

2013年秋の大会  
標準委員会セッション2(原子力安全検討会、分科会)  
「原子力安全確保のための深層防護の考え方」

(1) 深層防護による原子力安全の確保  
原子力学会「いま、原子力安全を考える」

平成25年9月4日  
大阪大学 山口 彰  
(原子力安全分科会 主査)

# 基本的な考え方

- 原子力の安全確保：人と環境をまもる
- 深層防護は目的を達成するための方策を構築する考え方を定める共通概念
  - 原子炉、核燃料施設、内部事象、外部事象、人的事象、いずれにも適用できる
- 安全には、“総体安全”と“局所安全”がある
  - 総体安全にも局所安全にも深層防護は適用できる
- 安全の確保は社会に説明し、信任いただくもの
  - 論理的かつ簡明で、分かりやすくなければならない

# 原子力安全の深層防護

ハザードを障壁から  
出さない

人と環境をハザード  
からまもる



# 防護の要素(Elements of Protection)

- ハザード(リスク源)を排除する(要素①)
- ハザードを障壁の外に出さない(要素②)
  - “望ましくない状態”を防止
- 公衆に実害を及ばさない(要素③)
  - “望ましくない状態”の影響閉じ込め
- 被害を受けるもの(公衆)を離隔(要素④)

環境をまもることの意味は、公衆をまもるためにその生活環境としての環境をまもるとした。環境そのものや環境中のあらゆる生物等をまもることとはしていない。  
(原子力学会、原子力安全基本原則)

# 深層防護の“自立した有効性”

## Independent Effectiveness

- いずれかひとつの要素に過度に依存することは避けるべきである
- とくに、以下の二つに依存してはならない
  - ハザード(リスク源)を排除する(要素①)
  - ハザードを障壁の外に出さない(要素④)
- 深層防護はindependently effectiveであるべき
  - いずれかの要素が機能せずとも、深層全体として有効な防護であること
  - クリフエッジとも関連する(“わずかな変動”がプラント状態の著しい変化をもたらすこと)

# 深層防護を構築するプロセス

- 深層防護の目的(防護の対象)
- 深層防護のハザード(放射性物質)
- 望ましくない状態を決定
  
- 物理的な状態に着目する(原子炉の状態の観点)
  - シビアアクシデントの発生前
  - シビアアクシデントの発生後
- 放射性ハザードに着目する(公衆と環境への影響の観点)
  - 放射性物質の放出前
  - 放射性物質の放出後
- 設計基準に着目する(規制の観点)
  - 設計基準内
  - 設計基準を逸脱

# Level 3の目的は事故を設計基準内に留めること(設計基準の観点)、INSAG-10 (IAEA,1996)

## IAEAにおける深層防護の考え方

| 深層防護のレベル | レベルの目的                          | 必須の手段                                      | 備考                              |
|----------|---------------------------------|--|---------------------------------|
| 第1の防護レベル | 通常運転からの逸脱と安全上重要な設備の故障を防止        | 品質管理と工学的手法に従ってプラントを健全かつ保守的に立地、設計、建設、保守、運転。 |                                 |
| 第2の防護レベル | プラントの運転時に予想される事象が事故の状態に拡大するのを防止 | 設計で特定の系統・設備を設置。有効性を安全解析で確認。                |                                 |
| 第3の防護レベル | 炉心への損傷や重大な所外放出を防止               | 設計では事故の進展可能性を想定。固有の工学的安全施設、安全系、手順書を用意。     | 設計基準事故                          |
| 第4の防護レベル | 深層防護の第3の防護レベルが失敗した結果の事故の影響を緩和   | 閉じ込め機能を確実にし、放射性物質の放出を合理的に達成可能な限り低く維持。      | 設計拡張状態<br>※シビアアクシデント状態を含むこともある。 |
| 第5の防護レベル | 放射性物質の放出による放射線の影響を緩和            | 緊急時管理センターの整備。緊急時対応に対する緊急時計画と緊急時要領の確立。      |                                 |

