

日本原子力学会 新型炉部会セッション
GIF 第4 世代炉国際フォーラムの現状と今後について

(3)PRPP-WG活動

2013年9月4日

(独)日本原子力研究開発機構
井上 尚子

Outline

1. はじめに

- PRPP WGの概要

2. 核拡散抵抗性に関わる定義とGIF PRPP評価手法の概要

3. GIF PRPP WGの検討活動

- 仮想的ナトリウム冷却高速炉システム(ESFR)デモンストレーションスタディ
- ESFRケーススタディ
- GIFシステムステアリングコミッティとの評価手法適用研究
- INPRO拡散抵抗性評価手法との整合性研究
- Rev.5 報告書の改訂→Rev.6 報告書の発行

4. 日本の新型炉・サイクルシステム開発の観点からの課題と方向性

5. まとめ

- GIF PRPP目標
 - 原子力システムが、転用や核兵器利用物質の盗取について、全く非魅力的で、もっとも望ましくないという保証を高め、さらに、テロ行為に対する核物質防護を増強する。

- WGのミッション
 - GEN IV原子力システムの核拡散抵抗性 (PR)と核物質防護 (PP)についてシステマティックな評価のための評価手法を開発、実証する。

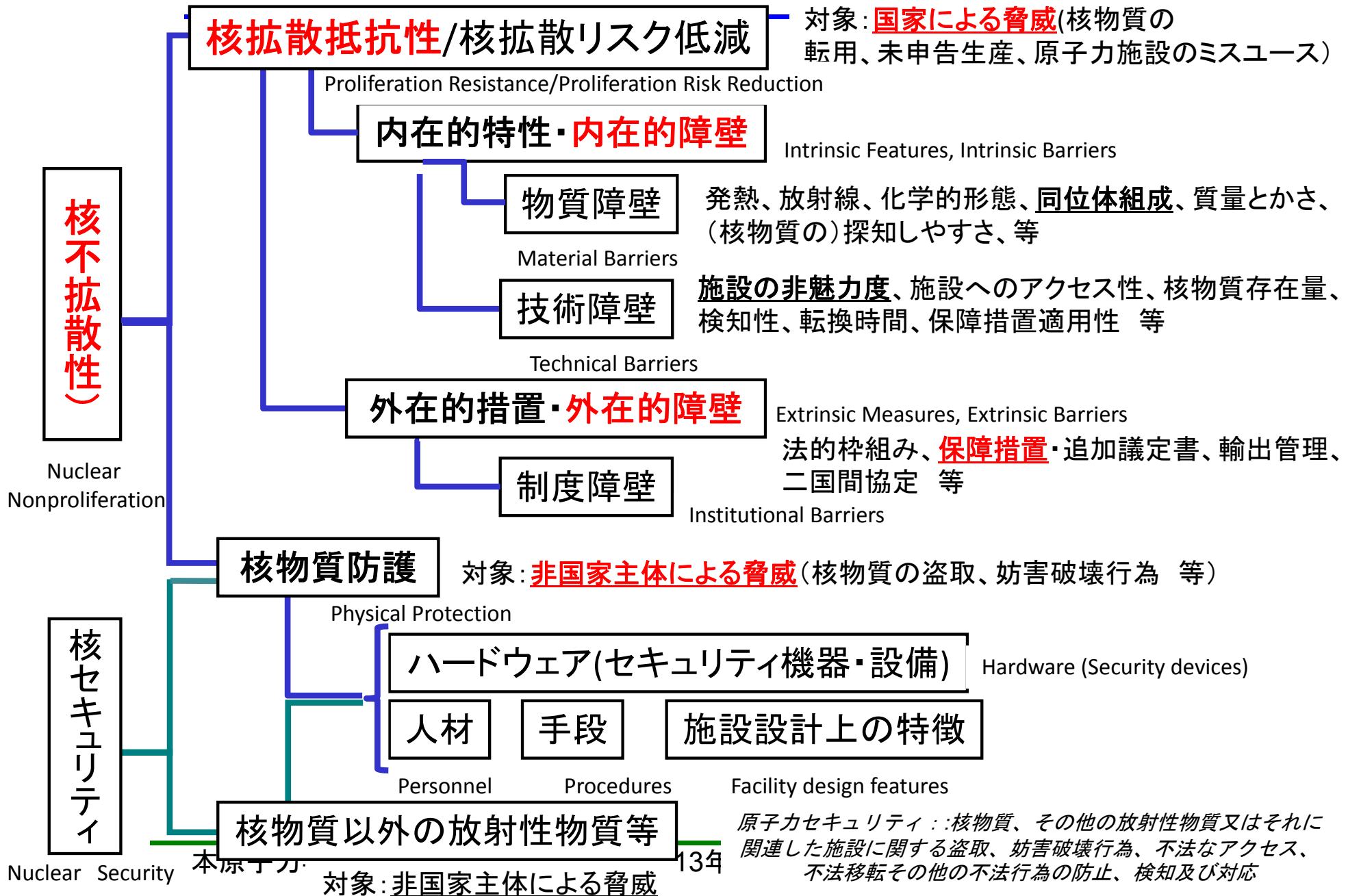
- 参加国・組織
 - 米国 (DOE-NE/NNSA、国立研究所、大学、他)、カナダ、EU、仏国、日本、韓国、英国 (初期のみ)、IAEA、ユーラトム、ロシア、中国
 - Co-Chairsは米国2人 (B. Bari, P. Peterson)、カナダ1人(J. Whitlock)

