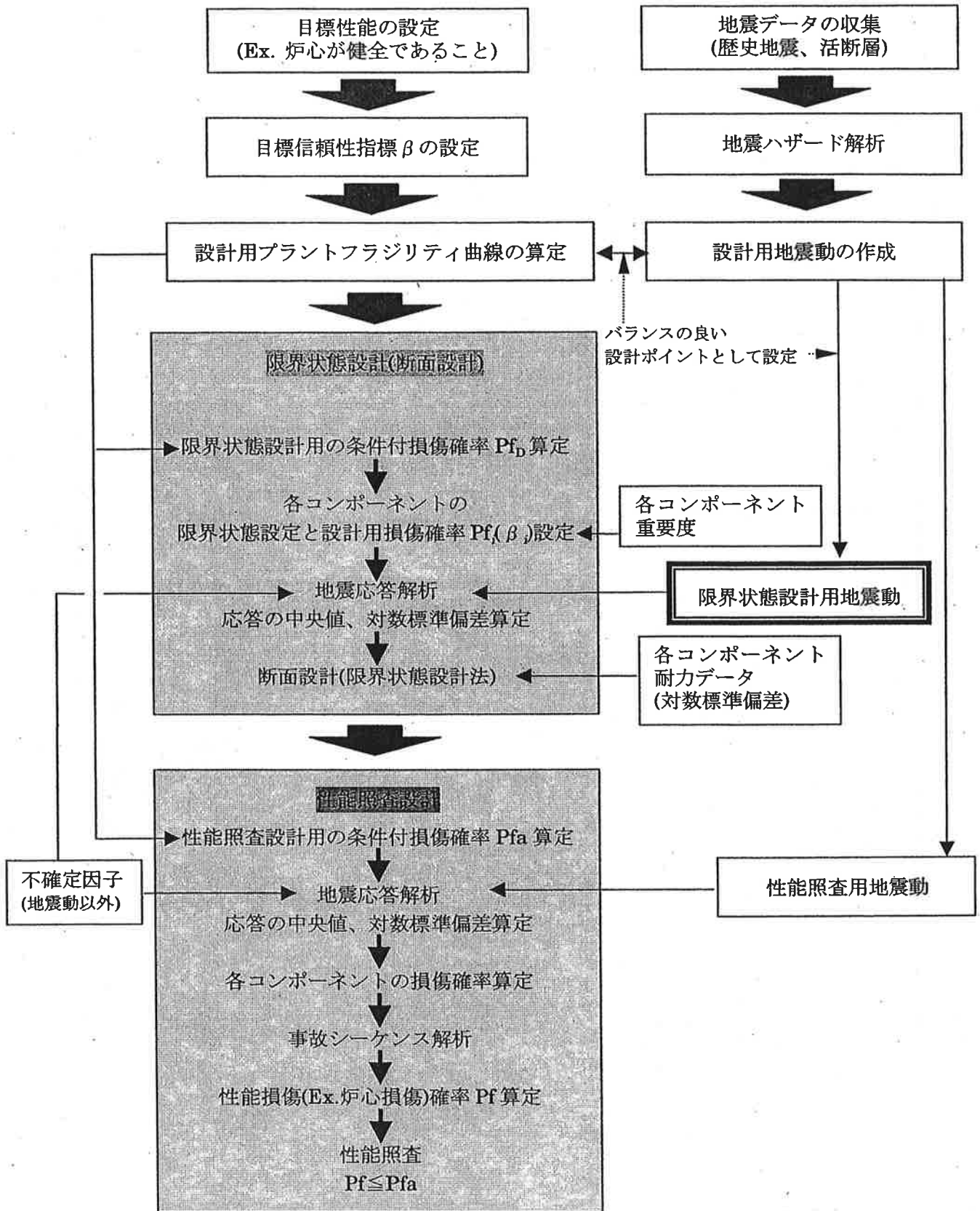
第 1 段階の断面設計は、まず入力地震動レベルにおけるプラントの条件付損傷確率を設計用プラント脆弱性曲線から求める。次いで、事故シーケンス解析における冗長系としての裕度(成功/失敗の確率)を考慮して、プラントの条件付損傷確率に適合するように各コンポーネントの確保すべき条件付損傷確率を求める。確率論的基準地震動に対する応答の中央値と対数標準偏差は変動解析等により評価する。そして、実験データ等から別途評価される

