



# 核不拡散と原子力の平和利用を 巡る国際動向

## 核不拡散に向けての技術的課題

核不拡散科学技術センター

久野祐輔



# エルバラダイ事務局長国連総会で演説

## 2007年10月29日

- 原子力への関心が復活する状況において、原子力が長期的な持続性を確実なものとしていくには技術革新や新しい制度の導入が大きなポイントである。とくに、燃料供給を保証し、核拡散リスクを抑えるためには、核燃料サイクル(フロントエンド、バックエンド両方)に関する多国籍レジームの開発を求める。
- Atoms for Peace initiativeから50年経過した今、私はこれまでの教訓や現状を取り入れた新しい原子力平和利用に関するフレームワークを考える時が来たと信じる。
- イランの未解決な問題を解決する上で、イランの積極的な協力と透明性の確保は重要な要因である。今年8月にIAEAとイランの間で合意した行動計画の実施状況について11月IAEA理事会で報告するつもりである。
- 原子力の応用分野において、ある地域で行われている原子力設備容量やインフラの整備拡大によって活気づけられている。
- 地価水帯水層の多国籍管理、害虫除去に関する広範囲の協力、原子力発電所プラントの共同所有・管理などの協力事業に対する機会は、技術協力に新たな意義を加えつつ、具体的計画の段階に来ている。
- IAEA予算に関して、IAEA憲章や加盟国からの要請に基づくプログラムを効率的に実行していくためには十分なリソースが緊急に必要である。
- 原子力が人類破滅の原因となるのではなく、平和と繁栄のエンジンとなるためのミッションを委ねられた国際機関としてのIAEAの役割の重さは、IAEAが設立された50年前と変わりはない。

# 原子力ネットワーク-新たな局面

- 先進核燃料サイクル開発の再燃
  - 温暖化防止、グローバルエネルギーセキュリティから原子力、高速炉+クローズドサイクルへの流れ
  - GEN IV, INPRO、GNEP
- 核不拡散の議論における新たな局面
  - 核不拡散対策を重視し、米・仏も保障措置適用を明言
  - 保障措置を包含した抵抗性の議論が活発化
  - 高速炉-先進サイクルに対する保障措置を検討
  - Puの本格的な利用-Pu取り扱い量増大-



# 今後の原子力に求められるもの

## 世界規模のパワーグロース

- 原子炉および原子燃料の供給ニーズ
- 使用済み燃料の対応ニーズ
- 核燃料サイクルのニーズ (Pu利用)
- 廃棄物処理処分ニーズ
- 安全かつ経済的な原子力システムのニーズ
- 転用リスクに対する核拡散抵抗性のある原子力システムのニーズ



世界規模での対応(合意形成) = 国際社会の受け入れ

一国で核燃料サイクルを含む原子力システムを考える時代の終焉



# 核不拡散のための対策

- ・ IAEA保障措置強化・合理化: 追加議定書(AP)の普遍化、統合保障措置など
- ・ CTBT(包括的核実験禁止条約)発効へ向けて
- ・ FMCT(兵器用核分裂性物質禁止条約)交渉開始へ向けて
- ・ 地域的取り組み: 透明性、地域計量管理・保障措置システム、非核兵器地帯条約な
- ・ 輸出管理の強化: NSG、ザンガー委員会
- ・ 核物質防護(PP)の強化
- ・ 核不拡散安全保障(PSI: proliferation Security Initiative)
- ・ 国際管理・供給保障構想
- ・ GNEP構想: 保障措置強化など
- ・ GenIV, INPRO: 核拡散抵抗性の向上

# 平和利用の担保に資する技術開発

## ○保障措置効率化技術

信頼性が高く、効率的な保障措置手法確立のための研究開発

## ○計量管理技術

施設の大型化等に対応した高度な計量管理技術の研究開発

## ○未申告活動探知技術

未申告の核物質や活動を探知するための環境サンプリング技術の研究開発

## ○先進リサイクル施設の保障措置

将来の先進リサイクル施設に適用する保障措置の研究開発

## ○核拡散抵抗性技術


転用を困難にする核拡散抵抗性技術の研究開発

## ○信頼醸成のための研究

原子力利用に対する国際的な信頼醸成のための核拡散抵抗性評価手法、  
透明性向上の研究開発

## ○核不拡散政策研究

核不拡散に関連する政策立案を支援するための核不拡散政策研究



国内外の理解と信頼の向上  
原子力平和利用の担保



# 今後の核燃料サイクルにおける不拡散対策

## 考えられる対策

先進保障措置技術＋核拡散抵抗性技術の最適な組み合わせ  
(効率的、経済性があり、国際社会に許容されるレベル)、かつ  
透明性の高いシステム

- 制度に基づく対策
  - International Safeguards [Comprehensive Safeguards Agreement + Additional Protocol], Bilateral Agreements, Export Control, Security (PP) etc
- 補完的対策
  - Proliferation Resistance (Intrinsic)
  - Transparency (e.g. provision of information on nuclear activities to neighbor countries, public)



# 核不拡散に向けた技術課題 (原子力平和利用)

- 保障措置技術
- 核拡散抵抗性技術
- (透明性向上技術)





# (I) 保障措置技術

## ■ Full Compliance with IAEA Safeguards

- Ratified NPT in 1976
- Signed Comprehensive Safeguards Agreement (CSA) in 1977
  - Excellent record of compliance with Comprehensive Safeguards since 1977
- Ratified Additional Protocol (AP) in 1999
  - Japan has fully implemented AP since then.

# 保障措置の強化・効率化

## パート1 (現行の保障措置協定内で既に実施されつつある手段)

### 情報の追加提供

- 設計情報の早期提出
- 原子力活動情報の追加提供

### 立入の強化

- 無通告査察の適用拡大
- 保障措置環境サンプリング手段の導入

### 保障措置の効率化

- 新たな保障措置技術の開発
- 国内保障措置制度との協力

核物質を対象とした  
現行の保障措置の  
強化・効率化手段

## パート2 (IAEAとの追加議定書締結により実施可能となる手段)

### 新規情報提供

- 核物質を用いない核燃料サイクル関連研究・開発活動の情報
- 原子力関係資機材の製造組立活動の情報 など

### 立入の強化 (補完的立入)

- 疑義が生じた場合等のIAEA査察官の立入強化
- 保障措置環境サンプリング手段の拡大

情報分析を特徴とする  
保障措置の強化



- NPT推進が膠着の中、中長期的には「秘密裏に核兵器を取得しようとする活動を抑止できる体制」の整備を図る。
- まずは「秘密裏の核開発を検知」を徹底し、国際圧力で核兵器国を増やさないこと。



### IAEA保障措置強化策を支援

「追加議定書の普遍化によるIAEA保障措置の強化こそ、現在のところ核不拡散体制を強化するため最も現実的かつ効果的な方途である」

(日本国政府)