※IAEAの安全要件「原子力発電所の安全：設計(SSR-2/1)」より作成

発電用軽水型原子炉施設におけるシビアアクシデント対策規制の基本的考え方について、平成24年8月、原子力安全・保安院

# Level3の目的は放射性物質の放出と炉心溶融状態を防止すること(WENRAは公衆リスクの観点に注目)

## 欧州原子力規制協会(WENRA)における深層防護の考え方(新設炉)

|           | 深層防護のレベル | レベルの目的   | 必須の手段  | 関係する発電所状態の区分  |
|-----------|----------|--|--|---|
|           | レベル1     | 異常運転と故障の予防   | 保守的な設計と建設・運転での高い品質                             | 通常運転  |
|           | レベル2     | 異常な運転と故障の制御  | 制御、制限及び防護設備、及び他の監視機能                           | 運転時の異常な過渡変化   |
|           |          | 放射能の放出を制限し、炉心損傷状態への拡大を予防するための事故の制御                           | 安全系事故手順  | DiDレベル3.a<br>想定単一起因事象                               |
| 発電所の当初の設計 | レベル3     | 放射能の放出を制限し、炉心損傷状態への拡大を予防するための事故の制御                           | 工学的安全施設<br>事故手順                                | DiDレベル3.b<br>DiDレベル3.aに伴う安全系の考えられる故障または無効を含む特定の多重故障 |
|           | レベル4     | 放射性物質の早期または大量の放出を招く可能性がある状況の実質的排除<br>所外放出を抑えるための炉心溶融を伴う事故の制御 | 炉心溶融を緩和するための工学的安全施設<br>炉心溶融を伴う事故の管理(シビアアクシデント) | 想定炉心溶融事故(短期及び長期)                                    |
| 緊急時計画     | レベル5     | 放射性物質の重大な放出の放射線影響の緩和   | 所外緊急時対応介入レベル                                   | -   |

Safety Objectives for New Power Reactors Study by WENRA Reactor Harmonization Working Group, December 2009, RHWG, WENRAより抜粋

発電用軽水型原子炉施設におけるシビアアクシデント対策規制の基本的考え方について、平成24年8月、原子力安全・保安院

# 米国NRCの考え方 (Multiple Barriers Approach)

## 概念や考え方と捉え、一般性を求める

- 放射性物質放出に対する多重障壁アプローチの考え方
  - Redundancyを定める考え方
- 障壁は、様々な形態をもつ
  - 容器 (Container)
  - 壁 (Wall)
  - 離隔 (Restricted area of land)
    - 障壁の機能維持を支援するために工学施設 (冷却系など) をおく場合もある
- 必要な障壁の数と形態
  - ハザードの大きさとつりあい、比例相関
  - 重要な不確かさについての理解の現状を反映
  - 深層防護の仕上がり具合はリスク評価で測る

