

第5回WG資料5-4 改訂版

原子力発電部会
「次期軽水炉の技術要件検討」ワーキンググループ

【第4回議題】

第2回(恒設/可搬型SA設備)及び第3回(APCその他テロ対策)に係る論点整理を踏まえた深層防護の実装について

R0: 2019.4.24

R1: 2019.8.1

R2: 2019.11.8

目次

1. 深層防護全体の考え方について
 2. 既設炉における深層防護の実装と設備対応の例
 3. 新設炉における深層防護の実装について
 4. 新設炉の検討において今後取り組むべき項目
 5. まとめ
- (参考 1) 深層防護に関する海外の規制動向
- (参考 2) 層間の独立性について
- (参考 3) 新設炉の設計例
- (参考 4) 深層防護レベルの厚さのイメージ
- (参考 5) 新設炉におけるPRAの活用例
- (参考 6) PEの定義に関するIAEA文書の抜粋

1. 深層防護全体の考え方について

➤ 深層防護とは、不確かさへの備えとして、多種の防護策を組み合わせることで、全体としてできるだけ防護の信頼性を向上させるものであり、実装にあたっては、以下の方針を用いることとする。

- ① 原子力安全の目的を達成するために貢献できる複数の防護の目的（防護レベル、護るべきもの）を設定する。
- ② 防護レベルの目的を達成するため、各防護レベルを突破されないための防止策と、防護レベルを突破された時の緩和策を設定する。
- ③ 異なった防護レベル間の防止策・緩和策は、「広義の独立性」を有するように設定する。

性能要求		事故の発生防止	炉心に閉じ込め	原子炉容器に閉じ込め	格納容器内に閉じ込め	サイト内に閉じ込め
防止		異常発生を防止	DBAを防止	重大事故を防止	格納容器損傷を防止	放射性物質放出を防止
緩和		異常の段階で検知・収束	工学的安全施設で収束	格納容器に閉じ込めて収束	放射性物質放出を管理	敷地外緊急対応
有効性評価		原子炉計装 原子炉保護	設計基準事象発生頻度と影響度	レベル1 PRA 炉心損傷シナリオ	レベル2 PRA ソースタームCV破損シナリオ	レベル3 PRA 放射性物質放出シナリオ
性能目標		設備の信頼度目標	工学的安全系の信頼度目標	炉心冷却形状維持の信頼度目標 10 ⁻⁴ /炉年	格納容器の信頼度目標 10 ⁻⁵ /炉年	放出管理の信頼度目標Cs ¹³⁷ 100TBq 10 ⁻⁶ /年

図 4.2.2. 深層防護の実装例^[13]

一般財団法人日本原子力学会「社会と共存する魅力的な軽水炉の展望」調査専門委員会 報告書平成29年3月 より

➤ また、防護レベルの設定の考え方について、「防護策全体の性能を高めるためには、各レベルが適切な厚みを持ち、各レベルの防護策がバランス良く講じられ、あるレベルの防護策に負担が集中しないことが重要である」とされている。

2. 既設炉における深層防護の実装と設備対応の例（1/2）

➤ 福島第一原発事故を踏まえた新規規制基準における深層防護の実装イメージを以下に示す。

深層防護の目的※	防止策（例）	緩和策（例）
異常・故障発生防止	外部ハザード由来のリスクの低い立地の選定	安全余裕を含む適切な設計
事故への拡大防止	異常発生の防止	異常の段階で検知・収束
著しい炉心損傷防止 （設計基準事故＋安全機能維持（単一故障を仮定））	DBA基準逸脱の防止	工学的安全施設による事故の収束
著しい炉心損傷防止 （設計基準に基づく安全機能喪失（多重故障））	重大事故の防止	格納容器内において事故を収束
大規模な放出防止 格納容器破損防止	格納容器破損を防止	放射性物質の放出を抑制
放出抑制・拡散緩和 人的被害防止、環境回復	放射性物質の大規模放出を防止	敷地外緊急対応

※ 旧原子力安全・保安院「発電用軽水炉型原子力施設におけるシビアアクシデント対策の基本的考え方について（現時点での検討状況）」平成24年8月27日にて示される深層防護の目的より引用

2. 既設炉における深層防護の実装と設備対応の例 (2/2)

➤ 深層防護の各層に対する既設炉での設備対応の例と、そこから抽出される論点について以下に示す。

深層防護の目的	既設炉における設備対応の例	論点
異常・故障発生防止	発生防止系設備	<p>内的事象、外的事象、APCその他テロへの対応の観点で、既設炉より強化する余地がある。(第3回WGにて議論)</p>
事故への拡大防止	<p>恒設の設計基準対象施設 ×複数系列</p>	
著しい炉心損傷防止 (設計基準事故+安全機能維持(単一故障を仮定))		
著しい炉心損傷防止 (設計基準に基づく安全機能喪失(多重故障))	<p style="text-align: center;">SA設備</p> <p>可搬型SA設備</p> <p>恒設SA設備</p> <p>特重施設 (APC その他テロ)</p>	<p>以下の点で新設炉では信頼性向上の余地がある。(第2回WGにて議論)</p> <ul style="list-style-type: none"> 主に可搬型設備を用いた対応となっており、作業員負担が大きく、人的リスクが大きい
大規模な放出防止 格納容器破損防止		<p>上記と同じく、既設炉においては主に可搬型設備を用いた対応としている点に対して、新設炉では信頼性向上の余地がある。(第2回WGにて議論)</p> <p>SA設備に加えて、特重施設も同じ格納容器破損防止を目的に設置しており、同目的に対して重点が置かれた対策となっていることから、最適化の余地がある。(第3回WGにて議論)</p>
放出抑制・拡散緩和 人的被害防止、環境回復		<p>可搬型の放水砲等を配備しているものの、大規模放出に備えた格納容器への放水などに用途が限られた設備であり、訓練等の運用性の面で信頼性向上の余地がある(第2回WGにて議論)</p>

3. 新設炉における深層防護の実装について（1/5）

- 新設炉に対する深層防護の考え方は様々な機関から提唱されており、国や地域による差異があるものの、本WGにおいては一例として国際的な安全規格であるIAEAが提唱する深層防護の戦略に基づき、深層防護の実装について考える。^{注)}