- 第1回全体会合：2002年12月
 - 全体会合：年1回 (2006までは年3回)
 - テレコン：月1回 (2009までは隔週)
 - サブグループ活動 (会合、テレコン)、ワークショップ等

拡散抵抗性に係る重要な定義

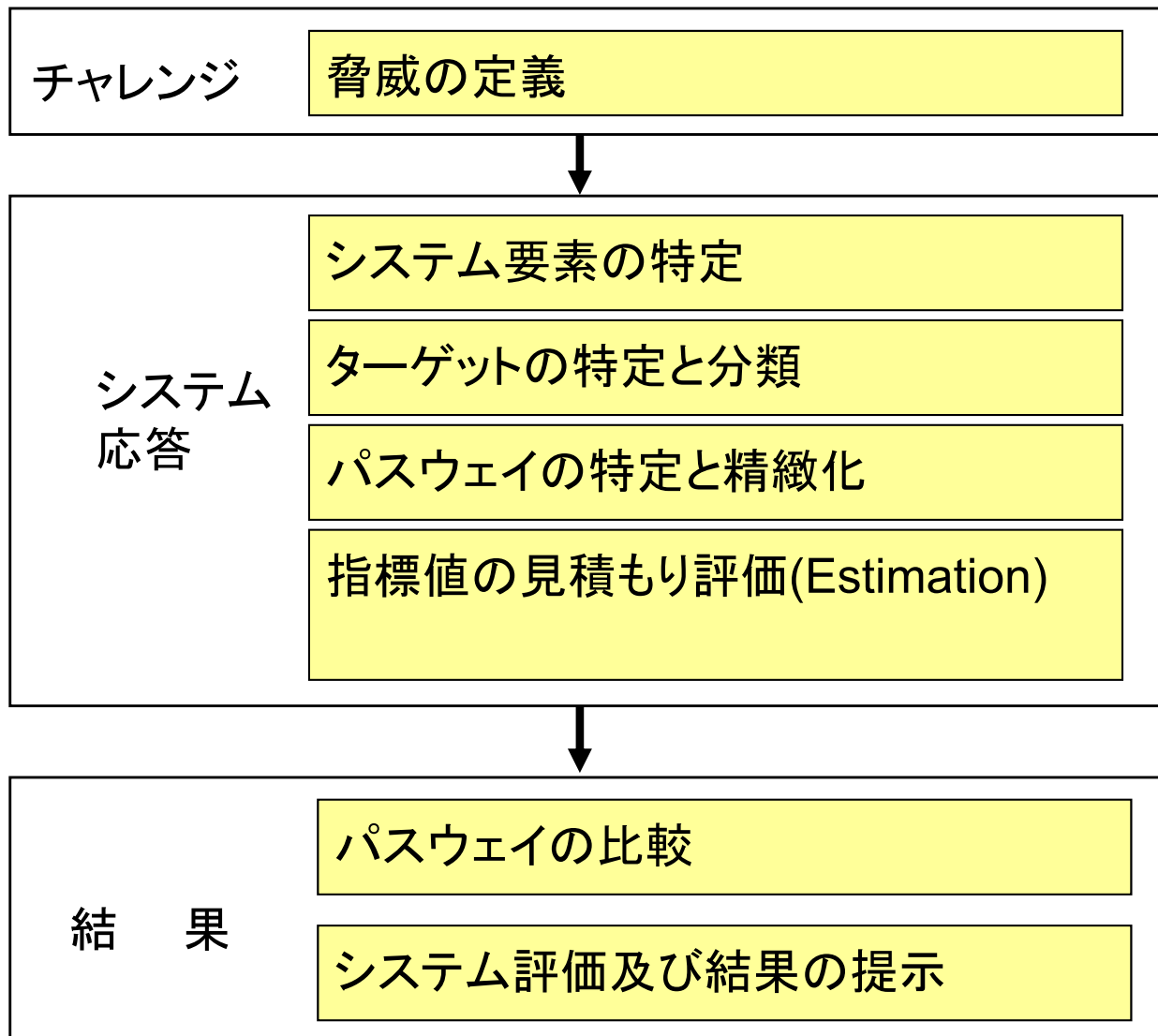
- **核拡散抵抗性(Proliferation Resistance)**
 - ✓ 核兵器または他の核爆発装置の獲得を目的とした、(ホスト)国による、未申告の核物質の生産や転用及び技術の不正使用を妨げる原子力システムの特
性。
- **核物質防護(Physical Protection)**
 - ✓ 核物質防護 (堅牢性) は、非国家主体や敵対する非ホスト国による、核爆発装置あるいは放射能拡散兵器 (RDDs) に適した物質の盗取及び施設や輸送の妨害破壊行為を妨げる原子力システムの特
性。(GIF)
- **抵抗性のレベル**
 - ✓ 技術的設計特性、運転形式、制度的取り決め、保障措置の組み合わせで決まる。
- **抵抗性の内在的特性(Intrinsic features)**
 - ✓ 原子力システムの技術的な設計上の特徴、外在的措置の実施を容易にするものを含む
- **抵抗性の外在的措置(Extrinsic measures)**
 - ✓ 原子力システムに関する国家の決意や事業による措置

