

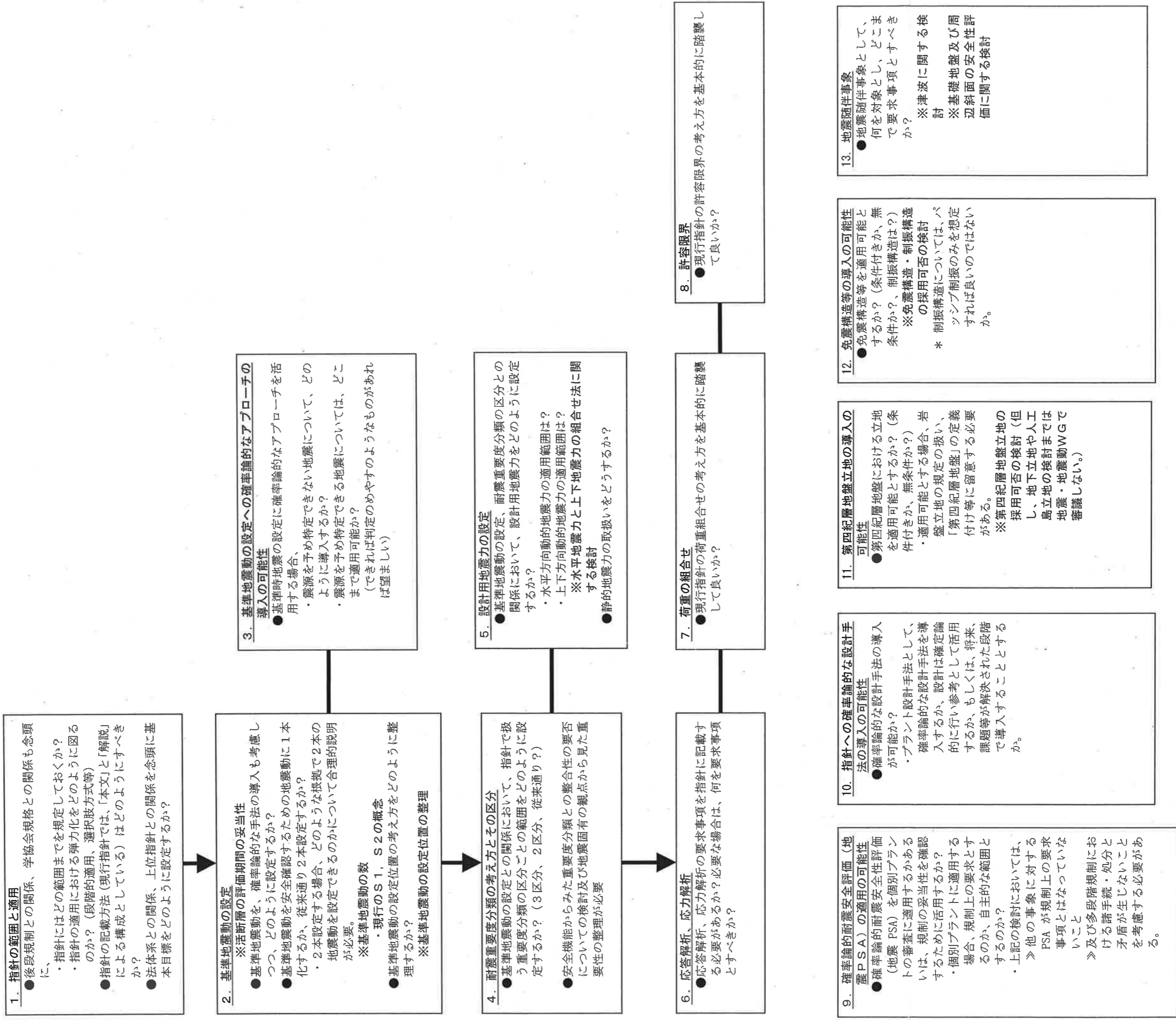
2/18 打ち合わせ 18:00～ 於: 共用743
保安院 平野課長 高島 統指
JNES 平野部長 滝沢ケル-久長
原子力安全委員会 課長 島村 松田 名倉 真野

原子力安全基準専門部会 耐震指針検討分科会
第8回会合議事進行(案)

平成16年2月27日(金)
10:30～12:30
原子力安全委員会第1, 2会議室

1. 開 会
事務局説明 10:30～10:31 [1分]
・定足数確認、配付資料確認
2. 資料8-1「原子力安全基準専門部会 耐震指針検討分科会構成員」
事務局説明 10:31～10:32 [2分]
3. 資料8-2「耐震設計審査指針に関する今後の検討スケジュール(案)」
資料説明<事務局> 10:32～10:34 [2分]
質疑応答等 10:34～10:39 [5分]
4. 資料8-3「指針への確率論的な手法の導入の可能性について」
資料説明<JNES> 10:39～10:59 [20分]
質疑応答等 10:59～11:19 [20分]
5. 資料8-4「第四紀層地盤立地、免震構造等について」
 - (1) 概念整理等
資料説明<事務局> 11:19～11:29 [10分]
 - (2) 実例紹介
資料説明<日本原子力研究所> 11:29～11:49 [20分]
・高温工学炉(第四紀層地盤立地)
資料説明<核燃料サイクル開発機構> 11:49～12:09 [20分]
・サイクル機構ユーティリティー施設(免震構造)
 - (3) 事業者意見開陳(需要等について)
資料説明<部外協力者(調整中)> 12:09～12:14 [5分]
 - (4) 質疑応答等 12:14～12:29 [15分]
6. 閉 会
次回の予定等
事務局説明 12:29～12:30 [1分]

今後、分科会において検討する項目



今後、地震・地震動ワーキンググループにおいて検討する項目

1. スラブ内地震の特性と評価方法

2. 地震地体構造の定義と適用方法 — 第 13 回会合にて検討済

3. 地下の震源断層と地表の活断層あるいは地震断層との関係

4. 鳥取県西部地震の震源地域を対象とした調査結果の整理 — 第 13 回会合にて検討済

- ・ 最新の調査手法とそれによって解明できたこととの関係
- ・ 産総研等他機関の調査結果も参照

5. 震源を予め特定できる地震による地震動の想定における不確かさの取扱いに関する検討

6. 最新の地震動評価法（上下方向地震動の応答スペクトルの評価法を含む）

— 第 13 回会合にて検討済

- | | |
|-----------------------------|----------|
| (1) 設計用基準地震動の確率論的アプローチについて | 資料 1 |
| (2) 地震 P S A の概要及び有効性について | |
| ① 地震 P S A の概要 | 資料 2 - 1 |
| ② 地震 P S A の有効性 | 資料 2 - 2 |
| ・地震 P S A 評価手法の成熟度 | |
| ・地震 P S A 評価手法・評価結果の活用（有効性） | |
| ・地震 P S A 評価手法高度化等の課題 | |
| (3) 確率論的手法に基づく耐震設計について | 資料 3 |

設計用基準地震動の確率論的アプローチについて

設計用基準地震動に関しては、第 7 回基本WG（平成 15 年 7 月 31 日）の資料「耐震設計審査指針の高度化のあり方に対する基本WGの検討結果（中間報告）」（震基W第 7-1 号）において、

- ①「基準地震動の選定」に関し、「原子炉施設の寿命期間 100 年間に地震の発生する可能性が 100 分の 1 程度」、すなわち 10^{-4} /年程度の年超過確率の地震動を考慮する。
- ②設計用基準地震動の設定に際しては、各種の不確かさを考慮する。

という試案が示されている。

これらの基本WGの提案を受けて、前回（第 13 回）の地震・地震動WGにおいて、今後「震源を特定できる地震」に関する確率論的取扱いについて議論することに決まった。

これらより、地震動関連の確率論的アプローチに関しては、現状では以下のように要約できる。

(1) 震源を特定しにくい地震について

「震源を特定しにくい地震の確率論的検討」については、第 11 回地震・地震動WG（平成 15 年 10 月 28 日）の資料：震震W第 11-1 号及び第 12 回地震・地震動WG（平成 15 年 12 月 1 日）の資料：震震W第 12-2 号（コメント回答）において、日本全国の地震規模別発生頻度、地表地震断層出現率及び地震断層パラメータ（アスペリティ深さ、応力降下量、高周波遮断振動数）等のばらつきを、確率論的に評価した年超過確率別の地震動スペクトルを報告した。

また、「震源を特定できない地震の確定論的検討」については、第 10 回地震・地震動WG（平成 15 年 7 月 28 日）の資料：震震W第 10-2 号において、既往の震源近傍の地震観測記録を包絡した地震動スペクトルが報告されている。（図 1 参照）

(2) 震源を特定できる地震について

「震源を特定できる地震の確率論的アプローチ」については、上記に記したように今後の地震・地震動WGで議論される事になっており、これらについては 3 月以降に議論される予定である。

(3) 「震源を特定できる地震」と「震源を特定しにくい地震」の組合せについて

「震源を特定できる地震」が確率論的に評価可能との結論が得られた場合には、これらと「震源を特定しにくい地震」の確率論的地震動との組合せを議論する必要がある。これらについては、指針反映の期限を考慮し、5月頃までに議論される必要がある。

以上の「基準地震動の確率論的取扱い」について、地震・地震動WGにおいて結論が得られた時には、これらを6月頃に「耐震指針検討分科会」での議題とすることが考えられる。

以上

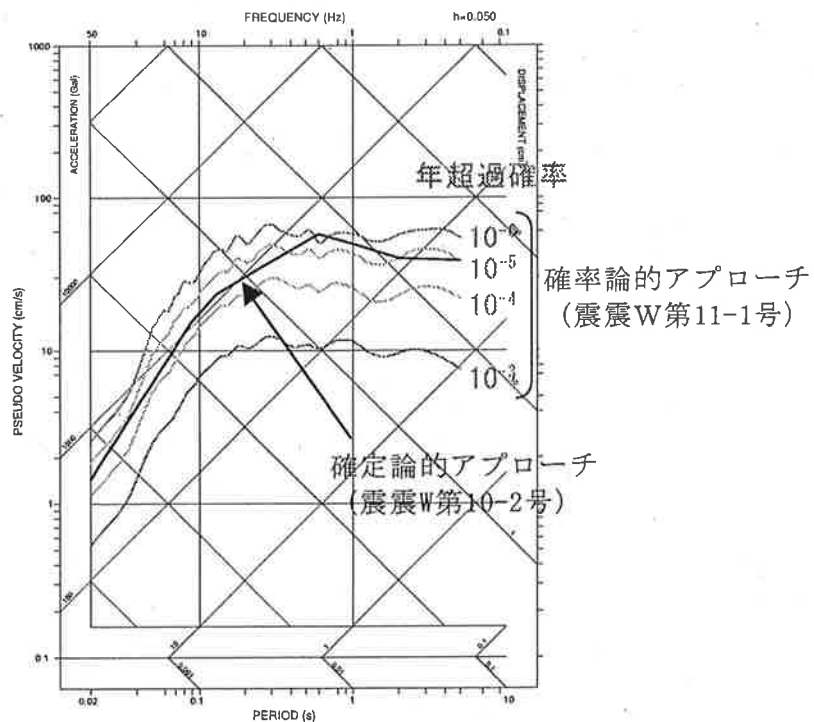


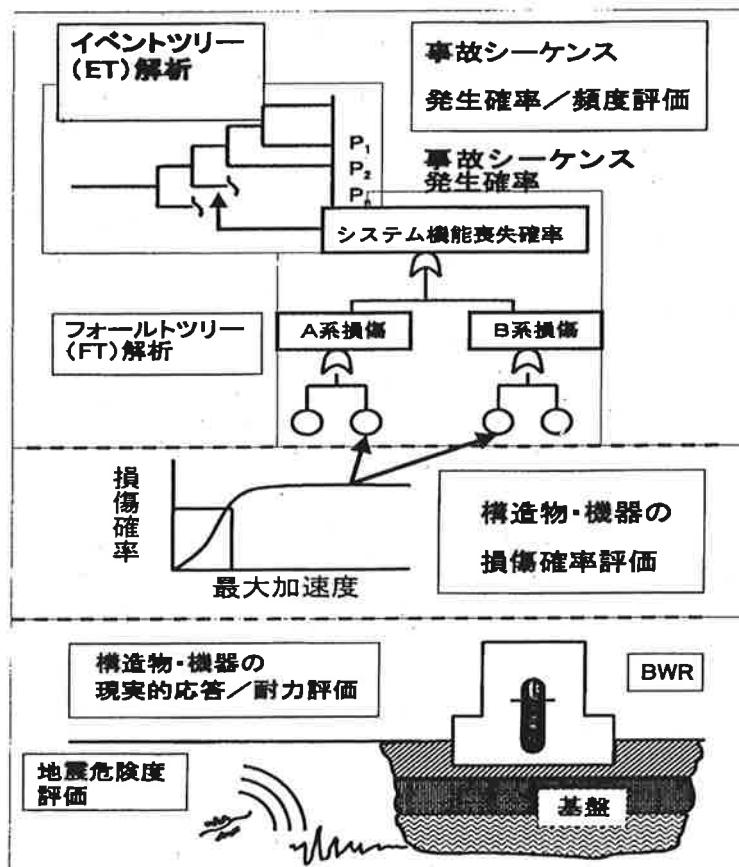
図1 「震源を特定しにくい地震」の確定論的及び確率論的アプローチの地震動スペクトル

地震 P S A 評価手法の概要について

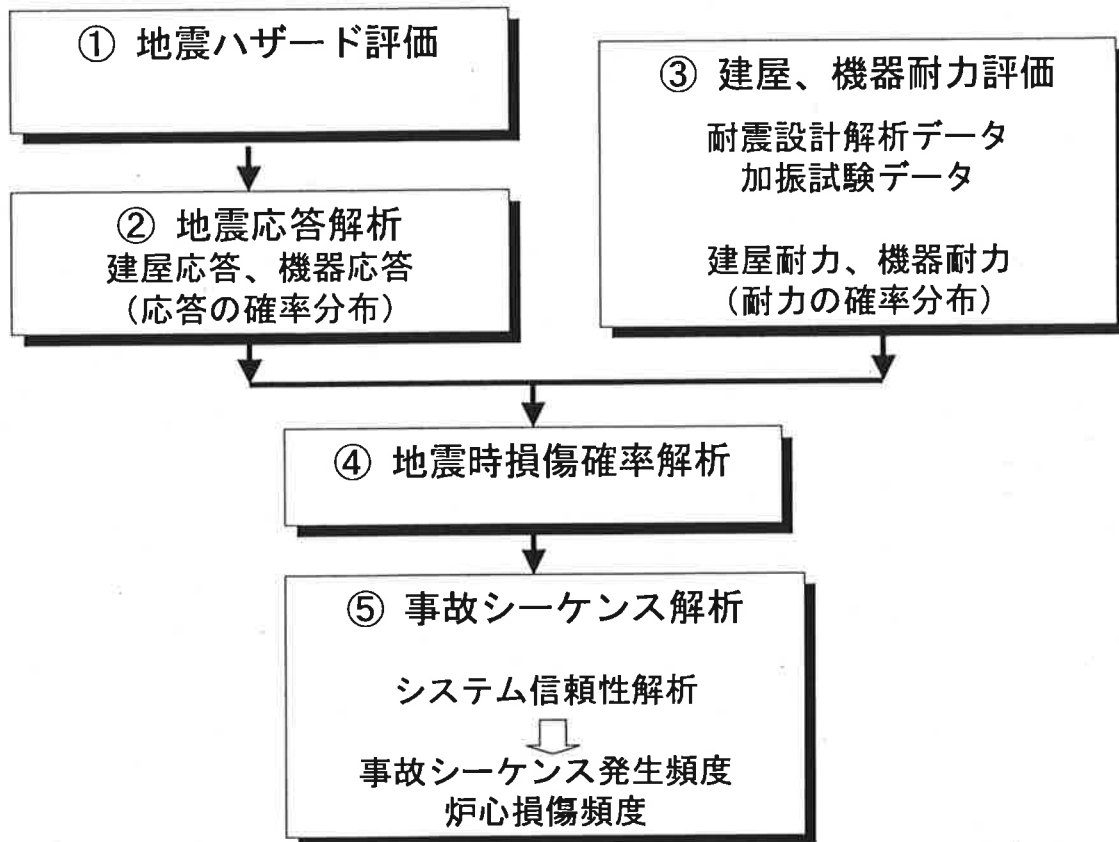
平成 16 年 2 月

独立行政法人 原子力安全基盤機構

■地震による炉心損傷事故発生頻度(CDF)評価手順



地震P S Aの手順



地震P S Aの対象建屋・構築物・機器

○ 建屋・構築物

- ・地上(建 屋): 原子炉建屋
- ・地下(埋設物): 非常用補機冷却海水系設備の取水ピット
海水管ダクト

○ 機 器

・機械系機器

- 動的機器: ポンプ, 電動機, 弁
- 静的機器: 格納容器, 圧力容器, タンク類, 熱交換器

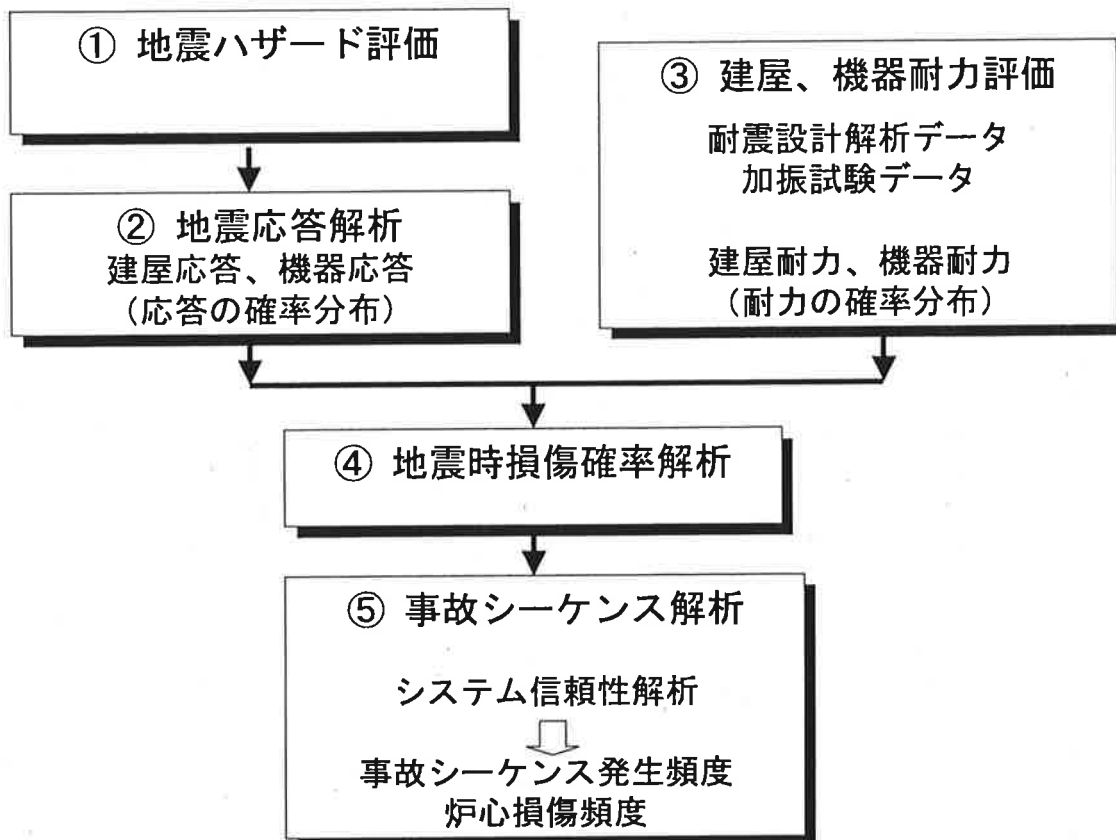
・電気系機器

- 動的機器: ディーゼル発電機, リレー等で構成される計装盤類
(制御盤, スイッチギア, モータコントロールセンタ)
- 静的機器: ケーブル

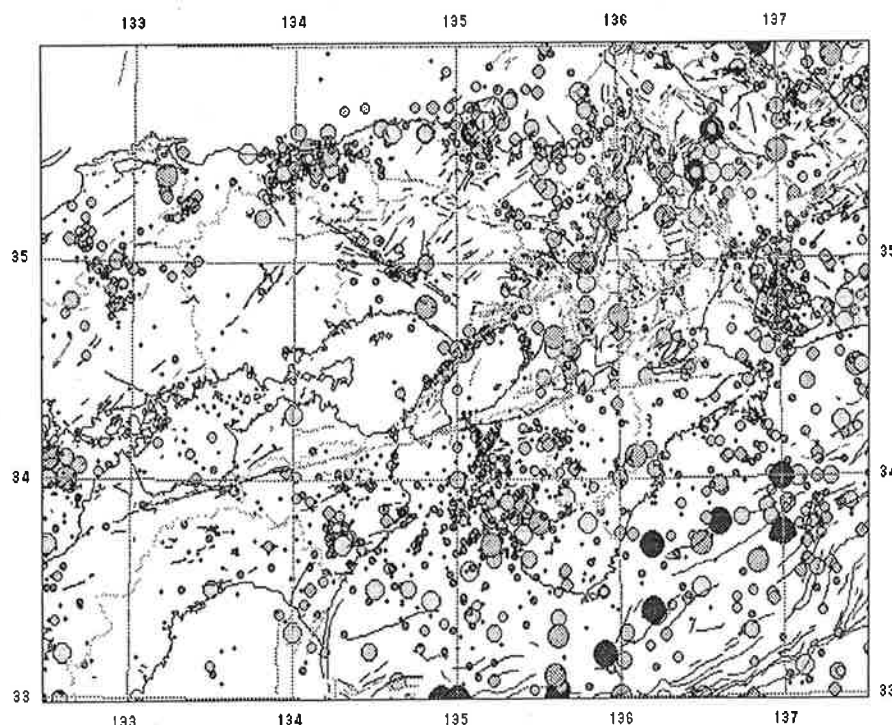
○ 配管系

- ・配管本体, 配管支持構造物

地震PSAの手順



活断層及び歴史地震分布の例

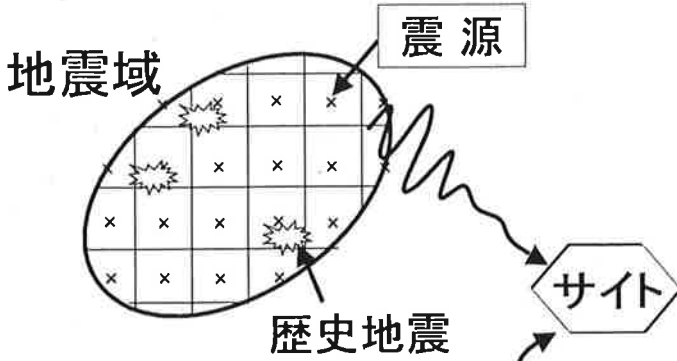


活断層
 — 活動度A級以上
 — 活動度B級以下
 — 活動度不明

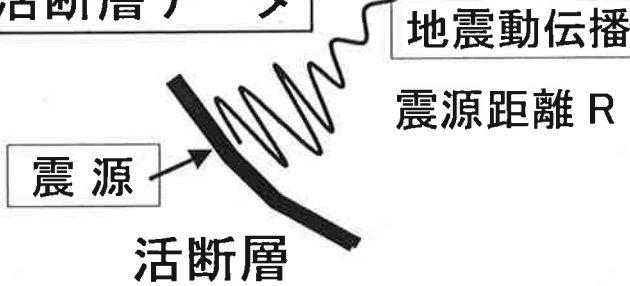
マグニチュード
 ○ $M \geq 7.5$
 ○ $M \geq 7.0$
 ○ $M \geq 6.5$
 ○ $M \geq 6.0$
 ○ $M \geq 5.5$
 ○ $M \geq 5.0$
 ○ $M \geq 4.5$
 ○ $M \geq 4.0$

地震ハザード評価方法

○歴史地震データ



○活断層データ



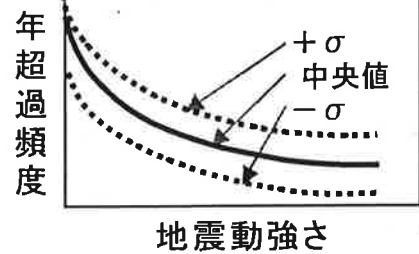
地震発生モデル

- ・規模 (M)
- ・位置
- ・発生頻度

地震波伝播による減衰

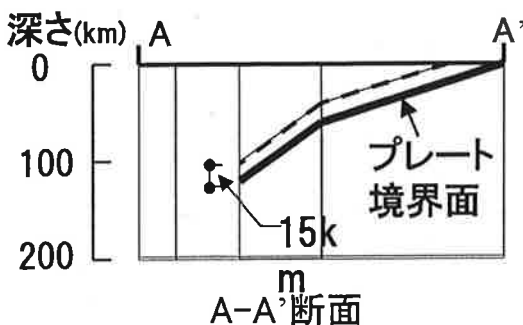
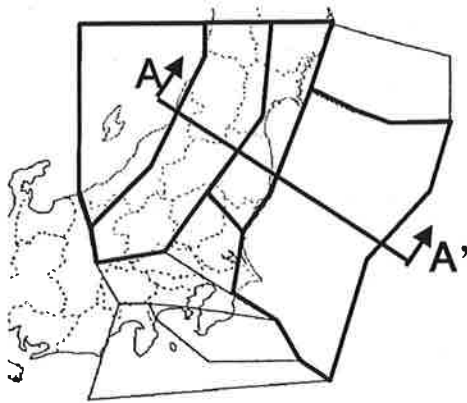
距離減衰式 $f(M, R)$

地震ハザード曲線

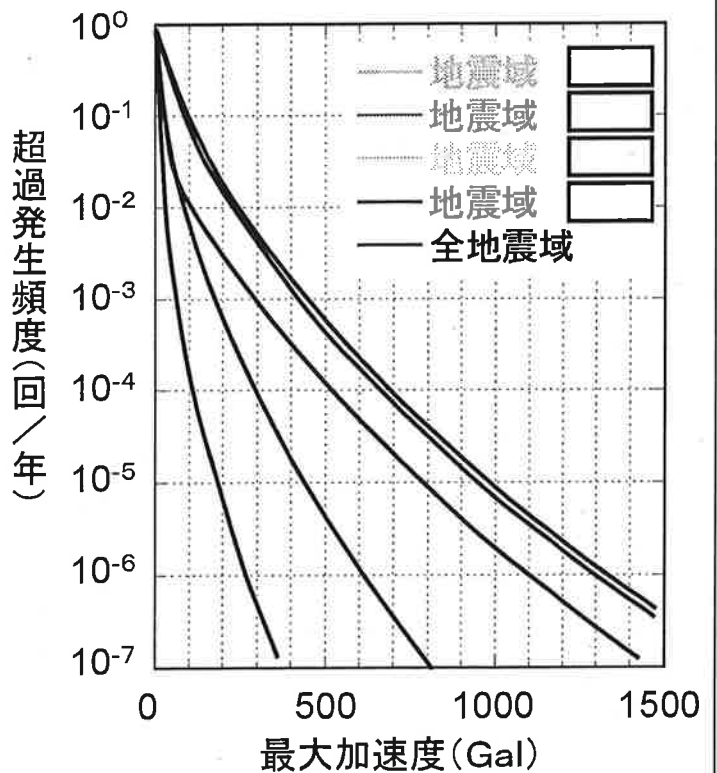


地震域及びハザードへの寄与の例

地震域

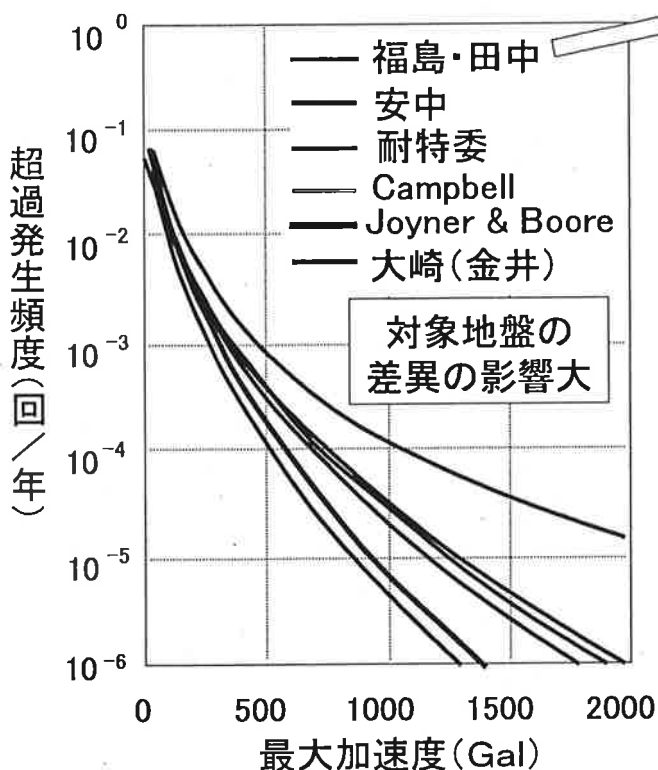


地震域別地震ハザード

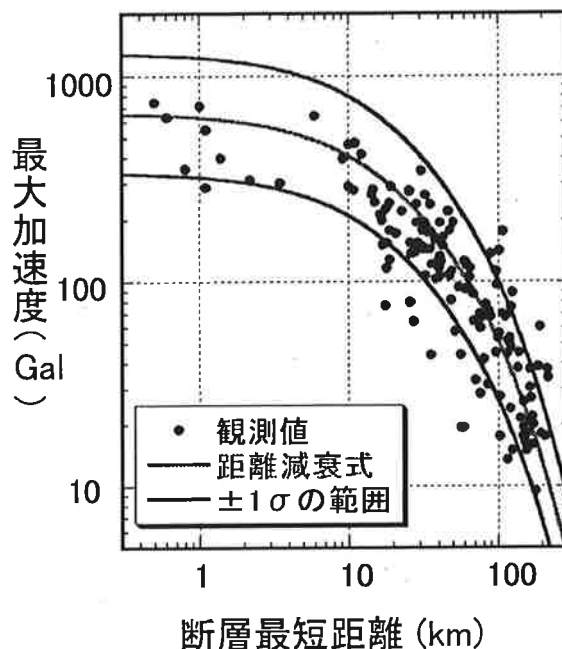


距離減衰式の違いによる結果への影響

距離減衰式の影響

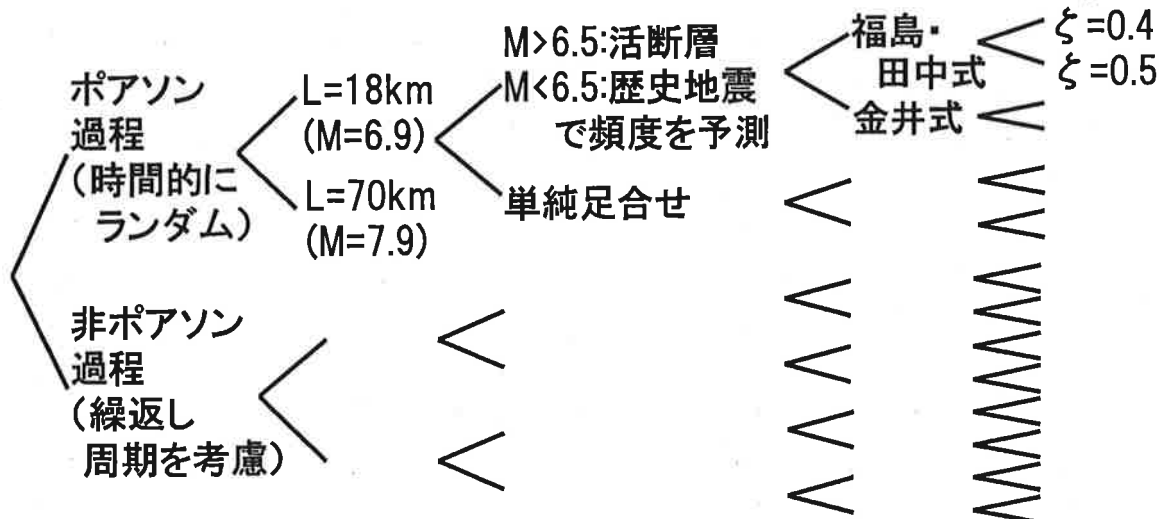


福島・田中式と観測記録の比較例(兵庫県南部地震)

