

# 次世代革新炉開発における保障措置の課題 と対応

堀 雅人

日本原子力研究開発機構



核不拡散・核セキュリティ総合支援センター



次世代革新炉の開発に必要な研究開発基盤  
の整備に関する検討会(第6回)

2023年1月23日

# Contents

1. IAEA保障措置とその課題
2. ナトリウム冷却高速炉、再処理施設に対する保障措置技術開発の経験
3. 次世代革新炉及びそのサイクル施設に対する保障措置
  - ① 次世代革新炉及びそのサイクル施設の保障措置上の特徴
  - ② IAEAの取り組み: Safeguards-By-Design for Small Modular Reactors
  - ③ 次世代革新炉及びそのサイクル施設の保障措置上の課題
  - ④ 次世代革新炉及びそのサイクル施設に対する保障措置の技術的課題への対応
4. まとめ

# IAEA保障措置とその課題

# 保障措置の目的

保障措置協定に基づき、国が履行すべき義務をIAEAが検認。  
IAEAは保障措置の結論を導くことにより、国が協定上の義務を履行している確証を提供。

The purpose of Agency safeguards is to verify States' undertakings under their respective safeguards agreements with the Agency. The safeguards conclusions drawn by the Agency provide assurance to the international community that States are abiding by their safeguards obligations under those agreements.

*Supplementary Document to the Report on The  
Conceptualization and Development of  
Safeguards Implementation at the State Level  
(GOV/2013/38) GOV/2014/41, August 2014*

国の義務やIAEAの検認活動は、各国が締結している保障措置協定・議定書により異なる。

年1回、保障措置実施報告書(SIR)として、保障措置の結論をIAEA理事会に報告。

# 保障措置協定の種類

1. 包括的保障措置協定 Comprehensive Safeguards Agreement (CSA)  
(INFCIRC/153)
  - NPT第3条1、非核兵器地帯条約に基づき締結
  - 原子力の平和利用にかかるすべての核物質が対象
2. 対象物特定保障措置協定 Item Specific Safeguards Agreement  
(INFCIRC/66)
  - NPT未締約のインド、パキスタン、イスラエル
  - 二国間原子力協定に基づき、受領した核物質や原子力資機材が対象
3. 自発的提供協定, Voluntary Offer Agreement (VOA)
  - NPT核兵器国(米、露、英、仏、中)が自発的にIAEA保障措置を適用を受けるために締結
  - 選択された施設が対象

# 議定書

## 1. 追加議定書Additional Protocol (AP)

(INFCIRC/540、1997年)

- 保障措置の実効性を強化し及び効率を改善するための議定書
- 保障措置の適用範囲の拡大、補完的なアクセス等新たなIAEAの権限

## 2. 少量議定書Small Quantity Protocol (SQP)

(Original SQP 1974年、Revised SQP 2005年)

- 核物質を保有しない又は微量のみ保有する国の保障措置協定締結促進のため作成された議定書
- CSAに規定されている報告・活動を免除

# IAEA保障措置の目標

## CSA及びAP発効国の保障措置の目標

- 申告された施設等にある申告された核物質の転用の検知
- 申告された施設等における未申告の核物質の製造・処理の検知
- 国全体で未申告の核物質及び活動の検知

The generic objectives established are the following:

For States with CSAs:

- to detect any diversion of declared nuclear material at declared facilities or locations outside facilities where nuclear material is customarily used (LOFs);
- to detect any undeclared production or processing of nuclear material at declared facilities or LOFs; and
- to detect any undeclared nuclear material or activities in the State as a whole.

# IAEA保障措置の手段

## 1. 計量管理(CSA)

すべての核物質の所在、種類、量、移動を把握

## 2. 封じ込め・監視(CSA)

核物質等の移動状況等を監視カメラ、封印等により確認

## 3. 保障措置検査(査察)(CSA)

施設に立入り、計量管理の状況を検査(査察)において検認

## 4. 設計情報の確認(CSA)

施設に立入り、提供された施設情報等が正しいことを確認

## 5. 拡大申告、補完的なアクセス(AP)

研究開発活動、サイト等情報を申告

短期通告により、未申告の核物質、活動がないことを確認



# IAEA保障措置のリソース

## 予算（Mユーロ）

Major Programme	2022	2023
1 Nuclear Power, Fuel Cycle and Nuclear Science	42.8	42.8
2 Nuclear Techniques for Development and Environmental Protection	43.5	43.5
3 Nuclear Safety and Security	38.3	38.3
4 Nuclear Verification	153.7	153.7
5 Policy, Management and Administration Services	84.3	84.3
6 Management of Technical Cooperation for Development	27.6	27.6
<b>TOTAL</b>	<b>390.2</b>	<b>390.2</b>

