

2014年秋の大会  
標準委員会セッション3  
(システム安全専門部会とリスク専門部会の合同セッション)  
「原子カプラントの継続的な安全性向上対策採用の考え方」

(3) 安全性向上対策採用に係る海外事例検討

平成26年 9月10日

一般社団法人 原子力安全推進協会

鎌田 信也



# 海外の発電所における安全性向上対策 採用の事例 ー 報告内容

1

## (1) 米国のバックフィット規則

- バックフィットプロセス
- 規制上の分析プロセス
- 評価事例 (SBO規則、フィルタベント設置)

## (2) シビアアクシデント影響緩和代替案 (SAMA)、設計代替案 (SAMDA)

- SAMA、SAMDAの評価プロセス
- 評価事例 (既存炉、新設炉)

## (3) 合理的に可能な限りのリスク低減 (ALARP)

- 原子力施設の安全評価原則 (SAP)
- 基本安全レベル (BSL)、基本安全目標 (BSO)
- 評価事例



# リスク情報に基づく意思決定に関する着眼点

## (1) バックフィット要否についての判断基準

バックフィット要否に関する判断に必要な考え方、手法、基準

## (2) バックフィット実施のための環境整備

科学的かつ合理的なバックフィットを行うに当たって、必要な解析環境が整備されているか

## (3) 事業者の更なる自主的安全性向上評価のための安全目標

事業者の更なる安全目標に向けた取り組みについての目標の設定について



以上の着眼点を踏まえ、海外事例の運用を参考に国内原子力発電所での安全性向上対策採用の方向性は？



# 米国のバックフィット規則

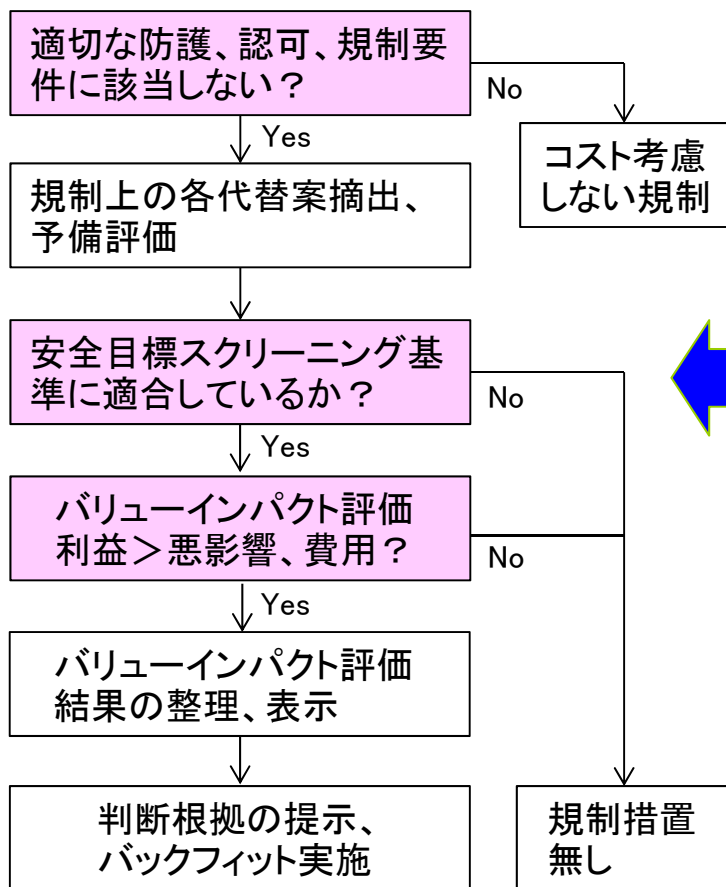
## バックフィットとは？

原子力発電所の設計、手順書、組織等に関して、NRCの定めた連邦規則の新規制定、改定及び規制要件の解釈の見直し等により、NRCが被認可者に対して課す変更要求(1988年 10CFR50.109)