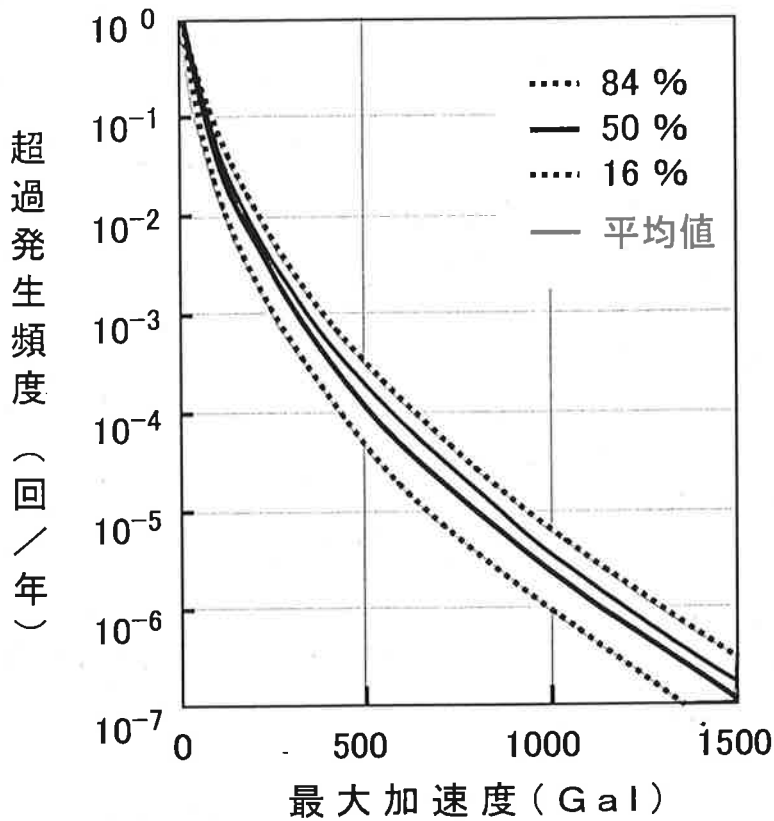


複数のモデルを取り扱う方法 (ロジックツリーを用いた方法)

地震発生モデル			地震動伝播モデル	
時系列モデル	活断層Aの扱い	歴史地震データと活断層データとの組合せ方法	距離減衰式の選定	式のばらつき



地震ハザードの評価例



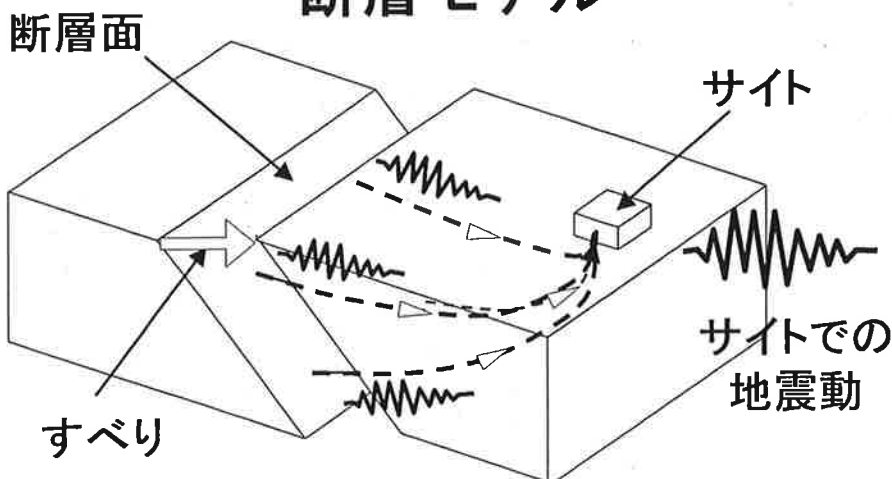
対象サイト：
 東北地方太平洋岸

- ・専門家の意見・判断を収集
- ・異なる意見をロジックツリーでモデル化
- ・全ルートを解析し統計処理

地震ハザード評価手法の高度化 —近傍断層からの地震動評価—

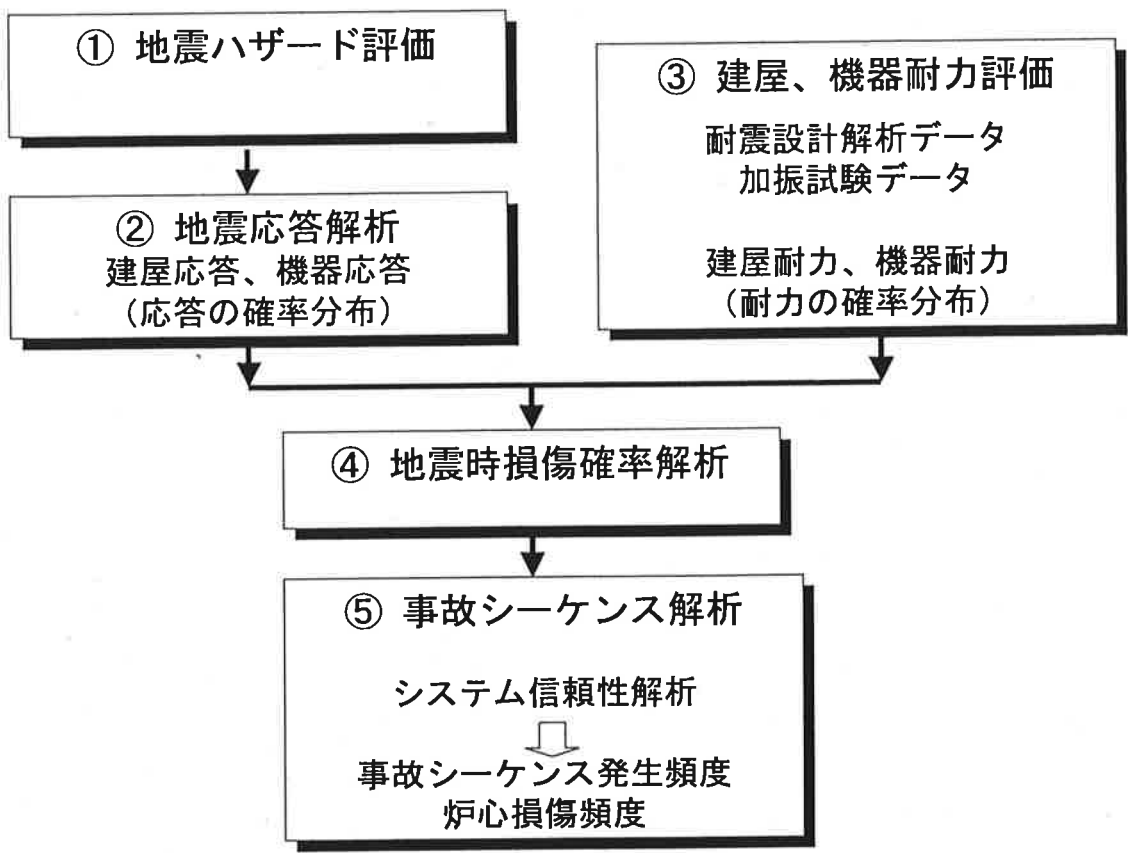
- 近傍震源断層 ⇨ 断層モデルによる地震動の評価
- その他の震源 ⇨ 距離減衰式による地震動の評価

断層モデル



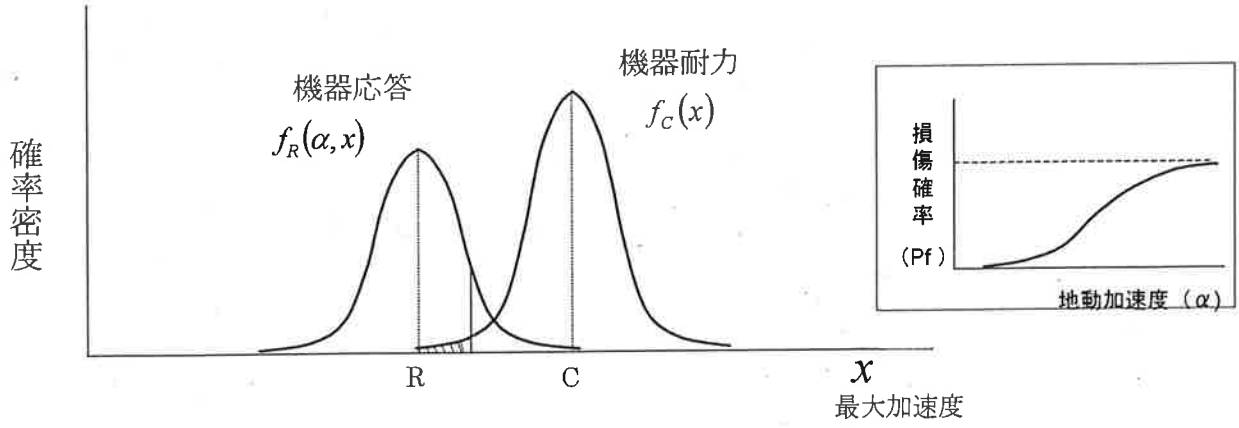
断層の破壊の進行に沿って各断層要素からの地震波を重ね合わせて地震動を評価

地震PSAの手順



機器の損傷確率の定義

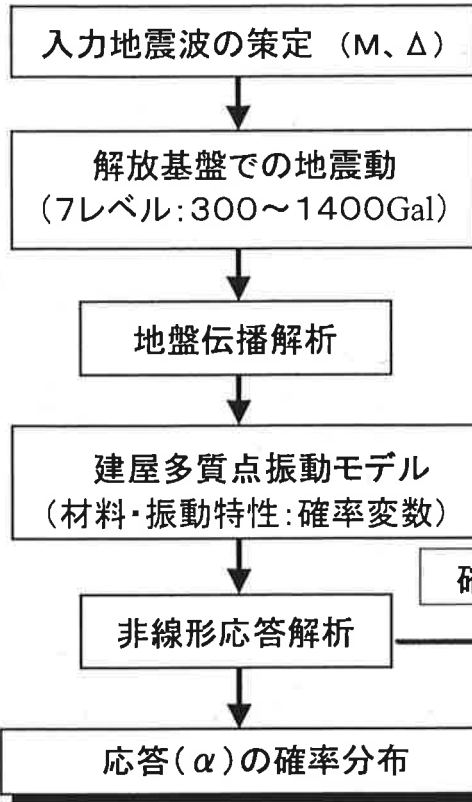
機器の損傷確率は、地動加速度 (α) に対する機器応答加速度が機器耐力 (限界加速度) を超過する確率であり、下式で表される。



$$P = \int_0^{\infty} f_R(\alpha, x) \left\{ \int_0^x f_C(x') dx' \right\} dx = \Phi \left[\frac{1}{\sqrt{\beta_R^2 + \beta_U^2}} \ln \left(\frac{R}{C} \right) \right]$$

- Φ : 対数正規分布の累積分布関数
 - β : 応答或いは耐力のばらつき
 - C : 極限耐力 (応力 等)
 - R : 応答 (応力 等)
- 〔機器の応答及び耐力の分布として対数正規分布を仮定〕

建屋地震時応答(α)の算定



詳細法の適用

(現実的な材料物性値等を用いた
非線形地震応答解析の実施)

考慮する確率変数 例

- 入力地震波の策定
 - ・ 入力波諸元 (Δ、M) に係る係数
- 地盤の波動伝播解析
 - ・ 地盤諸元に係る係数
- 建屋の応答解析
 - ・ 建屋の履歴特性に係る変数

機器の地震時応答(α)の算定

機器の現実的応答を、設計計算の結果から保守性を補正することにより算定。

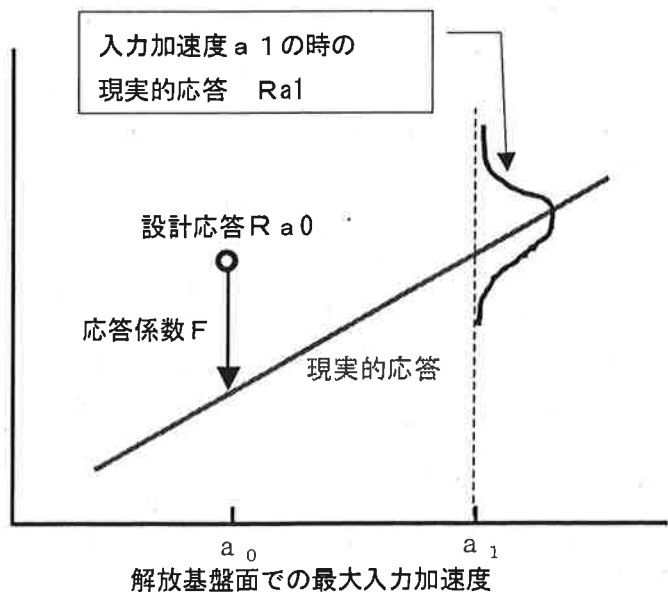
(保守因子毎に応答係数とばらつきを求め、設計応答を全体の応答係数 (F) で除して現実的応答を算定)

$$\alpha = R_{a1} = \frac{R_{a0}}{F} \times \frac{a_1}{a_0}$$

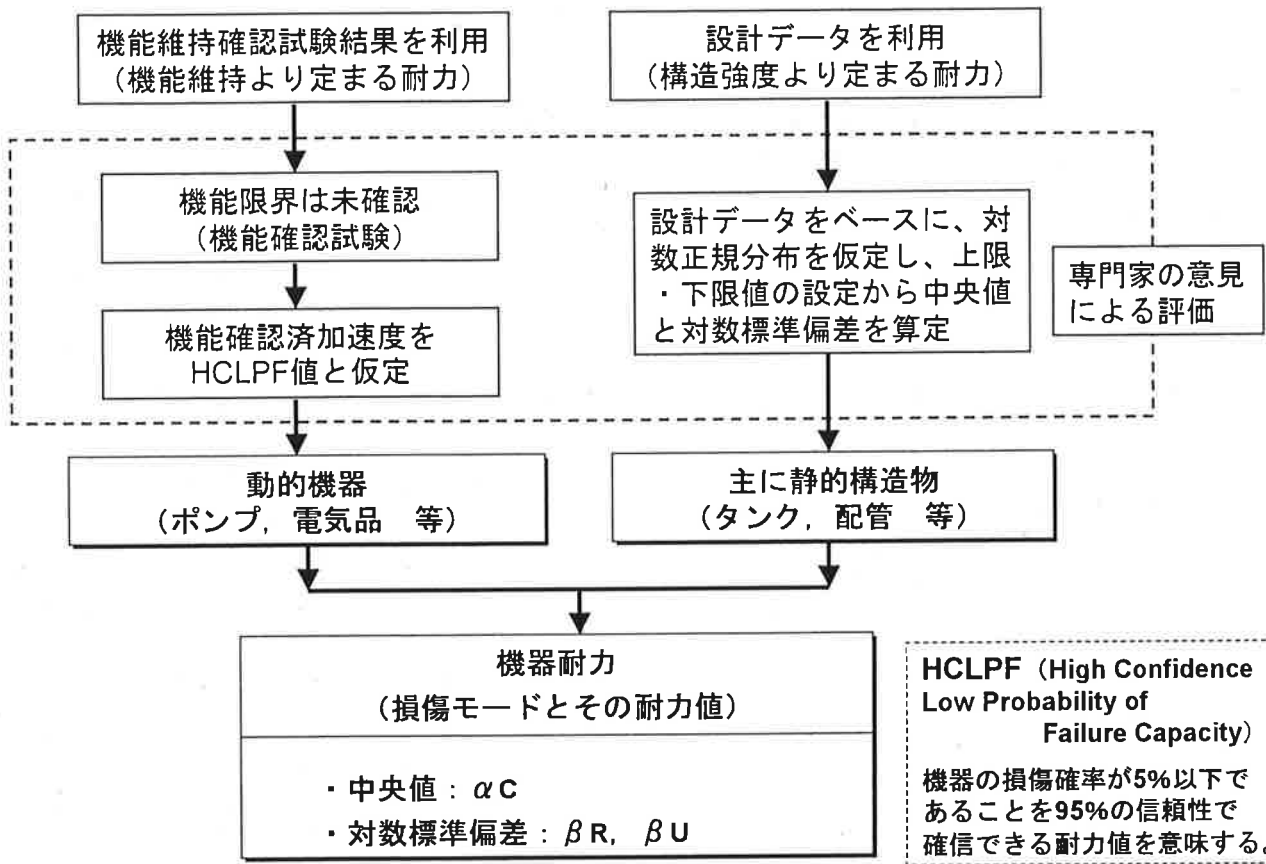
保守因子例

- ・ 振動モデルに係る係数 (F1)
- ・ 機器の減衰比に係る係数 (F2)
- ・ 床応答スペクトルの適用に係る係数 (F3)
- ・ 機器固有周期に係る係数 (F4)

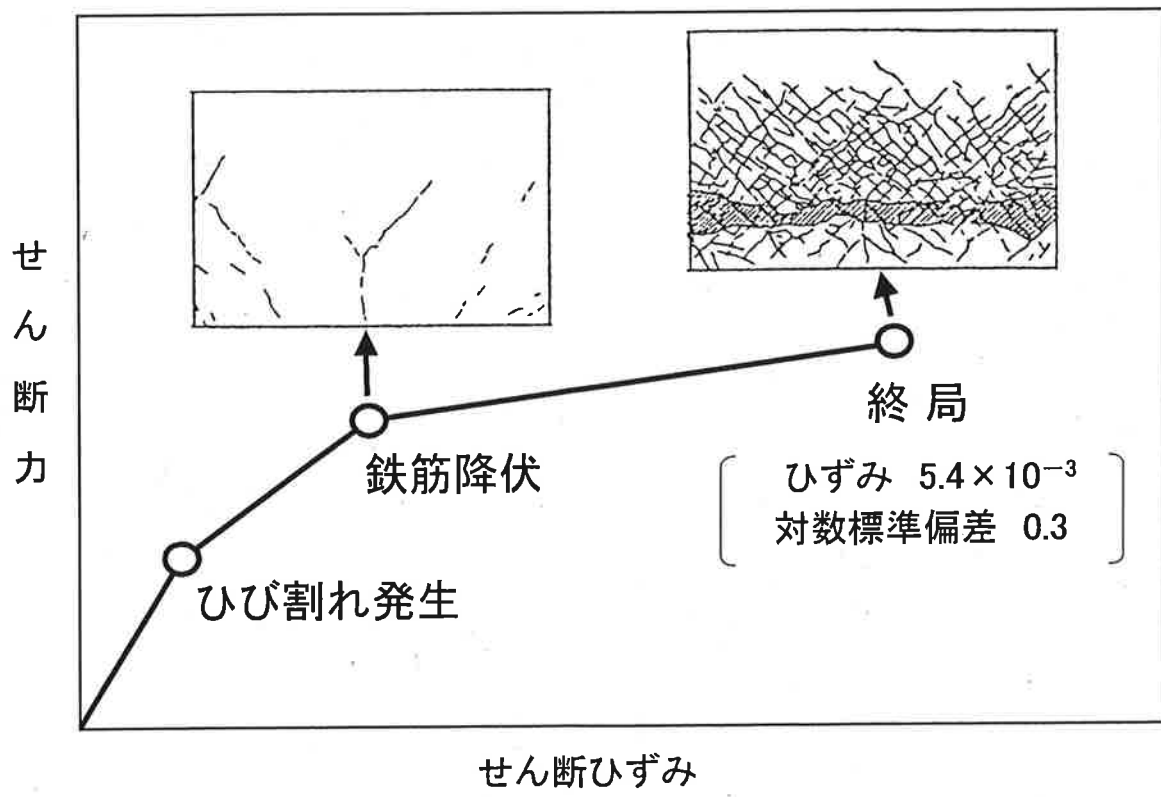
$$F = F1 \times F2 \times F3 \times F4$$



耐力評価方法

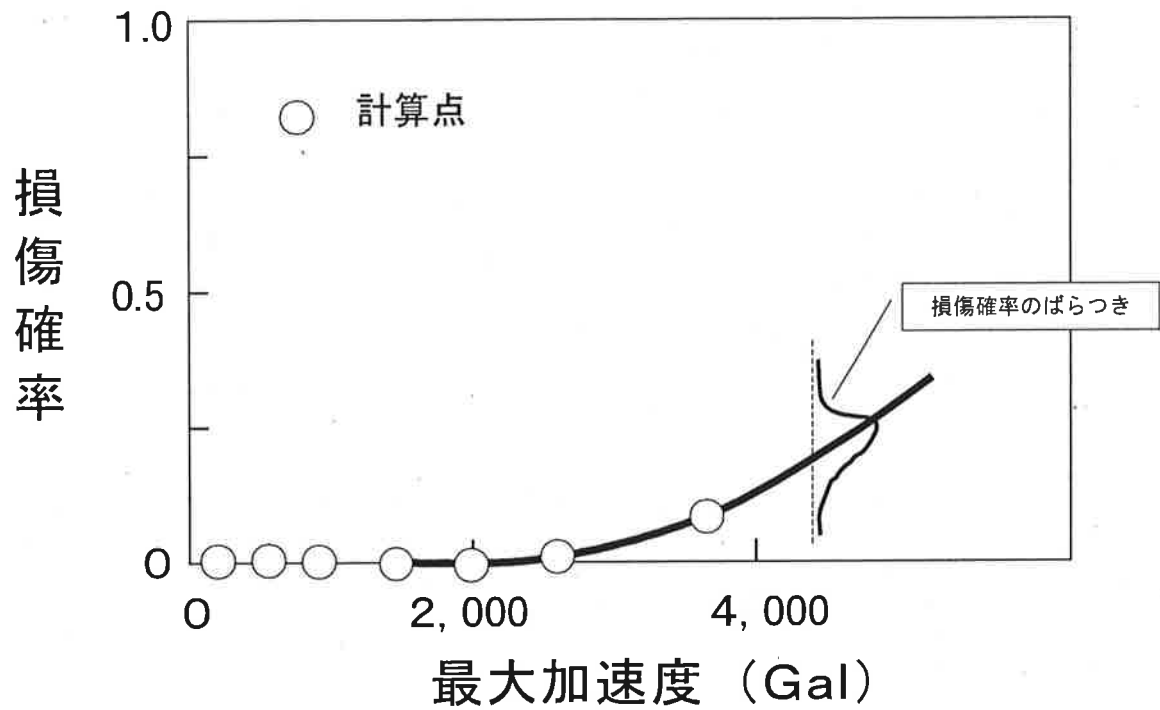


建屋耐震壁の耐力評価例



建屋損傷確率の評価例

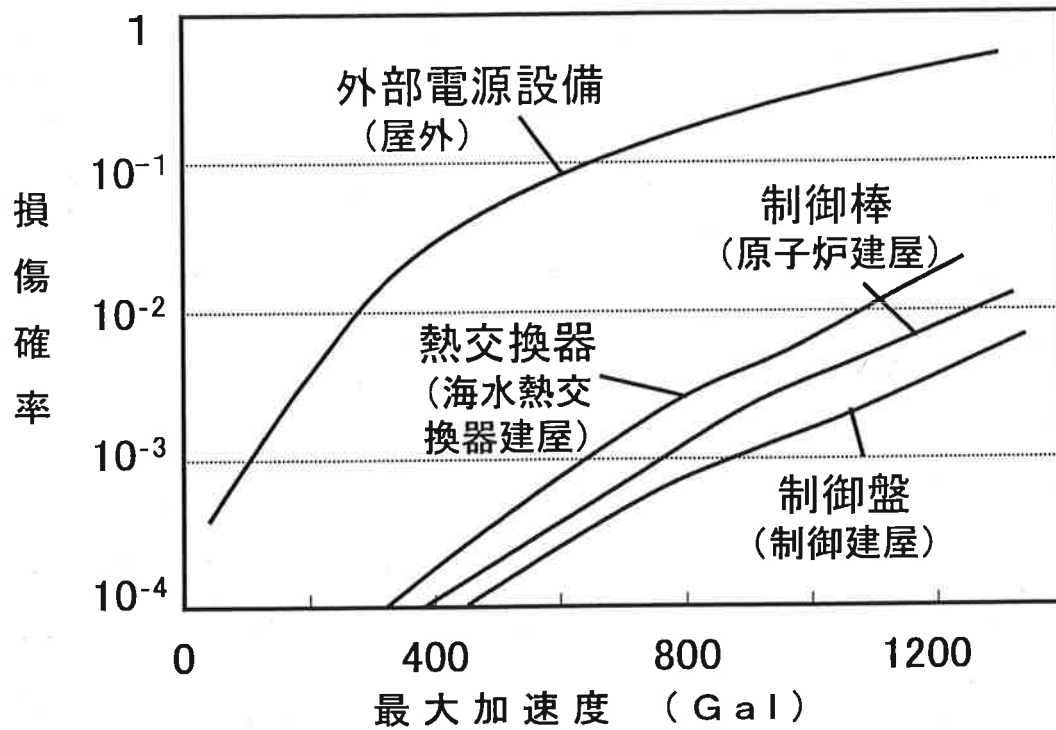
モデルBWR 原子炉建屋



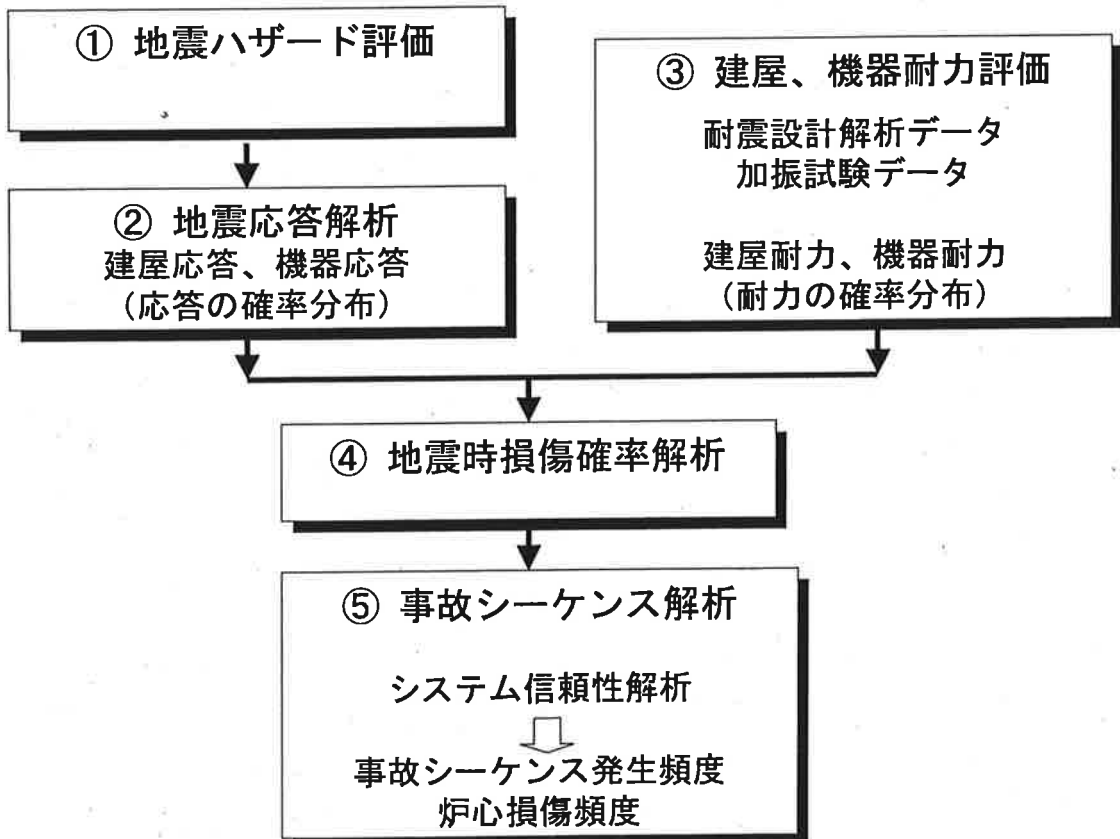
機器耐力値 (BWR 例)

機器カテゴリ	耐力中央値 (g)	対数標準偏差	備考
炉内構造物	6	0.17	制御棒挿入性
大型たて形容器/熱交	17	0.08	
大型平底たて形タンク	20	0.26	
電動ポンプ/圧縮器	1.6	0.04	動的機能
電動弁	7	0.04	動的機能
リレーキャビネット	3.6	0.04	動的機能
モータコントロールセンタ	3.6	0.04	動的機能
制御盤及びラック	3.6	0.04	動的機能

機器損傷確率の評価例(BWR例)

