

地震PRAの利活用のすすめ

高田 毅士

東京大学名誉教授 量子放射線利用振興協会
日本原子力学会地震PRA作業会主査

1

講演の背景とねらい

【背景】

原子力安全確保は第1層から5層までの深層防護の考え方に基づいて実施されている。各層の実装は、保守的に設定された条件の下、工学的に実施され結果として極めて保守性のある重層化した安全確保の枠組みとなっている。

しかし、地震国日本において、また、1F事故を経験して、地震安全確保は以前にも増して最重要関心事であり、その在り方が問われている

【目的】

地震を対象に深層防護の考え方に基づいて、各層の頑健性のうち、第1-3層の保守性を評価するために開発・実施されている地震リスク評価(地震PRA)の考え方、その実践について解説とともに、最近の地震安全に関わる話題とその活用可能性についても紹介する。

2

2

講演概要

1. PRAの目的
2. 地震被害の特徴
3. 地震PRAとは？
4. 地震PRAの特徴(補遺)
5. 最近の話題
 - (1)地震時の避難問題
 - (2)敦賀2号機の立地不許可の判断
 - (3)中部電力浜岡原子力発電所の不適切事案
6. まとめ

3

3

1 PRAの目的

4

4

リスクの定義

リスク＝損失の大きさとそれが生じる確率との積

$$R=P \times C$$

R: リスク (＄)

P: 想定する事象の発生確率

C: 想定する事象が発生したことによる影響 (損失額 (＼)、死者数など)

(例)

地震による建物の倒壊リスク (＼) = 倒壊確率 × 倒壊による被害費用

1フライト当りの死亡リスク (人) = 旅客機の墜落確率 × 墜落による死者数

送電機器の機能喪失リスク (時間) = 送電機能喪失確率 × ダウンタイム

事象の発生確率とその結果の積

事象の発生確率とその結果の組み合わせ(Combination of probability and consequence)

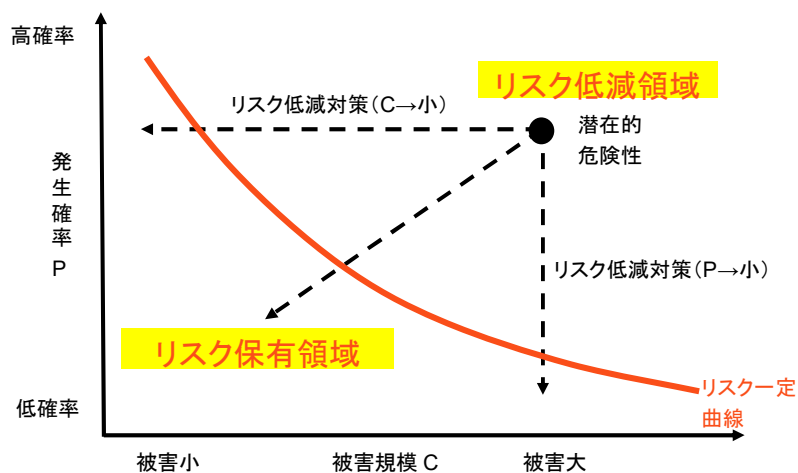
目的に対する不確かさの影響(Effect of uncertainty on objectives, ISO31000)

5

5

リスク低減の方法

リスクの定義: 事象の発生頻度と事象が発生したことによる被害の大きさを組み合わせたもの、あるいは両者の積



6

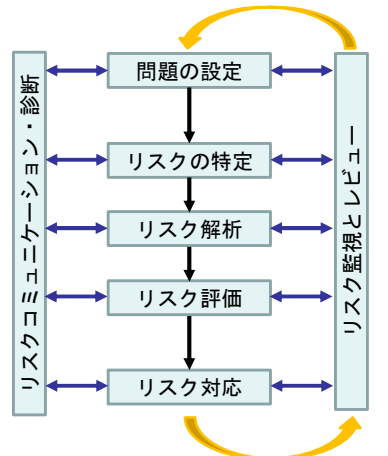
6

リスクマネジメントの展開

リスクマネジメントとは、リスクを組織的に管理し、損失などの回避または低減を図る一連のプロセス

リスクマネジメント	
リスク評価	リスク解析
	ハザード特定
	リスク算定
	リスク評価
リスク対応	リスク回避
	リスク最適化
	リスク移転
	リスク保有
リスク受容	
リスクコミュニケーション	

リスクマネジメントプロセス
(AS/NZS 4360:2004)



リスクマネジメント(ISO31000)

7

7

確率論的リスク評価 (PRA) の目的

総合資源エネルギー調査会資料(H26.5.30)より抜粋

- ① 既存プラントの保有する安全性の定量化と結果の判断
- ② 低頻度の事象を見逃さない網羅的なリスク評価の実施
- ③ 深層防護の充実を通じた残余のリスクの低減
- ④ 決定論的な安全確保手法の補完的役割
- ⑤ わが国特有の立地条件に伴う地震・津波等の外的事象に着目したプラント毎の事故シーケンス及びクリフエッジの特定と、既存のシステムでは想定されていない事態への備え及び回復を含む総合的な被害の低減策であるレジリエンスの向上
- ⑥ わが国で商業運転されている軽水炉の更なる安全性の向上のための研究の再構築と国内外関係機関とのコーディネーションの強化
- ⑦ 新型炉や原子力関連施設の安全審査のクライテリア設定の根拠づけ(GA)
- ⑧ 社会との対話のツールとして

