

「原子力発電所の地震安全の基本原則に関わる研究委員会」 成果報告会

～「地震安全の原則」の提案と具体化に向けて～

性能確保のための対地震ハザード設計への適用（２） 対地震ハザード設計体系

日本地震工学会 原子力発電所の地震安全の基本原則に関わる研究委員会
活用WG

- 藤本 滋(神奈川大), 高田 毅士(東大), 成宮 祥介(JANSI),
蔵増 真志(中国電), 伊神 和忠(三菱重工), 美原 義徳(鹿島),
樋口 智一(東芝), 飯島 唯司(日立)



1

背景・目的

1. 背景

- ①原子力発電所の継続的安全性向上のためには，福島第一原子力発電所の事故の経験や新たな知見を踏まえ，様々な安全性向上活動を総合的に進める必要がある。
- ②日本においては，地震は不可避の自然ハザードであることから，原子力発電所の地震安全確保は最重要課題である。
- ③日本地震工学会や日本原子力学会において地震安全に関する基本的考え方に関する議論が行われ，様々な地震事象に対処できる安全確保体系の構築の必要性が指摘されているが，具体的な設計体系までの議論はなされていない。
- ④深層防護とリスクの概念に基づいた新しい地震安全のための原則について，日本地震工学会「原子力発電所の地震安全の基本原則に関わる研究委員会」が日本原子力学会と協働で検討を行ってきた。

2. 目的

地震安全の原則に基づき，これまでの知見と整合性が取れる原子力発電所の土木構築物，建築物や発電設備システムなどの耐震設計体系を提案

⇒ **深層防護とリスクの概念を取り込んだ耐震設計体系の構築**

2

耐震設計体系の構築の基本的考え方

1. 地震ハザード（地震動（震源・規模など）、地震随件事象（余震・津波・断層変位・斜面崩壊など））の規模は**不確か（想定を越える事象）**
2. 地震ハザードおよび火災・溢水・浸水・暴風雨などが**重畳**（同時・事後）する可能性
3. 設備、設備集合（システム）の耐力は**確率量**



☆発電所システムの耐震設計体系の考え方

- ⇒ 不確かさ対処のためには**深層防護**に基づいた方策・設計法が有効
- ⇒ 確率論に基づく**リスク**の考えの取り込み（想定を越える地震も想定）
- ⇒ 従来の決定論的設計法に加えて**リスク評価法**を活用
- ⇒ 安全目標から設定される**性能目標**を満足
- ⇒ 多重性・多様性・独立性を考慮した**設備集合（システム）の最適化**

3

耐震設計体系における深層防護の考え方

1. 基本概念

深層防護レベルは、地震時のプラント状況や設備損傷状況を想定して、IAEA 深層防護レベル（内的事象）の考え方と対応させると共に、新規制基準での要求事項を踏まえて整理

