

深層防護と新規制基準による 原子力安全の確保

原子力安全土木技術特定テーマ委員会講演会
「いま、原子力安全を考える」

山口 彰（大阪大学）

1

内容

- 原子力のリスクと安全確保
- リスク管理と深層防護
- 規制基準と安全目標
- まとめ

2

原子力安全の確保

- 原子力基本法の第二条の基本方針
 - 「安全の確保を旨として」
- 政府は、規制委員会が安全とした原子炉は再稼働
 - 安全が確保されるとはどのような状態か？
- 規制は公共の安全を図るために行い、もって国民の生命、健康及び財産の保護、環境の保全に資することを目的(炉規法)
- 原子力規制委員会の最大の課題は、東京電力福島原子力発電所事故以来、地に落ちた原子力規制への国民の信頼の回復
 - 第1回原子力規制委員会、新組織の発足にあたって、平成24年9月19日
- 安全確保という言葉には、安心が得られているはずという含意がある

新規制基準で安全と安心は得られるのか

3

リスクとシビアアクシデントとPSA

- 世界の原子力安全関係者は、TMI事故やチェルノブイリ事故の経験を貴重な教訓として、発電用原子炉施設における、設計で想定した事象を大幅に超えて炉心の重大な損傷に至る事象(シビアアクシデント)のリスクを抑制することが重要と認識した
- このため、施設の設備の誤動作や誤操作の発生時にいくつもの安全装置が作動しないことによる災害の発生可能性とその影響の大きさを推定し、それからシビアアクシデントのリスクを定量化する確率論的安全評価手法(PSA)技術が開発されてきている

安全目標に関する調査審議状況の中間とりまとめ、平成15年12月、
原子力安全委員会 安全目標専門部会

4

シビアアクシデントとは?

- きわめて確率の低い**プラント状態**であって、設計基準事故条件を超えたもの。安全系の多重故障状態により生起し、**重大な炉心損傷に至り、放射性物質放出の障壁の多くまたは全ての脅威**となる可能性のあるもの
 - 出典: Severe Accident Management, IAEA
- 設計基準を大幅に超える事象であって、安全設計の評価上想定された手段では適切な炉心の冷却又は反応度の制御が**できない状態**であり、その結果炉心の**重大な損傷に至る事象**をいう
 - 発電用軽水型原子炉施設の性能目標について、—安全目標案に対応する性能目標について—、原子力安全委員会、平成18年3月

シビアアクシデントの特徴

- きわめて確率の低い**稀なプラント状態**
 - 従って不確かさが大きい
- 設計基準(安全設計の評価上想定された)考え方では対応できなかった状態
 - その結果、炉心損傷に至っている
- 格納機能が脅威にさらされている状態
 - 放射性物質放出に備えなければならない

設計基準とは別の観点、格納機能が重要

新しい安全基準

これで安全確保はできるのか?

<従来の安全基準>

<新安全基準>

炉心損傷に至らない状態を想定した設計上の基準(設計基準)
(単一の機器の故障のみを想定等)

自然現象に対する考慮
火災に対する考慮
信頼性に対する考慮
電源の信頼性
冷却設備の性能
その他の設備の性能
耐震・耐津波性能

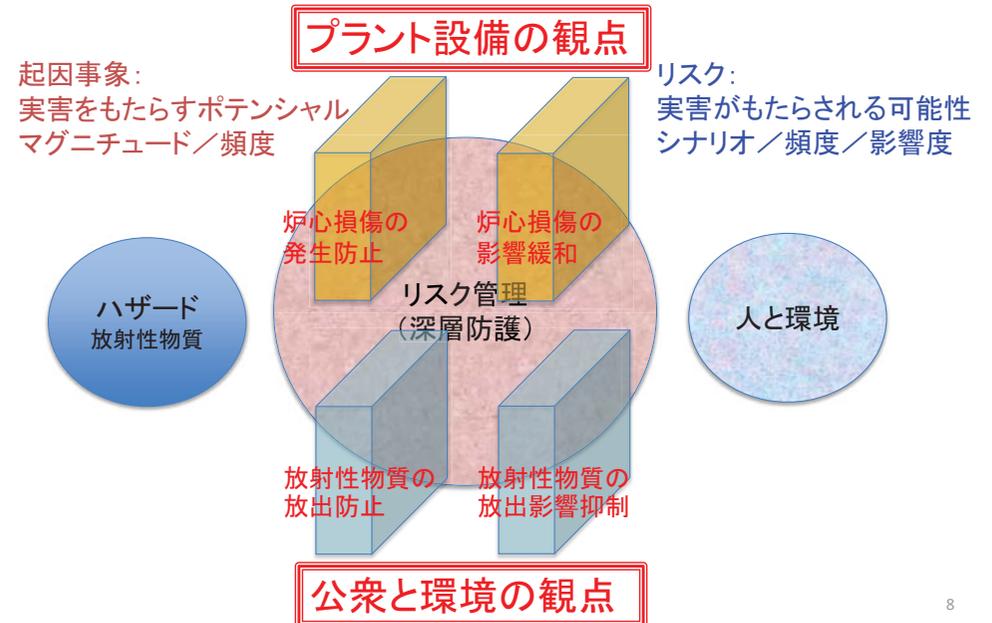
放射性物質の拡散抑制
意図的な航空機衝突への対応
格納容器破損防止対策
炉心損傷防止対策(複数の機器の故障を想定)
自然現象に対する考慮
火災に対する考慮
信頼性に対する考慮
電源の信頼性
冷却設備の性能
その他の設備の性能
耐震・耐津波性能