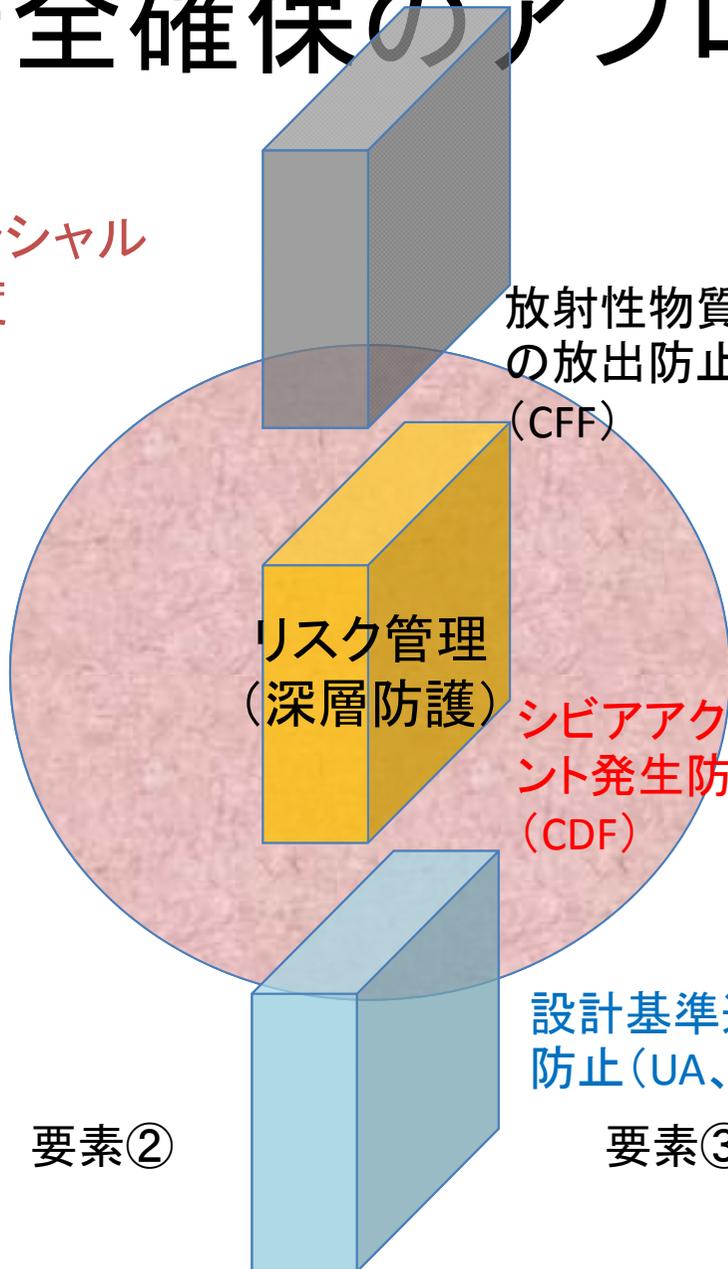
# 安全確保のアプローチ

外部ハザード：  
実害をもたらすポテンシャル  
マグニチュード／頻度

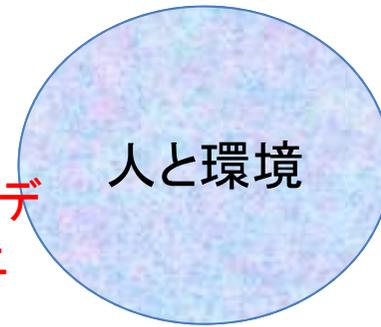
リスク：  
実害をもたらされる可能性  
シナリオ／頻度／影響度



要素①



要素②



要素③

要素④

# 日本における深層防護の説明

## これまでの我が国の安全規制における深層防護の考え方

| レベル  | レベルの目的 | 具体的な施策  |
|------|--------|---|
| レベル1 | 異常発生防止 | 個々の構築物、機器や系統の重要度に応じた十分に高い信頼性の確保。<br>(例)フェイルセーフ設計、インターロックの採用等    |
| レベル2 | 異常拡大防止 | 異常を早期に発見、異常が拡大しないうちに原子炉の停止等の必要な措置を講じる。(例)原子炉の緊急停止系の設置等          |
| レベル3 | 事故影響緩和 | 原子炉の冷却材が喪失するような事故の発生や事故時に放射性物質の放出を防止。(例)緊急炉心冷却装置や原子炉格納容器施設の設置など |

