

## GIF PRPP WGの活動について

日本原子力研究開発機構  
原子力人材育成・核不拡散・核  
セキュリティ総合支援センター  
技術開発推進室  
芝 知宙

# GIF PRPP WGの紹介

# GIF PRPP WGの概要

## ➤ GIF PRPP\*目標

- 原子力システムが、核物質の転用について、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

- 第4世代炉の核拡散抵抗性 (PR)と核物質防護 (PP)についてシステムティックな評価のための評価手法を開発、実証する。
- 第4世代炉のさらなる研究開発のために、現在におけるPRPPの特性を示した報告書を時機に応じて発行する。

## ➤ 参加国・組織

- 米国、カナダ、EURATOM、英国、日本、韓国、フランス、中国、南アフリカ、IAEA（オブザーバー）、NEA（事務局）

## ➤ Co-Chairs：3名（EURATOM、米国、フランス）

## ➤ 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）
- Web会合：隔月（2024までは毎月）
- アウトリーチを目的としたワークショップ、等

\* PR: Proliferation Resistance, 核拡散抵抗性  
PP: Physical Protection, 核物質防護

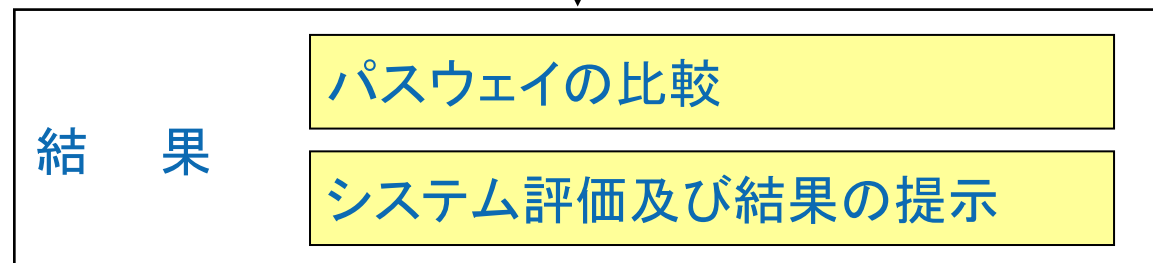
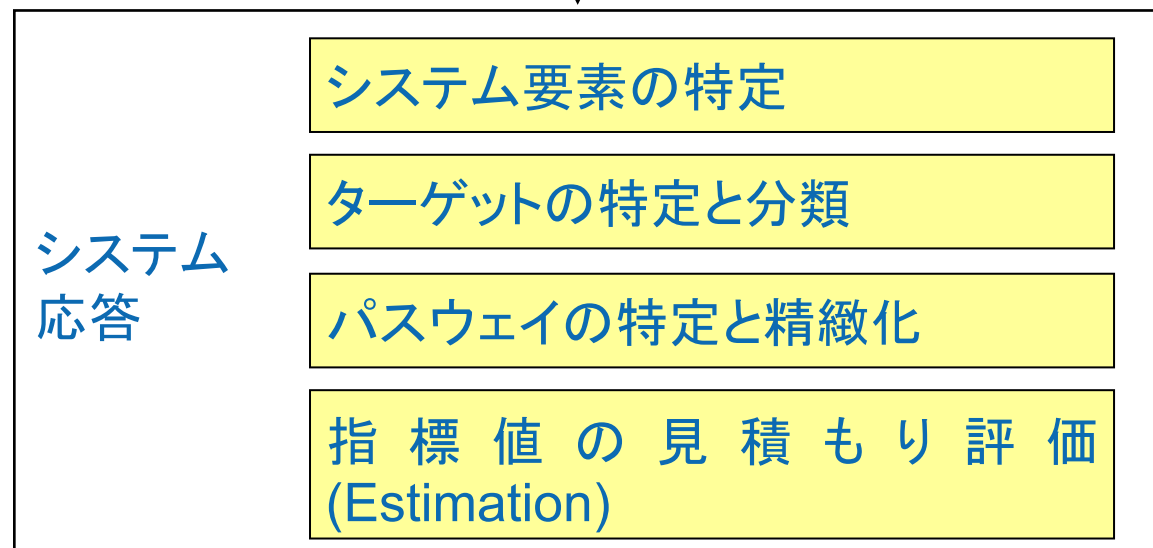
# PRPP 評価手法