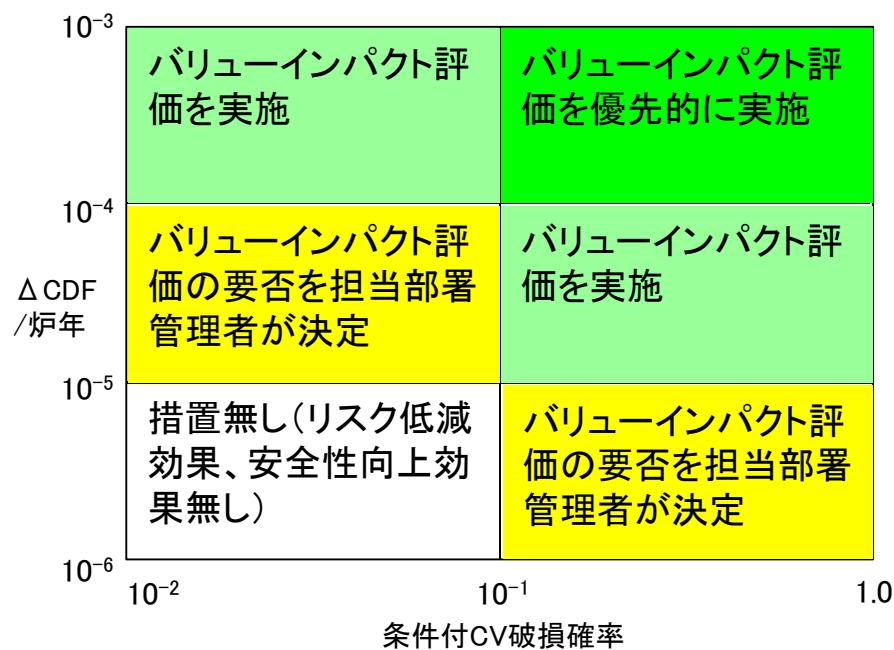
- ・ 原子力プラントが公衆の健康と安全に対して、適切な防護(規制要件、認可、コミットメント)を確保するバックフィットに関しては、NRCは経済的コストは考慮しない(10CFR50.109 (a) (4))。
- ・ 上記を除き、NRCはバックフィットに要するコストを考慮(公衆の健康、及び安全または安全保障の全般的な防護が増加し、直接及び間接のコストが防護の実質的増加の観点から正当化)(10CFR50.109 (a) (3))



# 米国のバックフィット規則－規制上の分析プロセス



安全目標スクリーニング基準  
(NUREG/BR-0058 Rev.4)



バリュー : 利益  
インパクト: 悪影響、費用

(NUREG/BR-0058, Rev.4)



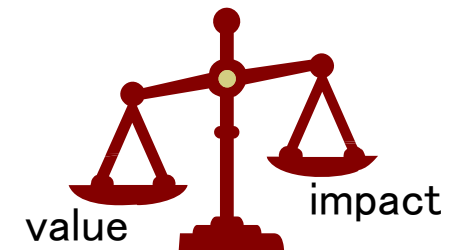
# 米国のバックフィット規則ーバリュー(利益)とインパクト(影響)の例

## (1) バリュー(利益)

- ・ 公衆被ばく及び職業被ばくの低減
- ・ 健康上、安全上、または自然環境上の改善
- ・ 回避されたオンサイトの影響、オフサイトの財産損害
- ・ プラントの稼働率の改善、等

## (2) インパクト(悪影響、コスト)

- ・ 事業者、NRC、州及び地方政府の費用
- ・ 健康上、安全上、自然環境上の悪影響
- ・ 経済効果及び取引に対する悪影響、等



## (3) バリューとインパクトの換算、比較

レベル3PRAを実施してバリューを評価、被ばくとコストの換算係数は1000～3000ドル/人・レムの範囲で換算し、総バリューと総インパクトの比で比較



# バックフィット規則－SBO規則(事例) 1/2

## SBO規則制定に際して実施されたバックフィット分析(NUREG-1109)

外電喪失の発生頻度及び時間、所内非常用電源の冗長性及び信頼度、その後のシビアアクシデントシーケンスの可能性等により未解決安全問題であったが、バリューインパクト解析を実施し、バリューとコストを特定。

### (1) SBO規則実施によるバリュー

- ・ SBOに起因した炉心損傷頻度(CDF)の低減
- ・ 所外への放射能放出リスクの低減

### (2) SBO規則実施による主に産業界で発生するインパクト

- ・ プラントのSBO対応能力の評価(炉心冷却及びCV健全性の維持)
- ・ 運転手順書の策定と訓練
- ・ 非常用DGの信頼度がある水準以下となる場合での信頼性向上対策
- ・ 規則要件への適合に必要な設備追加(バッテリー、タンク、圧縮空気各容量の追加、等)



## バックフィット規則－SBO規則(事例) 2/2

### (1) バリュー(100基分最適ケースのリスク低減値)の推定

公衆被ばくのリスク低減値は、SBOによる所外集団線量を計算し、これにSBO規則実施によるCDFの低減量を乗じて算出。

SBOによる集団線量 × CDF低減量 × プラント余寿命(25年)

$1.43 \times 10^5$ 人・レム(ソースタームは立地評価最悪ケースの1/10)

### (2) インパクト(100基分最適ケースのコスト)の推定

・ SBO規則実施に伴うコスト総額は6000万ドル(b)