8

8

2. 地震被害の特徴

9

9

PD「2011年福島事故の教訓と展望」のまとめ



地震工学会大会（2016.9）でのPDで指摘された事項

1. **想定外事象への対応**、想定外（シナリオ）の想定をどのように？
2. **不確実性の評価と低減**
3. **リスク概念**の有効性と、その活用の必要性
4. プラント全体（周辺も含めて）**トータルシステム**として取り扱う
5. 揺れ、変位、地震起因・随件事象（斜面、津波、火災・・・）
6. **深層防護概念の実装**の方法は
7. BDBE(Beyond Design Basis Events, **設計基準外事象**)
8. **トータルプロセス**、分野横断、異分野連携
9. 緊急時対応（情報の不確実さの時間依存性）

10

10

過去と現在の災害像の相違と対応

過去	現在
単機能	多機能
単純系	複雑系
独立	相互依存（従属）
	
低技術水準のため災害は頻繁に生じる	技術進歩により、災害は滅多に生じない
→ 常時の注意と配慮が必要	→ 一旦生じると、その影響は極めて大きい
伝統的安全確保（設計余裕の増大）の対応で十分	分野横断的アプローチが必要 → リスクマネジメントが必須

11

11

保全学 Vol.12, No.1 April, 2013

巻頭言

巻頭言

トータルプロセス・トータルシステム

高田 毅士 Tsuyoshi TAKADA

東京大学教授



1. リスク論に基づく安全規制

2006年の原子力施設の耐震設計審査指針においては、将来の地震動評価には大きな不確実性が存在することを認めた上で「残余のリスク」の概念が導入された。このことは、原子力発電所の「絶対安全」思想からの大いなる脱却であり、リスクに基づく規制の第一歩であったと言える。リスクの概念は、原子力発電所が「安全か否か」ではなく「どの程度に安全か」を示すことの重要性を示唆しており、リスクを認識し計量することによりそれを効果的に低減する種々の方策に検討が及ぶ。それは設計における対応にとどまらず、緊急時の対策を充実させることも視野に含むことになる。そう考えると、リスク概念の徹底が、想定を超える津波の襲来とは言え、福島発電所被害を軽減できたのではとの思いに至る。

さて、現在、原子力規制庁においては「発電用原子炉施設の地震・津波に関わる新安全設計基準」の策定が行われているが、残念ながらリスク論が積極

地震や津波に対する確率論的安全性評価は、ハザード、建屋・機器・設備の脆弱性、安全系の特性も全てトータルプロセスを構成するパーツとして扱い、それらの不確実性も明示して確率論的枠組みに組み込んで、残余のリスクを評価する一連の作業であり、今後、安全規制に活用されるべきものである。

トータルプロセスを通じてのみ評価できる安全目標をクリアすることが安全性確保の要件であり、それを実現できるように基準地震動を選択することになる。すなわち、残余のリスクを評価して、その対策を検討するリスク論による意思決定を促す規制の枠組を確立しなければならない。

3. 「トータルシステム」としての頑健性の確保

原子力発電所を構成する、安全確保のための構造物・システム・機器に加えて、敷地地盤、敷地内外の施設やインフラも含めた広義の発電所全体システムを「トータルシステム」と捉えて、その挙動を把握することが必須である。福島事故で明らかになっ

12

12

3 地震PRAとは？

(SPRA: Seismic Probabilistic Risk Assessment)

13

13

原子力発電所の安全確保の基本的な考え方

□ 基本的な安全機能

- 「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」

□ 多重性あるいは多様性及び独立性

- 多重性：所定の安全機能を遂行するために最低限必要な数の設備よりも多い数の設備を備えること（例：ある機能を遂行するのに2台のポンプが必要な場合に3~4台のポンプを用意すること）
- 多様性：同一の安全機能を果たす設備に対して異なる属性を取り入れた複数の系統や機器を設けること（例：電動ポンプと蒸気タービン駆動ポンプ）
- 独立性：2つ以上の系統／機器が1つの原因によって同時にその機能が阻害されないよう相互に独立していること（電氣的分離、機能的隔離、物理的分離）

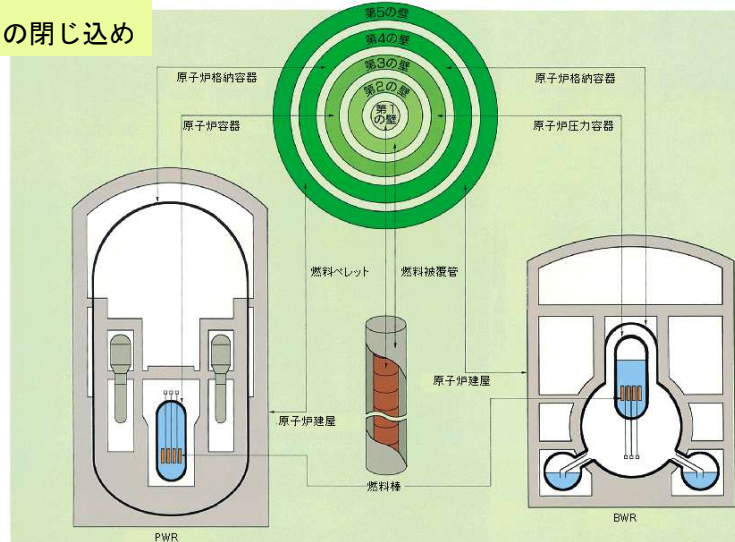
14

14

原子力発電所の安全確保の基本的な考え方

□ 多重の障壁

- 核分裂生成物の閉じ込め



15

15

原子力発電所のPRAの特徴

- 広範な起因事象から派生する事故シナリオ(起因事象とそれを緩和するための設備の作動成功/失敗の組合せで定義される)を同定するために系統的なアプローチが用いられており、有意な事故シナリオを網羅的に評価することができる。
- 事故の発生頻度と公衆の健康影響(早期死亡や後期死亡)を現実的に評価することができる。
- 評価結果の不確かさを定量的に示すことができる。
 - ➔ 総合性と定量性に優れた手法
- 定性的かつ定量的な「リスク」情報を得ることができ、設計や運転、保守管理に有用な知見を導いたり、プラントの安全性向上やリスクの低減を図るための対策を評価する上での共通となる基盤を提示することができる。

