

耐津波工学の体系化に向けた活動の中間報告

地震・津波工学に求められる原子力安全

— 外的事象、共通要因故障と深層防護の関わり —

“Nuclear Safety on Seismic and Tsunami Engineering for Nuclear System“



法政大学 宮野 廣 Hiroshi MIYANO

検討メンバー

宮野 廣（法政大学）
亀田弘行（京都大学名誉教授）
蛭澤勝三（電力中央研究所）
中村隆夫（大阪大学）
成宮祥介（関西電力）
飯田 晋（東北電力）
奈良 博（東芝）
奈良林直（北海道大学）

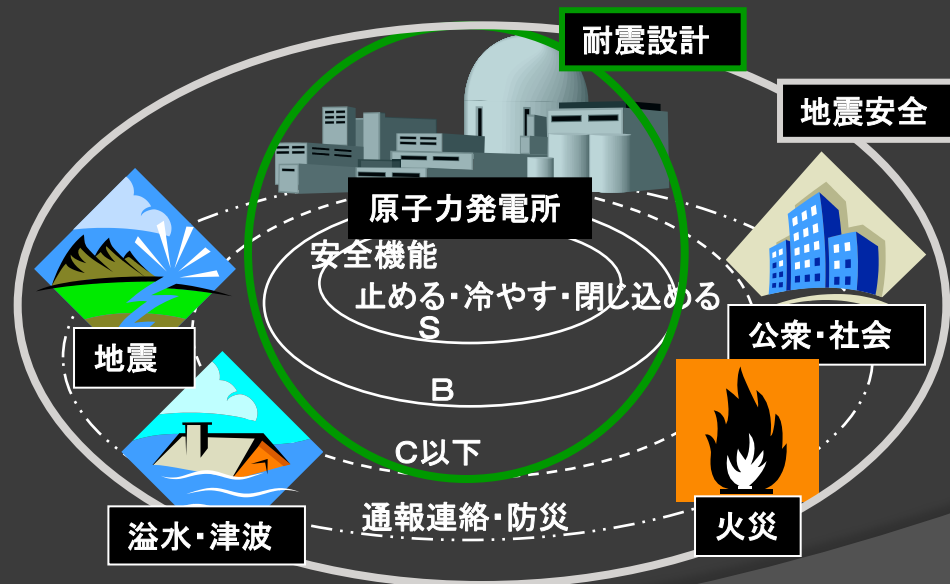
なお、本調査委員会は日本地震工学会と日本原子力学会および土木学会の協働で運営されているものであり、日本原子力学会は原子力安全に関する検討成果を提供するものである。

本検討は、日本原子力学会における標準委員会傘下に設けた原子力安全検討会（主査：田中知東大教授）および傘下の原子力安全分科会（主査：山口阪大教授）にて実施した成果を活用、反映したものである。

地震安全の検討

2007年7月16日に発生した新潟県中越沖地震において、原子力施設に対する耐震設計による原子力安全の確保に加えて、地震により誘発される事象とその影響を考慮して地震時あるいは地震後の公衆や社会の安全を確保することまでを含む必要がある。「原子力発電所地震安全特別専門委員会」を発足させ、“地震安全”として、何をしなければならないのか、を検討してきた。

(2008年10月－2011年3月)



地震安全の検討

＜地震安全の論理＞

地震安全の論理は耐震評価の流れにおける各段階の評価・判断の基となるものである。

＜設計・建設段階＞

- ・原子力発電所の立地、設計、建設時にはいわゆる「耐震設計」が行われる。
この流れは、耐震設計技術規程JEACに基づいて示している。
 - (1) 地質・地盤調査
 - (2) 地震・地震動の策定
 - (3) 地盤安定性解析
 - (4) 構造健全性評価
- ・「残余のリスク」評価に絡む、地震時の確率論的安全評価(地震PSA)の活用や、地震に伴う事象(盛土崩落、地盤流動化、津波)への対応について、その取扱いや判断基準を明確にする必要がある
 - (5) 地震PSA の活用
 - (6) 地震随件事象評価
 - (7) 火災などへの対応
 - (8) 地震観測システムの構築とデータベースの構築