IAEAの提唱する深層防護の戦略（アプローチ2）

深層防護レベル	深層防護の目的	必須の設計手段	必須の操作手段
レベル1	異常運転および故障発生防止	監視・制御システムを含む通常の運用システムの保守的な設計と、高い品質	運用ルールと通常の運用手順
レベル2	異常状態の制御 故障の検知	制御・保護システム及びその他の監視機能	異常時の操作手順/緊急時の操作手順
レベル3	DBAの制御	安全系機能（安全システム）	緊急時の操作手順
レベル4a	炉心溶融を回避するためのDECの制御	炉心溶融を伴わないDECに対処するための安全系機能	緊急時の操作手順
レベル4b	SAの影響を緩和するためのDECの制御	炉心溶融を伴うDECに対処するための安全系機能 テクニカルサポートセンター	補完的な緊急時の作業手順/ 重大事故管理のガイドライン
レベル5	重大な放射性物質の放出による放射線影響の緩和	サイト内外の緊急対応施設※	サイト内外の緊急計画※

Ref. IAEA-TECDOC-1791 “Considerations on the Application of the IAEA Safety Requirements for the Design of Nuclear Power Plant”

注) 新規制基準の条文（第二章が設計基準対象施設、第三章が重大事故等対処施設）に近いIAEA（アプローチ2）を選定。海外で深層防護について提唱している機関は主にWENRAとIAEAがあり、IAEAのアプローチ2ではDBAをレベル3、DECをレベル4としているが、IAEAのアプローチ1及びWENRAでは、炉心損傷防止をレベル3、CV破損防止をレベル4としている。

※ 放水砲等の放射性物質拡散抑制対策は本WGの議論の対象とする。

3. 新設炉における深層防護の実装について (2/5)

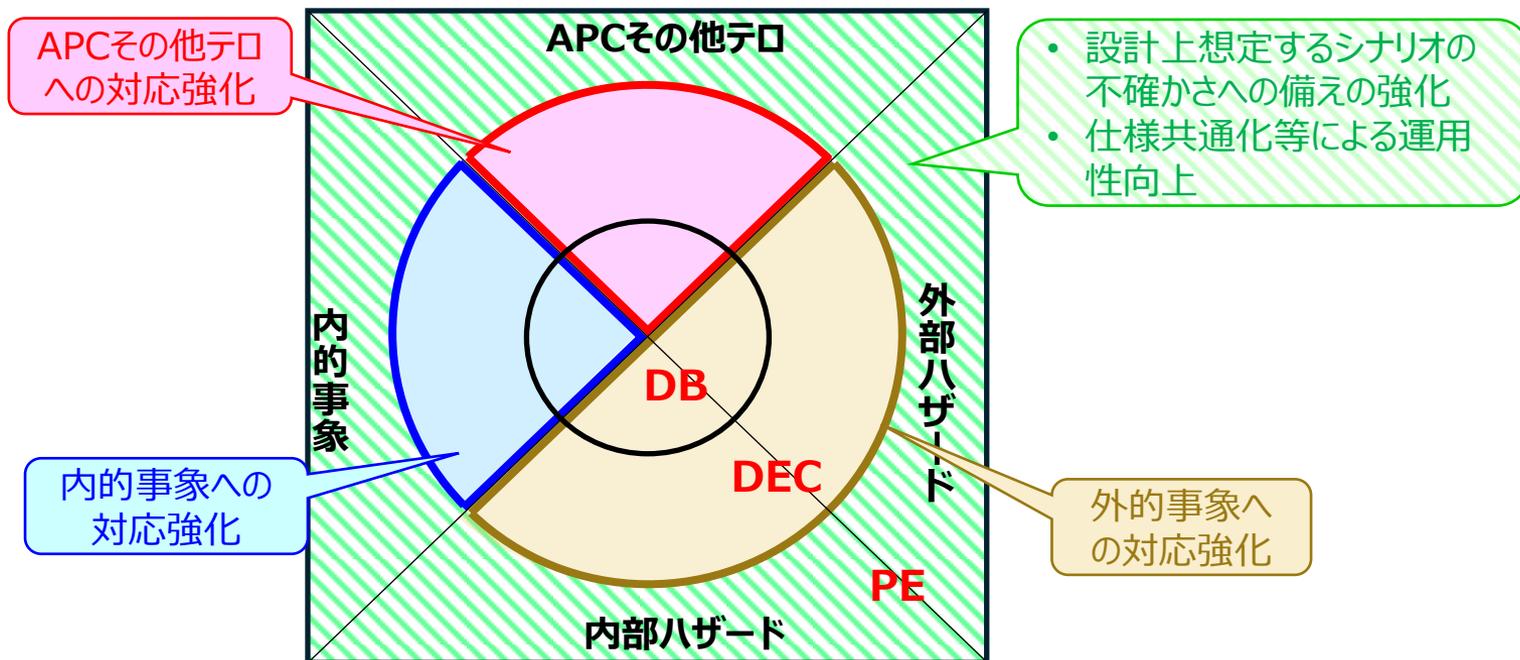
- 既設炉の深層防護の整理から抽出された論点を踏まえ、新設炉としてIAEAの深層防護戦略を基に、深層防護の各層に対して以下の強化方針をとることで、プラント全体としての信頼性を向上させることが可能。

深層防護レベル	深層防護の目的	防止策 (例)	緩和策 (例)	既設炉の論点整理を踏まえた新設炉の強化方針					
				想定事象への対応 (次頁を参照)				APCその他テロ	不確かさへの備え (PE※への配慮)
				内的事象	外的事象				
				内部ハザード	外部ハザード				
レベル1	異常・故障発生防止	外部ハザード由来のリスクの低い立地の選定	安全余裕を含む適切な設計	<ul style="list-style-type: none"> 多重性の強化 恒設設備による管理・運用性の向上 	<ul style="list-style-type: none"> 独立性 (区画分離) の強化 	<ul style="list-style-type: none"> 建屋の耐性強化 独立性 (区画分離) の強化 	<ul style="list-style-type: none"> 建屋の耐性強化 独立性(区画分離や、分散配置)の強化による耐性向上 	<ul style="list-style-type: none"> 設計上想定するシナリオの不確かさへの備えとして、可搬型設備等を事象緩和に活用することで、信頼性を向上 可搬型設備の仕様共通化等により運用性を向上 	
レベル2	異常状態の制御故障の検知	異常発生の防止	異常の段階で検知・収束						
レベル3	DBAの制御	DBA基準逸脱の防止	工学的安全施設による事故の収束						
レベル4a	炉心溶融を回避するためのDECの制御	重大事故の防止	格納容器内において事故を収束		<ul style="list-style-type: none"> 独立性 (区画分離) の確保 	<ul style="list-style-type: none"> 恒設設備による管理・運用性の向上 独立性 (区画分離) の確保 			
レベル4b	SAの影響を緩和するためのDECの制御	格納容器破損を防止	放射性物質の放出を抑制						
レベル5	重大な放射性物質の放出による放射線影響の緩和	放射性物質の大規模放出を防止	敷地外緊急対応	-	-	-			