2. 整理のための基本的考え方

①**設備の損傷・機能喪失は、内的事象の場合と地震による場合とは、想定すべき事象・発生順序が異なる。**

⇒ 内的事象で想定した共通要因故障の考え方とは同一とは限らない

⇒ 同じ設計思想で設計された設備であれば複数設備が同時損傷する可能性

②**深層防護の各レベルの目的や位置づけは内的事象と基本的に同じとする**

③**深層防護レベルは、従来の耐震設計の考え方に基づいて地震時の損傷状況を想定して、内的事象の考え方と対応するように整理**

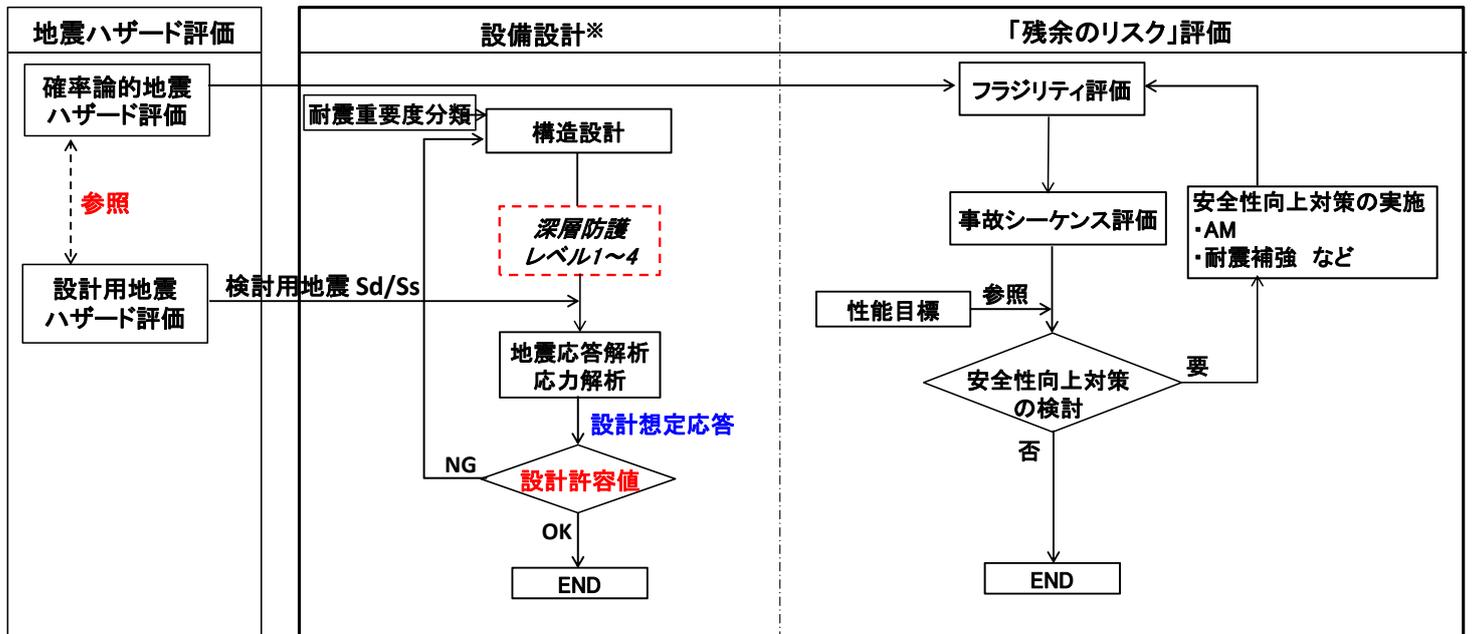
④**深層防護の各レベル間の境界は、地震事象のレベルと対応させる**

4

表1 内的事象及び地震ハザードに対する深層防護レベルと供用性の考え方

深層防護レベル	事象	地震ハザードに対する深層防護				供用性確保の考え方			
		内的事象に対する深層防護 (IAEA, INSAG-10)				当該レベルの機能の喪失時に生じる状態	段階	目的	対応策
		目的	考え方	対応策	被爆上の考え方				
1	地震	異常運転や故障の防止	運転継続を求められる地震に対して必要な信頼性を確保するための要求性能を満足するように設備を設計	供用性検討地震による運転継続に必要な常用設備の対地震ハザード設計	地震による常用設備の損傷または通常運転の逸脱	供用性 I	発電を継続できる	供用性検討地震による運転継続に必要な設備(常用設備)の対地震ハザード設計	
	内的	異常運転や故障の防止	保守的設計及び建設・運転における高い品質	規制による放出に関する運転制御					
2	地震	地震の検知及びプラント設備の破損防止	地震動を検知し、地震初期に確実に原子炉を「止める」機能を確保し、損傷箇所の復旧を除けば、格段の修復なしに通常運転に復帰できる。	安全保護回路(安全保護系設備)の設置(地震加速度大による原子炉トリップを含む)	プラントの早期復旧困難	供用性 II	地震後に損傷箇所の復旧を除けば、格段の修復なしに通常運転に復帰できる。	・供用性検討地震による安全上重要な設備の対地震ハザード設計 ・安全保護回路(安全保護系設備)の設置(地震加速度大による原子炉トリップを含む。)	
	内的	故障の検知及び異常運転の制御	制御、制限・防護系及びその他のサーベイランス特性の確認	規制による放出に関する運転制限					
3	地震	設計基準地震動内の制御(安全系設備の破損防止)	地震による炉心損傷を防止するために、安全上重要な施設が必要な信頼性を確保するための要求性能を満足するように設計する。また、安全上重要な設備の多重性、多様性及び独立性を確保する。	・安全性検討地震による安全上重要な設備の耐震設計 ・安全上重要な設備の多重性、多様性及び独立性を確保 ・運転員による操作	設計基準事象の逸脱(著しい炉心損傷を含む)				
	内的	設計基準内への事故の制御	工学的安全施設及び事故時手順	敷地外への被ばく上の影響はないかわずかに留まる					
4	地震	事故の進展防止及びSAの影響緩和を含む、過酷なプラント状態の制御	炉心損傷に至るおそれがある場合もしくは炉心損傷に至った場合に、環境への放射性物質の放出を極力抑制若しくは放出までの時間余裕を確保するための手段を確保する。	・安全性検討地震による重大事故等対処施設(可搬型含む)の対地震ハザード設計 ・重大事故等対処施設の多重性、多様性及び独立性を確保 ・運転員による操作	放射性物質の大規模放出等				
	内的	事故の進展防止及びSAの影響緩和を含む、過酷なプラント状態の制御	補完的手段及び格納容器の防護を含めたアクシデントマネジメント	地域と時間に関する制限された被ばく回避手段					
5	地震	放射性物質の大規模な放出による放射線影響の緩和	緊急時の避難等	住民避難等への支援、協力					
	内的	放射性物質の大規模な放出による放射線影響の緩和	サイト外の緊急時対応	敷地外への被ばく回避手段が必要				5	

深層防護(耐震)と現行の耐震設計体系との関係

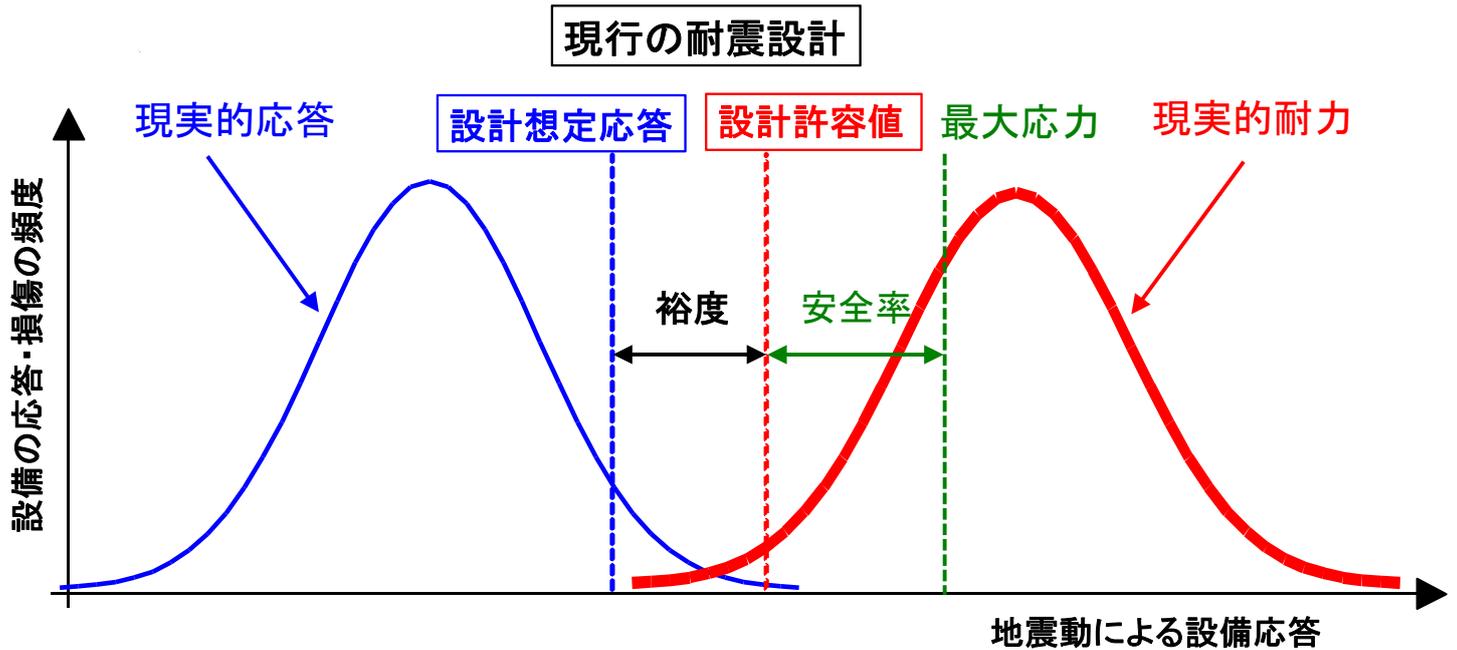


※現状の設計体系では、深層防護レベルに限らず設備単体としての仕様規定により設計している。

- ① 深層防護レベルに関係なく設備単体としての仕様規定により設計
- ② 設計に地震ハザード(S_g など最大値想定)の不確実性が考慮されず(見直す度に対策)
- ③ 決定論的地震動評価と確率論的地震ハザード評価は、SSC設計・評価において分離
- ④ 設備設計と設備集合(システム)のPRA評価との対応関係が明確でない

図1 現行の原子力発電所の耐震設計体系

地震ハザードに対する設備の信頼性の考え方(1)



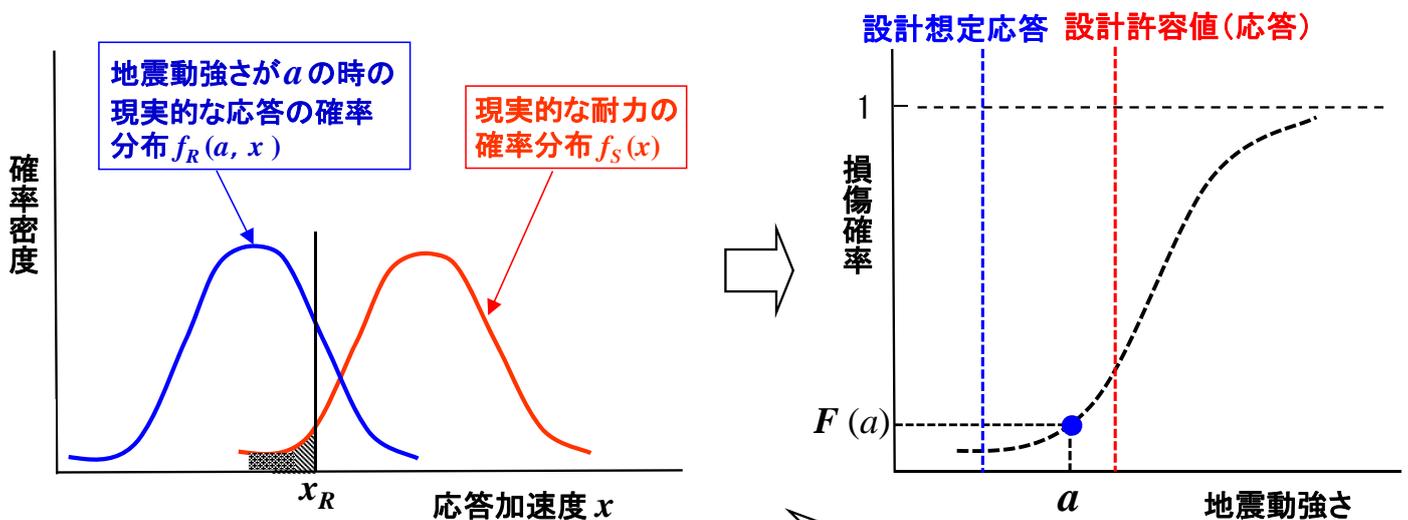
- 設備が設計許容値を超えると設計見直し, 対策・耐震強化
- 設備の応答が設計許容値を超えても実際には破損しない(安全率大きい)
- 設備の現実的な応答, 設備の現実的な損傷は確率現象(不確実性)

