



リスク論に基づく津波防御の体系

東京大学大学院工学系研究科建築学専攻

高田毅士

1. リスク論に基づく意思決定
2. 地震・津波下のリスク論に基づく原子力安全確保の体系化
3. リスク論に基づく津波防御の総合的枠組
4. まとめ



G. Apostolakis (NRC)の資料より

確率的リスク評価(PRA)はリスクマネジメント実施のために以下の質問に答える。

(1) どのような事故が起こりうるか？

限定された設計事故事象とは違って、数千の事故シナリオを調べる。

(2) これらのシナリオはどれぐらいの発生頻度か？

(3) それらの事故後の結果は？

(4) どのシステムや機器が最もリスクに影響を与えるか？

リスクマネジメントの概要

(Guide 73, 2002)の定義

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の目的

地震・津波を受ける原子力発電所のリスクを計量し、社会が受容できる水準と照らして、発電所を利用するかどうかの意思決定を行うため。

- 定性的目標から**定量的目標**へのより高い議論へ（安全かどうかでなくて、どれくらい安全か？）
- 「絶対安全論至上主義」から生じるいろいろな不条理の解消
- 「**トータルシステム**」→細分化され全体が見えにくい状態の回避、
- プラントの総合的挙動評価（**ロバスト性確保**）、マルチハザードへの適切な対応の実現
- 「**トータルプロセス**」→関連分野を串刺しにした安全性の総合的定量化の実現（分野を超えた安全確保の思想の一貫性の確保）
- **異分野連携のツール**として、工学的説明性の向上
- 科学技術と社会との接点をつなぐ役割（**リスコミ**）として

確率的リスク評価の目的

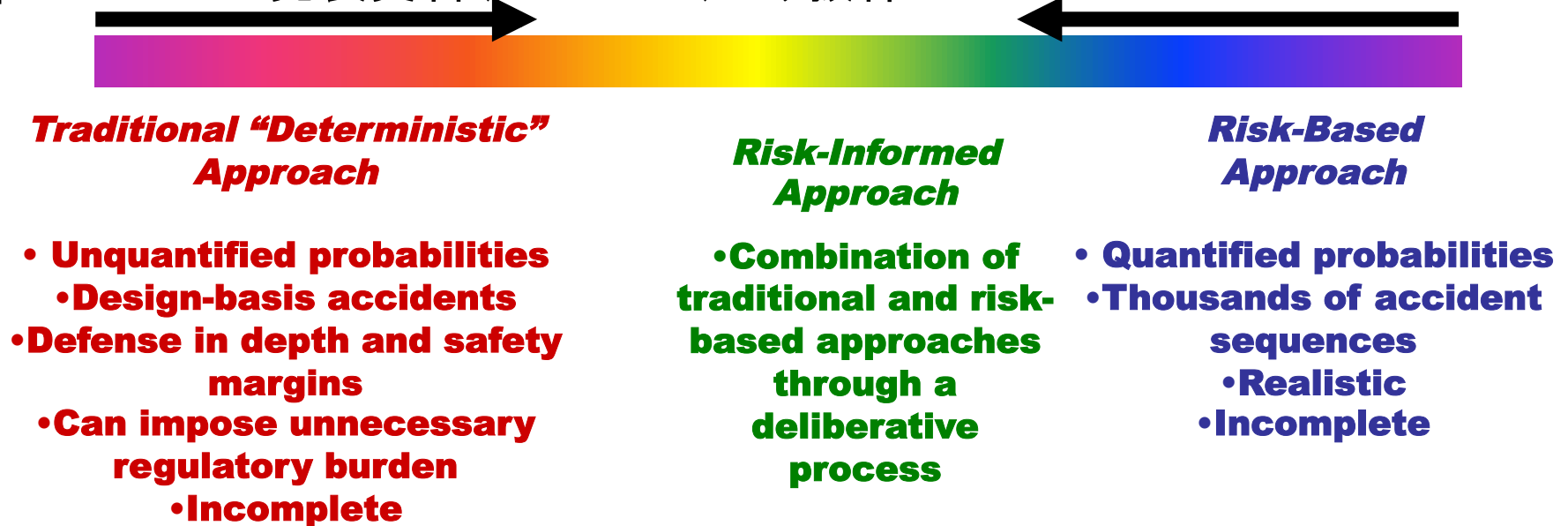
また、具体的には、以下のような幅広い取組みの実践が求められる^{3,2-7)}。