＜運転段階＞

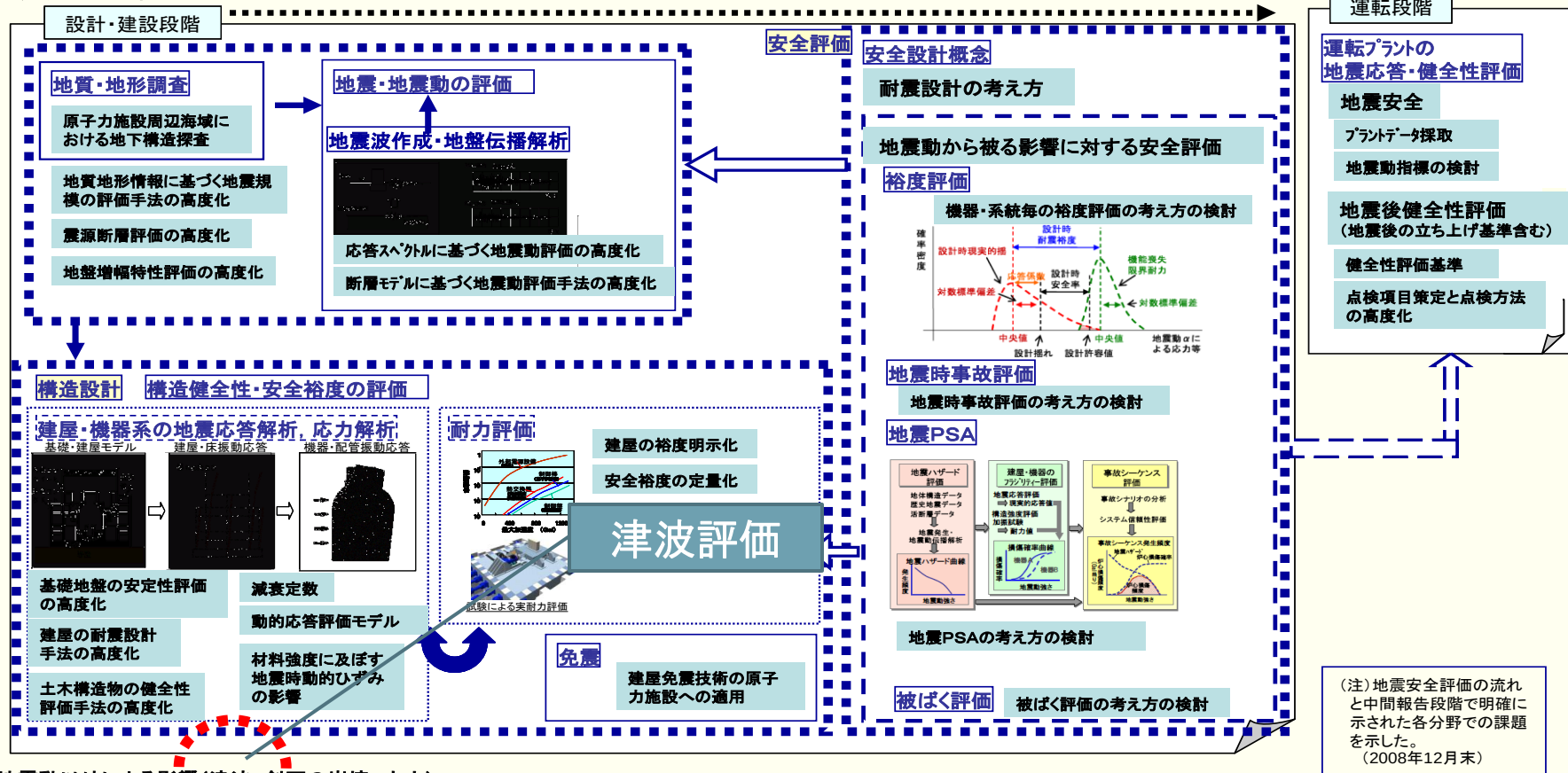
- ・原子力発電所が地震を受けた場合の「耐震評価」について、その考え方および手順などの詳細を定める必要がある
- ・現状では、設計時の基準である耐震設計技術規程JEACを適用している
- ・地震後の原子力発電所の再起動についても評価すべき基準がない

