

第 1 画面

資料№4

原子力発電所の耐震設計

2002年7月26日

渡部 征男
(株)大林組)

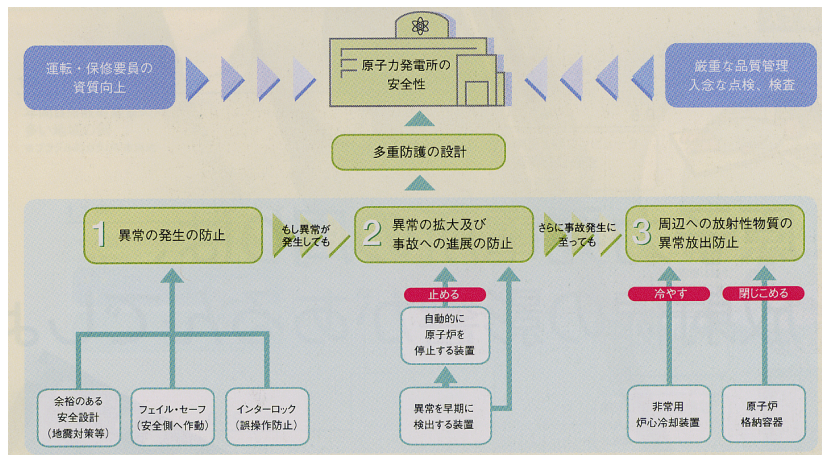
第 2 画面

主な項目

- 1 原子力発電所の安全確保のしくみ
- 2 原子力発電所の耐震設計の流れ
- 3 保有する耐震裕度
- 4 PCCVの実証試験
- 5 機器設備の実証試験
- 6 耐震性に関する許認可

第1画面

原子力発電所の安全性確保のしくみ



第2画面

耐震設計の位置づけ

- 余裕の有る安全設計 - **耐震設計**
- 自動的に原子炉を停止する装置 - **地震感知器**
- 原子炉格納容器 - **S 1 + 事故の設計**
- 厳重な品質管理・入念な点検、検査 - **振動試験**
- **地震観測**

第 1 画面

設計で考慮する事象

自然現象

- ・ 風
- ・ 雪
- ・ 台風
- ・ 地震
- ・ 津波

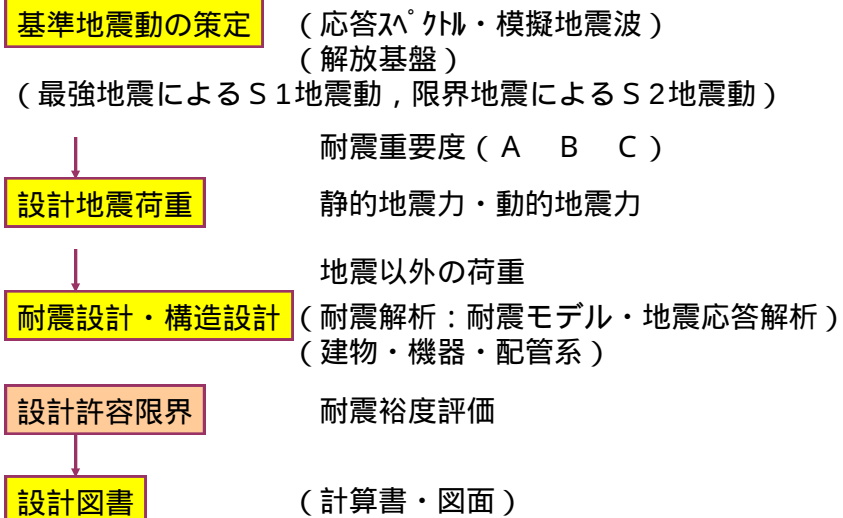
運転状態

- ・ 通常運転
- ・ 試験
- ・ 故障（過渡変化状態）
- ・ 想定事故
- ・ 稀な重大事故（想定外事象）

第 2 画面

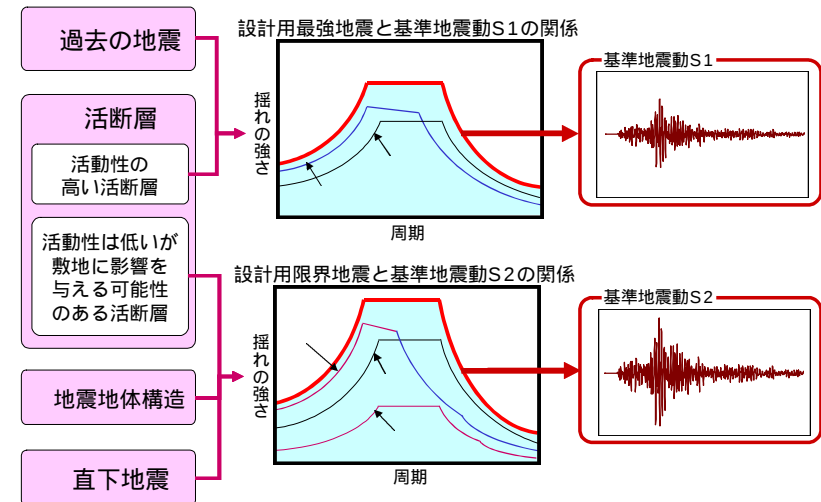
第 1 画面

原子力発電所の耐震設計の流れ(1)



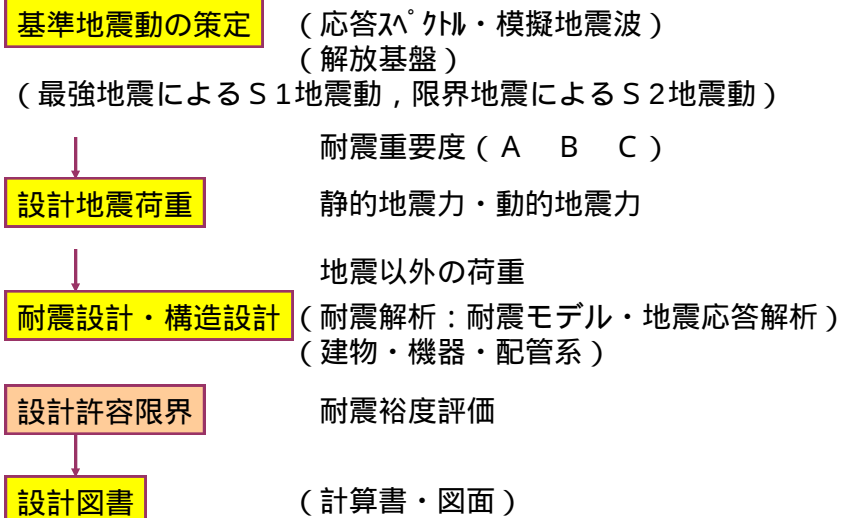
第 2 画面

基準地震動の策定



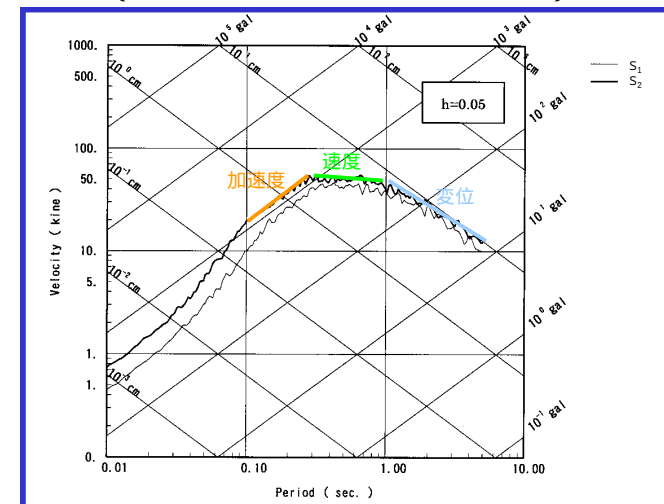
第 1 画面

原子力発電所の耐震設計の流れ(1)