- ① 低頻度の事象を見逃さない網羅的なリスク評価の実施
- ② 深層防護の充実を通じた残余のリスクの低減
- ③ 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
- ④ 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

リスクベーストか、リスクインフォームドか？

- リスクに基づく安全設計と評価 (risk-based safety assessment and design)
- リスク情報活用した安全設計と評価 (risk-informed safety assessment and design)

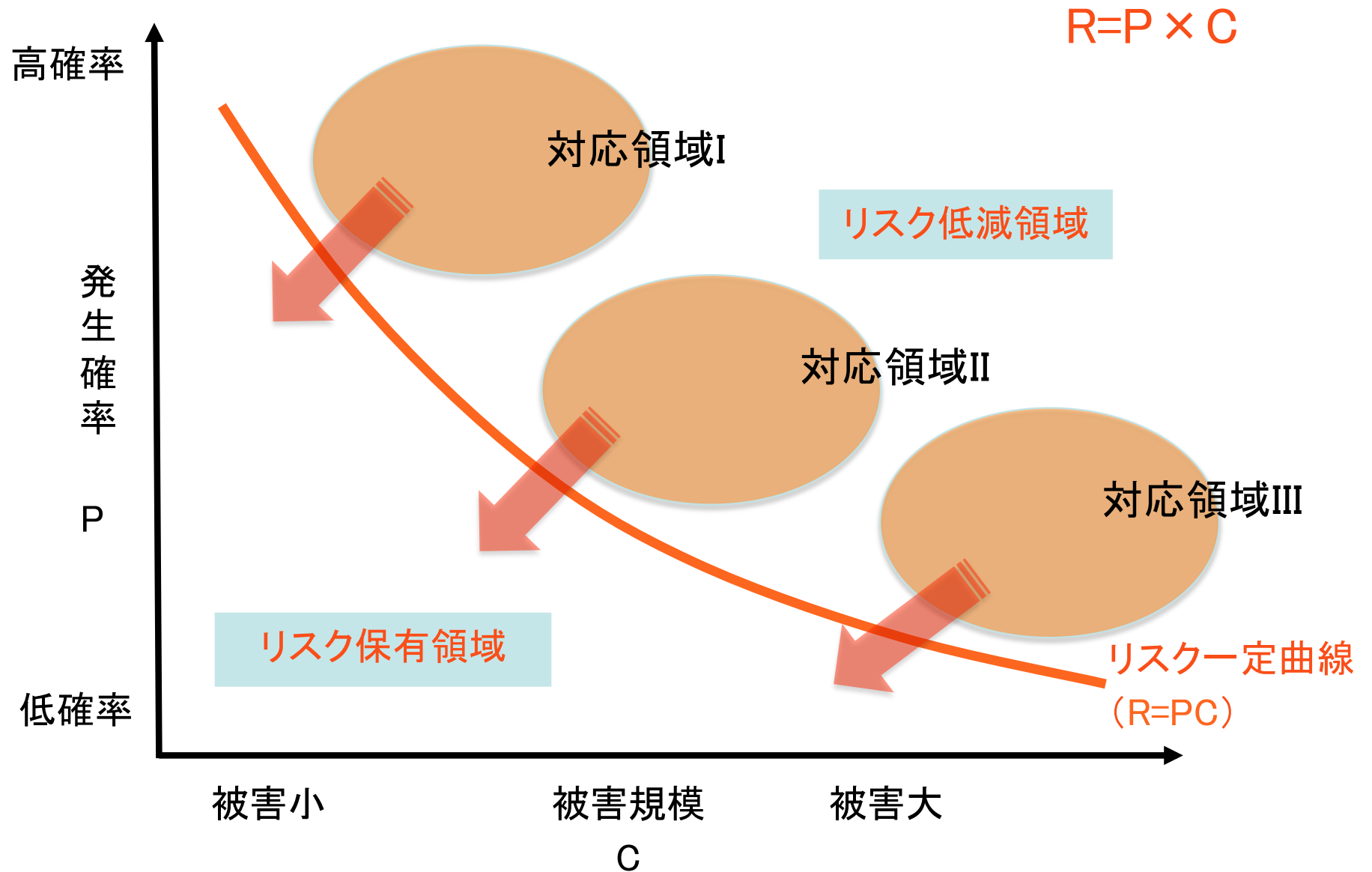
G. Apostolakis の発表資料(2014. 2)より抜粋





決定論的耐震設計	地震PRA
個々の構造物、系統、設備に適切な余裕を確保	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
固定した唯一のレベルの設計用地震外力を使用	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
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