IAEAではこれに伴い従来の原子力施設に対する保障措置の「効率化(合理化)」が重要な課題となった。

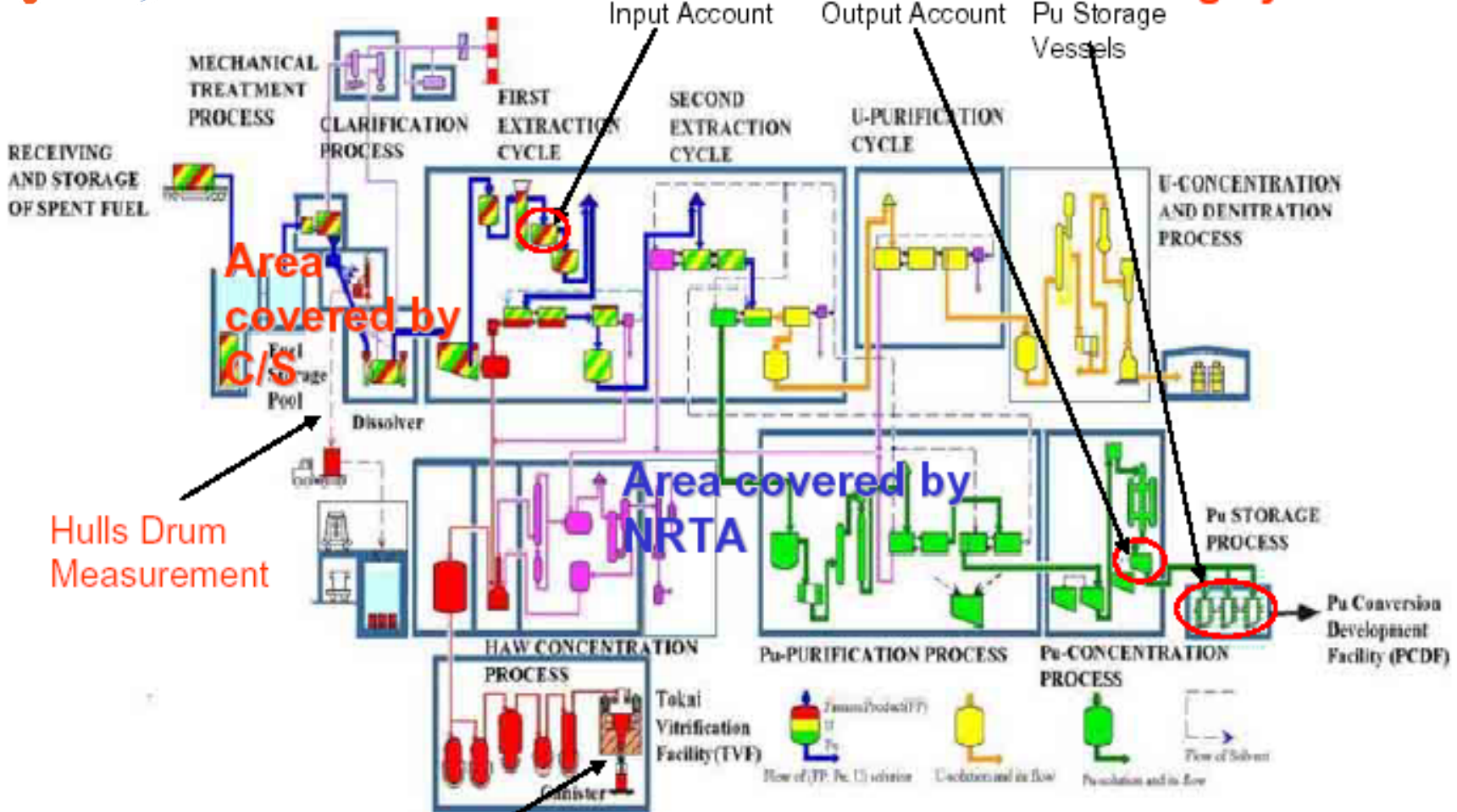


## 保障措置技術の開発・導入

- **Tokai Reprocessing Plant (TRP)**
  - Introduced new SG technologies through TASTEX
  - Actively cooperating with the IAEA for a long time (e.g. JASPAS)
  
- **Rokkasho Reprocessing Plant (RRP)**
  - Establishing the Large Scale Reprocessing Plant Safeguards (LASCAR) contributing to the examination of the safeguards methods and procedures
  - Closely collaborating with the IAEA and the US from the design stage, developing and installing a variety of safeguards technologies