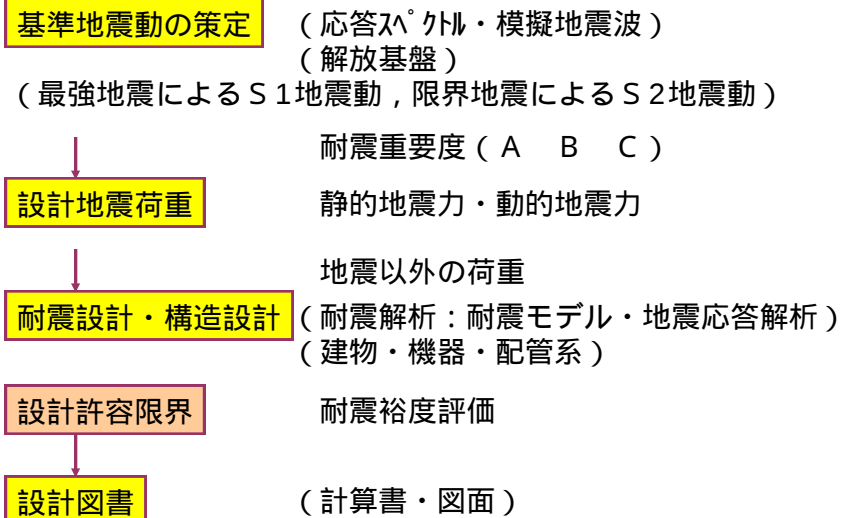
第 2 画面

S 1, S 2 地震応答スペクトル (3 方向対数表示スペクトル)



第 1 画面

原子力発電所の耐震設計の流れ(1)



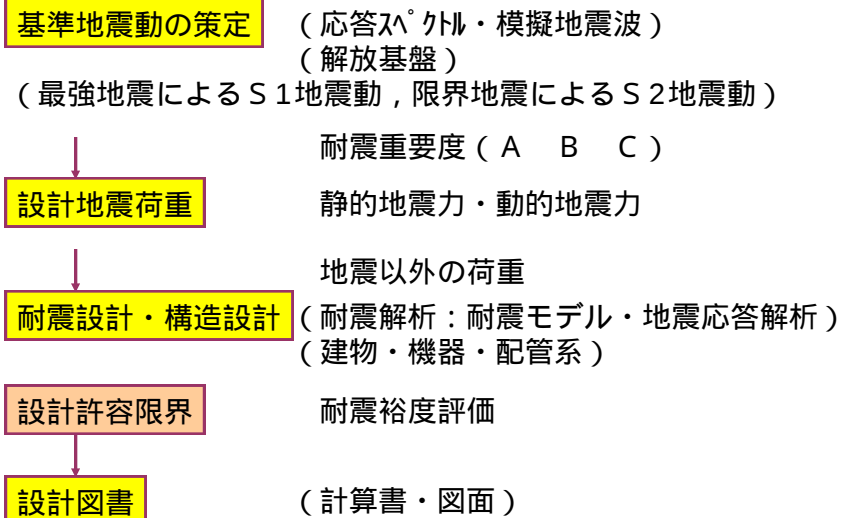
第 2 画面

耐震重要度分類

炉型 クラス	沸騰水型原子炉 (BWR)	加圧水型原子炉 (PWR)
A	原子炉格納容器 制御棒、駆動機構 残留熱除去系 原子炉圧力容器など	原子炉格納容器 制御棒、駆動機構 余熱除去系 原子炉容器など
B	非常用炉心冷却系など	安全注入系など
C	廃棄物処理設備など	廃棄物処理設備など

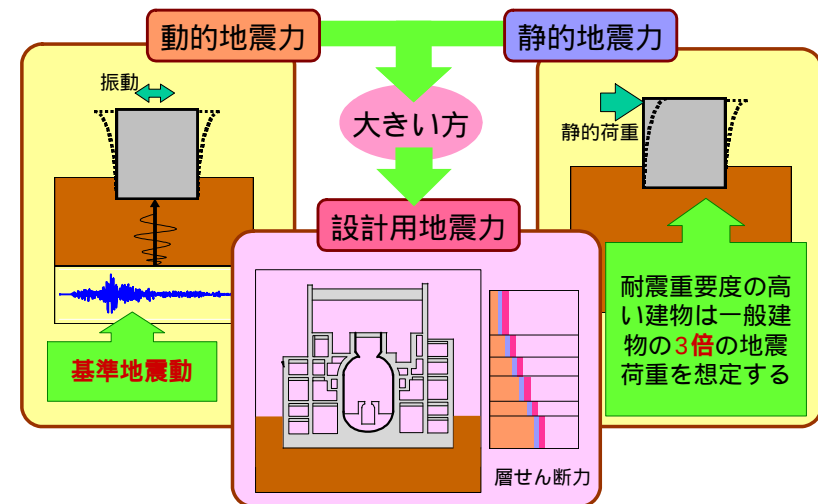
第 1 画面

原子力発電所の耐震設計の流れ(1)



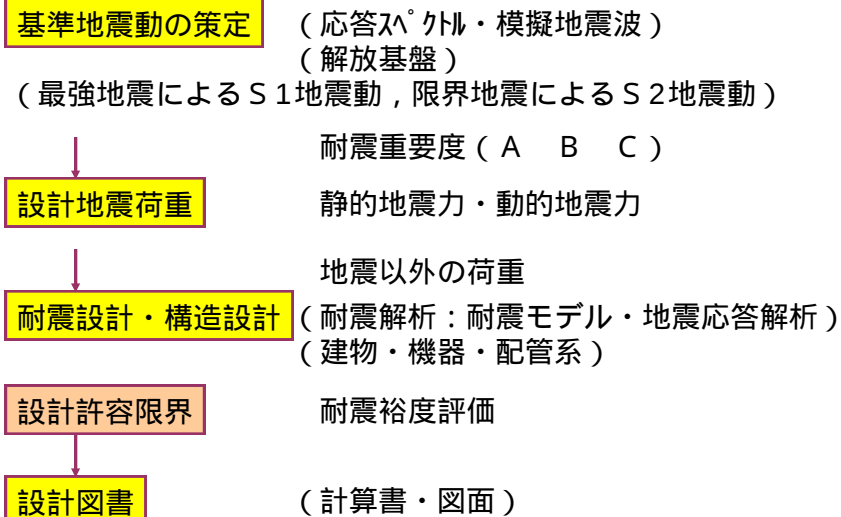
第 2 画面

設計地震荷重



第 1 画面

原子力発電所の耐震設計の流れ(1)



第 2 画面

設計用地震力の算定

動的地震力

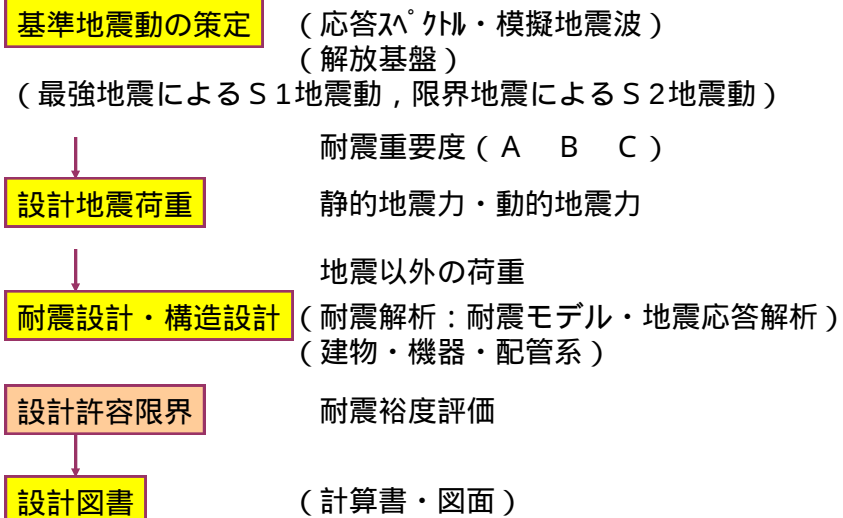
- 基準地震動による水平地震力
- 基準地震動の最大加速度の $1/2 =$ 鉛直震度(一定)による鉛直地震力 (基準地震動 S₂)