地震安全の検討

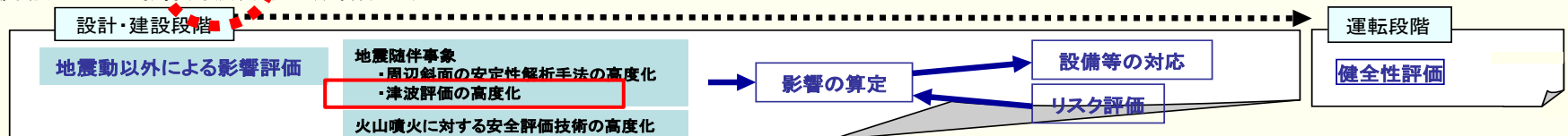
地震安全の論理

安全論理の明確化

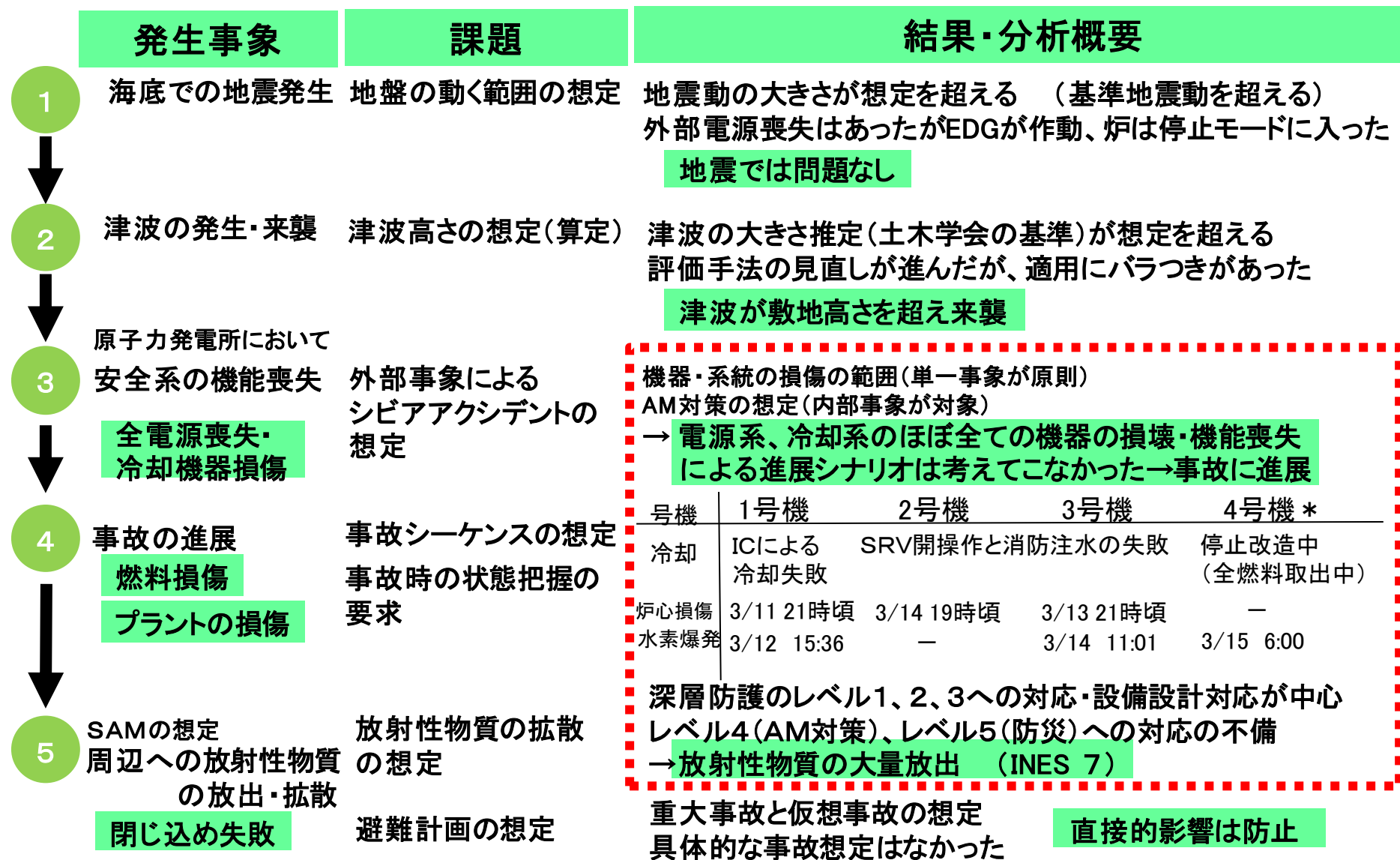
地震動による影響



地震動以外による影響(津波、斜面の崩壊、火山)



背景



背景

事態の把握

地震では、基準値を超える地震動を受けたプラントもあったが、全てのプラントはスクラムし、健全性が確保された。

津波では、結果として、女川、福島第二、東海第二のプラントは被害は少なからずあったが、福島第一以外は原子炉の冷温停止にまで持っていくことができた。

東京電力福島第一原子力発電所での事故について

事故の要因と安全確保としての課題と対応

自然災害への対応不足

設計基準の曖昧さ

電源の重要性の認識不足

「冷やす」ことの緊急性の認識不足

事故進展により重要となる設備

事故時の炉心状態の把握不明

事例の水平展開不足(水素爆発)

「原子力安全」への認識があいまいであった
その取り組み方に共通の理解ができていなかった

「原子力安全の基本的考え方」

－対策の根本－

原子力学会で策定した「原子力安全の基本的考え方」の、福島事故での反省を踏まえた特徴と、以降の原子力施設に資する耐津波工学の体系の論理展開を貫く思想として、方法論である「深層防護」と合わせて、その概要を示す。

(説明) 根本原因はどこにあるのか、が課題である。事故は直接要因として発生した。その背景にある、間接要因や背後要因により、直接要因が発生していることは否めない。

重要な間接要因が、「原子力安全の基本的考え方」なる、原子力関係者の共通する考え方がなく、その共有ができなかったことである。

そこで、原子力学会でまとめた、共有すべき「原子力安全の基本的考え方」のポイントを紹介する。これを基に、規制、基準、規格などの策定において共通の認識として、制定に生かされることを期待するものである。

「原子力安全の基本的考え方」

－その特徴－

- 要点：①原子力に係るそれぞれが安全確保の責務を果たす意識
②共通の認識としての“リスク”の定量化と活用した対応
- ・ベネフィットを超えるリスクであってはならない
 - ・安全目標、性能目標のコンセンサスを形成、リスクで評価
- ③常に「深層防護」を念頭に対応

基本とする 10の原則

- 原則1 : 安全に対する責務
- 原則2 : 政府の役割
- 原則3 : 規制機関の役割
- 原則4 : リーダーシップとマネジメント
- 原則5 : 安全文化の醸成
- 原則6 : 正当性の説明
- 原則7 : リスク抑制
- 原則8 : 事故の発生防止と影響緩和
- 原則9 : 緊急時の準備と対応
- 原則10 : 放射線リスクの低減のための防護措置

「原子力安全の基本的考え方」

ーポイントー

責務(responsibility) について述べているが、原子力施設を運営する事業者に安全確保に対する最も大きな責務があることを前提として、広く原子力安全に関係する組織や個人が、その能力を発揮すべきと期待される場面でそのつとめを果たすことを意味することに注意が必要である。