### (3) バリューインパクト比の算出

・ 公衆及び事故時従業員被ばくのリスク低減量は $1.45 \times 10^5$ 人・レム(a)

・ バリューインパクト比は(a) / (b) = 2.4人・レム/1000ドル

➡ NUREG/BR-0058の1人・レム/1000ドルの換算基準から考えると、2.4倍のベネフィット効果がある。





# バックフィット規則ーフィルタベントの設置(事例)1/5

## (1) フィルタベント設置の経緯

NRCは福島事故を踏まえ、規制要件、プログラム、プロセス等を見直すタスクフォースを設置し、短期レビューを実施。改善に関わる12項目の勧告を示し、更なる検討が必要になる可能性があるものとして格納容器フィルタベントを提示(SECY-11-0137)。

## (2) フィルタベントに対する産業界からの反論

- ・ 格納容器スプレイ又は冠水と耐圧強化ベントの組合せにより、99.9%のFPを除去。
- ・ 既存のフィルタ設計では対策実施後に残存する放射性微粒子が効果的に除去されることが実証されていない。
- ・ 科学的な事実に基づく**パフォーマンスベースのアプローチ**を採用すべき。



## フィルタベントに関わるオプション

- ・オプション1：耐圧強化ベント(現状維持)  
追加の措置を講じない
- ・オプション2：SA対応耐圧強化ベント(SA時に実行可能なベント)  
SA条件下で機能継続する高信頼性耐圧強化ベント
- ・オプション3：フィルタベントに関する命令  
工学的フィルタベント系の設計及び設置
- ・オプション4：SA制限戦略(パフォーマンスベース)  
運転員操作や系統操作の組合せで技術的容認基準を満足させるアプローチ(可搬式機器による格納容器内注水及びスプレイ、耐圧強化ベントの周期運転)



# バックフィット規則－フィルタベントの設置(事例)3/5

## NRCによる格納容器ベントに関するバックフィット解析例

対象プラント	BWR Mark I 型格納容器 Peach Bottom 2、3号機			
事象シナリオ	長期、短期全交流電源喪失			
解析コード	MELCOR(熱水力及びFP移行挙動)、MACCS2(所外被ばく線量)			
オプション	オプション2 (高信頼性耐圧強化ベント)		オプション3 (工学的フィルタベント系)	
総コスト (1000ドル)	2027		16127	
炉心損傷頻度	$2 \times 10^{-5}$ /年	$2 \times 10^{-4}$ /年	$2 \times 10^{-5}$ /年	$2 \times 10^{-4}$ /年
総ベネフィット (1000ドル)	938	9380	1648	16480
ベネフィット－コスト	-1089	7353	-14479	353

(SECY-12-0157)



## バックフィット規則－フィルタベントの設置(事例)4/5

### (1) バックフィット解析結果

炉心損傷頻度 $2 \times 10^{-5}$ /年ケースでは、コストがベネフィットを上回り、フィルタベントのプラント改造は対費用効果は無し。

### (2) コストベネフィット不成立に関するNRCによる評価

- ・ 事象の発生頻度や影響は不確実さが大きく、パラメータの設定によってはベネフィットがコストを上回る可能性。
- ・ 定性評価として、①深層防護の拡充、②大きな不確実さへの対処、③バリア独立性の考慮、④緊急時計画の改善及び国際慣行の考慮、の各定性因子の観点で優位性大。

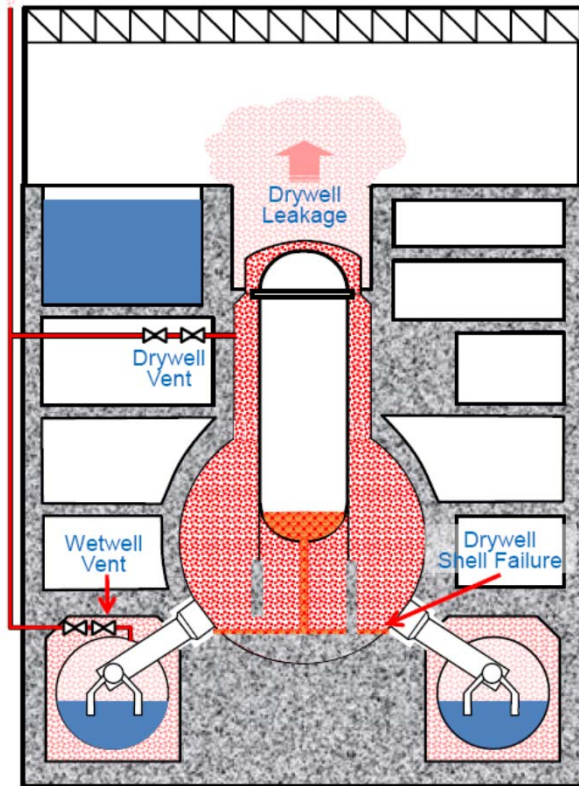
※ NUREG/BR-0058に基づき、考慮すべき11の定性因子について、4段階(効果があると期待されない～非常に大きな効果があると期待される)で評価(2013年6月、NRCはFV設置義務化の先送りを決定)