静的地震力

- 建築基準法の係数の 3 倍による水平地震力
- 岩盤上では鉛直震度 0.24(一定)による鉛直地震力

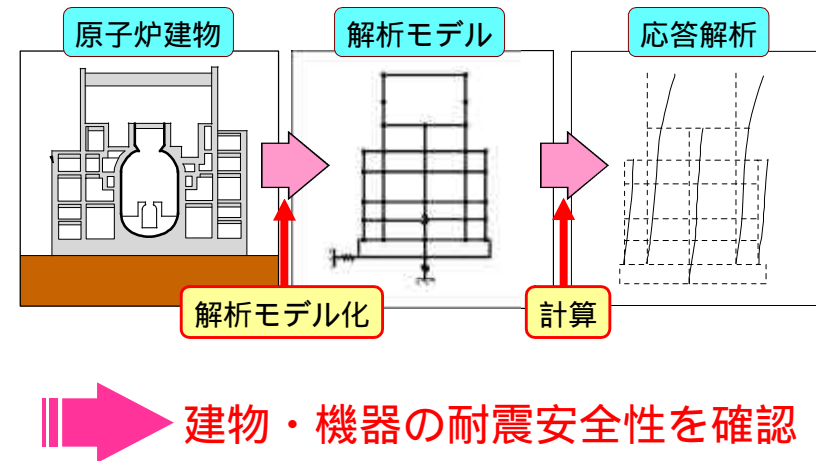
第 1 画面

原子力発電所の耐震設計の流れ(1)



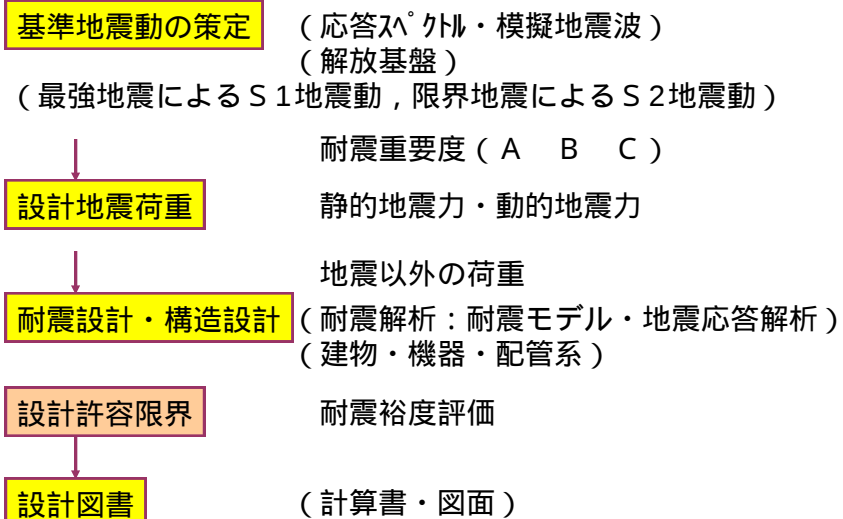
第 2 画面

耐震解析(地震応答解析)



第 1 画面

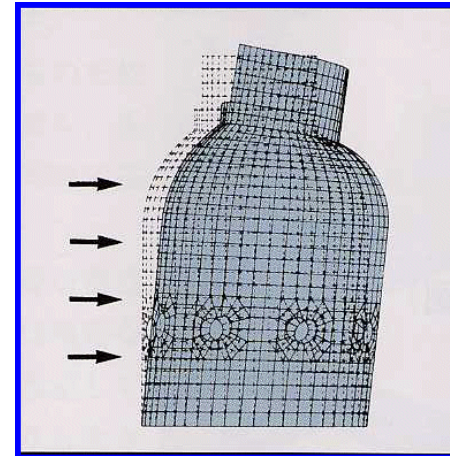
原子力発電所の耐震設計の流れ(1)



第 2 画面

建物の耐震安全性確認

構造解析

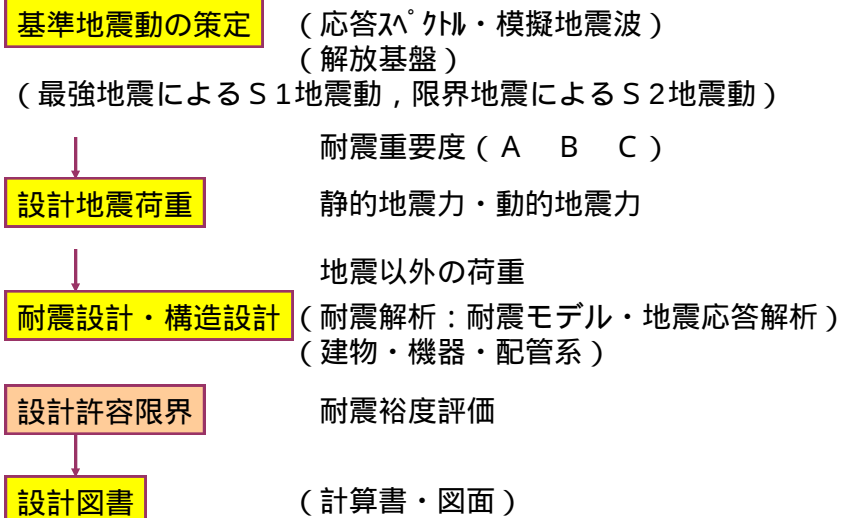


建物に生ずる
応力・変位
- 構造解析

応力に見合う
鉄筋量などを
算定
- 設計許容限界

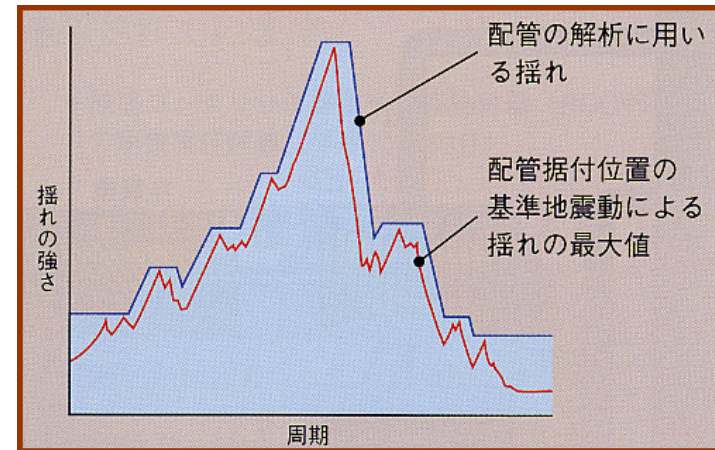
第 1 画面

原子力発電所の耐震設計の流れ(1)



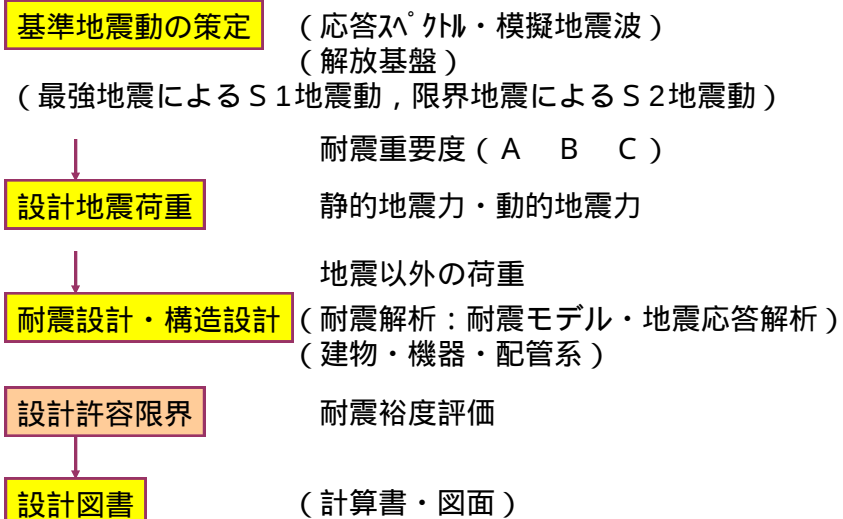
第 2 画面

機器配管の耐震安全性確認(1) (床応答スペクトル)