※ PE(Practically eliminate)については、IAEA の原子力発電所の原子炉格納系の設計(NS-G-1.10)、同安全設計要求(SSR-2/1)によれば、早期或いは大規模放射性物質の放出に繋がるシーケンスをPEとすべきであり、それは“ある状態が発現する可能性は、物理的に発生し得ない、あるいは、高い信頼水準で極めて発生しがたいと判断される場合、「実質上除外される」と考えられる”と定義されている。本WGでのPEはこれに従った解釈とする。

3. 新設炉における深層防護の実装について (3/5)

- 前ページにて整理した新設炉の強化方針は下図※の通りとなる。新設炉では全ての想定事象に対して対応を強化する方針
- 新設炉では、DECシナリオを適切に設定の上、恒設設備で対応することで、放射性物質の大規模放出を実質的に排除（PE）できるように設計するが、PEに対しても配慮する方針



参考-想定事象の分類

- 内的事象 (Internal event)
- 外的事象 (External event)
 - └ 内部ハザード (Internal hazard) : 内部溢水、内部火災等
 - └ 外部ハザード (External hazard) : 地震、津波等
- APCその他テロ

※外的事象、及びAPCその他テロは、深層防護の目的等を表すものではなく、そのレベルにおけるプラント状態を表しており、深層防護の各層、DB、DECという定義とリンクしないが、内的事象でレベル1~4で分類している手段を外的事象、及びAPCその他テロへの対応に置き換え、強化する範囲をイメージで示す。

3. 新設炉における深層防護の実装について（4/5）

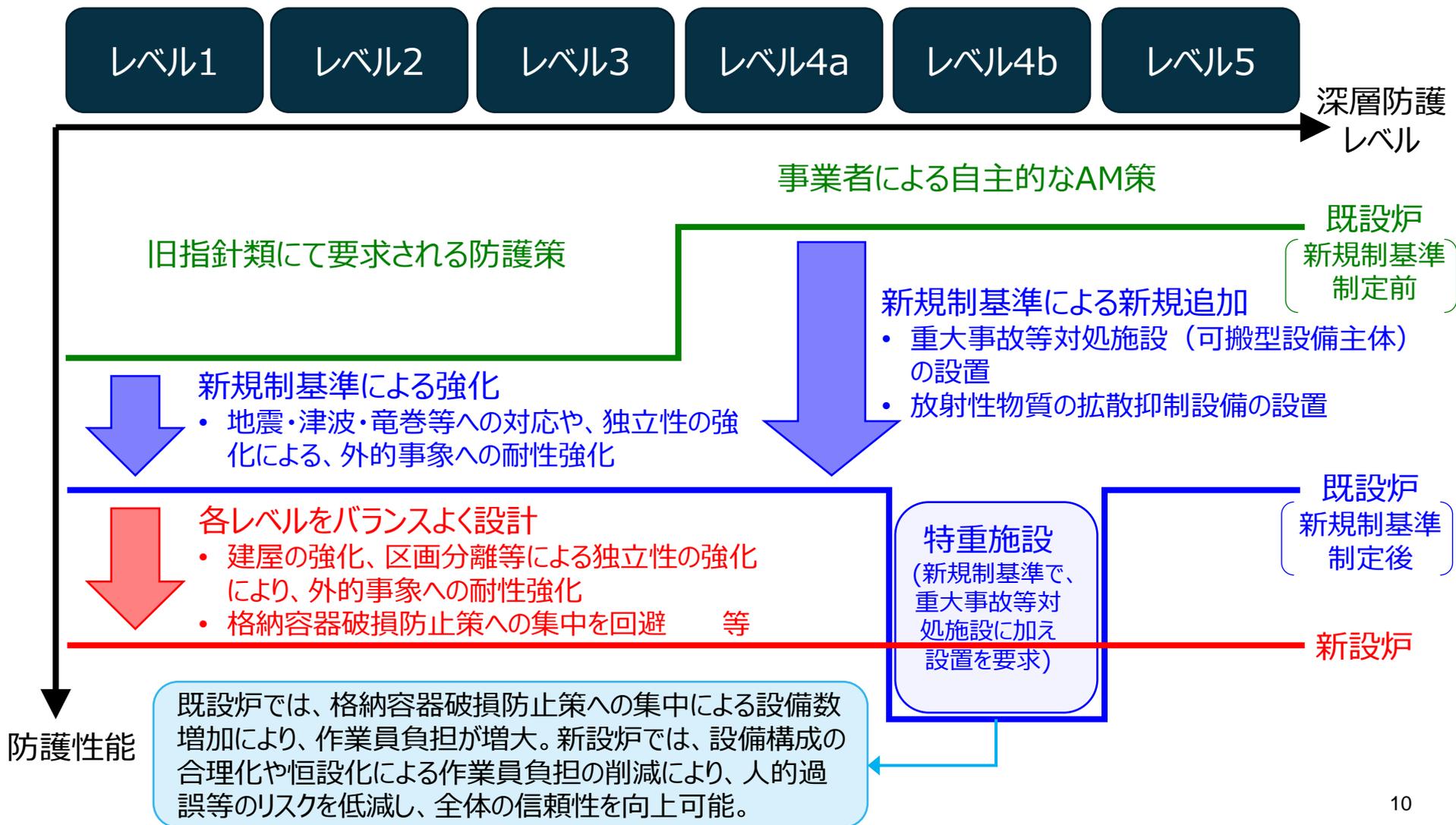
- P.7に各深層防護レベルの基本的な強化方針をまとめたが、その他考慮する新設炉における対応方針を纏める。