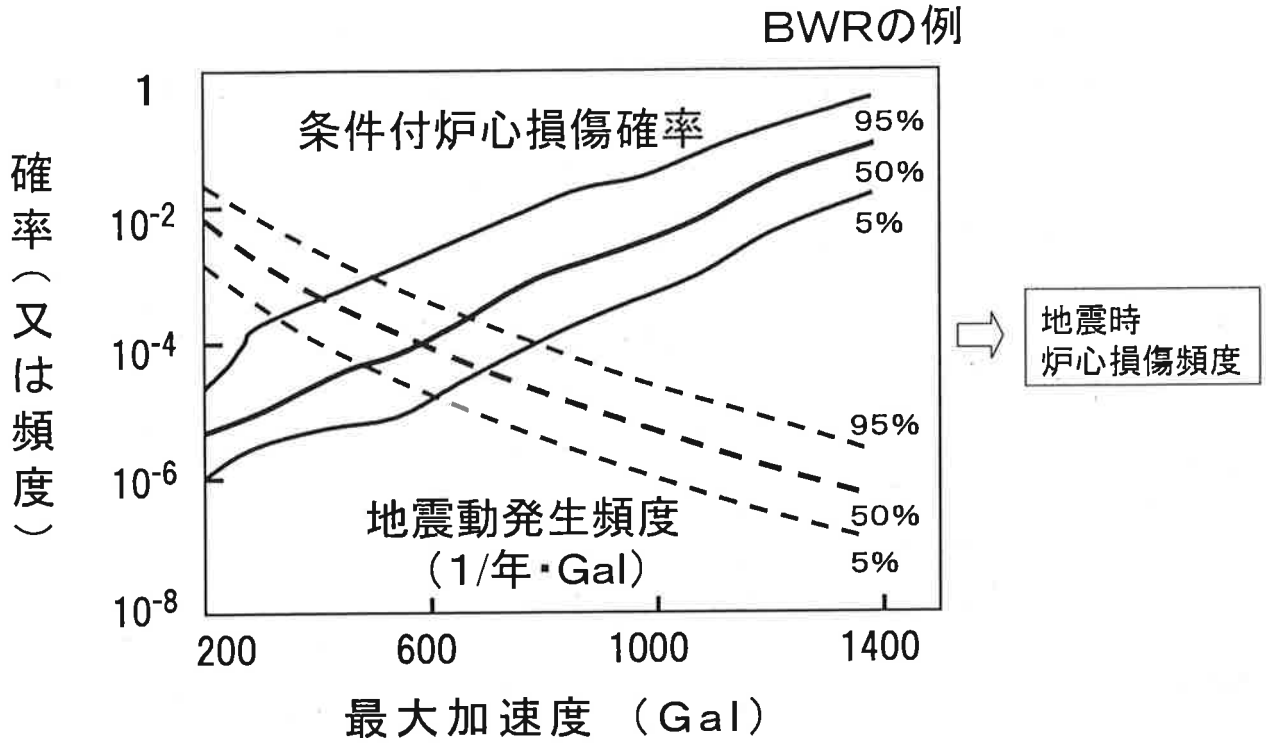


地震PSAの手順



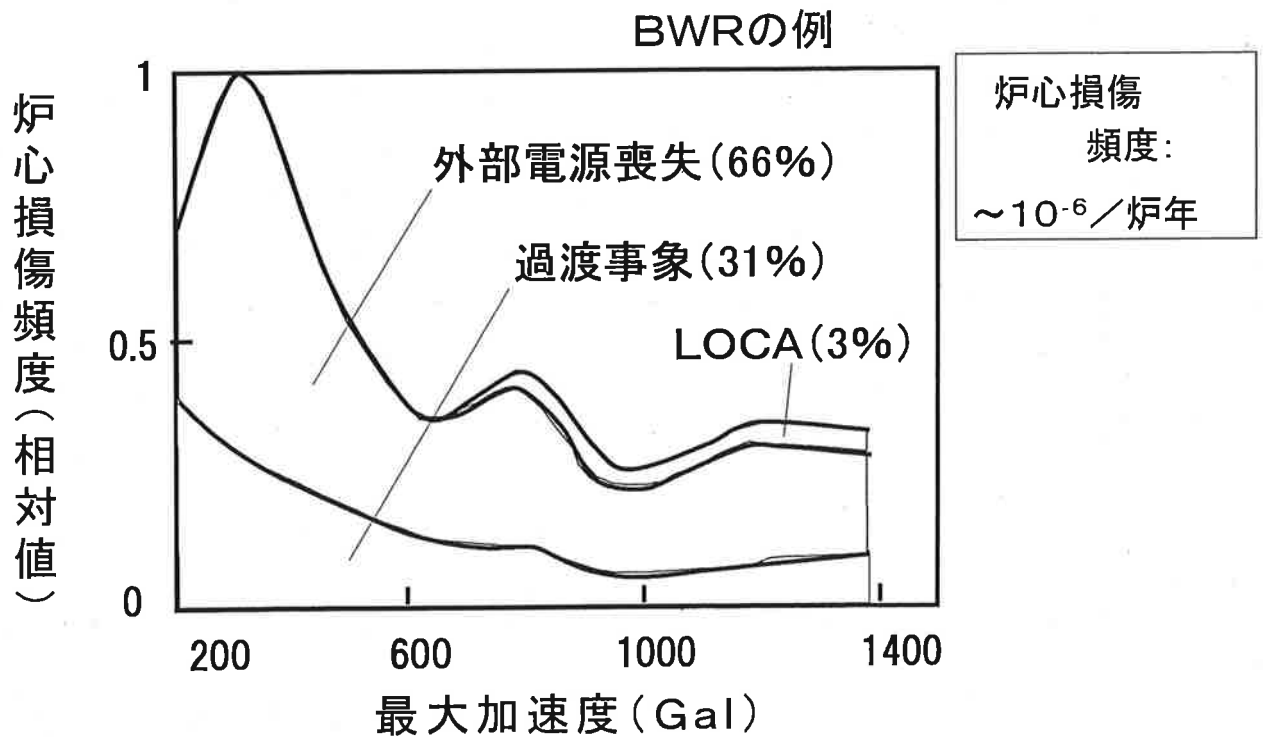
地震時炉心損傷頻度の算定(2/2)

-地震動発生頻度と条件付き炉心損傷確率-



地震PSA解析例

一起因事象別の炉心損傷頻度



地震PSA解析例

—主要事故シーケンス—

起因事象	事故シーケンス
外部電源喪失	交流電源喪失
	DG一基起動失敗・ 格納容器熱除去失敗
	格納容器熱除去失敗
	炉停止失敗
過渡事象	炉停止失敗
	格納容器熱除去失敗
	炉心冷却失敗
LOCA	格納容器熱除去失敗

BWRの例

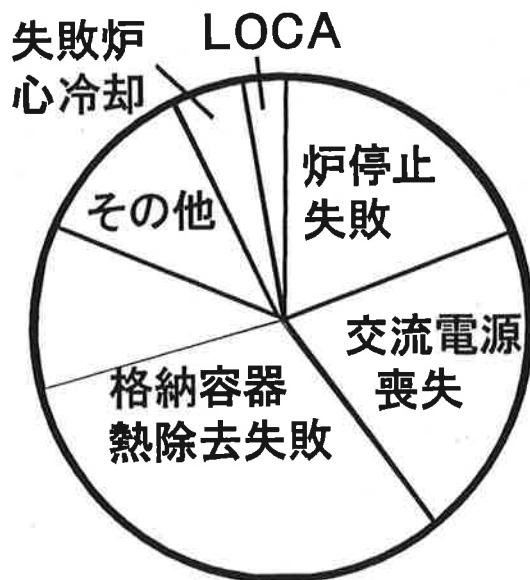


電源系の
機能喪失の影
響大

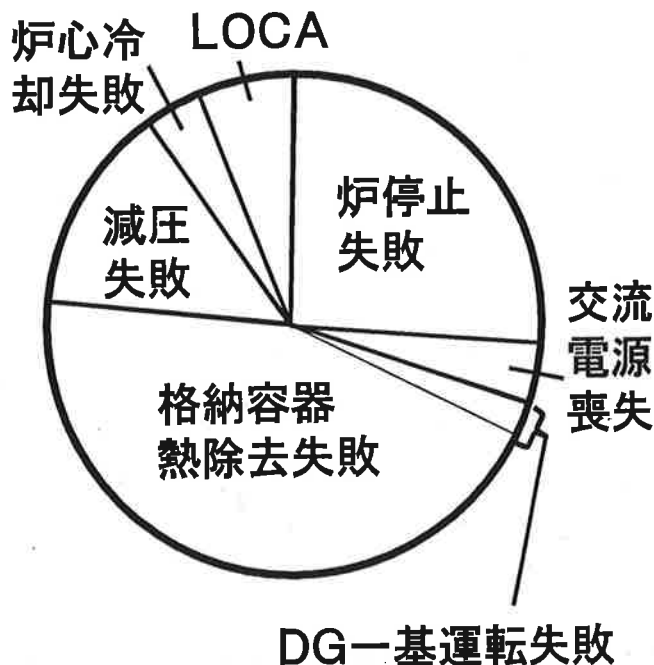
DG: ディーゼル発電機
LOCA: 冷却材喪失事故

地震PSAと内的事象PSAの比較

地震PSA(BWRの例)



内的事象PSA(BWRの例)



地震PSA評価手法の有効性について

平成16年2月

独立行政法人 原子力安全基盤機構

地震PSA評価手法の成熟度 (1/2)

日米における地震PSA研究・事業の実績

米国での主な内容	日本での主な内容
WASH-1400報告 : 1975年 ・確率論的手法による原子炉安全研究 ローレンスリバモア研究所 : 1978年 ・SSMRP法の開発 ・ZION法の開発 NUREG-1150報告 : 1990年 ・BWRピーチボトムの評価 ・PWR サリーの評価 IPEEE (外的事象個別プラント評価) : 1995年 ・個別プラント(約40基)の評価、評価結果を プラント改善の意思決定に利用 R. G. 1. 165 (立地・耐震指針) : 1997年 ・地震PSA成果の耐震指針改訂への反映 2000年 R. G. 1. 200 (PSA品質指針) : 2004年 外的事象PSAの組み込み	日本原子力研究所 : 1985年開始 ・評価手法・評価コード(レベル1) ・BWRモデルプラント評価 原子力発電基盤機構 : 1994年開始 ・原研手法コード導入、手法の高度化 レベル1, 2, 3地震PSAへの拡張 ・より実機に近いプラントの評価 代表的BWR(タイプ4, 5) 代表的PWR(2ループ、4ループ) ・振動台による機器耐力データ整備 他機関での検討 ・サイクル機構、事業者

地震PSA評価手法の成熟度 (2/2)

	米 国	日 本
地震ハザード評価	活断層データ, 歴史地震データ 地震動観測データを反映した評価手法	左記に関し、質量共に優るデータを反映した評価方法、地震ハザードの不確実さ幅が米国よりも小
建屋機器応答評価	詳細法(非線形地震応答解析) 安全係数法	同 左
機器耐力評価	試験による耐力の確認 ・機能限界を確認したもの ・機能限界は未確認のもの (HCLPFによる耐力の設定) 設計データによる耐力の算出	同 左 動的機器について、機能限界確認データの拡充を推進中
信頼性評価	ET, FTを用いた評価	同 左



米国は手法開発の先駆けであり、1995年以降実用(個別プラント評価)に使用
1997年に耐震設計の改訂に、地震ハザード結果を利用した設計用地震の設定が
導入された。

日本では米国手法を参考として、我が国の耐震設計法を反映した手法を開発し、
振動台による機器耐力データの拡充を含め、評価手法の高度化を推進している。

(参考資料)

I A E A (IAEA Safety Standards Series) の耐震関連基準の動向

- ・ DS305 (安全要求一立地評価)
確率論的評価を重視。設計用地震動を確率論的評価に基づき設定
- ・ DS302 (原子力発電所における地震ハザード評価)
地震地体構造モデル, 地震ハザードモデルにおけるパラメータの
確率分布, 不確実さの取り扱いについて表示

地震P S A評価手法・評価結果の活用（有効性）（1 / 3）

- ① 安全目標 and/or 性能目標との定量的な整合性確認
- ② 不確かさが耐震安全性に与える影響の程度の定量的評価
- ③ 安全評価プロセス及び安全裕度の透明性，説明性の向上
- ④ 炉心損傷頻度などに寄与する地震動範囲の把握と適切な設計基準地震動設定のための情報提供
- ⑤ 地震時の重要な事故シナリオ，緩和系、機器の同定
- ⑥ 地震時の構造物・機器の応答や耐力に関する不確かさの要因と不確かさの幅の把握
- ⑦ 耐震重要度分類への反映
- ⑧ アクシデントマネジメント対策への反映
- ⑨ 重要度に応じた設計改善点把握，合理化，保守点検項目，運転管理項目などに対する優先度付

安全目標に関する概要

（参考資料）

■安全目標案

○定性的目標案：

- ・放射線被爆等による公衆の健康被害の発生する可能性は、公衆の日常生活に伴う健康リスクを有意に増加させない水準に抑制されるべき

○定量的目標案：

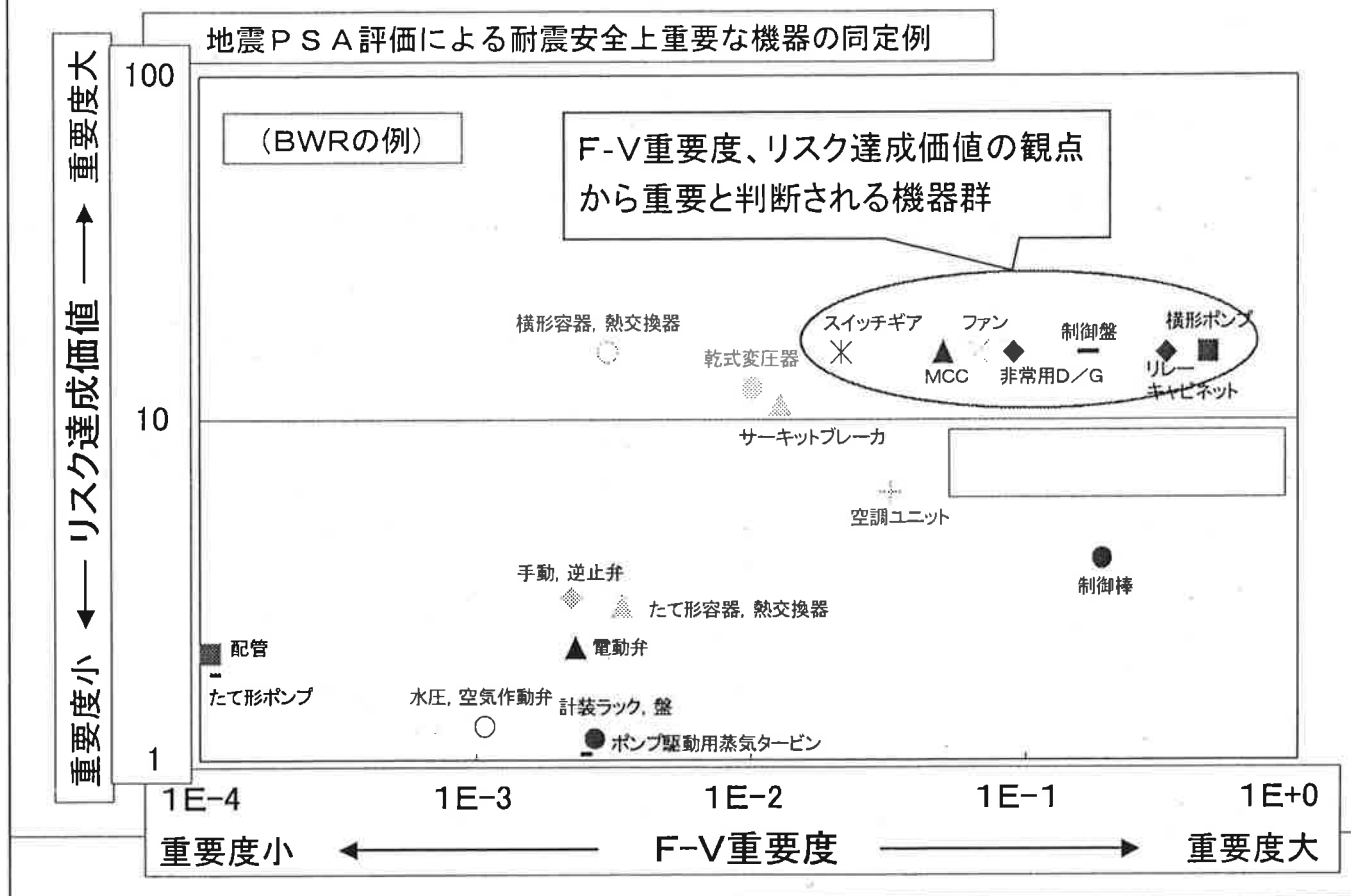
- ・放射線被爆による施設敷地境界付近の公衆の個人平均急性死亡リスクは、年当り百万分の1程度を超えないように抑制されるべき。
- ・放射線被爆によるがんによって、施設からある範囲の公衆の平均死亡リスクは、年当り百万分の1程度を超えないように抑制されるべき。

▽原子力施設の種類毎の性能目標案：

- ・原子炉施設において、重大な炉心損傷事故の発生頻度(CDF)や、大量の放射性物質がある時間内に放散される事象の発生頻度(LERF)

例：IAEA ISAGでのCDFは新設炉—10-5回/年、既存炉：10-4回/年

地震PSA評価手法・評価結果の活用（有効性）（2/3）



地震PSA評価手法・評価結果の活用（有効性）（3/3）

① 新設プラントの耐震安全性評価

（立地指針への対応）

- A 原子炉は事故を起こさないように設計、建設、運転及び保守が行い得ること。
- B 重大事故の発生を仮定しても、周辺の公衆に放射線障害を与えないこと。
- C 仮想事故の発生を仮想しても、周辺の公衆に著しい放射線災害を与えないこと。

（活用方法）

- 案1： 工認の最終段階における評価と規制当局による承認
- 案2： 事業者による自主評価

② 既設プラントの耐震安全性評価（バックチェック）

例：個別の機器で、仮に耐震健全性を満足しないものがあっても、システム全体として耐震安全性を満足していれば良しとする
→ バックフィット（機器の改良等）要否の判断に活用

③ 定期安全レビューにおける高経年プラントの耐震安全性の確認

④ 耐震安全性の維持・向上のための対策の立案と、実施された対策の有効性の確認

地震PSA手法高度化等の課題

5/E

項目

主な課題

-
- | | | |
|----------------|---|--|
| 地震ハザード評価 | : | 断層モデルによる近距離地震動の評価
地震動の上限値の設定 |
| 建屋・構造物フラジリティ評価 | : | 大入力時の建屋・地盤非線形応答解析手法の高度化 |
| 機器フラジリティ評価 | : | 振動台試験等による損傷モードと実耐力データの追加
整備（特に動的機器・電気系機器） |
| システム解析 | : | 損傷モードを考慮したシステムモデルの作成
損傷の相関の取扱い |
| 標準的マニュアル | : | (財)原子力安全研究協会にて整備中(～H16/3)
原子力学会において整備予定(H16/4～) |

確率論的手法に基づく耐震設計について

(財)原子力発電技術機構では、平成 15 年度上期までに発電用原子炉施設の設計用の基準地震動を確率論的に評価する方法を検討した。さらに、確率論的基準地震動を用いた耐震設計体系の基本的な枠組みを検討した。以下にその検討概要を示す。

1. 原子力発電技術機構「確率論に基づく基準地震動」の検討

原子力発電技術機構では、確率論的手法に基づく基準地震動の評価法を検討した。

その概念は、信頼性設計法のレベル 1 (荷重・耐力係数設計法) に基づく評価法であり、サイトの解放基盤表面における地震荷重 (PGA) の確率密度分布と、プラント損傷度の確率密度分布及び信頼性指標 β_T が与えられたときに、最適な設計ポイントとして設計用地震動を評価するものである。

地震荷重 (PGA) の確率密度分布は地震ハザード解析によって算定する。そして、確率論的基準地震動は地震荷重の中央値からの隔たりとして評価する。即ち、地震荷重の中央値 + $\beta_T \times \alpha_H \times \zeta_H$ として求める。

その概念を図-1 に、確率論的基準地震動の設定フローを図-2 に示す。

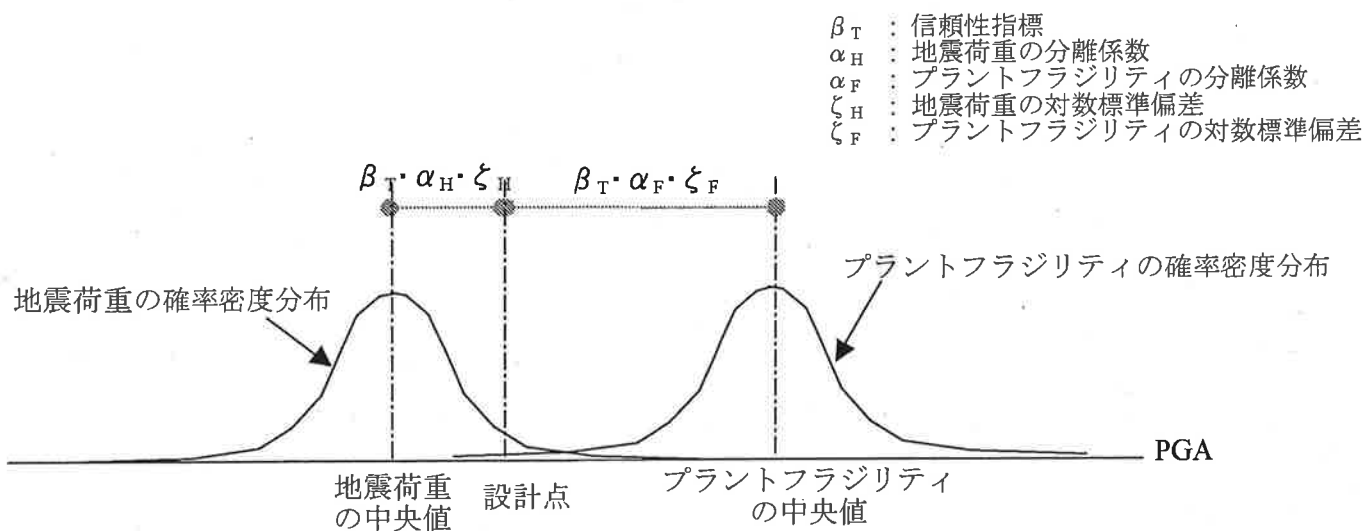


図-1 確率論的基準地震動の評価法の概念

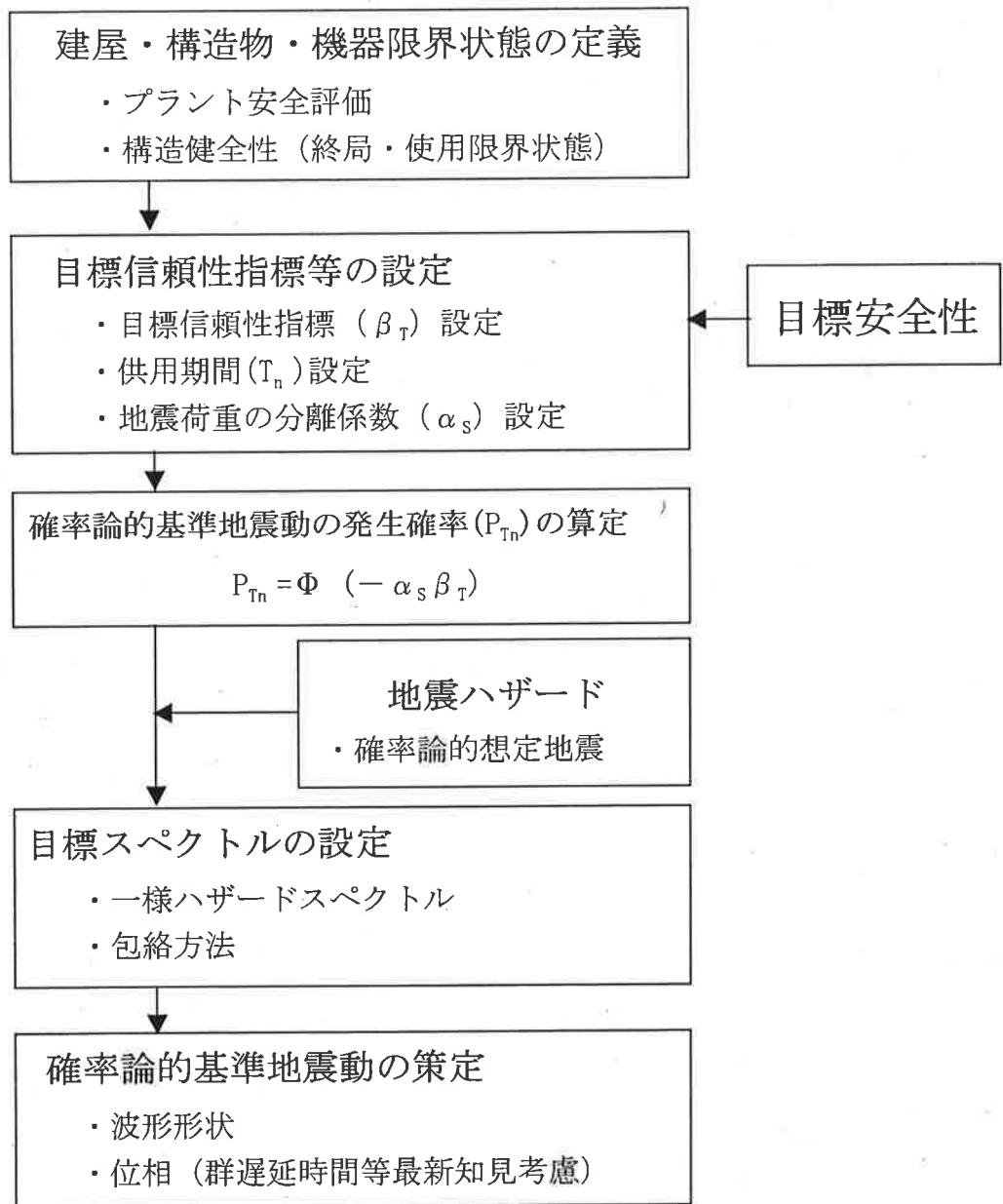


図-2 確率論的基準地震動の作成フロー

2. 確率論に基づく設計法の検討

(財)原子力発電技術機構では、確率論的基準地震動を用いた耐震設計法の基本的な枠組みについて検討した。

信頼性設計法のレベル1設計法(荷重・耐力係数設計法)は、構造物の供用期間において設計で考慮する限界状態を設定し、それらを超える確率に基づく設計規範により実施する設計法であり、手法としては確立している。しかしながら、実用的な観点からは従来の設計法が主流であり、今後、本設計法を用いた設計検討並びにノウハウの蓄積が望まれる。

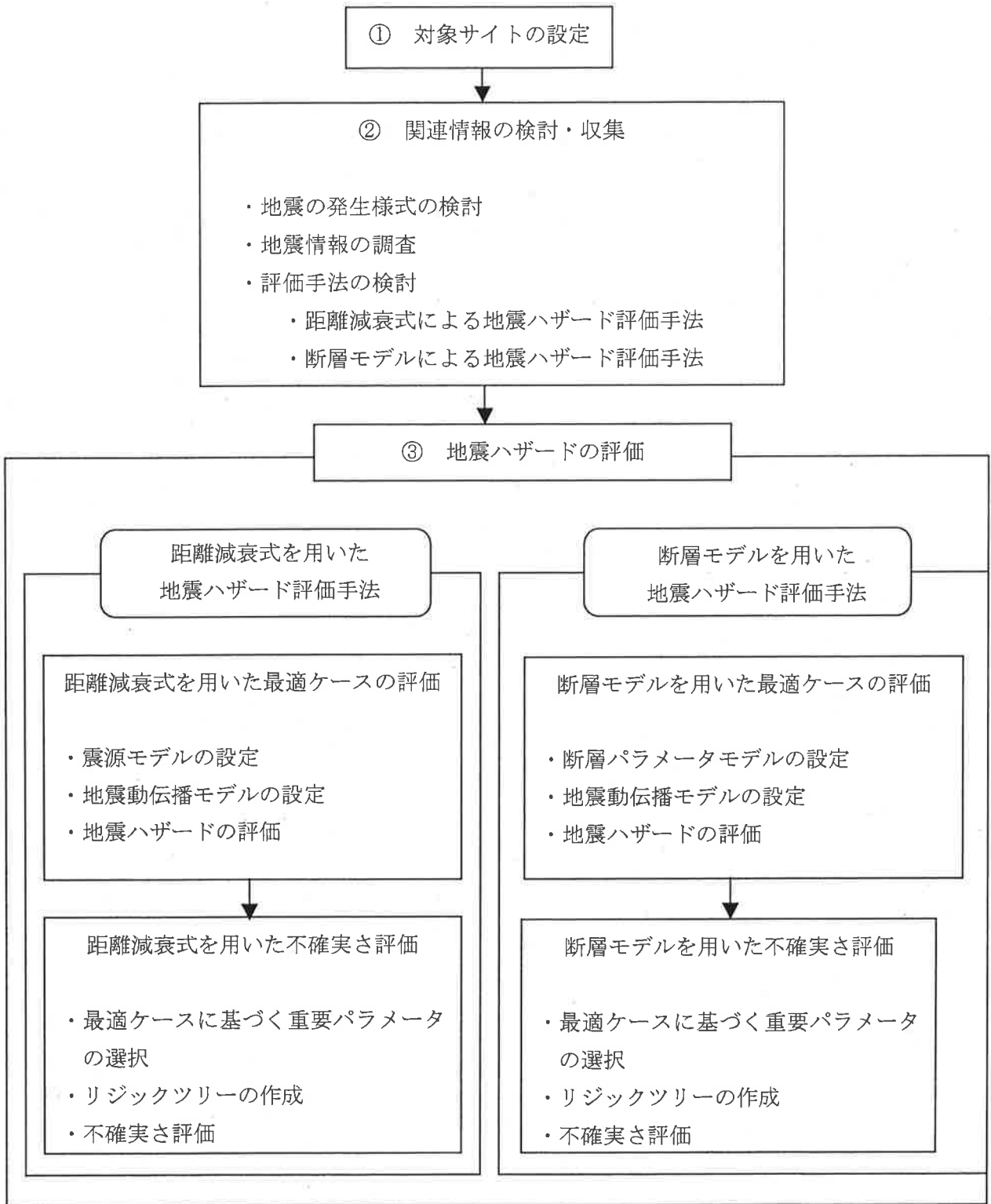


図2・1 地震ハザード評価の概要

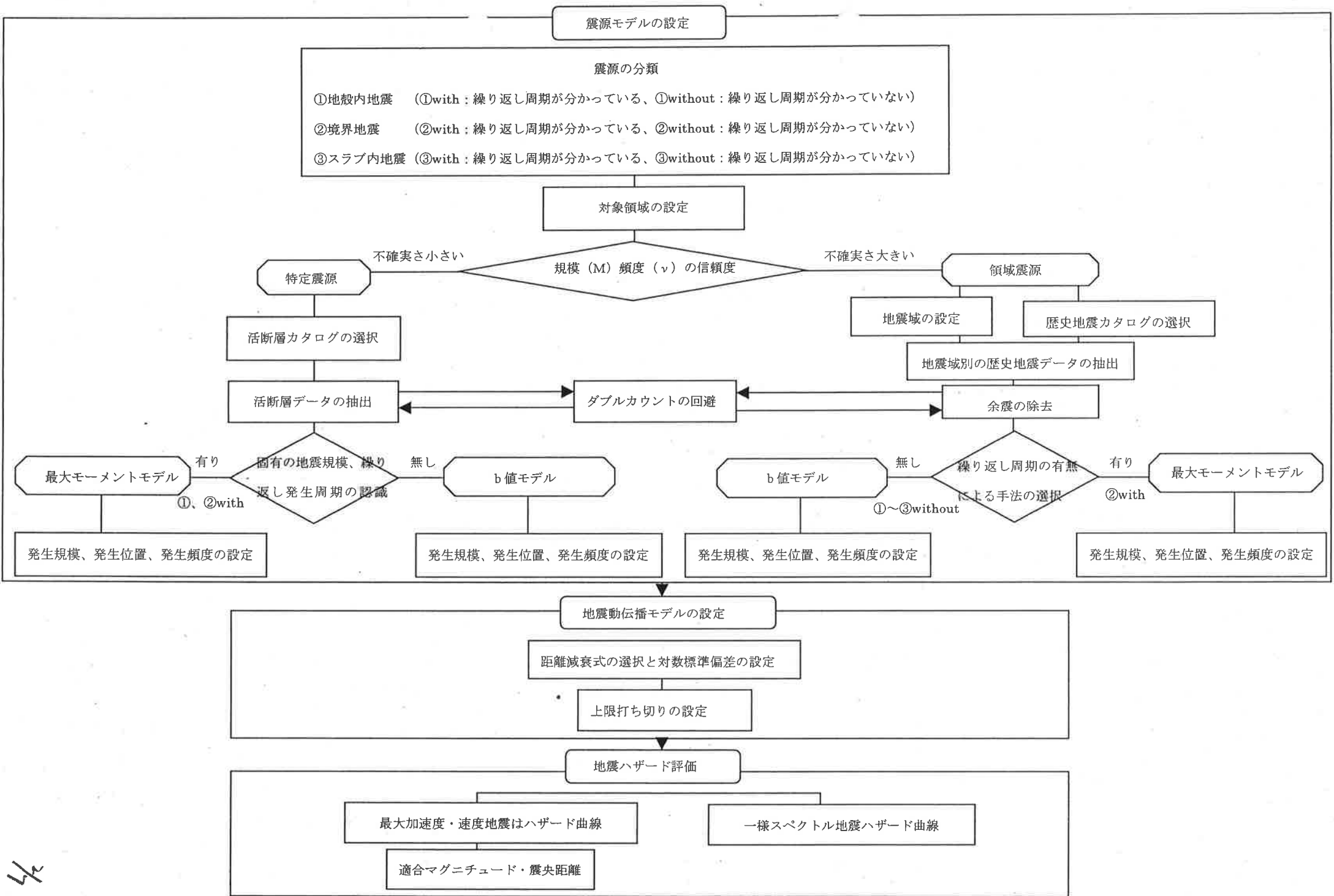


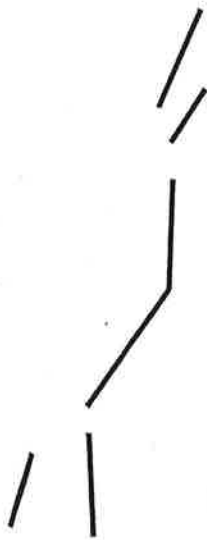
図 2. 2 地震ハザード評価における距離減衰式を用いた最適ケースの評価手順

44

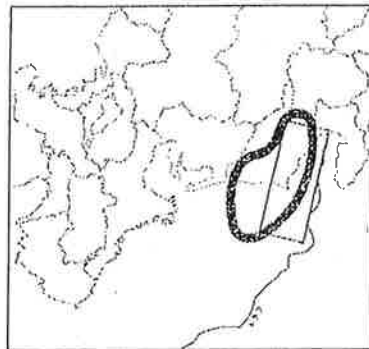
表 2・2 地震ハザード評価の最適ケースにおける不確実さ要因の一覧

特定震源			領域震源					
最大モーメントモデル	R	U	最大モーメントモデル	R	U	b 値モデル	R	U
○震源モデル設定			○震源モデル設定			○震源モデル設定		
1) 活断層データカタログの選択		○	1) 歴史地震カタログの選択		○	1) 歴史地震カタログの選択		○
2) 活断層カタログから対象活断層の抽出 ・対象範囲（軽度・緯度）の設定 ・物理的内容による選択方法 ・確実度の違い（Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ）で設定		○ ○ ○	2) 歴史地震カタログの選択 ・対象範囲（軽度・緯度）の設定 ・歴史期間・規模別の設定 ・余震の除去の仕方 ・活断層と歴史地震データの重複除去の仕方		○ ○ ○ ○	2) 歴史地震カタログの選択 ・対象範囲（軽度・緯度）の設定 ・歴史期間・規模別の設定 ・余震の除去の仕方 ・活断層と歴史地震の重複除去の仕方		○ ○ ○ ○
3) 震源の規模、位置、頻度の設定 ①規模（M） ・断層長さLの設定（セグメンテーション仕方） ・長さ（L）と規模（M）の関係式の選択 ②位置（Δ、深さH） ・平面（Δ—軽度、緯度）：一様分布 ・深さ（H）：断層長さのα倍の設定 ③頻度（ν）：非ポアソン過程で設定 ・非ポアソンモデルの選択 ・平均繰り返し周期（ $T_s = D/V_s$ ）の設定 ・平均変位速度 V_s と断層変位Dの設定 ・最終地震の発生時期（ T_0 ）の設定		○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	3) 震源の規模、位置、頻度の設定 ①規模（M） ・Mの設定 ②位置（Δ、深さH） ・平面（Δ—軽度、緯度）：一様分布 ・深さ（H）の設定 ③頻度（ν）：非ポアソン過程で設定 ・非ポアソンモデルの選択 ・平均繰り返し周期（ $T_s = D/V_s$ ）の設定 ・平均変位速度 V_s と断層変位Dの設定 ・最終地震の発生時期（ T_0 ）の設定		○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	3) 震源の規模、位置、頻度の設定 ①規模（M）・頻度（ν） ・Mの設定 ・最小Mの設定 ・最大Mの設定 ②位置（Δ、深さH） ・平面（Δ—軽度、緯度）：一様分布 ・深さ（H）の設定		○ ○ ○ ○
			4) 地震域の設定		○	4) 地震域の設定		○
○地震動伝播のモデル化								
1) 既存の距離減衰式と その対数標準偏差をセットでの選択		○	1) 既存の距離減衰式と その対数標準偏差をセットでの選択		○	1) 既存の距離減衰式と その対数標準偏差をセットでの選択		○
2) 上限値の打ち切りに関する対数標準偏差の選択		○	2) 上限値の打ち切りに関する対数標準偏差の選択		○	2) 上限値の打ち切りに関する対数標準偏差の選択		○