## 人員

IAEA全体 2650名

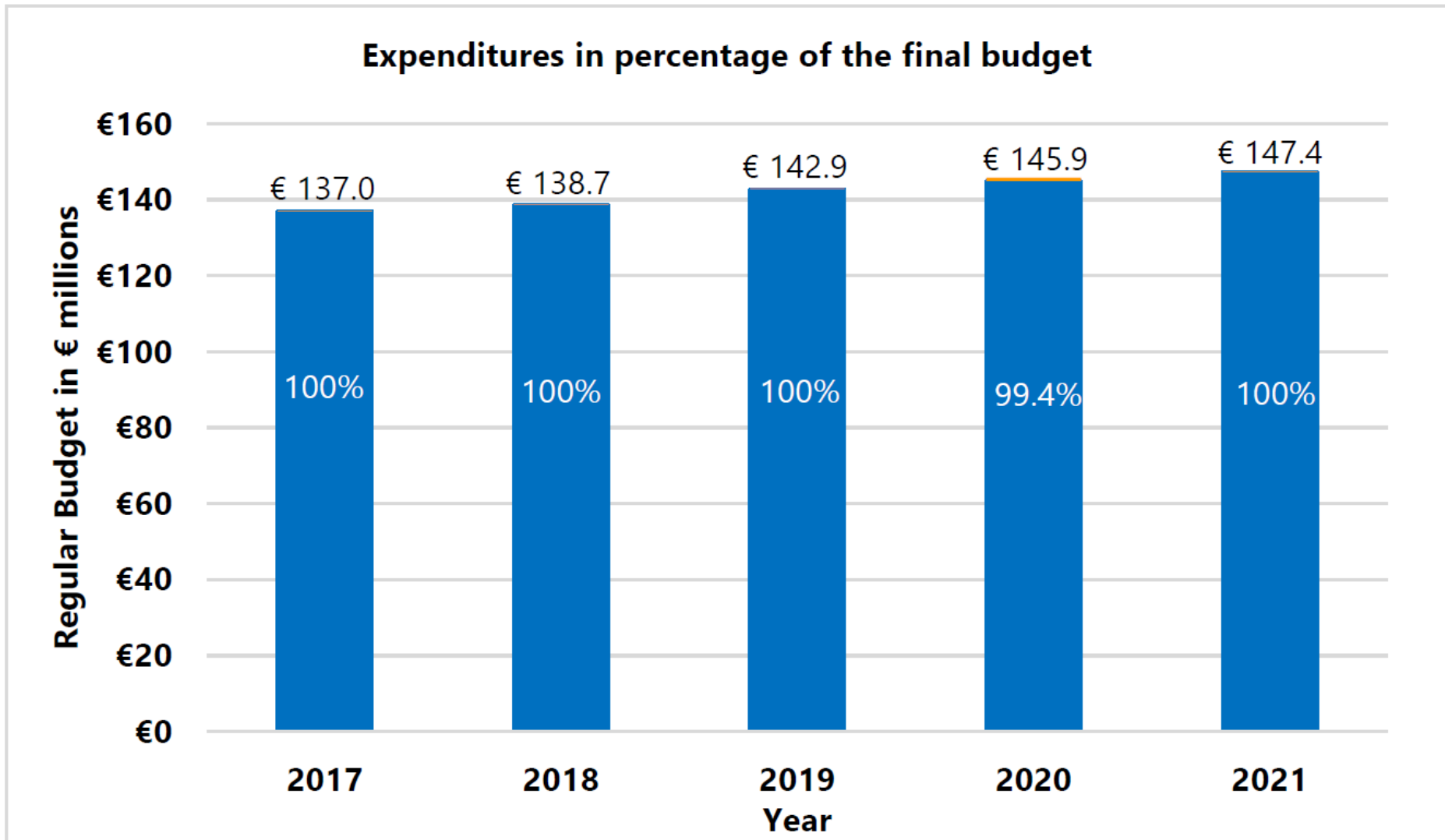
<https://www.iaea.org/about/staff>

保障措置局 773名+CFE、JPO、  
コンサルタント等

*SIR2021 (GOV/2022/25)*

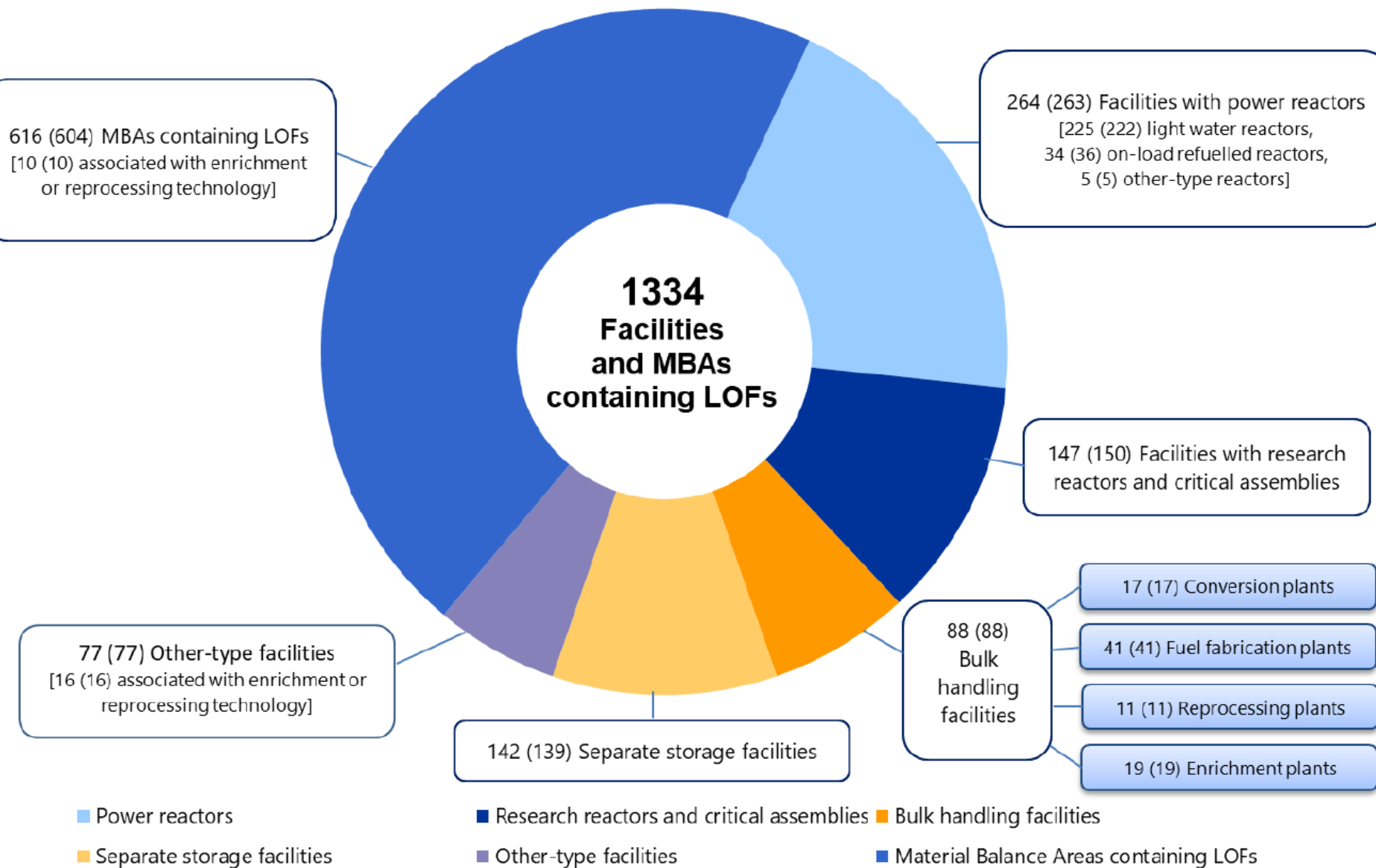
*The Agency's Programme and Budget 2022–2023, GC(65)/2*