技術要件	新設炉における対応方針案
冗長性 多重性 多様性 独立性	✓ 防護レベルに関係なく、同一の機能を持つ複数の設備が、同時に機能を喪失しない設計とする。
層間の 独立性	✓ 有効な層間の独立性を各深層防護レベル間に確保（層間独立については参考1,2を参照） ✓ あるレベルの防護策に負担が集中しないよう、各レベルの防護策をバランス良く講じる。（1章の基本的考え方に基づく）
外部ハザード への耐性※	✓ 想定する外部ハザードに対して十分な耐性を有する設計とする（新設炉では設計段階から計画することにより耐性を強化（津波に対し、敷地嵩上げによるドライサイト化など）） ✓ 外部ハザードの想定に対する不確かさへの対処として以下の設計を実施することで、既設炉に比べて信頼性の向上が可能 ・ 設計基準に対し多様性を確保した設計 ・ 可搬型設備等の整備(第2回WGにて議論した、設備面/運用面を含む対応)

※ SFP（使用済燃料プール）についても外部ハザードに対して十分な耐性を確保するものとする。

3. 新設炉における深層防護の実装について (5/5)

- 深層防護の各レベルは適切な厚みを持ち、各レベルの防護策がバランス良く講じられることが重要
- 既設炉（新規規制基準制定前後）の各レベルの防護策の厚さ、及び新設炉として目指すべき防護策の厚さのイメージは以下の通り表現できる。



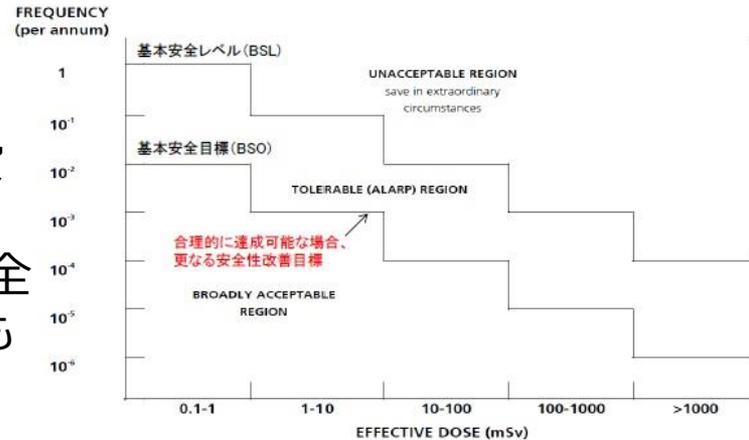
4. 新設炉の検討において今後取り組むべき項目

新設炉においては、各レベルの防護策をバランス良く講じるための設計を実施することが重要であり、今後取り組むべき項目を以下にまとめる。

➤ 防護レベルの性能目標設定

炉心損傷や格納容器破損等に関する性能目標を設定する。

なお、性能目標については、英国ONRにある基本安全レベル(BSL)と、基本安全目標(BSO)の考え方などもあり、参考とすることができる。



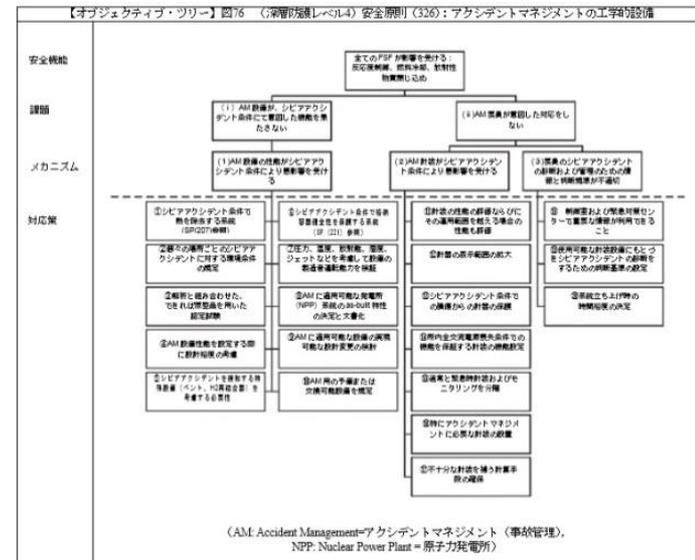
➤ 防護策の有効性評価

- SRS-46^{注)}におけるオブジェクティブツリーを用いて深層防護の有効性を評価する。
- 内的事象、外的事象に対して十分な耐性を有すること、並びに性能目標に対する設計の有効性をPRAにて確認する。

➤ 効果的手段の実装

各防護レベルのバランスを高めるためには、オブジェクティブツリー等を用いた決定論的な評価、PRAを用いた確率論的な評価を用い、IRIDM (Integrated Risk Informed Decision Making) 等を活用して、効果的な手段を実装する。

英国ONRによるBSL、BSOの設定



オブジェクティブツリー (例)

注) IAEA Safety Reports Series No.46 " Assessment of Defence in Depth for Nuclear Power Plants "

5. まとめ

第2回WG及び第3回WGにて議論した、恒設/可搬型SA設備、APCその他テロ対策の設備構成のあり方等を深層防護の概念に照らし合わせ、新設炉への実装の考え方を整理した。

- 深層防護各レベルの信頼性を向上するとともに、各レベルの防護策をバランスよく講じる。具体的には以下の通り。
 - 恒設設備の独立性等を向上するとともに、不確かさに対しては可搬型設備等で備えることが、深層防護の信頼性を高めることに有効
 - ✓ 建屋頑健化、または区画分離の徹底を図ることで、トレン間及び設計基準対象設備とSA設備間の独立性を強化
 - ✓ 恒設設備を主体とすることで、管理運用性を向上
 - ✓ 設計段階から外部ハザードを考慮することで、各レベルの耐性を向上
 - ✓ 設計上想定するシナリオの不確かさへの備えとして、可搬型設備等により柔軟性を確保
 - ある防護レベルに負担が集中しないよう、各レベルの防護策をバランス良く講じることが有効
 - ✓ CV破損防止機能に集中していた防護策を最適化することで、深層防護策全体の性能を向上
 - ✓ SA設備の恒設/可搬型を最適化することで、作業員負担を軽減し、人的過誤のリスク等を低減