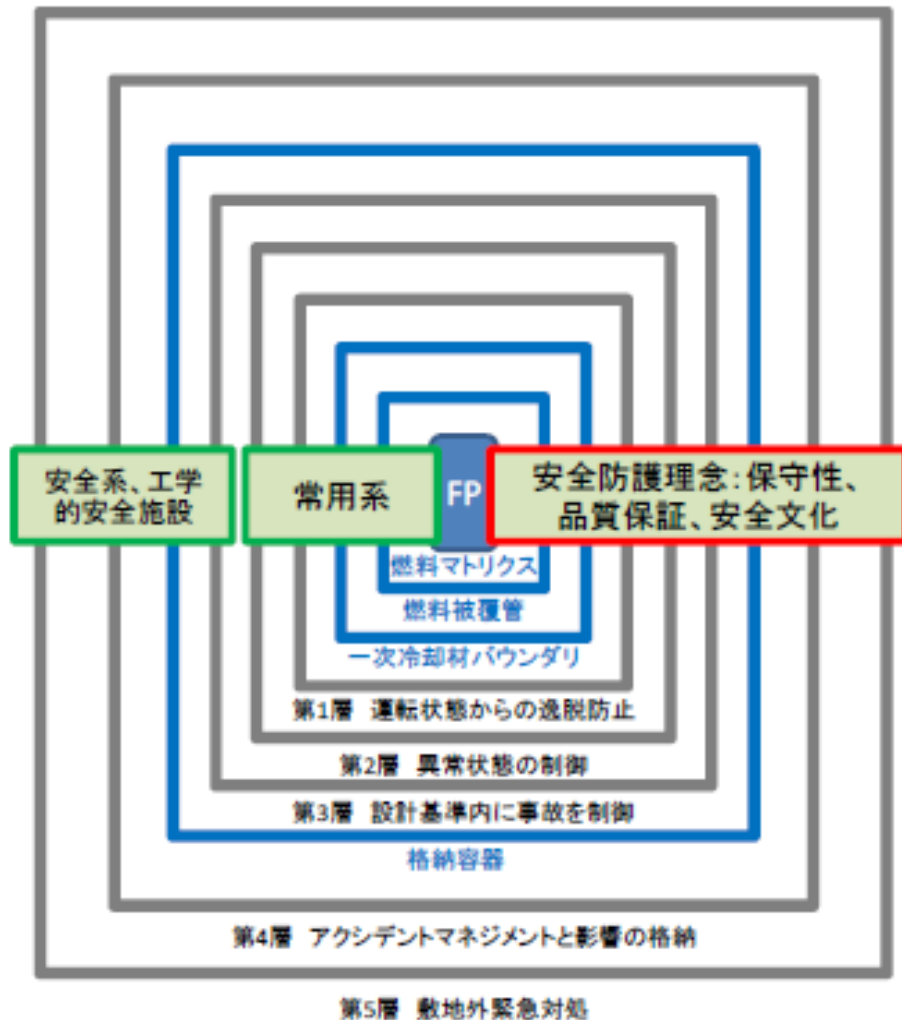
目的については、「人および環境を放射線リスクから防護すること」である。

深層防護の考え方 に基づいて事故の発生を防止すること、また事故が発生した際の影響を緩和すること、さらに事故発生時のアクシデントマネジメント策や緊急時対応計画をあらかじめ準備しておくこと

基本安全原則 は、深層防護の考え方の適切な取り入れ、マネジメントやリーダーシップ、安全文化、アクシデントマネジメント策といったソフトウェア的側面が不可欠であることを示している。

「深層防護」による安全確保と設計

—その考え方の基本と過去の誤り—



第1図 深層防護の概念

これまでの誤り

これまでの誤った考えとしては、多重障壁として、燃料、被覆管、圧力容器、格納容器、原子炉建屋が、多重防護(深層防護)と誤解され、喧伝されてきた。



ハード志向、格納容器の隔離能力絶対主義が生じ、設備により安全が確保される「安全神話」を生むこととなった。

第3層までを確実にすることで、「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」が担保されるとして、規制が適用され、「万が一」についてのアクシデントマネジメントは事業者の自主対応となった。

「深層防護」

もう一度、「深層防護」について考えてみると、

原子力発電所についての深層防護は、一般には次の5つのレベルからなる。

第1層: 異常・故障の発生防止。

第2層: 異常・故障の「事故」への拡大防止。

第3層: 「事故」の影響緩和。

第4層: 「設計基準を越す事故」への施設内対策

第5層: 公衆と環境の防護のための防災対策

「設計基準を越す事故 (Beyond DBA: B-DBA) としては、DBAは超えたがまだ炉心溶融には至っていないものから、炉心溶融が起きてしまったもの (シビアアクシデント) まで含まれる。

各層は安全上の効果(effectiveness)が独立(independent)なものでなければならない。

「深層防護」による安全確保と設計

①外的事象，特に自然現象に対する防護

個々の外的事象に対してはそれに応じた安全設計が必要である。

地震動に対しては、個々の機器等について振動による構造強度に裕度をもった耐震設計が必要であり、

津波に対しては、水の侵入に対する適切な耐水、防水などの機能が必要である。

②アクシデントマネジメント策の充実

想定外の個々の自然災害が発生した後のAM策では、自然災害が招く特有の障害についても配慮した対策を考えることが重要となる。

③「想定を超える事象」への「柔軟な対応策」

発生頻度が非常に稀なところでは、大きな被害を招く事態（深い“クリフエッジ”）に対して備える柔軟なAM策が求められる。

深層防護による安全確保

シビアアクシデント対策とその実効性の確保

オンサイト、オフサイトを含めた多重、多様の安全確保がなされることに加え、AM策の実効性を確保するための訓練や演習，およびそれらの不断の見直し等の多くの因子を有機的に結び付けることが必要である。