16

16

外的事象と内的事象の分類

内的事象	外的事象		
	内部ハザード	外部ハザード	
		自然ハザード	人為ハザード
<ul style="list-style-type: none"> ・ 機器のランダム故障 ・ 人的過誤 ・ 外部電源の喪失 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 内部火災 ・ 内部溢水 ・ 内部ミサイル ・ 内部爆発 ・ 重量物落下 ・ 化学物質放出 ・ その他 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地震 ・ 外部火災 ・ 津波 ・ 強風 ・ 火山噴火 ・ 隕石落下 ・ 生物学的現象 ・ 異常気象 ・ その他 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 原子力施設外の爆発 ・ 原子力施設外での化学物質放出 ・ 航空機落下 ・ 意図的な不法行為 ・ その他

日本原子力学会 用語の定義(2018)より

17

17

地震時安全に関する不確かさ

■ 地震ハザードに関する不確かさ

- (1) 地震発生に関する不確かさ
 - ・ 発生時刻(いつ?)、発生地点(どこで?)、発生様態(どのような規模、様式?)
- (2) 地盤中を伝わる地震動に関する不確かさ
 - ・ 地震動の特性(大きさ、波の性質)
- (3) モデル化、解析理論の不確かさ、様々な仮定の適切性



■ 構造物、機器配管設備の揺れに対する強さに関する不確かさ

- (1) 地震時応答に関する不確かさ
 - ・ 地盤、構造物、機器配管の応答特性、材料特性など
- (2) 構造物、機器配管設備の耐力
- (3) モデル化、解析理論の不確かさ、様々な仮定の適切性

■ システム全体の挙動に関する不確かさ

- (1) 故障の可能性
- (2) 人間過誤の影響など
- (3) モデル化、解析理論の不確かさ、様々な仮定の適切性

18

18

不確定性の分類

偶然的な不確定性
(Aleatory uncertainty)



偶然に支配される不確定性
荷重、材料強度などの物理量のばらつき

低減できない不確定性

認識論的な不確定性
(Epistemic uncertainty)



真の状態がよくわからず知識不足により
生じる不確定性(モデル化誤差に近い)
データの蓄積、科学の進歩により低減
可能な性質を持つ

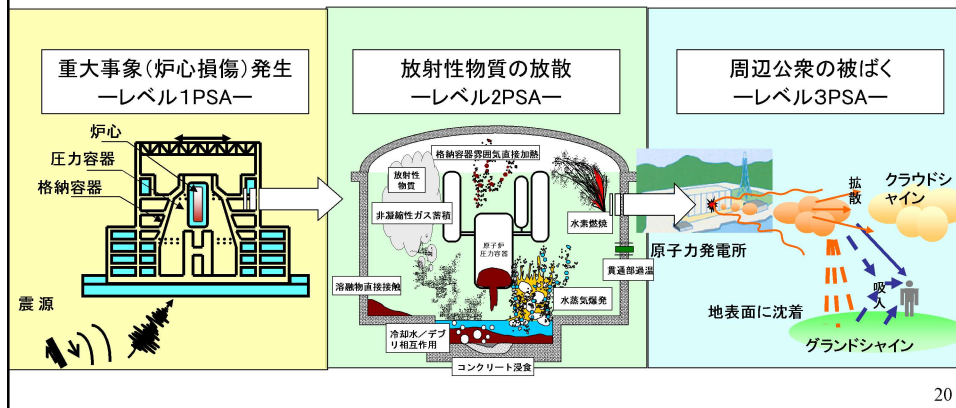
19

19

総合的なPRAの枠組み

20

- 基準地震動 S_s を上回る地震動の影響が施設に及ぶことにより、
- ・施設の重大損傷事象が発生すること
 - ・大量の放射性物質が環境に放散する事象が発生すること
 - ・それらの結果として周辺公衆に対して放射線被ばくによる災害を及ぼすこと

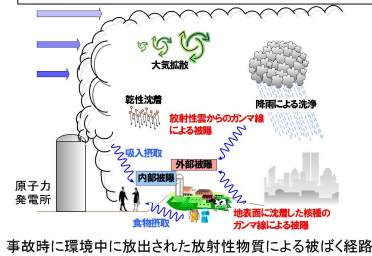


20

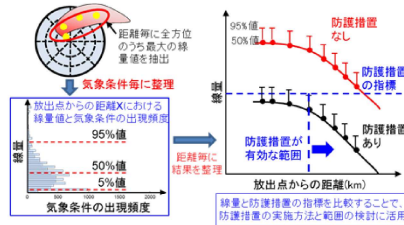
20

レベル3 PRAと防災

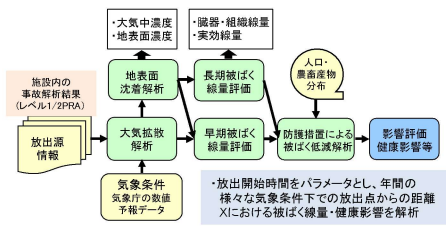
●レベル3PRA=レベル1PRA+レベル2PRA+事故影響評価
 事故時に環境に放出される放射性物質の挙動を解析し、放射線に起因する公衆の影響(リスク)を評価