 **深層防護全体としての実効性を合理的に向上可能**

なお、実設計においては、適切な性能目標を定め、PRA等の手法を用いた有効性評価を実施の上、効果的な手段を実装していくことが必要である。

新設炉の信頼性を合理的に向上していくため、現行の新規制基準の思想に加えて、深層防護の考え方を設計段階から考慮していくことが望まれる。

(参考 1) 深層防護に関する海外の規制動向 (1/2)

NRC :

- NRC Glossaryにおいて深層防護は放射能や有害物質の放出に繋がる事故の発生防止と緩和のため、人的／機械的な失敗に対して多重で独立な複数の防護層 (layers)を設ける事が重要と定義されている。
- NUREG KM-0009 “Historical Review and Observations of Defense-in-Depth”で深層防護に関するNRCの議論を総括。複数の関連する論文では微妙に定義が異なるが総じて以下の**3つの防護ライン** (three lines of defense) が深層防護のレベルの区分として議論されている。
 - ✓ レベル 1 : 事故の発生防止
 - ✓ レベル 2 : 万一事故が起こった場合の緩和
 - ✓ レベル 3 : 放射能放出が発生した場合の公衆の健康被害を最小とする
緊急時対策
- レベル間の独立性等の深層防護を適用する具体的な指針は明確に規定されていないものの**リスクを定量化し、対応の有効性を示す**ことなどを提言 (NUREG KM-0009セクション9.2.5 “Criteria Determining Defense-in-depth Adequacy”)
- SECY-93-087 “POLICY, TECHNICAL, AND LICENSING ISSUES PERTAINING TO EVOLUTIONARY AND ADVANCED LIGHT-WATER REACTOR (ALWR) DESIGNS”の I 章 L.項の“Equipment Survivability”において**SA対応設備には10 CFR 50 Appendix Aで課せられているような多重性／多様性は要求しない**と見解が示されている。

(参考 1) 深層防護に関する海外の規制動向 (2/2)

IAEA :

- TECDOC-1791 セクション4.3において深層防護へのアプローチについて右表の**5層の区分** (Level 3、4の細区分の違いにより2種のアプローチ) が示されている。
- SSR 2_1 Requirement 7 で深層防護を設計に考慮することを要求。また、深層防護のレベルには**実用上可能な範囲で独立性を有することを要求** (“...shall be independent as far as practicable”)
- TECDOC-1791 セクション8.4にDECに対しては**単一故障基準に準拠するための多重性の必要は無い** (機能としての信頼性が適切に達成されていれば良い) と解説あり。

TABLE 4. LEVELS OF DEFENCE IN DEPTH FOR THE DESIGN OF NEW NUCLEAR POWER PLANTS

Level of defence Approach 1	Objective	Essential design means	Essential operational means	Level of defence Approach 2
Level 1	Prevention of abnormal operation and failures	Conservative design and high quality in construction of normal operation systems, including monitoring and control systems	Operational rules and normal operating procedures	Level 1
Level 2	Control of abnormal operation and detection of failures	Limitation and protection systems and other surveillance features	Abnormal operating procedures/emergency operating procedures	Level 2
Level 3	3a Control of design basis accidents	Engineered safety features (safety systems)	Emergency operating procedures	Level 3
	3b Control of design extension conditions to prevent core melt	Safety features for design extension conditions without core melt	Emergency operating procedures	4a Level 4
Level 4	Control of design extension conditions to mitigate the consequences of severe accidents	Safety features for design extension conditions with core melt. Technical Support Centre	Complementary emergency operating procedures/severe accident management guidelines	4b
Level 5	Mitigation of radiological consequences of significant releases of radioactive materials	On-site and off-site emergency response facilities	On-site and off-site emergency plans	Level 5

IAEA-TECDOC-1791 “Considerations on the Application of the IAEA Safety Requirements for the Design of Nuclear Power Plants” 4.3 “Summary”より抜粋

- 海外規制においては、防護区分の考え方に相違はあるものの**深層防護を考慮することを要求**
- 全てのレベル間で独立性は必須ではなく、**実用上可能な範囲で深層防護の有効性を示すことが要件**
- DBAを超えたDECに対しては**現実的な想定を許容し、強制的な単一故障基準適用の要求は無い**

(参考2) 層間の独立性について

層間の独立性については、「社会と共存する魅力的な軽水炉の展望」調査専門委員会報告書（平成29年3月）にて、以下の通り議論されている。

(3) 防護レベル（防護レベル間の防止策及び緩和策の有効性）の独立性の考慮

(a) 各防護レベルの有効性が独立（The independent effectiveness of the different levels of defence）であるということ、安全設計における多重性又は多様性及び独立性との関係

- ・ （省略）
- ・ （省略）
- ・ 広義の独立性とは、すなわち、「深層防護レベルが突破されるのを防止する手段の有効性が“independent”であること」と考えられる。