「深層防護」による安全確保と設計

—「深層防護」と設計およびマネジメントの関係—

設計基準以内の想定事象で事故に至らないように設備設計を行うのが原則

(安全)設計の領域

(設備)設計の領域

この範囲で、
「止める」
「冷やす」
「閉じ込める」を確実に確保

設計基準

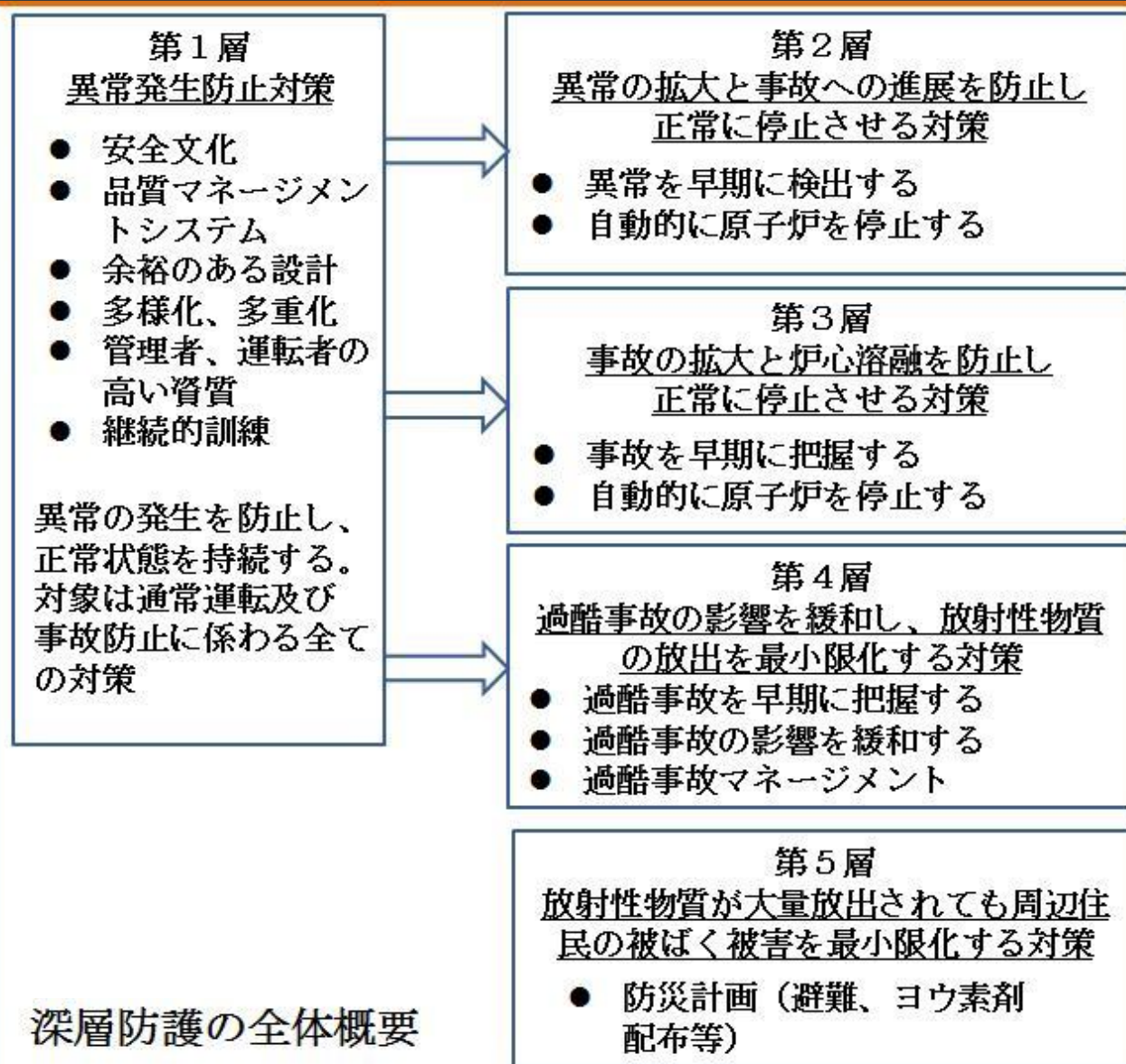
設備設計領域の拡大

マネジメントを主体とした安全確保領域

評価尺度の統一(リスク評価)
による安全設計の統合

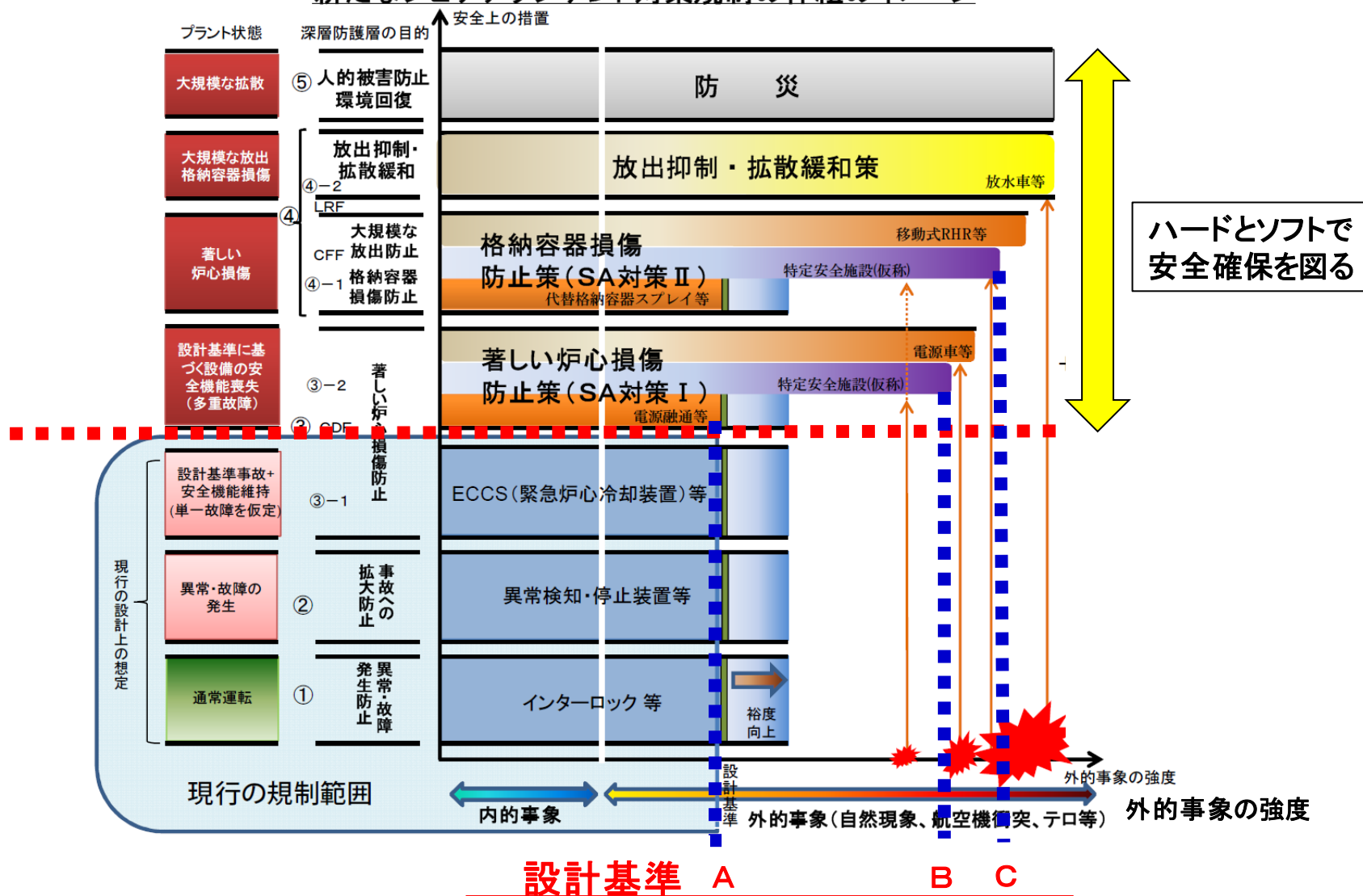
	防護 レベル	目的	目的達成に 不可欠な手段	関連する プラント状態
プラントの 当初設計	レベル1	異常運転や故障の防止	保守的設計及び建設・ 運転における高い品質	通常運転
	レベル2	異常運転の制御及び故障の検知 (異常の検知) (運転の制御)	制御、制限及び防護系、 並びにその他のサーベ ランス特性	通常時の異常な過渡変 化 (AOO)
	レベル3	設計基準内への事故の 制御 (事故の制御)	工学的安全施設及び事 故時手順	設計基準事故 (想定単一起因事象)
設計基準外	レベル4	事故の進展防止及びシ ビアアクシデントの影 響緩和を含む、苛酷な プラント状態の制御	補完的手段及び格納容 器の防護を含めた アクシデント マネジメント (AM)	多重故障 シビア・アクシデント (過酷事故)
計画 緊急時	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	(防災)