耐力の対数標準偏差を考慮して、荷重耐力係数法により耐力の中央値を設計する。ここで、応答や耐力は各コンポーネントの損傷モード(応力、ひずみ、加速度、変位)に応じて評価する。

第2段階の性能確認は、第1段階で設計された各コンポーネントの性能確認用地震動レベルにおける損傷確率を求め、これを用いて事故シーケンス解析を行う。求められた炉心損傷確率が設計用プラントフラジリティ曲線から求められる条件付損傷確率以下であることを確認し、性能照査とする。



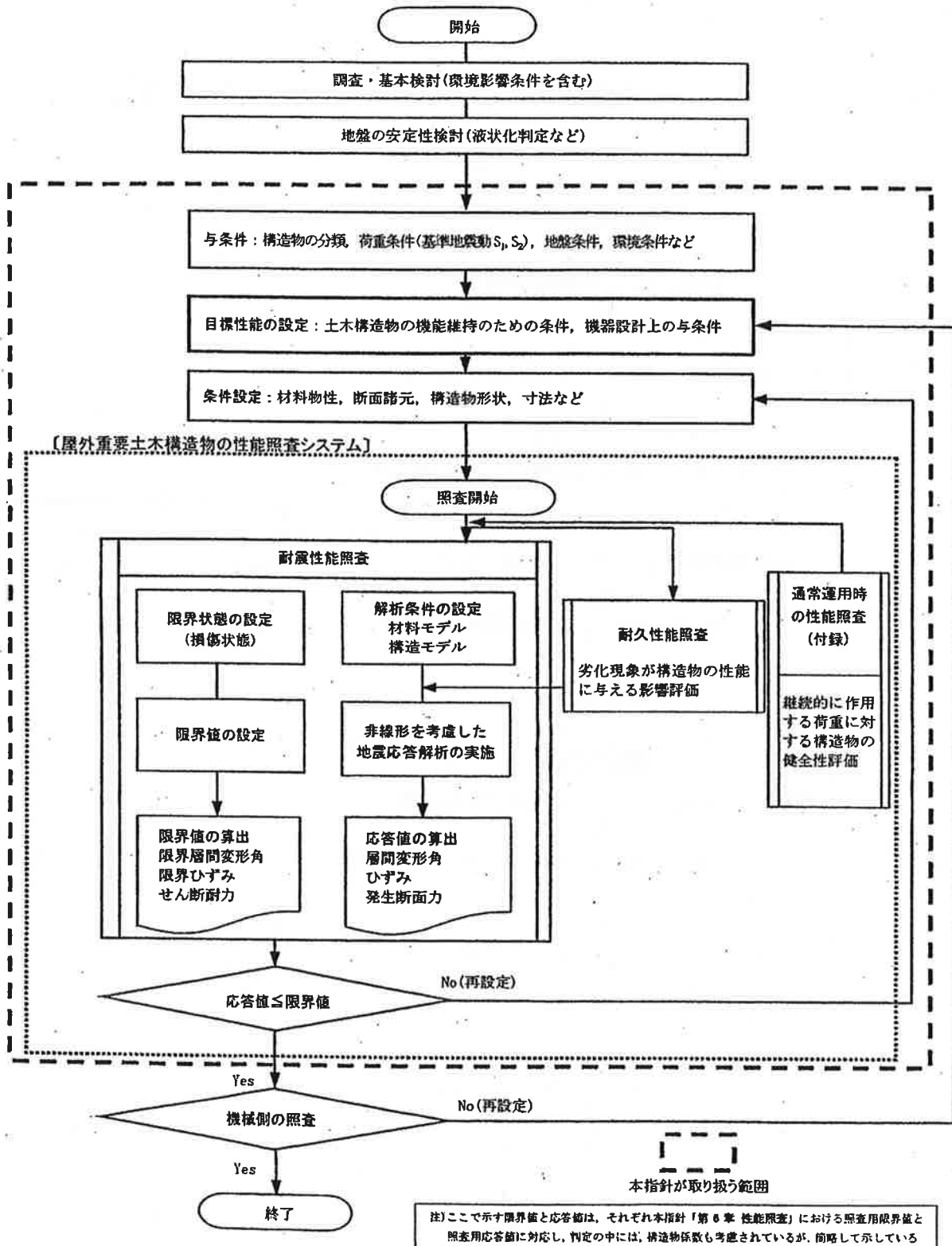
付図-1 確率論的基準地震動の作成フロー



付図-2 確率論的基準地震動に基づく耐震設計フローの暫定案

付録-2 土木学会「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針(案)及びマニュアル」

原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針



解説 図 1.2-1 耐震性能照査フロー(機器・配管を支持する場合)