# Solution Measurement and Monitoring System



Area covered by C/S

Area covered by NRTA

Hulls Drum Measurement

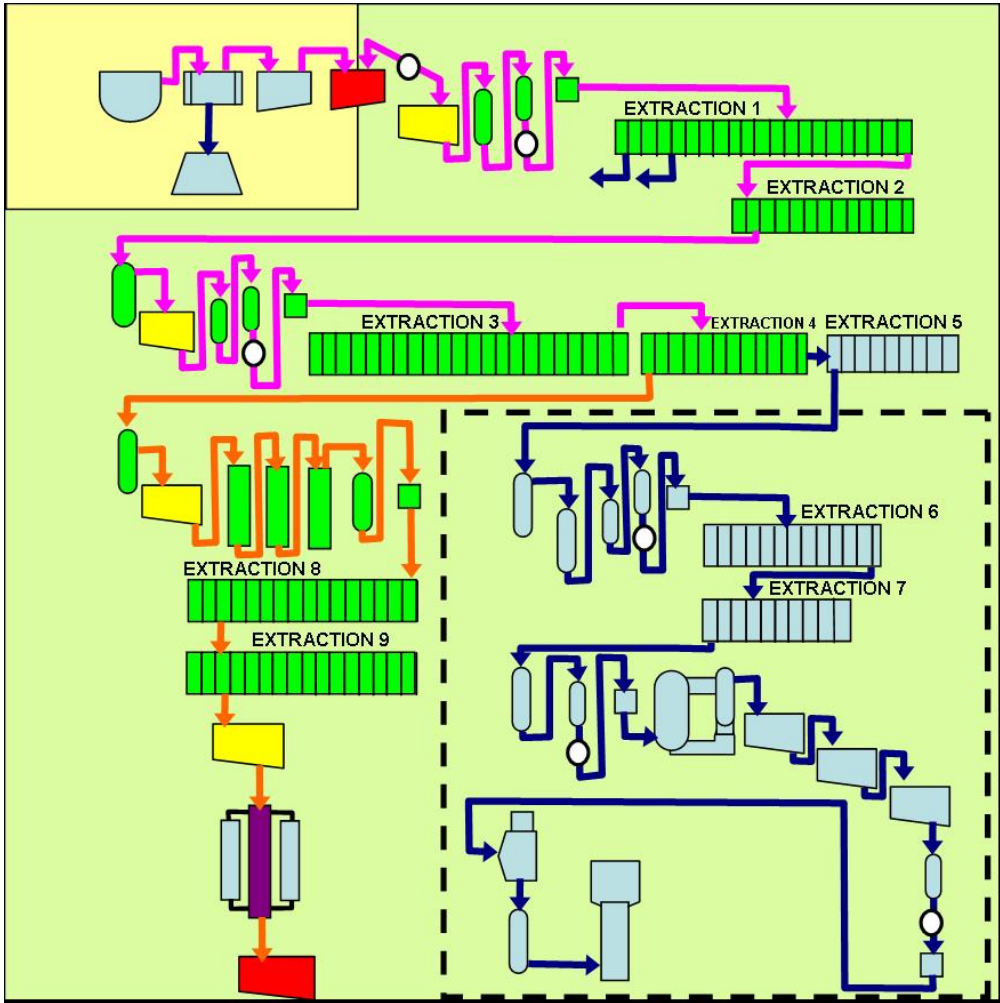
Vitrified Waste Canister Measurement

Unattended Verification and Monitoring System at TRP

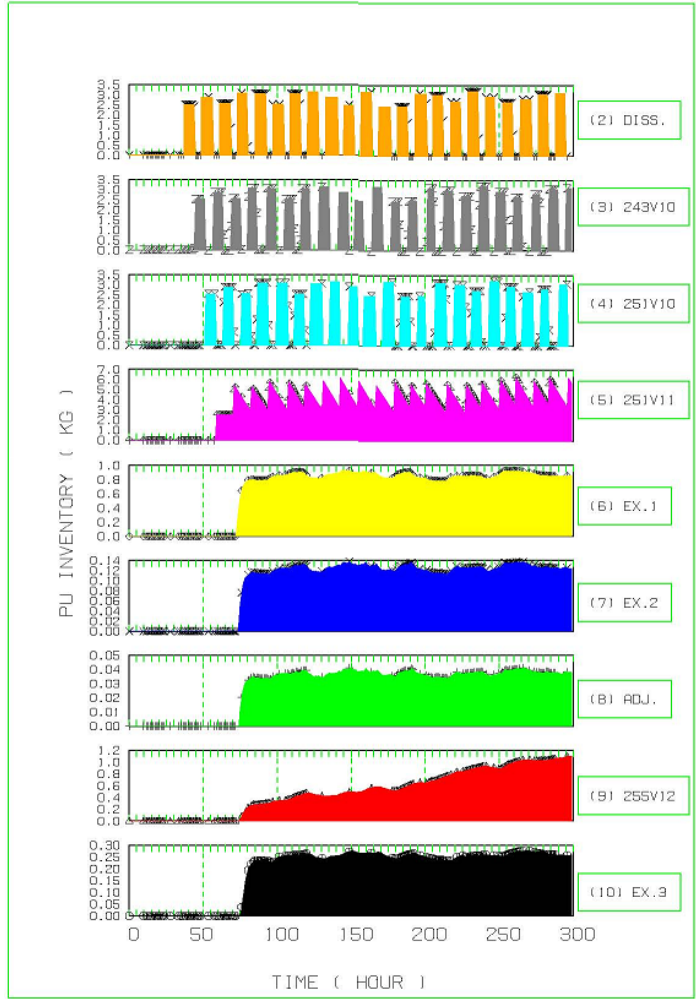
## 東海再処理工場における保障措置技術

# SG Simulator Sample (TASTEX)

TRP Model Plant

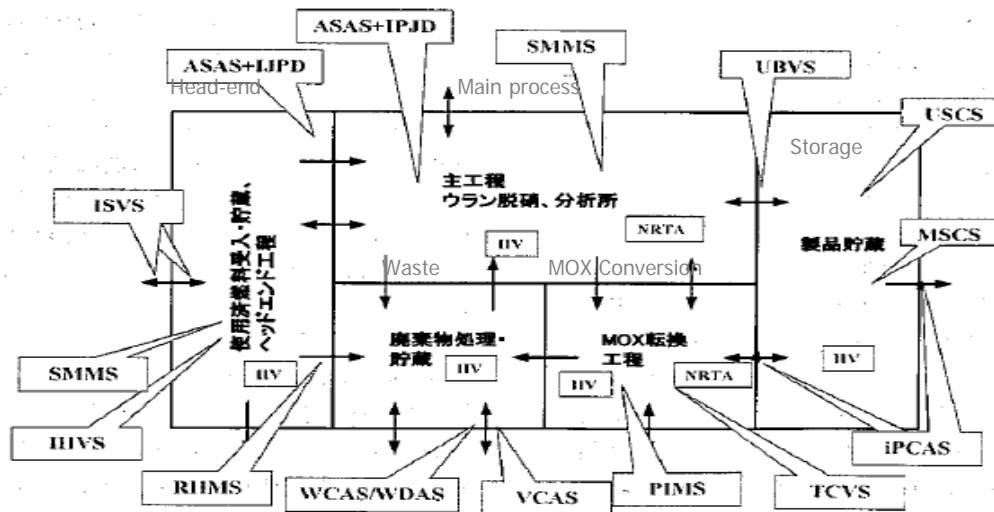


In Process Pu Inventory of TRP Model Plant



# 六ヶ所再処理施設における保障措置

- DIQ/DIV
- デュアルC/S(監視カメラ、放射線検出器)
- 工程のモニタリング(ハルモニター、ソリューションモニタリング、PIMS等)
- NRTA
- 査察官非立会い検認、査察データの一元的収集化
- 各種NDA
- 最新技術による計量管理システム
- オンサイトラボラトリーによる迅速検認



注)

ISVS : Integrated Spent fuel Verification System  
 IHVS : Integrated Head-end Verification System  
 ASAS : Automatic Sampling Authentication System  
 WCAS : Waste Crate Assay System  
 VCAS : Vitrified Canister Assay System  
 TCVS : Temporary Canister Verification System  
 MSCS : MOX Storage C/S System  
 USCS : Uranium Storage C/S System

SMMS : Solution Monitoring and Measurement System  
 RHMS : Rokkasho Hulls Drum Measurement System  
 IJP D : Inspector Jug Passage Detector  
 WDAS : Waste Drum Assay System  
 PIMS : Plutonium Inventory Measurement System  
 iPCAS : Improved Plutonium Canister Assay System  
 UBVS : Uranium Bottle Verification System



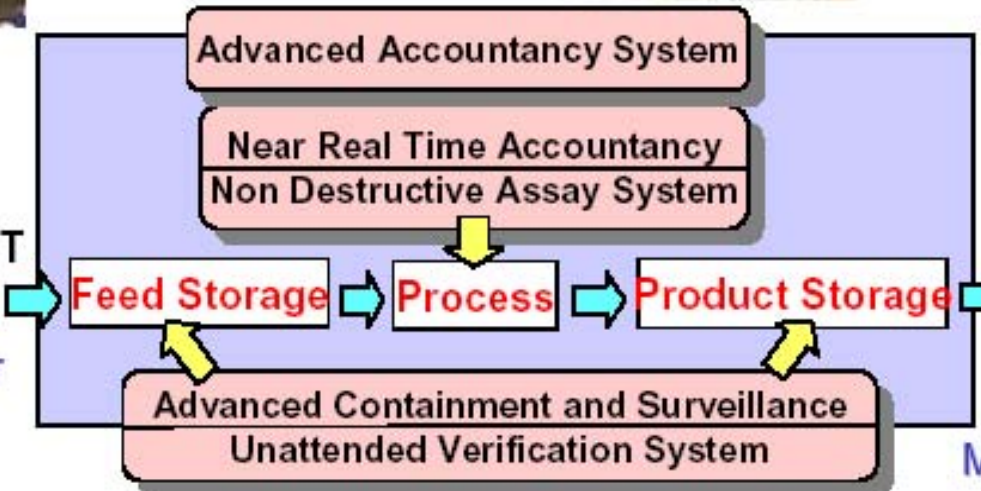
AAS  
(Advanced Accountancy System)

SBAS  
(Hold-up Measurement System)



WDAS  
(Waste Drum Measurement System)

PCAS  
(Plutonium Canister Measurement System)



AC/S  
(Advanced Containment and Surveillance System)



FAAS  
(Fuel Assembly Measurement System)



Unattended Verification System and Material Accountancy System at PFPP

プルトニウム燃料製造施設における保障措置技術





# —保障措置の効率化を目指して—

## 統合保障措置 (I)

- 統合保障措置とは  
CSA及びAP双方の下で利用可能なSG手段を最適に組み合わせ、最大限の効率性を達成するためのもの
  - (1) 未申告原子力活動(未申告施設を含む)、未申告核物質検知のための活動 (強化)
  - (2) 強化されたSG活動の追加による在来活動との重複の是正 (効率化)  
SGパラメータ(有意量、適時性目標、及び探知確率)の一部を緩和できる
  - (3) 新規技術、新しい概念に基づく従来からのSG活動の効率化  
時代とともに発展していく検証技術や概念の導入により、SG活動を効率化していくことが可能
- 統合保障措置の原則
  - ✓ 非差別性
  - ✓ 情報分析及びその評価が基本
  - ✓ 核爆発装置目的の核物質収集経路の分析、申告済核物質の検認手段を含む
  - ✓ 計量管理は引き続き基本的に重要な保障措置手段として維持
- 従来の計量管理を基本としつつ、検知能力をあるレベルで維持しながら査察を効率化する→高効率保障措置