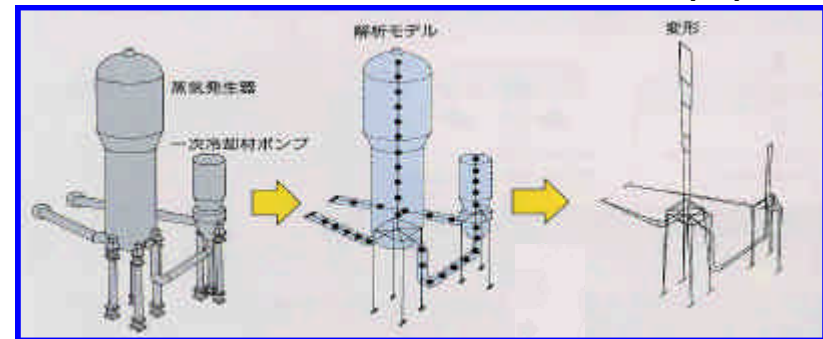
第 1 画面

原子力発電所の耐震設計の流れ(1)



第 2 画面

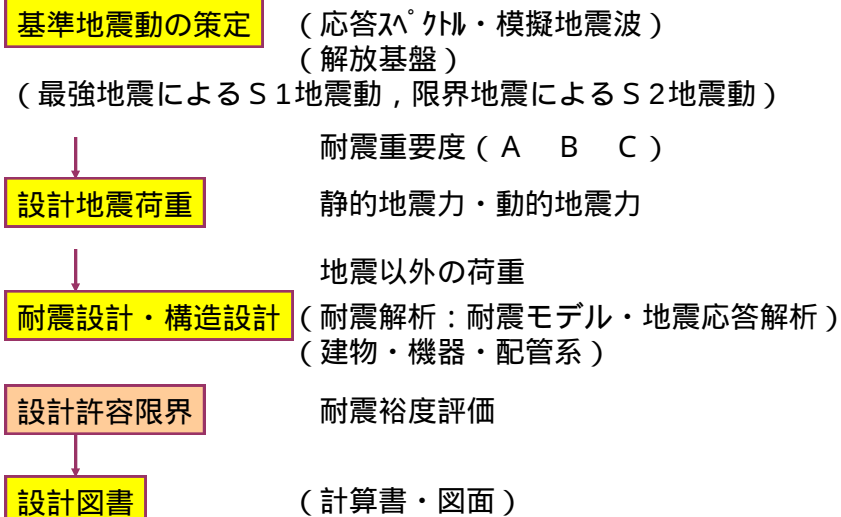
機器配管の耐震安全性確認(2)



機器・配管の耐震解析モデル-振動試験などで検証
応力・変形について設計許容限界による評価
(地震以外の荷重による応力・変形も考慮)

第 1 画面

原子力発電所の耐震設計の流れ(1)



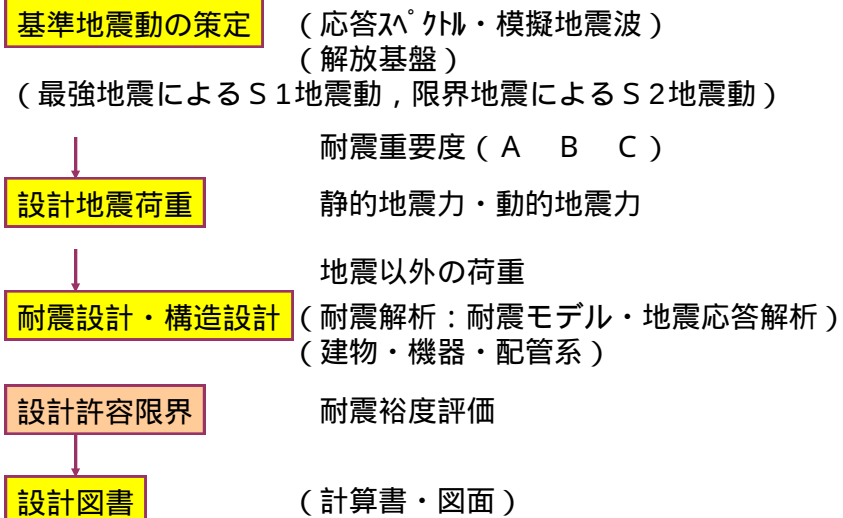
第 2 画面

耐震設計(荷重の組合せと許容限界)

荷重の組合せ	許容限界
運転時	構造材料 - コンクリート強度の 1 / 3、 鉄筋降伏応力の 2 / 3
S1地震時 事故時	- コンクリート強度の 2 / 3、 鉄筋降伏応力
S2地震時	建物の地震復元力特性に変形制限、 応答の制限
事故時 + S1地震	構造材料の終局強度に基づく設計 (崩壊しないことの確認)

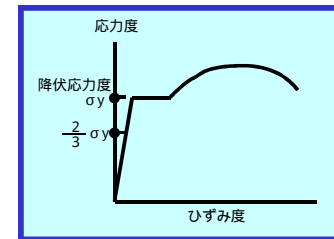
第 1 画面

原子力発電所の耐震設計の流れ(1)