多段階のリスクマネジメントのスキーム



地震・津波下のリスク論に基づ く原子力安全確保の体系化



新規制基準の基本的考え方（2014.2）と課題

- ①「**深層防護**」の徹底
目的達成に有効な複数の(多層の)対策を用意し、かつ、それぞれの層の対策を考えると、他の層での対策に期待しない。
- ② 共通要因故障をもたらす自然現象等に係る**想定的大幅な引き上げ**とそれに対する防護対策を強化、地震・津波の評価の厳格化、津波浸水対策の導入、多様性・独立性を十分に配慮、火山・竜巻・森林火災の評価も厳格化
- ③ **自然現象以外**の共通要因故障を引き起こす事象への対策を強化
火災防護対策の強化・徹底、内部溢水対策の導入、停電対策の強化(電源強化)
- ④ 基準では必要な「性能」を規定(**性能要求**)
基準を満たすための具体策は事業者が施設の特性に応じて選択

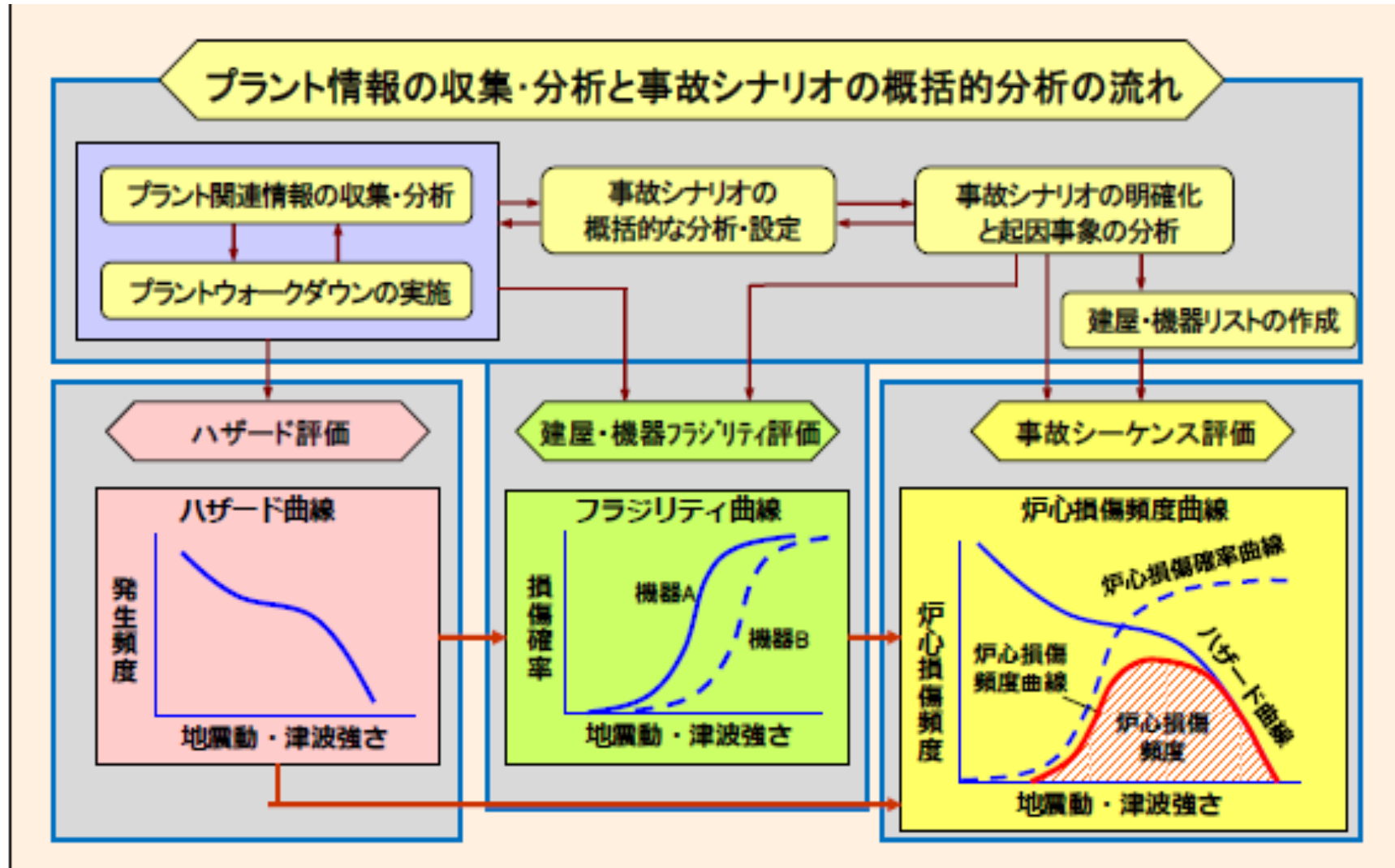
課題

- 1)どのように「深層防護」を実施するか？
- 2)リスク論への転換の必要性 ⇒ 「残余のリスク」の評価の重要性
- 3)安全目標が示されていないこと ⇒ PRAの実施の必要性
- 4)現実的に対応可能な技術が排除されてしまっていること ⇒ 多様な安全確保の受入

地震・津波PRAと考慮事項

PRAのレベル	<p>・ レベル1 PRA</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 防止あるいは緩和対策の全てもしくは部分的失敗により炉心損傷に至る内的事象と内部及び外部ハザードを考慮する 2. それぞれに起因する炉心損傷頻度(CDF), 炉心損傷へ至る事故シーケンス, それらの重要度を評価する 3. その他のリスク源(燃料プール内の使用済み燃料の冷却喪失や漏洩)を考慮する 	<p>・ レベル2 PRA</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 