図2 設備の設計応答・設計許容値と現実的な応答・耐力との関係

地震ハザードに対する設備の信頼性の考え方(2)

設備の損傷確率(フラジリティ)の考え方1*

損傷確率 $F(a)$ を, 地震動強さがある値 a のときの現実的応答 $f_R(a, x_R)$ が, 現実的耐力 $f_S(x_R)$ を越える条件付損傷確率として算定



地震動強さ a に対する損傷確率

$$F(a) = \int_0^{\infty} f_R(a, x_R) \left(\int_0^{x_R} f_S(x) dx \right) dx_R$$

設備応答が x_R である確率 設備(耐力)が応答 x_R 以下で損傷する確率

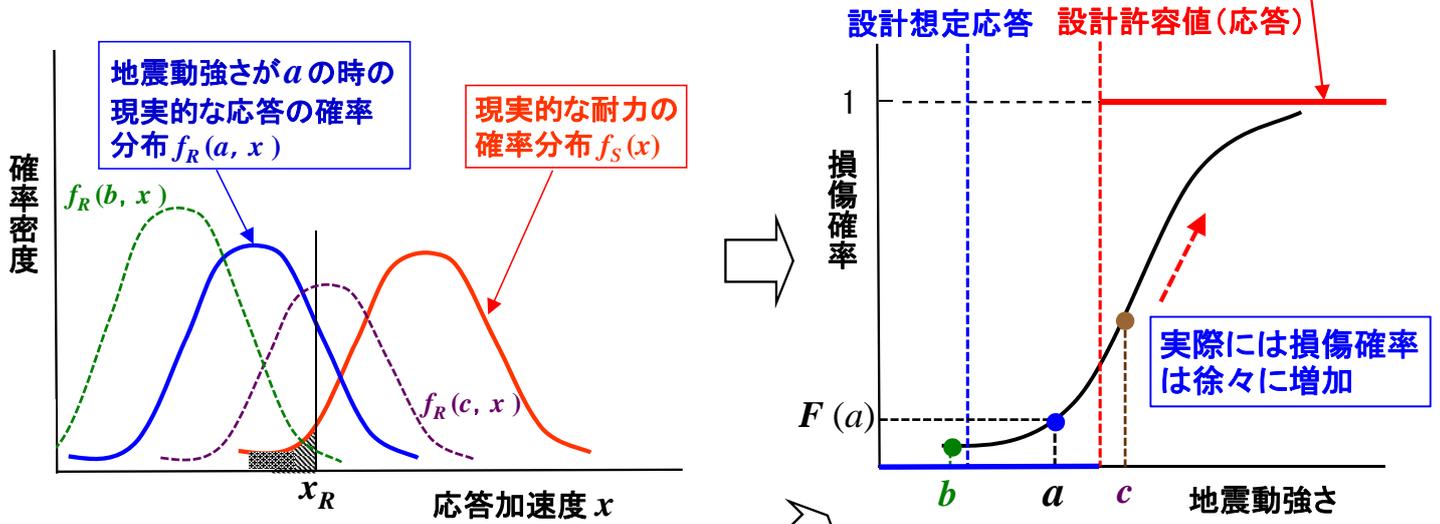
* 蛭沢勝三, 都市大・早大共同大学院 原子力耐震安全工学特論講義資料“地盤・土木・建屋・機器フラジリティ評価と耐震余裕評価”, 2014.

地震ハザードに対する設備の信頼性の考え方(3)

設備の損傷確率(フレンジティ)の考え方2*

損傷確率 $F(a)$ を、地震動強さがある値 a のときの現実的応答 $f_R(a, x_R)$ が、現実的耐力 $f_S(x_R)$ を越える条件付損傷確率として算定

現行耐震設計=損傷確率は1



地震動強さ a に対する損傷確率

a が大きくなると損傷確率 $F(a)$ は増加

$$F(a) = \int_0^{\infty} f_R(a, x_R) \left(\int_0^{x_R} f_S(x) dx \right) dx_R$$

設備応答が x_R である確率 設備(耐力)が応答 x_R 以下で損傷する確率

* 蛭沢勝三, 都市大・早大共同大学院 原子力耐震安全工学特論講義資料“地盤・土木・建屋・機器フレンジティ評価と耐震余裕評価”, 2014. 9

深層防護に基づく地震波ハザードに対する設備集合(システム)の信頼性の考え方(1)