新設
(シビアアクシデント対策)

強化

強化

安全確保のアプローチ



深層防護の実装が多重障壁 (Multiple Barriers)

- 障壁は、様々な形態をもつ
 - 容器 (Container)
 - 壁 (Wall)
 - 隔離 (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
- 障壁の数とタイプ
 - ハザードの拡がりをつりあう、それと比例的相関
 - 重要な不確かさについての理解の現状を反映

A Proposed Risk Management Regulatory Framework, NUREG-2150m April 2012より

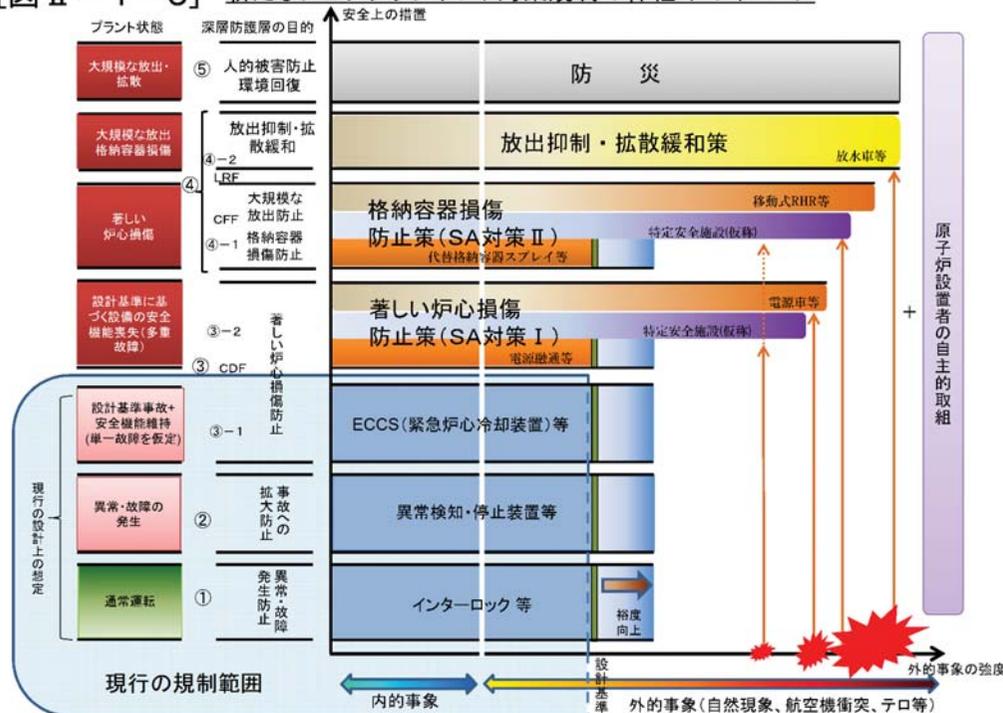
日本における深層防護の説明

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、機器やシステムの重要度に応じた十分に高い信頼性の確保。 (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)

[図 II - 1 - 5] 新たなシビアアクシデント対策規制の枠組みのイメージ



原子力安全委員会の考え方 対策・手順を中心(深層防護の適用)

- 多重防護の第3層までにおいては、設計の保守性を重視し、設計上の想定条件に対して大きな裕度を持つ頑健なシステムを構築することによってリスクを抑制するという考え方、いわば古典的な多重防護の考え方が基本となっている。
- これに対して、第4層では、第一にPSAを中心とする方法によってリスク要因の所在を追及し、これに基づいて効果的にリスクを低減するという方法をとる。
- しかし、この方法においては、ごく低頻度の事象に関しては知識の不完全性による限界があることから、**第二の方法として、多様な状況に柔軟に対処できる能力(可搬設備の準備、復旧能力等)を重視する。**...