# IAEA保障措置予算の推移



SIR2021 (GOV/2022/25)

# 保障措置の対象(2021年)



SIR2021 (GOV/2022/25)

# IAEAの保障措置技術開発

- IAEAの基本的な保障措置技術開発ポリシーは、
  - IAEAは、通常予算を使った技術開発を行わない。
  - 技術開発は、加盟国の支援により実施。
- IAEAは、保障措置の技術的課題・ニーズを、長期R&D計画、2年間の開発実施支援計画といった文書で公表。
- 加盟国は、IAEAのニーズを踏まえ、主として加盟国支援計画(MSSP)の下で、技術開発を行い、成果をIAEAに提供。
- IAEAは、4年に1回、保障措置シンポジウムを開催し、各国の開発成果の共有を図っている。

# 保障措置の課題・ニーズに関する文書

## 中長期的課題

- 核物質 検認のための能力強化：資源投入の優先順位

Enhancing Capabilities for Nuclear Verification: Resource Mobilization Priorities (RMP)

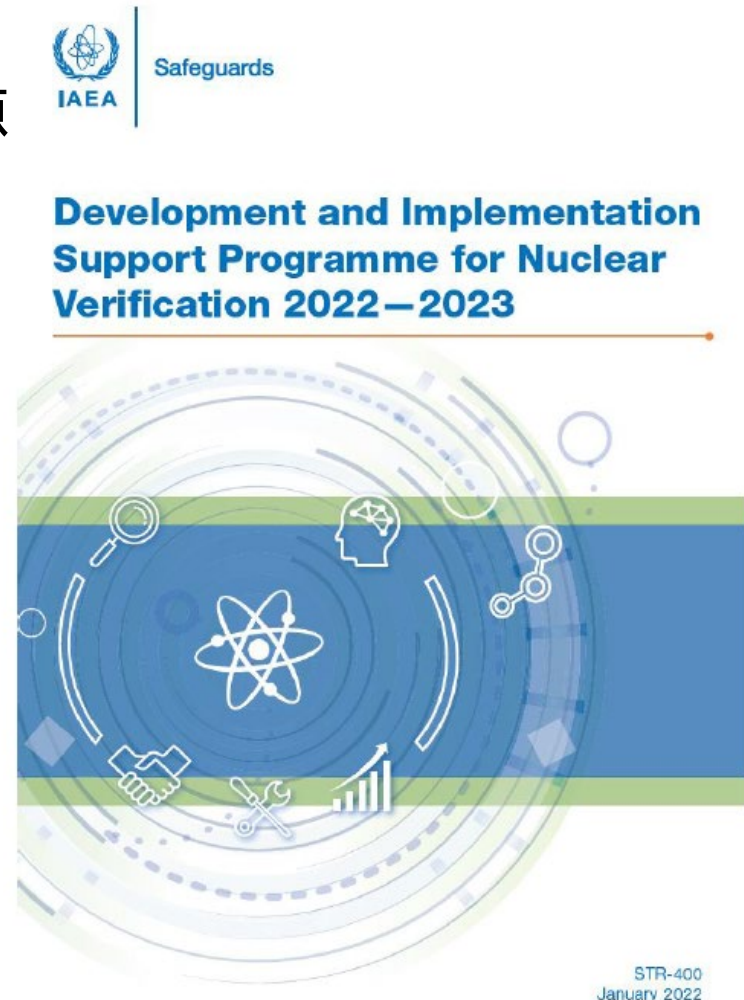
(STR -399、2022年1月)

## 技術目標・マイルストーン

- 核物質検認のための開発及び実施支援計画(D&IS) 2022–2023

Development and Implementation Support (D&IS) Programme for Nuclear Verification

(STR-400、2022年1月)



# IAEA保障措置の戦略的計画

## The Department's Strategic Plan-on-a-Page



Safeguards

### MISSION

To deter the proliferation of nuclear weapons

### STRATEGIC OBJECTIVES

- To detect early the misuse of nuclear material or technology\*
- To provide credible assurances that States are honouring their safeguards obligations\*
- To assist with other verification tasks\*
- To continually improve the Department's capabilities and performance

### VISION

IAEA nuclear verification contributes to a secure and peaceful world. The Agency's competence and independence enable it to operate with the trust and support of its Member States and the international community

### VALUES

Integrity, professionalism and respect for diversity

## Delivering on the Mission – Departmental Priority Objectives



- V.1 Strengthen information collection, integration and analysis
- V.2 Reinforce State evaluation and consistency in drawing SG conclusions
- V.3 Advance State-level safeguards
- V.4 Enhance SG effectiveness monitoring and evaluation
- V.6 Prepare for new types of facilities and activities



- T.1 Strengthen instrumentation capabilities for verification
- T.2 Enhance sensitivity, reliability and timeliness in sample analysis
- T.3 Ensure resilient, secure and up-to-date SG IT systems
- T.6 Enhance remote sensing, monitoring and verification capabilities