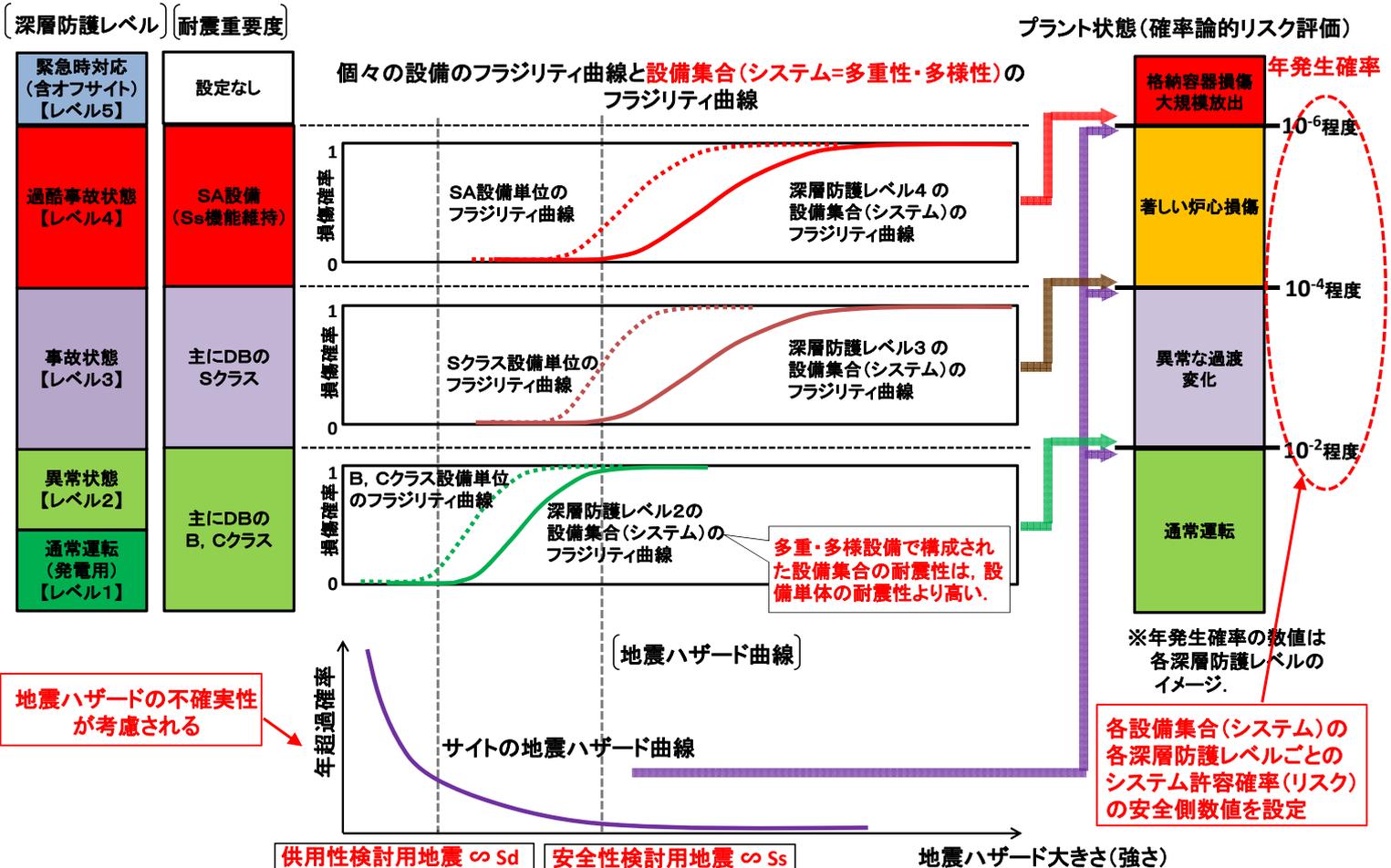


図3 深層防護に基づく設備集合(システム)の信頼性の考え方

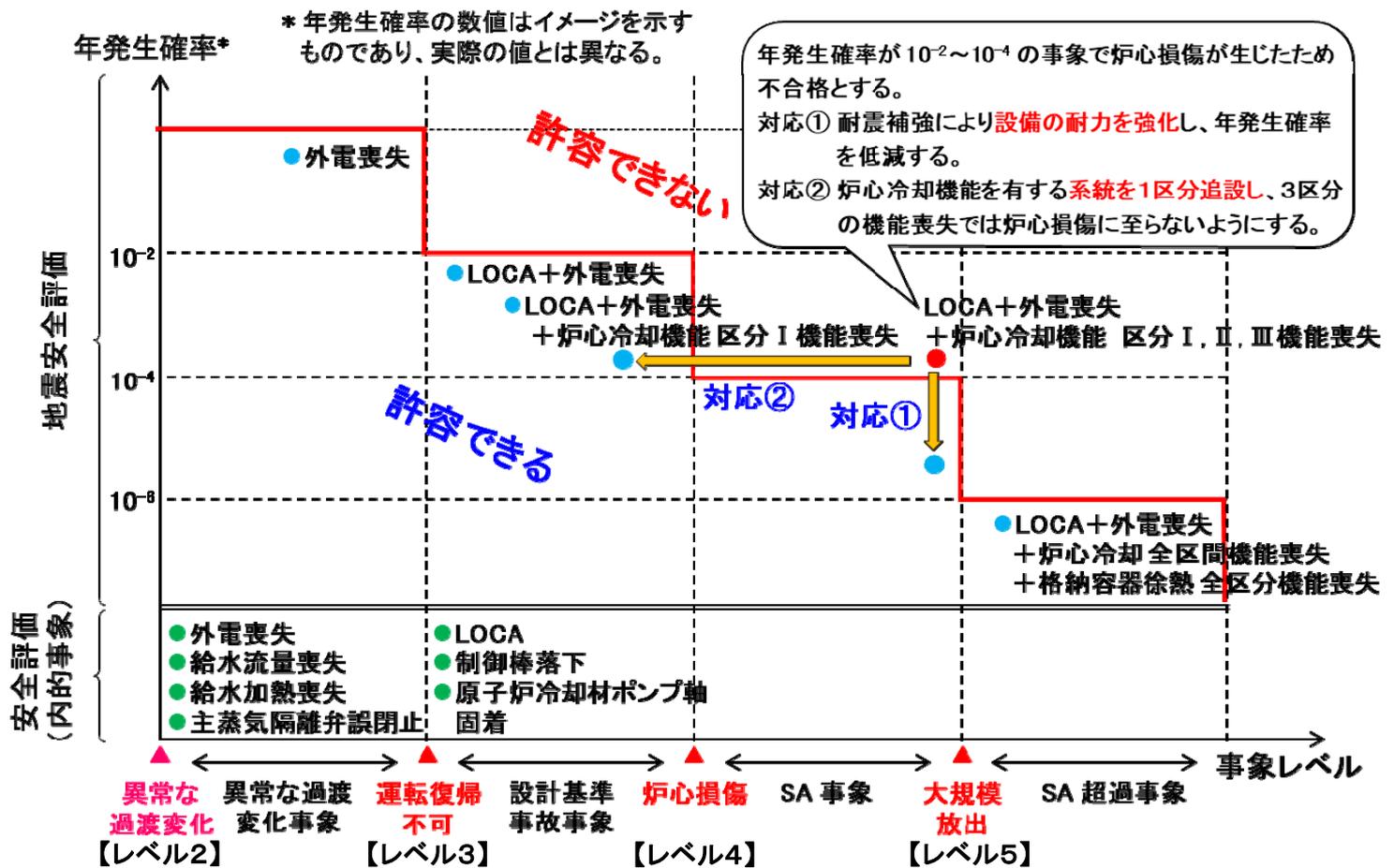
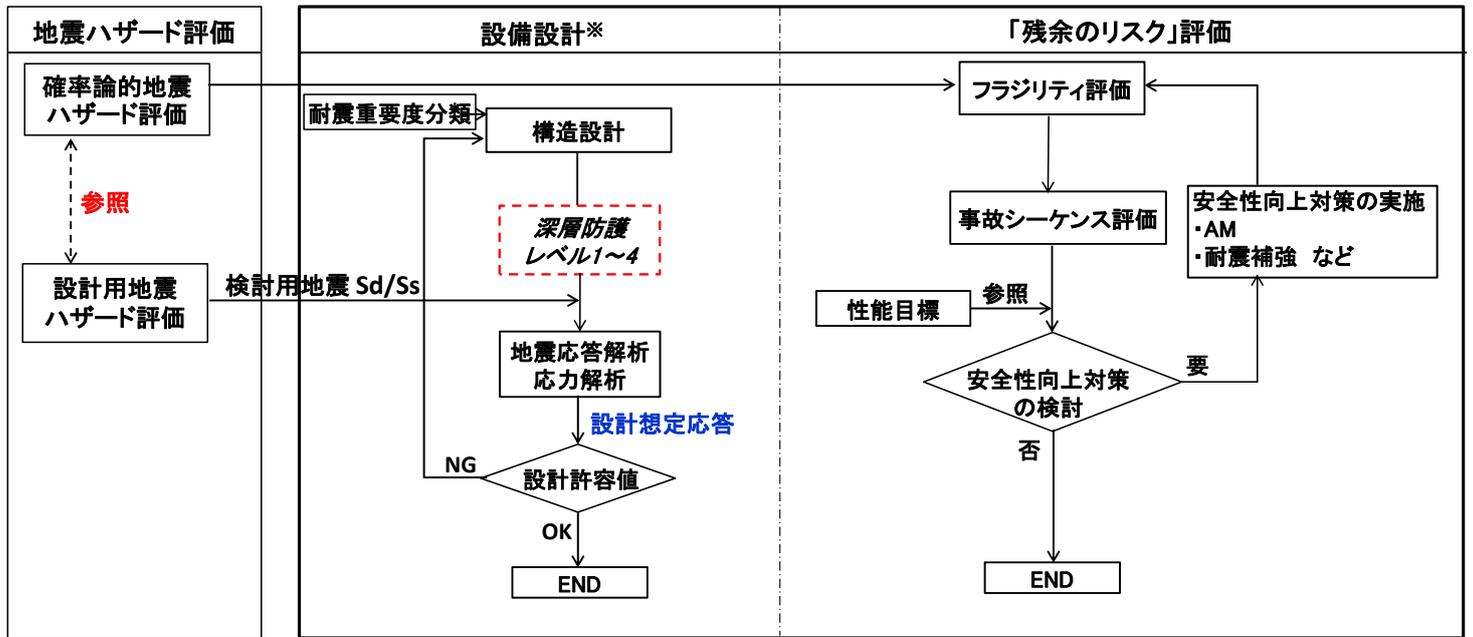