# GIFにおけるPRPP評価の目的

- 第4世代炉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**PRPP**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**PRPP**評価モデルに組み込まれる
  - 設計と共に進展・詳細化（**Progressive refinement**）
- **PRPP**は安全性や経済性と共に検討されるべき
- **PRPP**評価結果は政策立案者による原子力システム選択の基礎情報となる

# 評価の枠組み

標準的な安全性評価アプローチと同じ



例)

PR:秘密裏転用/不正使用  
ブレイクアウト,秘密裏施設  
PP:盗取、サボタージュ

内在的特性:

原子力に係る技術そのものが持つ特性

外在的措置:

制度的取り決め、協定

指標と尺度による表現

# 拡散抵抗性指標の尺度(Scales)

| 指標及び尺度                                                                               | 尺度スケール<br>(中間値)                                                          | 拡散抵抗性                             |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 内在的特性によって決まる指標                                                                       |                                                                          |                                   |
| <b>拡散の技術的困難度 (T D)</b><br>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%)<br>5-25%(10%)<br>25-75%(50%)<br>75-95%(90%)<br>95-100%(98%)     | 非常に低い<br>低い<br>中程度<br>高い<br>非常に高い |
| <b>拡散コスト (P C)</b><br>尺度例：国の予算に占める軍事費の割合                                             | 0-5%(2%)<br>5-25%(10%)<br>25-75%(50%)<br>75-100%(90%)<br>>100%(100%)     | 非常に低い<br>低い<br>中程度<br>高い<br>非常に高い |
| <b>拡散時間 (P T)</b><br>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)<br>3ヶ月-1年 (8ヶ月)<br>1-10年 (5年)<br>10-30年 (20年)<br>>30年 (>30年) | 非常に低い<br>低い<br>中程度<br>高い<br>非常に高い |
| <b>核分裂性物質タイプ (M T)</b><br>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 | H E U<br>W G - P u<br>R G - P u<br>D B - P u<br>L E U                    | 非常に低い<br>低い<br>中程度<br>高い<br>非常に高い |

## 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

# 拡散抵抗性指標の尺度(Scales) 続き

| 指標及び尺度                                                                       | 尺度スケール (中間値)             | 拡散抵抗性 |
|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------|
| 外在的措置と内在的特性によって決まる指標                                                         |                          |       |
| <b>検知確率 (D P)</b><br>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 |
| <b>検知リソース効率 (D E)</b><br>尺度例：査察業務量(人・日当り、P D I) 当りの発電量(G W e・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、I A E A 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I A E A 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I A E A 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H E U/分離P uに対するI A E A の検知確率及び適時性目標に等しい)

H E U/分離P uに対するI A E A 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.

# ESFRケーススタディ

# ケーススタディ

- 主な目的

- PRPP手法を第4世代炉の原子力システム全体に適用

- 燃料サイクルも評価に含んだ稀な取り組み

- 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な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PRPP評価の事例を提供する。