格納容器バウンダリ外部への放射性物質放出の特性, 影響度, 頻度を評価する 2 レベル1PRAの設備の状態に基づきそれぞれの状況にて格納容器の応答を解析する 3 環境への放出の観点から格納容器損傷シーケンスを定め放出カテゴリを設定する 4 我が国では格納容器損傷頻度(CFF), 欧米では放射性物質の(早期)大規模放出頻度(L[E]RF)を指標とする 	<p>・ レベル3 PRA</p> <p>敷地外の影響解析により, 潜在的な放出による公衆へのリスクを, 個人と社会的リスクとして評価する</p>
地震PRAでの考慮事項例	<p>地震ハザード(本震・余震)</p> <p>揺れによる外部電源喪失</p> <p>揺れによる原子炉建屋損傷</p> <p>揺れによる炉心・圧力容器損傷</p> <p>揺れによる安全機能(原子炉停止・炉心冷却・崩壊熱除去)喪失</p> <p>揺れや被害発生の影響による人的過誤の増加</p>	<p>地震ハザード(本震・余震)</p> <p>揺れによる格納容器損傷</p> <p>揺れや被害発生によるアクシデントマネジメント策の失敗・遅れ</p> <p>揺れや被害発生の影響による人的過誤の増加</p>	<p>地震ハザード(本震・余震)</p> <p>揺れによるサイト外(インフラ・一般建築)被害下での避難等原子力防災・減災の有効性</p>
津波PRAでの考慮事項例	<p>津波ハザード(本震・余震)</p> <p>津波の防潮堤越波・防潮堤損傷</p> <p>津波のサイト内・建屋内への流入</p> <p>津波による電源喪失</p> <p>機器等の被水</p>	<p>津波ハザード(本震・余震)</p> <p>浸水, 漂流物流入, 余震影響によるアクシデントマネジメント策の失敗・遅れ</p>	<p>津波ハザード(本震・余震)</p> <p>周辺地域の広域津波被害</p> <p>津波被害(インフラ・一般建築)下での避難等原子力防災・減災の有効性</p>