(b) 異なる防護レベル間の防止策及び緩和策の有効性の独立性の確保

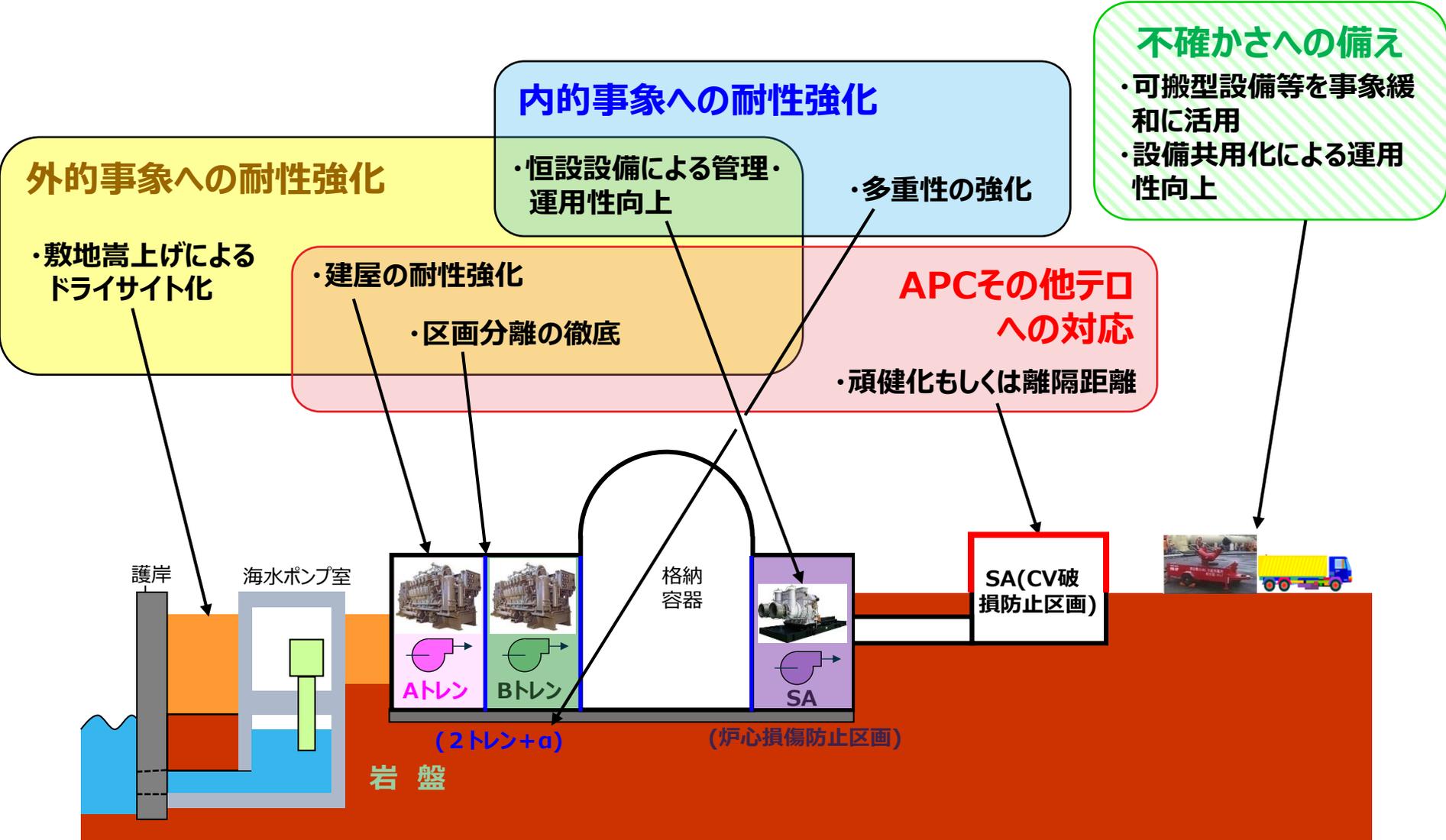
- ・ 異なる防護レベル間の防止策及び緩和策の有効性の独立性、すなわち、広義の独立性をいかに確保するかが課題である。
- ・ 現時点では、PRAなどの手法によりリスクの低減度合を見ることで、広義の独立性を確保するための手段の有効性を評価し、より効果的な手段を実装することが唯一の手段だと考えられる。

「社会と共存する魅力的な軽水炉の展望」調査専門委員会 報告書（平成29年3月）より抜粋

- 新設炉においては、調査専門委員会での議論を踏まえ、設計段階においてPRA等の手法を用いて層間の「広義の独立性」の有効性について評価を実施する。その上で、IRIDMの考え方等を活用し、効果的な手段を実装していくことが肝要であると考えられる。

(参考3) 新設炉の設計例

➤ 新設炉における対応方針案を反映したプラントの設計例を示す。



(参考 4) 深層防護レベルの厚さのイメージ (1/4)

- 深層防護の各層は適切な厚みを持ち、各レベルの防護策がバランス良く講じられることが重要
- 深層防護の各層の厚さについては、NUREG/KM-0009におけるDefense-In-Depth Frameworkを参考