付図-3 屋外重要土木構造物の耐震性能照査フロー

平成15年12月

指針検討に係わる実質的課題と見解

項 目

1. 岩盤立地を要求事項としないこと
2. 地震時の安全確保
3. 耐震重要度分類の検討
4. 耐震重要度分類と安全重要度分類の関係
5. 設計用地震力の考え方
6. 活断層の評価期間
7. 活断層のセグメンテーション
8. 地質調査の高度化
9. 松田式(1975)の妥当性
10. 地震地体構造上想定する地震の評価方法
11. 位相特性の考え方
12. 地震動の不確定性への配慮
13. 震源を事前に特定できない地震の考え方
14. 静的地震力の取り扱い
15. 荷重の組合せの考え方
16. 許容限界、終局耐力の考え方

課 題	岩盤立地を要求事項としないこと
議論の要点	<p>岩盤は、一般的に重量構造物を支持するのに十分な耐力。 岩盤における地震動特性は比較的、解明容易。 原子炉施設の第四紀層地盤立地に関する研究が進展。</p>
見 解	<p>原子力発電所の立地多様化を目的として実施された「高耐震構造立地技術確証試験 第四紀層地盤立地技術方式に関する調査 (NUPEC)」、「原子力発電所の立地多様化技術 (土木学会)」により一定の条件を満たす第四紀洪積層の密な砂・れき・堆積層であれば第四紀層地盤立地は十分成立性があると判断。 地震動の評価技術も岩盤から第四紀層地盤への増幅を考慮した解析を実施することで評価可能。</p>
今後の検討方向	<p>第四紀立地では、杭基礎などの採用も考えられるため (中間貯蔵施設等)、基礎形式に応じて、従来、地震時に岩盤支持で求められていた安全機能 (地震時の支持力、滑り、沈下) と同等の安全機能を要求する。</p>
参 考	<p>「再処理施設安全審査指針」、「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設のための安全審査指針」には岩盤立地は要求されていない。</p>

課 題	地震時の安全確保
議論の要点	地震時の安全確保をどうとらえるか
見 解	<p>原子炉施設の安全確保の目的は、放射性物質に係る放射線障害の潜在的危険性を顕在化させないことである。</p> <p>敷地における限界的な地震動を仮定しても、周辺公衆に著しい放射線障害を与えないようにすることが原則である。しかしながら地震力は、全ての施設に同等に同時に作用する（以下、共通要因事象）という特性を踏まえ、限界的な地震動の発生を仮定しても、周辺公衆に著しい放射線障害を与えないように、原子炉災害を防止する観点から必要な安全上の機能を維持させることが現時点での方策と考える。</p> <p>この考え方に基づき限界的な地震動に対し安全上果たすべき機能は以下と考える。</p> <p>地震時に周辺公衆に著しい放射線障害を与えないようにするためには、地震力は、共通要因事象という特性を踏まえた上で、炉心及び使用済燃料内の大量の放射性物質を放出するような事態及びそのような事態に拡大・発展することを防止することである。そのためには以下の機能が必要である。</p> <ol style="list-style-type: none"> ①原子炉冷却を可能にするための、原子炉冷却材を保持する機能 ②地震発生時に緊急に原子炉の核反応を停止しかつその状態を維持する機能 ③原子炉停止後にも放出される崩壊熱を除去するための機能で、最終的には海水に熱を放出する機能までを含む ④冷却材喪失事故後相当長期間にわたり周辺公衆への放射性物質の放出を最終的に防止する機能 ⑤使用済燃料内の放射性物質の外部放出を防止するために、燃料の大量かつ著しい損傷を防止する機能 <p>まとめると以下のようなになる。</p> <ol style="list-style-type: none"> ①原子炉冷却材圧力バウンダリー機能 ②地震発生時に緊急かつ安全に原子炉を停止させる機能 ③原子炉停止後の最終除熱機能 ④原子炉格納容器バウンダリー機能 ⑤使用済燃料の大量かつ著しい損傷を防止する機能
今後の検討方向	審査指針に記載すべき「地震時の安全確保」に関して要求する機能を明確にする。
参 考	