（注）R：ランダムに起因する不確実さの要因、U：知識不足に起因する不確実さの要因

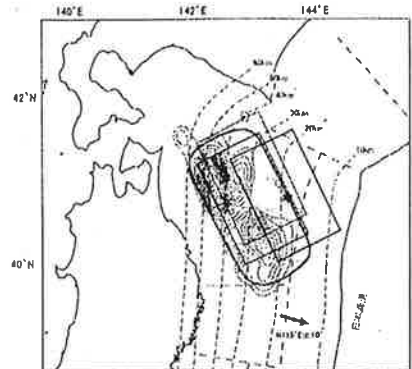


想定東海地震の新たな想定震源域 (案)



- 新たな想定震源域 (案)
- 中央防災会議(1979)による想定震源域

三陸沖北部の想定震源域の位置

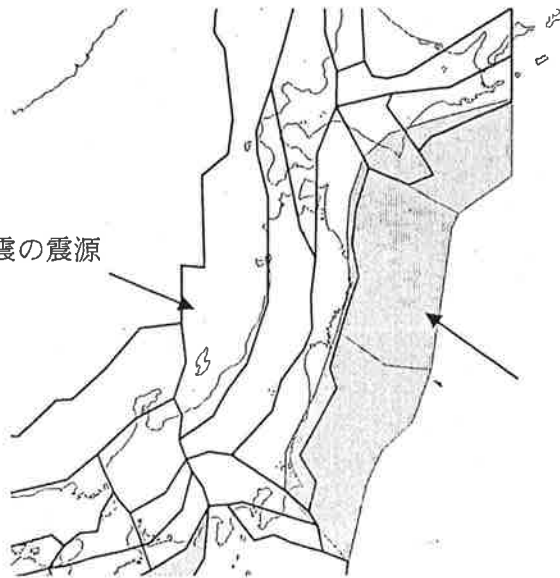


- プレート境界の等震線(本報告)
 - 1958年 十勝沖 Kanamori(1971)[長期期表面波]
 - 1988年 十勝沖 Fikao and Furumoto(1975)[長期期地震波]
 - 1968年 十勝沖 Aida(1978)[津波強震実績]
 - 1968年 十勝沖アズベリティ永井ほか(2001)
 - 1988年 十勝沖震源位置
 - 想定震源域
- 矢印は陸側のプレートの太平洋プレートに対するずれの向きを示す。

活断層震源 (概念図)

プレート境界の震源

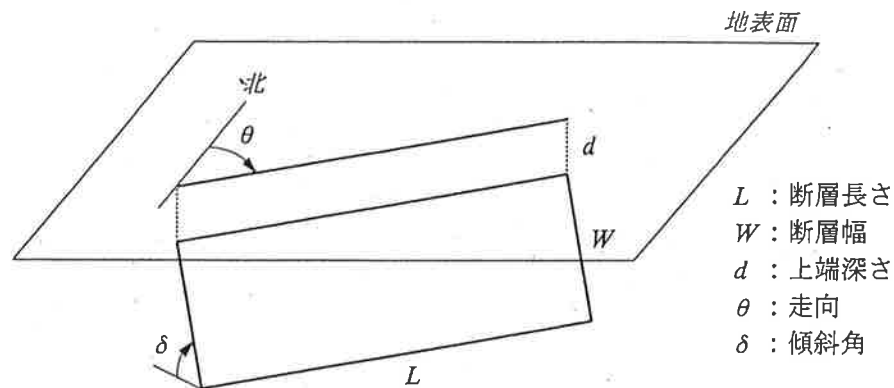
内陸の地殻内地震の震源



プレート境界地震の震源

* : 地震調査研究推進本部による資料。 左図は「南海トラフの地震の長期評価について (H13.9.27)」より抜粋。
 右図は「三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価について (H14.7.31)」より抜粋。

種文献（参考となる文献の記載が必要）をもとに設定することが望ましい。しかし、文献からは明確に評価できない場合があるため、例えば、横ずれ断層の場合、断層の深さは上端位置を地震発生層の知見に基づく上端深さ、断層幅は断層長さと同じ（但し、上部地殻深さを考慮して鉛直方向で 15km 程度を最大とする）、傾斜角は 90 度と設定することが考えられる。なお、これらの幾何学的パラメータに関しては、断層周辺の領域で観測された地震の震源分布や震源メカニズム、及び当該地域の地震地体構造に基づき推定することもできる。



解図 3-1 断層面形状パラメータ

b) 地震規模（マグニチュード）

活断層で発生する地震の規模は断層長さが長いほど大きくなることが知られており、断層長さとマグニチュードの関係を定めた種々の経験式が提案されている。日本では以下の式が広く用いられており、本手順書では、活断層で発生する地震の最大マグニチュードを、これらの式に基づき確定的に評価した固有地震モデルを採用する。

$$\text{松田式}^{6)} \quad \text{Log}_{10}L = 0.6M - 2.9 \quad (\text{解 3.1})$$

$$\text{武村式}^{7)} \quad \text{Log}_{10}L = 0.6M - 2.97 \quad (M \geq 6.8) \quad (\text{解 3.2})$$

$$\text{Log}_{10}L = 0.4M - 1.38 \quad (M < 6.8) \quad (\text{解 3.3})$$

$$\text{Log}_{10}L = 1/2 \cdot \text{Log}_{10}M_0 - 11.82 \quad (M_0 \geq 7.5 \times 10^{25}) \quad (\text{解 3.4})$$

$$\text{Log}_{10}L = 1/3 \cdot \text{Log}_{10}M_0 - 7.28 \quad (M_0 < 7.5 \times 10^{25}) \quad (\text{解 3.5})$$

ここで、 L ：活断層長さ（km）

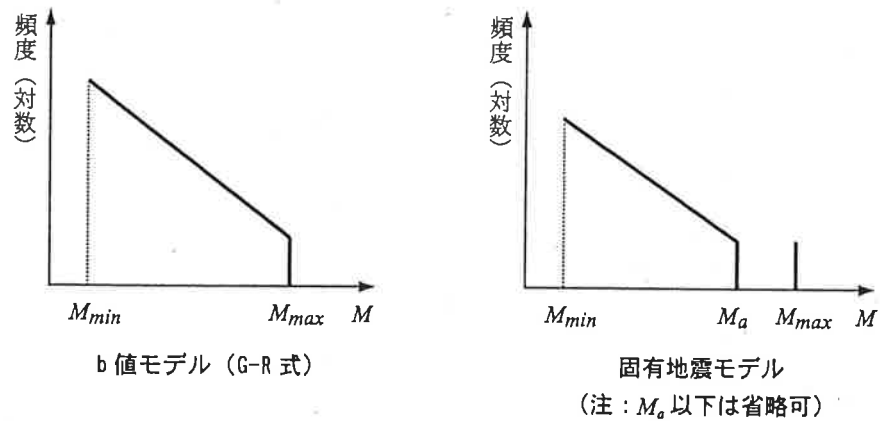
M ：地震のマグニチュード（気象庁マグニチュード）

M_0 ：地震モーメント（dyne cm）

但し、上式で評価した地震規模が評価対象領域の過去の地震や地震地体構造等の知見から判断される最大地震規模と矛盾しないよう、1回の地震で動く活断層の想定長さに上限を設定する必要がある。また、上限の設定にあたっては、前述のセグメンテーションに対する考え方も考慮する必要がある。

なお、本手順書では、特定震源の地震活動特性を、いつも同じ規模・間隔で繰り返されると考える固有地震説に基づき評価することを基本としているが、固有規模の地震の発生

に加えてマグニチュードが比較的小さい地震の発生を確率的に評価することもできる。この場合、地震発生頻度の評価に注意が必要である。解図 3-2 に地震のマグニチュード－頻度関係モデルを示す。



解図 3-2 地震のマグニチュード－頻度関係モデル

c) 地震発生頻度

活断層で発生する地震の発生頻度は、地震時の断層変位（すべり量）と活断層の年平均変位速度の比より平均的な発生頻度として評価する。具体的には、松田の関係式（断層長さ
とマグニチュードの関係、すべり量とマグニチュードの関係）⁶⁾ に基づき、以下のよう
に評価する。

$$\text{Log}_{10} L = 0.6M - 2.9 \quad (\text{既出、解 3.1})$$

$$\text{Log}_{10} D = 0.6M - 4.0 \quad (\text{解 3.6})$$

$$\nu = S/D = (10^{1.1} \cdot S)/L \quad (\text{解 3.7})$$

ここで、 ν ：地震の年平均発生頻度（回/年）

M ：地震のマグニチュード

L ：活断層長さ（km）

D ：地震時のすべり量（m）

S ：活断層の年平均変位速度（m/年）

なお、「新編 日本の活断層」²⁾ では、活断層の年平均変位速度に応じ
て活動度を以下のように分類している。

活動度 A：1.0～10（m/千年）

活動度 B：0.1～1.0（m/千年）

活動度 C：0.01～0.1（m/千年）

なお、評価対象とする活断層において過去に繰返し発生した地震の年代が評価可能なト
レンチ調査結果等が存在する場合には、上記の方法によらず、調査結果から地震発生頻度
を直接評価しても良い。また、地震発生
の非定常性を考慮することもできる。この場合、

解表 3-1' 繰り返し発生する地震の例¹⁾

a. プレート間地震である南海地震の発生年と発生間隔

地震発生年月日	発生間隔
684年 11月 29日	202.7年
887年 8月 26日	211.5年
1099年 2月 22日	262.4年
1361年 8月 3日	136.9年
1498年 7月 9日	106.6年
1605年 2月 3日	102.7年
1707年 10月 28日	147.2年
1854年 12月 24日	92.0年
1946年 12月 21日	
平均活動間隔	157.8年

b. 陸域の活断層である阿寺断層の地震の発生年と発生間隔

地震発生年月日	発生間隔
6,496±177 B.C.~8,477±271 B.C.	1,009.5年
6,458±143 B.C.~6,496±177 B.C.	2,246年
4,178±160 B.C.~4,284±177 B.C.	2,092年
1,947±140 B.C.~2,331±146 B.C.	1,982年
68±96 B.C.~381±216 B.C.	1,742年
1586年 1月 18日 (天正地震)	
平均活動間隔	1814.3年

提出資料概要

H13.12

	原安委 2 3 項目との対応	提示時期 H14年	担 当	資料の概要	備 考
基本 WG	① 安全目標	2月	原安委		
	③ 国内外の耐震設計の動向	2月	原安委	・ 第4回原安委提出資料のコメント反映版 (各指針類の比較表)	
	④ 確率論的手法と決定論的 手法の関係 (その1)	2月	原機構	以下についての概要紹介 (1)海外の動向 1) 一般的内容—IAEA 2)PSA 関連—米国、韓国等 (2)国内の動向 1) 一般的内容—建築学会、土木学会、 ライフライン機関 2)PSA 関連—原研、NUPEC、サイクル機構等	
	④ 確率論的手法と決定論的 手法の関係 (その2)	3月	原機構	(1)海外の動向 1)IAEA (詳細) 2)米国の地震 PSA (詳細) (2)性能設計の動向 1)原子力発電所屋外重要土木構造物耐震性能照査 指針 2)鉄道構造物等設計標準	
	② 耐震重要度分類の考え方	5月	原機構/電事連	・ 現行の耐震設計重要度分類の実情紹介	
	③ 確率論的手法と決定論的 手法の関係 (その3)	5月	原機構	(1) 国内の地震 PSA の動向 1)原研の地震 PSA (詳細) 2) サイクル機構の地震 PSA (詳細) 3) NUPEC の地震 PSA (概要)	

	原安委23項目との対応	提示時期 H14年	担 当	資料の概要	備 考
施設 WG	⑤ 静的地震力の動向	2月	電事連	・ 現行の建築基準法の動向紹介 ・ 現行の原子力発電所耐震設計審査指針の紹介	資料としては「③ 国内外の耐震設計の動向」と合本か
	⑥ 構造信頼性の確率論的評価	3月	原機構	・ ISO関連情報の紹介	

必要に応じて基本WG①～④の項目を追加

	原安委 2 3 項目との対応	提示時期 H 1 4 年	担 当	資料の概要	備 考
地震・地震動WG	⑩、(22) 活断層評価法* ¹⁾	2・5月* ²⁾	原機構／電事連	<ul style="list-style-type: none"> ・活断層の評価期間に関する検討 ・活動度 (A～C級) による S1・S2 分類の意義 ・長大活断層のセグメンテーション ⑩地質調査手引きの改訂の方向性 ✓鳥取県西部地震関連検討結果 	
	⑱ 基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価	5月	電事連	<ul style="list-style-type: none"> ・現行の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価手法の概要 ・土木学会原子力土木委員会地盤安定性評価部会での検討内容 	
	⑳ 津波評価法	3月	電事連	土木学会原子力土木委員会津波評価部会の津波評価手法	
	⑰基準地震動の考え方	2月 3月	電事連	<ul style="list-style-type: none"> (1) 過去の地震の評価方法 <ul style="list-style-type: none"> 1) 現行指針の記載事項 2) 地震諸元の検討方法 (2) 地震地体構造の評価方法 <ul style="list-style-type: none"> 1) 現行指針の記載事項 ②最近の知見 (スラブ内地震、地球物理学データ) 3) 地震地体構造マップ 	
	⑳地震発生確率論的評価	2月	原機構	・推本の評価方法の紹介	
	⑰基準地震動の算定法	3月 5月	電事連	<ul style="list-style-type: none"> (1) 主な地震動評価法の紹介 ②耐専スペクトルの紹介 ③断層モデルによる地震動評価法 ④スラブ内地震の評価 ✓ 	

* 1) 原安委主要 2 3 項目には「活断層評価法」はない。

* 2) 鳥取県西部地震関係の検討結果は 5 月

必要に応じて基本WG①～④の項目を追加

地震・地震動関連の検討項目と検討予定（案）

WGにおける検討項目	検討事項	検討会議体	予定
19 設計用地震の区分と 想定すべき地震	○スラブ内地震の特性と評価方法	地震・地震動WG	3/3 予定
	○地震地体構造の定義と適用方法	地震・地震動WG	2/6 済
	○活断層の評価期間の妥当性	分科会	(事務局) (推本?)
	○地下の震源と地表の活断層あるいは 地震断層との関係	地震・地震動WG	3/3 予定
	○鳥取県西部地震の震源地域を対象と した調査結果の整理	地震・地震動WG	2/6 済
20 地震発生の確率論的 評価	○震源を予め特定できる地震による地 震動の想定における不確かさの取扱 いに関する検討 (○震源を特定しにくい地震との組合 せ法に関する検討)	地震・地震動WG (地震・地震動WG)	3/3 予定 (JNES) 4~5 月 予定
	○震源を特定しにくい地震による地震 動の確率論的評価	分科会	3~4 月 (JNES)
22 地質調査に関する基 本的な要求事項	○鳥取県西部地震の震源を対象とした 調査結果の整理	(再掲)	2/6 済
17 基準地震動の考え方	○基準地震動の数(現行 S1、S2 の概念)	分科会	(事務局)
	○基準地震動の設定位置	分科会	(事務局)
18 基準地震動の算定法	○スラブ内地震の特性と評価方法	(再掲)	3/3 予定
	○震源を予め特定できる地震による地 震動の想定における不確かさの取扱 いに関する検討	(再掲)	3/3 予定 (JNES)

	○最新の地震動評価法（上下方向地震動の応答スペクトルの評価法を含む）	地震・地震動WG	(電協会)
21 地震動の確率論的評価	○震源を予め特定できる地震による地震動の想定における不確かさの取扱いに関する検討	(再掲)	3/3 予定 (JNES)
	○震源を特定しにくい地震による地震動の確率論的評価	(再掲)	3~4月 (JNES)
9 設計地震力の考え方	○水平地震力と上下地震力の組合せ法に関する検討	分科会	(電協会)
15 第四紀層地盤立地	○第四紀層地盤立地の採用可否の検討	分科会	(事務局)
16 免震構造、制震構造	○免震構造、制震構造の採用可否の検討	分科会	(事務局)
23 地震随伴事象	○津波に関する検討	分科会	(事務局)
	○基礎地盤及び周辺地盤の安全性評価に関する検討	分科会	(電協会)

震施 W 第 6—1 号

建築物の限界状態設計指針について

AIJ

建築物の 限界状態設計指針

Recommendation for LSD of Buildings

2003年2月28日
 原子力安全委員会 原子力安全基準専門部会
 耐震指針検討分科会 施設ワーキンググループ

東京大学大学院 環境学専攻
 神田 順

AIJ

指針の全体構成

- 第1章 基本事項
- 第2章 荷重・耐力係数一般
- 第3章 鉄筋コンクリート構造
- 第4章 鋼構造
- 第5章 鉄骨鉄筋コンクリート構造
- 第6章 木質構造
- 第7章 基礎構造

付録1 - 付録6

2003. 2. 28
耐震指針検討分科会
施設WG
3

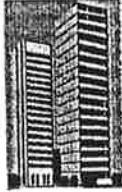
日本建築学会LSD刊行の経緯

- 鋼構造荷重・耐力係数設計法試案 1986
- 鋼構造限界状態設計規準(案)・同解説 1990
- 鋼構造限界状態設計指針 1998
- 限界状態設計指針(案) 1999
- 限界状態設計指針(案)第2版 2001
- 建築物の限界状態設計指針 2002

2003. 2. 28
耐震指針検討分科会
施設WG
2

第1章 基本事項

主査: 高田毅士(東京大学)
 幹事: 森保宏(名古屋大学)



2003. 2. 28
耐震指針検討分科会
施設WG
4

第1章の構成

1. 基本事項

- 1. 1 一般
- 1. 2 構造物に要求される性能
- 1. 3 限界状態設計の原則
- 1. 4 基本変数
- 1. 5 モデル

2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

5

1.1.2 用語の定義 (p.1,2)

用語の定義 (設計に関わる一般用語)

破壊(Failure) : 設計目標を満たしていない状態、安全性もしくは使用性を満足できなくなった状態 (機能喪失状態)

使用性(Serviceability) : 構造物が通常の使用に支障をきたさない能力、および資産の損失、損傷を抑止する能力

安全性(Safety) : 構造物が、人間の死傷につながる危険を抑止する能力

信頼性(Reliability) : 安全性や使用性に関わる設計目標を満足する能力

基準期間(Reference Period) : 信頼性を測るために選定された期間
(使用性では1年、安全性では50年など)

設計供用期間(Design Working Life) : 構造物が実質的な補修を必要とせずに使用されると想定された期間

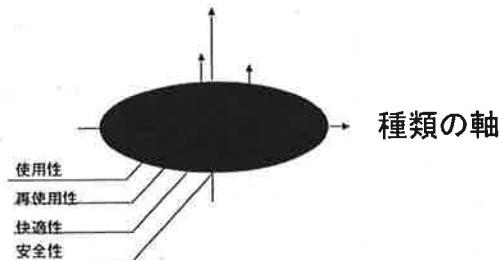
2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

7

性能を表すふたつの軸

定量指標(グレード)の軸



2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

6

1.1.2 用語の定義 (p.1,2)

用語の定義 (設計に関わる一般用語)

限界状態(Limit States) : 設計目標を満たしている状態とそうでない状態とを区別する境界

終局限界状態(Ultimate LS) : 安全性に関わる限界状態

使用限界状態(Serviceability LS) : 使用性に関わる限界状態

基本変数(Basic Variable) : 荷重、環境影響、材料・地盤の性質、幾何学的寸法などの物理量を表す指定された変数

限界状態関数(LS Function) : 基本変数を用いて限界状態を記述する関数 $g(x)$

限界状態設計法(Limit State Design) : 建築物の供用期間において、設計で考慮する限界状態を設定し、それらを超える確率に基づく設計規範により実施する設計法

2003. 2. 28

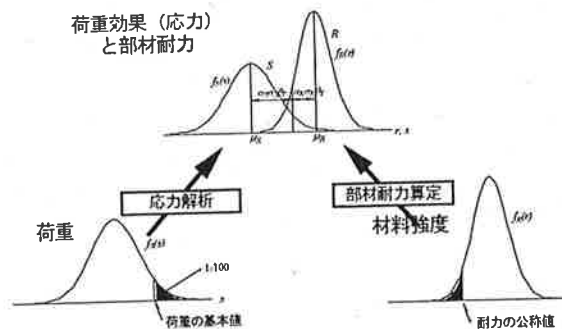
耐震指針検討分科会
施設WG

8

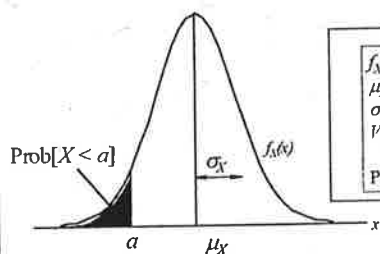
用語の定義 (荷重および耐力に関わる用語)

荷重(Load) 荷重強さ(Load Intensity) 荷重効果(Load Effect) 荷重の基本値(Basic Value of Load)	耐力(Resistance) 公称値、規格値(Nominal Value) 設計耐力(Design Resistance) 耐力係数(Resistance Factor)
設計荷重効果(Design Load-Effect) 荷重係数(Load Factor) 荷重組合せ(Load Combination)	設計耐力(Design Resistance) 耐力係数(Resistance Factor)

用語の説明 (荷重および耐力)



用語の説明 (確率分布)

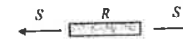


$f_X(x)$: 確率分布 (確率密度関数)
 μ_X : 平均値 (期待値)
 σ_X : 標準偏差
 V_X : 変動係数 ($= \sigma_X / \mu_X$)
 $\text{Prob}[X < a]$: 非超過確率

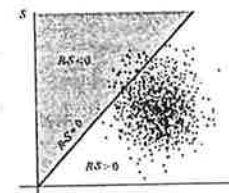
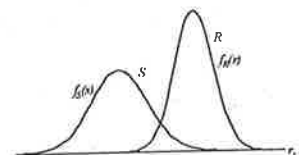
破壊確率 P_f

破壊確率の意味:

限界状態関数
 $g(R, S) = R - S$
 = 部材耐力 - 部材応力



破壊確率 $P_f = \text{Prob}[R - S < 0]$



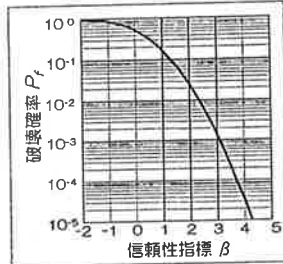
破壊確率と信頼性指標の関係

$$P_f = \Phi\left(-\frac{\mu_R}{\sigma_g}\right) = \Phi(-\beta)$$

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = \frac{\mu_R}{\sigma_g}$$

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f)$$

ここで $\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2}t^2} dt$ 標準正規確率分布関数



2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

13

R, Sが対数正規変数の場合

安全余裕: $G = \ln(R/S) = \ln(R) - \ln(S)$, $\ln(R)$, $\ln(S)$ は正規変数

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1+V_S^2}} \cdot \exp(\alpha_S \cdot \beta_T \cdot \sigma_{\ln S})$$

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{1+V_R^2}} \cdot \exp(-\alpha_R \cdot \beta_T \cdot \sigma_{\ln R})$$

2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

15

荷重・耐力係数と目標信頼性指標

$$\beta \geq \beta_T$$

設計式 (R, Sは共に正規確率変数)
 β_T : 目標信頼性指標

$$\frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \geq \beta_T$$

$$\mu_R - \mu_S \geq \beta_T \cdot \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$$

$$\mu_R - \mu_S \geq \alpha_R \cdot \sigma_R \cdot \beta_T + \alpha_S \cdot \sigma_S \cdot \beta_T$$

$$(1 - \alpha_R \cdot V_R \cdot \beta_T) \mu_R \geq (1 + \alpha_S \cdot V_S \cdot \beta_T) \mu_S$$

$$\phi \cdot \mu_R \geq \gamma \cdot \mu_S$$

α_R, α_S : 分離係数

$$\gamma = (1 - \alpha_S \cdot V_S \cdot \beta_T): \text{荷重係数}$$

$$\phi = (1 + \alpha_R \cdot V_R \cdot \beta_T): \text{耐力係数}$$

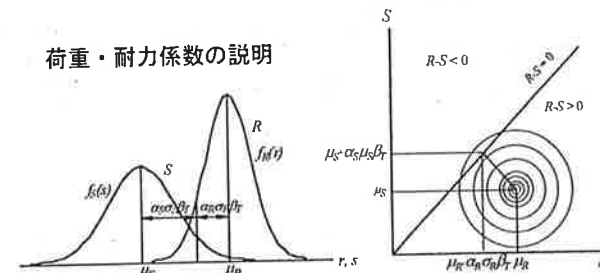
2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

14

設計荷重および設計耐力

荷重・耐力係数の説明



$$\mu_R - \alpha_R \cdot \sigma_R \cdot \beta_T \geq \mu_S + \alpha_S \cdot \sigma_S \cdot \beta_T$$

2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

16

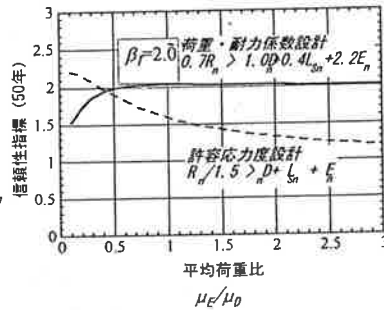
荷重・耐力係数の利点

許容応力度設計

$$R_n / \nu > D_n + L_{sn} + E_n$$

荷重・耐力係数設計

$$\phi R_n > \gamma_D D_n + \gamma_L L_{sn} + \gamma_E E_n$$



2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

17

1.2.2 基本要件条件 (p.3)

構造物に要求される性能

構造物全体あるいは構造要素は、設計供用期間中に、それらの機能・使用目的に合致するように、また、それらの経済性も考慮しつつ、設計、建設、維持管理されなければならない。特に、適度な信頼性をもって、以下の条件を満足する必要がある。

- 1) 設計供用期間中に生じる極大な荷重や頻繁に生じる荷重に対して、構造物あるいは構造要素が耐える。(安全性に関する要求条件)
- 2) 通常の使用条件下で構造物あるいは構造要素が機能する。(使用性に関する要求条件)

2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

19

1.3.4 限界状態設計 (p.6)

限界状態設計法 (確率に基づく実用的設計)

- ◆ 破壊確率 P_f を直接用いる方法

$$P_f < P_{fa} \quad P_{fa}: \text{許容破壊 (機能喪失) 確率}$$

- ◆ 信頼性指標 β を用いる方法

$$\beta < \beta_T \quad \beta_T: \text{目標信頼性指標}$$

- ◆ 従来の形式に類似した方法 (荷重・耐力係数方式)

$$\phi R_n < \sum \gamma_i S_{ni} \quad \phi: \text{耐力係数、} \gamma_i: \text{荷重係数}$$

2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

18

1.3 限界状態設計の原則 (p.4)