- 対象シナリオ

- 1. 秘密裏の核物質転用

- 2. 秘密裏の施設不正使用

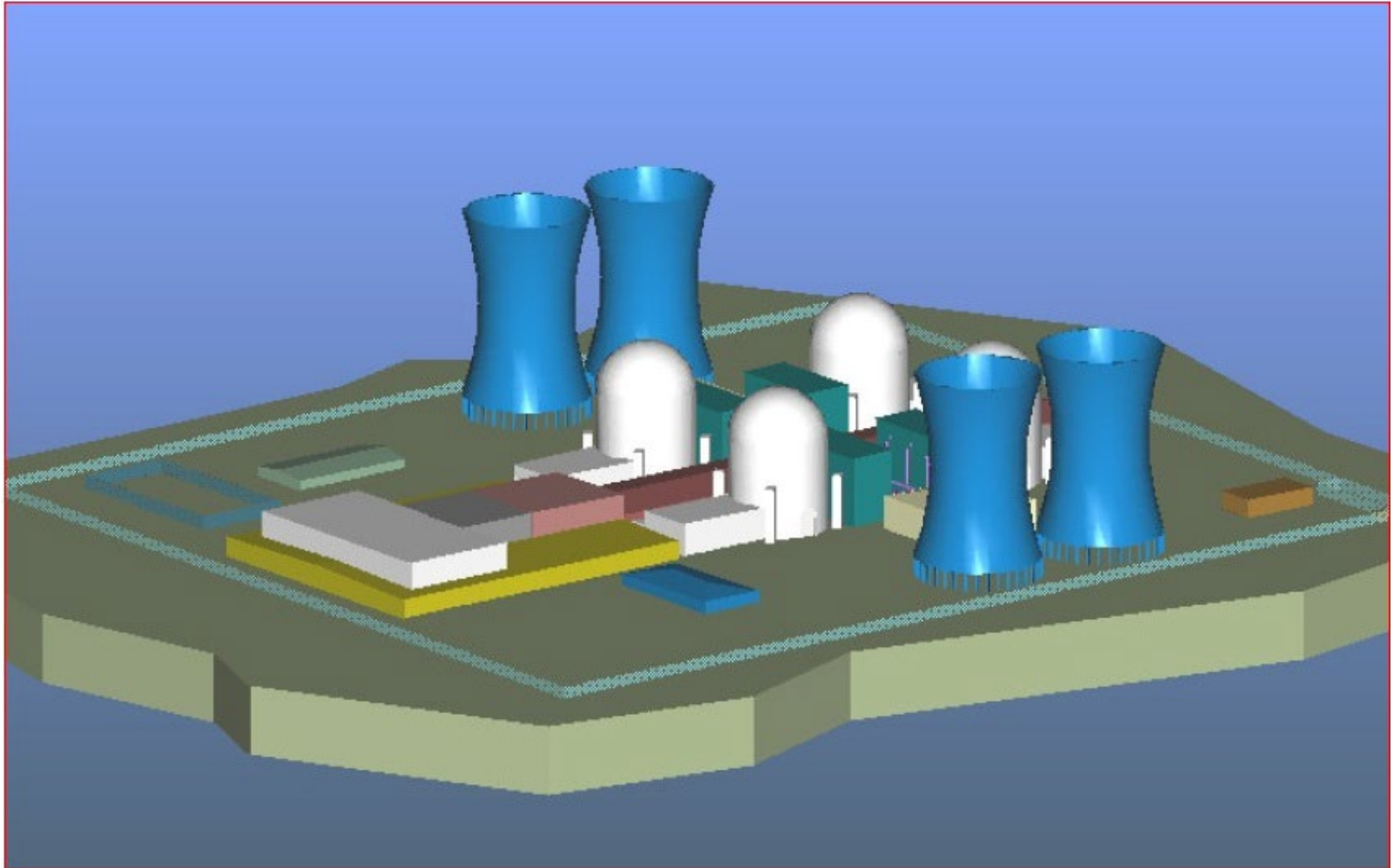
- 3. ブレイクアウトをした上で公然の転用又は不正使用

- 4. 核物質の盗取又は施設への妨害破壊行為

- 使用するアプローチ：基本的には定性的アプローチを採用する（専門家による検討・考察を利用して抵抗性指標を評価する）

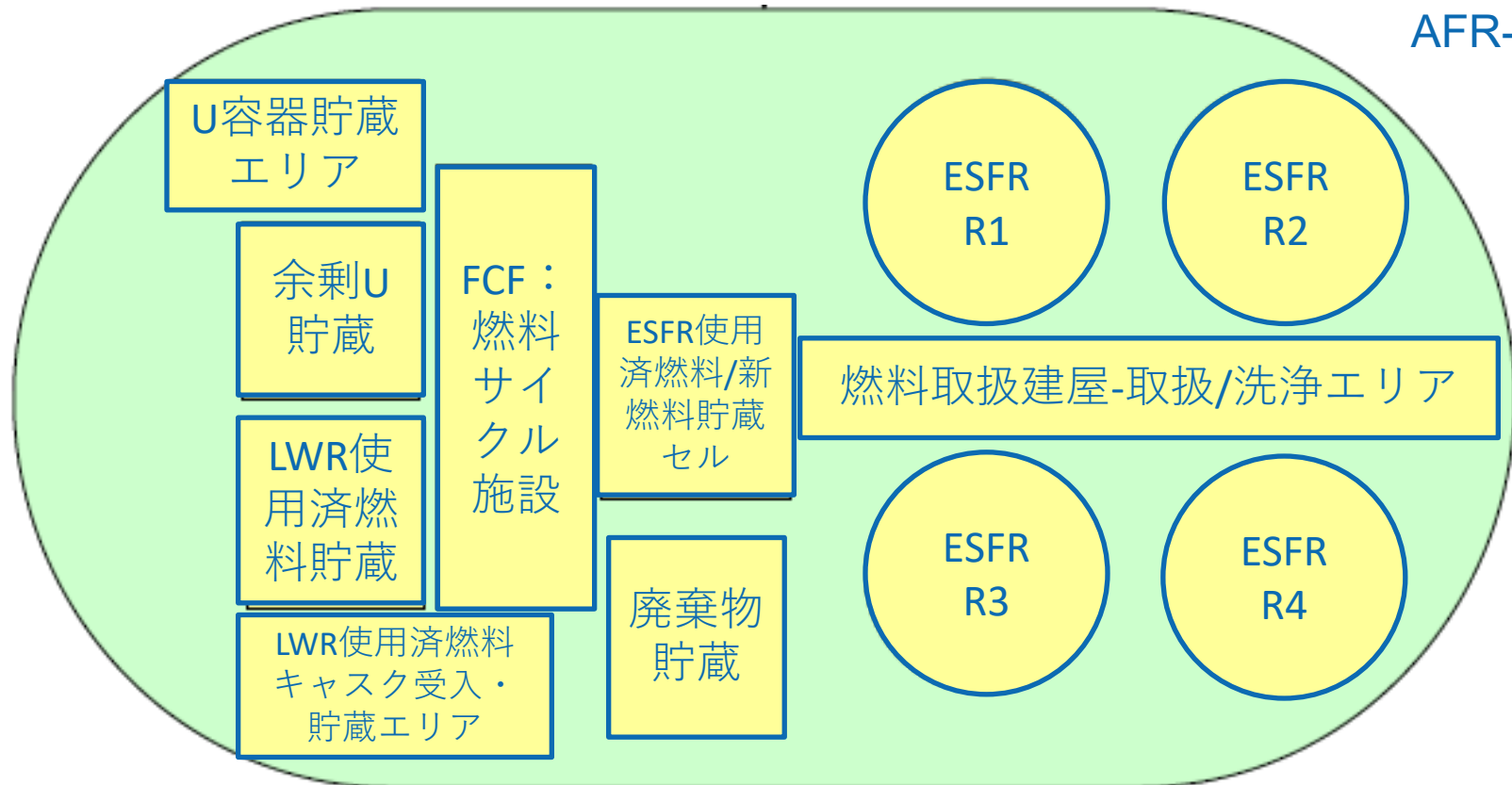
- 報告書を2010年に公開(OECD/NEAサイト上)

## Example Sodium Fast Reactor (仮想的ナトリウム高速炉)



★転換比をパラメータとし（0.73、0.22、1.00、1.12）増殖も考慮

AFR-300



# 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・サボタージュ)

1. PRPP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・PPの専門家への聴取技術が必要
3. 定性的解析であっても予備設計レベルで有意義な結果を提供する。
  - 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

# 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

- 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保障措置やPP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難しいのが現状