課 題	耐震重要度分類の検討
議論の要点	地震時の安全確保の考え方に立脚した耐震重要度分類の考え方の整理
見 解	<p>限界的な地震動に対して機能維持すべき「特に重要な安全機能」を有する施設を安全クラスとする。</p> <p>それ以外の施設をノンクラスとする。</p> <p>「特に重要な安全機能」とは、以下のとおりとする。</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 原子炉冷却材圧力バウンダリー機能 ② 地震発生時に緊急かつ安全に原子炉を停止させ維持する機能 ③ 原子炉停止後の最終除熱機能 ④ 原子炉格納容器バウンダリー機能 ⑤ 使用済燃料の大量かつ著しい損傷を防止する機能 <p>ノンクラス施設については、民間規格の中で従来のA, B, Cに区分する。A, B, Cの各施設に対応する地震力も民間規格とする。</p>
今後の検討方向	<p>指針に記載すべき地震時の安全機能と耐震重要度分類の定義を検討する。具体的な耐震重要度の検討はJ E A Gにて行う。</p> <p>安全機能の重要度分類との関連及び安全重要度クラス1の一部の施設が耐震重要度分類ではノンクラスとなることの妥当性を検討する。</p>
参 考	

課 題	耐震重要度分類と安全重要度分類との関係
議論の要点	安全重要度分類と耐震設計上の重要度分類の明確化
見 解	<p>指針では耐震重要度分類において、「安全クラスの機能」と「ノンクラス」を規定する。</p> <p>ノンクラスの詳細はJ E A Gで規定する。安全クラスとJ E A Gで詳細化される耐震重要度分類全体は、地震力は、共通要因事象という特性を踏まえれば整合することを明確にする。</p>
今後の検討方向	安全上の機能に着目し安全重要度分類から共通要因事象を考慮した耐震重要度分類を検討する。詳細はJ E A Gにて検討する。
参 考	<p>現行の安全重要度分類と耐震重要度分類の対応関係を比較検討した。その結果、基本的には安全重要度分類のクラス1, 2, 3は各々耐震重要度のクラスA (Asを含む) B, Cと対応している。一方地震荷重が共通要因事象という特性を有していることを考慮して、必要に応じて耐震重要度を上げている。したがって地震時の安全性を確保する観点からは両分類に不整合は無いと判断できる。</p>

課 題	設計用地震力の考え方
議論の要点	指針で規定する地震力の位置付け
見 解	<p>地震時の安全確保の観点から地震動を規定する。</p> <p>これは、地震時において拡大性のある事故（炉心損傷）を起こさないため、耐震安全上特に重要な施設の安全機能の維持を評価するための限界的な地震動である。</p>
今後の検討 方向	
参 考	

課 題	活断層の評価期間
議論の要点	指針制定後、多数のトレンチ調査等が実施され活断層に関する知見が集積。S1については、工学的な見地から検討。
見 解	<p>国内の多数のトレンチ調査結果によっても、再来期間が5万年を超える活断層は存在しないことから、S2として考慮する活断層の評価期間を5万年としていることは妥当と判断。</p> <p>同トレンチ調査結果から、S1として考慮する活断層～S2として考慮する活断層の区分（1万年、活動度A級）について、厳密に境界を設定することは困難であっても、工学的には妥当と判断。</p> <p>これらについて、トレンチ調査結果に基づく活断層の再来期間の分布状況等を考慮した確率的検討によっても妥当であることを確認。</p>
今後の検討方向	5万年について変更する必要はないと認識。S1については、指針では規定せず、J E A Gで規定する方向。その際、現状の区分（A級、1万年）については工学的に妥当と判断。
参 考	

課 題	活断層のセグメンテーション
議論の要点	<p>活断層の連続については、「明確な証拠がない場合には安全側に考慮」とのポジション</p> <p>地震研究推進本部等の評価結果は原子力の評価を超える場合もあり、原子力の評価の妥当性を問われるケースがある。</p>
見 解	<p>断層の連続に関する評価は、断層の形態、性状などに関するデータの質・量に応じて合理的に検討されるべき。</p> <p>具体的には、断層の屈曲、分岐などの幾何学的要素、変位センス、変位速度などの地質構造的要素、古地震の破壊区間、活動間隔、最新活動時からの経過時間などの活動履歴に関する要素などによる評価が可能（土木学会新立地部会断層活動性分科会でとりまとめを実施：下記参照）。</p> <p>地震研究推進本部などによる検討結果についても、活断層としての定義の違い、ベースとなるデータの質、量などを吟味した上で、原子力として判断するべき。</p>
今後の検討方向	<p>セグメンテーションのルールを一般化することは困難であり、原則として個別断層（群）毎に評価。</p>
参 考	<p>平成 10 年度～平成 14 年度にかけて、土木学会新立地部会断層活動性分科会では糸魚川～静岡構造線をケーススタディとして、断層のセグメンテーションの考え方のとりまとめを実施。同成果は土木学会報告書として平成 15 年下期出版予定。</p>