レベル 1 PRA



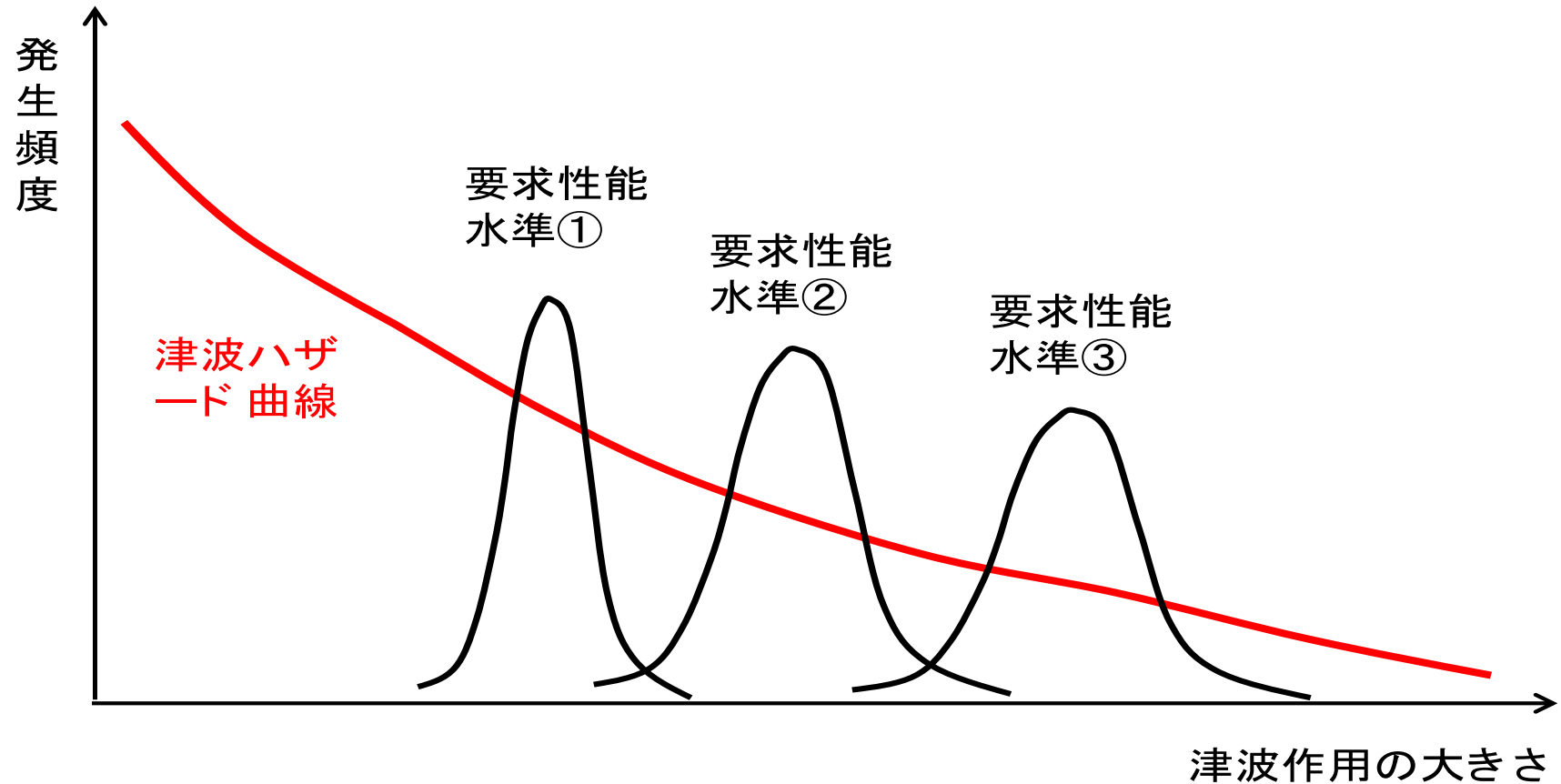
認識論的不確定性評価のための専門家の活用レベル

専門家活用 水準	課題の程度	検討方法
活用水準 1	ハザードへの影響 度が小さい場合	TI が文献レビュー, 経験に基づきモデルを評 価し, コミュニティ分布を見積もる
活用水準 2	ハザードに影響, 意 見の違いがある場 合	TI がモデル提案者や関連の専門家と接触し, 見解や根拠を聞き, コミュニティ分布を見積も る
活用水準 3	ハザードに最も影 響, 意見の違いがあ り複雑な場合	TI がモデル提案者や関連の専門家を一堂に 集めて討論を持ち, 提案の改善, 絞り込みを 行って, コミュニティ分布を見積もる
活用水準 4	同上(注)	TFI が専門家パネルを組織し, 議論の焦点を 絞る。各評価者のコミュニティ分布の見積もり を引き出し集約する。