限界状態設計の原則

限界状態設計法では、構造物またはその部分の構造性能が、定められた限界状態により表現され、その限界状態を超過する確率で、その性能の程度を規定する。

ねらい：設計要件条件に直接対応した設計目標を明確化することと、定量化すること

限界状態

破壊確率、信頼性指標

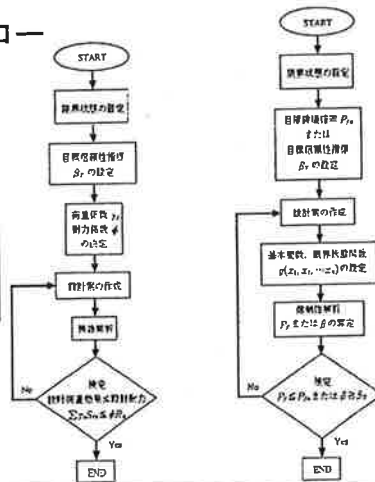
2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

20

限界状態設計のフロー

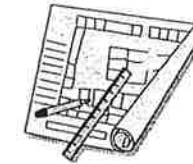
想定する限界状態に対して
適度な信頼性を確保するよう
に、確率・統計手法に基づく
設計法を用いるものとする



2003. 2. 28

第2章 荷重・耐力係数一般

主査: 高田毅士 (東京大学)
幹事: 森保宏 (名古屋大学)



2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

23

2.1. 基本方針 (p.17)

目標信頼性指標の設定方法

1. 既往設計法のコードキャリフレーションによる方法
 2. 費用と性能のトレードオフから、最適な性能水準を定める方法
 3. 建物の重要性、考慮する限界状態、経済性などを考慮して定める方法
- など

2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

22

第2章・付録1の構成

2. 荷重・耐力係数一般
 2. 1 基本方針
 2. 2 基準期間
 2. 3 荷重・耐力係数設計の方針
 2. 4 荷重・耐力係数

付録1 荷重・耐力係数の算定

- 付録1. 1 荷重および耐力の基本統計量の根拠
- 付録1. 2 荷重・耐力係数の算出方法
- 付録1. 3 荷重・耐力係数および分離係数の近似算定法
- 付録1. 4 各パラメータの不確定性の影響
- 付録1. 5 フロー2による荷重・耐力係数の算定例

2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

24

基本方針

荷重・耐力係数に基づく限界状態設計法では、限界状態毎の基準期間中の目標信頼性指標と、荷重や耐力の統計的特性を基に、荷重・耐力係数を定める。

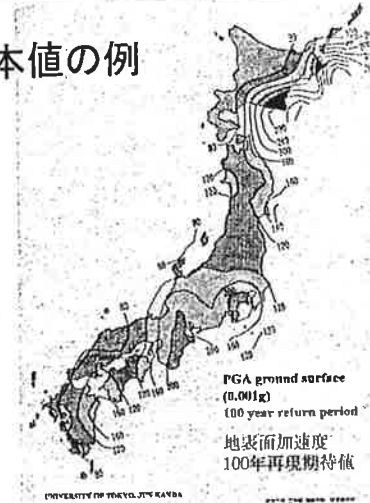
2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

25

荷重強さの基本値の例

日本建築学会
建築物荷重指針
1993



2003. 2. 28

27

限界状態設計指針の設計規範の表現

荷重・耐力係数設計式の採用

$$\phi R_n > \sum \gamma_m S_{nm}$$

設計用地震荷重 = 荷重係数 × 荷重の基本値
設計用部材耐力 = 耐力係数 × 部材耐力の公称値

$$\gamma_m = \frac{1}{\sqrt{1 + V_m^2}} \exp(\alpha_m \beta_T \zeta_m) \frac{X_m}{S_{nm}} \quad \text{耐力係数} \quad \phi = \frac{1}{\sqrt{1 + V_R^2}} \exp(-\alpha_R \beta_T \zeta_R) \frac{X_R}{R_n}$$

γ : 耐力係数、 V : 変動係数、 ζ : 対数標準偏差、 β_T : 目標信頼性指標、 α : 分離係数、 X : 基本値ある場合は公称値

固定荷重	V=0.1	風荷重	V=0.3
積載荷重	V=0.4	地震荷重	V=0.6-0.8
雪荷重	V=0.3-0.5	部材耐力	V=0.1-0.4

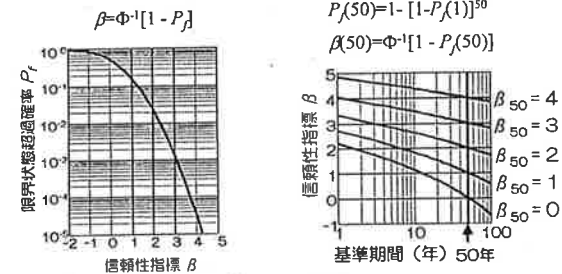
2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

26

基準期間

基準期間は、終局限界状態設計および使用限界状態設計では、それぞれ、50年および1年とする。



2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

28

荷重・耐力係数設計の方針

終局限界状態および使用限界状態に関する信頼性水準の検定は次式による。

$$\phi R_n \geq \gamma_p S_{pm} + \sum_k \gamma_k S_{kn}$$

ここに、

- ϕ : 限界状態に応じた耐力係数
- γ_p : 主の荷重に関する荷重係数
- γ_k : 従の荷重に関する荷重係数
- R_n : 耐力の公称値
- S_{pm} : 主の荷重の基本値から算定される荷重効果
- S_{kn} : 従の荷重の基本値から算定される荷重効果

荷重・耐力係数設定フロー (図2.4.1参照)

フロー1 (簡易法)

代表的な統計量を用いて算出された標準的な荷重・耐力係数の表に与えられた係数をそのまま用いる簡易法

フロー2 (略算法)

荷重や耐力の独自のデータを用いる場合や、フロー1の算定条件と異なる場合について、確率の計算が不要で比較的簡易な略算式を用いて荷重・耐力係数を計算する略算法

フロー3 (詳細法)

上記以外の場合で、荷重組み合わせ方法についても異なる理論を用いたい場合、より詳細な信頼性解析結果により荷重・耐力係数を算定する詳細法

荷重組合せ (Turkstra則)

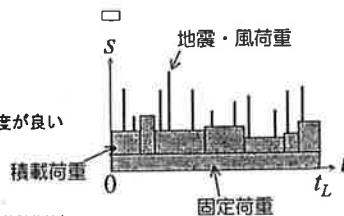
- ・ 荷重は一般に不規則に時間変動する確率過程
- ・ 基本変数: 年最大値, Arbitrary point-in-time
- ・ $\text{Max}(D+L+W)$, $\text{Max}(D+L+E)$ 等が必要

Turkstraの経験則

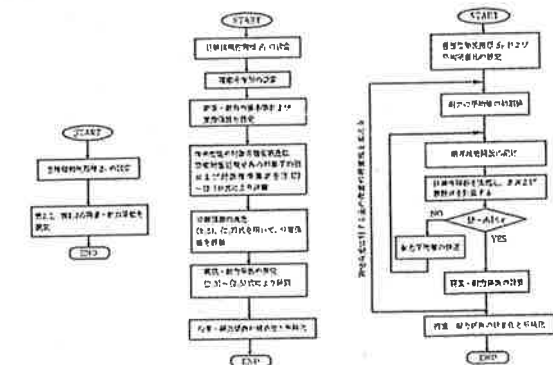
$$\text{Max}[X+Y] \cong X_{\text{max}}+Y$$

経験的裏づけ、
論理的根拠ないが結構精度が良い

X_{max} : 主の荷重
 Y : 従の荷重



荷重・耐力係数算定フロー



フロー1 (簡易法)

荷重・耐力係数 (終局限界状態、基準期間=50年、耐力の変動係数=0.3)

荷重組合せ	目標信頼性指標	荷重係数 γ_i			耐力係数 ϕ_0
	β_T	D	L	E	R
D+Le	1.0		1.7	-	0.75
	2.0	1.0	2.0	-	0.60
	3.0		2.4	-	0.45
D+Ls+E (Dsのばらつき 考慮せず)	1.0			0.85	0.8
	2.0	1.0	0.45	1.7	0.75
	3.0			4.75	0.75
D+Ls+E (Dsのばらつき 考慮)	1.0			0.8	0.8
	2.0	1.0	0.45	1.65	0.75
	3.0			4.55	0.75

2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

33

フロー2 (略算法)

荷重係数

$$\gamma_i = \frac{1}{\sqrt{1+V_{S_i}^2}} \exp\left(\alpha_{S_i} \cdot \beta_T \cdot \frac{\zeta_{S_i}}{S_{N_i}}\right) \frac{\mu_X}{S_{R_i}}$$

耐力係数

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{1+V_{\phi}^2}} \exp\left(-\alpha_{\phi} \cdot \beta_T \cdot \frac{\zeta_{\phi}}{R_{N_i}}\right)$$

μ_X : X の平均値
 S_{N_i} : 荷重効果 S_i の基本値
 R_{N_i} : 部材耐力の公称値
 V_{S_i} : 荷重効果 S_i の変動係数
 ζ_{S_i} : 荷重効果 S_i の対数標準偏差
 α_{S_i} α_{ϕ} : 考慮する荷重組み合わせに対応した分離係数

基本変数を対数正規近似 $\Rightarrow V, \zeta$
 分離係数を略算 $\Rightarrow \alpha$

2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

35

フロー2 (略算法)

- 煩雑な信頼性解析を回避
- 適用範囲

目標信頼性水準: $\beta_T = 1.0 \sim 3.0$

耐力の変動係数: $V_{\phi} = 0.1 \sim 0.4$

基準期間: 終局限界...50年

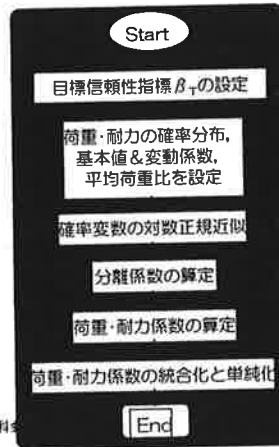
使用限界...1年

主の荷重が十分支配的

- 確率変数の分布形について、ある程度の知識を要する

2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG



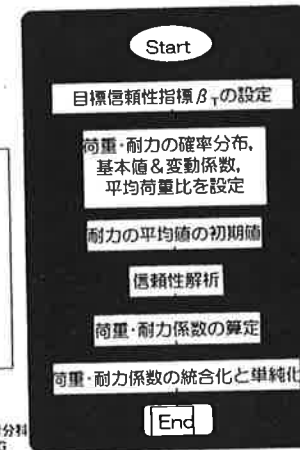
フロー3 (詳細法)

- 信頼性解析に基づいた厳密な計算手法を用いて荷重・耐力係数を設定 (付録1.2参照, p. 273)

- 荷重や耐力に関する独自のデータ
- より高度な信頼性解析手法
- より高度な荷重組み合わせ理論

2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG



3章 鉄筋コンクリート構造

主査：堀田 久人
東京工業大学

強度型建築物と靱性型建築物

- フレーム構造・耐震壁フレーム構造で整形なもの
- 地震に対して
 - 骨組の強度により抵抗する建物
(強度型建築物)
 - 骨組の塑性変形能力により抵抗する建物
(靱性型建築物)
- 最下層柱脚部、壁脚部、はり端部に
曲げ降伏を許容する全体崩壊形

3章および付録2の構成

- 3.1 基本事項
- 3.2 設計の基本方針
- 3.3 設計荷重
- 3.4 終局限界状態設計
- 3.5 使用限界状態設計
- 3.6 部材強度の統計値と荷重・耐力係数
- 付2.1 12F靱性型建築物の設計例
- 付2.2 強度型架構の計算例
- 付2.3 RC靱性保証型耐震設計指針設計例のキャリブレーション
- 付2.4 目標機構保証指標とせん断破壊確率

強度型建築物

- 設計荷重に対して専ら、
目標信頼性指標 β_T
より求まる必要強度を確保する。

靱性型建築物 降伏機構設計

- 設計荷重に対して、降伏ヒンジを計画する部位に目標信頼性指標 β_T より求まる 曲げ強度 を確保する。

(降伏機構設計)

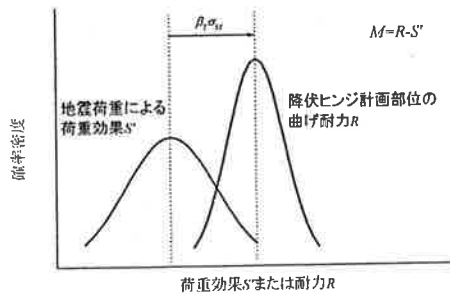
靱性型建築物 降伏機構保証設計

- 終局時の存在応力を設計荷重として、
 - 降伏ヒンジを計画しない部位に目標機構保証指標 ξ_1 より求まる曲げ強度を確保する。
 - 全ての部材に目標機構保証指標 ξ_2 より求まるせん断強度を確保する。

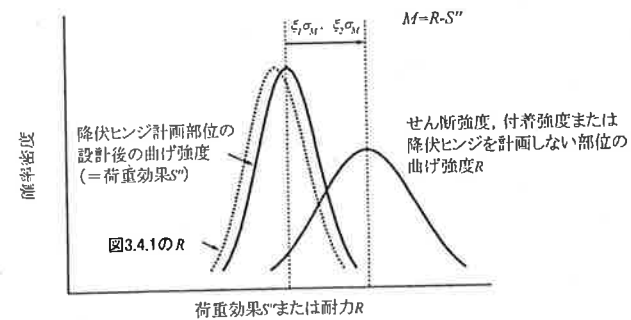
(降伏機構保証設計)

目標機構保証指標…降伏機構保証設計において目標信頼性指標に相当するもの

靱性型建築物 降伏機構設計



靱性型建築物 降伏機構保証設計



限界状態

- 原則として、次の2つの限界状態を設ける。
終局限界状態・・・安全性に関わる限界状態
終局限界耐力をチェックする。
- 使用限界状態・・・使用性に関わる限界状態
使用限界耐力
使用限界変形をチェックする。

部材強度の統計量

$$\text{平均値 } \bar{R}/R_n = \bar{\psi}_m \cdot \bar{\psi}_p \cdot \bar{\psi}_s$$

$$\text{変動係数 } V_R = \sqrt{V_{\psi_m}^2 + V_{\psi_p}^2 + V_{\psi_s}^2}$$

$\bar{\psi}_m$ V_{ψ_m} : 材料強度のばらつき

$\bar{\psi}_p$ V_{ψ_p} : 評価式と実験強度の誤差

$\bar{\psi}_s$ V_{ψ_s} : 実構造物の強度と実験強度の差
(寸法効果、施工精度、経年変化等含む)

部材強度の公称値

- 部材強度の公称値 R_n を算定する際には、
- 鉄筋の降伏強度には規格降伏強度 (σ_y) を、
- コンクリートの圧縮強度 (σ_B) には設計基準強度 (F_c) を用いる。

材料強度のばらつきの設定値

表 3.6.3 材料強度のばらつきの設定値

	鉄筋の種類	規格強度 σ_y (N/mm ²)	実強度	実強度
			規格強度 の平均値	規格強度 の変動係数
鉄筋	SD295	295	1.25	0.05
	SD345	345	1.15	0.05
	SD390	390	1.15	0.03
	SD490	490	1.10	0.03
コンクリート	コンクリート の種類	設計基準強度 F_c (N/mm ²)	実強度	実強度
	普通	Fc20-Fc90	設計強度 の平均値	設計強度 の変動係数
			1.25	0.10

p.77

強度統計値の算定例 梁の曲げ降伏強度 (強度評価式が線形)

$M_y = 0.9a_f \sigma_y d$ 材料強度の統計量が保存

表 3.6.5 曲げ降伏強度の統計値

部材	軸力比 の範囲	主筋 種別	①材料強度 による変動		②評価式 による変動		③実構造物 に対する変動		強度統計値	
			$\bar{\psi}_m$	$V_{\psi m}$	$\bar{\psi}_p$	$V_{\psi p}$	$\bar{\psi}_s$	$V_{\psi s}$	\bar{R}/R_n	V_R
			梁	$\eta=0$	SD295	1.25	0.05	1.05	0.09	1.00
		SD345	1.15	0.05	1.20	0.11				
		SD390	1.15	0.03	1.20	0.10				
柱	$0 < \eta \leq 0.4$	SD295	1.12	0.03	0.99	0.12			1.12	0.13
		SD345	1.10	0.03					1.09	0.13
		SD390	1.10	0.02					1.09	0.13

$\eta = N/A_f D \sigma_B$ 2003. 2. 28 耐震指針検討分科会 施設WG 49

p.77

強度統計値の算定例 梁の曲げ降伏強度 (強度評価式が線形)

$M_y = 0.9a_f$

$$V_R = \sqrt{V_{\psi m}^2 + V_{\psi p}^2 + V_{\psi s}^2}$$

部材	軸力比 の範囲	主筋 種別	①材料強度 による変動		②評価式 による変動		③実構造物 に対する変動		強度統計値	
			$\bar{\psi}_m$	$V_{\psi m}$	$\bar{\psi}_p$	$V_{\psi p}$	$\bar{\psi}_s$	$V_{\psi s}$	\bar{R}/R_n	V_R
			梁	$\eta=0$	SD295	1.25	0.05	1.05	0.09	1.00
		SD345	1.15	0.05	1.20	0.11				
		SD390	1.15	0.03	1.20	0.10				
柱	$0 < \eta \leq 0.4$	SD295	1.12	0.03	0.99	0.12			1.12	0.13
		SD345	1.10	0.03					1.09	0.13
		SD390	1.10	0.02					1.09	0.13

$\eta = N/A_f D \sigma_B$ 2003. 2. 28 耐震指針検討分科会 施設WG 51

p.77

強度統計値の算定例 梁の曲げ降伏強度 (強度評価式が線形)

$M_y = 0.9a_f$

$$\bar{R}/R_n = \bar{\psi}_m \cdot \bar{\psi}_p \cdot \bar{\psi}_s$$

部材	軸力比 の範囲	主筋 種別	①材料強度 による変動		②評価式 による変動		③実構造物 に対する変動		強度統計値	
			$\bar{\psi}_m$	$V_{\psi m}$	$\bar{\psi}_p$	$V_{\psi p}$	$\bar{\psi}_s$	$V_{\psi s}$	\bar{R}/R_n	V_R
			梁	$\eta=0$	SD295	1.25	0.05	1.05	0.09	1.00
		SD345	1.15	0.05	1.20	0.11				
		SD390	1.15	0.03	1.20	0.10				
柱	$0 < \eta \leq 0.4$	SD295	1.12	0.03	0.99	0.12			1.12	0.13
		SD345	1.10	0.03					1.09	0.13
		SD390	1.10	0.02					1.09	0.13

$\eta = N/A_f D \sigma_B$ 2003. 2. 28 耐震指針検討分科会 施設WG 50

p.75

強度統計値の算定例 せん断ひび割れ強度 (強度評価式が非線形)

$V_{sc} = \sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_T \cdot \sigma_0 \cdot b \cdot D / \kappa}$ モンテカルロ法により算出

表 3.6.4 せん断ひび割れ強度の統計値

部材	軸力比 の範囲	①材料強度 による変動		②評価式 による変動		③実構造物 に対する変動		強度統計値	
		$\bar{\psi}_m$	$V_{\psi m}$	$\bar{\psi}_p$	$V_{\psi p}$	$\bar{\psi}_s$	$V_{\psi s}$	\bar{R}/R_n	V_R
		梁	$\eta=0$	1.12	0.05	1.09	0.35	1.00	0.05
柱	$\eta \leq 1/3$	1.07	0.03	1.17	0.35				
	$\eta > 1/3$	1.06	0.03	1.16	0.35				

$\eta = N/A_f D \sigma_B$ 2003. 2. 28 耐震指針検討分科会 施設WG 52

荷重係数・耐力係数の算定

- 使用限界状態設計および終局限界状態設計(一般)
…フロー1(2. 4. 1 p.22)による

β_T, V_R から表2.1、表2.2より γ, ϕ_0 を求める。

$$\phi = \frac{\bar{R}}{R_n} \phi_0$$

第4章 鋼構造

- 4.1 基本事項
- 4.2 構造区分及び設計の基本
- 4.3 終局限界状態設計
- 4.4 使用限界状態設計
- 4.5 製作、施工の品質および保守、維持管理

付録3 鋼構造設計例



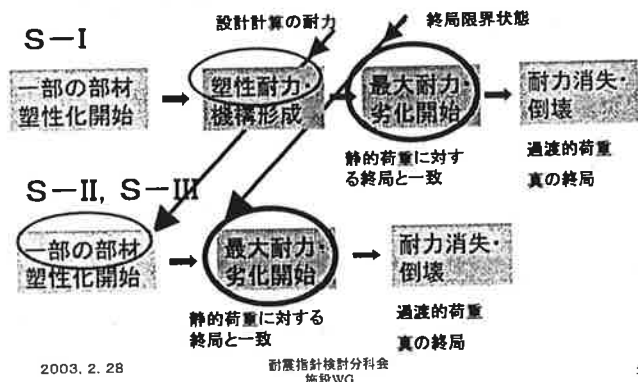
第4章 鋼構造

主査：大井謙一(東大・生研)

フロー1による終局限界、一般地域 (表2. 1 $V_R=0.2$ 、 β_T 線形補間)

固定	荷重係数				耐力係数	50年 β_T
	積載	雪	風	地震		
1.1	1.6				0.9	2.5
1.0	2.43				0.77	
1.1	0.6	1.4			0.9	2.0
1.0	0.45	1.30			0.77	
1.1	0.6		1.4		0.9	2.0
1.0	0.45		1.40		0.83	
1.1	0.6			1.4	1.0	1.5
1.0	0.45			1.33	0.99	

終局 耐震設計



第5章 鉄骨鉄筋コンクリート構造

主査: 内田 保博
鹿児島大学



2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

59

4.3 終局限界状態設計

- 下記の公称耐力を示し、それに耐力係数を乗じて設計耐力とする。
引張り材、圧縮材(曲げ座屈限界耐力、局部座屈限界耐力)、曲げ材(全塑性限界耐力、横座屈限界耐力、局部座屈限界耐力)、

2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

58

5章 鉄骨鉄筋コンクリート構造

5.1 基本事項

5.2 終局限界状態設計

5.3 使用限界状態設計

付録 4 SRC構造設計例

付録 5 CFT構造設計例

2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

60

$$\phi Mn \geq M, \quad \phi Qn \geq Q \quad (5.2)$$

$$M, Q = \sum C_k \gamma_k W_{kn}$$

M, Q : 応力

Mn, Qn : モーメント、せん断耐力の公称値

単純累加、一般化累加

終局限界→終局耐力 (SRC規準)

使用限界→降伏(短期)耐力 (〃)

設計方針

- 1) 断面算定用の応力計算は、終局・使用限界状態ともに弾性計算
- 2) 使用限界・終局限界状態設計のどちらを先に設計しても構わない
- 3) 変形性能はDsのみで考慮する。
- 4) 終局限界・使用限界における変形の検討

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{1+V_R^2}} \exp(-\alpha_R \beta_T \sigma_{\ln R}) \cdot \bar{R} / R_n \quad (5.2.1)$$

α_R : 耐力の分離係数

β_T : 基準期間における目標信頼性指標

$$\bar{R} / R_n = \bar{\Psi}_s \cdot \bar{\Psi}_p \cdot \bar{\Psi}_m \quad \sigma_{\ln R} = \sqrt{\ln(1+V_R^2)}$$

$$V_R^2 = V_{\Psi_s}^2 + V_{\Psi_p}^2 + V_{\Psi_m}^2$$

5.4 終局限界状態設計

(1) 曲げを受けるSRC梁

SRC梁の単純累加強度

$$M_n = {}_s Z_p \cdot {}_s \sigma_Y + {}_m a_t \cdot {}_m \sigma_Y \cdot {}_m d$$

SRC柱の単純累加強度 M_n →(5.4)式

一般化累加式 M_n →SRC規準

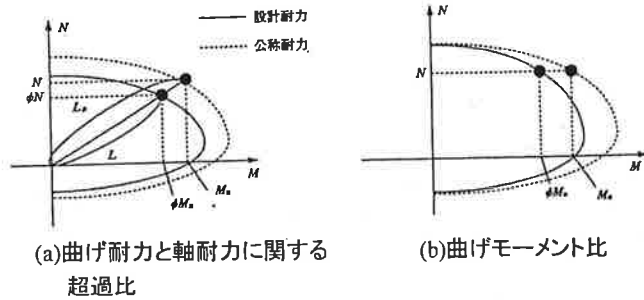


図5.2.1 設計耐力

2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

65

表5.6 SRC梁・柱の曲げ耐力の平均値
および変動係数

	梁		柱	
	一般化累加	単純累加	一般化累加	単純累加
\bar{R}/R_n	1.43	1.77	1.40	1.59
V_R	0.17	0.24	0.21	0.24

2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

67

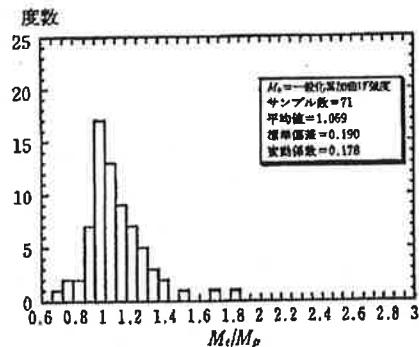


図5.2.2 柱曲げ耐力の実験値のヒストグラム
(一般化累加曲げ強度により規準化)

66

LSDのまとめ

- 目標信頼性に応じた設計
- 荷重や耐力に関する統計量の充実
- 設計荷重、設計耐力は確定値
- 国際的にも共通の安全性概念

2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

68

おまけ

- ・自己責任・性能規定
- ・規制緩和
- ・過去との連続性
- ・国際協調

2003. 2. 28

耐震指針検討分科会
施設WG

69

震分第6-4号

耐震指針検討分科会
基本ワーキンググループ
における検討状況

平成15年8月20日

目次

はじめに.....	1
1. 検討状況.....	2
耐震指針検討分科会 基本ワーキンググループ構成員.....	16
耐震指針検討分科会 基本ワーキンググループ検討経緯.....	16

はじめに

原子力安全基準専門部会は、原子力安全委員会から指示を受け、平成13年7月3日に各分野の専門家からなる耐震指針検討分科会を設置し、「耐震安全性に係る安全審査指針類について」のうち、「発電用原子炉施設の耐震設計審査指針」〔昭和56年7月20日決定〕及び「原子力発電所の地質、地盤に関する安全審査の手引き」〔昭和53年8月23日決定〕について、最新知見等を反映し、より適切な指針とするために必要な調査審議を実施することとした。

これを受け、耐震指針検討分科会では、調査審議にあたり検討すべき項目の抽出を行い、第3回会合において、分科会における検討にあたって必要な各種知見等の整理作業を行うため、基本、施設、地盤・地震動の3つのワーキンググループを設置するとともに、第4回会合において、各ワーキンググループにおいて検討すべき項目の整理・分類を行った。

以来、基本ワーキンググループでは、6回の会合を開催し、これらの検討項目に沿って、分科会の検討に必要な各種知見等の整理作業を進めてきた。

本資料は、今後の耐震指針検討分科会における調査審議に資することを目的に、基本ワーキンググループの検討状況を「耐震設計審査指針の高度化のあり方に対する基本附の検討結果」としてとりまとめたものである。

1. 検討状況

検討状況は以下の通りである。

耐震設計審査指針の高度化のあり方に対する基本WGの検討結果（中間報告）

1. はじめに

基本WGは、分科会から1)地震時安全確保の考え方、2)考慮すべき事故の考え方、3)耐震設計の枠組み、4)基準地震動の考え方、5)耐震重要度分類の基本的考え方、6)新立地様式、7)運転管理に係る考慮事項、8)確率論的安全評価、の各項目について検討するように指示された。この報告は、これらの項目の検討を行った結果を取りまとめたものである。これらの項目は相互に関係しており、この検討作業は現行の耐震設計審査指針（以下、「指針」という。）の高度化を目指す活動の一部であるので、検討結果は高度化された「指針」の枠組みを念頭において取りまとめることとし、この報告も「指針」の構成にそって記載することを心がけている。記載に当たっては、検討の主要な結論は「・・とするのが適切である。」と結び、検討作業において意見が収束していないものについては、いくつかの意見を並列に記すことにしている。また、検討では主として施設WGや地震・地震動WGにおいて検討されるべき項目にも議論が及ぶことがあったが、それらについては、今後の分科会における議論の参考になればと考えて、専門的検討を経ていないものであることを明らかにしつつ、記載することになっている。具体的には、参考意見であることがわかるようにして「これは・・と考えられる。」と記載している。

なお、この報告は、7月31日の会合で原案を審議し、その席上の議論及びその後の各委員から提出のあった意見を踏まえて事務局が主査の指示で取りまとめたものであり、分科会における審議を踏まえて修正されることがあるものである。したがって中間報告としている。

2. 「指針」の姿について

- (1) 一般に原子炉施設等の設計に対する許認可に掛る審査基準は、
- ①法律に定められている要件と等価な基本的目標
 - ②この目標を達成するために満足されることが必要な性能要求
 - ③この性能要求を満たす方法の一般原則
 - ④この要求と一般原則を満足する方法として容認される設計方法の仕様規定から構成される。現行「指針」は主として基本設計の安全審査に用いることを意図して③までを規定しているものであり、工事計画の認可の実務に用いられ

2

る④は民間規格である電気協会規格 JEAG4601 が該当する。

- (2) 「指針」の高度化に当たって、これらの4階層の全ての要求を取り込むことは可能であるが、他方で、これら①から④へと段階が下るに従って、関係学問の進展に伴ってより効果的な方法が継続的に生み出されることを受けて、その記載内容を改定することが頻りに望まれる可能性が高くなる。そこで、地震学や土木建築学の進展状況を考えると、ある程度の時間的安定性を有するべき「指針」は、現在と同様に基本目標を達成するために満足されることが必要な性能要求とこれを満たすための方法の一般原則までを規定するものとし、④の容認される設計方法に関する仕様の規定については、最新の知見を踏まえて定期

的に見直しが行われる学協会規格にゆだねるのが適切である。

(8) ただし、このことが可能であるためには、原子力安全・保安院が設計方法を定めた学協会規格を「指針」に適合する仕様規定であること、具体的には、規制法にいう工事計画の認可処分に係る審査基準であるとして容認する行為を行う必要がある。特に、現在、保安院では、省令を性能規定化し、そのもつで JEAG4601 を呼び込んでいる機械学会「設計及び建設規格 (JSME S NCI-2001)」を告示 501 号に相当するものとして活用するための行政手続きが進行中であるから、「指針」の改定が JEAG4601 の変更を必要とする内容を含む場合には、並行して JEAG4601 の改定に着手する等の措置を講じないと、改定「指針」に適合する工認の審査基準が存在しないことになる可能性があることに留意しなければならない。

(4) なお、このような考え方に則って「指針」の高度化が行われたとしても、今後の学問の急速な進歩、あるいは設置しようとする施設の特性の故に、「指針」に適合しなくても法律に定められている要求を満足し得る許認可申請がなされる可能性がないとはいえない。こうした申請がなされた場合にこれを門前払いするのは適切ではないため、現在の指針にある「本指針に適合しない場合があつてもその理由が妥当であればこれを排除するものではない。」との付記は、高度化後も残しておくことが適切である。

3. 「指針」の目標と性能要求

上の方針に基づき「指針」を設計するには、第一に基本的目標、第二にそれが達成されているために満足されるべき性能が明らかにされねばならない。

3. 1 基本的目標

発電用原子炉施設に関する安全設計審査指針 (以下では、安全設計指針という。)