課 題	地質調査の高度化
議論の要点	地質調査範囲の妥当性 鳥取県西部地震を踏まえた地質調査
見 解	<p>最低限考慮する地震動を考慮すれば、30km 範囲については、現行の J E A G 規定内容で問題はないと認識。</p> <p>地震動に大きく影響を与える可能性のある敷地近傍については、空中写真判読、地表踏査に加え、震源断層の存在の可能性を勘案し、反射探査、トレンチ調査等、鳥取県西部地震で実施した調査と同程度の調査を実施する必要があると認識。</p>
今後の検討方向	敷地近傍調査の範囲、調査内容については、今後 J E A G で検討。
参 考	

課 題	松田式(1975)の妥当性
議論の要点	<p>松田式(1975)は古い M-L 関係式の最近の知見である、松田式(1998)、武村(1998)、Wells and Coppersmith(1994)との関係</p>
見 解	<p>松田式(1975)は、測地学的なデータも活用して活断層長さLを決めているため、その活断層長さLは震源断層に対応すると考えられる。</p> <p>松田式(1975)は、武村(1998)、Wells and Coppersmith(1994)における同様な関係式との比較検討を実施した結果、日本国内あるいは世界中の地殻内地震に基づき導き出されている震源断層の長さ地震規模の関係と良く整合している。</p> <p>一方、最近の知見である松田式(1998)は、1回の地震で地表に表れる地震断層の長さとの関係を求めており、両者で断層長さの評価は異なっている。</p> <p>現行の地質調査法に従って評価された活断層は、地下の震源断層が繰り返し活動した結果を地表から確認しているもので、震源断層に対応する。よって、第一義的にLからMを求める場合は、松田式(1975)で支障ないと判断。</p>
今後の検討方向	<p>地表地震断層と地殻内の震源断層との関連や、地表に断層が現れるメカニズムの解明や、過去の地震と活断層との関連について検討する必要がある。</p>
参 考	<p>活断層が敷地に近い場合は、別途、断層モデルによる地震動評価等の検討が必要。</p>

課 題	地震地体構造上想定する地震の評価方法
議論の要点	<p>地震地体構造という概念が現在の地震学的に受け入れられるか 設計用地震を想定する上で想定される最大地震規模と発生位置に関する知見は重要</p> <p>基準地震動を策定するにあたって地震発生機構別（プレート境界地震、内陸地震、スラブ内地震等）による地震動評価手法をどのように評価するべきか。</p>
見 解	<p>① 現行指針では、地震地体構造上考慮する地震の上限規模を想定する際に、地震地体構造マップを参照するだけでなく、その元データである過去の地震、活断層に遡って検討が行われ、また、最新知見も適宜考慮している。</p> <p>② 地震地体構造の地震学上の位置づけはともかく、設計用地震を評価する上で想定される最大地震規模と発生位置に関する知見は重要</p> <p>③ 地震地体構造の今後の扱いについては、設計用地震動の設定における「震源を特定できる地震」の位置や規模の想定を、「過去の地震」および「活断層による地震」に基づき行う際に、関連知見の不足やデータベースの不十分さを補うために参照する関連研究成果の一つとして位置づけ</p> <p>④ 基準地震動を策定するにあたっては地震発生機構別（プレート境界地震、内陸地震、スラブ内地震等）に地震動特性が異なることに留意する。</p> <p>⑤ スラブ内地震については一般化できるほどデータ、知見が蓄積されていないが地域性を示すため、サイト毎の評価を基本とする。地震の想定は微小地震等に基づくスラブの形状、過去に発生したスラブ内地震を考慮する。地震観測記録が得られている場合はそれを基に標準的な地震動との差に留意した評価を行う。なお、地震観測記録が得られていない場合でも震度分布を参考に敷地に対する影響を評価可能。</p>
今後の検討方向	<p>今後の地震学の進展により、評価地点近傍で更に詳細な地震の発生機構等が解明できる可能性もある。このことを考慮し、地震地体構造上想定する地震の評価方法は機能性化しておく。</p> <p>また、「地震地体構造」なる言葉があたかも理学的見地から地震が想定できるとの誤解を与えているのであれば指針上の表現を工夫する必要がある。理学的知見には立脚しているが、耐震設計を実施する上で安全性を更に向上させるため地震工学的に想定しているものである。</p> <p>スラブ内地震の最大地震規模、震源特性、伝播特性について更に検討を進める。</p>
参 考	<p>現行指針に基づく地震地体構造の評価では、「表マップ(1980)」が多く用いられているが、その後のより細分化された「萩原マップ(1991)」および「垣見マップ(1994)」、「垣見マップ(2003)」との上限規模の比較からみても矛盾はない。よって、新しい「垣見マップ」も、基準地震動の策定に使用可能。</p>