図4 耐震安全評価と設備集合(システム)最適化の考え方(例)

深層防護とリスクの概念に基づいた耐震設計体系(1)

- ①設備の設計 (現行の耐震設計) に加え、深層防護とリスク概念を考慮して **設備集合(システム)** に対して安全評価手法 (PRA等) を用いた設計を追加
- ②設備の耐震設計
 - ・地震動は、確率論的地震ハザード評価に基づき要求性能に応じた地震動を設定 (**供用性検討用地震** $\sim S_d$, **安全性検討用地震** $\sim S_s$)
 - ・この地震動に対して要求性能に応じた許容値で評価・判定
- ③深層防護レベル3, 4に該当する設備
 - ・ **設備集合(システム)としても設計・評価**
 - ・フラジリティ評価, 事故シーケンス評価より **システム目標(許容リスク: 許容確率)** に照らした判定からなる地震安全評価を実施
 - ・システム再検討の場合は, **機能強化・多重性・多様性を考慮**した緩和系設備の組み合わせ, 運用面での対策などにより **システムの最適化**を図る
 - ・地震安全評価の結果に応じて, 設備設計における許容値を変更することも実施 (設備設計の最適化)

深層防護とリスクの概念に基づいた耐震設計体系(2)

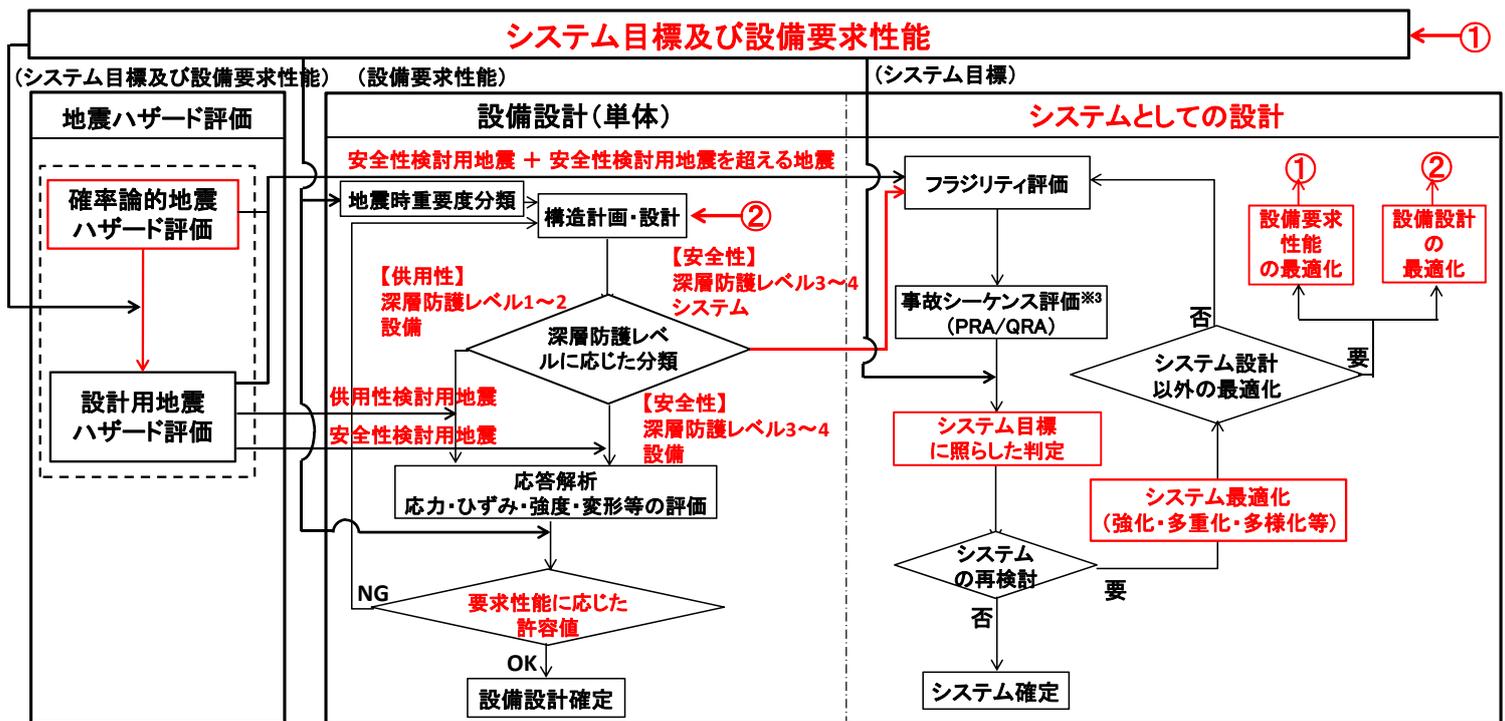


※現状の設計体系では、深層防護レベルに限らず設備単体としての仕様規定により設計している。

- ① 深層防護レベルに関係なく設備単体としての仕様規定により設計
- ② 設計に地震ハザード (S_g など最大値想定) の不確実性が考慮されず (見直す度に対策)
- ③ 決定論的地震動評価と確率論的地震ハザード評価は, SSC設計・評価において分離
- ④ 設備設計と設備集合(システム)のPRA評価との対応関係が明確でない

図1 現行の原子力発電所の耐震設計体系

深層防護とリスクの概念に基づいた耐震設計体系(3)



*深層防護レベル3~4に関する設備について、設備単体としての仕様が予め決まっているものでも、多様性及び損傷の相関を踏まえた多重性を考慮したシステムとして考え、システムとしての目標を満足するかの評価を行う。

図5 地震ハザードに対する原子力発電所の性能確保のための設計体系

深層防護とリスクの概念に基づいた耐震設計体系(4)