TI(Technical Integrator)/TFI(Technical Facilitator/Integrator) 技術的まとめ役
注: より組織的に実施する場合

USNRC, NUREG/CR-6382, SSHAC (Senior Seismic Hazard Analysis Committee), 1997

津波ハザードと要求性能毎のフラジリティ曲線

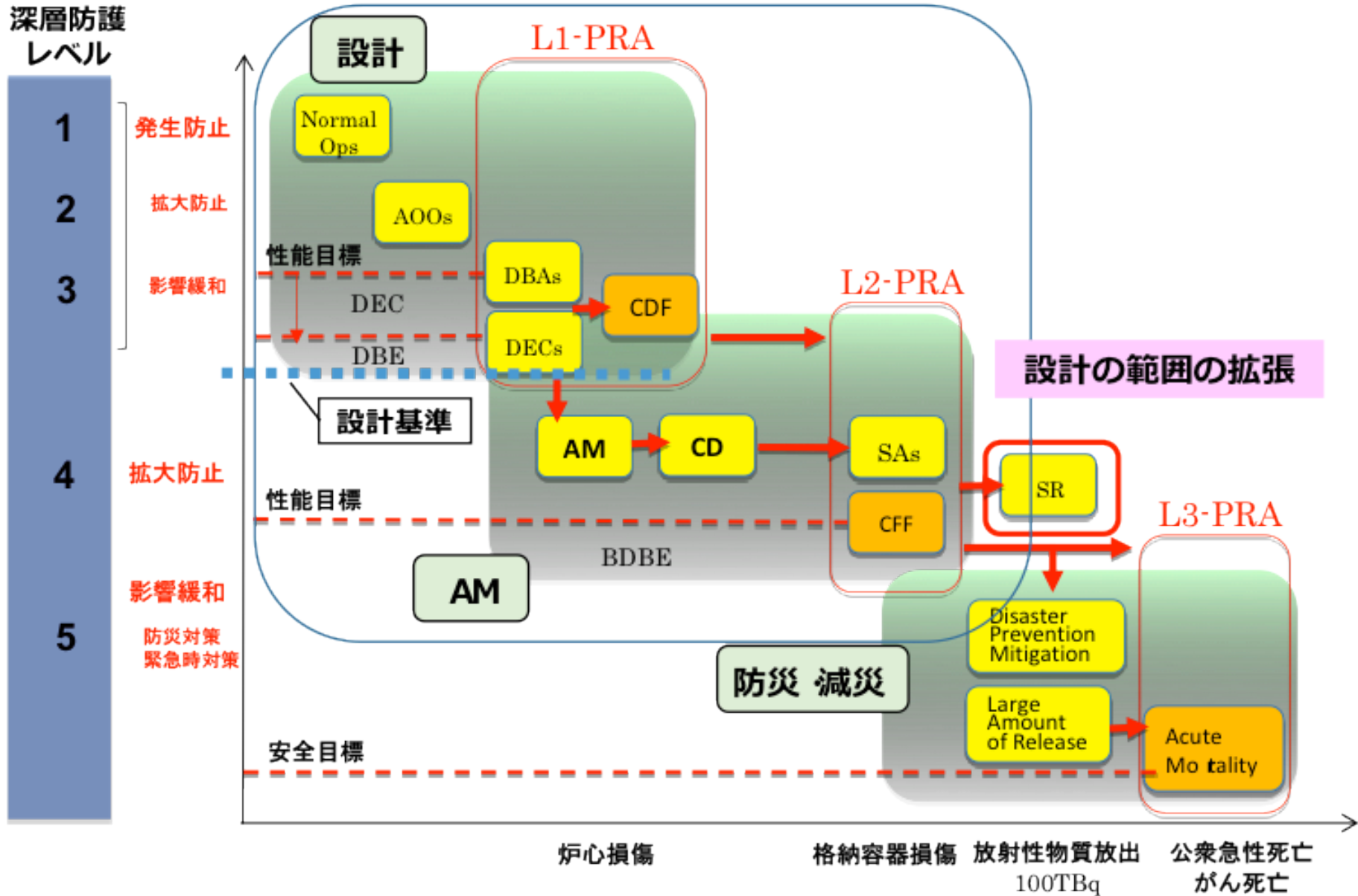


リスク論に基づく津波防御の総合的枠組 (設計—AM対策—防災—リスク評価)





設計—AM対策—防災—リスク評価の領域(再掲)





深層防護からみた耐震・耐津波設計とリスク評価の役割

FACULTY OF ENGINEERING
THE UNIVERSITY OF TOKYO

深層防護 レベル	1	2	3	4	5
	異常発生防止	異常検知	設計基準事故	アクシデント マネジメント(AM) 炉心溶融事故 に対するマネジ メント)	原子力防災 敷地内・敷地外 での緊急時対 応)
設計の 対象	想定する地震 動・津波に対して 施設に異常が発 生しないように 防潮堤などを) 設計	想定する地震 動・津波に対して 津波の検知や自 動停止ができる ように 津波検知 機能などを)設計	想定する地震 動・津波に対して 発生する事故が 設計基準事故に 収まるよう安全 機能を設計	AMで必要となる 施設の設計・可 搬設備の準備	避難等の計画
施設の 耐震設計	設計地震動に基づく耐震設計			※2	
施設の耐 津波設計	設計水準津波に 基づく耐津波設計	事故水準津波※1に基づく耐津波設計		※2	
地震・津波 リスク評価	レベル1PRAによる有効性検証			レベル2PRAによ る有効性検証	レベル3PRAによ る有効性検証

設計基準