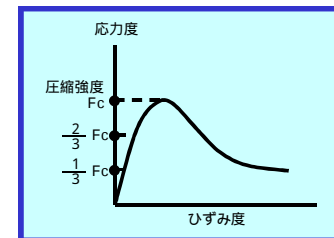


第 2 画面

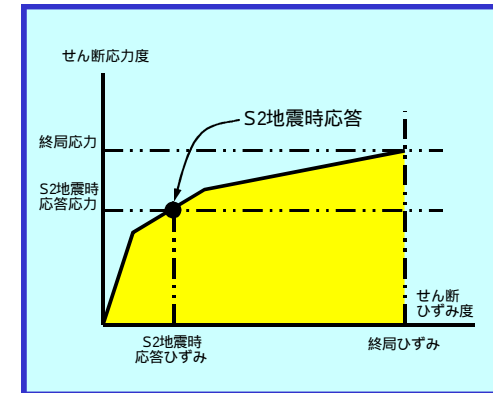
材料・部材特性と許容限界



鉄筋の応力 - ひずみ関係



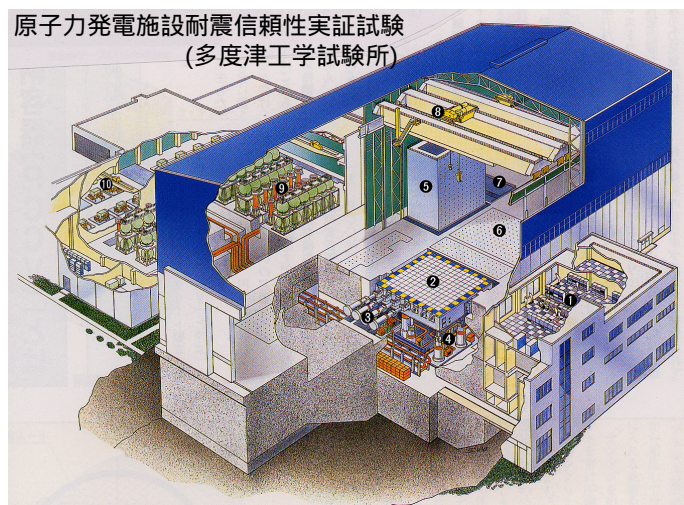
コンクリートの応力 - ひずみ関係



耐震壁のせん断応力 - ひずみ関係

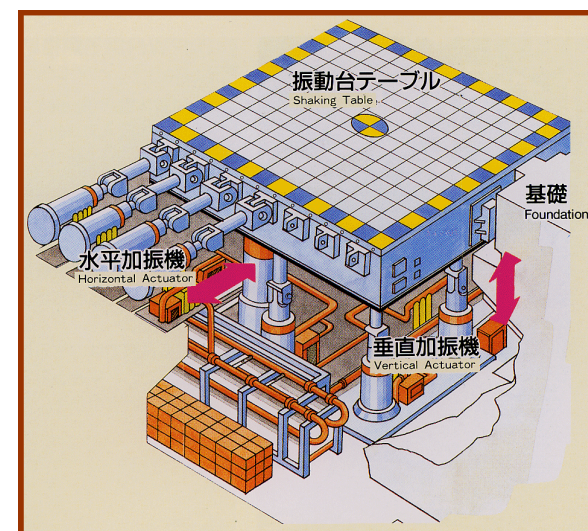
第 1 画面

保有する耐震裕度



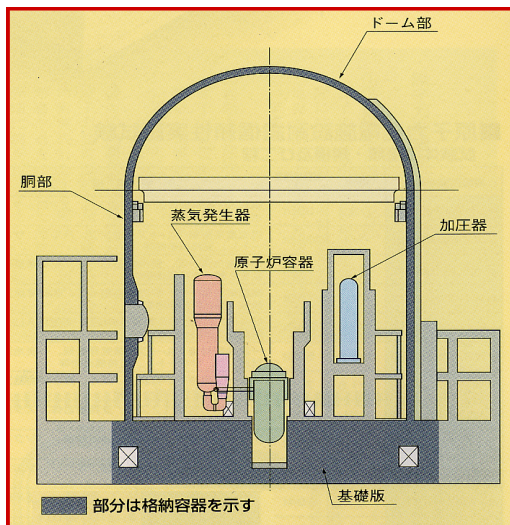
第 2 画面

大型高性能振動台



第 1 画面

プレストレストコンクリート製原子炉格納容器(PCCV)実証試験 構 造 概 要



第 2 画面

コンクリート製原子炉格納容器の 実証試験

■ 試験の概要

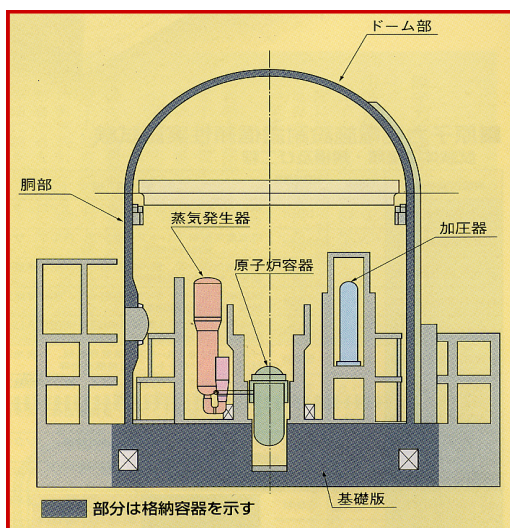
最新のプレストレストコンクリート製原子炉格納容器 (PCCV) の 1/10 縮尺試験体に対して、多度津の大型高性能振動台で破壊までの振動試験を実施
(平成 7 - 8 年)