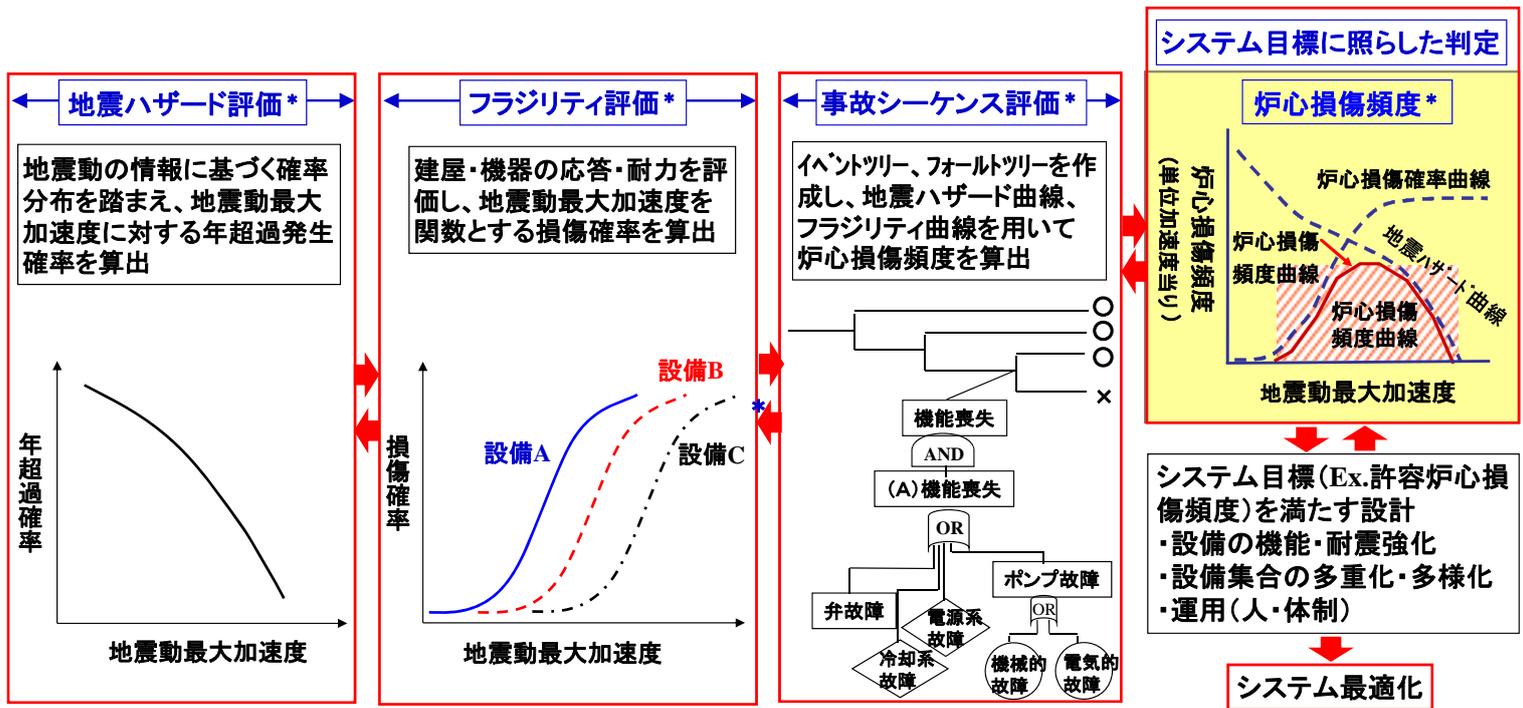
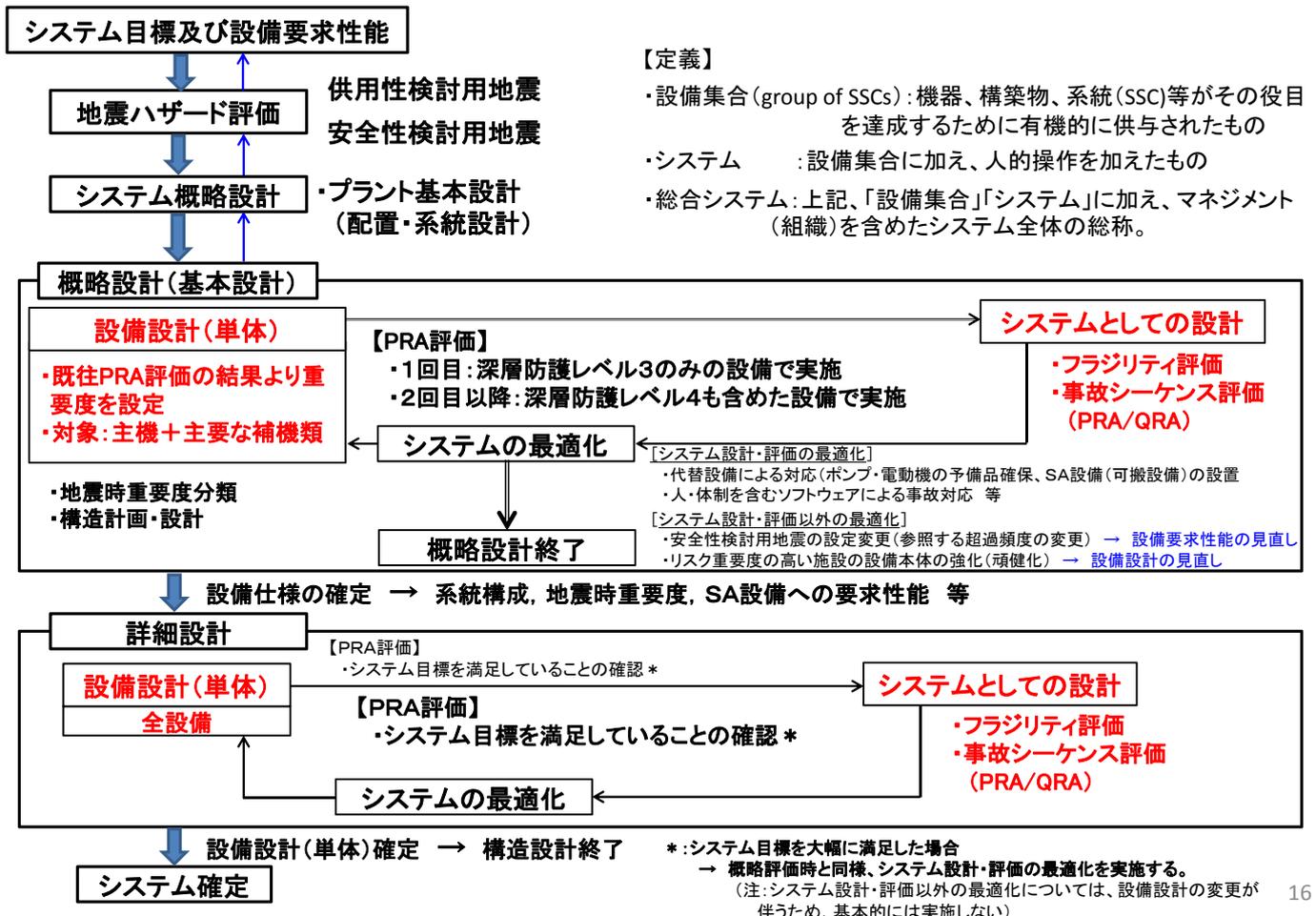


図6 システムとしての設計の考え方

* 蛭沢勝三, 都市大・早大共同大学院 原子力耐震安全工学特論講義資料“地盤・土木・建屋・機器fragility 評価と耐震余裕評価”, 2014.

地震ハザードに対する原子力発電所の性能確保のための設計手順(1)

★地震ハザード評価から設備設計確定までの流れ



—システム目標—

【システム目標及び設備要求性能の設定】

◆システム目標の設定 : 深層防護に基づく耐震安全性の考え方を踏まえたリスクの概念を考慮した目標を設定

<設定例>

- ・供用性に係るシステム目標 : 「供用性検討用地震」に対してプラントが停止せず発電を継続すること。もしくは、早期に再開出来ること。
- ・安全性に係るシステム目標 : 炉心損傷頻度(もしくは、格納容器破損頻度)を基準。