核不拡散用語の体系



- 次世代原子力システムの概念設計の可能なもっとも早期の段階で設計プロセスにPR&PP特性を導入する
- 設計と保障措置の進展に伴って、詳細情報が増え、これがPR&PP評価モデルに組み込まれる：設計と共に進展(詳細化) Progressive refinement
- PR&PPは安全性や経済性と共に検討されるべき
- PR&PP評価結果は政策立案者による選択のベースとなる

標準的な安全性評価アプローチと同じ



例)

PR:秘密裏転用/ミスユース
ブレイクアウト,秘密裏

施設

PP:盗取、妨害破壊行為

内在的特性:

物理的・技術的な設計上の特性

外在的措置:

制度的取り決め、協定

指標と尺度による表現

- **核拡散の技術的困難性** (T D, Proliferation Technical Difficulty)
技術が本来内包する拡散行為に対する困難性。セル等の核物質の取り扱いの困難性等。
- **拡散コスト** (P C, Proliferation Cost)
既存施設あるいは新規施設を用いる拡散行為に必要とされる経済的・人的投資。
- **拡散時間** (P T, Proliferation Time)
拡散行為にかかる時間。
- **核分裂性物質のタイプ** (M T, Material Type)
核爆発装置に利用する際に影響する核物質の特性。
- **検知確率** (D P, Detection Probability)
拡散行為を（保障措置により）検知する確率。
- **検知リソースの効率** (D E, Detection Resource Efficiency)
国際保障措置を適用するのに必要な人、装置、資金。

核物質防護 3 指標

- **敵の成功確率** (Probability of Adversary Success)
敵対者がパスウェイに描出される行為を成功裏に完了し、結果を生む確率。
- **結果** (Consequences)
パスウェイに描出される敵対者の行為が成功裏に完了することによる影響。
- **核物質防護リソース** (Physical Protection Resources)
バックグラウンドスクリーニング (身元調査)、検知、妨害及び無効化等の核物質防護を提供するのに要する、人、能力及びコスト。また、脅威の能力の変化に対するこれらのリソース感度。

拡散抵抗性指標の尺度 (Scales)