※平成15年版 原子力安全白書より作成。

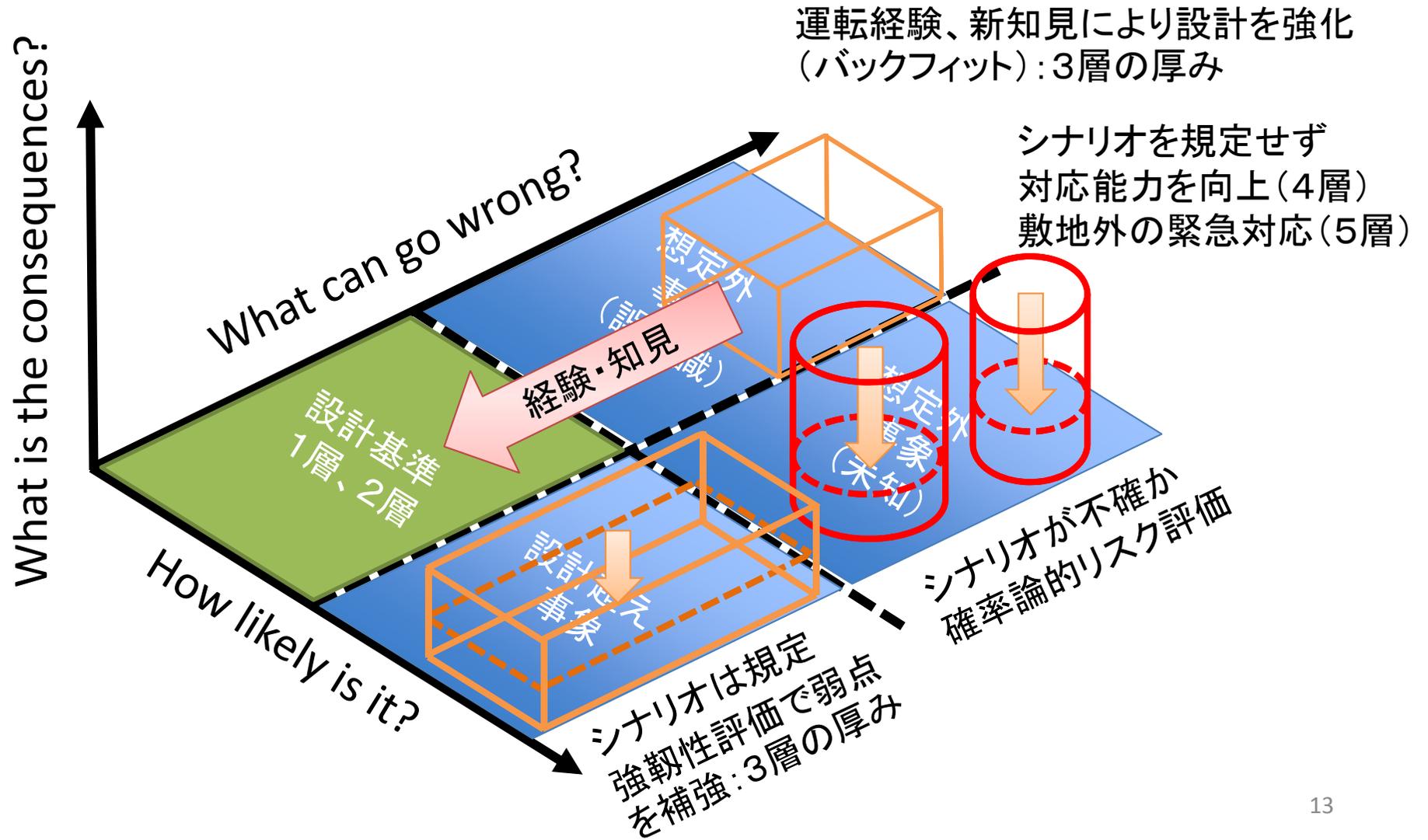
※なお、安全管理等を含めた広義の多重防護の対策には、アクシデントマネジメント策、防災対策等が含まれるとしている。(平成12年度版 原子力安全白書)

福島第一原子力発電所事故の教訓、IAEA等の海外の動向も踏まえ、規制としての深層防護の考え方をこれまでの3層(異常発生防止, 異常拡大防止, 事故影響緩和)から、シビアアクシデントを含めた5つの層に整理することが適切 (発電用軽水型原子炉施設におけるシビアアクシデント対策規制の基本的考え方について、平成24年8月、原子力安全・保安院)

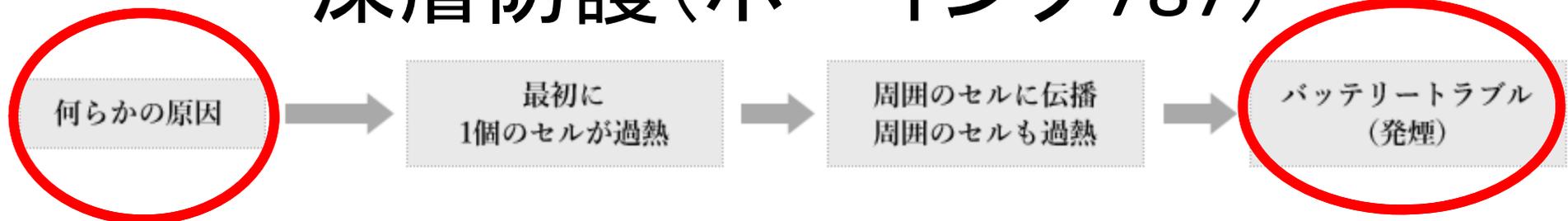
# リスクを抑制する

- リスク管理とは(米国国土安全保障省)
  - リスクを同定し、分析し、コミュニケーションするプロセスであり、
  - リスクを受容し、忌避し、転換し、あるいは受容可能なレベルにコントロールすること
  - それを実施されるアクションのコストと効果を考慮しつつ行うこと
- 意思決定プロセスは、リスク的洞察(Risk insight)と性能指標(Performance based)に基づく(NUREG-2150, NRC, 2012)
- リスクの定義: リスク評価は以下の問い(Risk triplet)に答えること(Kaplan and Garrick, 1981)
  - シナリオ(What can go wrong?)
  - たしからしさ(How likely is it?)
  - 影響度(What are the consequences?)
- リスクは、“確率 × 影響度”ではない、また、ただの数字でもない