“深層防護” —階層構造—



「深層防護」による安全規制の新たな展開

新たなシビアアクシデント対策規制の枠組のイメージ



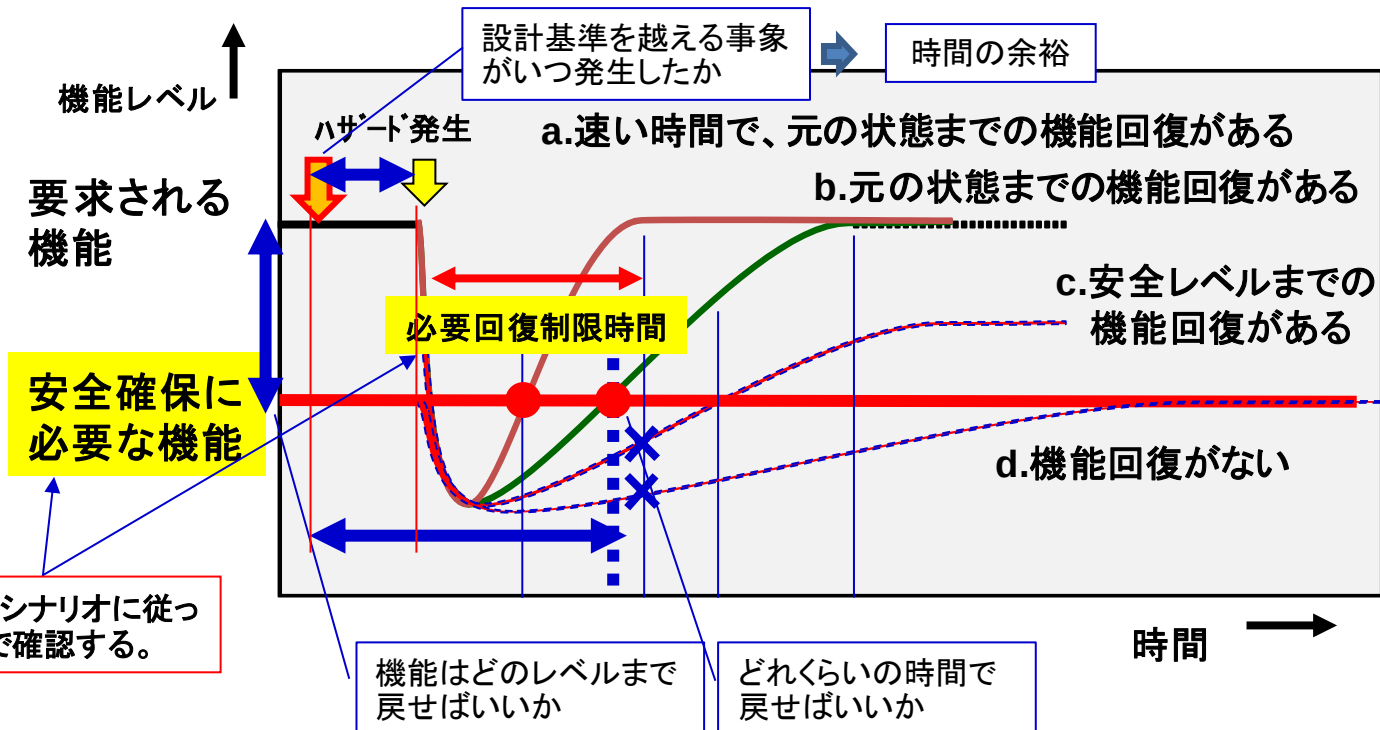
「深層防護」における機能喪失の展開と安全確保

電源機能の喪失により、停止、冷却の機能が即、喪失することになる

深層防護	バウンダリー機能	冷却機能	停止機能	その他(共通機能)
第1層	- 原子炉冷却材圧力バウンダリー(PS-1) - 原子炉冷却材を内蔵する(PS-2) - 原子炉冷却材圧力バウンダリーに直接接続されていないものであって、放射性物質を貯蔵する(PS-2) - 放射性物質放出の防止(MS-2) - 原子炉冷却材保持(PS-1/2以外)(PS-3) - 放射性物質の貯蔵(PS-3) - 核分裂生成物の原子炉冷却材中への拡散防止(PS-3)	- 炉心形状の維持(PS-1) - 通常時炉心冷却(PS-3)	- 過剰反応度の印加防止(PS-1) - 原子炉冷却材の循環(PS-3)	- 燃料を安全に取り扱う(PS-2) - 電源供給(非常用を除く)(PS-3) - プラント計画・制御(1)(2)(3)(安全保護系除く)(PS-3) - プラント運転補助(1)(2)(PS-3) - 原子炉冷却材の浄化(PS-3) 共通要因の電源系・作動信号系は全ての機能維持に重要
第2層	- 原子炉冷却材圧力バウンダリーの過圧防止(MS-1) - 安全弁及び逃がし弁の吹き止まり(PS-2)	- 原子炉停止後の除熱(MS-1) - 制御室外からの安全停止(MS-2) - 原子炉圧力の上昇の緩和(MS-3) - 原子炉冷却材の補給(MS-3)	- 原子炉の緊急停止(MS-1) - 未臨界維持(制御棒による系)(MS-1) - 未臨界維持(ほう酸水注入系)(MS-1) - 出力上昇の抑制(MS-3)	第2、3層共通 - 工学的安全施設及び原子炉停止系への作動信号の発生(MS-1) - 安全上特に重要な関連(1)(非常用所内電源系)(MS-1) - 安全上特に重要な関連(2)(制御室)(MS-1) - 安全上特に重要な関連(3)(原子炉補機冷却水系)(MS-1) - 安全上特に重要な関連(4)(直流電源系)(MS-1)
第3層	- 放射性物質の閉じ込め機能、放射線の遮へい及び放出低減(PCV)(MS-1) - 放射性物質の閉じ込め機能、放射線の遮へい及び放出低減(R/B)(MS-1)	- 炉心冷却(MS-1) - 燃料プール水の補給(MS-2)		事故時のプラント状態の把握(MS-2)
第4、5層 (*)	過酷事故対応(PCVベント)(MS-3)	- 過酷事故対応(補給水系)(MS-3) - 過酷事故対応(消火系)(MS-3)	過酷事故対応(ほう酸水注入系)(MS-3)	緊急時対策上重要なもの及び異常状態の把握(1)(2)(3)(MS-3)

深層防護のレベル4、5における回復（Resilience）への取り組み

残余のリスクとレジリエンス



安全確保のためのトータルデザイン

トータルデザイン トータルプラン

「人と環境を守る」ことを最優先とした」

「原子力安全」を確実にするために

トータルマネジメント...

深層防護の全領域を考えた
マネジメント、設備と運用の最適化
(ハードとソフトのマネジメント)

トータルプロセス...

通常運転から事故・緊急時対応
まで考慮した仕組み
(プロセスを俯瞰した安全)

トータルシステム...