指標及び尺度	尺度スケール (中間値)	拡散抵抗性	核物質タイプ HEU=高濃縮ウラン、ノミナルで95%U-235 WG-Pu =兵器級プルトニウム、ノミナルで94%核分裂性Pu同位体; RG-Pu =原子炉級プルトニウム、ノミナルで70%核分裂性Pu同位体; DB-Pu =高燃焼度プルトニウム、ノミナルで43%核分裂性Pu同位体 LEU =低濃縮ウラン、ノミナルで5%U-235
<i>内在的特性によって決まる指標</i>			
拡散の技術的困難度 (TD) 尺度例：脅威者の能力を考慮した内在的な技術的困難性によりパスウェイが失敗する確率	0-5%(2%) 5-25%(10%) 25-75%(50%) 75-95%(90%) 95-100%(98%)	非常に低い 低い 中程度 高い 非常に高い	
拡散コスト (PC) 尺度例：国の軍事予算に対する割合	0-5%(2%) 5-25%(10%) 25-75%(50%) 75-100%(90%) >100%(100%)	非常に低い 低い 中程度 高い 非常に高い	
拡散時間 (PT) 尺度例：パスウェイを完遂するのにかかるトータルの時間	0-3ヶ月 (2ヶ月) 3ヶ月-1年 (8ヶ月) 1-10年 (5年) 10-30年 (20年) >30年 (>30年)	非常に低い 低い 中程度 高い 非常に高い	
核分裂性物質タイプ (MT) 尺度例：無次元のランク分類 (HEU, WG-Pu, RG-Pu, DB-Pu, LEU);核物質属性に基づく補間	HEU WG-Pu RG-Pu DB-Pu LEU	非常に低い 低い 中程度 高い 非常に高い	

拡散抵抗性指標の尺度 (Scales)

指標及び尺度	尺度スケール (中間値)	拡散抵抗性
<i>外在的措置と内在的特性によって決まる指標</i>		
検知確率 (DP) 尺度例：累積検知確率	a	非常に低い
	b	低い
	c	中程度
	d	高い
	e	非常に高い
検知リソース効率 (DE) 尺度例：査察業務量(人・日当り、PDI) 当りの発電量(GWe・年)(または査察コスト\$)	<0.01 (0.005 GWy/PDI)	非常に低い
	0.01-0.04 (0.02 GWy/PDI)	低い
	0.04-0.1 (0.07 GWy/PDI)	中程度
	0.1-0.3 (0.2 GWy/PDI)	高い
	>0.3 (1.0 GWy/PDI)	非常に高い

検知確率 (DP)

A -劣化ウラン、天然ウラン及び低濃縮ウランに対する、IAEAの検知確率より顕著に低い累積検知確率と適時性目標

B -1年で50%(劣化ウラン、天然ウラン及び低濃縮ウランに対するIAEAの検知確率及び適時性目標に等しい)

C 3ヶ月で20%、1年で50%(1有意量の使用済燃料/照射済核物質に対するIAEAの検知確率及び適時性目標に等しい)

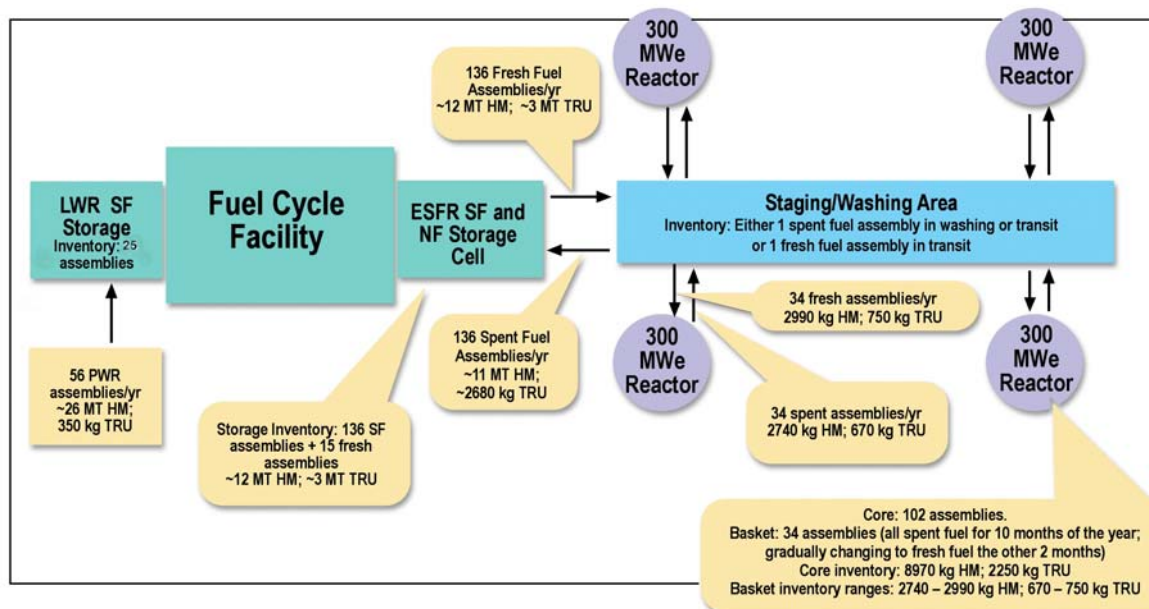
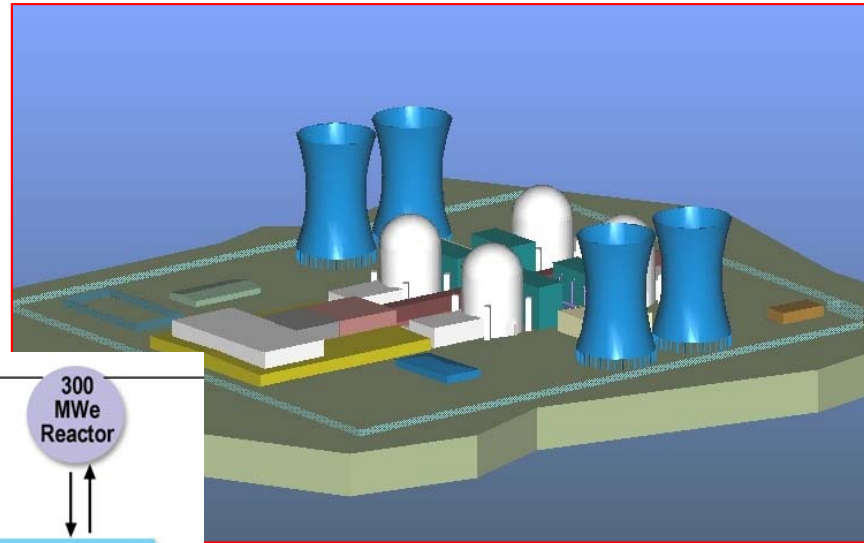
D -1ヶ月で50%、1年で90%(これは1有意量のHEU/分離Puに対するIAEAの検知確率及び適時性目標に等しい)