## 統合保障措置(II)

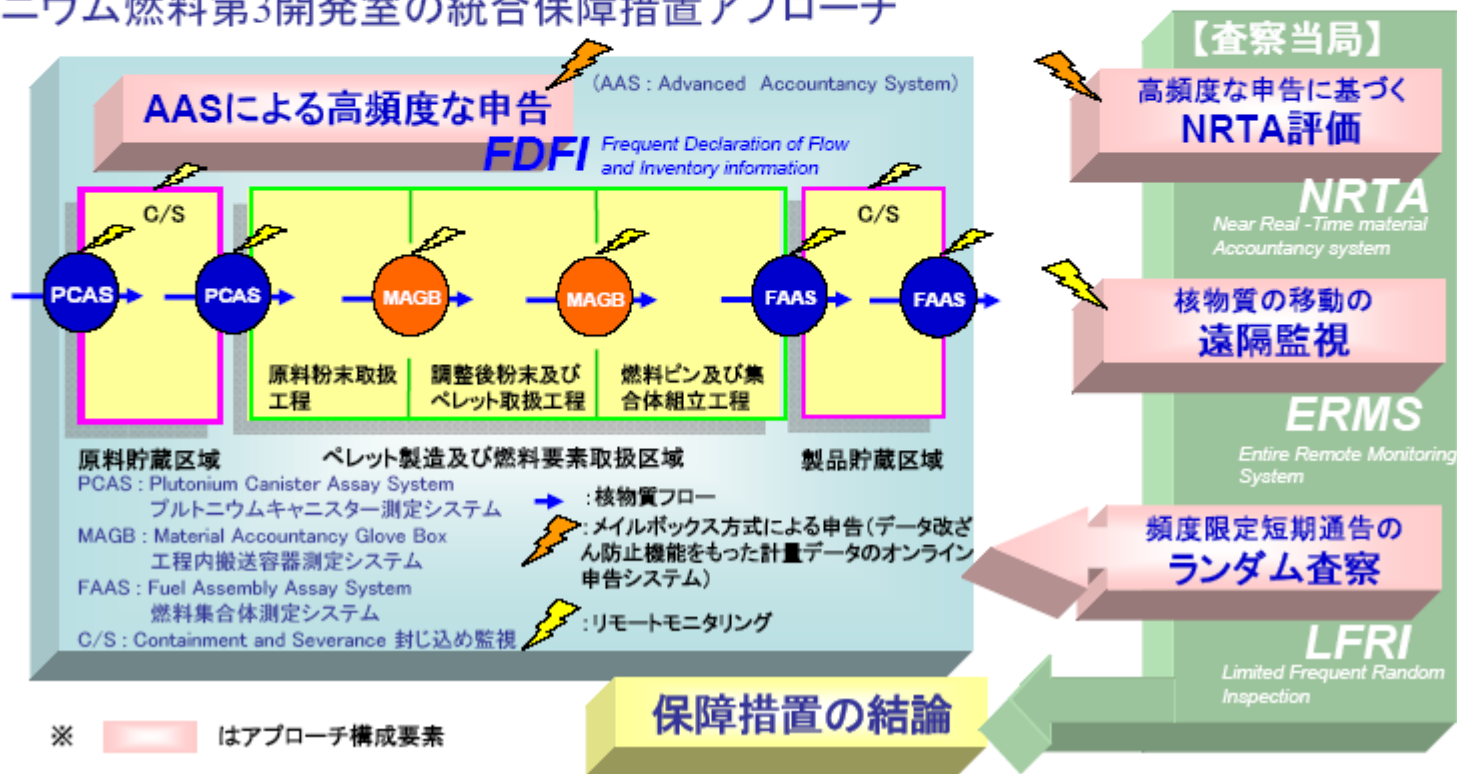
- 国全体 (state as a whole) に焦点を移す。
- 必要な情報 (当事国の申告、検認活動の結果、オープンソース等) からその国の過去、現在、未来の核 (平和) 利用計画に一貫性があることを評価。
- 確実な結論に至るに十分な情報が得られない場合はさらなる情報収集・分析を行う。
- 至るべき結論: 保障措置下におかれた核物質の転用を示す兆候も未申告の核物質および原子力活動を示す兆候もないとの「拡大結論」

# 保障措置効率化技術

『統合保障措置』は、IAEAが有する査察手段等を組み合わせ、最大限の効果と効率化を目指すもの。日本では、2004年6月のIAEAの『拡大結論』以降、軽水炉、ウラン燃料加工施設等に統合保障措置が順次適用。

保障措置の更なる効率化を目指し、プルトニウム取扱い施設の統合保障措置をIAEA、MEXT、NMCC、JAEA間で検討。非立会検認装置、リモートモニタリング等を組み合わせた統合保障措置アプローチをIAEAに提案。

## プルトニウム燃料第3開発室の統合保障措置アプローチ





## 次世代核燃料サイクルに対し保障措置上 考慮すべき点

- Puスループットの増大、高フィットサイクルのPuの取扱い(FBRケース)
- IAEA保障措置要求を満足？
- 査察の軽減？
- 経済性(費用対効果)？

# 93+2計画時の経費等に係る検討 結果の概要

- 経費削減の最大の可能性は、査察員がいなくても運転または保守が行われ、核物質の移動を監視する最新保障措置技術の開発・利用を継続することにある
- 未申告活動(特に、未申告再処理または濃縮)がないことの保証の積み重ねによる**適時性目標の緩和**を通じて、天然ウラン及びLEU燃料サイクル中の申告物質に対する保障措置実施の経費が削減できることが予想される
- 諸方策は**SSACとIAEAとの高レベルの協力を前提**としている。高レベルの協力とはSSACにとり業務量の増加、その結果としての経費の増大を意味するが、その増大の程度はそのSSACの性質並びに既に実施している活動により、ケースによってはSSACの業務量が減少する
- 特記すべきは、有効性を強化する方策の多くは、業務量または経費の増大を必要とする種類のものではなく、むしろ、情報増加のような開放性、IAEA**査察員の移動自由度**の増加、並びに新種技術及び機器の受入などであること



# 次世代核燃料サイクルの保障措置適用における キーポイント

The concept of “**Safeguards by Design**” may be essential for future NFC’s to realize **less inspection work-load, accurate accountancy, timely verification - high detection probability.**