# フィルターベントの設置－BWR Mark I、Mark II 各格納容器のシビアアクシデント時の応答

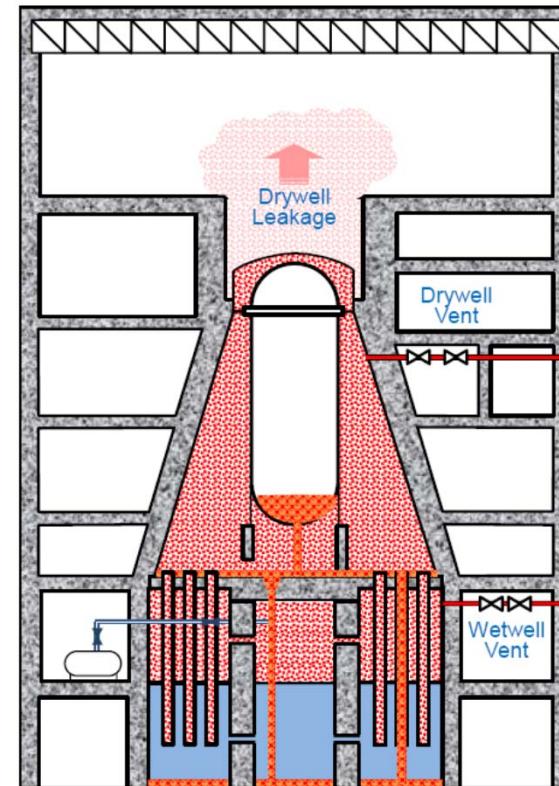
・早期CV破損回避 → デブリ冷却(CVスプレイ、CV冠水)が必須

BWR Mark I 型格納容器



炉心デブリが  
ドライウェル  
シェルに接触  
して破損

BWR Mark II 型格納容器



炉心デブリが  
サンプル排水  
系配管に入り、  
ウェット  
ウェル気相  
部に排出さ  
れてバイパス

(EPRI TR-1026539)



# フィルターベントの設置－SA緩和方策による放射能放出抑制効果（EPRIの解析）

・環境へのFP放出抑制 → デブリ冷却とCVベントの併用が有効

	Mark I 型	Mark II 型	
複合的なSA緩和方策		サプレッションプール バイパス有	サプレッションプール バイパス無
CV冠水、耐圧強化ベント	黄色	赤色	黄色
CVスプレイ、耐圧強化ベント	黄色	赤色	黄色
CV代替熱除去と耐圧強化ベント、CV冠水またはスプレイ	黄色	解析ケース無し	
耐圧強化ベント周期運転、CV冠水	緑色	赤色	緑色
耐圧強化ベント周期運転、CVスプレイ	緑色	赤色	緑色
フィルタベント、CV冠水またはスプレイ	緑色	緑色	緑色



除染係数 < 100



100 < 除染係数 < 1000



除染係数 > 1000

(EPRI TR-1026539)

世界最高水準の安全性の追求  
～たゆまぬExcellenceをめざして～

一般社団法人 原子力安全推進協会  
Japan Nuclear Safety Institute



# バックフィット規則ーフィルタベントの設置(事例)5/5

表 フィルタベントに関するNRCスタッフと産業界の主な見解

	NRCスタッフ	産業界
	<b>フィルタベントの設置</b>	<b>パフォーマンスベースのアプローチ</b>
外部フィルター追加の利点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Mark I、IIでFP放出低減可能</li> <li>・確実、タイムリーに実施可能な規制措置</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・フィルタ追加により更なるFP放出低減効果は認められている。</li> </ul>
外部フィルター追加の悪影響	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>・外的事象に対する防護レベルが低い場合、ベント能力喪失</li> <li>・ラプチャディスクの誤開等、格納容器機能の信頼性低下の影響因子が多い。</li> </ul>
パフォーマンスベースについての見解	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実施には非常に時間を要する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・本アプローチが望ましい</li> <li>・本アプローチの規制要件化が望ましい。</li> </ul>
単一緩和対策は有効ではない。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ベントとCVスプレイ、またはDW床面冠水手段の組合せ要との認識</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・フィルタベントを設置しても、CVに放出された炉心デブリ冷却が無ければFP放出低減は実現できない。</li> </ul>
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・MELCORの解析ではベント周期運転は効果無し。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・MAAPの解析ではベント周期運転は、FP放出低減に効果がある、等。</li> </ul>