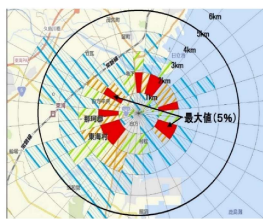
事故時に環境中に放出された放射性物質による被ばく経路



被ばく線量評価結果の放出点からの距離Xによる整理



レベル3PRAコードOSCAARの概要



7日間積算線量が空間線量の基準値を超える気象条件の出現確率の空間分布

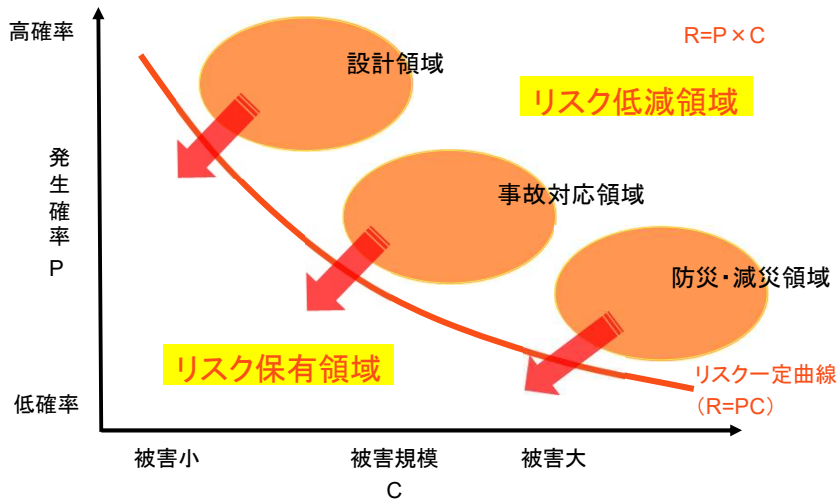
空間線量評価結果の空間分布による整理

深層防護 (INSAG-10, 1996)

	防護レベル	目的	目的達成に不可欠な手段
プラント当初設計	レベル1	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
	レベル2	以上運転の制御及び故障の検知	制御、制限および防護系、並びにその他のサーベイランス特性
	レベル3	設計基準内への事故の制御	工学的安全施設および事故時手順
設計基準外	レベル4	事故の進展防止およびシビアアクシデントの影響緩和を含む、過酷なプラント状態の制御	補完的手段および格納容器の防護を含めたアクシデントマネジメント
緊急時計画	レベル5	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