※1 耐津波設計では、設計水準津波（異常発生防止用設計津波）に対して防潮堤の設計を行うと、敷地内には浸水がなく安全機能に対する設計を行うことができない。そのため、深層防護のレベル2、3に対するSSCの設計にあたっては設計津波とは異なる津波を想定する必要がある

※2 AM（防災を対象としたSSC）は、設計基準に対して適切に耐震・耐津波設計を行うことで、AM（防災領域）に機能させる。十分な機能が確保されるかどうかはレベル2、3PRA等で確認・検証する

耐津波設計法における複数津波レベル

表3.5-1 施設やSSCに対する耐津波性能設計の枠組みの例

		設計対象となる性能(深層防護レベル)		
		異常発生防止のためのSSC	異常検知・設計基準事故のためのSSC	AM・防災のためのSSC
津波レベル	設計水準津波	多少の損傷があっても機能を満たすことを確認	損傷せずに機能を満たすことを確認	※1
	事故水準津波	他のSSCへ波及的影響を与えないことを確認	多少の損傷があっても機能を満たすことを確認	損傷せずに機能を満たすことを確認
	想定事故津波	※2	※2	※2

※1 レベル2の津波に対して無損傷を確認しているので確認不要

※2 設計では冗長性や多様性などを工夫することで性能を与え、津波PRAでその性能が確認・検証される

耐津波設計におけるリスク論の役割

- ① 残余のリスクの定義と扱い
- ② 決定論的評価基準の策定および妥当性の検討
- ③ 深層防護のバランスの検討
- ④ SSCの耐津波性能水準の決定・耐津波重要度の決定のためのインプット
- ⑤ 設計や安全性向上策の代替案の評価
- ⑥ 敷地内および敷地外緊急時対応(原子力防災)
- ⑦ 重要な起因事象・事故シーケンスの特定

まとめ

1. リスク論の重要性の意義
2. 耐津波工学におけるリスク論の実装
「深層防護」概念の実展,
リスク評価、設計、SA、防災の相互連携
3. 津波PRAの実施
津波ハザード、津波フラジリティ、事故シーケンス評価
レベル1, 2, 3
4. リスク論に基づく津波防御の総合的枠組