■ 試験の目的

- (1) 地震に対する構造健全性・ライナー健全性の実証
- (2) 大加振による試験体破壊と裕度評価

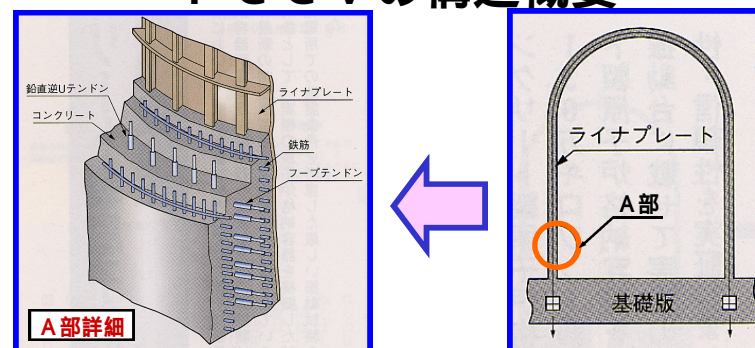
第1画面

プレストレストコンクリート製原子炉格納容器(PCCV)実証試験 構造概要



第2画面

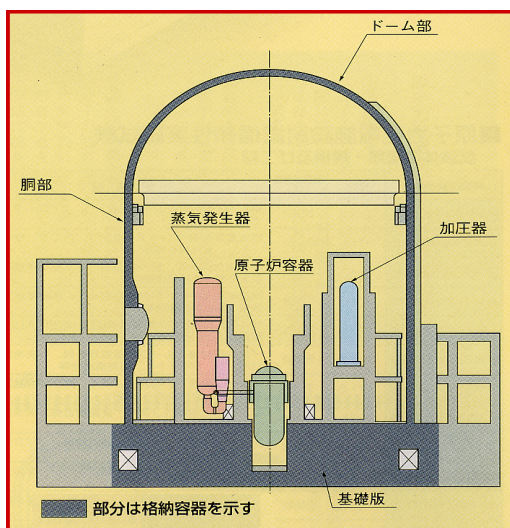
PCCVの構造概要



PCCV : コンクリート中に、テンドン(鋼より線を束ねたもの)を配置し、耐圧・耐震機能を高めたもの
コンクリートの内面に鋼製ライナプレートを設置し、気密性確保

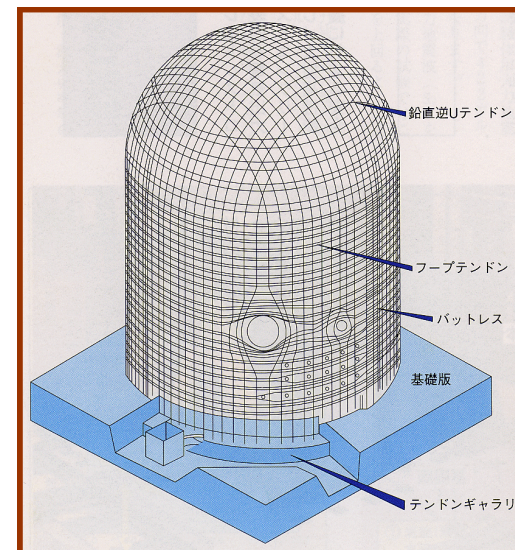
第1画面

プレストコンクリート製原子炉格納容器(PCCV)実証試験 構造概要



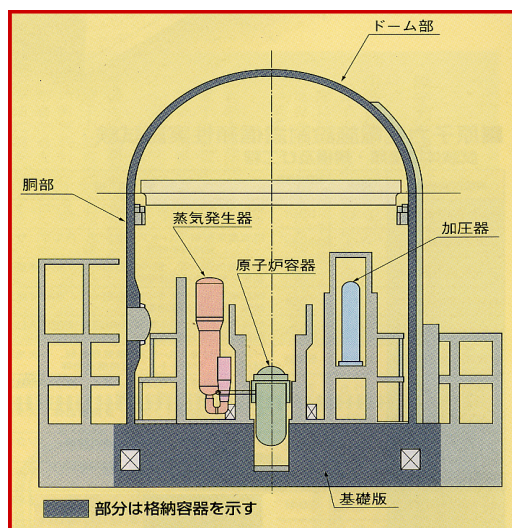
第2画面

PCCVのテンドン配置例



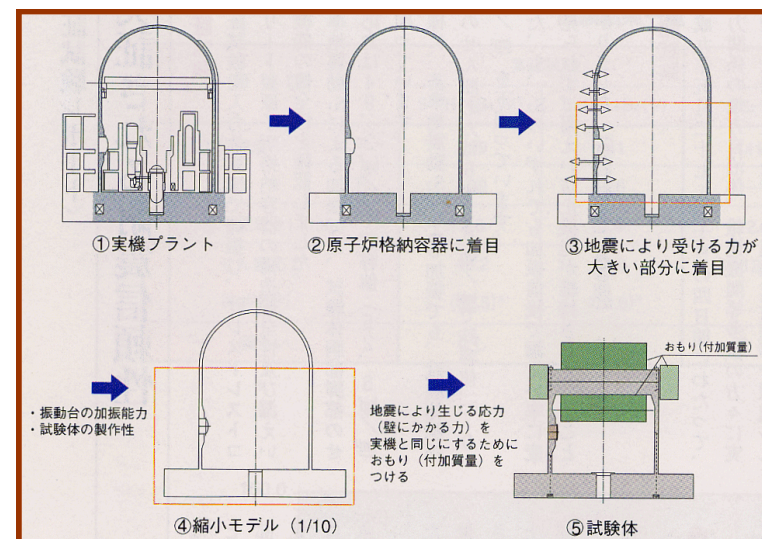
第1画面

プレストレストコンクリート製原子炉格納容器(PCCV)実証試験 構造概要



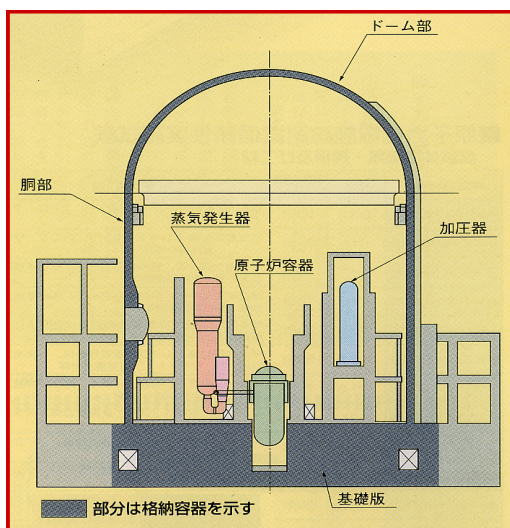
第2画面

試験体形状の決定



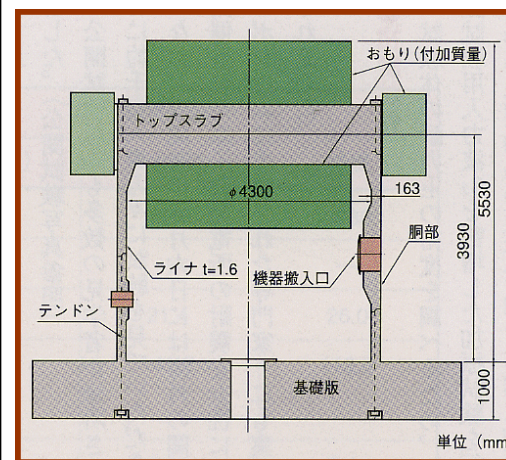
第1画面

プレストコンクリート製原子炉格納容器(PCCV)実証試験 構造概要



第2画面

PCCV実証試験体形状・寸法 (縮尺: 1/10)

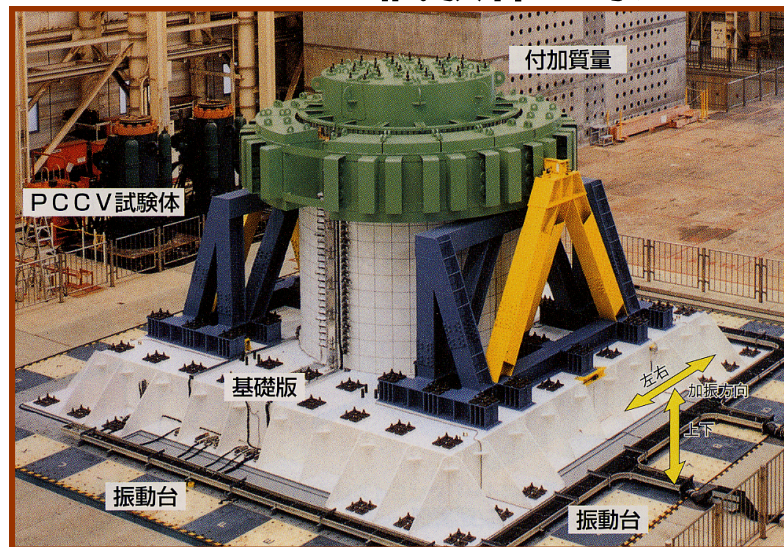


試験体重量

胴部・トップスラブ	63 ton
おもり(付加質量)	434 ton
基礎版 等	260 ton
合 計	757 ton

第 1 画面

PCCV試験体全景



第 2 画面

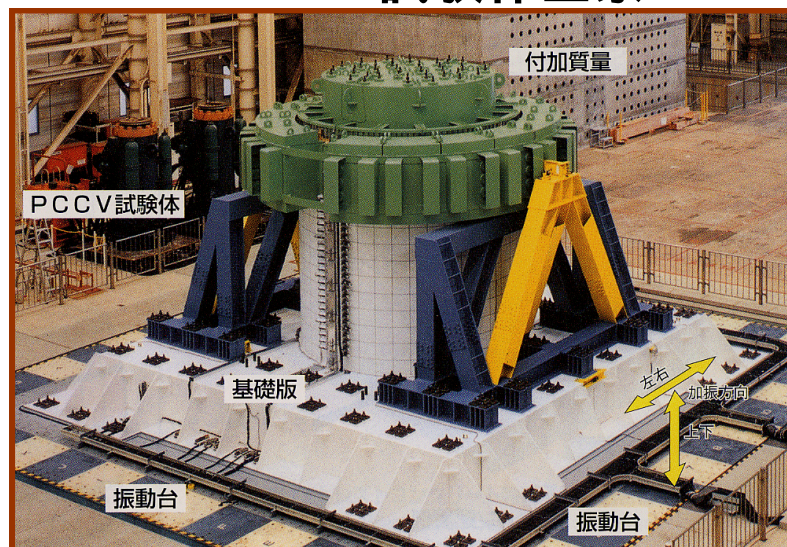
加振条件

ステップ	加振試験内容	ステップ	加振試験内容
1	$S_1 H$	8	$2 S_2 H$
2	$S_1 V$	9	$3 S_2 H$
3	$S_1 H + V$	10	$2.7 S_2 H$
4	$S_2 H$	11	$3.3 S_2 H$
5	$S_2 V$	12	$4 S_2 H$
6	$S_2 H + V$	13	$3.9 S_2 H$
公開試験	$S_2 H + V$	14	$5 S_2 H$
7	$P d + S_1 H + V$		

(H : 水平 V : 上下 P d : 内圧)

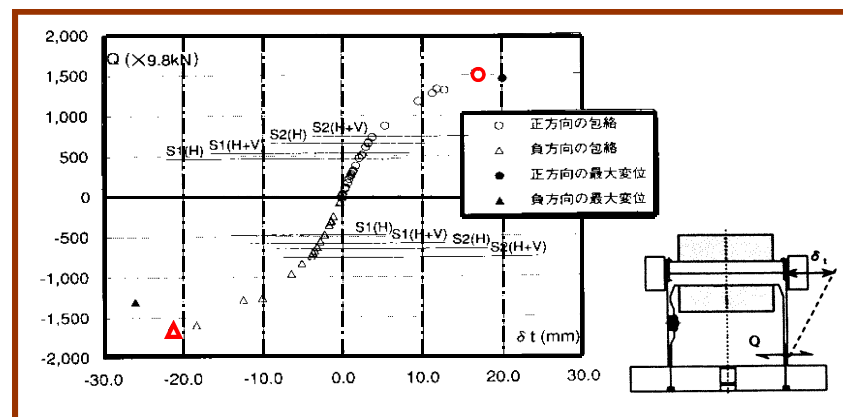
第1画面

PCCV試験体全景



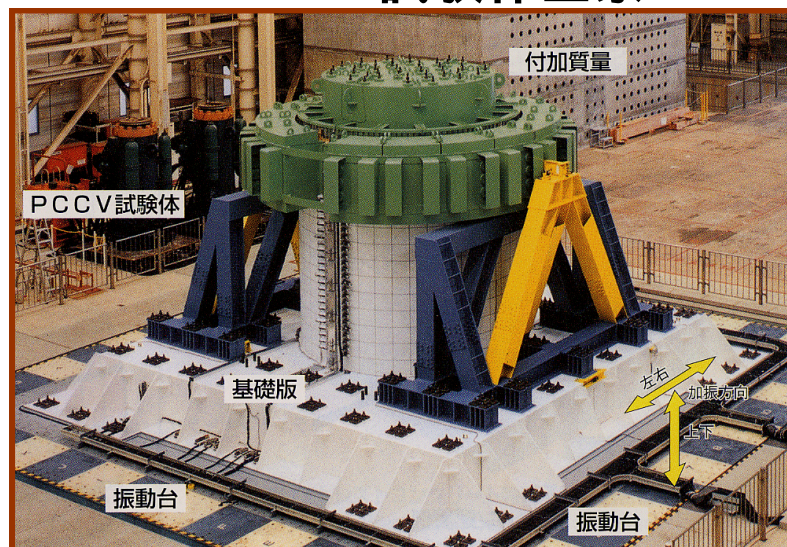
第2画面

試験結果 (水平力 Q と水平変形 δ の関係)