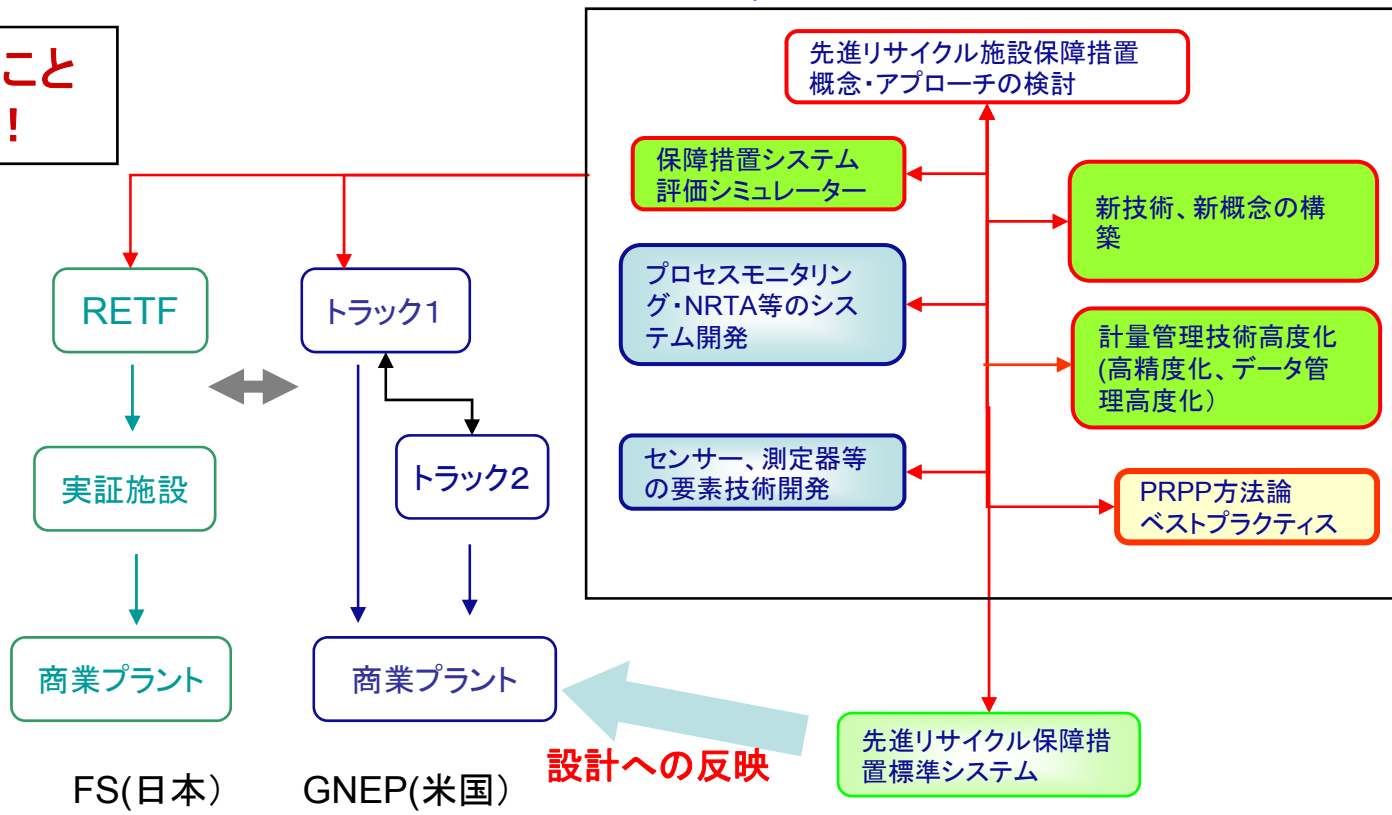
- Inventory (**small inventory**)
- **Accurate measurement system** (bulk measurement, representative sampling, DA, NDA)
- **Accountancy-friendly operational mode** (NRTA, more accurate interim inventory verification)
- CS, **real-time process monitoring**
- Timely verification; **Remote monitoring**, On-Site-Laboratory
- Unattended mode, **SNRI**

# 先進リサイクル施設の保障措置

次世代サイクルにおける保障措置の要件:

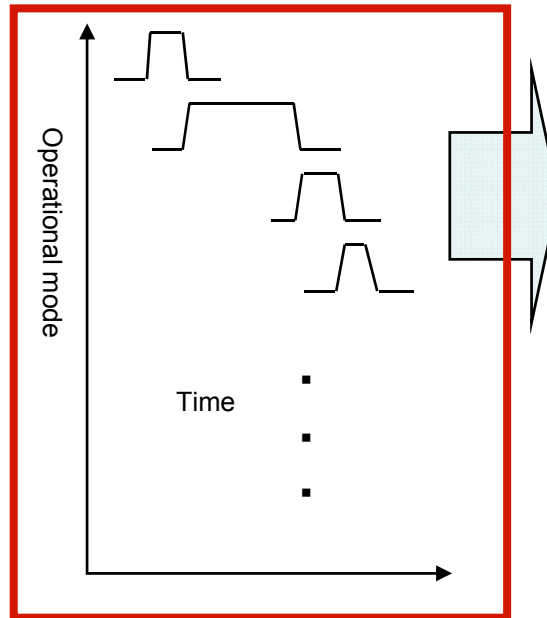
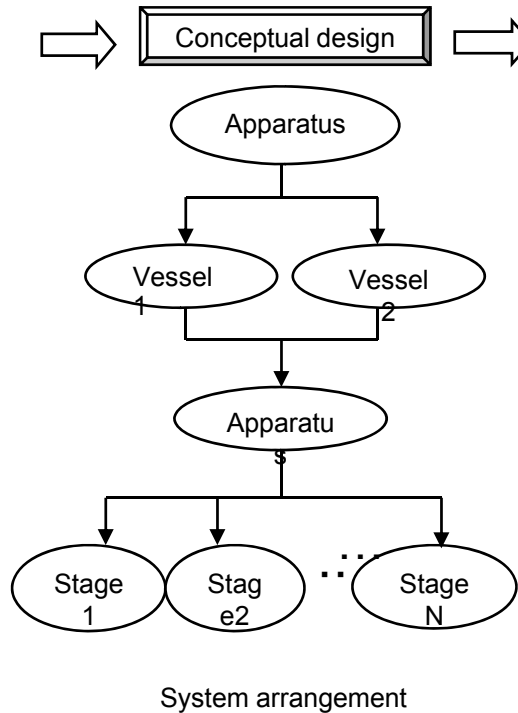
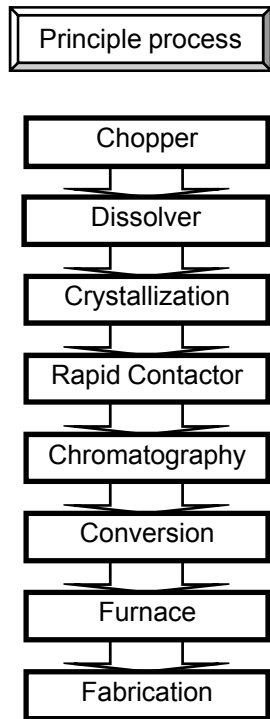
- ・統合保障措置下での高効率の査察の導入(例無通告査察)
  - ・計量管理技術高度化(正確さ、データ処理)
  - ・徹底したモニター化、リモートモニタリングによるプロセス情報提供  
(核物質移動モニター+プロセス変更による転用を適時に検知)
- ・適時性のある情報提供・検認(高頻度NRTA/IIV,オンサイト検認分析)

設計段階から組込むこと  
によりのみ実現可！！





# 計量フレンドリーな設計・運転モード Safeguards System Simulator



## Nuclear Material Accountancy Core

Nuclear material transfer module

- $\rho(\text{Pu})$ ; Density
- $M(\text{Pu})$ ; Mass
- $u, v, w$ ; Velocity
- $T$ ; Temperature
- $p$ ; Pressure
- $C(\text{Pu})$ ; Concentration

Chemical separation & MA module

- Aqueous, Organic
- Radioactivities
- Nuclides concentration
- Chemical reaction

## Multivariate Multi-scale Core

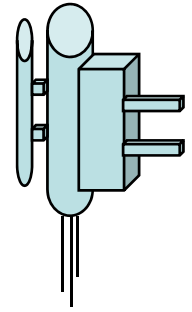
Process monitoring module

- Process monitoring
- Statistical analysis
- Wavelet analysis
- PCA

Optimized design



## 次世代モニタリング技術例



- 例: ボルタンメトリー・電導度・密度 合体のモニター
- ソリューションモニタリング、中性子・ガンマ遠隔モニターなど併用
- 再処理のほとんどのプロセスに適用可 (U, Pu, 酸濃度等)
- 遠隔モニタリングで「核物質フロー＋運転管理情報」をリアルタイムで提供、工程条件変更検出 (阻止)
- NRTAとともに遠隔でリアルタイムインベントリー検認



## (II) 核拡散抵抗性技術

定義：2002年10月にイタリア・コモでIAEAによって開催された国際技術会合 (IAEA/Centro Volta – Landau Network と共催) で文書化、現在の共通的定義とされている (GenIV, INPROを含む)。