3

は、指針 2 において「安全機能を有する構造物、系統及び機器は、その安全機能の重要度及び地震によって機能の喪失を起こした場合の安全上の影響を考慮して、耐震設計上の区分がなされるとともに、適切と考えられる設計用地震力に十分耐えられる設計であること」とする一方、その解説において、「耐震設計上の区分」や「適切と考えられる設計用地震力」や「機能の喪失を起こした場合の安全上の影響を考慮して十分に耐えられる設計」等の規定を「指針」にゆだねている。しかしながら、「指針」は、その基本方針を「発電用原子炉施設は想定されるいかなる地震力に対してもこれが大きな事故の誘因とならないよう十分な耐震性を有していなければならない」としつつ、「想定されるいかなる地震力」や「十分な耐震性」についてさらに詳しく規定することをせず、直ちに、これが達成されるために満足されるべき性能である「耐震設計上の重要度分類」及び「耐震設計評価法」を規定している。

本 WG は、課されたいくつかの検討項目から判断して、分科会はこの関係の明確化を求めていると判断して、関係指針類が述べてきているところをもう一度見直し、「指針」の基本的目標をもう少し敷衍して述べることの可能性を検討した。以下は、その検討結果である。

(1) 原子炉立地審査指針は、

A 原子炉は事故を起こさないように設計、建設、運転及び保守が行い得ること。

が求められるのは当然であるとして、その項目を念も基本的目標を掲げている。

る。

- B 敷地周辺の事象、原子炉の特性、安全防護施設等を考慮し、技術的見地からみて、最悪の場合には起るかもしれないと考えられる重大な事故(以下「重大事故」という。)の発生を仮定しても、周辺の公衆に放射線障害を与えないこと。
- C 更に、重大事故を超えるような技術的見地からは起るとは考えられない事故(以下「仮想事故」という。)(例えば、重大事故を想定する際には効果を期待した安全防護施設のうちいくつかが動作しないと仮想し、それに相当する放射性物質の放散を仮想するもの)の発生を仮定しても、周辺の公衆に著しい放射線障害を与えないこと。

つまり、対象施設に対して、発生可能性(確率)の異なる3つの状態に対して、それぞれの状態がもたらす影響のある大きさに限定することを求めているのである。

- (2) これに対して、安全設計指針は、このうちAの条件を担保するために、放射性物質の放出につながる施設の損傷が発生しないよう設計することを求めると

4

同時に、施設の損傷や誤操作などの異常事象の発生した場合にその影響が拡大しないようにできる工学的安全施設の設置を求めている。一方、発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針(以下、「安全評価指針」という。)は、こうした設計の妥当性を評価するための設計基準事故の安全評価の方法に加えて、BとCに係る安全評価の方法を示している。したがって、「指針」が妥当とする耐震性は、上に述べたこれらの指針が受け入れ可能としている「発生可能性(確率)と被害の関係」と整合的であるべきであり、そのことがわかるように規定がなされているのが適切と考える。

- (3) なお、過去における立地審査指針のあり方をめぐっての議論においては、上のBとCを一本化して立地評価事故を規定し、その評価基準を定めるべきだという意見が有力であったことは、今後の議論において留意されるべきことと考える。

- (4) これに対して、「指針」は、上に述べたように、安全設計指針2と同義の表現を基本目標として

- D 歴史的資料から過去において敷地又はその近傍に影響を与えたと考えられる地震が再び起こり、敷地及びその周辺に同様の影響を与えるおそれのある地震及び近い将来敷地に影響を与えるおそれのある活動度の高い活断層による地震のうちから最も影響の大きい(敷地の基盤に最大の地震動を与える)地震を設計用最強地震とし、これによる地震動を S_1 地震動とし、これによる地震力と運転時や事故時の荷重を組み合わせて発生する応力に対して「重要な安全機能を有する施設・設備」は基本的に弾性範囲に留まるよう設計すること
- E 地震学的見地に立脚し設計用最強地震を上回る地震について、過去の地震の発生状況、敷地周辺の活断層の性質及び地震地体構造に基づき工学的見地からの検討を加え、最も影響の大きい地震による地震動を S_2 地震動とし、これによる地震力と運転時や事故時の荷重を組み合わせて発生する応力に対して「重要な安全機能を有する施設・設備のうち、事故後の崩壊熱除去機能を担う設備等を除くもの」は構造物の相当部分が降伏し、塑性変形する場合で

も適度な風形、風裂、破損等が生じ、その施設の機能に影響を及ぼすことがないこと

という性能要求を掲げている。しかしながら、性能要求は上に述べた「発生可能性（確率）—影響関係」と整合する要求であることがわかりやすいことが重要であるから、この規定振りには改良の余地があるのではないかと議論がなされた。

(5) すなわち、この記述は、基準地震動に係る地震力を事故時の荷重を組み合わ

5

せるとしているから、基準地震動の発生時においては、ある程度までのランダム故障あるいは安全上重要でない設備の故障に係る事故の発生は否定しないものの、これに備えて設置されるべき工学的安全施設が機能することも含めて、大きな事故に至る可能性が適切に抑制される施設設計であることを求めていると考えられる。そして、そこでは発生可能性の異なる基準地震動に対してこの可能性の抑制の程度を変える方法として、ほぼ同一の安全上重要な設備群に対して、S1地震動に対しては変形が弾性範囲内に留まることとし、S2地震動に対しては脆性が維持される限りにおいて塑性変形を許容とする方法が採用されている。しかしながら、これが施設に求められる安全特性としての「発生可能性（確率）—影響」関係に整合的な要求であることは読み取り易くない。そこで、これに代わる方法はないかということである。

(6) この問題意識に応える一つの提案として議論されたのは、基本目標を

目標Ⅰ：原子炉施設は、敷地周辺の特徴からみて寿命中に一度ならず発生する地震動を経験しても事故を起こさないように設計、建設、運転及び保守を行なわなければならないのは当然のことであるが、敷地周辺の事情で異なる地震動の大きさと頻度の関係を踏まえて、地震学的見地から見て施設の寿命中には極めて稀には起きるかもしれない地震動を基準地震動とし、この発生を仮定しても安全防護施設も含めて必要な安全機能は損なわれず、周辺の公衆に放射線災害を与えないよう設計されること。

目標Ⅱ：施設の設計裕度により、この基準地震動を超える地震動が発生する可能性を考慮してもそれによる公衆の放射線災害のリスクが小さいこと。

とすることである。

なお、目標Ⅰ、Ⅱとも、施設の設計目標として与えられているが、放射線災害の発生を抑制し、あるいはそのリスクを小さくするための運転管理操作が必要に応じて可能であるように設計されていれば、それを考慮に入れることを排除するものではないのは当然である。

(7) 目標Ⅰは、施設の寿命期間中における発生可能性のある範囲の地震動に対しては大きな事故が発生しないことを求めるものである。この発生可能性の範囲の限界に位置する基準地震動と現行指針のS₁、S₂地震動の関係については、この地震動に対する応答が弾性範囲を超えても安全機能に重大な影響が生じないならば大きな事故が発生しないといえるから、S₂地震動に対応させるのが適切である。ただし、S₂地震動の発生可能性は、安全評価指針にいう設計基準事故はもとより重大事故のそれに準しいともいえるほど小さいから、この地震動の発生によっても「周辺の公衆に放射線災害を与えないこと」という判断

6

基準は、上の「発生頻度—影響」関係を踏まえれば、「仮想事故に相当する放射性物質の放出がないこと」とするのが適切ではという意見もあった。しかしながら、この表現あるいは仮想事故条件に相当する「安全防護施設のうちのいくつかが動作すること」という表現には施設設計の審査に適した規範性がないこと、そもそも「構造物の相当部分が降伏し、塑性変形してもその施設の機能に影響を及ぼすことがないこと」とする判断基準は、この施設の機能について通常時ほど高い信頼性を要求してはいることを意味するから、例えば「その施設の機能に重大な影響を及ぼすことがないこと」とするなどしてそのことを明確にする修正を行うことにより、この表現を利用するのが適切という意見が大勢を占めた。

(8) 目標Ⅱは、たとえ基準地震動のある超過確率を基準に定めるとしてもその推定には不確かさが伴うこと、他方、設備等の応答に関して基準等で与える許容限界は、それを超えると直ちに機能不全に陥る可能性が極めて高い本当の限界値を意味するわけではないこと、設備等の設計においては基準を満足する必要最低限の設計ではなく十分これを満足する設計が行われるのが普通である等の現実を踏まえて、工事が進捗して運転手順書等の検討も進んだ、例えば運転開始前に、実際に建設され、運転される施設のリスクの観点からの妥当性を確認することが適切、という判断に基づいて提案されたものである。

(9) この目標Ⅱを規定することに対しては、設置許可処分は安全性を確保し得るという判断に基づいてなされ、工事計画の認可処分は適切な技術基準を満足することをもって行われるのであるから、許認可を得て建設された施設はリスクが適切に抑制されているのが当然であり、設置者の裁量によって導入される裕度を考慮に入れたリスク評価の結果で設計の基準適合性を判断するのは二重規制をもつことになるのではという意見がある一方、原子炉等規制法は、設置許可における判断基準を「災害の防止上支障のないこと」としているのに対して、保安規定の認可条件においては「災害の防止上十分でないときは認可してはならない」としているの、そもそも二重基準性を有していると考えられること、運転開始前に、認識論的な不確かさの存在を念頭に置きつつ行われる基準地震動の選択や、許容限界の設定と建設・運転に係る設計裕度、運転管理における運転員の知恵を尽くした事故管理活動を総合的に評価してリスクが適切に抑制されていると判断してから運転許可を与えるのがむしろ法の精神に合う、とする意見があった。

なお、この目標Ⅱは目標Ⅰを包絡する性格を有するから、これを規定することにより、特に基準地震動についての知見が今後とも増大する可能性があるところ、有力な最新の知見が学会等において認識されたときに、それを踏まえた確率論的リスク評価の結果引き続きリスクが適切に抑制されていると判断できれば、たとえその知見が生じる以前になされた設置許可によって建設・運転された施設であっても、その設置許可の妥当性が損なわれるものではないとする

7

「バックフィットルール」として活用できるとの指摘もなされた。

以上のことから、目標Ⅱはその位置づけを明らかにした上で採用するのが適切である、とするのが多数意見であった。

3. 2 基本目標が達成されているために満足されるべき性能の構成

(1) 目標Ⅰが達成されているために設計段階において満足されるべき性能は、現行「指針」と同様の考え方で与えられることが適切である。すなわち、安全設計審査指針の指針2を念頭に、「安全機能を有する構造物、系統及び機器は、基

本的目標を達成する観点から、その安全機能の重要度及び地震によって機能の喪失を起こした場合の安全上の影響を考慮して、耐震設計上の区分がなされるとともに、その区分に適切と考えられる設計用地震力が加わっても機能を失わない設計であること」が求められていることを踏まえて、以下のことが規定されるのが適切である。

- 1) 基本目標の達成の観点から適切な、安全機能を有する構築物、系統及び機器の、地震荷重に対する応答及び耐性の特徴も考慮に入れた、安全上の重要度に応じた耐震設計上の区分のあり方、
- 2) 基本目標の達成の観点から適切な、これらの区分ごとの設計評価に使用する設計用地震力の選定のあり方、
- 3) 基本目標の達成の観点から適切な、これらの構築物、系統及び機器が対応する設計用地震力に対して耐震性を有することを確認する方法

- (2) 目標Ⅱが達成されていることを判断するためには、運転開始前に実施される地震PSAの結果を、公衆リスクを指標として定められる安全目標を参考に定められる性能指標と比較するのが適切である。

4. 耐震重要度の区分のあり方

- (1) 耐震重要度の区分について「指針」は、As、A、B、Cクラスという分類を用いている。しかしながら、原子炉施設の安全機能を有する構築物、系統及び機器の安全機能の重要度に基づく分類は「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」(以下、重要度指針という。)で規定されている。重要度指針では、重要度はそれぞれの構築物、系統及び機器が機能喪失を起こした場合の安全上の影響を考慮して定めるとされているから、両者の機器等の区分の論理は同じと考えられる。そこで、耐震重要度の区分も、重要度指針の規定に準じて、以下の3クラスの分類を用いるのが適切である。

耐震クラス1：その損傷又は故障により発生する事象によって、炉心の著しい損傷、又は燃料の大量の破損を引き起こすおそれのある構築物、系

8

統および機器 (PS-1 分類) ならびに、異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し、残留熱を除去し、原子炉冷却材圧力バウンダリの加圧を防止し、敷地周辺への過度の影響を防止する構築物、系統および機器。安全上必須なその他の構築物、系統および機器 (MS-1 分類)

耐震クラス2：その損傷又は故障により発生する事象によって、炉心の著しい損傷、又は燃料の大量の破損を直ちに引き起こすおそれはないが、敷地外への過度の放射性物質の放出のおそれのある構築物、系統および機器 (PS-2)、ならびにこれらの構築物、系統および機器の損傷または故障により敷地周辺公衆に与える放射線の影響を十分小さくするようにする構築物、系統および機器 (MS-2)

耐震クラス3：その損傷または故障が異常時の起因事象になる PS-1、PS-2 以外の構築物、系統および機器及び原子炉冷却材中の放射能濃度を運転に支障のない程度に低く抑えるための構築物、系統および機器 (PS-3) ならびに運転時の異常な過渡変化があっても MS-1、MS-2 とあいまって事象を緩和する構築物、系統および機器及び異常対応に必要な構築物、系統および機器 (MS-3)

ただし、地震荷重に対する構築物、系統及び機器の応答及び耐性に特徴的な間

題がある場合には、一部の構築物、系統及び機器の耐震クラスを重要度指針のクラスと異なるものとするのが適切である。

- (2) なお、重要度指針のクラス1に分類される構築物、系統及び機器は、炉心の著しい損傷・燃料の大漏れ、異常状態発生時の事象の拡大防止と収束に関連する安全機能を有していて、クラス2及び3に分類される構築物、系統及び機器の有する安全機能とはその重要性に格段の差があること、クラス2に分類される構築物、系統及び機器は、たとえその安全機能が失われても、それによって発生する放射性物質の外部放出によっては立地指針にいう公衆の放射線災害の発生に至る可能性が極めて小さいので、これらの耐震設計の水準をクラス3に分類される構築物、系統及び機器のそれと別にする必要はないとして、耐震重要度については、重要度指針のクラス1を耐震クラス1、クラス2及び3を耐震クラス2とすることが基本目標を達成する観点から適切（ただし、「使用済み燃料貯蔵」に関する安全機能は耐震クラス1とする）という意見も考慮に値する代替案とされた。
- (3) 上記(2)の3区分の分類とする提案に対しては、そもそも重要度分類指針は耐震重要度分類の存在を知りつつ制定されており、これが今日に至るまで並立してきたことにはそれなりの理由があるのではないかと、また、この提案を採用することにより、実質的には従来Aクラスとされてきた構築物、系統および機器の分類をAsクラスに変更することになるが、その結果、現在の指針に適合

して設計され、運転されている施設が新指針に適合しないことになる。したがって、提案の採用には慎重であるべきとの意見も提出された。

しかしながら、問題は重要度分類を3区分とするか、4区分とするかの選択であり、指針間の整合性を重視する観点から3区分の採用を提案しているものであり、その結果、現行指針ではAsクラスとAクラスの機器類はS1地震動に対しては同じ機能信頼性が求められており、S2地震動に対してはAsクラスの機器等のみ“ねばり”による機能維持可能性の確認を求めているところ、この確認をAクラス機器類にも求めることとするものである。この“ねばり”はAクラスの機器等にも潜在的には存在するものではあるが、だからといって既存の指針に適合しているAクラス機器等について「S2地震動が加わってもその機能を適切な信頼度で維持できること」という要請が自動的に満足される保証はない。しかしながら、Aクラス機器等は事故が発生した際に必要とされる安全機能であるから、この保証がないからといって直ちに大きな事故が発生することにはならない。つまり、この保証がないことは基本目標が満足されないことを意味するわけではないといえるので、このような改定がなされたとしても、目標Ⅱが満足される限りにおいて、改修等の必要性はないとしてよいと考えられる。そこで、このようなことに留意しつつ、指針間の整合性を確保することが指針高度化にむけてとるべき道ではないかというのが多数意見であった。

- (4) なお、重要度指針を用いて耐震重要度分類を行う際には、次のような耐震設計特有の事項について留意する必要がある、としておくのが適切である。

- 1) 異常の発生防止機能と影響緩和機能との区別はしない。
- 2) 重要度指針でいう「当該系の機能遂行に直接必要となる関連系以外の関連系」のうち、系統及び機器を収納・支持する機能（建物・構築物、系統及び機器の支持構造物）については、当該関連系統・機器の耐震設計に用いられる基準地震動に対して、安全機能（支持機能）を損なわないことの確認を行うものとする。
- 3) 建物・構築物、系統及び機器間の相互影響については、上位の耐震クラス

- に適用される基準地震動に対して、それぞれ要求される安全機能が損なわれないことの確認を行う。
- 4) 重要度クラスの異なる系統及び機器が構造的に連続している場合、その地震時挙動が上位の耐震機能に影響を与える範囲まで、上位の重要度をもつものとする。
 - 5) 耐震設計上重要な設備の耐震重要度分類の検討には、地震PSAの知見も用いる。

5. 基準地震動の設定のあり方

- (1) 基準地震動は、3. 1の議論を踏まえれば、安全指針体系が目指すリスク抑制水準を与える「発生頻度—被害関係」を踏まえて定められた目標Ⅰを満たす設計が備える性能を与えるために、敷地における地震動とその超過確率の関係に基づいて定めるのが適切と考えられる。現行指針の基準地震動の定義にもこの考え方を読み取ることができ、特にS2地震動に関しては、限界という形容詞を用いた記述もあることから、敷地において地震学的に見てそれより激しい地震動はないと考えられるような地震動として定めるべきことを要求していると誤解を生じないとはいえないので、この目標に照らして適切な超過確率を用いるなど、より直截な表現を用いて定義されることが望ましいとの意見が多かった。
- (2) 具体的には、目標Ⅰの定めるところを踏まえれば、敷地周辺の事情で定まる地震動の大きさと超過確率の最も確からしい関係（確率論的地震ハザード）に基づき、「原子力施設の寿命を安全側に100年とし、この100年間を通じて、その規模を超える地震動の発生する可能性が100分の1となるような激しさの地震動」あるいは「原子力施設の敷地においてその寿命の100倍の期間内に発生する地震動のうち最も過酷な地震動」を与える地震に基づいて基準地震動を設定することが考えられるという意見が提出された。
- (3) これに対しては、それを是としつつも、1) 確率論的地震ハザードの推定には大きな不確かさが伴うことに対する配慮が必要ではないか、2) いくつかの地点について求めた確率論的ハザードでは現行のS2地震動の超過確率がほぼこの程度になっているが、基準地震動をこのように設定するに際してはこのことを精査すべきではないか、3) 今後100年以内に大きな地震動を経験すると予想される地点においてこのような設定の仕方が有効性を有するかどうかについて検討すべき、等の議論がなされた。他方、このように具体的な数値をあまりに明確に決めるのは、地震動の決定に専門的裁量を働かせることを妨げるものであり、専門家の協力を得にくくなる恐れがあるのではないか、という意見もあった。
- (4) なお、目標Ⅱに対する適合性を評価するための地震PSAにおいては当然のことながら合理的に評価されたこの確率論的地震ハザードの不確かさを評価に取り入れるので、今後の審議の過程で代表的な敷地についてリスク評価を試みることにより、上の設定における不確かさの適切な取り扱いについて整理することが可能ではないかとの意見もあった。

- (5) 一方、「指針」は、地震を考慮に入れても安全目標を達成しようと判断できる設計は受け入れることができるように整備されるべきだから、確率論的地震ハザードの求め方を規定して、「基準地震動は、安全目標達成の観点から適切な超過確率に対応するものとする」とするに止め、具体的な選択は申請者にゆだねるとすべきとする提案もあった。この提案に関しては、これは目標Ⅱだけを規定することに等しく、本節の考え方と相容れないものではないから、この考え方に則って、原子力安全委員会が制定する安全目標を入力として、構造物、機器、設備の強さと基準地震動とを決定する方法を規定した学会規格が整備された場合には、これを受け入れることができるようにするのがよい、とする意見があった。しかし、地方で、そのような規格を整備するには相当の年月を要すると考えられるので、当面は(1)から(4)に議論されているような基準地震動の設定法を規定しておく必要性に変わりはないという意見もあった。

6. 設計用地震力の設定のあり方

(1) 耐震安全の基本的目標を達成するため各耐震クラスの機器等の設計評価に使用する適切な設計地震力は、以下のように定めるのが適切である。

- ・ 耐震クラス1の構造物、系統、機器は上に定められた基準地震動の地震力を設計用地震力として用いること
- ・ 耐震クラス2のそれらについては、耐震クラス1の設計用地震力を α 倍($\alpha < 1$)して求めた地震力を設計地震力として用いること
- ・ 耐震クラス3のそれらは一般施設の強度設計に用いられる基準に従うこと

(2) ここで、 α の値については、これをパラメータに地震リスク評価を行い、リ

スクの様相がリスク抑制の目標と考えられる「発生頻度—影響関係」から見て妥当なものとなることを探すと、0.5 程度となりそうだという報告に基づき 0.5 とすることも提案された。しかしながら、先に述べたクラス分類について現状維持案や 2 分類とするという案を推す意見のあることも踏まえて、ここでは値を議論するところまでには至らなかった。今後このあたりの方針が確定してから、さらに検討を深めるべきと考えられる。

7. 地震荷重と他の荷重の組み合わせ

- (1) 耐震設計にあたっては、上記設計用地震力と 1) 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、及び、2) 地震によって引き起こされるプラント状態による荷重で地震動と同時性を有する荷重を組み合わせるべきである。

ただし、これらのうち、同時に作用する確率が事象の発生頻度、荷重の継続時間及び継時的変化を考慮して、リスク抑制の観点から考慮する必要のないほど小さい場合にはそうした組み合わせを考慮する必要がない。

8. 適切な耐震性を有していることの確認法

- (1) 耐震基本目標の達成の観点から適切な、各クラスの構造物、設備、機器が対応する設計用地震力に対して耐震性を有することは、構造物等有する安全機能が適切な信頼度で維持できる応力・ひずみ・変形、あるいは動的機能維持加速度・荷重・変位等を許容限界として定め、それが属するクラスに選定された設計用地震力により生じる応力・変形がその範囲内にあることをもって確認するのが適切である。

12

- (2) 原子炉を構成する構造物等は、運転時の異常な過渡変化に起因する変形については寿命中に幾度となく経験するとして、その作用下でいつでも確実に機能を果たす高い信頼度が要求される。しかしながら、寿命期間中であっても発生することが稀な基準地震動の作用下では、そのような意味での高い信頼度は求められていないことに留意するべきである。このことが現在の指針が基準地震動に対して「たとえ相当部分が降伏し、塑性変形する場合でも過大な変形、亀裂、破損が生じてその機能の維持に影響が及ぶことはないこと」としているゆえんである。上に言及した基準地震動の超過確率を踏まえれば、この基準地震動に対する耐震クラス 1、2 の機器等の耐震性は、これと同等の表現で定義されて良いと考えられる。

- (3) ただし、例えば耐震クラス 2 の施設などは設計の簡易化などを行うかわりに許容限界を弾性範囲内とすることも考えられる。これらはその妥当性が示されれば許容されてしかるべきである。また、クラス 3 の構造物等は一般施設の耐震性の判断基準に従うべきである。

- (4) なお、現在の「指針」が S2 地震動に対して“ねばり”を確認する観点から降伏応力を超える状態についても機能確認ができる限りにおいて許容するとしているにも関わらず、現実にはそれが出来ないために降伏応力を限度としている場合が多く、結果として S₂ に対して弾性設計が行なわれていることが少なくない。このことは耐震性の確認に超過確率の低い地震動を基準地震動として選択し、「機能を担保できる限りにおいて許容応力の範囲を広げても、その空間は事実上利用できないことがあることを意味する。それならば、もっと超過確率

の高い地震動を基準地震動として、その地震動に対して「発生可能性—影響関係」から導かれるより高い信頼度の機能維持（より小さい変形に留まること）を求め、リスク抑制の適切性は目標Ⅱの達成をもって判断するとする指針を整備すべきではないか、との指摘もあった。

9. 支持地盤の健全性、地震随伴事象への配慮

- (1) 現在の「指針」に明確な規定がないけれども、実際には耐震設計の審査の一部として行なわれている「支持地盤は支持する建物・構築物に適用される基準地震動に対して支持機能を損わないこと」、「基準地震動の発生に伴う地すべり、斜面の崩壊及び津波等の可能性の検討を行い、施設の安全確保に支障がないこと」の確認は、この際、明文化することが適切ではないかとの意見が出された。

10. 新立地様式への適用

- (1) この項は本WGの検討課題とされたものであるが、実質的には検討していない。ただし、土木・建築学の近年の進歩を踏まえれば、現行指針の剛構造・岩着規定は削除し、第四紀層地盤立地、免震制振構造の施設の審査にも適用可能とする内容とするようにしておくことは指針の枠組みという観点から適切と考えられる。

11. 地震に起因するリスクが大きくないことの確認

- (1) 現在の安全目標案は、安全目標の適用について、個別の施設に対する規制等、より踏み込んだ適用は将来のことであるとして、まずは審査指針や技術基準類の整備・改訂など、規制活動の合理性、整合性等の判断の参考とするとしている。しかしながら、目標Ⅱの達成を判断するためには、地震PSAを実施して当該施設の耐震安全性の妥当性を安全目標を参考に確認することが適切である。
- (2) 地震PSAを実施するためには、受け入れ可能な共通の地震PSA手法が必要であり、地震PSA実施手順書が民間規格として制定されているべきである。その上で、この項には、受け入れ可能な地震PSAの条件として、民間規格として制定される実施手順書によった、品質の保証されたものであるべきとの記載がなされるべきである。

12. 運転管理に係る考慮事項

- (1) 施設の運転中に地震を経験することがあり得るから、以下のような点については予め保安規定等に定めておくことが必要ではないかとの意見が提出された。
- 1) 原子炉施設に勤務する人々に対して、運転管理作業中に地震に遭遇した際に適切な振る舞いを可能にする教育・訓練を実施すること
 - 2) 事故時操作マニュアルに、事故時操作マニュアルに沿った操作を継続中に地震を経験した場合の処置の仕方を記載すること。特に短時間のうちに操

作業者は正しい手順に従って、それが確実にできていることを確認してマニュアルを整備すること。

- 3) 地震に誘発された事故に対するアクシデントマネジメントのあり方を検討すること。

しかしながら、「指針」における後続規制に対する要請のまとめ方の一般的原則をどうするか議論が定まっていないこともあり、これを「指針」にどう

14

位置づけるかを含めて深い検討はまだ行われていない。

- (2) 東海、南海地震等によって原子炉施設の寿命中に大きな地震を経験する可能性が小さくない施設に対しては大きな事故がおきないことをもって規制責任がはたされたことになるのかという問題提起もあったが、これについても今後の検討課題としている。

以上

15

耐震指針検討分科会 基本ワーキンググループ構成員

グループリーダー	近藤 駿介	東京大学大学院工学系研究科 教授
	阿部 清治	日本原子力研究所東海研究所 安全性試験研究センター センター長
	伊藤 幸美	財団法人 原子力発電技術機構 特別顧問
	入倉 幸次郎	京都大学防災研究所 教授
	神田 順	東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授
	藤田 碧	独立行政法人 防災科学研究所 客員研究員
	平野 光将	財団法人 原子力発電技術機構 理事

(平成 15 年 8 月 20 日現在)

耐震指針検討分科会 基本ワーキンググループ検討経緯

第 1 回	平成 14 年 2 月 18 日	基本WGにおける作業方針について 地震時安全確保の考え方、耐震設計の枠組み について
第 2 回	平成 14 年 3 月 14 日	地震時安全確保の考え方、基準地震動の 考え方について、耐震需要度分類の 基本的考え方について
第 3 回	平成 14 年 5 月 31 日	確率論的安全評価について
第 4 回	平成 15 年 4 月 24 日	検討項目の全般について
第 5 回	平成 15 年 6 月 24 日	検討項目の全般について
第 6 回	平成 15 年 7 月 31 日	基本ワーキンググループの検討状況について

地震ハザード評価WG基準地震動検討Grの

活動進捗

■本資料の目的

基準地震動検討Grにおいて得られた成果と残された課題を整理し、今後の「確率論的基準地震動の策定手順」の高度化に資する。

○基準地震動検討Grの目標

耐震設計審査指針の見直しに伴い、長期的視野に立ち、基準地震動策定に関する枠組みを構築する。

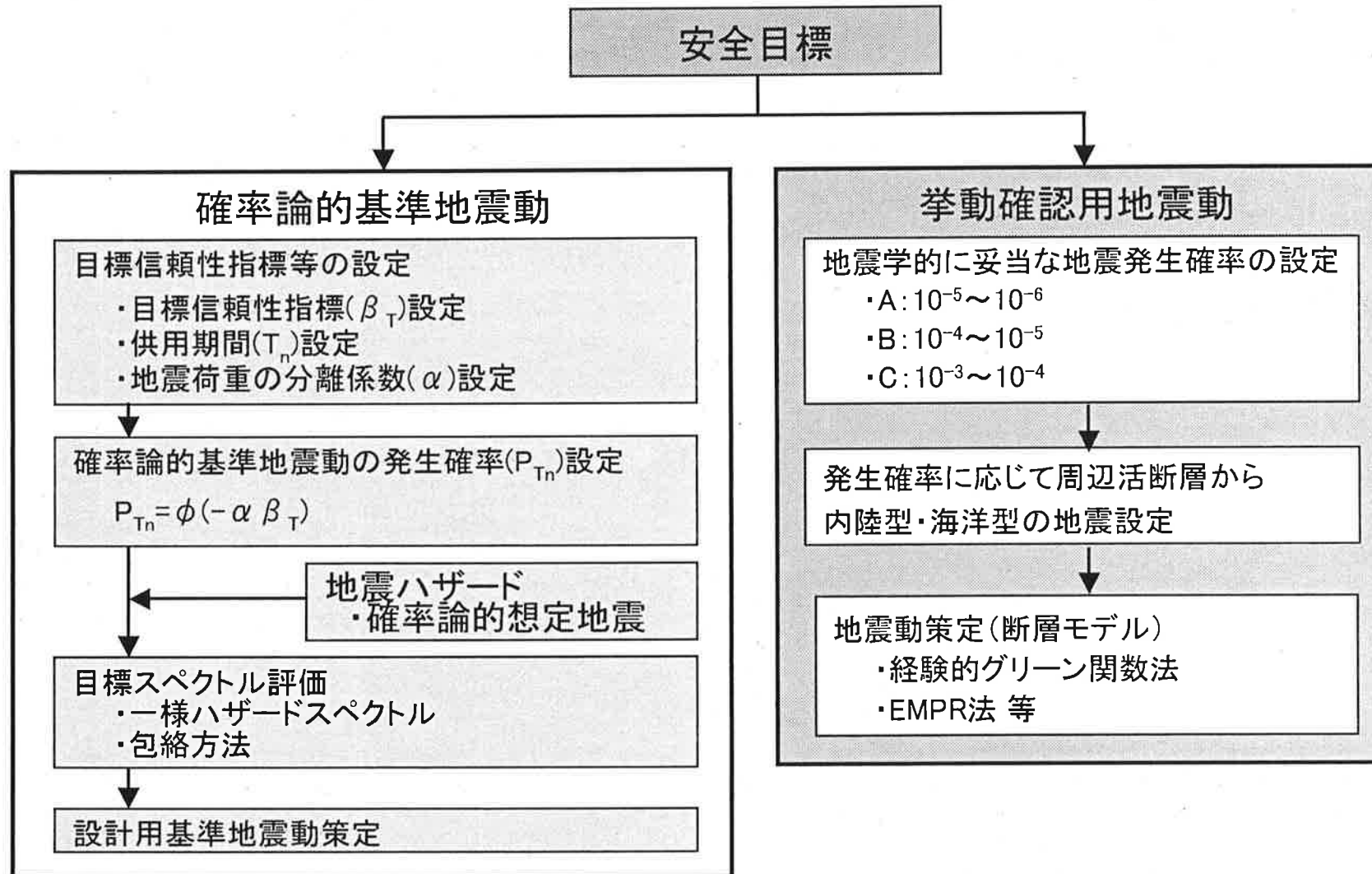
○得られた成果

- ・確率論的基準地震動策定手順の提案
- ・上記手順の有用性の確認
- ・上記手順の高度化及び実用化のための課題整理

○活動期間

- ・平成12年9月(第1回)～平成15年7月23日(第13回)