(SECY-12-0157、NEILター)





# シビアアクシデント影響緩和代替案/影響代替案(SAMA/SAMDA)

## SAMA、SAMDAとは？

1980年6月13日、NRCは建設許可及び運転認可申請書に適用する環境影響証明書におけるシビアアクシデントの考慮について、暫定政策声明書を発行。シビアアクシデント影響緩和代替案/設計代替案(SAMA/SAMDA)の候補を特定し、候補の実施がコスト上有益か否かを判断し、必要であればシビアアクシデント対策に必要な追加措置を講じる。

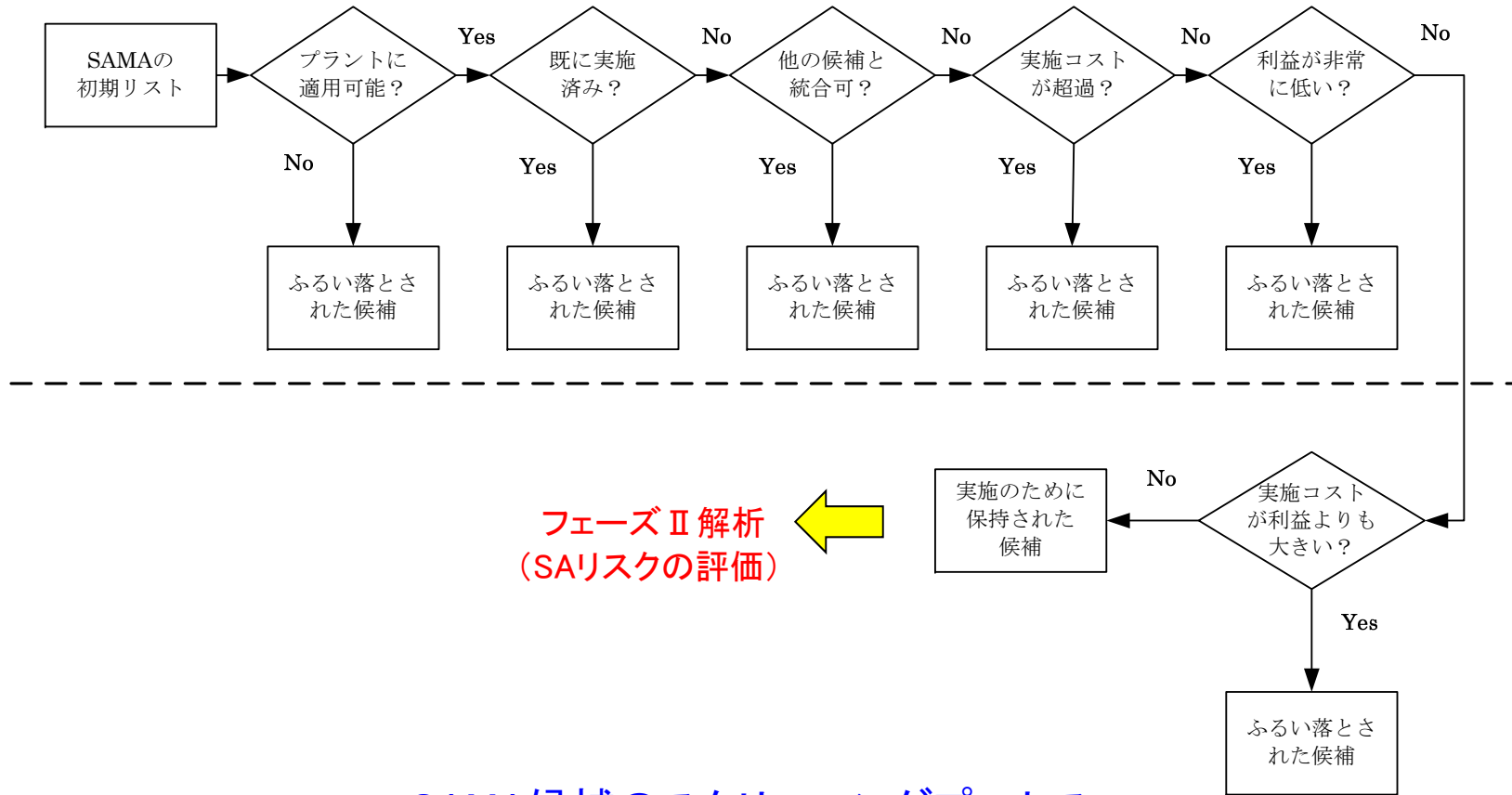
- **既存炉の認可更新に関するSAMA**  
環境防護要件(10CFR51.53)により、運転認可更新の申請にあたり、プラント個別にSAMAの解析を要求(環境標準審査指針の補足1により審査)。
- **新設炉のSAMDA**  
新設炉のDC(型式認証)では、SAMDAのコストベネフィット(環境報告書)、シビアアクシデント解析及びIPE(プラント固有のPRA)の実施を要求。