- 「**国家が核兵器や他の核爆発装置を獲得することを目的とした核物質の転用や未申告生産、技術のミスユースを防ぐための原子力システム**の特性」
- 拡散抵抗性の程度は、とりわけ**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。
- **内在的拡散抵抗性の特性**は、**外的措置の実施を促進するものも含め、原子力システムの技術設計の結果から来る特性**である。
- **外在的拡散抵抗性の措置**は原子力システムに関連する**国家の決定と取り組み**である。



# 核拡散抵抗性

## わかりやすく言えば

制度や技術的な対応によって、国家の核拡散への選択を困難にすること。

核拡散抵抗性技術により、

- (1) 転用する場合の時間増加、
  - (2) 転用に必要の人、物、資金の増加、
  - (3) 転用しようとしても失敗する確率の増加、
- をもたらすこと。



# 転用シナリオ検討のベース

1. 国家主体による転用
2. 非国家主体・テロリストによる転用

「非国家主体・テロリストによる転用」対策については、核物質防護の強化でカバー

# 核拡散抵抗性の基本的理解

- 核拡散抵抗性は内在的な特性と外在的な措置の最適な組み合わせが、他の設計上の配慮と整合して原子力システムに含まれるときに最も費用対効果が良くなる。
- 核拡散抵抗性は、原子力システムの設計と開発のできるだけ早い時点で考慮に入れることで強化される。
- 管理や検認のような外在的抵抗性の措置は、内在的特性の有効レベルがいかなるものであっても不可欠なものがある。
- 内在的特性の効果的な使用は、外在的措置の効果的な適用を容易にする。

## 1) 内在的

- **拡散の技術的困難(TD)**— 拡散への多重の障壁を克服するために要求される技術的精緻化や核物質取扱能力の必要性から起きる固有の困難性。
- **拡散コスト(PC)**— 既存または新施設の使用を含む拡散への多重の障壁を克服するために要求される経済的、人的投資。
- **拡散時間(PT)**— 拡散への多重の障壁を克服するために要求される最小の時間 (すなわち、そのプロジェクトのために当事国によって計画される全時間)。
- **核分裂物質型(MT)**— 核爆発装置での使用によりその特性が実用性に影響する程度に基づく核物質の分類。

## 2) 外在的(+内在的)

- **検出確率(DP)**— 拡散の区分または経路を検出する包括的確率。
- **検出方策の効率(DE)**— NESに国際保障措置を適用するための、人、装置及び資金の使用の効率。

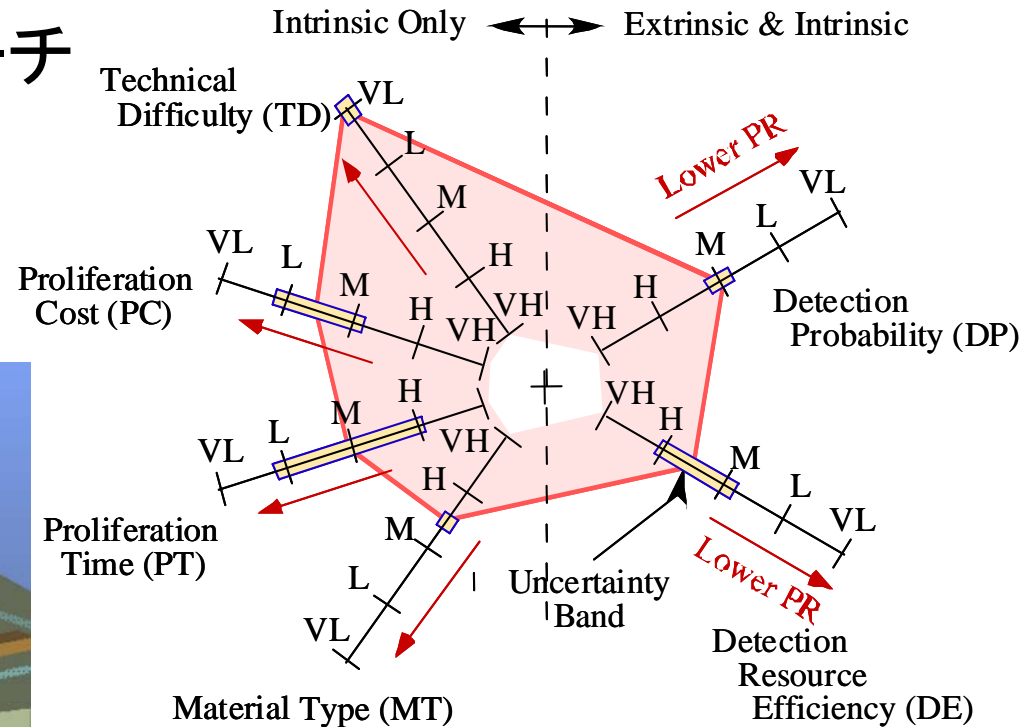
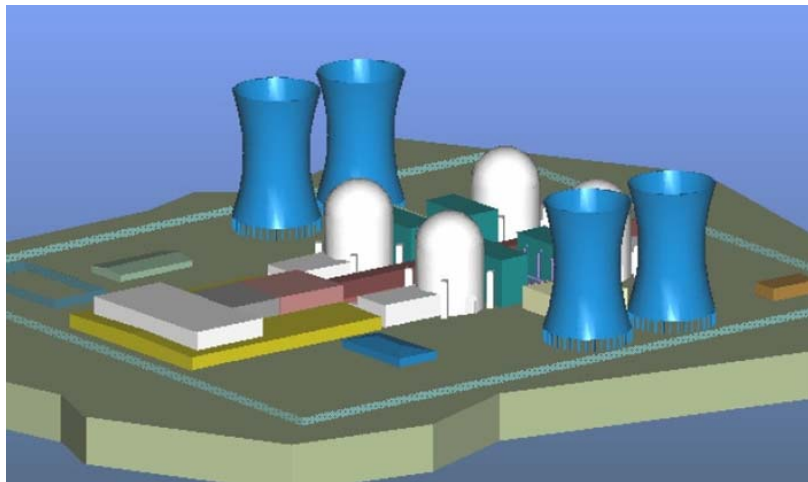
1) 物質形態・技術による拡散困難化 → それを克服するためのコスト・時間

2) 秘密裏・未申告転用の検出のしやすさ

# GIF PR&PP: 2002~

ESFR (Example Sodium Fast Reactor) システムを用いたケーススタディを通して3アプローチを開発

- 定性的アプローチ
- Logic Treeアプローチ
- Markovアプローチ



# 【核拡散抵抗性 GenIV、INPRO】

Gen IV

核拡散抵抗性と核物質防護 (PRPP)

- 抵抗性, 防護性にわけ評価
- シナリオに基づいて脆弱性を評価

PR&PP-1

PR&PP-2

ゴール

兵器利用物質の転用と未申告製造の容易性をライフサイクル全体で最小化、効果的なIAEA保障措置の実施促進

兵器利用物質あるいは有害な放射性物質の盗取への脆弱性の最小化、テロや破壊行為に対する施設や輸送システムの脆弱性の最小化

内在的特性によるもの

内在的+外在的特性によるもの

拡散の技術的困難さ高低

拡散コスト高低

要拡散時間長短

物質のタイプ抵抗性高低

検出確率高低

検知リソース効率高低

評価指標

INPRO

核不拡散性

- 核物質防護性は別評価
- 各ユーザ要求に対する満足度を評価

基本ポリシー

ユーザー要求

BP1

革新的核燃料システムの全寿命を通して対策が実行されること

BP2

内在的特性と外来的な対策の双方を備えること

UR1.1

核不拡散性に対する国の関与、義務、政策の妥当性

UR1.2

核物質の非魅力性

UR1.3

核物質の拡散困難性

UR2.1

多層の核拡散抵抗性と対策

UR2.2

内在性特性と外在性からの対策の最適化

判断基準(クライテリア)