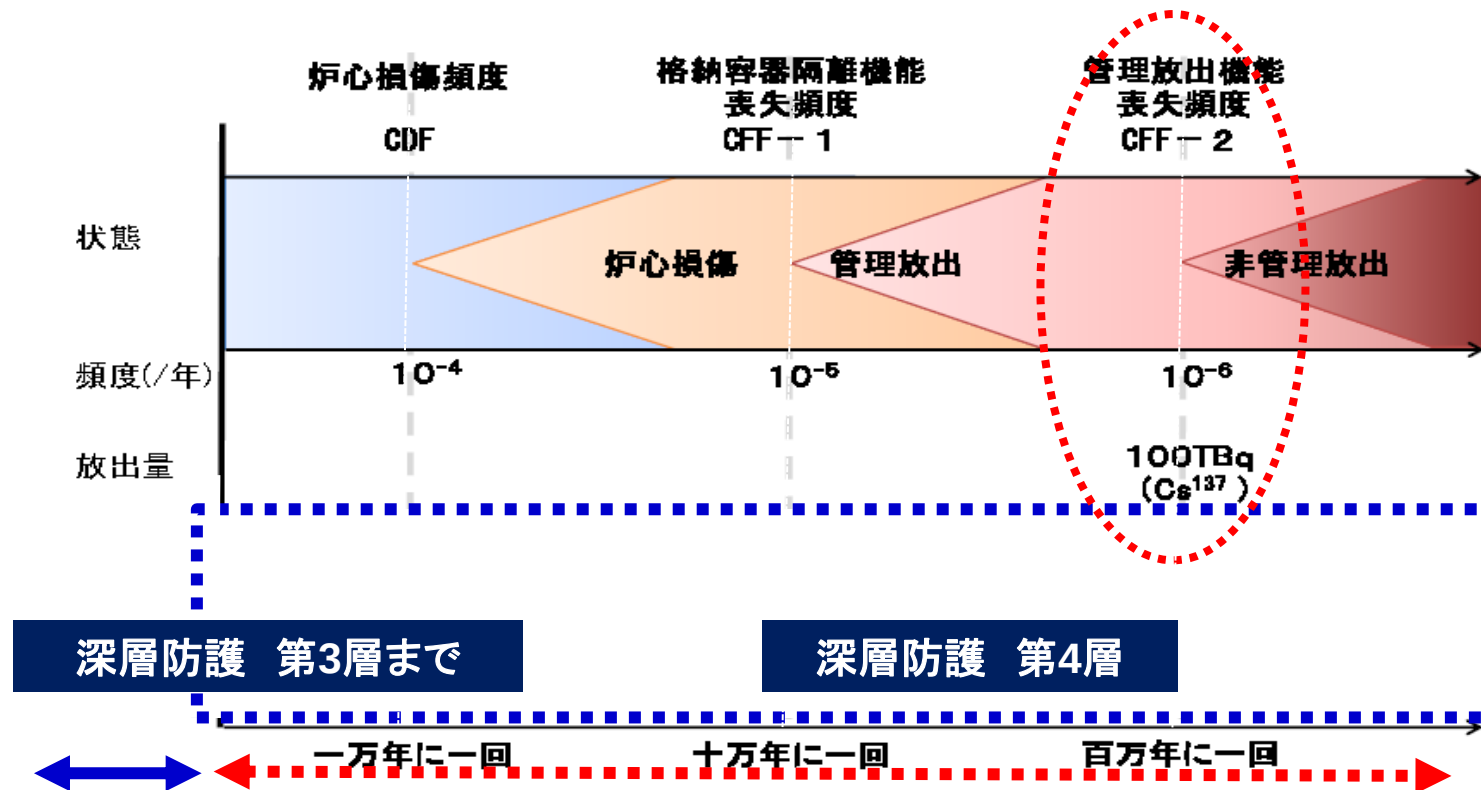
地盤・建屋・機器・配管・電気・計装等、
システム全体を考えた整合化
(システム安全)

「原子力安全の基本的考え方」

—原子力安全における安全目標、性能目標とリスク—

” How safe is safe enough?” として、決定論的な規則を補う形での性能目標が確率論的な数値として定められ活用されつつある。原子力規制委員会において、性能目標が提示された。

放射性物質放出漏えい発生頻度との関係(概念図)



深層防護における外的事象への対応

重要な原子力安全の取り組みは、安全設計においては第1層から第5層まですべての範囲で整合させて安全を確保する役割を持たせることとしたことである。

第3層までの設備設計の範疇と第4層のAM対策の範疇、第5層の防災の範疇を通して、「原子力安全」を確保するための要求を明確にすることが安全設計の役割である。

・複合事象への対応

・複数機器の機能喪失の仮定もしくは共通要因事故・故障の発生 of 仮定とその対応

プラント設備としては①全電源の喪失、②全冷却システムの喪失、③全ヒートシンクの喪失が原因であることがわかってきた。一方、AM対策としては①代替電源の不備、②代替ポンプ(消防車など)の能力不足、③想定外事象(水素爆発など)の多発の準備不足

・包括的な外的事象の影響評価

地震、津波に限らず外的事象の影響を包絡的に評価としてPRA以外も含んだリスク評価手法によりIPEEEを実施する必要があると考えられる。

IPEEE(Individual Plant Examination of External Events)により、地震、火災、強風(台風、竜巻)、洪水、雪崩、火山、氷結、高温、低温、近隣の輸送・工場、航空機落下等に対してリスクおよびプラントの脆弱性が検討

・クリフエッジの考慮

安全系の多くが機能喪失するクリフエッジが顕在化することになった。クリフエッジではどのような事態になるのか、緩和策も含めた考慮が求められる。

・設計基準を超える事態への対応

耐津波設計における深層防護の適用

IAEAの深層防護と外的事象の一つとしての津波対策の関係の例

	防護層 レベル	目的・プラント状態	目的達成に 不可欠な手段	津波評価への適用(例)
プラントの (当初)設計	レベル 1 第1層	異常運転や故障の防止 (通常運転)	保守的設計及び建設 運転における高い品質	通常運転状態が維持可能 波の進入防止・設計基準高さ
	レベル 2 第2層	異常運転の制御及び故障の検知 (異常の検知) (運転の制御)	制御、制限及び防護系 並びにその他のサーベ ランス特性	緊急の措置(運転制限、自動停止等) 津波の検知(@判断に用いる位置) 安全上必要な水位の検知
	レベル 3 第3層	設計基準内への事故の 制御 (設計基準事故制御)	工学的安全施設及び事 故時手順	非常時安全系の措置による事故収束 波の進入防止・設計基準高さ
設計基準 外	レベル 4 第4層	事故の進展防止及びシ ビアアクシデントの影 響緩和を含む、苛酷な 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(過酷事故) マネジメント (AM/SAM)	設計基準事象(事故)を越える事態 安全停止状態への移行が困難 アクシデントマネジメントの措置 (進展防止、影響緩和、等)
計画 緊急時	レベル 5 第5層	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 (防災)	地域共生 地域への津波影響の評価と緩和策 発生時の最適対応

耐津波工学の体系化に向けた活動の中間報告

地震・津波工学に求められる原子力安全

— 外的事象、共通要因故障と深層防護の関わり —

ご清聴、ありがとうございました

法政大学 宮野 廣