# SAMA/SAMDAの評価プロセス(フェーズ I) 1/2

## フェーズ I 解析(SAMA候補のスクリーニング)



## SAMA候補のスクリーニングプロセス

(NEI 05-1)



# SAMA/SAMDAの評価プロセス(フェーズⅡ) 2/2

## フェーズⅡ解析(SAリスクの評価)

### (1) レベル1PRAモデル

内的事象レベル1PRAモデル、IPE以降レベル1PRAモデルに対して行った主要な変更、CDFへの影響を評価。IPEEEで対象とされた地震、火災、その他の外的事象(強風、外部洪水、等)について評価

### (2) レベル2PRAモデル

シーケンス別、放出カテゴリ別の放出頻度及びFP特性(放出割合、放出タイミング、期間等)、IPE以降レベル1、2PRAモデルのピアレビュー結果、SAMA解析への影響を評価

### (3) レベル3PRAモデル

レベル2PRAの結果得られた事故時ソースタームを用いた大気放射能輸送・拡散、被ばく線量、急性及び晩発性の健康影響及び経済影響の評価結果(MACCS2コード)



# 既存炉におけるSAMDA、SAMAの事例

## (1) Limerick発電所の運転認可に係る評価

運転認可に際して、環境声明書の中でSAMDAについて検討を実施。コストベネフィット評価では1000ドル/人・レムのスクリーニング基準に適合したSAMDA7候補を抽出したが、最新のPRA結果ではこれらについてベネフィットが成立しないことが判明 → シビアアクシデント対策としてプラント改造を行う正当性無し。

## (2) Watts Bar-2発電所の建設再開に係る評価

SAMDAのコストベネフィット解析を行った結果、費用効果の確認された7ケース(DC母線の負荷制限の改善、F&B冷却の訓練改善、プラントリスクに関する自己啓発訓練の実施、等)を採用。

## (3) プラント個別の評価

NRCは、2013年7月2日の時点で、全49発電所の内37発電所に対して対用効果のあるSAMAがある旨を認定。



## 新設炉におけるSAMDAの事例

### (1) DC(型式認証)申請におけるUS-APWRのSAMDA評価

SAMDA候補の作成及びスクリーニングを産業界ガイダンス(NEI 05-01、Rev.A)に基づいて検討を実施。SAMDAのベネフィットはいずれも導入コストより著しく小さく、費用効果の認められるSAMDAは無し。

### (2) COL(建設運転一括認可)におけるComanche Peak3、4号炉のSAMDA評価

当該プラントは設計が完了していないため、US-APWRの標準設計を代用して評価を実施。評価結果は、

リスク換算値の総計(400,073ドル) < US-APWRの最低費用SAMDA  
(870,000ドル、CVスプレイ追加)

➡ 既にUS-APWRの設計で考慮済みの対策で包絡される。



# 可能な限りのリスク低減(ALARP)

## ALARPとは？

1988年に英国HSE(保健安全執行部)はリスクを次頁の図に示す通り、  
①受容不能領域、②条件付受忍可能領域、③受容可能領域に分け、  
②については、合理的に可能な限りリスク低減を図るという条件付で  
受忍できる領域 → ALARP(As low as reasonably practicable)