◆設備要求性能 : システム目標を満足するために、設備単体に要求される設備要求性能を設定

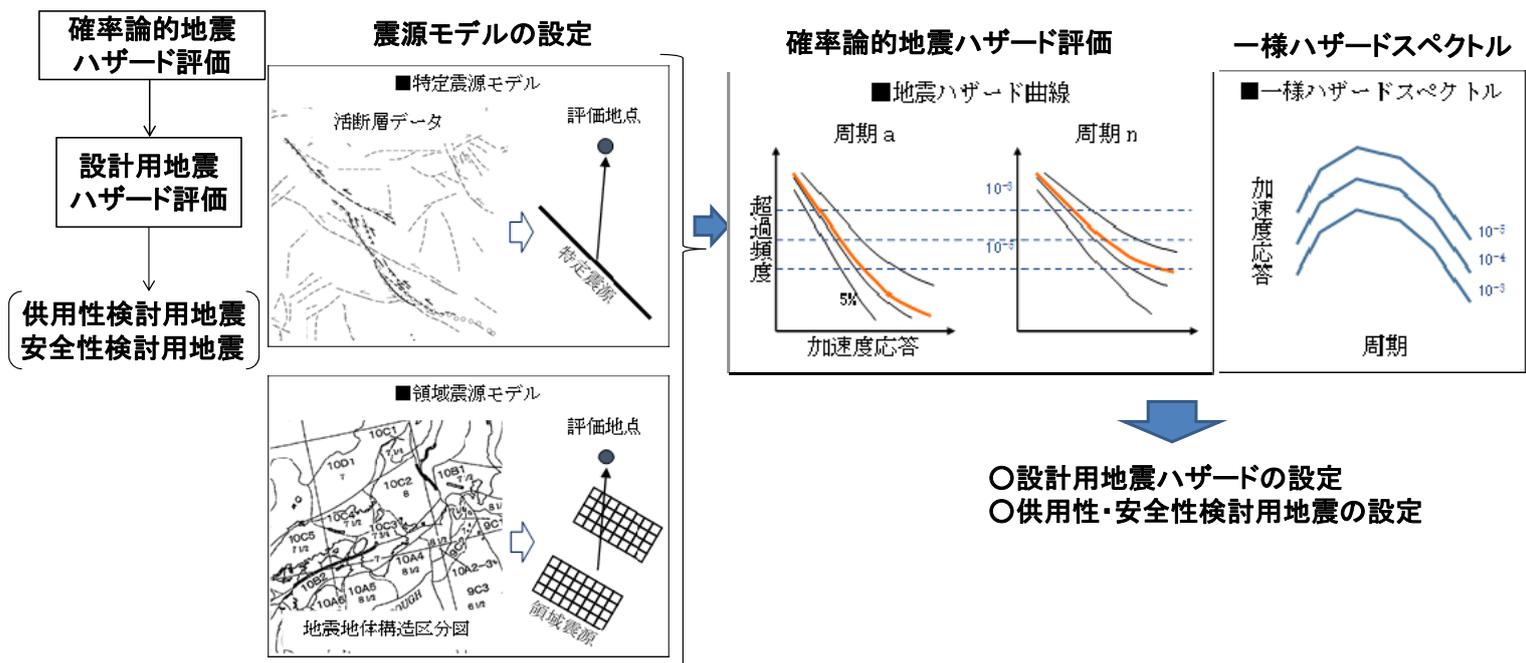
<設定例>

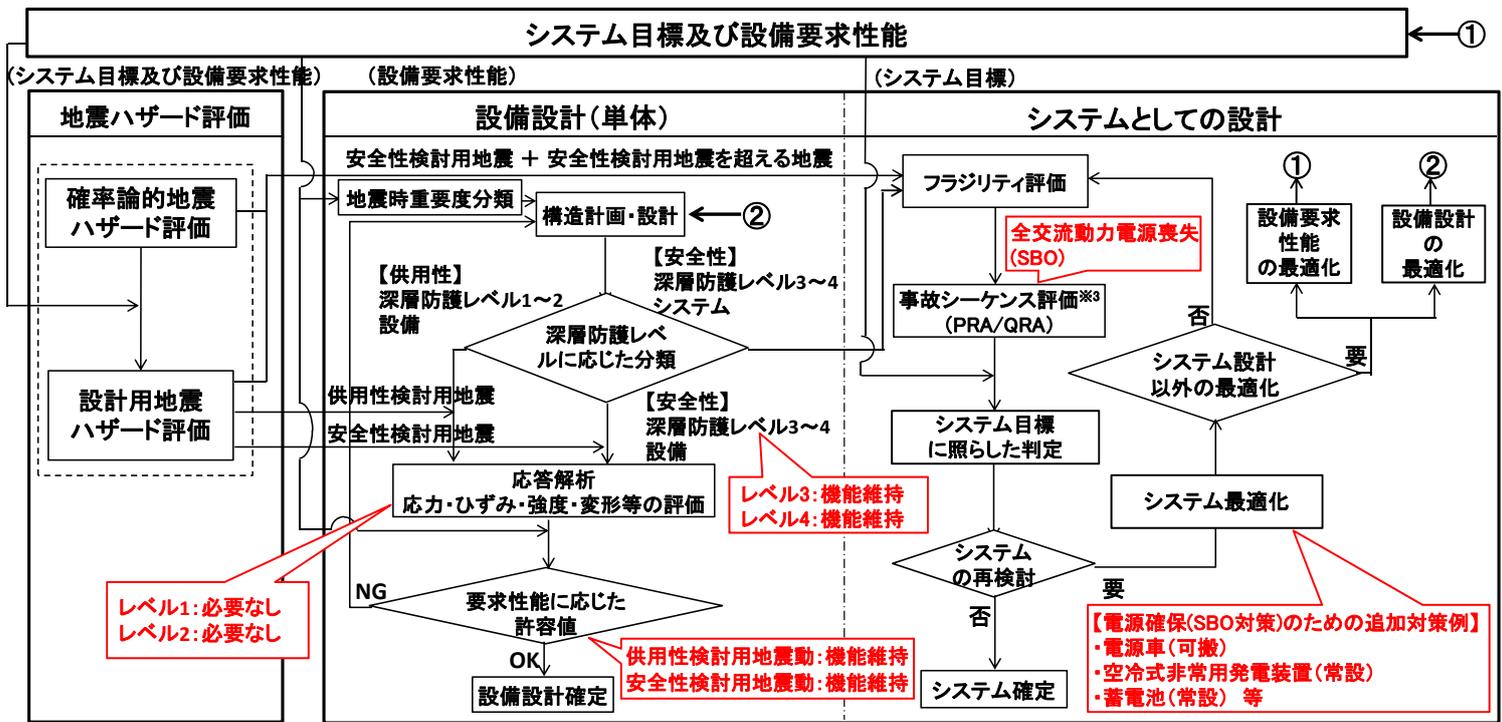
- ・「供用性検討用地震」に対して、発電を継続、もしくは早期に再開可能な状態に留まること(発電に直接関係のない設備は対象外。(例:非常用炉心冷却設備(ECCS)))
- ・「安全性検討用地震」に対して、安全に必要な設備の安全機能が保持できること。