■ 確率論的基準地震動策定手順



■活動の概要

	H12		H13					H14			H15		
	9/7	11/9	1/23	3/16	5/31	7/17	11/22	2/6	7/2	10/28	1/21	5/14	7/23
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
○コンセンサスの形成	←→												
○基準地震動策定手順の提案			←→										
○手順内の要素の検討 ・諸外国の安全目標の紹介 ・目標信頼性指標(β_T)の検討 ・地震荷重の分離係数(α_s)の検討 ・目標スペクトルの検討						↔	←→	←→	←→				
○基準地震動の試評価 ・供用期間の設定 ・安全目標の設定 ・プラント目標信頼性指標の設定 ・サイト1の地震荷重分離係数の分析 ・サイト1, 2, 3の基準地震動の策定例								↔	↔	↔	↔		
○挙動確認用地震動の評価 ・試評価例						↔							
○基準地震動策定手順の妥当性検討 ・設計的検討 ・課題の整理										←→	←→	←→	←→
○まとめ													↔

コンセンサスの形成／その1（第1回～第4回）

1. 検討の枠組み

- ・安全性のレベルを安全目標という形で具体的に提示されれば、それに応じて基準地震動が設定できる体系とすることが必要。
- ・ S_1 及び S_2 地震に対するクライテリアを、限界状態設計法における構造物の使用限界、終局限界に対応させるのも一方法。
- ・使用限界をどのような条件として設定するか。構造躯体の弾性限界または変形限界、あるいは機器系の作動限界とするか。
- ・終局限界をどのような条件として設定するか。建屋及び機器の限界耐力を設定するか、炉心損傷あるいは放射能放出とするか。
- ・使用限界／終局限界の評価が、どのような評価尺度（信頼性指標）で許容されるかを示すのが重要。
- ・信頼性指標の目標値に対しては国民的な合意が必要。
- ・信頼性設計ありきでなく、現行の許容応力度設計体系に確率論を取り入れる方法等も含めて検討する必要あり。
- ・海外と同じ指標で評価。地震 PSA を活用するのも一方法。
- ・確率論（ハザード）から地震動を設定する場合は、その供用期間の設定が不可欠。
- ・距離減衰式の検討は重要であり、原子力用の新しい距離減衰式（NUPEC 式）を作成してはどうか。
- ・活断層の活動履歴を考慮して地震の発生確率を評価する手法の採用。
- ・活断層が個別に独立に地震を起こすか、いくつかの断層が連動して地震を起こすかどうかの見極めが重要。
- ・「日本の活断層」の A、B、C 級は単に平均変位速度のランクにすぎず、しかも確定した値ではないので、それに依存しすぎることは問題。
- ・ S_1 及び S_2 地震の一本化も議論の対象

2. 成果物

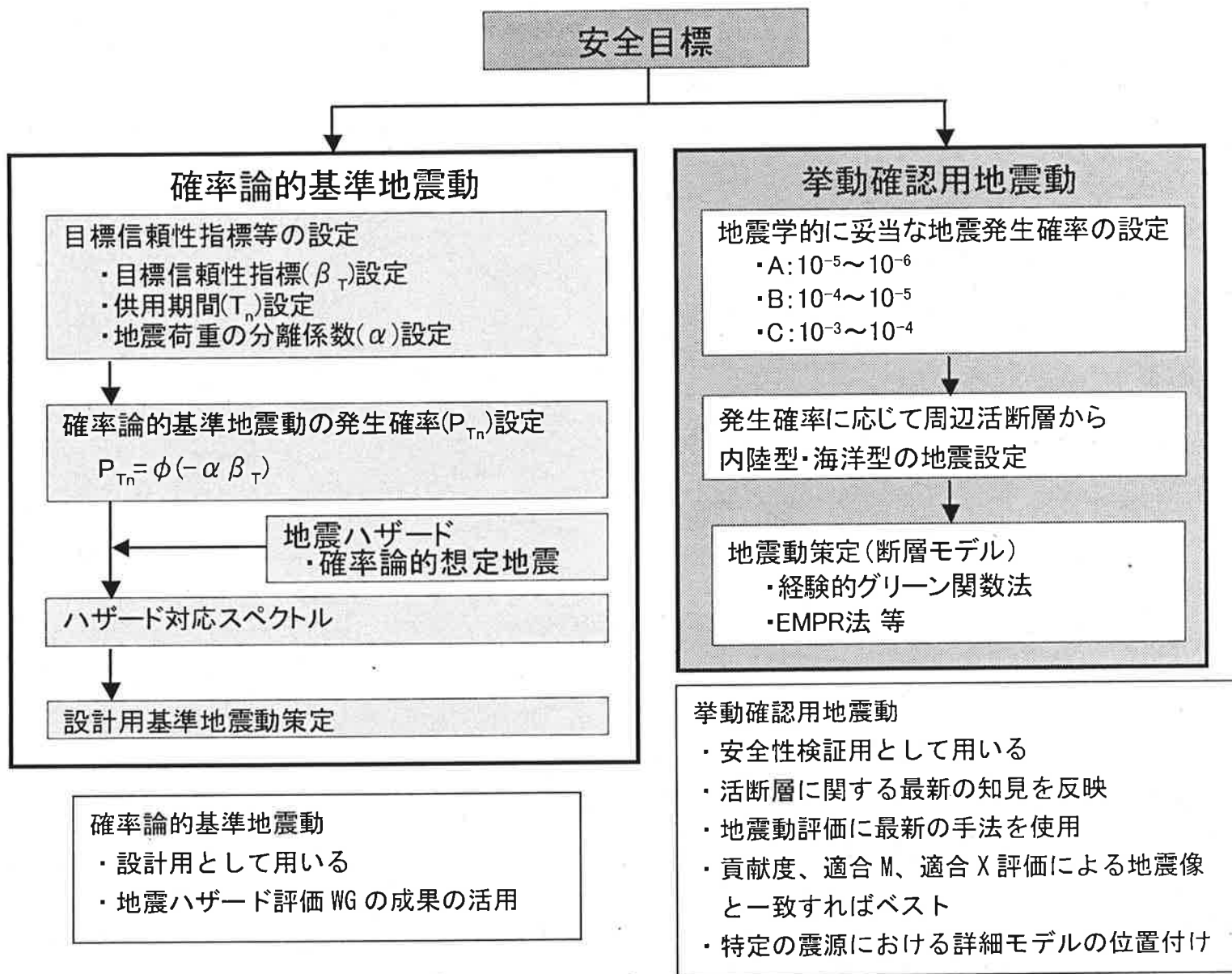
- ・最終成果物は応答スペクトル及び時刻歴波形。確率論で位置付けられた地震では位相の設定が問題。
- ・一様ハザードスペクトルも候補の一つであるが、マグニチュードと震源距離の設定が問題。

コンセンサスの形成／その2（第1回～第4回）

地震学・地震工学等分野における最新知見を反映すべき主な項目と話題提供の内容

	最新知見を反映すべき主な項目	話題提供内容
地震学関連	<ul style="list-style-type: none"> ・活断層の評価 ・サイト近傍地震の規模・位置の検討 ・地体構造の検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・近年の活断層評価の動向からみた課題 (鈴木委員) <ul style="list-style-type: none"> 再中間隔と最新の活動時期の値をモンテカルロシミュレーションにより与えることで、地震発生確率を推定し、発生確率分布を評価
地震工学関連	<ul style="list-style-type: none"> ・震源近傍強震動特性の検討 ・地震動のばらつきと上限値の検討 ・上下地震動の取り扱いの検討 ・地震動の位相特性の検討 ・地震動の長周期成分の検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・基盤強震動データベース開発と非定常スペクトルの重ね合わせによる強震動予測法について (杉戸委員) <ul style="list-style-type: none"> 工学基盤レベルのデータを用いて、小断層の非定常スペクトルを重ね合わせ、大地震の強震動を予測する手法とシミュレーション例の紹介 ・震源近傍の地震動の特徴に関する定性的・定量的な最新知見 (香川委員) <ul style="list-style-type: none"> 硬質地盤上の地震動を特化して、大地震の震源近傍地震動の特徴と支配する要因(ラジエーションパターン、破壊伝播、非一様すべり)を評価 ・震源近傍の地震動を計算するための断層モデル設定法 (香川委員) <ul style="list-style-type: none"> Somerville et al.のM_0によるスケールリング則を用いた断層モデル設定方を提示 ・断層モデルを用いた地震動のばらつき評価法と評価例 (蛭沢委員) <ul style="list-style-type: none"> 断層モデルを用いた地震動のばらつき評価手法とばらつき評価例とばらつきに及ぼす主因子について紹介
耐震設計関連	<ul style="list-style-type: none"> ・動的及び静的地震力の取り扱いの検討 ・機器の耐震重要度分類の検討 ・性能設計導入の検討 ・地震 PSA 導入の検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・確率論に基づく、耐震設計における地震荷重の考え方 (高田委員) <ul style="list-style-type: none"> 耐震性能の確率的表示と地震荷重との関係から、「破壊確率に基づく耐震設計」、「地震荷重の再現期間に基づく設計」、「建物損傷度曲線に基づく設計」、「確定的耐震設計」について紹介 ・基準地震動設定の一案 (神田主査) <ul style="list-style-type: none"> 限界状態設計法(目標信頼性指標、分離係数)の概念に基づく基準地震動策定の方法を提示 ・基準地震動の複数ルート案 (神田主査) <ul style="list-style-type: none"> 設計用基準地震動を策定するフローと、それを確証する挙動確認用地震動の検討フローを提示 ・確率論的想定地震の設定に関する検討 (村松委員) <ul style="list-style-type: none"> 地震ハザード評価結果を地震の物理的イメージを把握するために再分解(RG1.165/石川・亀田の方法)し、サイトに支配的な影響を及ぼす地震を評価

確率論的基準地震動の策定フロー登場（第5回）



目標信頼性指標 (β_T) の検討 / その1 (第7回~第9回)

1. 国内の代表的プラントの主要機器に対する信頼性指標 (β) のキャリブレーション

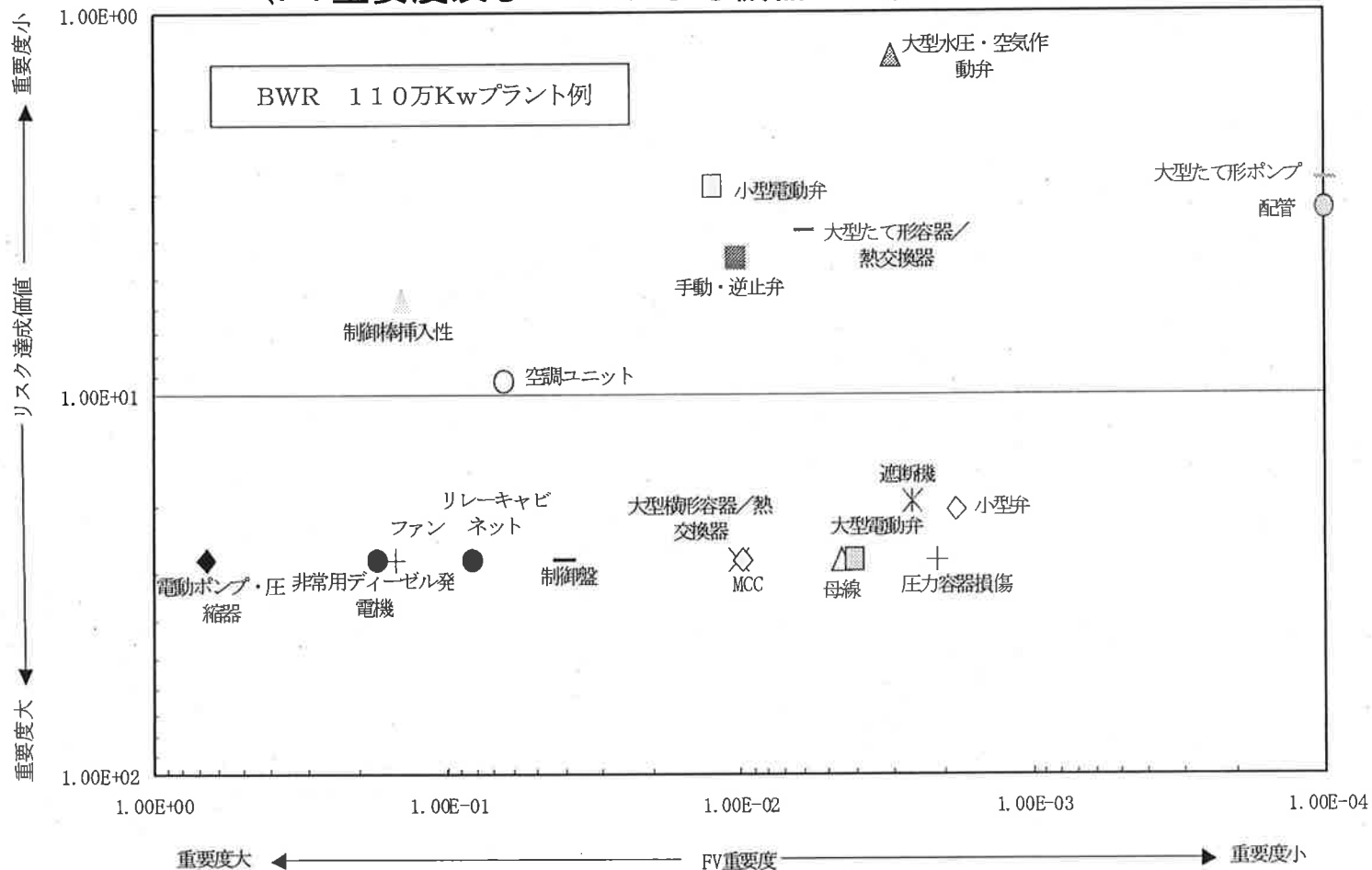
番号	耐力カテゴリ名	代表機器名	機器フラジリティ		地震ハザード(対数正規分布への近似結果)		損傷頻度の算定	
			中央値(Gal)	対数標準偏差	中央値(Gal)	対数標準偏差	安全性指標 β	損傷確率 $\Phi(\beta)$
1	制御棒挿入性	制御棒挿入阻害	14453.8	0.860	131.22	0.550	4.607	2.05E-06
2	原子炉圧力容器	原子炉圧力容器損傷	54325.8	0.867	131.22	0.550	5.866	2.23E-09
3	配管	RHRサビ水系配管の損傷	5629.2	0.557	131.22	0.550	4.801	7.92E-07
4	大型たて形容器/熱交換器	RHR熱交換器の損傷	22347.9	0.808	131.22	0.550	5.257	7.35E-08
5	大型平底たて形タンク	復水貯蔵タンの損傷	1797.0	0.563	131.22	0.550	3.323	4.45E-04
6	大型横形容器/熱交換器	EECW熱交換器の損傷	5067.1	0.552	131.22	0.550	4.687	1.39E-06
7	中・小容器及び熱交換器	非常用ガス処理装置の損傷	400436.1	0.844	131.22	0.550	7.964	0.00E+00
8	大型たて形ポンプ	RHR海水ポンプの損傷	23241.4	0.646	131.22	0.550	6.100	5.32E-10
9	電動ポンプ・圧縮器	EECW電動ポンプの損傷	2546.9	0.646	131.22	0.550	3.495	2.37E-04
10	ポンプ駆動用蒸気タービン	タービン駆動ポンプ(RCIC)の損傷	6293.5	0.802	131.22	0.550	3.981	3.44E-05
11	大型電動弁 (>10インチ)	RHR電動弁の損傷	7566.2	0.552	131.22	0.550	5.204	9.77E-08
12	大型水圧・空気作動弁	PCVS空気作動弁の損傷	26885.8	0.775	131.22	0.550	5.600	1.07E-08
13	手動・逆止弁	RHR逆止弁の損傷	4690.4	0.744	131.22	0.550	3.864	5.58E-05
14	小型弁	RHRスレーの損傷	51369.5	0.802	131.22	0.550	6.140	4.13E-10
15	小型電動弁 (<10in.)	HPCSサビ水系電動弁の損傷	3890.5	0.571	131.22	0.550	4.275	9.55E-06
16	非常用ディーゼル発電機	非常用DGの損傷	12550.3	0.802	131.22	0.550	4.691	1.36E-06
17	バッテリーラック	蓄電池の損傷	72401.1	0.753	131.22	0.550	6.771	6.43E-12
18	スイッチギア	母線の損傷	21174.2	0.752	131.22	0.550	5.458	2.41E-08
19	乾式変圧器	充電器の損傷	31081.3	0.752	131.22	0.550	5.870	2.19E-09
20	空調ユニット	HPCS空調ユニット損傷	12550.3	0.802	131.22	0.550	4.691	1.36E-06
21	計装ラック及び盤	SLCS手動スイッチ損傷	18863.4	0.767	131.22	0.550	5.263	7.11E-08
22	制御盤	EECW電動ポンプ手動スイッチ損傷	17631.8	0.754	131.22	0.550	5.252	7.53E-08
23	リレーキャビネット	EECW電動ポンプ補助リレーキャビネット	17631.8	0.754	131.22	0.550	5.252	7.53E-08
24	計器	HPCSヘルプスイッチ損傷	26707.7	0.782	131.22	0.550	5.560	1.35E-08
25	モータコントロールセンタ	EECW電動ポンプ MCC損傷	11595.9	0.646	131.22	0.550	5.281	6.43E-08
26	インバータ	インバータの損傷	21174.2	0.752	131.22	0.550	5.458	2.41E-08
27	スナッパ及びレストレイン	HPCS配管の損傷	5693.0	0.849	131.22	0.550	3.727	9.70E-05

各機器カテゴリの中でFVの高い機器を選定
各機器カテゴリの代表的な機器を選定 (FVによる選定が不可能なため)

目標信頼性指標 (β_T) の検討 / その2 (第7回~第9回)

2. FV 重要度指標、RAW 重要度指標を介して、炉心損傷頻度 (CDF) の改善に影響の大きい重要機器の選定及びグルーピング

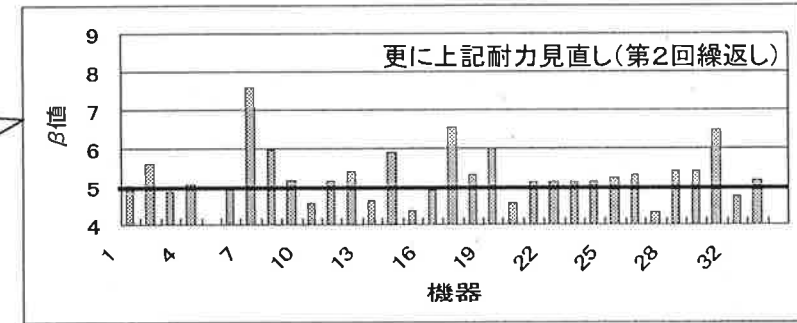
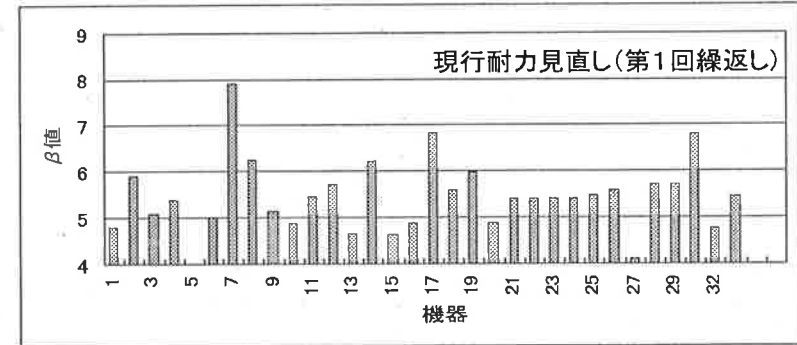
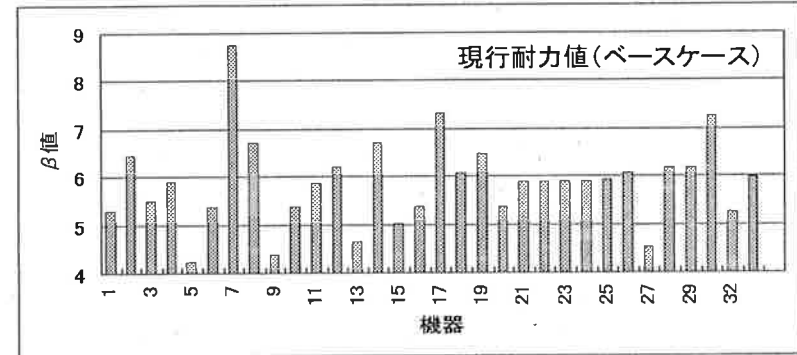
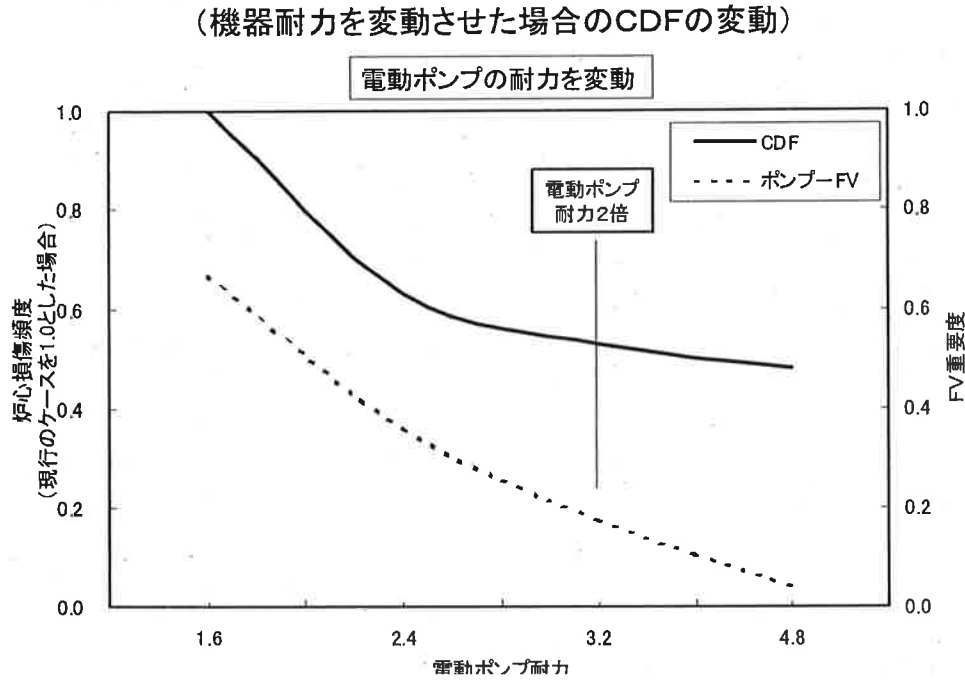
(FV重要度及びRAWによる機器の重要度の評価結果)



目標信頼性指標 (β_T) の検討 / その3 (第7回~第9回)

3. 重要機器耐力をパラメータとした CDF の改善効果及び β の変動傾向の把握

(各ケースにおける β 値の変化)



各機器の β 値が5程度に低減、且つ耐震裕度が平均化

地震荷重の分離係数 (α_s) の検討 (第8回~第9回)

1. 重要機器耐力をパラメータとした α_s の変動傾向の把握

表1 プラントの分離係数 (サイト1) 0.75

	機器フラジリティ			地震ハザード (対数正規分布への近似結果)			損傷頻度の算定					
	対数平均	中央値 (Gal)	対数標準 偏差	対数平均	中央値(Gal)	対数標準偏 差	信頼性指標 β	損傷確率 $\Phi(\beta)$	地震荷重の α_s	機器耐力の α_r	設計点 (Gal)	設計地震動発生確率 $\Phi^{-1}(\alpha_s \cdot \beta)$
基準ケース	7.89	2665.07	0.475	4.877	131.223	0.550	4.144	1.710E-05	0.757	0.654	736.57	8.553E-04/40年
ケース1	8.09	3259.26	0.499	4.877	131.223	0.550	4.324	7.653E-06	0.740	0.672	763.60	6.827E-04/40年
ケース2	8.58	5339.27	0.506	4.877	131.223	0.550	4.959	3.543E-07	0.736	0.677	977.09	1.311E-04/40年
ケース3	8.26	3871.21	0.500	4.877	131.223	0.550	4.555	2.625E-06	0.740	0.672	838.25	3.739E-04/40年
ケース4	7.92	2744.10	0.484	4.877	131.223	0.550	4.151	1.655E-05	0.751	0.660	728.93	9.123E-04/40年
ケース5	8.08	3216.12	0.491	4.877	131.223	0.550	4.341	7.109E-06	0.746	0.666	779.51	5.990E-04/40年

ケース1: 基準ケースからポンプ耐力を2倍、手動・逆止弁耐力を1倍、その他の機器耐力を0.7倍に変更
 ケース2: 基準ケースからポンプ耐力を2倍、手動・逆止弁耐力を1.5倍、その他の機器耐力を1.0倍に変更
 ケース3: 基準ケースからポンプ耐力を2倍、手動・逆止弁耐力を1倍、その他の機器耐力を0.8倍に変更
 ケース4: ケース1から制御棒挿入性及びスナッチャ・レストレイント耐力を1.1倍、手動・逆止弁、熱交換器、電動ポンプ、非常用DG及びファンの耐力を1倍、その他の機器耐力を0.7倍に変更
 ケース5: ケース1から制御棒挿入性及びスナッチャ・レストレイント耐力を1.2倍、手動・逆止弁、熱交換器、電動ポンプ、非常用DG及びファンの耐力を1倍、その他の機器耐力を0.8倍に変更

表2 プラントの分離係数 (サイト2) 0.90

	機器フラジリティ			地震ハザード (対数正規分布への近似結果)			損傷頻度の算定					
	対数平均	中央値 (Gal)	対数標準 偏差	対数平均	中央値(Gal)	対数標準偏 差	信頼性指標 β	損傷確率 $\Phi(\beta)$	地震荷重の α_s	機器耐力の α_r	設計点 (Gal)	設計地震動発生確率 $\Phi^{-1}(\alpha_s \cdot \beta)$
基準ケース	6.19	485.63	0.276	4.388	80.518	0.630	2.613	4.488E-03	0.916	0.402	363.47	8.355E-03/40年
ケース1	6.28	531.17	0.276	4.388	80.518	0.630	2.743	3.041E-03	0.916	0.401	391.89	5.993E-03/40年
ケース2	6.31	552.73	0.289	4.388	80.518	0.630	2.781	2.714E-03	0.909	0.417	395.66	5.740E-03/40年
ケース3	6.35	570.65	0.306	4.388	80.518	0.630	2.797	2.582E-03	0.899	0.437	392.62	5.943E-03/40年
ケース4	6.46	636.87	0.359	4.388	80.518	0.630	2.853	2.164E-03	0.869	0.495	383.79	6.580E-03/40年
ケース5	6.28	534.34	0.299	4.388	80.518	0.630	2.715	3.312E-03	0.904	0.428	377.56	7.075E-03/40年
ケース6	6.66	778.28	0.356	4.388	80.518	0.630	3.136	8.573E-04	0.871	0.492	449.36	3.168E-03/40年

ケース1: たて型ポンプ耐力1.5倍
 ケース2: たて型ポンプ耐力2.0倍
 ケース3: たて型ポンプ耐力3.0倍
 ケース4: 電気品耐力2.0倍
 ケース5: 制御棒耐力2.0倍
 ケース6: 全耐力1.5倍

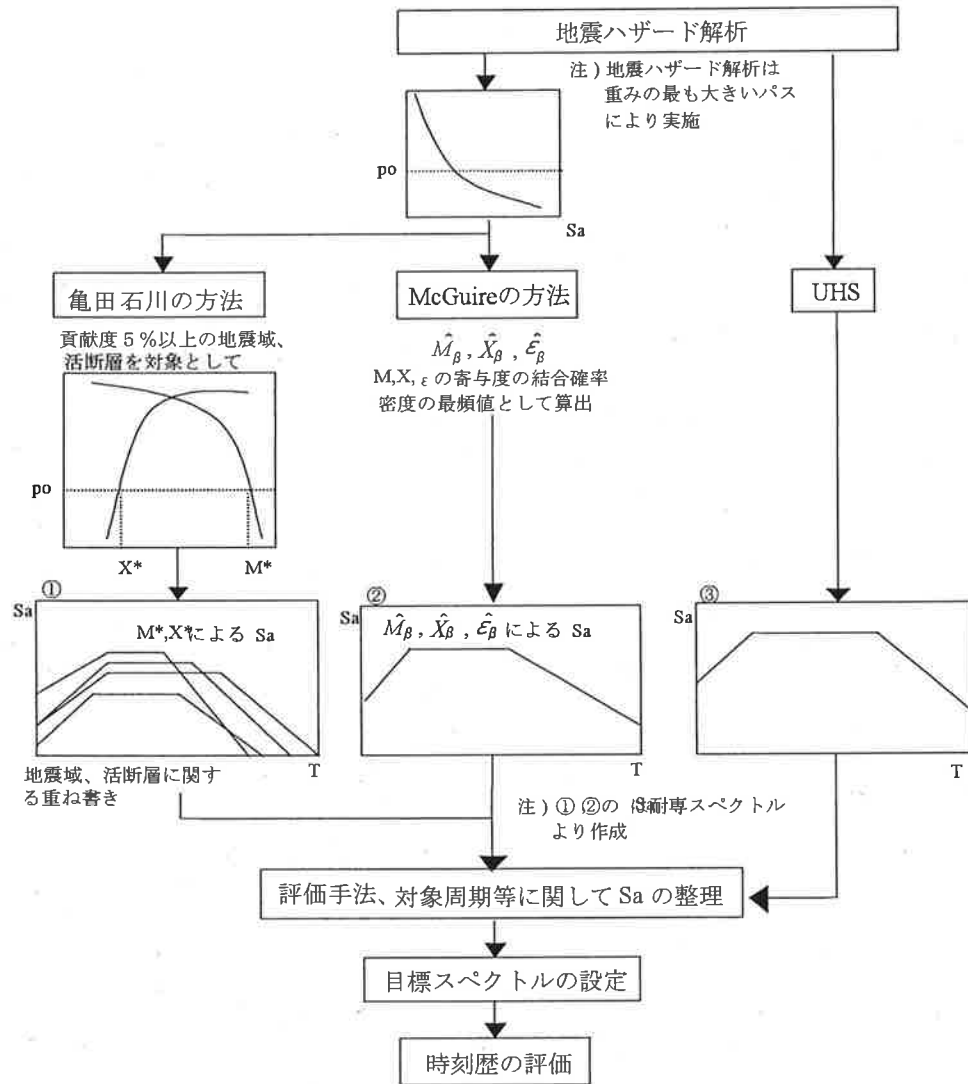
表3 プラントの分離係数 (サイト3) 0.90

	機器フラジリティ			地震ハザード (対数正規分布への近似結果)			損傷頻度の算定					
	対数平均	中央値 (Gal)	対数標準 偏差	対数平均	中央値(Gal)	対数標準偏 差	信頼性指標 β	損傷確率 $\Phi(\beta)$	地震荷重の α_s	機器耐力の α_r	設計点 (Gal)	設計地震動発生確率 $\Phi^{-1}(\alpha_s \cdot \beta)$
基準ケース	6.52	678.95	0.267	5.073	159.633	0.680	1.983	2.370E-02	0.931	0.365	559.68	3.247E-02/40年
ケース1	6.62	753.69	0.251	5.073	159.633	0.680	2.142	1.609E-02	0.938	0.346	625.59	2.224E-02/40年
ケース2	6.66	784.28	0.252	5.073	159.633	0.680	2.196	1.403E-02	0.938	0.347	647.41	1.970E-02/40年
ケース3	6.71	818.81	0.262	5.073	159.633	0.680	2.245	1.240E-02	0.933	0.360	662.77	1.811E-02/40年
ケース4	6.80	897.38	0.260	5.073	159.633	0.680	2.372	8.837E-03	0.934	0.358	719.65	1.336E-02/40年
ケース5	6.66	780.62	0.257	5.073	159.633	0.680	2.185	1.446E-02	0.935	0.353	640.26	2.050E-02/40年
ケース6	6.75	850.31	0.274	5.073	159.633	0.680	2.283	1.122E-02	0.928	0.373	673.36	1.710E-02/40年