多段階のリスク低減の方法

地震工学会「耐津波工学の体系化(2015. 3)」報告書より抜粋

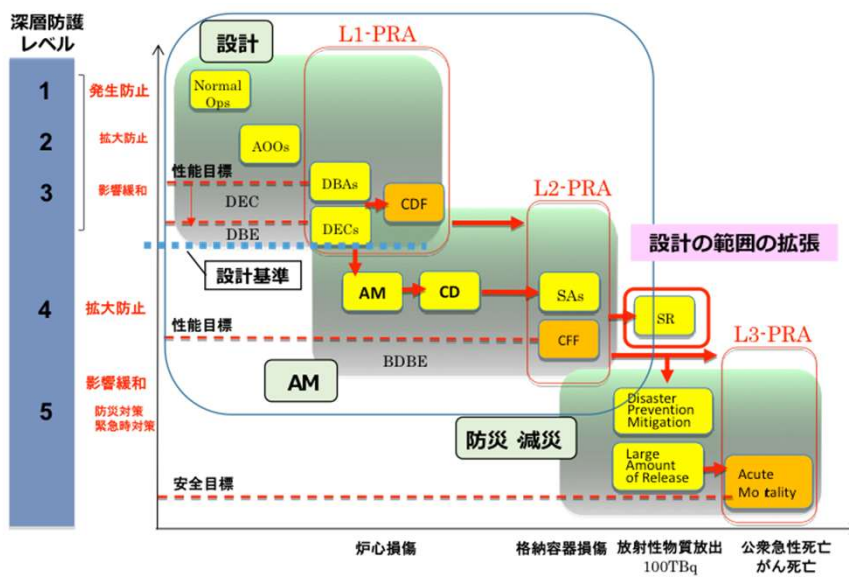


23

23

設計-AM対策-防災-リスク評価の領域

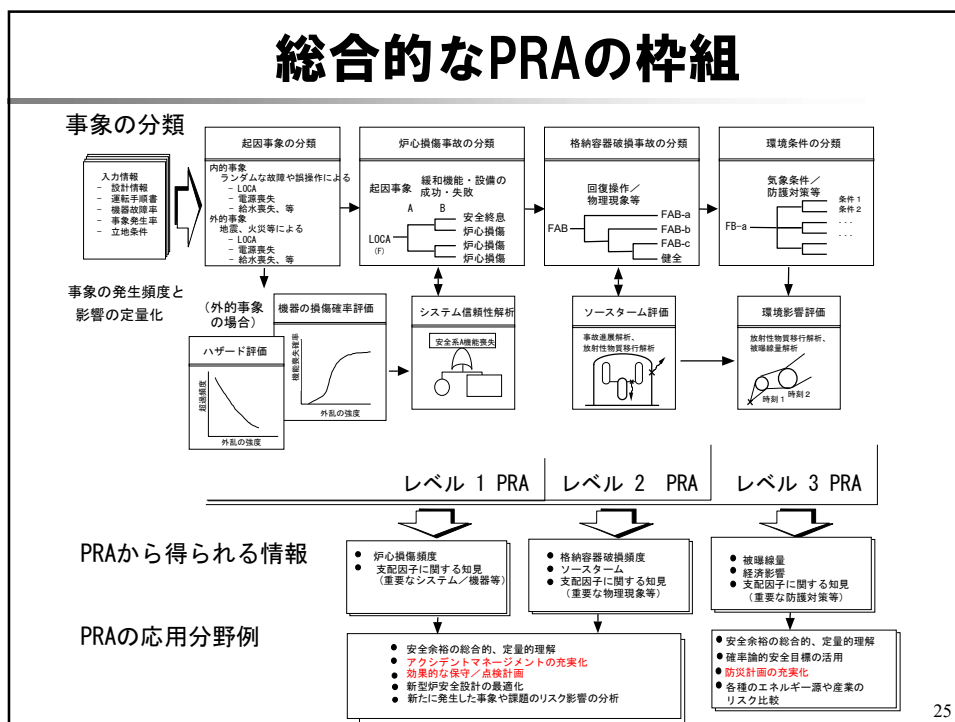
地震工学会「耐津波工学の体系化(2015. 3)」報告書より抜粋



24

24

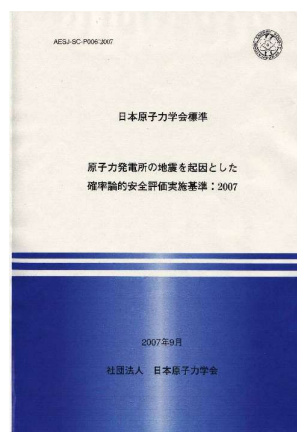
総合的なPRAの枠組



25

地震PRA（日本原子力学会標準）

発生の可能性が極めて小さな地震動も含めて、原子力発電所に影響を及ぼすと想定される地震動を対象に、地震動のばらつきや建屋・機器の応答挙動のばらつき、耐力のばらつき等を考慮に入れて、事故シーケンスの発生確率/頻度やその影響を分析し、原子力発電所の耐震安全性を定量評価する。



地震PRA実施基準
(原子力学会、2007, 2015, 2024)

26

4 地震PRAの特徴：補遺

27

27

決定論的耐震設計と地震PRAの比較

決定論的耐震設計	地震PRA結果による意思決定
個々の構造物、系統、設備に適切な余裕を確保 (部分的保守性確保)	設計、運転そして実際の条件を考慮した統合化システムとしてプラント性能を評価 (全体としての保守性確保)
固定した唯一のレベルの設計用地震外力を使用 (基準地震動 S_s, S_d :離散点で代表)	地震ハザードの全領域に渡って統合化したプラント性能を評価する (地震動の全範囲)
不確定性は保守的な取り扱いや安全率を用いて暗に考慮される	知り得る不確定性は陽に考慮され、結果に表現される
地震発生事象の発生頻度は、設計基準設定には考慮されない	様々な大きさの地震の発生事象の発生頻度は、方法論の主要な部分である
各科目どれも一定以上の得点 → 過剰要求となる (要求仕様に基づくアプローチ向き)	科目の総合点で判断 → プラント全体としての性能要求が可能 (要求性能に基づくアプローチ向き)