- M.1 Secure and optimally manage financial resources
- M.2 Manage SG assets strategically
- M.3 Mature process management and operational discipline
- M.4 Increase organizational resilience












- S.1 Communicate proactively and transparently
- S.2 Enhance States' safeguards capacity
- S.3 Promote safeguards-by-design
- S.4 Expand and leverage partnerships



- W.3 Build and retain organizational knowledge
- W.4 Advance workforce diversity, including gender parity

(STR -399、2022年1月)

# Focus Area: Core Activities (V)

ID	Capability	Key words	Support Type
<b>V.6</b>			
<b>Ensure that the Department is prepared to implement safeguards for all new types of nuclear facilities at all stages of their lifecycle, including decommissioning, and prepare for other activities of safeguards relevance.</b>			
V.6.C1	Ability to implement effective and efficient safeguards for geological repositories	Safeguards approaches	€  
V.6.C2	Ability to implement effective and efficient safeguards for SMRs and microreactors	Safeguards approaches	€  
V.6.C3	Ability to implement effective and efficient safeguards at J-MOX	Safeguards approaches	€  
V.6.C4	Ability to perform process monitoring and associated data analysis for safeguarding facilities, particularly advanced reactors with liquid or pebble fuel	Safeguards approaches IT	€   

(STR -399、2022年1月)

# ナトリウム冷却高速炉、再処理施設に対する保障措置の経験



# 保障措置をより効果的、効率的に実施するための技術開発の経験

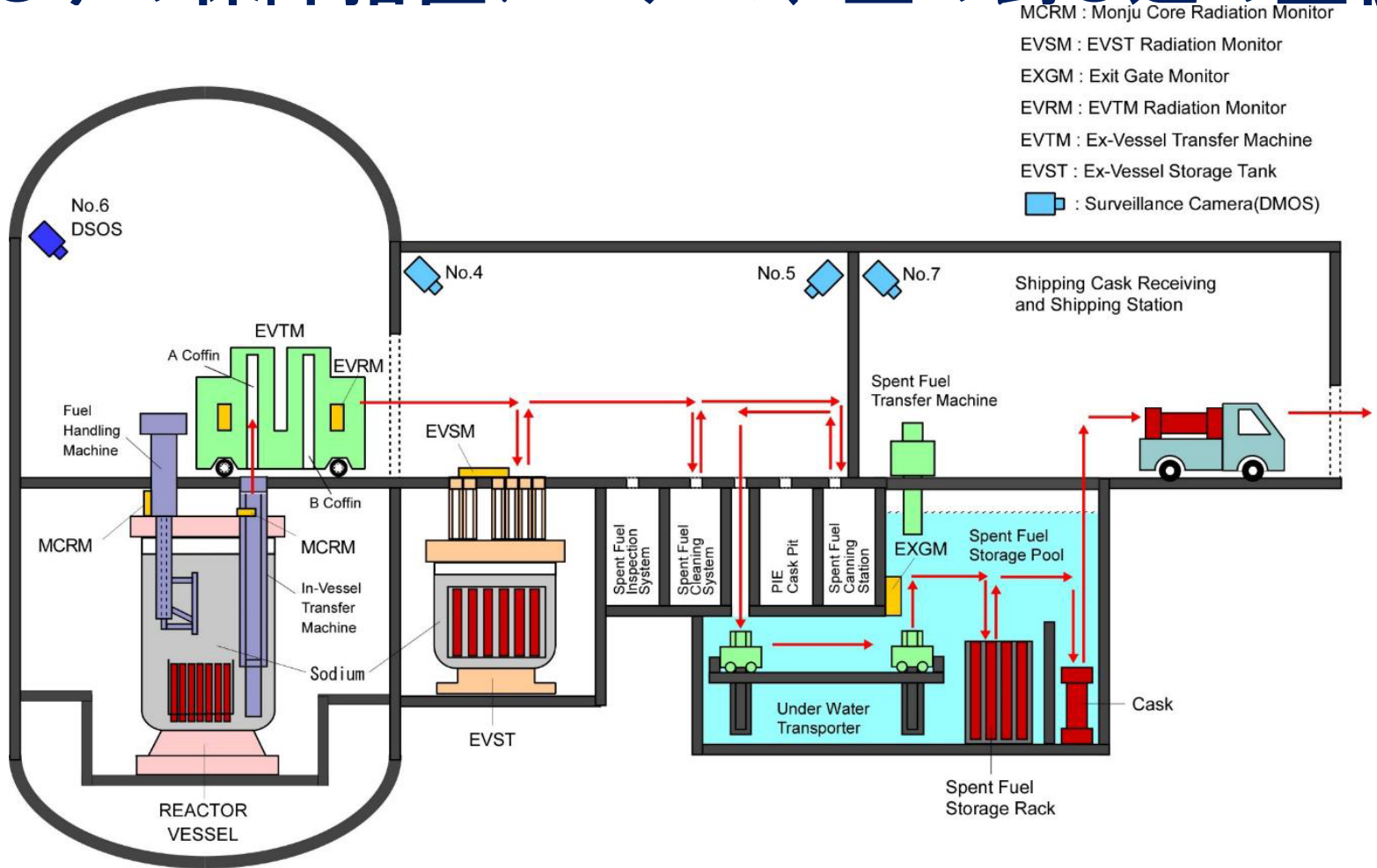
- 原子力機構では、過去にIAEAが経験のなかった原子炉、燃料サイクル施設に対する保障措置技術開発を実施。
- その結果、施設固有の技術的課題に対応した効果的・効率的な保障措置適用に貢献してきた。


例)