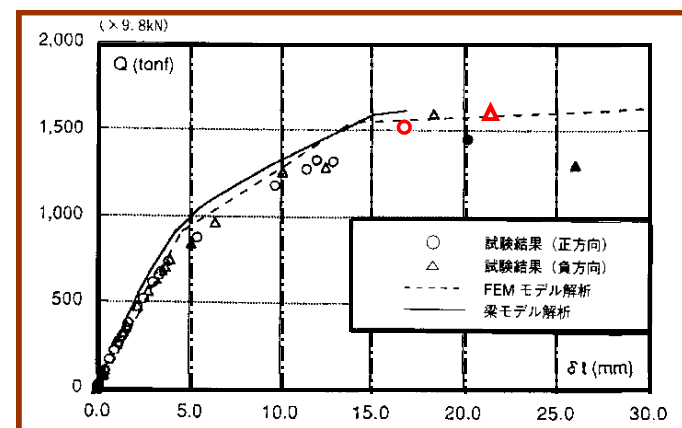
第 1 画面

PCCV試験体全景



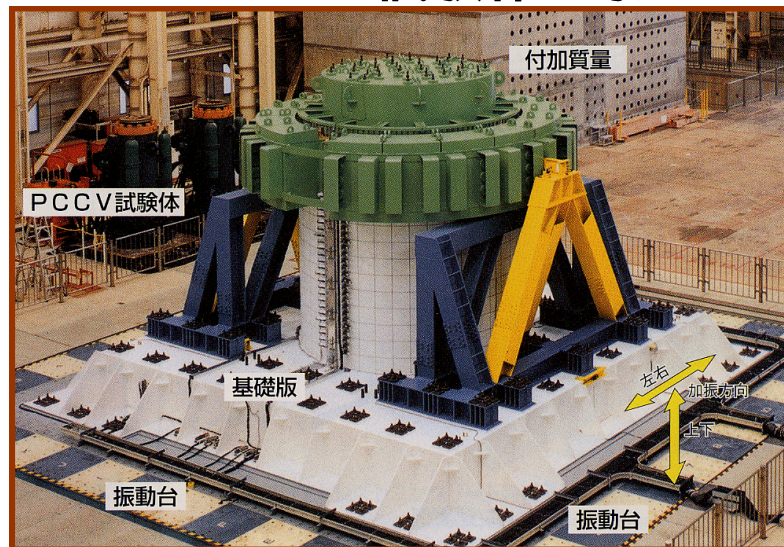
第 2 画面

解析評価 (Q - δ 関係の比較)



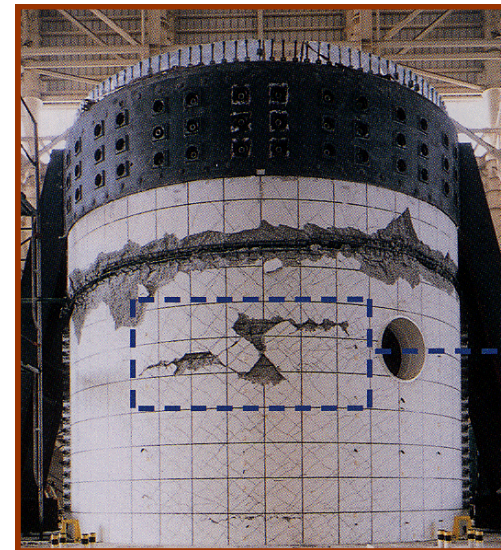
第 1 画面

PCCV試験体全景



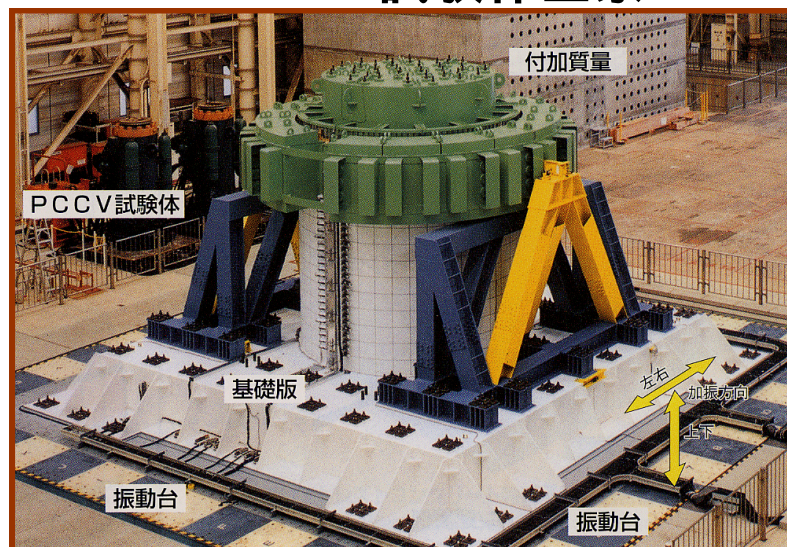
第 2 画面

試験体破壊状況



第 1 画面

PCCV試験体全景



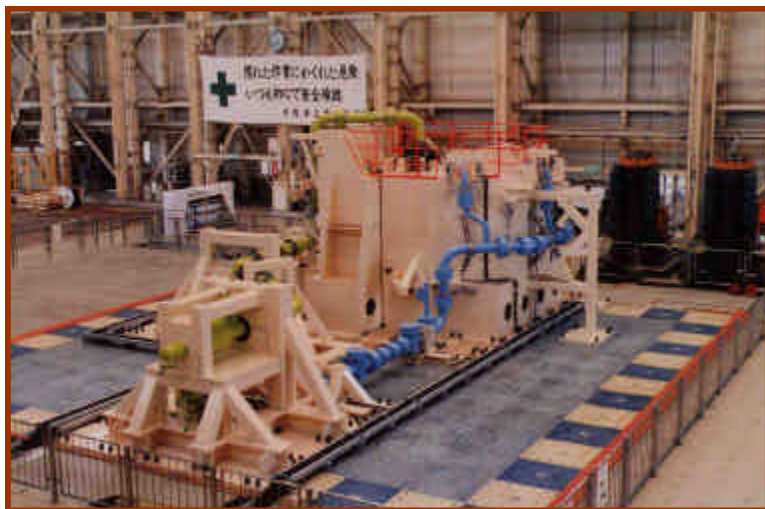
第 2 画面

PCCVの耐震裕度

- S_2 の 2 倍の加振までは構造健全性保持
- αS_2 加振の結果、耐震裕度は S_2 地震動に対して 5 ~ 6 倍保有と評価

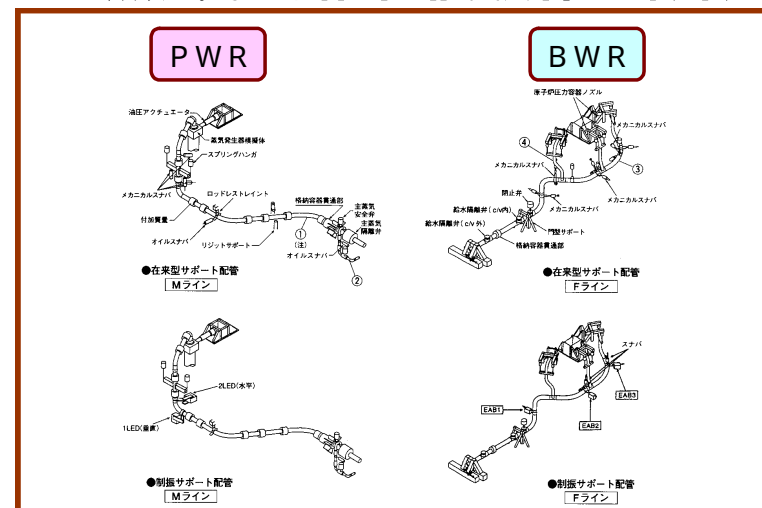
第 1 画面

機器設備の実証試験



第2画面

主蒸気系等配管試験体の概観



第 1 画面

機器・配管実証試験体の概要

項目 試験体名称	実機重量 ($\times 10^3$ kg)	縮 尺	重 量 ($\times 10^3$ kg)	概略図	項目 試験体名称	実機重量 ($\times 10^3$ kg)	縮 尺	重 量 ($\times 10^3$ kg)	概略図
原子炉格納容器 (PWR)	約3.800	1/3.7	350 (含支持構造物)		原子炉格納容器 (BWR)	約3.500	1/3.2	350 (含支持構造物)	
炉内構造物 (PWR)	約500	1/1	555 (含支持構造物)		炉内構造物 (BWR)	約500	1/1	750 (含支持構造物)	
一次冷却設備 (PWR)	約1.000	1/2.5	525 (含支持構造物)		再循環系配管 (BWR)	約800	1/1	665 (含支持構造物)	
原子炉容器 (PWR)	約850	1/1.5	700 (含支持構造物)		原子炉压力容器 (BWR)	約800	1/2	600 (含支持構造物)	