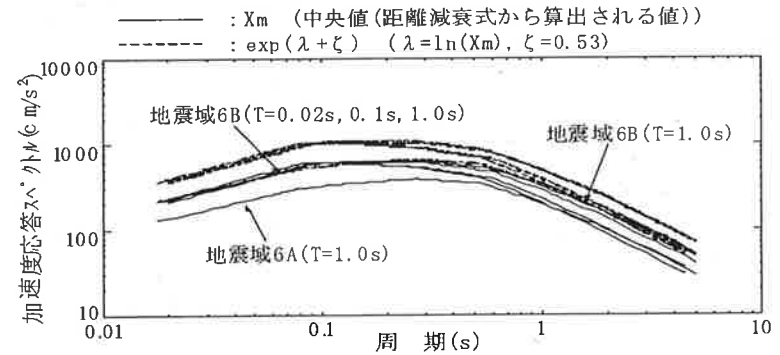
ケース1: 基準ケースからポンプ耐力を1.5倍に変更
 ケース2: 基準ケースからポンプ耐力を2.0倍に変更
 ケース3: 基準ケースからポンプ耐力を3.0倍に変更
 ケース4: 基準ケースからから全ての機器の耐力を上限値に変更
 ケース5: 基準ケースからから全ての機器の耐力を1.5倍に変更
 ケース6: 基準ケースからから全ての機器の耐力を2.0倍に変更

目標スペクトルの検討 (第7回~第9回)

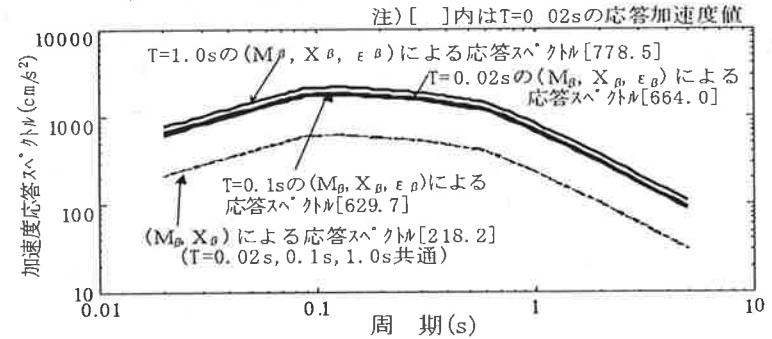
1. LT の各分岐の最も重みの大きいパスを用いたハザード曲線からの目標スペクトルの作成



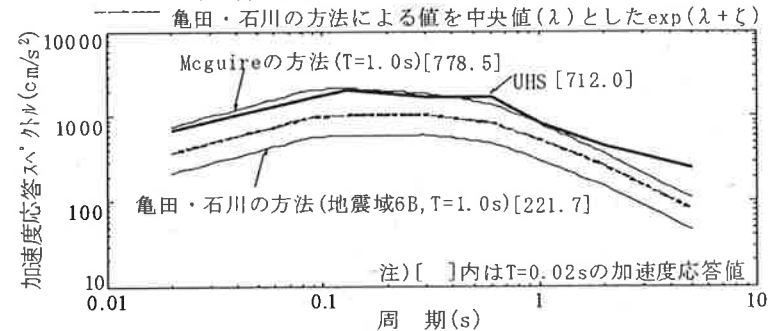
(亀田・石川の方法による加速度応答スペクトル)



(McGuireの方法による加速度応答スペクトル)



(一様ハザードスペクトルとの比較)



安全目標の設定（第9回）

- 炉心損傷頻度の目標値
- 炉心損傷頻度に関する IAEA の INSAG-12(INSAG-3 Rev.1)の推奨値を仮採用
 - 新規プラント：CDF=10⁻⁵ /炉年
 - 既存プラント：CDF=10⁻⁴ /炉年

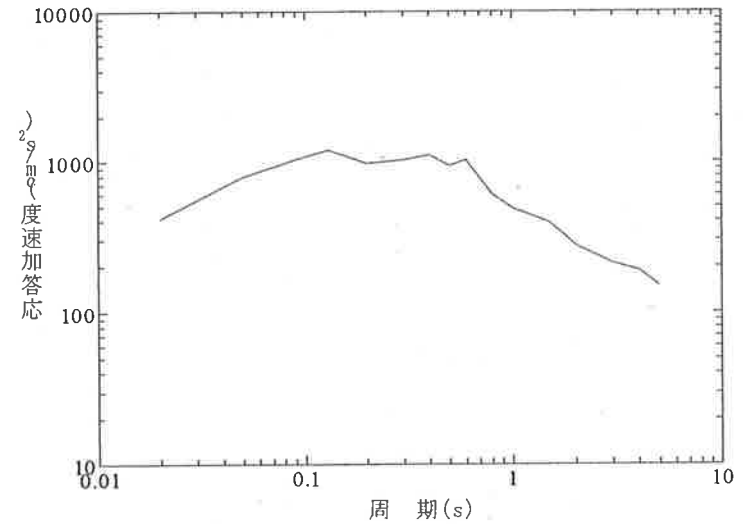
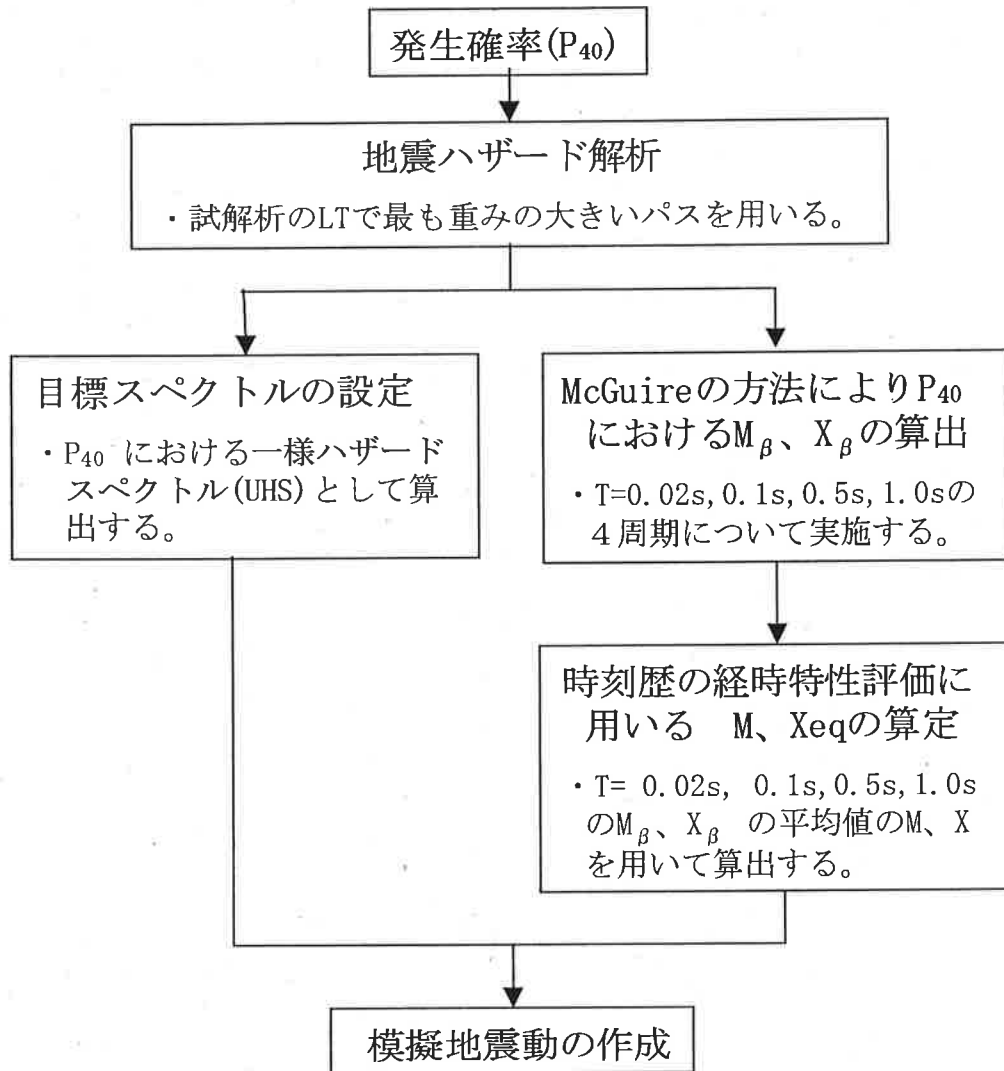
供用期間の設定（第8回）

- 米国の原子力発電設備の運転認可期間を参考にして40年とする。

プラントの目標信頼指標の設定（第9回）

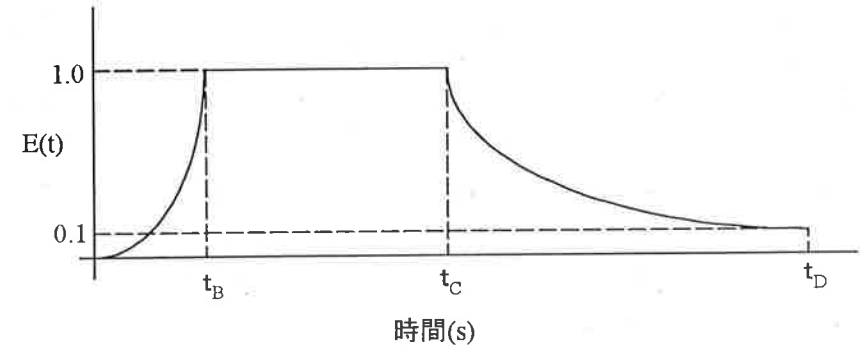
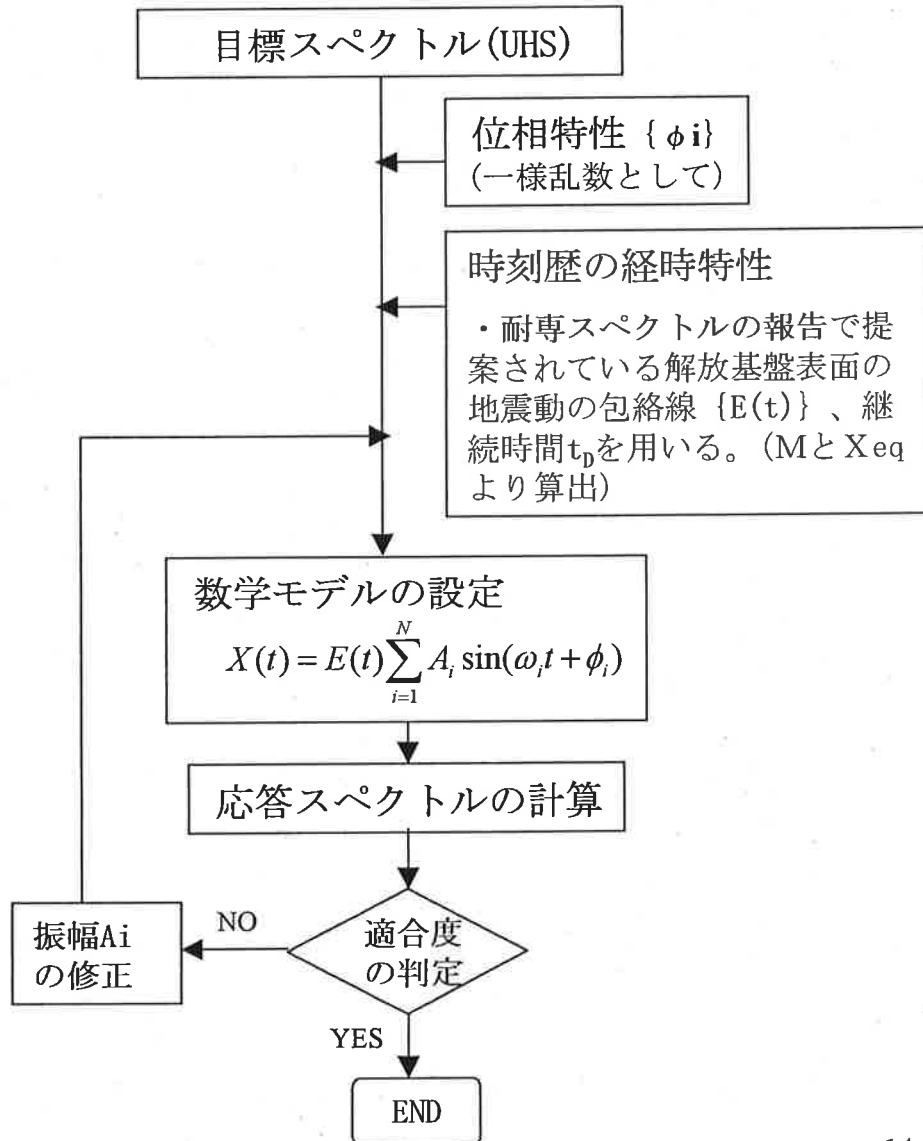
- 供用期間40年に対する目標信頼性指標
 - 新規プラント： $\beta = -\Phi^{-1}(4.0 \times 10^{-4}) = 3.35$
 - 既存プラント： $\beta = -\Phi^{-1}(4.0 \times 10^{-3}) = 2.65$

時刻歴波形の作成／その1 (第11回)



一様ハザードスペクトル (UHS) の例
(サイト1, $P_{40}=5.96 \times 10^{-3}$)

時刻歴波形の作成／その2 (第11回)



$$t_B = 10^{0.5M-2.93}$$

$$t_C - t_B = 10^{0.3M-1.0}$$

$$t_D - t_C = 10^{0.17M+0.54\log X_{eq}-0.6}$$

振幅包絡線 $E(t)$ は下式により算出される。

$$E(t) = (t/t_B)^2 \quad (0 < t \leq t_B)$$

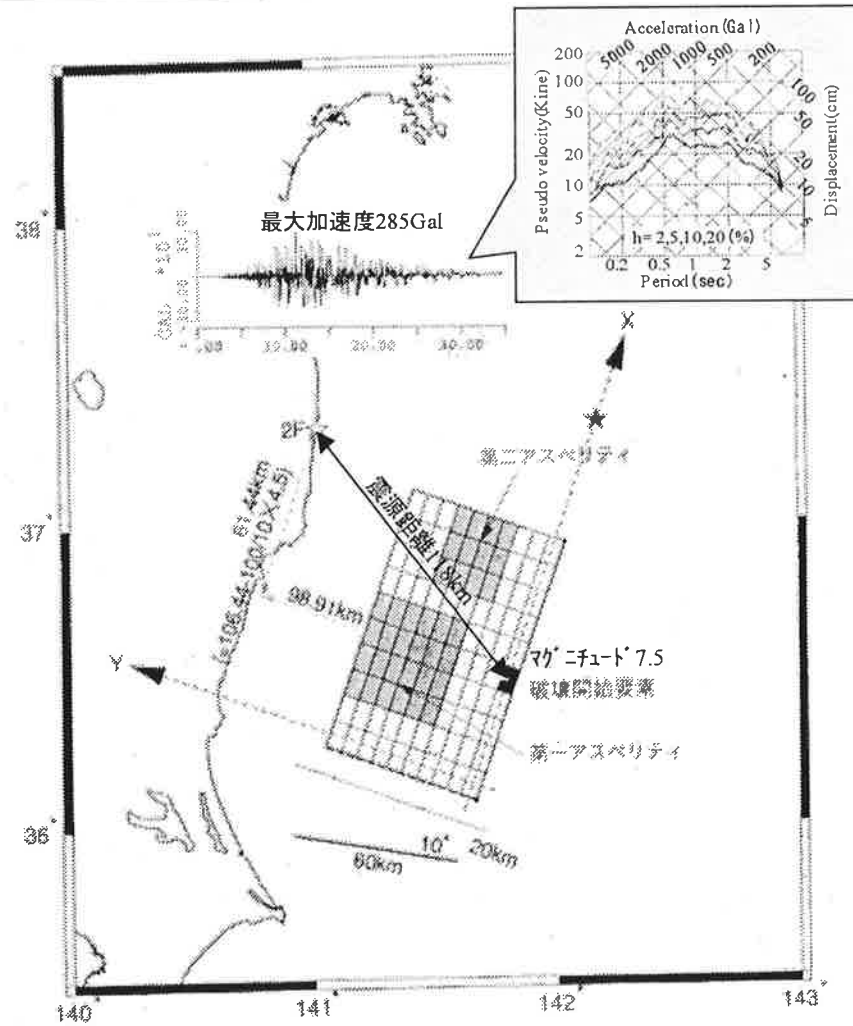
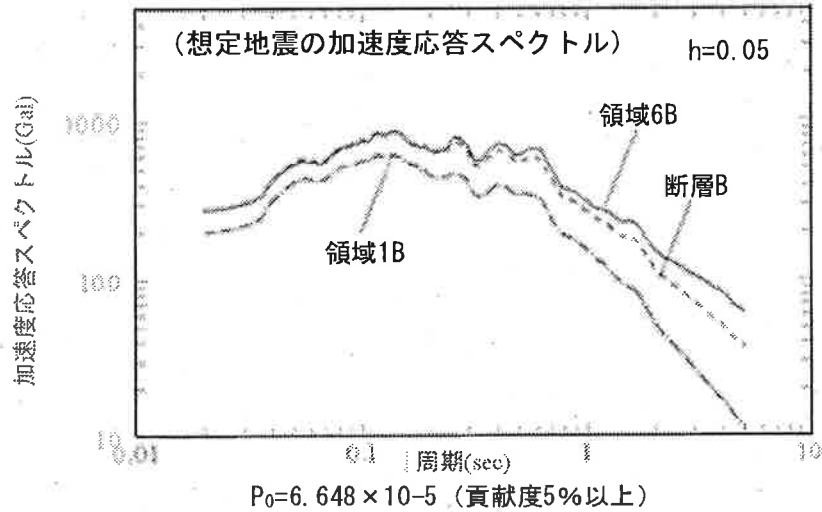
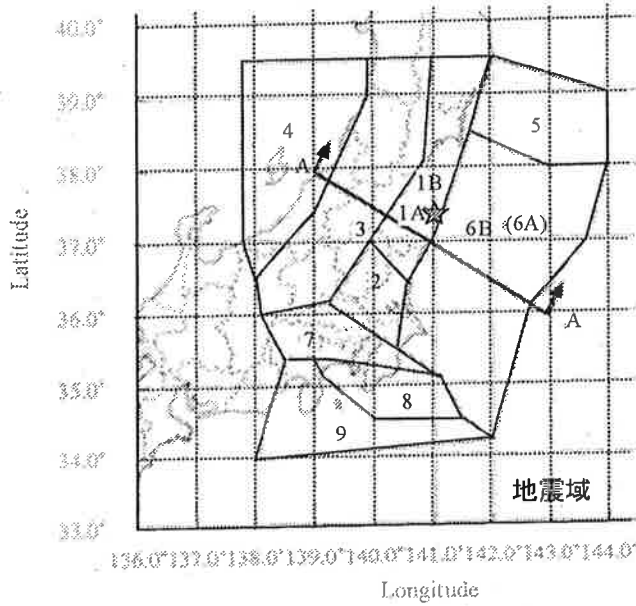
$$E(t) = 1 \quad (t_B < t \leq t_C)$$

$$E(t) = e^{\frac{\ln(0.1)}{t_D-t_C}(t-t_C)} \quad (t_C < t \leq t_D)$$

設定する時刻歴の経時特性

挙動確認用地震動の検討 (第7回)

1. サイト1 (塩屋崎断層)



確率論的想定地震算定結果

領域・活断層	年超過発生確率 $p_0=6.648 \times 10^{-5}$			
	貢献度(%)	M^*	X^* (km)	PGA (Gal)
領域1B	6.0	6.3	12.0	198.8
領域6B	78.0	7.4	20.0	277.2
断層B	9.0	7.0	15.0	277.0

設計的検討/その1 (第10回~第13回)

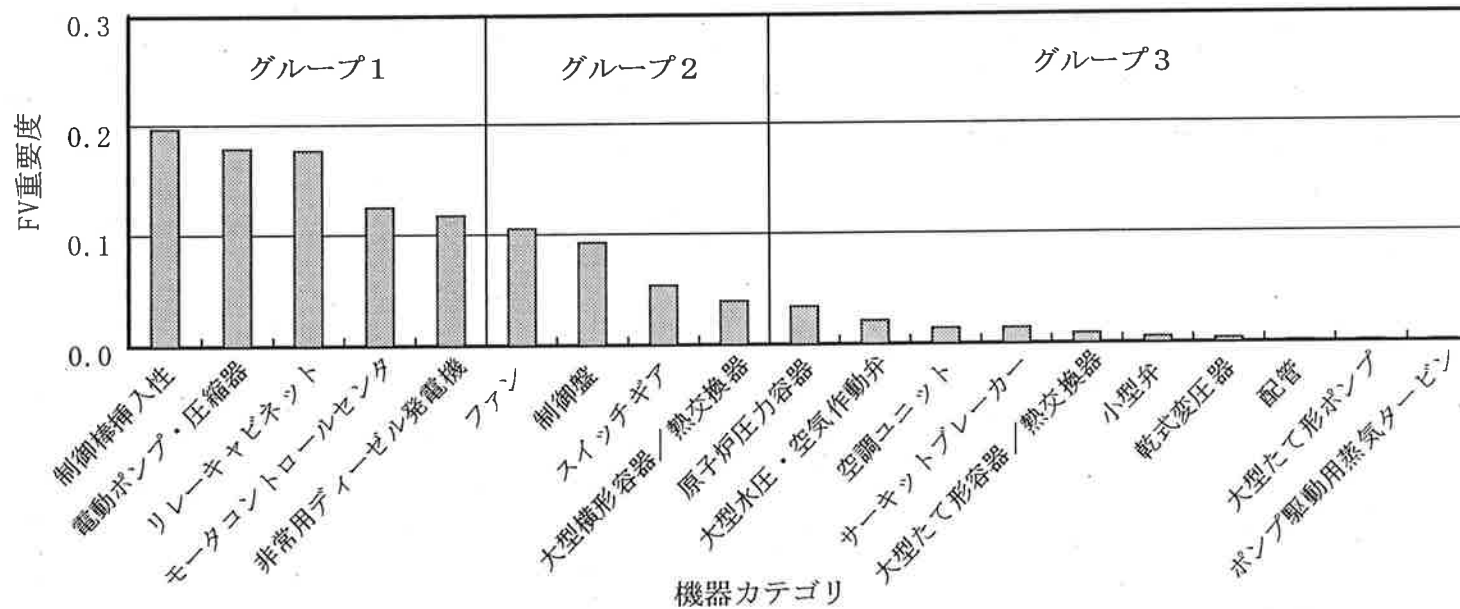
1. 機器耐力のカテゴリ化と CDF との対応

(解析ケースの設定)

ケース名	内容
CASE01	事故緩和系に含まれる主要機器の耐力を、プラントの目標信頼性指標に対して設定した確率論的基準地震動と機器耐力の分離係数に基づいて設定。原子炉压力容器の耐力値は実耐力を設定
CASE02	CASE01 の解析結果における FV 重要度を参考に、CDF への寄与度が低い機器(グループ 3)の信頼性目標を緩和(損傷確率で 1 桁程度)
CASE03	CASE01 の解析結果における FV 重要度を参考に、CDF への寄与度が低い機器の信頼性目標を緩和(グループ 3)かつ寄与度が高い機器(グループ 1)の信頼性目標を強化(損傷確率で 1 桁程度)

(CASE02 及び CASE03 における CDF の変化)

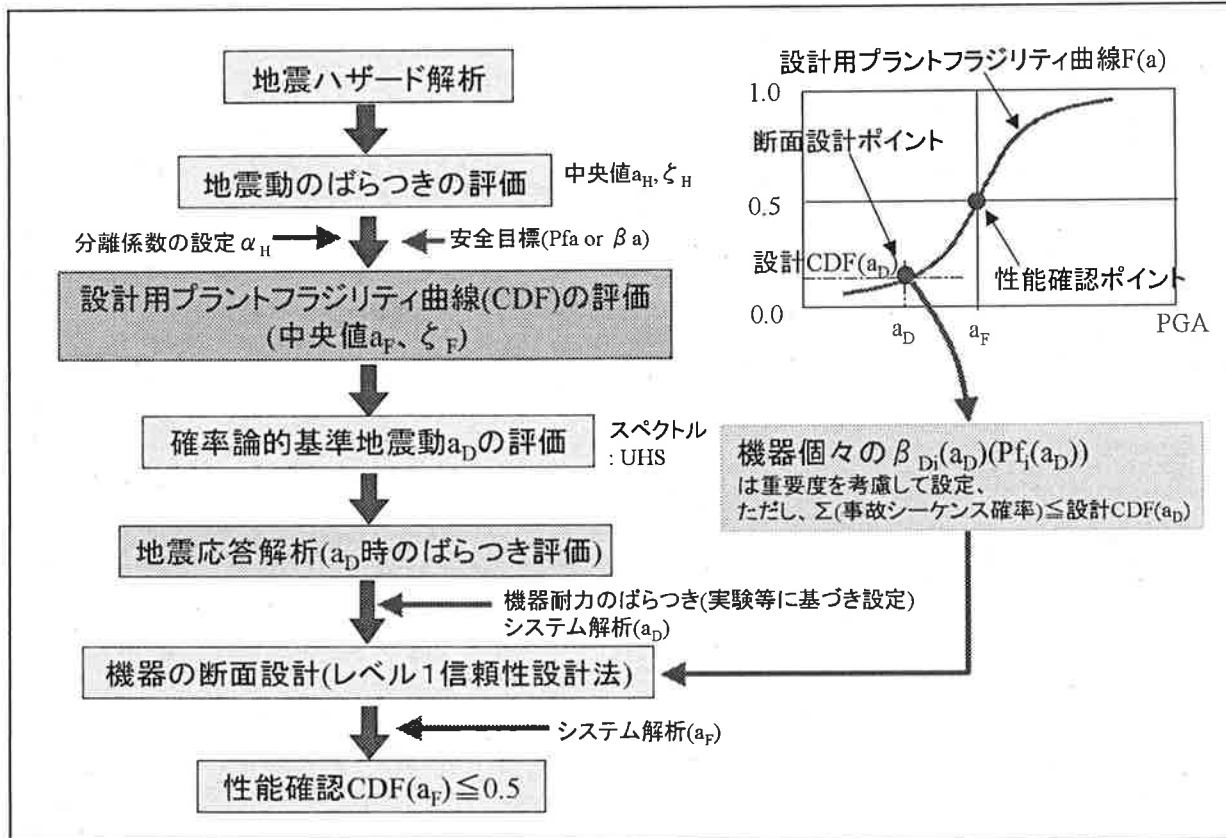
ケース名	サイト 1	サイト 3
CASE01	1.0	1.0
CASE02	1.13	1.05
CASE03	0.45	0.83



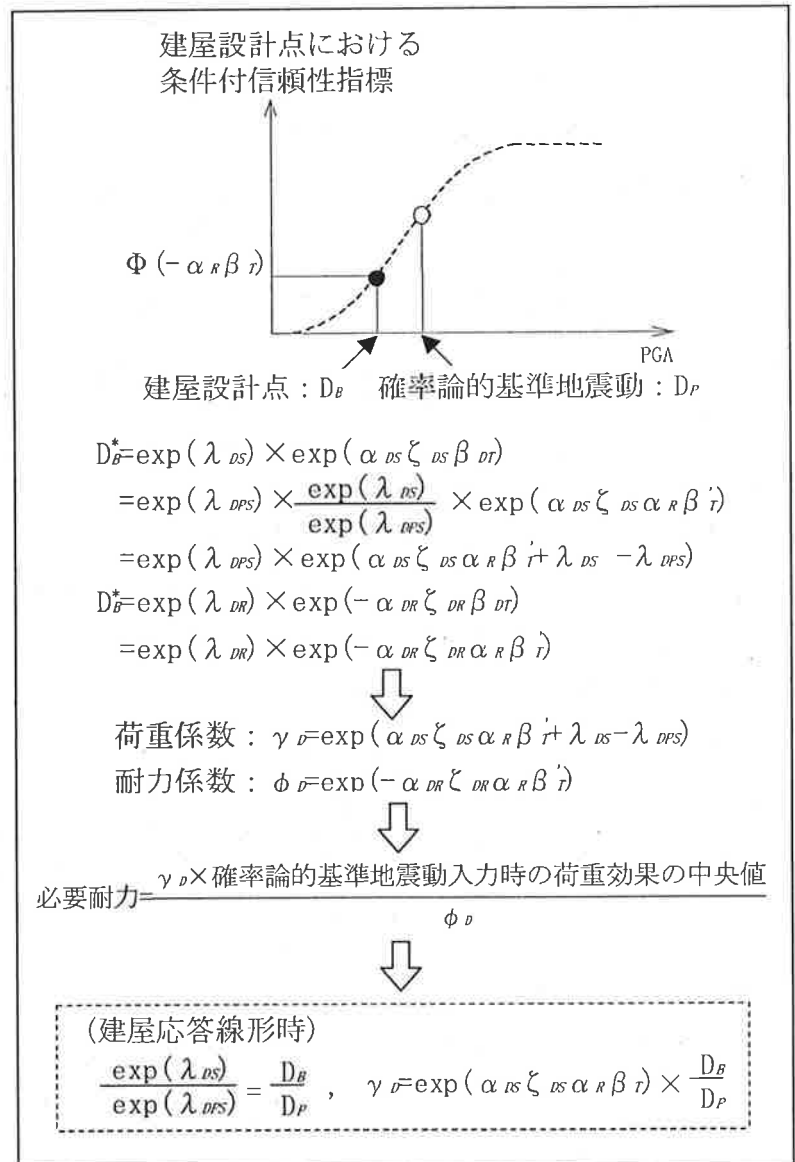
主要機器のFV重要度 (サイト1, CASE01)

設計的検討/その2 (第10回~第13回)

2. 設計法



3. 設計法 2



■設計適用に際しての必要検討項目

- ①安全目標レベルの明示
- ②適切な安全余裕の設定
 - ・目標信頼性指標の設定
- ③地震動評価手法の標準化
 - ・地震ハザード評価法
 - ・地震動時刻歴波作成法
- ④地震応答評価(中央値、標準偏差)の信頼性向上
- ⑤耐力データベースの整備
- ⑥地震荷重と他荷重の組合せ法の検討
- ⑦代表プラントによるキャリブレーション
 - ・解析例の蓄積