G.Apostolakis (2012)に赤字を追加

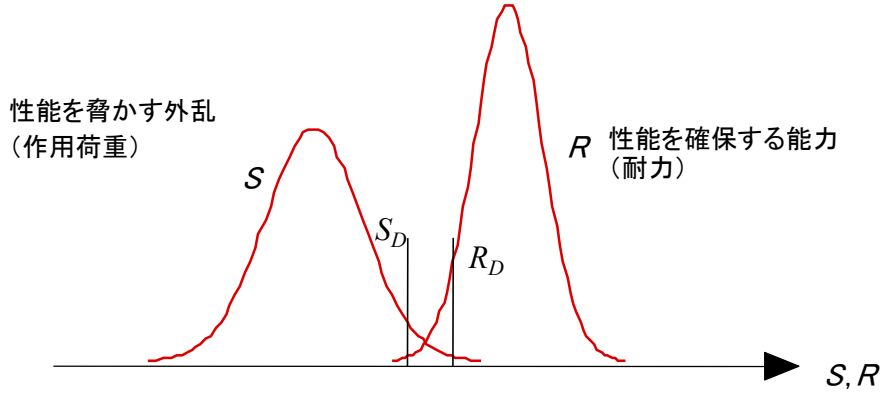
28

28

要求性能に関する性能確保の可能性

安全裕度 = 性能を確保できる能力 - 性能を脅かす外乱

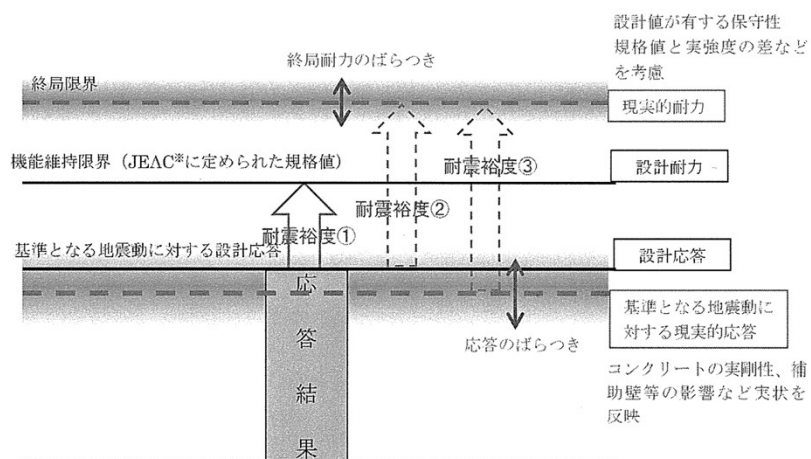
$$M = S - R$$



29

29

従来の耐震安全裕度評価の考え方



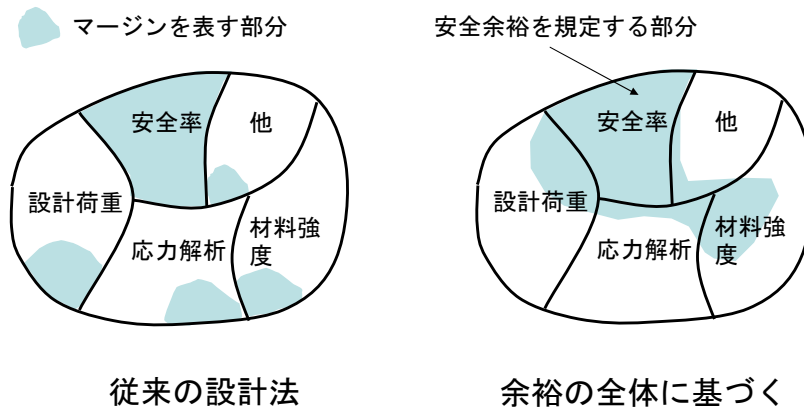
※JEAC：原子力発電所耐震設計技術規程：財団法人電気協会

図 3-1 耐震裕度のイメージ

30

30

安全裕度の分析（余裕の統合化）



31

31

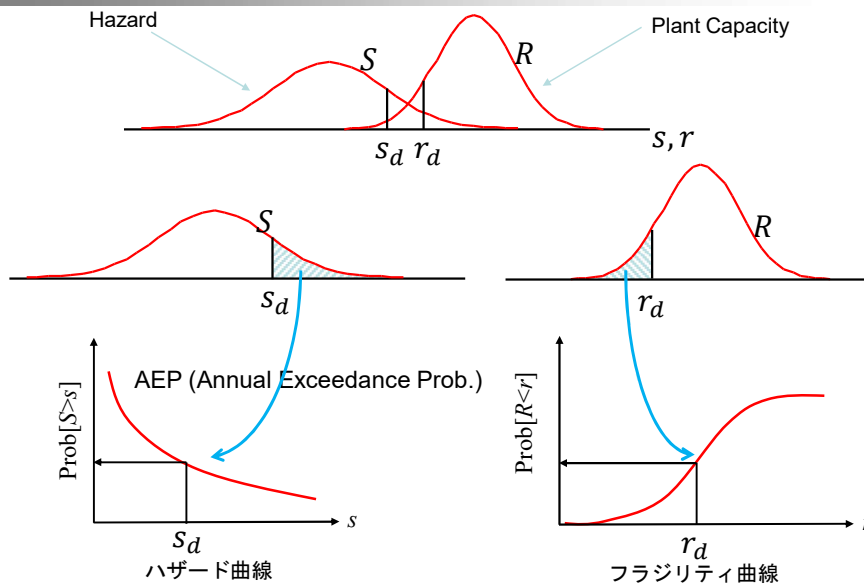
基準地震動 S_s の保守性の評価

- 地震発生に関する不確かさ
 - ・発生時刻(いつ?)
 - ⇒ 必ず地震が生じると仮定
 - ・発生地点(どこで?)
 - ⇒ 過去の地震カタログ、断層調査結果に基づき地震動が大きくなるような設定
 - ・発生様態(どのような規模、様式?)
 - ⇒ 経験則、過去の知見に基づき大きめの設定
- 地盤中を伝わる地震動に関する不確かさ
 - ・地震動の特性(大きさ、波の性質)
 - ⇒ 経験式、物理モデルなどで大きめの設定
- モデル化・理論の不確かさ
 - ⇒ 上記に加えて、不確かさを考慮した評価ケース(不確かさを考えて、保守的な取り扱いとしたケース)
 - 調査の不完全さも考慮する→不特定震源

32

32

地震安全性を測る



33

33

5 最近の話題

- 1) 地震時の避難問題 (東海第2、能登半島地震被害)
- 2) 敦賀2号機の立地不許可の判断
- 3) 中部電力浜岡の基準地震動の不適切事案

34

34

東海第二をめぐる水戸地裁の判決例（R3. 3. 18）

（略）

…深層防護の第5の防護レベルについても、大規模地震、大津波、火山の噴火等の自然現象による原子力災害を想定したうえで、実現可能な避難計画が策定され、これを実行しうる防災体制が整っていなければ、PAZ及びUPZの住民との関係において、深層防護の第5の防護レベルが達成されているということはできない。

（中略）

本件発電所のPAZ及びUPZにおいて、原子力災害対策指針の定める段階的避難等の防護措置が実現可能な避難計画及びこれを実行し得る体制が整えられているというにはほど遠い状態であり、PAZ及びUPZ内の原告らとの関係において、深層防護の第5の防護レベルには欠けるところがあると認められ、人格権侵害の具体的危険がある。