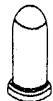
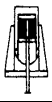
第 2 画面

機器・配管実証試験における最大加振条件

試験体名称	最大加振条件(裕度検討)
PWR 原子炉格納容器	$1.5 \times S_2$
PWR 炉内構造物	$1.5 \times S_2$
PWR 一次冷却設備	水平 ; $2.0 \times S_2$ 上下 ; $1.5 \times S_2$
PWR 原子炉容器	$2.0 \times S_2$
BWR 原子炉格納容器	$1.4 \times S_2$
BWR 炉内構造物	$1.7 \times S_2$
BWR 再循環系配管	$1.1 \times S_2$
BWR 原子炉压力容器	$1.7 \times S_2$

第 1 画面

機器・配管実証試験体の概要

項目 試験体名称	実機重量 ($\times 10^3$ kg)	縮 尺	重 量 ($\times 10^3$ kg)	概略図	項目 試験体名称	実機重量 ($\times 10^3$ kg)	縮 尺	重 量 ($\times 10^3$ kg)	概略図
原子炉格納容器 (PWR)	約3.800	1/3.7	350 (含支持構造物)		原子炉格納容器 (BWR)	約3.500	1/3.2	350 (含支持構造物)	
炉内構造物 (PWR)	約500	1/1	555 (含支持構造物)		炉内構造物 (BWR)	約500	1/1	750 (含支持構造物)	
一次冷却設備 (PWR)	約1.000	1/2.5	525 (含支持構造物)		再循環系配管 (BWR)	約800	1/1	665 (含支持構造物)	
原子炉容器 (PWR)	約850	1/1.5	700 (含支持構造物)		原子炉压力容器 (BWR)	約800	1/2	600 (含支持構造物)	

第 2 画面

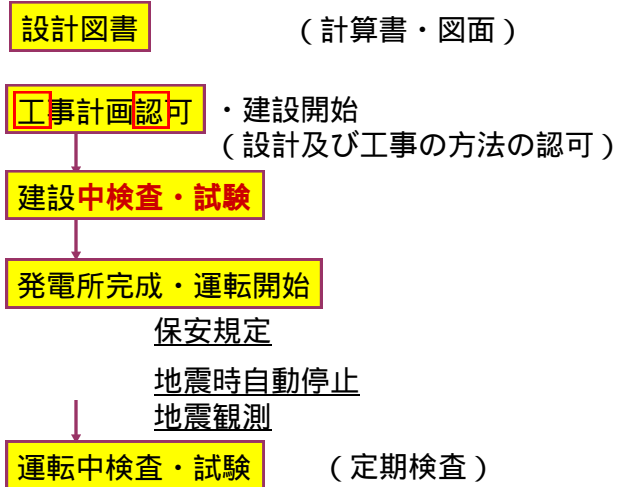
α S2加振レベルと地震規模M
(震央域最大加速度(ガル) = $9M^2$)

1.0 S ₂	380ガル	—	M6.5
1.1 S ₂	415ガル	—	M6.8
1.2 S ₂	455ガル	—	M7.1
1.5 S ₂	570ガル	—	M7.9
⋮	⋮		⋮
⋮	⋮		⋮
2.0 S ₂	760	—	M9.4

第 1 画面

原子力発電所の耐震設計の流れ(2)

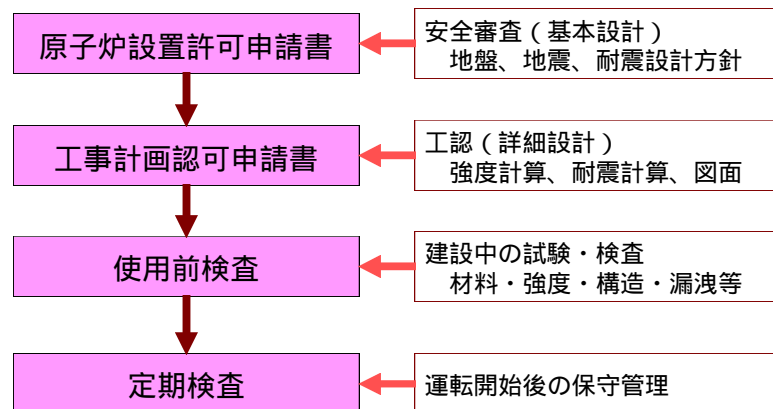
(運転・検査・試験)



第 2 画面

第 1 画面

耐震性に関する許認可



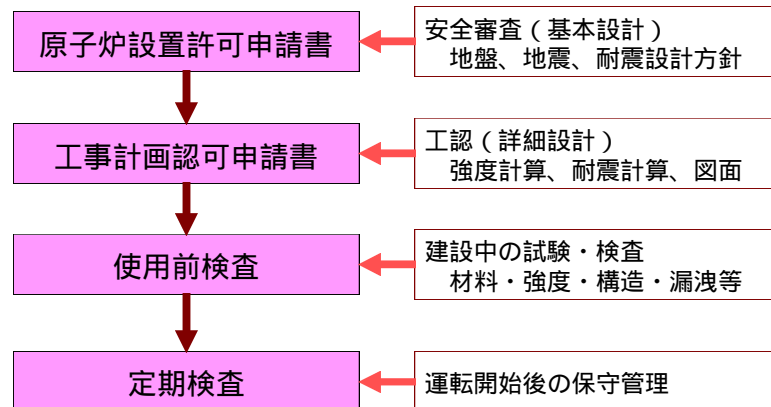
第 2 画面

建設中の検査内容

- 構造（材料、寸法）、強度、漏えいの検査・試験
- 岩盤検査
- 性能試験（新型炉の場合：原子炉建屋の振動試験）

第 1 画面

耐震性に関する許認可



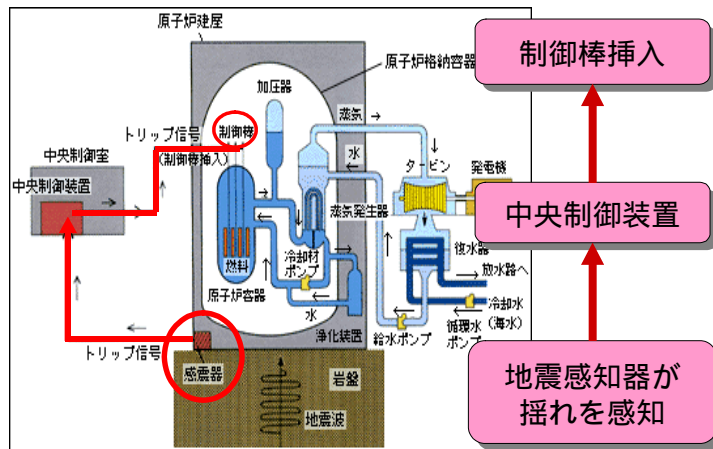
第 2 画面

完成後の原子力施設に対する試験

- 振動試験** - 原子炉建屋に加振機を設置
建物の振動特性（固有周期、減衰、振動性状 - モードなど）を地震計により確認
同時に設備にも地震計を設置し確認
- 地震観測** - 原子炉建屋の 3 箇所程度強震計を設置
地震による建物の応答を測定し、振動性状を確認
観測記録のシミュレーション解析などから耐震解析の妥当性を確認
観測結果などは建築学会などの場で発表

第1画面

地震時の自動停止機能



第2画面

地震時の自動停止装置

- 速やかに原子炉を自動停止する装置
- 保安規定
原子炉スクラム(トリップ)設定値明記
地震加速度大
水平〇〇ガル 垂直□□ガル
- 福井県内の原子力発電所では同一敷地内では設定値を低い値に統一する

第 1 画面

ま と め

- 指針などに基づく原子力発電所の耐震設計は十分な裕度を保有していることが耐震実証試験などで確かめられている。
- 運転期間においても試験・検査により耐震性に関する機能の維持について確かめられている。

第 2 画面