課 題	位相特性の考え方
議論の要点	基準地震動の策定にあたり、位相特性を考慮すべきではないか。
見 解	<p>原子力施設は、厚い生体遮へい壁など有するため剛性が高く、実質的に弾性応答をする。弾性応答では、地震動強さは応答スペクトルに一对一で比例する。よって、基準地震動は設計用応答スペクトルのレベルを満足することが重要であり、位相による影響は小さい。</p> <p>なお、断層モデルによる地震動評価を実施した場合は、震源の特性を含んでいることから、位相特性を別途考慮する必要はなく、計算された地震動をそのまま用いることが可能。</p>
今後の検討方向	今後、岩盤立地によらない第四紀層立地や、免震構造等を導入する場合には、より塑性域に入った応答になることも予測されるため、位相特性を考慮した基準地震動について検討する必要がある。
参 考	

課 題	地震動の不確定性への配慮
議論の要点	<p>自然現象である地震動には不確定性が伴う 不確定性を保守的に考慮すると設計用地震動を超えることがありうる 設計では種々の耐震安全余裕が見込まれている</p>
見 解	<p>① 設計用地震の選定に当たって諸元を厳しめに設定</p> <ul style="list-style-type: none"> ・敷地に影響のある過去の地震を選定し、被害記録を基に異論のある場合も考慮して諸元を設定 ・活断層長さの評価に当たって着実な地質学的証拠が得られない場合は保守的につなげて評価 ・地震調査から敷地で起きる可能性が低い地震も考慮し、更に無条件に直下地震を考慮 <p>② 地震動の策定に当たってバラツキに配慮</p> <ul style="list-style-type: none"> ・敷地で考慮する地震の地震動強さを全てカバーするように設計用地震動を策定 ・大崎スペクトルはバラツキにも配慮した設計用スペクトル <p>③ 地震応答解析、許容値等の保守性</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地震応答解析モデルは実現象に対して概ね安全側であることを確認して設定 ・床応答スペクトルを周期領域に1割拡幅して使用 ・許容値も試験値に対して使用状態を考慮し安全側に設定 <p>④ 安全に係わるシステム、施設の構成を評価した地震 PSA によっても耐震安全性を確認</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地震 PSA では安全に係わるシステム、施設の構成を評価でき、地震動や耐力等の不確定性を考慮。 ・代表炉の地震 PSA 評価結果から CDF は 10^{-4} / 炉年以下である。
今後の検討方向	<p>耐震試験データの充実 限界状態設計法の原子力施設への適用 確率評価モデルの精緻化</p>
参 考	<p>電気協会 原子力発電耐震設計特別調査委員会にて原子力施設の総合耐震安全性を検討したところ、現状の設計を実施することにより標準的なプラントに対して中央値で少なくとも約2倍の余裕を確認</p>