# 深層防護とリスク抑制

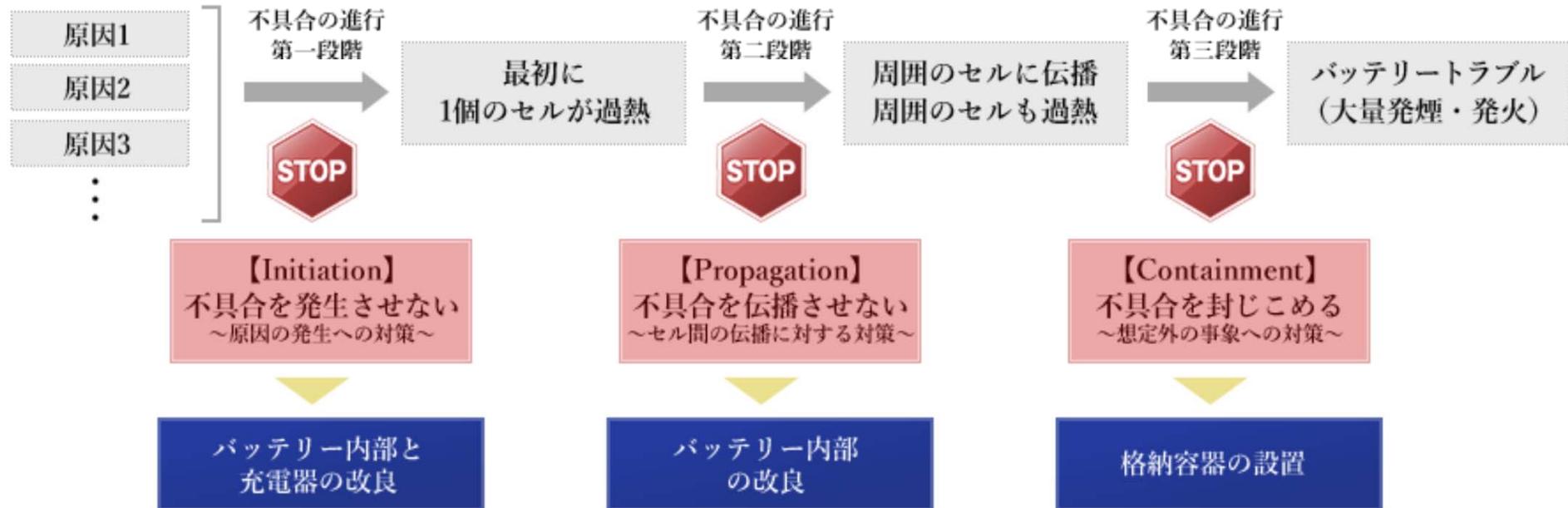


# バッテリートラブル防止が目的の 深層防護(ボーイング787)



- ① 電極ナットの締め付け状態の劣化
- ② 外部短絡や電圧変化による電解液への負荷
- ③ セルの過放電による化学変化
- ④ 製造時におけるセル内部への異物等の混入

<3重の対策コンセプト>



# まとめ

- 深層防護は目的達成のための方策、構築の考え方
  - 適用性は広く、方策は多様
- 深層防護で重要なこと
  - 目的を明確にする(ハザードと防護対象と避けるべき状態)
  - 原因の除去で対策したつもりにならない
  - ひとつの要素に頼らない(自立した有効性)
  - 論理的で簡明である
- 深層防護の着眼点
  - 避けるべき状態: 設計基準、原子炉状態、放射線影響
    - B787は設計対策 影響度は見ていない(だから3層)
  - 1層から3層は経験・知見ベースのシナリオ拡充が大切(BU)
  - 4層と5層は相互に整合、シナリオに因らず影響度を抑制(TD)