# NMCCアプローチ

障害次元の高いシステムは保障措置レベルを緩和できる

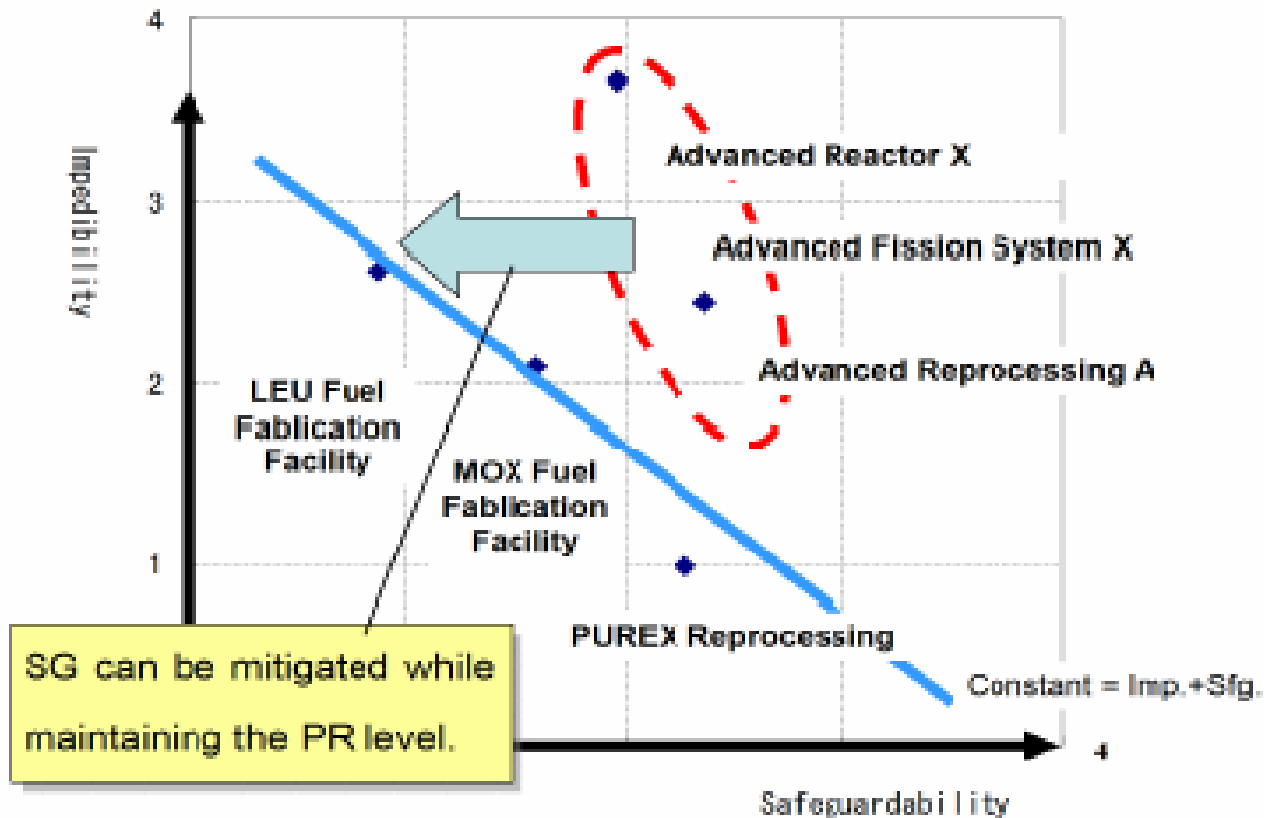
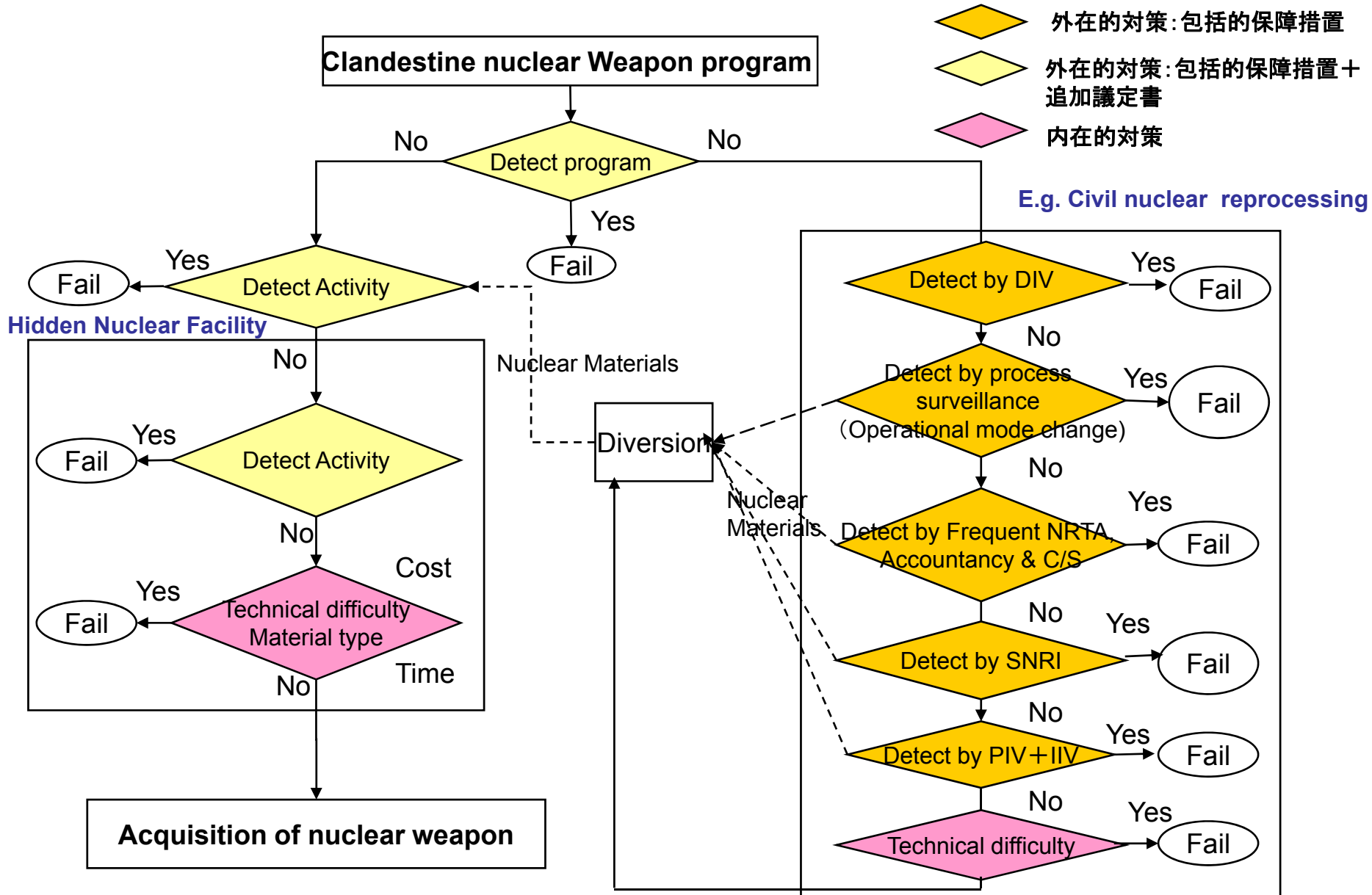