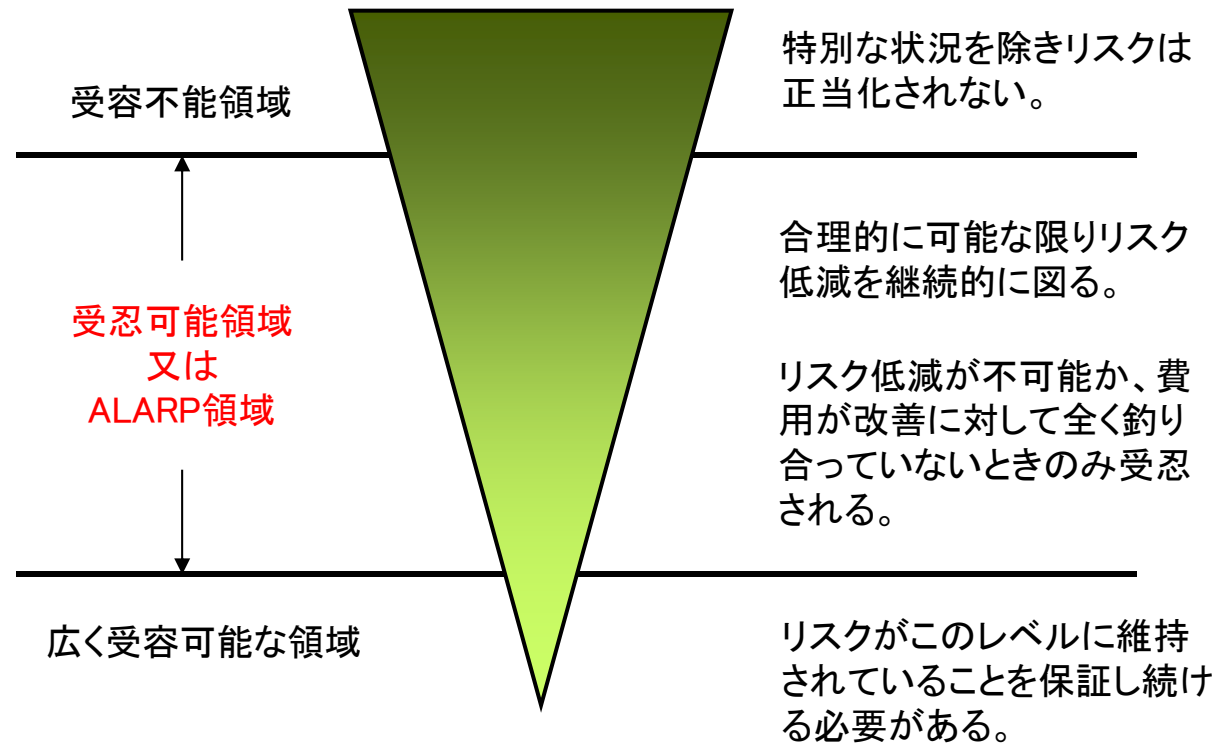
## リスクの低減と人間の防護(R2P2)－規制上の意思決定とは？

→ リスクの規制及び管理へのアプローチとそれを裏付ける考え方

- ・ 活動の達成目標：最も厳しいリスク、ハザードの制御を対象
- ・ 一貫性：類似の目標達成に向け、類似の状況に対して類似のアプローチ
- ・ 比例性：リスクに釣り合った活動
- ・ 説明責任：事態が悪化した場合の責任の所在