- ナトリウム冷却高速炉(もんじゅ): コア燃料にMOX燃料使用、ブランケット燃料を使用、燃料がナトリウム中でアクセスできないといった課題に、2重の封じ込め監視システム、遠隔監視システムの導入で対応。
- 東海再処理施設: 核物質を高精度に測定、検認する、工程内の核物質をモニタリングといった課題に、非破壊測定装置の高度化、溶液モニタリングの導入等で対応。

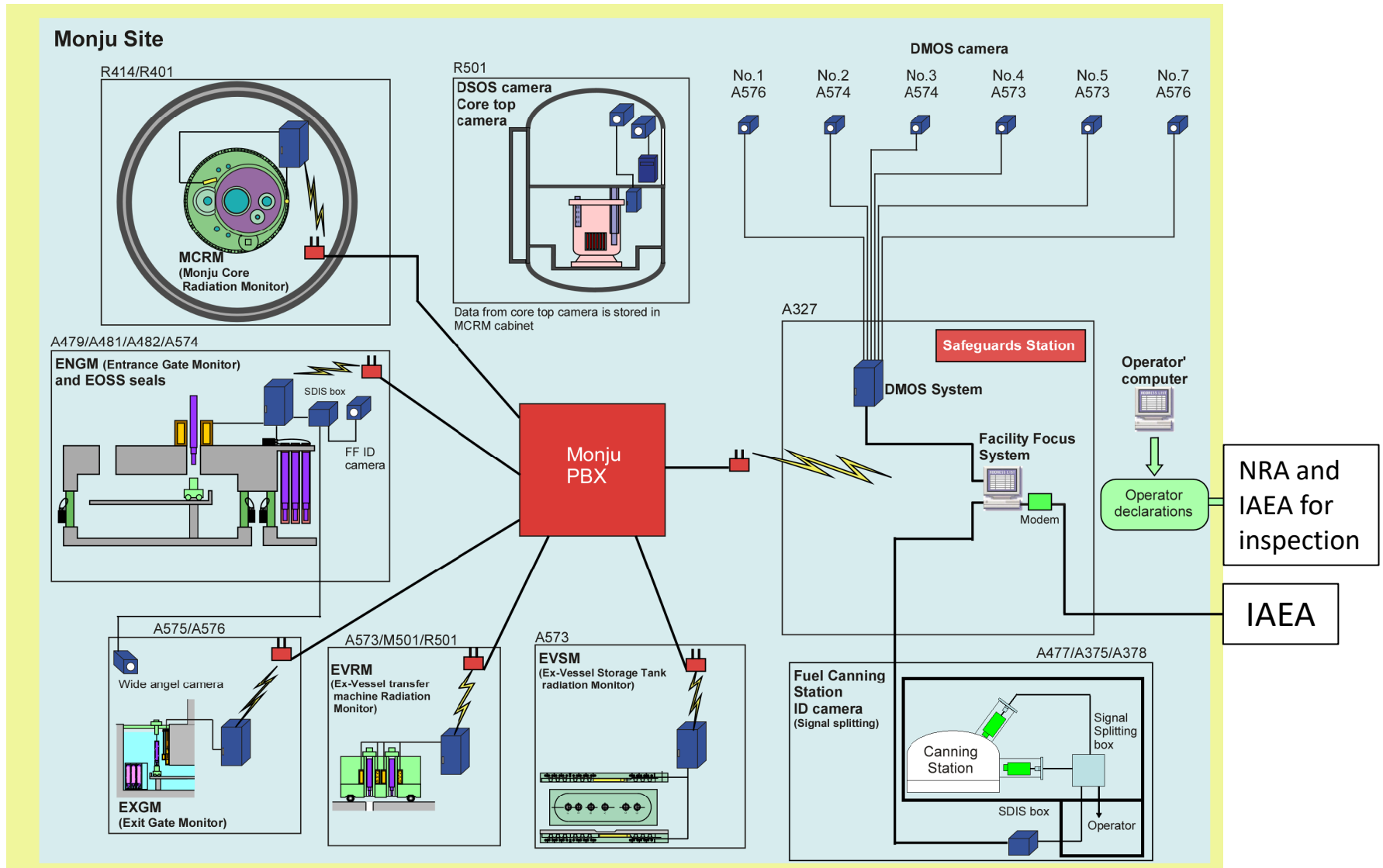
# ナトリウム冷却高速炉

## もんじゅの保障措置システム(2重の封じ込め監視)



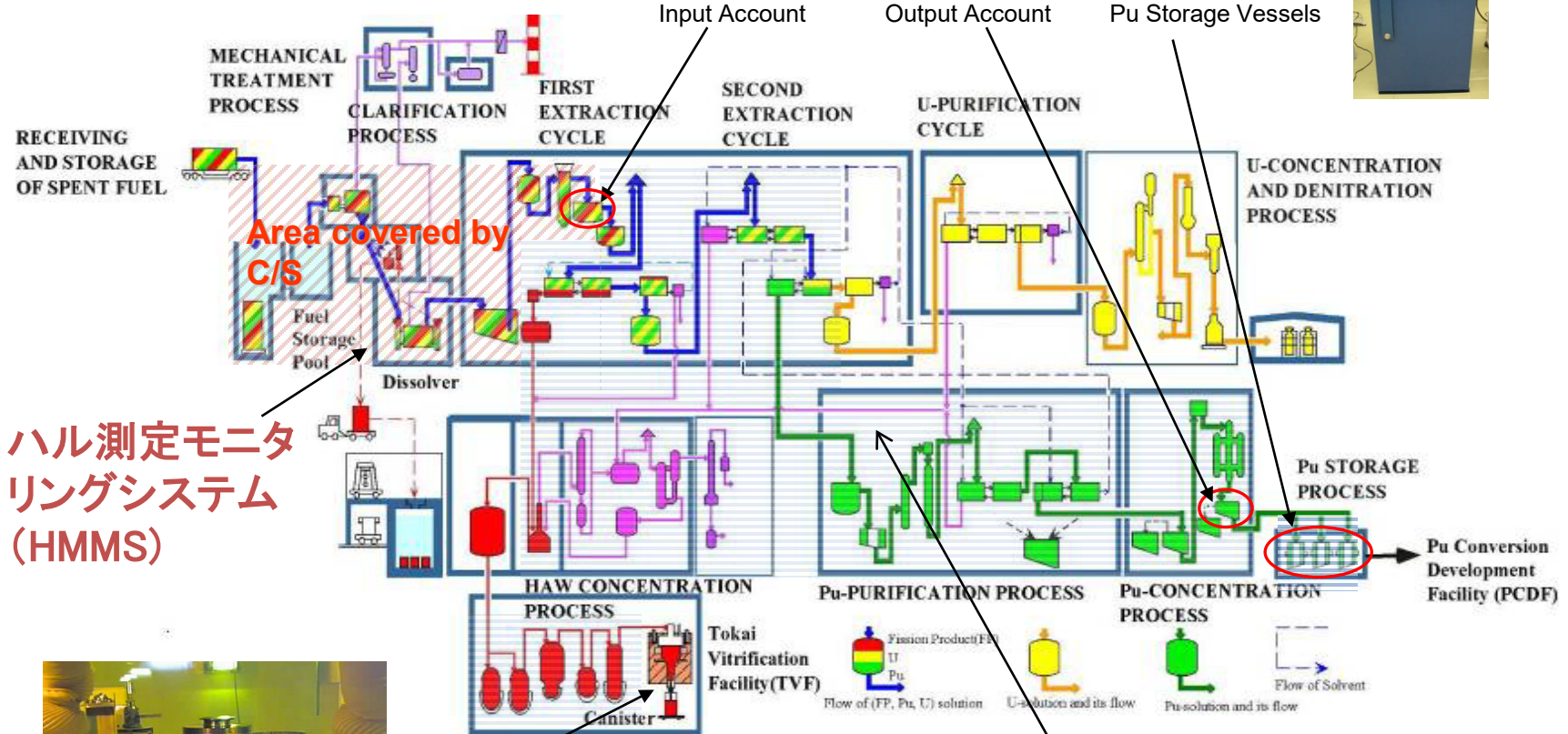
- MCRM : Monju Core Radiation Monitor