IAEAの定義

設計基準の観点+プラント状態の観点

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	閉じ込め機能を実際にし、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 ※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

WENRAはリスクに注目する

FP放出の観点、公衆リスクの観点

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
発電所の当初の設計		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 想定単一起因事象
	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	工学的安全施設事故手順	DiDレベル3.b 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 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 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

米国NRCの考え方

概念や考え方と捉える、一般性を求める

- 上位概念として、原子力施設でのさまざまな事象による影響に対しては3つの防護層がある
 - 事故の発生を防止する防護
 - 万一事故が起こった場合の緩和
 - 万一放射性物質が放出された場合に公衆の健康影響を最小化するための緊急時計画

深層防護とは？

- 深層防護は公衆と環境をまもる概念である (Protecting People and the Environment: USNRCのホームページ、人と環境を守る、確かな規制へ: NRAホームページ)
 - 分かりやすく、簡明でなければならない
- 二つの観点、二つの要素
 - 炉心損傷と放射性物質放出
 - 発生防止と影響緩和
- FPの放出の観点(公衆と環境をまもる)から展開
 - 安全確保の論理的説明
 - WENRAの考え方
- 安全設計の実装の観点(プラントの防護)から展開
 - 原子炉安全設計への適用
 - IAEAの考え方
- 安全確保と安全設計は不可分であるとする
 - 設計基準の枠組みは柔軟に考える (Design Enhancement Condition)
 - NRCの考え方
- 全てを盛り込もうとする
 - 旧原子力安全・保安院の考え方

安全確保とは公衆と環境をまもること
Protection of public and the environment

掘ってたつ概念が深層防護

深層防護の実装が多重障壁であり規制基準

深層防護達成の手段がリスク管理

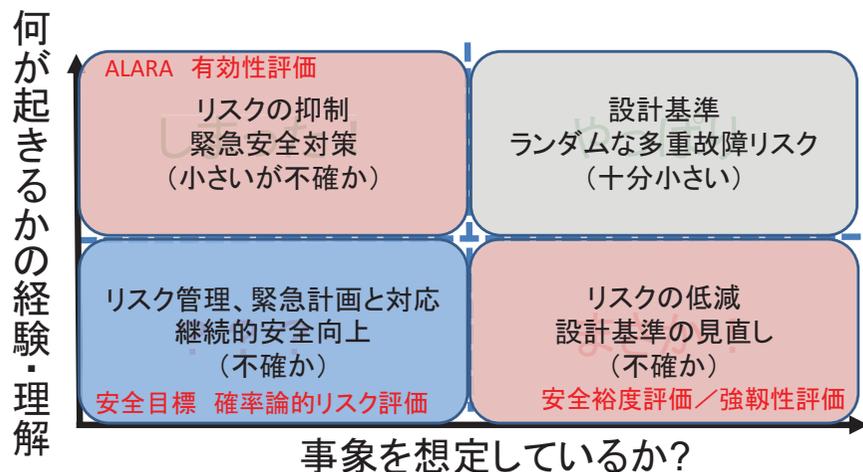
それを確認する方法がリスク評価

日本の安全目標

- 定性的目標案
 - 原子力利用活動に伴って放射線の放射や放射性物質の放散により公衆の健康被害が発生する可能性は、公衆の日常生活に伴う健康リスクを有意には増加させない水準に抑制されるべきである
- 定量的目標案
 - 原子力施設の事故に起因する放射線被ばくによる、施設の敷地境界付近の公衆の個人の平均急性死亡リスクは、年あたり百万分の1程度を超えないように抑制されるべきである
 - 原子力施設の事故に起因する放射線被ばくによって生じ得るがんによる、施設からある範囲の距離にある公衆の個人の平均死亡リスクは、年あたり百万分の1程度を超えないように抑制されるべきである
- 安全確保活動の深さと広さ
 - 安全目標によって様々な原子力利用活動に係るリスク管理者にそれぞれ分野で健康被害の可能性を抑制するために行うべき活動の深さや広さを共通の指標で示すことができる