—地震ハザード評価—

【地震ハザード評価】

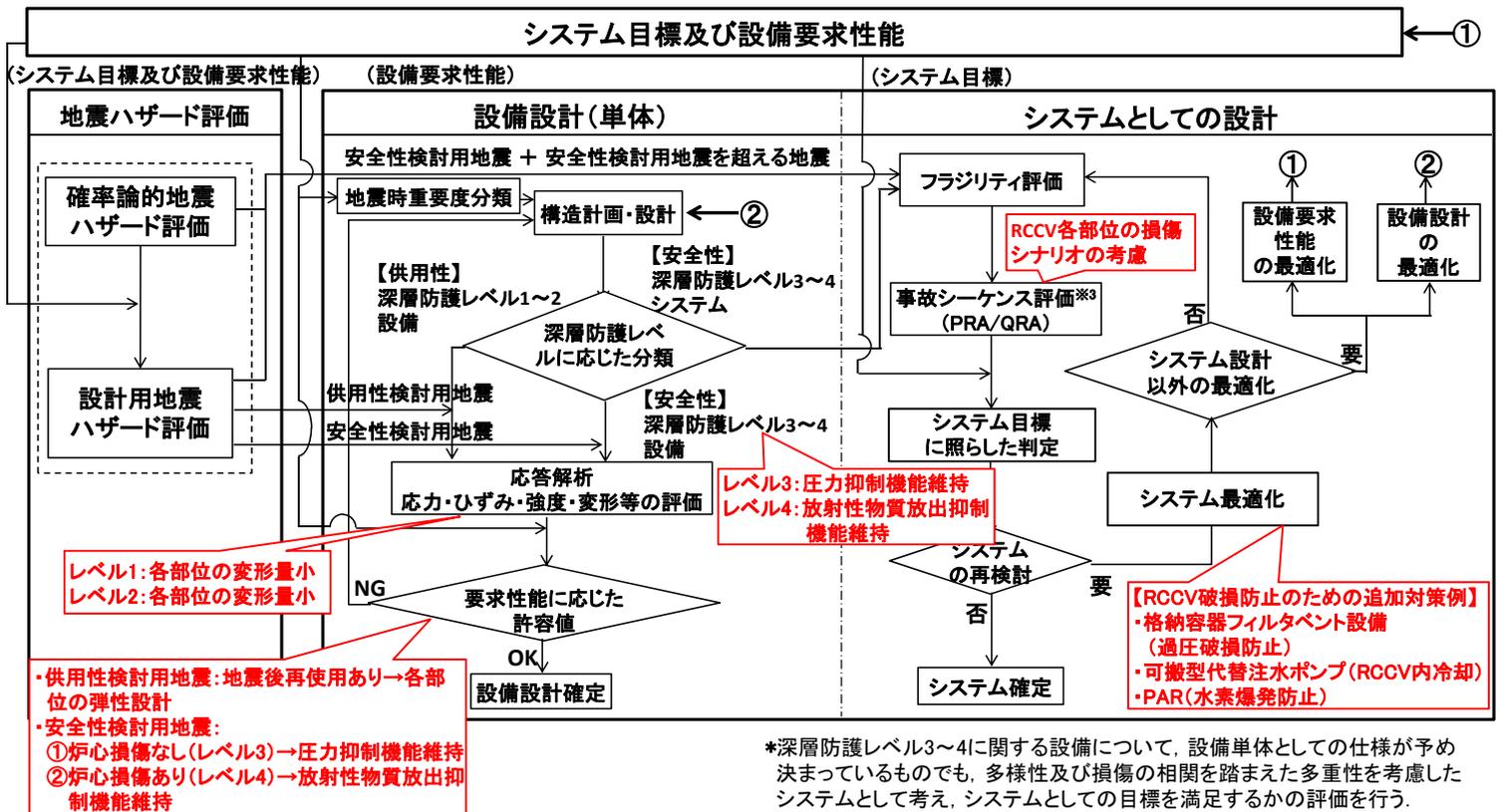
◆一様ハザードスペクトルを元に供用性検討用地震と安全性検討用地震を設定





*深層防護レベル3~4に関する設備について、設備単体としての仕様が予め決まっているものでも、多様性及び損傷の相関を踏まえた多重性を考慮したシステムとして考え、システムとしての目標を満足するかの評価を行う。

図4 原子力発電所の地震時の性能確保のための耐震設計体系 (非常用ディーゼル発電機への適用例)



*深層防護レベル3~4に関する設備について、設備単体としての仕様が予め決まっているものでも、多様性及び損傷の相関を踏まえた多重性を考慮したシステムとして考え、システムとしての目標を満足するかの評価を行う。

図5 原子力発電所の地震時の性能確保のための耐震設計体系 (鉄筋コンクリート製原子炉格納容器(RCCV)への適用例)

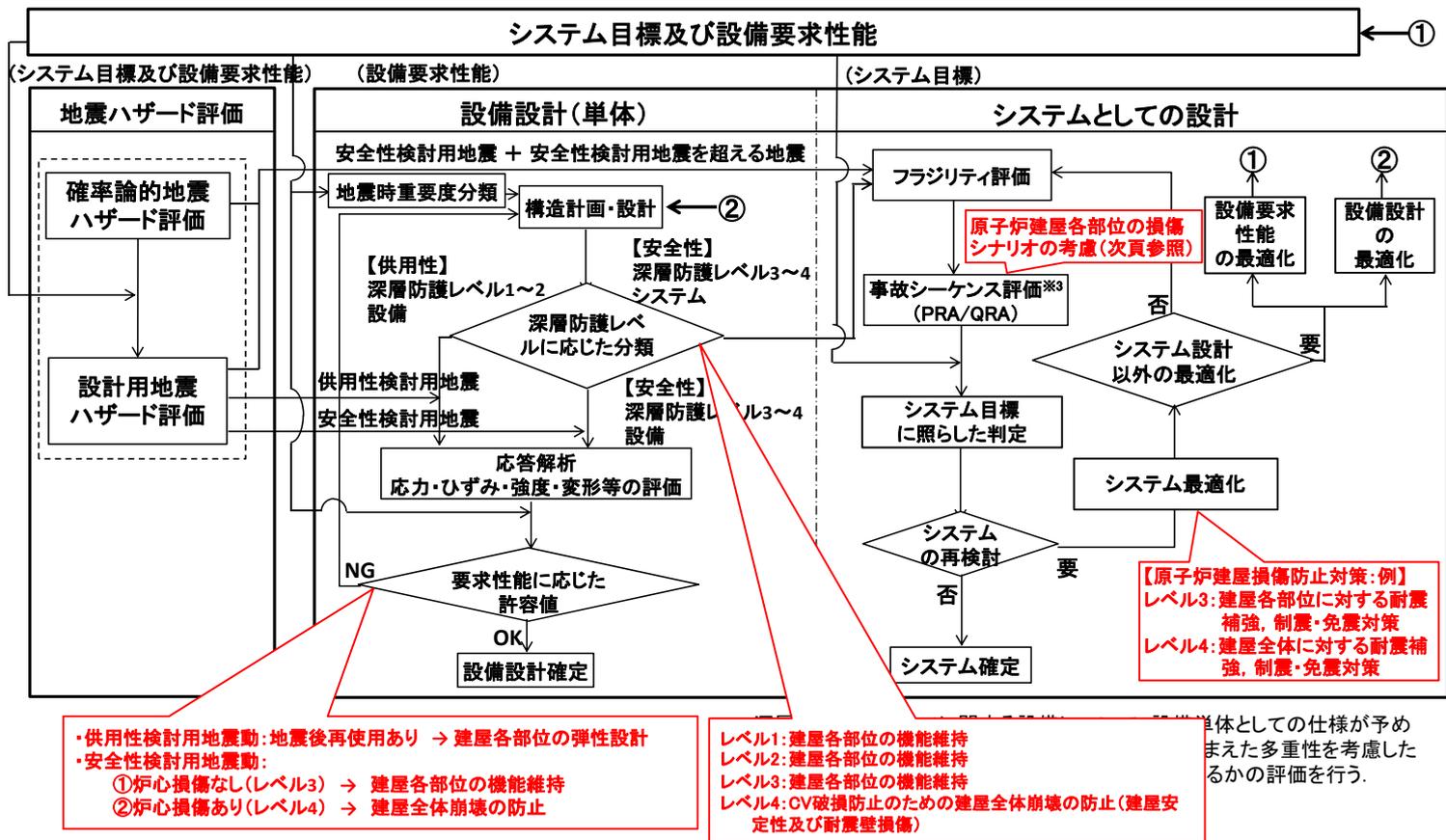


図6 原子力発電所の地震時の性能確保のための耐震設計体系 (原子炉建屋への適用例)

結論

深層防護とリスクの概念に基づいた耐震設計体系を検討し、提案した。

1. 外的事象(地震)に対する深層防護の考え方を整理した。
2. 深層防護およびPRA評価(リスク評価)に基づく設備の集合(システム)の耐震安全性の評価及び安全目標についての考え方を提案した。
3. 地震安全の原則に対応した耐震設計体系を提案した。
 - ①深層防護のレベルと設備集合(システム)の設計を取り込み、設備集合の最適化を実施することでリスク評価と設備集合の設計を明確に関連付けた。
 - ②深層防護レベル及び要求性能に応じた決定論的地震動を地震ハザード評価に基づき設定することとし、地震動の観点からも従来の設計体系とリスク評価による設計を明確に関連付けた。
4. 耐震設計体系を実際に適用するための手順を示すと共に代表的な設備・施設についてこの手順に則った設計事例を検討した。