HEU/分離Puに対するIAEAの検知確率及び適時性目標よりも顕著に大きい累積検知確率。

GIF PRPP WGの検討活動

- 評価手法の枠組みを解説したRev.5報告書(2006公開)
 - 2002年のWG設立後、指標、尺度等の検討を行い、2006年11月にRev.5報告書を発行
- ESFRデモスタディ (2004～2007)
 - Example Sodium Fast Reactor System (ESFR)を利用した評価手法の開発と検証
 - PP指標は各国の核物質防護体系と整合
 - 各国の国内活動と国際活動の調和
 - GEN IV原子力システムのPRとPPに対するシステムティックな評価のための手法を開発し、検証する
 - 定量化の3アプローチを開発
- ESFRケーススタディ (2007～2008)
 - ESFRを用い、評価手法の高度化を目的として、4シナリオについて定性的アプローチを用いて評価スタディを実施
- SSCsとの適用ジョイントスタディ (2008～2010)
 - GIF下の各炉型毎のSSC (System Steering Committee)と共同で定性的アプローチを用いた評価を実施
- Harmonization (2008～)
 - INPROや国内プログラムとの整合性検討
- Rev.6報告書 (2011公開)

- 仮想的ナトリウム高速炉システム（ESFR）を用いた評価手法のデモンストレーション研究
 - Example Fast Reactor System



アプローチ：システム応答を解析して指標値を推定する手法

1) 定性的アプローチ

- ・ 専門家ジャッジメントを利用して抵抗性指標をシステムティックに評価する
- ・ LLNL:燃料サイクル施設から一括転用、UCB：分割転用

2) 論理ツリーアプローチ

- ・ PNNLは転用の失敗可能性をフォールトツリーでモデル化
- ・ MITは成功の可能性をサクセスツリーでモデル化

3) マルコフモデルアプローチ

- ・ BNLはマルコフ鎖手法を適用
- ・ 拡散パスウェイをシステム要素に分割し、要素間の移行をランダムプロセスとみなす。特定の要素に到達するあるいは終了ステージに至る確率を移行率から算出。（例：転用率と保障措置の査察率（頻度））
- ・ 評価ツール”PRCALC”を開発

● 主な目的

- GIFのPR & PP手法を第IV世代の原子炉／燃料サイクルシステム全体に実施
- 様々な設計オプションを比較することにより、本手法が特に設計者や意思決定者のために有意の結果を生成できることを実証する。
- 本手法の将来のユーザーのためにPR & PP評価の事例を提供する。