- EVSM : EVST Radiation Monitor
- EXGM : Exit Gate Monitor
- EVRM : EVTM Radiation Monitor
- EVTM : Ex-Vessel Transfer Machine
- EVST : Ex-Vessel Storage Tank
-  : Surveillance Camera(DMOS)

# もんじゅの遠隔監視(伝送)システム



# 東海再処理工場の保障措置システム

## 溶液測定モニタリングシステム (SMMS)



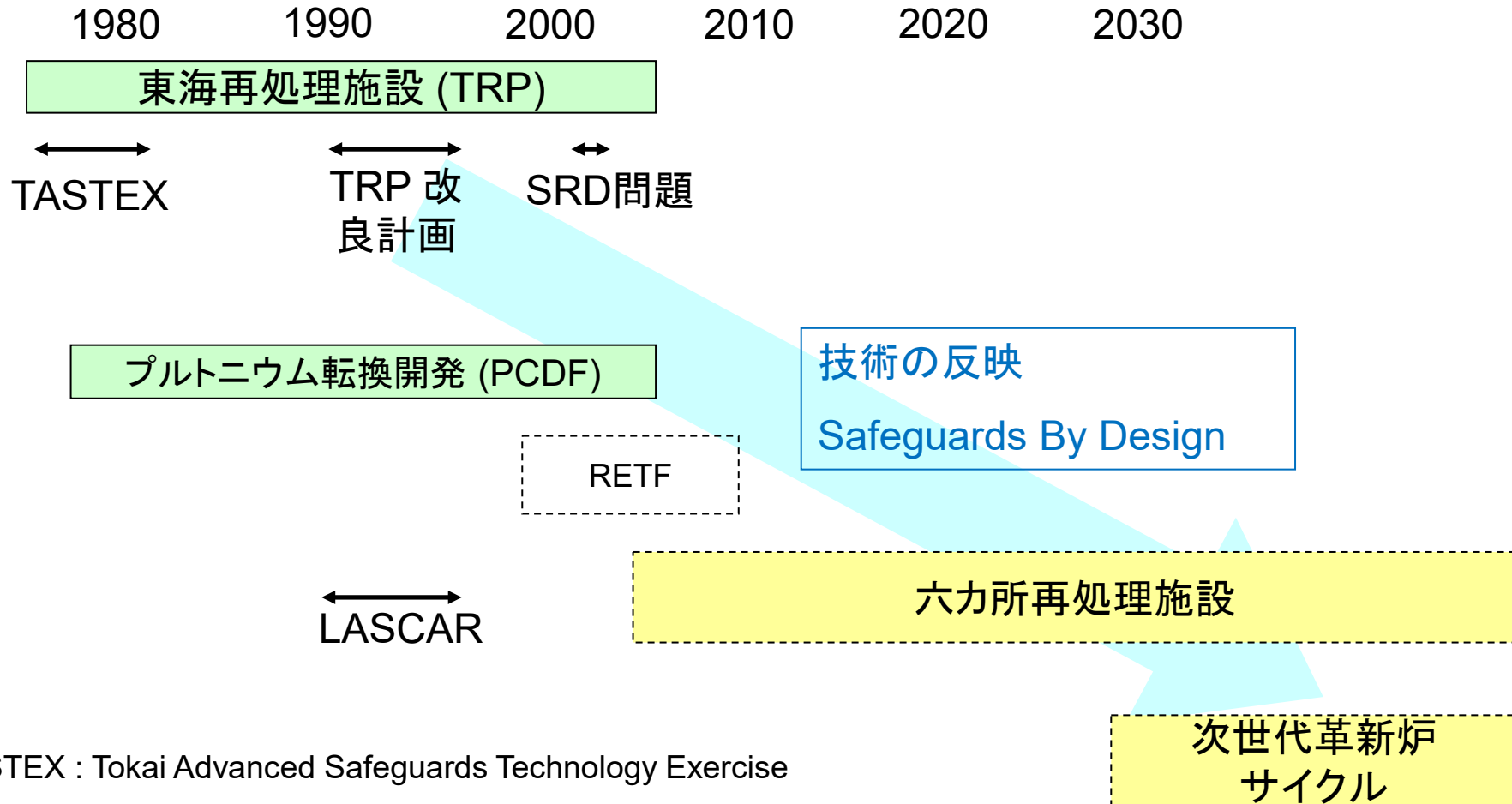
## ハル測定モニタリングシステム (HMMS)