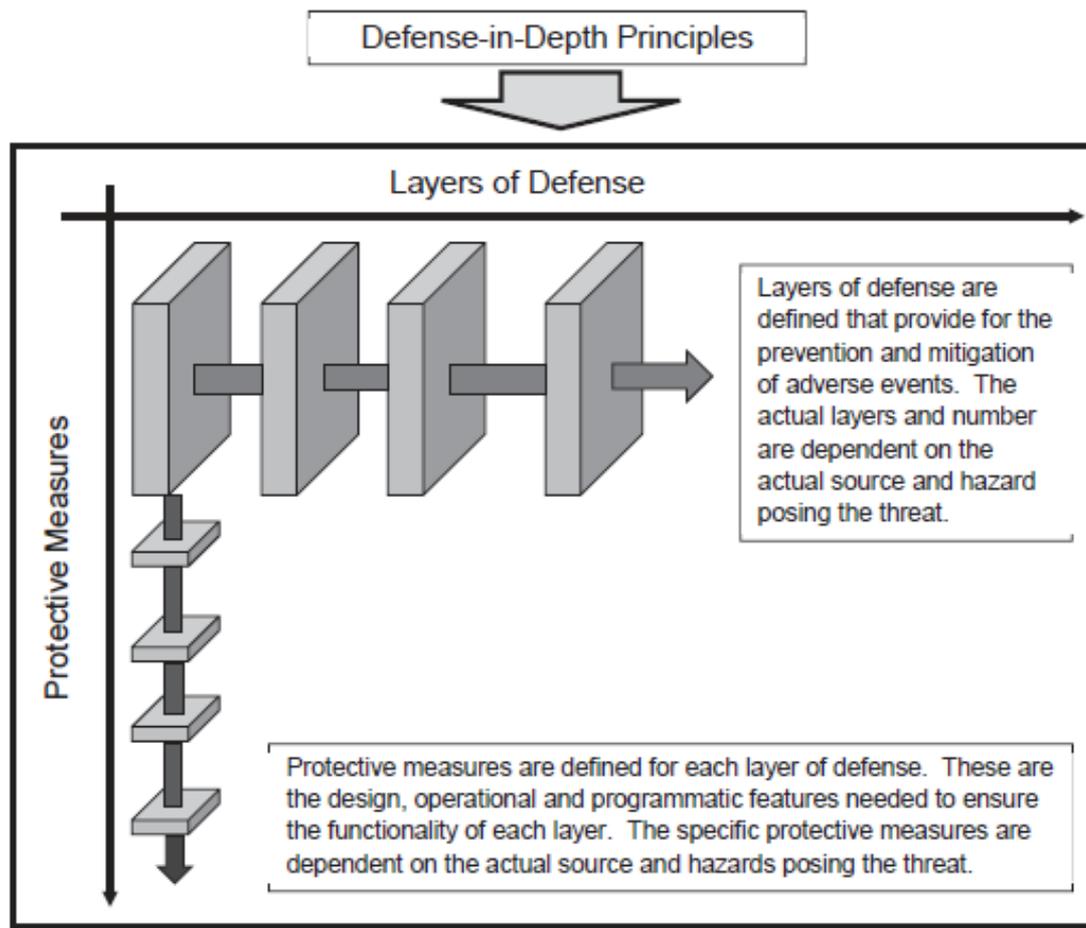


Figure 9-1 Defense-in-Depth Framework

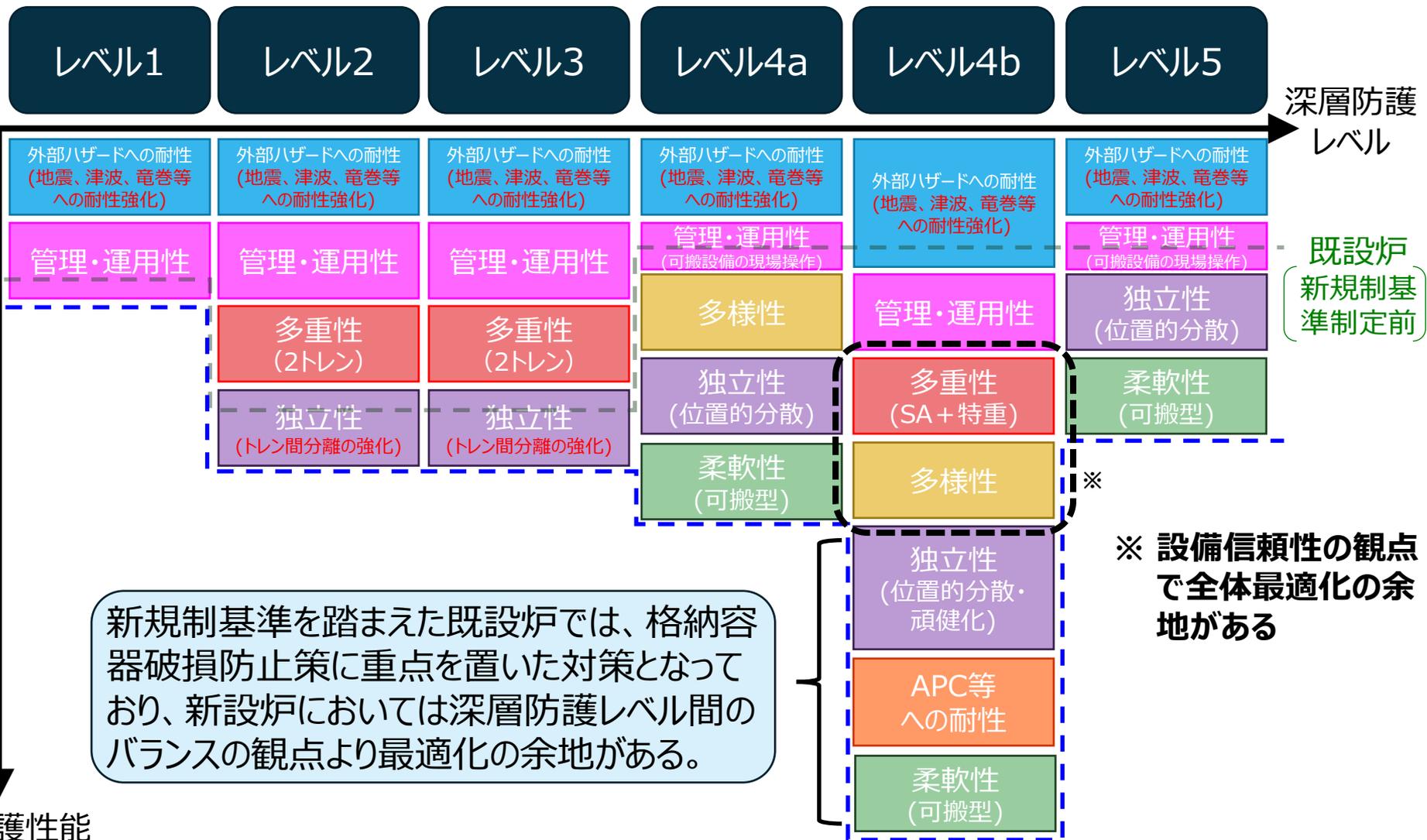
(参考4) 深層防護レベルの厚さのイメージ (2/4)

- NUREG/KM-0009を参考に、各層の防護策の厚みを既設炉（新規規制基準制定前後）と新設炉で表現
- 既設炉（新規規制基準制定前）の各防護レベルの厚さは、以下の通り表すことができる