課 題	震源を事前に特定できない地震の考え方
議論の要点	現行指針による直下地震の設定は間違っていたのか 震源を事前に特定できる地震と特定できない地震の区別
見 解	<p>① 原子炉設置の際には詳細な地震調査が実施され、同調査によって震源を特定できる地震は耐震設計上考慮される。</p> <p>② 現行指針による直下地震の位置づけについては、原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601-1987 日本電気協会）に「直下地震は、原子炉施設の耐震設計条件の一つとして、実際に起きる地震との関連よりも、むしろごく近傍である程度の規模の地震が発生したと仮定しても安全性が保てるように耐震設計を行っておくべきであるとの観点から設定されている。」とある。</p> <p>③ ②から、現行の直下地震は、耐震設計上の歯止めの地震動を与えるため M6.5 の地震を仮想したものと理解できる。</p> <p>④ 今回、「震源を事前に特定できない地震の地震動」は、上記の考え方を発展させ、原子力施設の建設に当たって敷地周辺において実施される詳細な調査によっても震源を事前に特定できない地震に対して、震源近傍で得られた複数の観測記録のほぼ上限レベルを与えた地震動強さとしている。</p> <p>⑤ これは仮想の地震から地震動を与えるのではなく、耐震設計上の最低規定を意図して地震動強さを直接設定したものの。</p> <p>⑥ したがって、現行指針の考え方を踏まえ、最新の知見を取り入れ、発展させた高度化である。</p> <p>⑦ ここでいう「震源を事前に特定できない地震」は原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601-1987 日本電気協会）等によって敷地周辺で実施される詳細な地質調査によっても震源と活断層を関連づけることが困難な内陸地殻内地震である。</p>
今後の検討方向	評価地点毎に地震発生様式などの地震学的知見に基づく評価の実施
参 考	<p>JNESの実施した震源を事前に特定できない地震の確率的検討によれば、上記の観測記録の上限レベルは 10^{-4}/年以下であることが示されている。</p> <p>ここでいう「震源を事前に特定できない地震」は、地震調査研究推進本部（2002）の「震源を予め特定しにくい地震（地表に痕跡を残さない地震）」のうち、</p> <p>グループ5：陸域のプレート内で発生する地震のうち震源を予め特定しにくい地震に属する。</p>

課 題	静的地震力の取扱い（一般建物の耐震設計との整合性）
議論の要点	静的地震力を適用することの可否
見 解	<p>最低規定としての地震力を与えるものとして静的地震力を用いる。</p> <p>また、地震被害との関連が明確な従来の静的地震力を、耐震設計の簡便性、建築基準法での取扱い*を考慮し、継続して適用する。</p> <p>耐震重要度分類に応じた係数及び必要保有水平耐力については従来との連続性を考慮して同じとする。</p> <p>*： 建築基準法改定において、設計者が構造設計方法を選択できるようになったが、現行の層せん断力による1次設計も認めている。</p>
今後の検討方向	静的地震力を用いることを審査指針に記載する。但し、指針で定義される限界的な地震動と静的地震力の位置付け及び取扱いについて検討する。
参 考	

課 題	荷重の組合せの考え方
議論の要点	地震荷重と他の事象による荷重の組合せの考え方
見 解	<p>地震荷重と他の事象による荷重の組合せの基本的な考え方は以下のように基本的に現行と同じ。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 原則として、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び事故時に生じるそれぞれの荷重と地震荷重を組合せ、それらの組合せ荷重によって施設に発生する応力や変形等の評価を行う。 2) 地震によって引き起こされる事象（地震の従属事象）による荷重は地震荷重との組合せを考慮する。 3) 地震の発生いかんにかかわらず生ずる事象（地震とは独立事象）による荷重と地震荷重との組合せについては、双方の事象の発生頻度、当該事象による荷重の継続時間及び継時的変化を考慮して確率的に判断する。なお、他の荷重の組合せで代表できる場合は当該荷重との組合せ評価を省略することができる。
今後の検討方向	上記基本的な考え方を審査指針に記載し、具体的な荷重の組合せはJ E A Gにて行う。
参 考	

課 題	許容限界、終局耐力の考え方
議論の要点	許容限界の考え方は基本的に現行と同じ
見 解	<p>現行審査指針の考え方を踏襲し以下を基本とする。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 建物・構築物、系統及び機器に要求される安全機能の性質は多様であるので、設計上の制限は、その安全機能の性質に応じた合理的なもの（応力・応力度、歪、変形など）を用いる。 2) 動的安全機能の評価は、原則として試験・実験に基づく評価法を用いるものとする。
今後の検討方向	<p>一部の設備についてはより合理的な条件での設計評価が可能となるよう研究が進行中であることから、これらの成果も取り入れられるような形で性能規定化されることが適当であると考えられる。</p> <p>許容限界の詳細はJ E A Gにて検討を行う。</p>
参 考	