35

35

能登半島地震被害からの課題

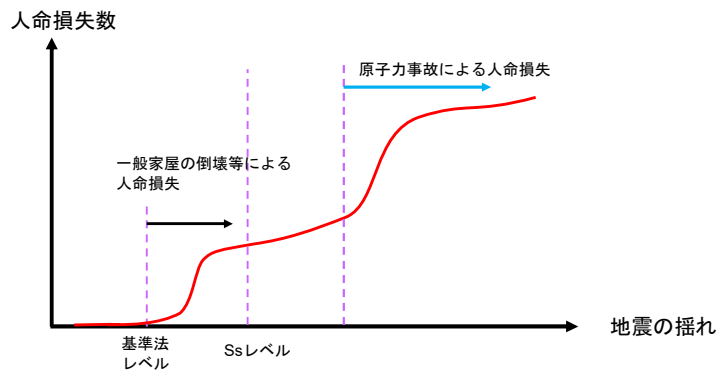
- ・ 志賀発電所としては、従来の安全設計は想定通り機能した
- ・ 安全上問題となるものはなかった
- ・ 一般防災と原子力防災の連携（オフサイトとオンサイト）
原子力事故時の避難や屋内退避の考え方
- ・ 複合ハザードへの対応
（ゆれ＋津波、ゆれ＋余震のゆれ、ゆれ＋X）
- ・ 耐震設計と地震防災の全体的な視点
安全規制（規制庁）と内閣府
- ・ 600余人の死者数（関連死400人程度含む）をどう考える？
- ・ 地元住民への適時な情報伝達

36

36

周辺住民の地震時安全確保の基本

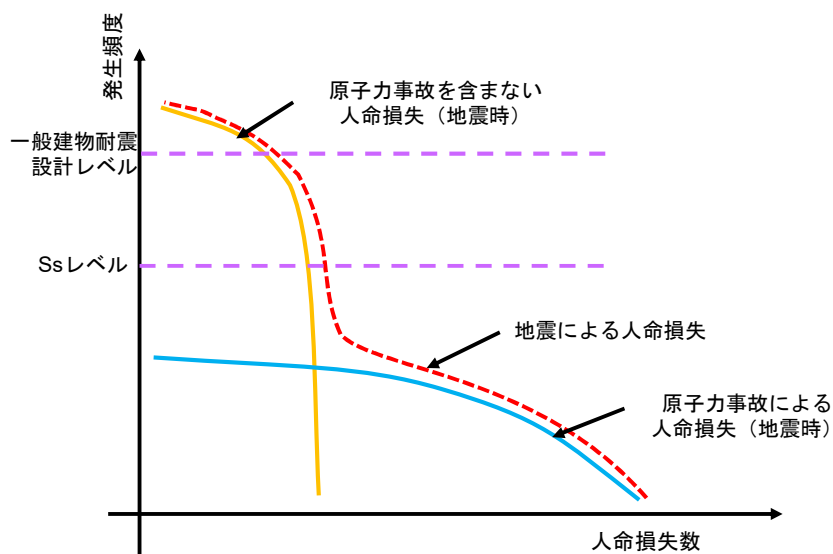
1. 地域の人命安全第一
⇒ 死に至る原因はどうか、地域住民の安全確保が最優先
2. 地域の人命損失を効果的に軽減する方策は？
⇒ 全体を見ながら、効果的な人命損失軽減策の検討



37

37

周辺住民の地震リスク



38

38

敦賀2号機の不許可事案について

- 1) IAEAの地震ハザード評価ガイドとの適合は？
- 2) 不確定な対象に多様な知見を活用したか？
- 3) リスク概念に基づいた安全確保
- 4) 地震安全確保という総合的視点は？
- 5) 審査基準・審査ガイドの改定の必要性は？
- 6) バックフィットルールの運用について

39

39

原電神谷氏作成資料(2025.9.30)より抜粋

敦賀発電所 2号炉審査結果 (2024年11月13日)

規制委 審査書 (抜粋)

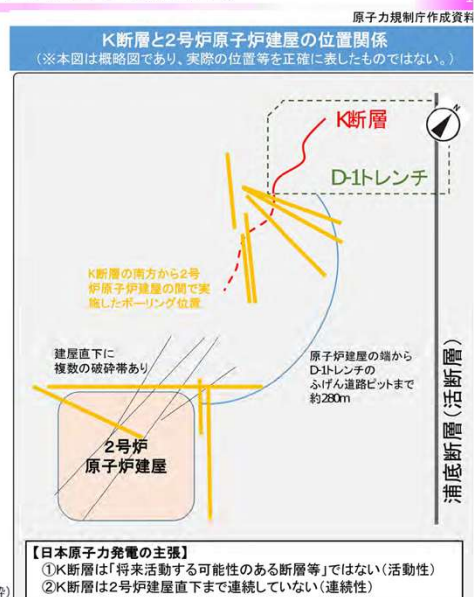
- ・ **K断層は後期更新世以降 (約12~13万年前以降) の活動が否定できないこと**
- ・ **K断層は2号炉原子炉建屋直下を通過する破砕帯との連続性が否定できないこと**



設置許可基準規則第3条第3項に適合していると認められないと判断した。

2024年11月13日 原子力規制委員会 資料1-2 (抜粋)

2024年8月28日 原子力規制委員会 資料1-2 (抜粋)



40

40

規制基準 規則の解釈（規則第3条第3項関連）

17

「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」
（原子力規制委員会内規、2013年7月8日施行）

- ・第3条第3項に規定する「**変位**」とは、**将来活動する可能性のある断層等が活動することにより、地盤に与えるずれ**をいう。
- ・同項に規定する「**変位が生ずるおそれがない地盤に設け**」るとは、耐震重要施設が将来活動する可能性のある断層等の露頭がある地盤に設置された場合、**その断層等の活動によって安全機能に重大な影響を与えるおそれがあるため、当該施設を将来活動する可能性のある断層等の露頭が無いことを確認した地盤に設置すること**をいう。
- ・「将来活動する可能性のある断層等」とは、**後期更新世以降（約12～13万年前以降）の活動が否定できない断層等**とする。
- ・その認定に当たって、後期更新世（約12～13万年前）の地形面又は地層が欠如する等、後期更新世以降の活動性が**明確に判断できない場合には**、中期更新世以降（約40万年前以降）まで遡って地形、地質・地質構造及び応力場等を総合的に検討した上で活動性を評価すること。
- ・活動性の評価に当たって、設置面での確認が困難な場合には、当該断層の延長部で確認される断層等の性状等により、**安全側に判断すること**。
- ・「将来活動する可能性のある断層等」には、**震源として考慮する活断層**のほか、地震活動に伴って**永久変位が生じる断層**に加え、支持地盤まで変位及び変形が及ぶ**地すべり面**を含む。