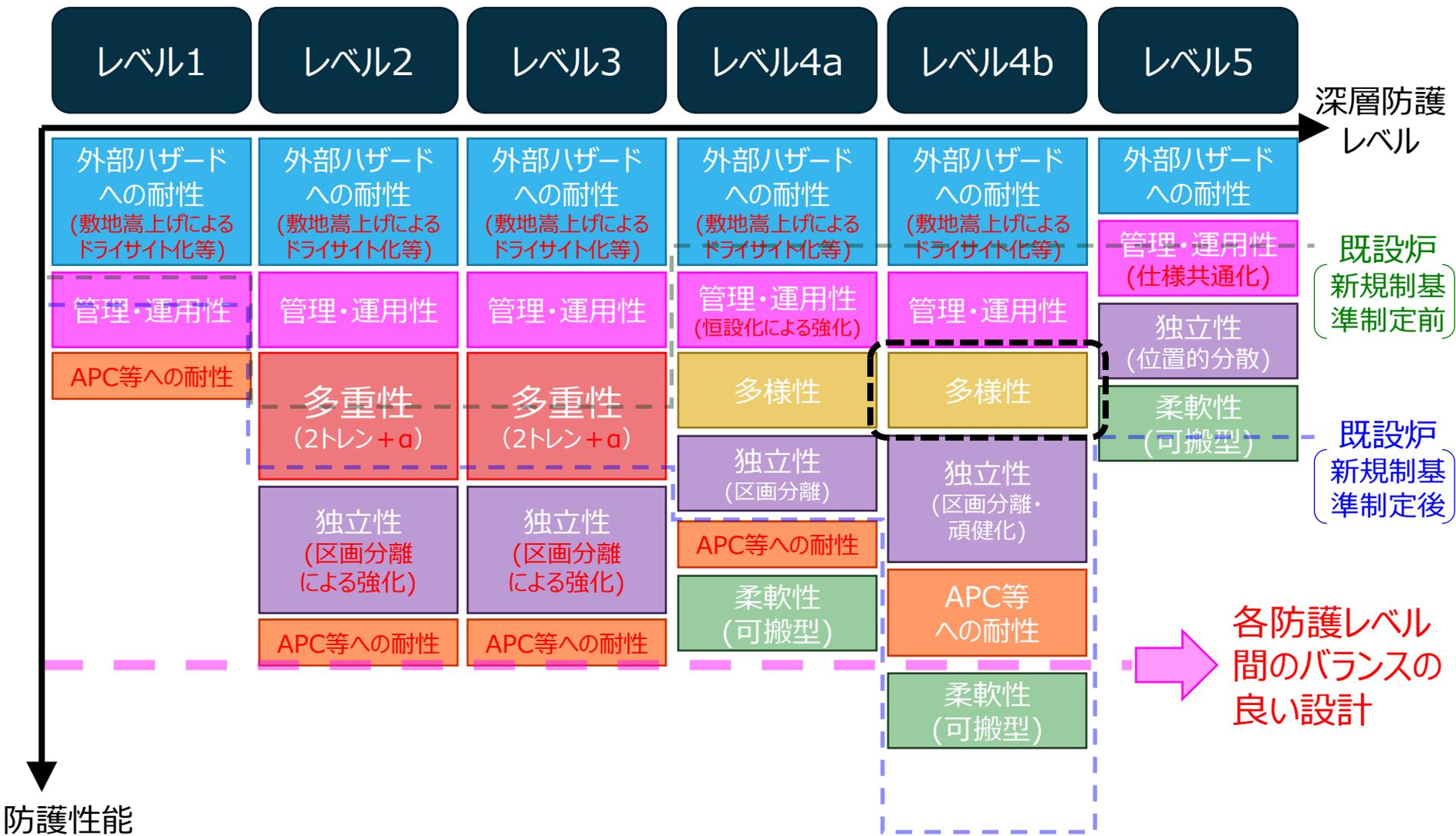
(参考4) 深層防護レベルの厚さのイメージ (3/4)

➤ 新規制基準により強化された後の既設炉における各防護レベルの厚さは以下の通り表すことができる



(参考4) 深層防護レベルの厚さのイメージ (4/4)

➤ 新設炉への対応方針を踏まえた各防護レベルの厚さは以下の通り表すことができる



(参考5) 新設炉におけるPRAの活用例

新設炉においては、従来の決定論的な設計に加え、PRAを用いた設計の有効性確認（内的事象、外的事象に対して十分な耐性を有すること、性能目標に対して十分な信頼性を有すること）を実施していく方針。

具体的なPRAの活用イメージは以下の通り。

- ▶ 新設炉の設計においては、既設炉等の経験を踏まえた決定論的なアプローチに加え、既設PRA結果を踏まえて新設炉の設計に展開するアプローチをとる。
- ▶ 新設炉の設計情報に基づくPRAを実施し、内的事象、外的事象に対する十分な耐性を有すること、性能目標に対して十分な信頼性を有することを確認する。

新設炉におけるPRAの活用イメージ

既設炉の設計・
経験を踏まえた
決定論的設計

既設炉のPRA結果

具体例

- 内的PRA結果
- 地震PRA結果
- 津波PRA結果

既設PRA結果
を踏まえた、新
設炉への展開

具体例

- 格納容器内RWSP
- 恒設設備主体のSA設備
- 重要設備に対し、十分な裕度を持った耐震設計
- 敷地嵩上げによるドライサイト化等

新設炉のPRA
評価を実施

内的事象、外的事象に対して十分な耐性を有すること、性能目標に対して十分な信頼性を有することを確認

必要に応じてフィードバック

(参考6) PEの定義に関するIAEA文書の抜粋

• IAEA No. SSR 2/1 (Rev.1)

- 8頁「THE CONCEPT OF DEFENCE IN DEPTH」(4) レベル4の解説

……中略

The safety objective in the case of a severe accident is that only protective actions that are limited in terms of lengths of time and areas of application would be necessary and that off-site contamination would be avoided or minimized. Event sequences that would lead to an early radioactive release or a large radioactive release³ are required to be ‘practically eliminated’⁴.

(脚注)

³ An ‘early radioactive release’ in this context is a radioactive release for which off-site protective actions would be necessary but would be unlikely to be fully effective in due time.

A ‘large radioactive release’ is a radioactive release for which off-site protective actions that are limited in terms of lengths of time and areas of application would be insufficient for the protection of people and of the environment.

⁴ The possibility of certain conditions arising may be considered to have been ‘practically eliminated’ if it would be physically impossible for the conditions to arise or if these conditions could be considered with a high level of confidence to be extremely unlikely to arise.

• IAEA No. NS-G-1.10

- 72頁「6. DESIGN CONSIDERATIONS FOR SEVERE ACCIDENTS」6.5節

6.5. For new plants, possible severe accidents should be considered at the design stage of the containment systems. The consideration of severe accidents should be aimed at practically eliminating¹⁴.

……後略

(脚注)

¹⁴ In this context, the possibility of certain conditions occurring is considered to have been practically eliminated if it is physically impossible for the conditions to occur or if the conditions can be considered with a high degree of confidence to be extremely unlikely to arise.