原子力安全委員会、安全目標専門部会、安全目標に関する調査審議状況の中間とりまとめ、平成15年12月

深層防護で“想定外”に備える



各国の性能目標 炉心損傷と大規模放出が重要

[単位：/年]

国名	炉心損傷頻度 (CDF)	格納容器機能喪失頻度 (CFF)	大規模放出/早期大規模放出	
			頻度	放出量
米国	10^{-4}	新設プラント： 条件付確率 10^{-1}	既設プラント： 10^{-5} 新設プラント： 10^{-6}	—
フランス	10^{-5}	—	10^{-6}	Unacceptable consequence
フィンランド	10^{-5}	—	5.0×10^{-7}	$^{137}\text{Cs} > 100\text{TBq}$
カナダ	10^{-5}	—	10^{-6}	$^{137}\text{Cs} > 100\text{TBq}$
日本	10^{-4}	10^{-5}	—	—

なぜ継続的な安全向上が必要なのか

- 安全目標は社会との約束事であるから
 - 安全目標が社会に広く受け入れられ関係者に尊重されるため(中略)広く社会と対話を続けて行くことが肝要である(安全目標中間取りまとめ)
- ALARAとはその当時の社会のコンセンサスであるから
 - ALARPを達成するためのリスクとコントロールに係る判断は簡単ではない。何がALARPかを計算する簡明な方程式はない。
 - ALARP Suite of Guidance, <http://www.hse.gov.uk/risk/theory/alarp.htm>

21

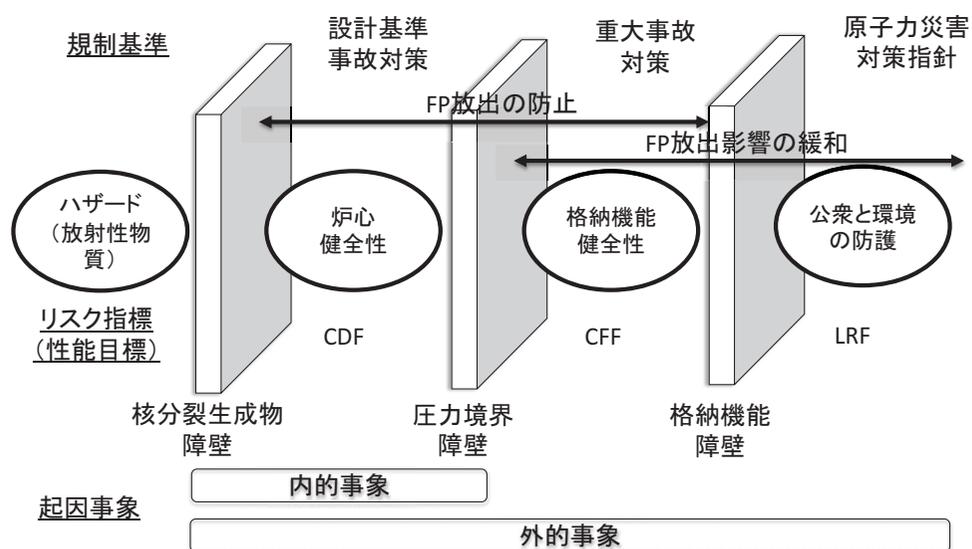
ALARAとは何か？

合理的に達成できる限り低くの意味するところ

- Reasonableとは(辞書から)
 - 理に適った、論理の通った、納得のいく
 - If you **think** something is fair and sensible you can say that they are reasonable
 - Reasonableは実際の場面における合理性、rationalは感情的でない高度に論理的な精神の働き
- 説明性のあること、多くが納得して合意してくれること
 - なぜ女川発電所は高所に設置できたのか
 - なぜ貞観津波に迅速に対処できなかったのか
- ALARAと安全目標は社会との約束ごと、従って、いつでもそれが適切かを考え続けなければならない

22

多重障壁を適切に設計すること



23



カナリア：だから大丈夫

ダチョウ：見たくない



シロヘビ：神の遣い



ブラックスワン：まさか

まとめ

- 安全確保は、公衆と環境をまもること
- 安全は規制基準、信頼は安全目標、安心は“青い鳥”

- 規制基準は深層防護の実装
- 安全目標、性能目標と規制基準は不可分
- 安全確保のために
 - 設計基準の延長ではない深層防護
 - リスク管理に基づく深層防護の実現