41

41

最近の出来事

(2) 中電浜岡原子力発電所の基準地震動策定に関する
不適切事案

42

42

基準地震動策定に関する不適切行為

原子力規制庁の公表内容(R8.1.7)

浜岡発電所の基準地震動の策定において不適切な処理がなされた疑いがある。震源を特定して策定する地震動のうち、断層モデル(統計的グリーン関数法による)による評価において、乱数を変えた複数の作成波に対し、意図的に代表波を選定して基準地震動を策定した。これらの方法は、審査で説明されたものとは異なるものであった。

問題点

- 1) 審査において虚偽の説明をしたこと(手続き上の虚偽説明の問題)、
- 2) 実質的な耐震安全性に対する疑念が生じたこと(実体的安全性の問題)

再発防止の方法

技術面について、よりトレーサブルな手法、作為の入りにくい手法の開発などが考えられるが、なかなか効果的な代替手法の開発は容易ではない。策定した波の適切性や保守性を担保する別の考え方や確認方法が必要。

浜岡の基準地震動

中部電力資料(2023.9.29)より抜粋

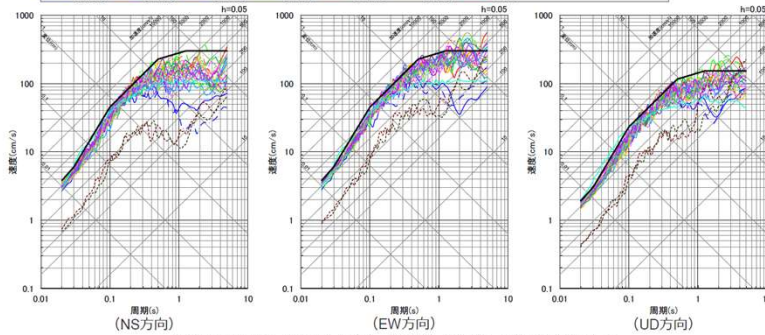
< 1 概要 >

基準地震動の策定(概要)

(基準地震動Ss1: 地震動の顕著な増幅が見られない敷地西側(1~4号炉周辺))

○「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」の評価結果に基づき、敷地西側(1~4号炉周辺)で用いる基準地震動Ss1としてSs1-D、Ss1-1~Ss1-23、Ss1-Nを設定した。

- 応答スペクトルに基づく手法による基準地震動Ss1 ... Ss1-D
- 断層モデルを用いた手法による基準地震動Ss1 ... Ss1-1~Ss1-23
- 震源を特定せず策定する地震動による基準地震動Ss1 ... Ss1-N



< 基準地震動Ss1 (Ss1-D, Ss1-1~Ss1-23, Ss1-N) (応答スペクトル) >

・基準地震動Ss1の地震動評価におけるケース名称等(p.140参照)

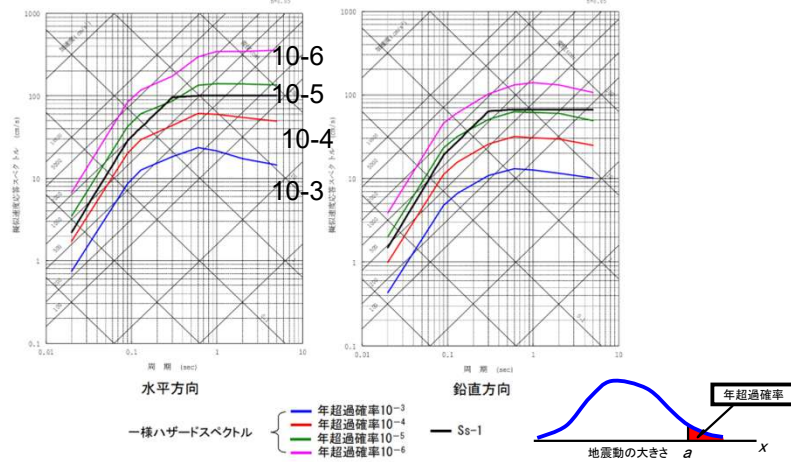
基準地震動Ssスペクトルの年超過確率の例

7. 基準地震動Ssの超過確率

第206回審査会合
資料から変更 161

■一様ハザードスペクトルと基準地震動Ss-1の比較
⇒基準地震動Ss-1は 10^{-4} ~ 10^{-5} 程度となっている。

審査会合での関西電力作成の説明資料より抜粋



45

45

6 まとめ

46

46

まとめ

1. 地震PRAの目的
2. 地震被害の特徴（不確定性、広域性、随伴性）
3. 地震PRAの有効性（深層防護との関係）
4. 最近の話題
 - （1）地震時の避難問題（地元住民の地震安全確保）
 - （2）敦賀2号機の立地不許可の判断
（不確定事象に対する意思決定の在り方）
 - （3）中部電力浜岡原子力発電所の不適切事案
（多元的安全確保の必要性）

47

47

ご清聴ありがとうございました

48

48