Figure Examples of aggregation of typical types of facility



# 包括的保障措施協定+追加議定書(例えば統合保障措施)下での核燃料サイクルの核拡散抵抗性



# 抵抗性と経済性

## 抵抗性の基本的考え方

- 原子力の推進を進めるためには、外在的な(制度面からの)核拡散防止、および技術的困難性等内在的な核拡散防止の両面での対策が必要。

但し、

- 国際的に受容され、かつ経済的に許容される抵抗性技術レベルであること(達成可能なものであること)が重要。

## 考慮すべきこと

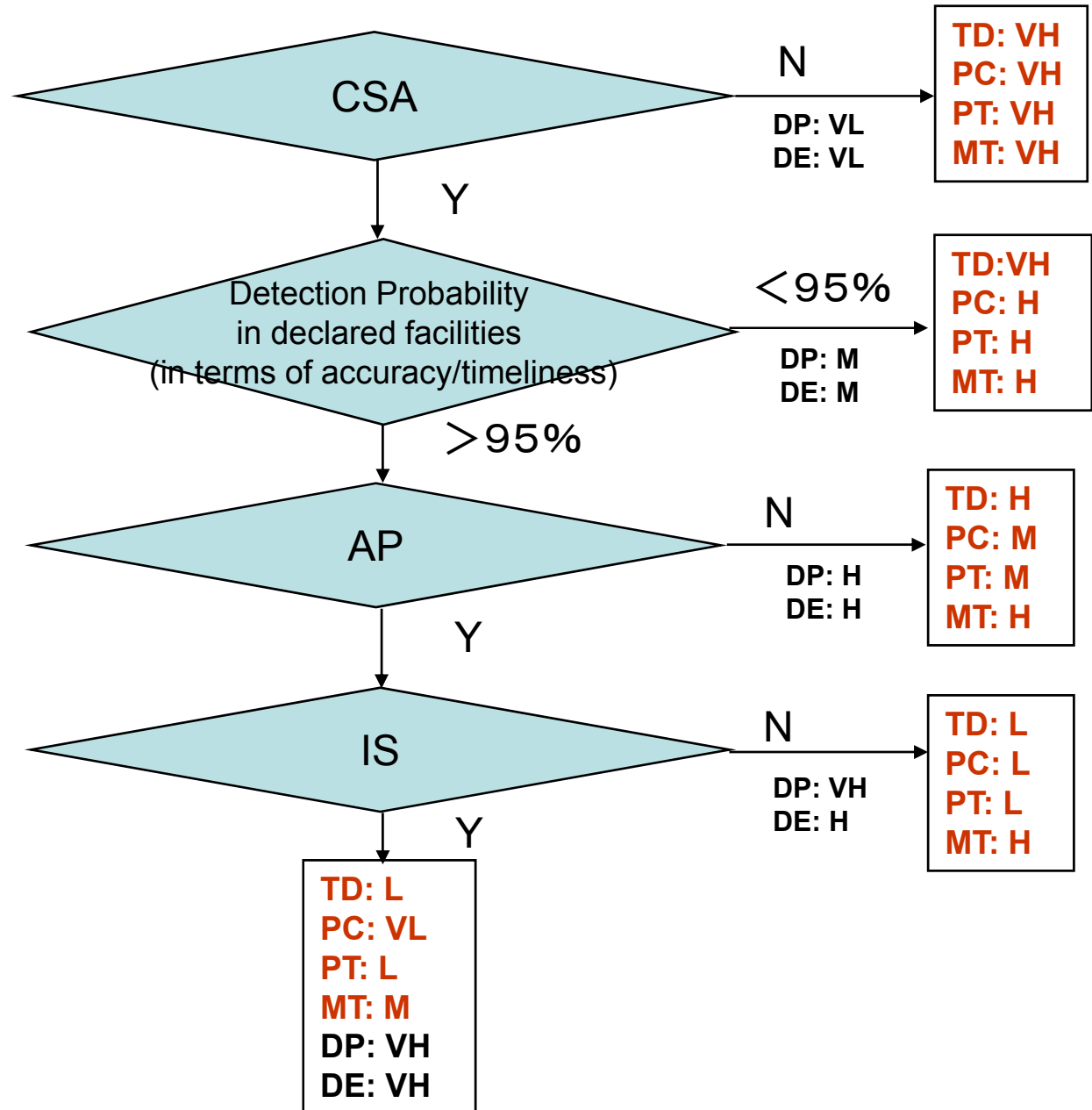
当事国の国際制度受け入れ状況事情、特に保障措置受け入れレベル(転用検出能)差によって必要とされる抵抗性レベルは異なってくるはず。



# Requirement Level of PR Measures

TD (Technical Difficulty)  
PC (Proliferation Cost)  
PT (Proliferation Time)  
MT (Material Type)  
DP (Detection Probability)  
DE (Detection Efficiency)

VH: Very High  
H: High  
M: Medium  
L: Low  
VL: Very Low



Rough Draft

# 「核拡散抵抗性」措置の最適化

- 評価方法は確立されつつあるが、評価結果に関する指標が必要
- 「核拡散抵抗性」レベルの標準的指標の確立？
- 但し、一律に核拡散抵抗性の指標を定めるのではなく、当事国の核不拡散に係る国際制度、すなわち保障措置の適用レベル(例えば包括的保障措置、追加議定書、統合保障措置)等環境に依存した分類を行うことが適切。
- この観点から、定性/定量的両面から抵抗性手法の適用性研究を行うことが必要：JAEA・US-DOE 不拡散・保障措置協力協定にて関連研究を行う予定。

# 透明性

定義(PNC時代のWebより):「透明性」とは、核不拡散、原子力平和利用の分野で、原子力平和利用活動に関する情報の共有を通じて、諸外国や国際機関、他の原子力機関や市民との間で相互理解と信頼を得て、より良好な関係を確立しようと努力することである。これには義務的行為も含まれ、IAEA等の第三者による検認により、透明性に対する信憑性や信頼性がより高まると考える。

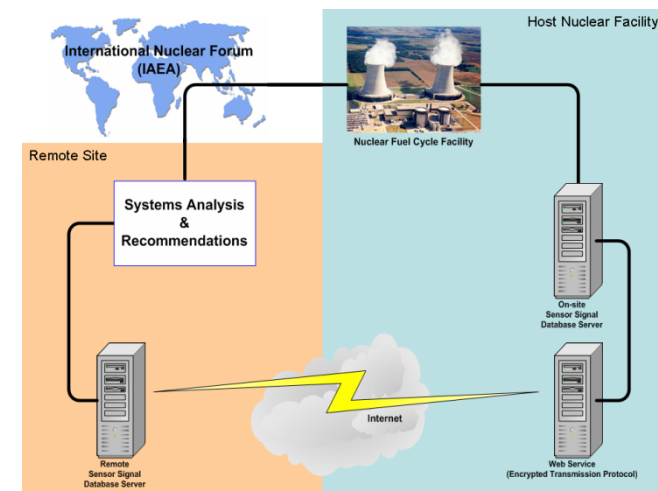
さまざまな定義が存在するが共通する基本は、「**信頼醸成のための手段**」

## 対象

- State-State: information sharing through “transparency-framework”
- State-International Organization
- Operator-Inspector
- Operator-Citizens: System for information sharing
- Non-government organizations: through cooperative project
- Regional cooperation for nonproliferation
- Etc

技術: センサー、モニタリング技術(リモート)など

保障措置の効率化とともに重要な手法とみなされつつある。



# 結論

## 将来の核燃料サイクルの核不拡散対策技術 (核拡散抵抗性/保障措置技術)

- **保障措置**: 正確かつ適時性のある保障措置のため最も効率的かつ合理的な手法の適用: 設計段階からの考慮が不可欠 (Safeguards by Design)
- **核拡散抵抗性**: 外在的抵抗性の措置 (制度等) は、内在的特性の有効レベルがいかなるものであっても不可欠なものがある。最も費用対効果が良くなるように内在的な特性と外在的な措置の最適な組み合わせを求め設計に反映することが重要。
- **透明性**が今後の不拡散対策の上で重要な手段となる。