# PRPP 白書

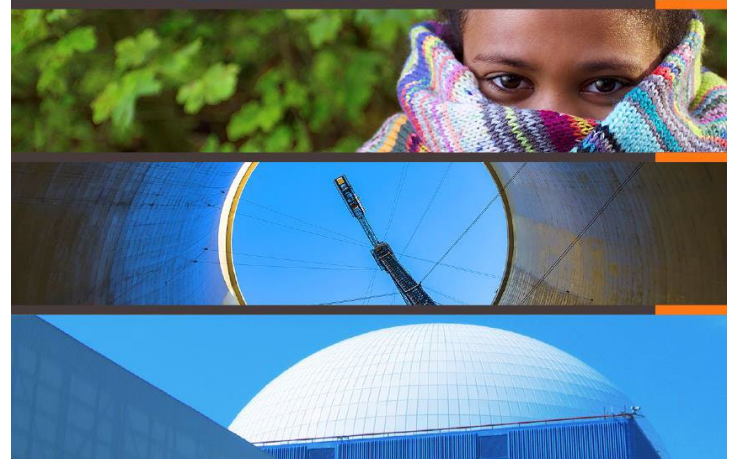
GIF/PRPPWG/2022/005

**GEN IV** International  
Forum  
Expertise | Collaboration | Excellence

## **GIF VERY-HIGH-TEMPERATURE REACTOR**

Proliferation Resistance  
and Physical Protection White Paper

August 2022



# PRPP白書について

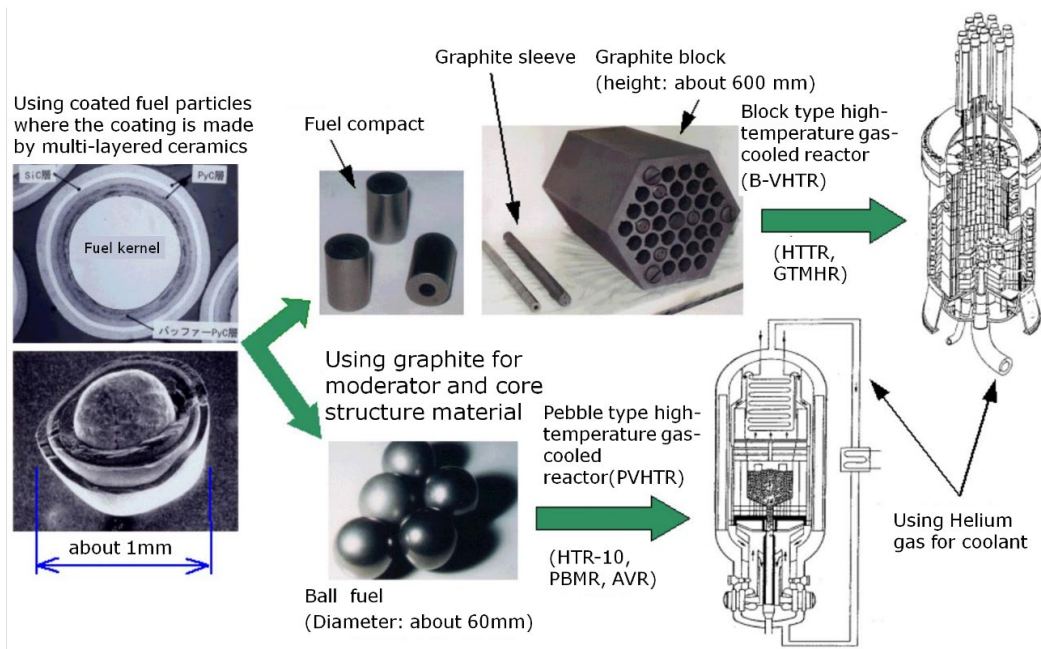
- 第4世代炉のさらなる研究開発のために、現在における**PRPP**の特性を示した白書を時機に応じて発行している。ただし、手法を適用するものではない
- **PRPP WG**とシステム運営委員会が共同で執筆。日本は超高温ガス炉（**VHTR**）を担当
- **PR**で内在的特徴に課題があるシステムの場合は、強固な外在的特徴（より多くのモニタリング、監視、又は測定）を必要とする。これらのトレードオフは炉の経済性に影響するため、設計者はこれらの事実を考慮する必要
- 原子炉設計者は、堅牢で費用対効果の高い**PP**設計をするために、設計の初期段階で複数の妨害破壊行為 / 盗取シナリオを検討することが強く推奨される。
- **Safety by Design**は設計の常識であるが、敵対者の脅威対策をより完全にするために、原子力安全と保障措置・セキュリティの統合的なアプローチ（**3S**）をとることが推奨される。
  - これらのコストは全体的な経済性において重要な役割を果たす可能性がある。設計プロセスの早い段階で **PRPP**を考慮した設計とすることにより、コストのかかる改造を避けることができる。