● 対象シナリオ

1. 秘密裏の物質**転用**
2. 秘密裏の施設**不正使用**
3. **ブレイクアウト**をした上で公然の転用又は不正使用
4. 兵器利用可能物質の**盗取**又は施設システム要素への**妨害破壊行為**

● 使用するアプローチ:定性的アプローチ

● 設計バリエーション

- TRU転換比(0.73、0.22、1.00、1.12)

● 報告書を2010年に公開(OECD/NEAサイト上)

ケーススタディからの知見

(転用、不正使用、ブレイクアウト、盗取・妨害破壊行為)

1. PR&PP評価は定性的解析から始めるべき

評価(研究)、仮定の脅威、ターゲットの特定、システム 要素などの範囲が明確になる。

⇒定性的解析の詳細なガイダンスが必要

2. 専門家の役割が必須

⇒PRとPPの専門家と専門家聴取技術が必要

3. 定性的解析は予備設計レベルで貴重な結果を提供する。TD, PD, PC, MTについては直接的な表現が可能。DEと(特に)DPは定量化が難しい。

その他の最近の活動

GEN IV 6炉型への評価手法適用研究(2007年～2010年)

- PR&PP評価手法をGIFの6炉型に適用
- 短期的活動
 - GEN IVシステムのPR&PP上の性能を強化するための設計・運転上の特徴についての知見をまとめる。
- より長期的な活動
 - PR&PPを支援する設計・運転上の原則等考え方の確立。
 - SSC代表と作業会のオブザーバを交えた3回のワークショップの開催（2008年5月、2009年7月、2010年1月）
 - SSCsとPR&PPメンバーの共同作業による各システムのPR&PP上の特徴をまとめた報告書を公開(2011年7月)

INPROの拡散抵抗性評価手法との整合研究(2008～)

- IAEA/INPROの拡散抵抗性評価手法との整合性研究
 - 共通点・相違点、目的・役割、相互補完的な関係の整理
 - 課題は多い
 - 評価結果の表現方法(政策立案者、規制当局、設計者)
 - 指標や尺度の整理

その他の最近の活動

“Safeguards by Design” (SBD)を可能に...

- 設計者のニーズ：設計するシステムの「保障措置適用性 (Safeguardability)」
- 内在的特性と外在的措置の組み合わせの最適化
- 包括的であっても柔軟で、ユーザーが設計上の制限や設計の目標を考慮して自身で決定できるようなツールが必要
- PR&PP評価手法はこれに役立つツールを提供していく

ナショナルスタディとの連携

日本の新型炉・サイクルシステム開発 の観点からの課題と方向性

- **GIF PRPP WG等の国際的検討の場の活用**
 - 核拡散抵抗性や核不拡散は国際的懸念
 - 評価手法は国際的コンセンサスの下で開発された手法を用いるべき
 - GIF PRPP 評価手法は設計へのフィードバックを目的として開発されているため設計者のニーズに合わせやすい
 - 引き続き評価手法開発への協力・貢献
- **設計者との共同作業の重要性**
 - 拡散抵抗性評価及び抵抗性強化のための検討は設計者と核拡散抵抗性・保障措置専門家の共同作業が必須
 - 日本は非核兵器国で唯一大規模燃料サイクルを保有し、運転する国
 - その確立の過程における保障措置分野での開発、適用の経験に基づく共同作業により得られる成果・知見は国際的にも貴重
 - 一方で機微情報、知的財産権、商業機密問題があり国際枠組み下での検討は困難
- 評価手法はあっても、評価結果の判断基準については確立されていない
 - 政治的な判断が入る余地があり困難
- 国内での共同検討を進め、その成果を随時適切な場と相手に発信していく
- 核セキュリティ(核物質防護)評価への適用性検討

- GIF PRPP WGの評価手法開発と活発な活動
 - 評価手法報告書 (Rev.5) : 2006年11月公開
評価手法の枠組み、指標・尺度
 - ESFRデモンストレーションスタディ
指標値を見積もるための3つのアプローチの開発
 - ケーススタディ評価報告書 : 2010年9月公開
評価事例
 - 評価手法ユーザーを対象としたワークショップ
日本での開催 : 2006年11月、2011年2月22日
- 日本の新型炉・サイクルシステム開発の観点から
 - 拡散抵抗性評価手法は国際的コンセンサスの下で開発されたものを利用すべき
 - 評価結果の判断基準についての検討
 - 設計者との共同作業の重要性
 - 成果の適時適切な場と相手に対する発信
 - 核セキュリティ(核物質防護)評価への適用性検討