## ガラス固化体測定システム (VWCC)

## ニアリアルタイム計量管理 (NRTA)

# 再処理施設の保障措置技術開発



TASTEX : Tokai Advanced Safeguards Technology Exercise

TRP : 東海再処理工場

SRD : 受払間差異

LASCAR : Large Scale Reprocessing Plant Safeguards

# 次世代革新炉及びそのサイクル に対する保障措置

# 次世代炉・サイクルの保障措置上の特徴

開発が進められているSMRの保障措置上の特徴として、施設の設計や核物質の仕様ごとに以下の通り整理した。

- 冷却減速材：水、重水、ナトリウム、黒鉛、鉛、フッ化物塩
- 燃料の性状：酸化物、金属、窒化物燃料、Th/233U、5%以上の低濃縮ウラン、モルテンソルト溶融塩、ペブルベッド(球状燃料)
- 燃焼度等：高燃焼度、長い運転サイクル
- 燃料交換、燃料サイクル等：移動型炉、中央工場における燃料交換
- 燃料サイクル：新しいリサイクル施設、廃棄物処理施設



A Supplement to the IAEA  
Advanced Reactors Information  
System (ARIS)

# IAEAの取り組み : Safeguards-By-Design (SBD) for Small Modular Reactors (SMRs)

IAEAに対する加盟国支援計画として2018年より開始。現在以下の7か国が参加。

ロシア: KLT-40S

カナダ: SSR-W300, IMSR

韓国: SMART

フィンランド: LUTHER, VTT

フランス: NUWARD

中国: HTR-PM

米国: 7-8 SMRs

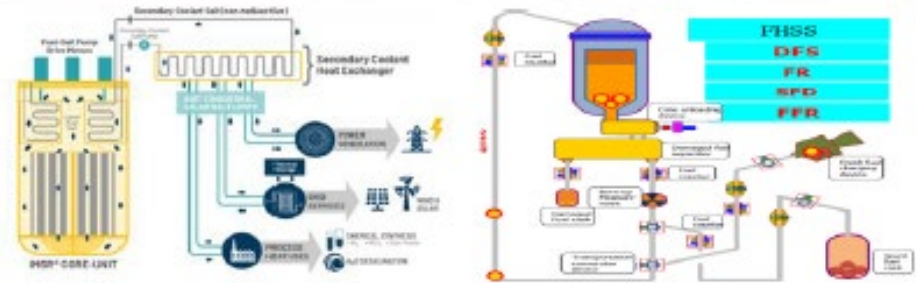


Figure 1: New types of Small Modular Reactors (SMRs).

(STR-400、2022年1月)



# 次世代革新炉及びそのサイクルに対する保障措置の課題（1）

- 各々の炉・施設・核物質の特徴に応じた保障措置アプローチの開発が必要になる。効果的効率的な保障措置を適用するために、設計段階からの保障措置の取入れ(Safeguards by Design)が重要。
- モルテンソルトやペブルベッド型炉に対する保障措置の経験は限られており、より多くの開発要素がある。
- 長い運転サイクル、特に、燃料交換を行わないタイプのSMRは、査察頻度が少なくなり、保障措置の効率化に貢献する。
- 核燃料を装荷した原子炉が、適用される保障措置が異なる国の間、例えば、核兵器国と非核兵器国の間を移動する場合の対応について、保障措置の制度・法的な側面での整理も必要になる。

# 次世代革新炉及びそのサイクルに対する保障措置の課題（2）

- 新しいリサイクル施設、特に、先進湿式プロセスや乾式再処理といった施設に関しては、高線量核物質、不均質の核物質といった、これまでに経験のない核物質の計量管理・保障措置技術開発が課題となる。
- 次世代炉の導入が進むと保障措置リソースがひっ迫するため、新しい概念・技術を導入し、効率的に保障措置を適用することが重要である。

# 次世代革新炉及びそのサイクルに対する保障措置の技術的課題への対応

- これまでの再処理、燃料製造施設等では、主にパッシブ法と呼ばれる非破壊測定技術が中心的。
- MA燃料等の高線量核物質に対してはパッシブ法は困難であり、放射線を試料に照射し、核反応を起こし、それに伴う中性子放出やガンマ線の放出を測定する、いわゆる「アクティブ法」と呼ばれる技術が有用。
- 将来の保障措置技術開発として、主に2種類のアクティブ中性子法技術開発を実施中。

## 遅発ガンマ線分析

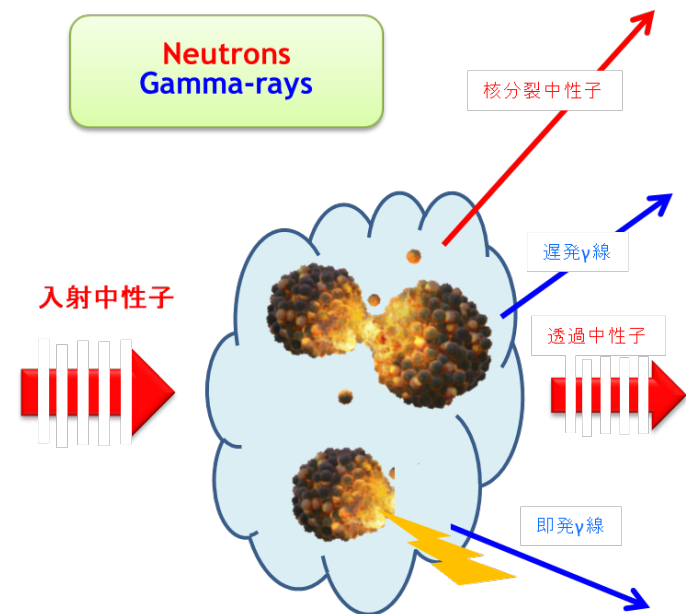
DGA (delayed  $\gamma$ -ray analysis)