# 白書の章立て

|                             |                                                                                                                       |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.技術の概要                     | GIFの参照システムとなる設計について、指針・方針と開発状況を含む一般的な概要を説明する。文献が参照可能な場合は、設計の詳細な技術概要を述べる                                               |
| 2.燃料サイクルの概要                 | GIFの炉型に付随する燃料サイクルのタイプ、および1章で説明されている主な設計オプションの概要について説明する                                                               |
| 3. PRPPに関連するシステム要素と潜在的な敵の目標 | それぞれの設計オプションについて、関連するシステム要素とそれらの潜在的な敵の目標を記述する。                                                                        |
| 4.核拡散抵抗性の特徴                 | 炉型委員会とPRPP WGが共同で検討した、大まかな（定性的な）核拡散に関する特長を説明する。その特徴とは、参照システムが持つ、代表的な拡散の脅威それぞれに対する潜在的な利点（≒魅力度）、または核拡散上問題となるシステムの機能である。 |
| 5.核物質防護の特徴                  | 炉型委員会とPRPP WGが共同で検討した、大まかな（定性的な）核物質防護の定性的概要を述べ、潜在的な脅威に対して敵対者の利益または問題となるシステム設計の要素について、PPの一般的な議論を展開する。                  |
| 6. PRPPの懸念および利点             | GIFの炉型および付随する燃料サイクルに関するPRPPに関連する未解決の問題、強み、および3Sを含むPRPPの統合と評価の将来計画について述べる。また、炉型に対するPRPPの具体的研究開発ニーズについても述べる。            |

# 超高温ガス炉白書の主な結論

- 高温耐性のある**TRISO** 燃料を使用するペブルベッド型とブロック型の概念が検討されている。
- 低い燃料濃度と、再処理技術が工業的に成熟していないことは、**PR**上有利である。
- ブロック型設計は、燃料集合体の員数勘定により利益を得ることができるが、ペブルベッド型設計は、追加の保障措置の考慮事項（より多くのモニタリング／測定）を必要とがある。
- ペブルベッド型の**PR**の利点は、**IAEA**の**SQ**を取得するために5～10万個の燃料球を必要とすることである。
- 大量の燃料球は、盗取の観点からは**PP**の利点であるが、事業者は使用済燃料球の妨害破壊行為を考慮する必要がある。



# 原子炉立地研究と3S Interface

## PRPP Siting Study for Advanced Modular Reactors (AMRs) and Microreactors (2025)

- 先進モジュール型原子炉（AMR）およびマイクロリアクターの様々な設置場所の選択肢が、核拡散抵抗性および物理的防護に及ぼす影響について検討する。
- AMRの設置場所として以下の4つの選択肢を検討
  - 遠隔地
  - 人口密集地付近
  - 浮体式または洋上発電所
  - 民間の船舶推進システム
- 単一モジュール方式と複数モジュール方式、ヒートシンク（シビアアクシデント時の徐熱機能）、自律運転と遠隔運転、HALEUとLEU、輸送の横断的な検討事項を検討

## 今後の展開の可能性

- AMRがデータセンターの近郊にあること、SMRが既設の大型原発の近傍にあること、Emergency Planning Zone (EPZ)等について検討していく

## Case Study of Safety, Security and Safeguards (3S) Interfaces for a Very High Temperature Reactor System (2025)

- 第4世代原子炉の設計初期段階から、安全（Safety）・核セキュリティ（Security）・保障措置（Safeguards）の3Sインターフェースを特定・評価
- 3S-by-Designの実現に向けた、技術中立的なガイドライン
- GIFのPRPP WG、RSWG、VHTRシステム運営委員会が共同でケーススタディを実施
  - 参照システムとしてペブルベッド型高温ガス炉を想定
- 各Sの目的が相互に阻害される可能性のある競合（Conflict）の整理
  - 例：燃料を高度に封じ込めることによる安全性と保障措置性
- 各Sの目的がConflictの緩和や相乗効果（Synergy）をもたらすものの整理
  - 例：TRISO燃料の安全性の高さと核物質の転用のしにくさ
- 特定されたインターフェースの多くは、他の第4世代炉にも適用可能な一般的特徴を有することを確認