# 原子力発電所の受容可能リスクーリスク レベルとALARP



「原子力発電所の受容可能リスク(TOR)」、1992年改訂版



# 原子力施設の安全評価原則(SAP)

## 安全評価原則(SAP)とは？

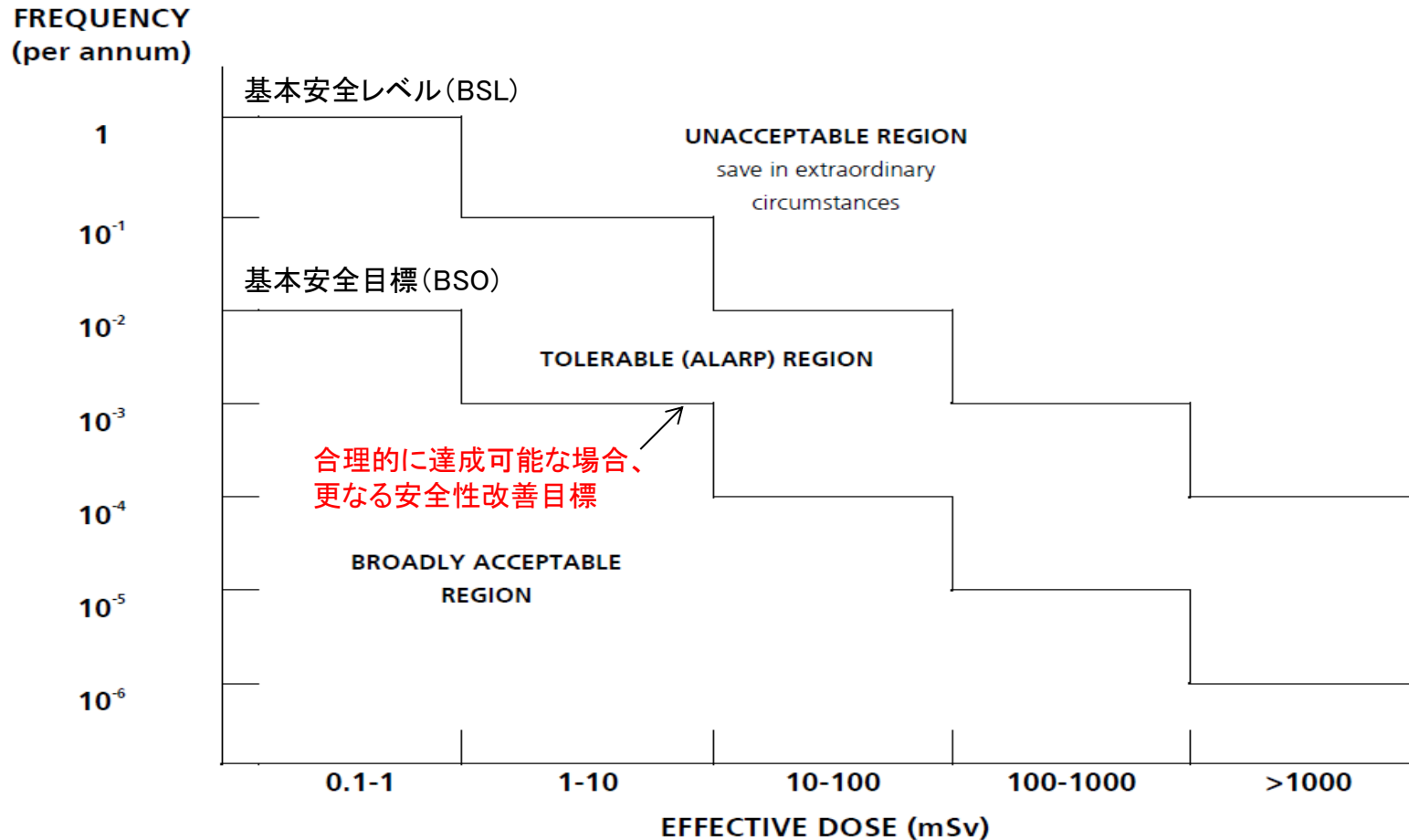
検査官が原子力サイト認可条件に関連した安全性評価や産業界に対する規制を行うガイダンス。主要な工学的原則は下記の通り。

- **原則1: 固有の安全性**  
放射線ハザードの発生を良好な設計と対応により事前防止
- **原則2: フォールトトレランス**  
障害発生時に機能維持したまま運転継続できる耐性のある設計
- **原則3: 深層防護**  
障害発生に対して複数階層の備えを有する設計(IAEA NS-R-1)
- **原則4: 安全機能**  
通常運転、全て事故シーケンスを網羅した解析で決定
- **原則5: 安全対策**  
静的安全系、自動起動、故障時の手動起動、管理的な対策



# 基本安全レベル(BSL)と基本安全目標(BSO)

BSLとBSOのターゲット8(事故時一所外個人実効線量、年間頻度)(安全基本原則2006年度版)



「EDF ストレステスト」

世界最高水準の安全性の追求  
～たゆまぬExcellenceをめざして～

一般社団法人 原子力安全推進協会  
Japan Nuclear Safety Institute





## ALARP評価の例(英国EPR)

### (1) 目的

英国EPRの建設前安全報告書で、設計のSAPへの適合性可否の検証と設計改良点(設計代替案)に関するコストベネフィット解析を実施。

### (2) リスク評価結果

個人死亡リスク( $1.7 \times 10^{-7}$ /年) < 安全目標( $1.0 \times 10^{-6}$ /年)

100人死亡リスク( $8.0 \times 10^{-8}$ /年) < BSO制限値( $1.0 \times 10^{-7}$ /年)

→ 公衆被ばく線量の目標を満足

### (3) 設計代替案のレビュー結果

設計代替案として7案を提案し、定量的ALARP評価を実施(基本的には米国SAMDA評価と同じ)。

設計代替案コスト > 設計代替案のリスク低減量

→ 7案の設計代替案は全てコスト効果的ではない(不採用)。



# リスク情報を活用した意思決定に関する 我が国の課題(例)

## (1) バックフィットの要否判定

委員会規則のバックフィット要否に関する判断するフローは示されたが、判断の原則、手法、基準が未整備。

## (2) コストベネフィット解析のためのリスク評価

「実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド」では、レベル1及びレベル2PRAについて内的事象、外的事象を対象に実施する旨を要求。コストベネフィット解析を行うためにはレベル3PRA迄実施する必要がある、解析データの整備が必要。

## (3) ALARPにおける基本安全目標

我が国の安全目標はTORにおけるBSL(基本安全レベル)に相当すると考えられる。事業者が自主的に更なる安全目標に向けた取り組みの目標としてBSO(基本安全目標)に相当する目標の設定について検討要。



御清聴有難うございました。