核分裂生成物の崩壊に伴うガンマ線を測定

## 中性子透過共鳴分析

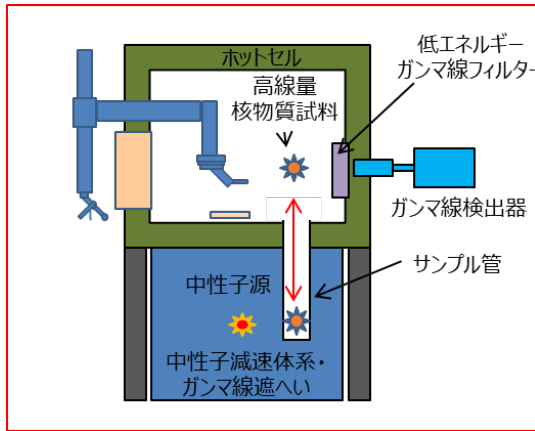
NRTA (neutron resonance transmission analysis)

透過中性子を測定

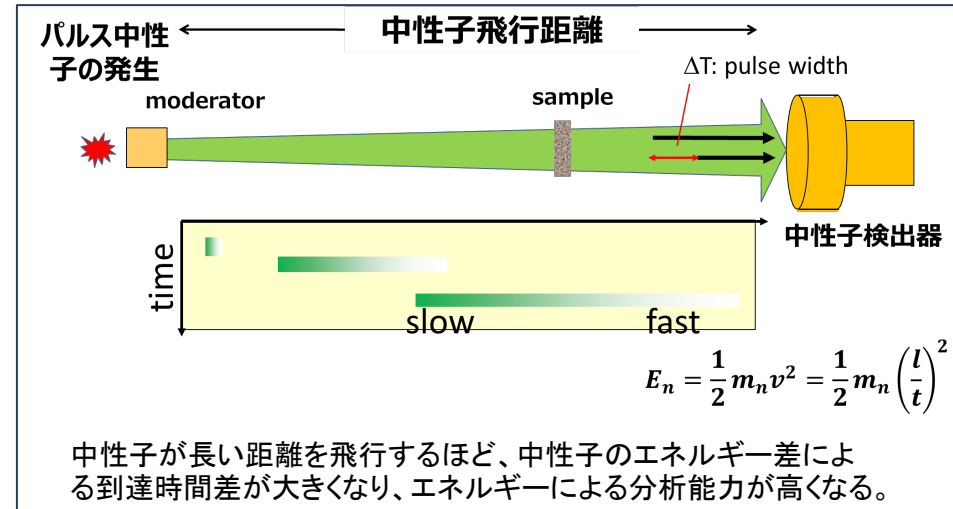


アクティブ中性子法

# アクティブ中性子法技術開発

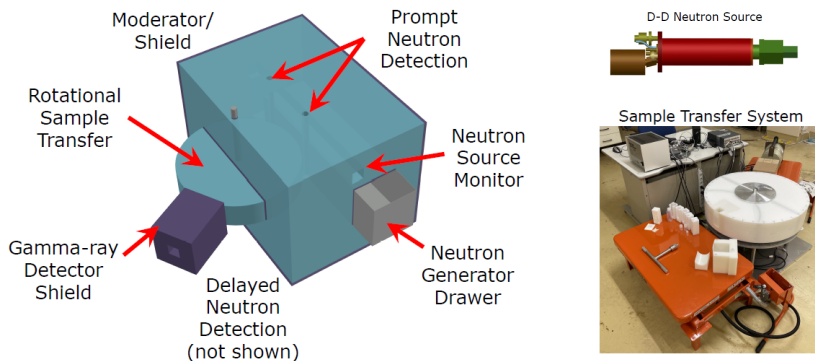


遅発ガンマ線分析装置概念図



NRTA (Neutron Resonance transmission analysis)概念図

## Fission Signature Assay Instrument for Small Samples



現在開発中の遅発ガンマ線分析装置

- 核分裂生成物の崩壊に伴うガンマ線を測定
- 測定対象は核分裂性物質のみ
- 現在、再処理工程の溶解液等の小さな試料をターゲットとした小型遅発ガンマ線分析装置を開発中。

- NRTAは高い放射能を含有する核物質試料の核種分析を非破壊で行うことができる。
- ADS、熔融燃料炉、ペブルベッド型炉等次世代の原子力システムに適用できる。
- 一方、小型化、高精度化が課題。
- 短パルスの中性子源により高精度化が可能  
今後の技術の進歩に期待(レーザー駆動中性子源など)

# まとめ

- 次世代革新炉及びそのサイクルの導入は、その規模が大きくなると、IAEA保障措置リソースをひっ迫する可能性があり、効率的な保障措置の適用が重要
- 早い開発段階から保障措置の特徴や課題を明確にし、設計段階からの保障措置の取入れ(Safeguards by Design)が重要
- これまでの日本の保障措置技術開発の経験・知見を活用することが重要
- IAEAが保障措置適用経験が持たない施設は、より多くの開発技術開発が必要
- IAEAは、SMRの保障措置に関する加盟国との協力を始めており、このような協力の枠組みに参加することも重要

*Thank you for your attention.*

