

# 核鑑識技術開発

2023年10月3日



令和5年度 第1回 核不拡散科学技術フォーラム

国立研究開発法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 (ISCN)

# ISCNにおける核鑑識関連事業

## 第1回核セキュリティサミット（2010年）における ナショナルステートメント:

核物質の測定、検知等は、原子力及び科学技術先進国である我が国が貢献すべき分野である。（中略）今後、3年後を目途により正確で厳格な**核物質の検知・鑑識技術**を確立し、これを国際社会と共有することにより、国際社会に対して一層貢献していく所存である

- 平成23年度から文科省核セキュリティ強化等推進事業費補助金事業において核鑑識技術開発を開始



## 核鑑識技術開発等のミッション

- 基本的な核鑑識分析能力の開発
- 先進的、高度な核鑑識分析技術の開発と成果の国際共有
- アジアを対象とした核鑑識能力整備のサポート（トレーニングコース等の提供）
- 国内及び国際コミュニティにおける核鑑識実施能力の整備と強化に貢献

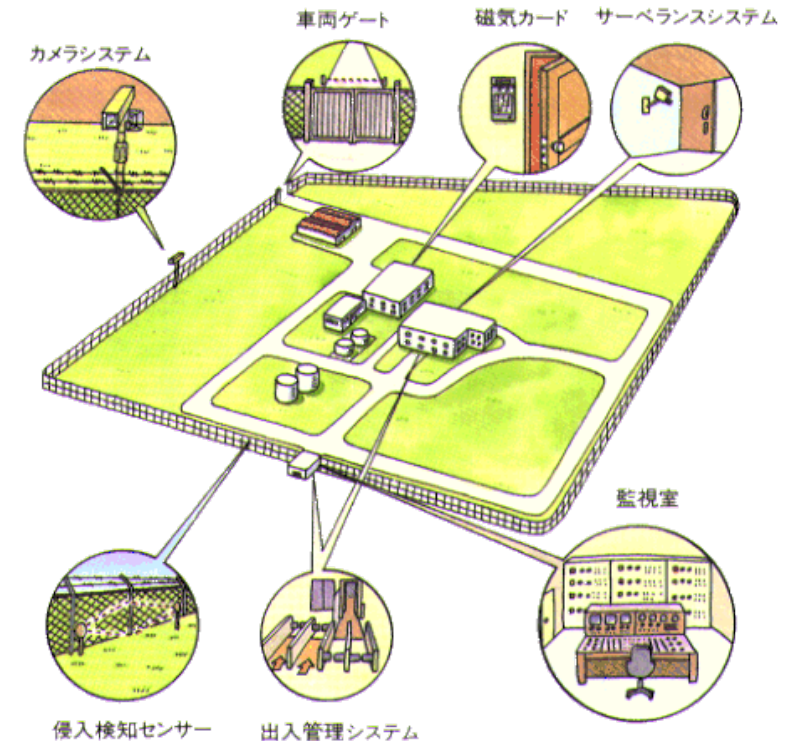
# 核セキュリティとは

核物質、その他の放射性物質、その関連施設及びその輸送を含む関連活動を対象とした犯罪行為又は故意の違反行為の**防止・検知・対応**



脅威の対象

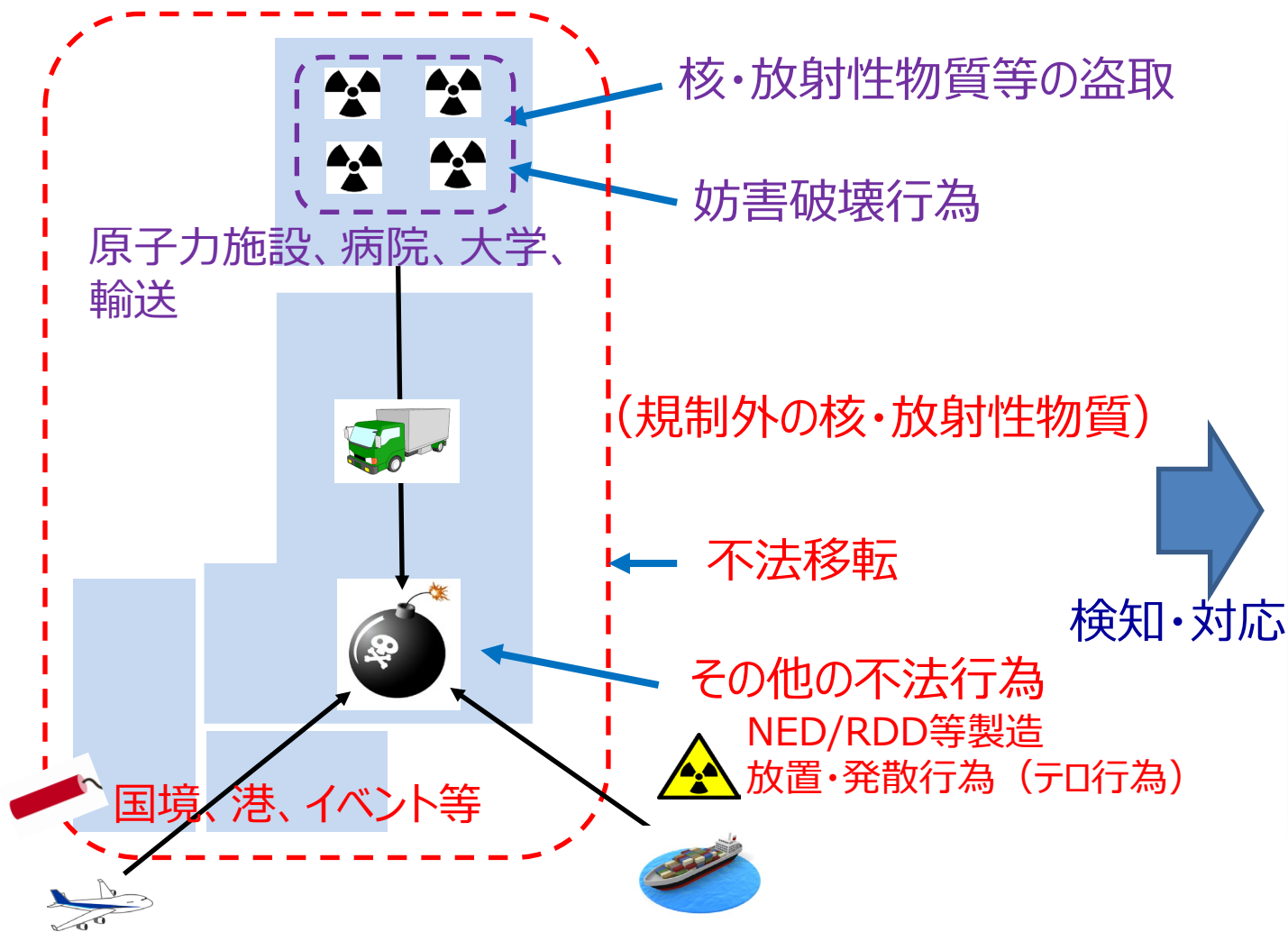
- 核物質等の盗取
- 妨害破壊行為
- 不法移転
- その他の不法行為



[https://www.jaea.go.jp/04/iscn/archive/pp\\_is/index.html](https://www.jaea.go.jp/04/iscn/archive/pp_is/index.html)

原子力施設における『防止と検知』

# 核セキュリティの脅威と対応



## RNテロの未然防止、事案発生時の対応

- 不法移転物質の検知: **核検知**
- 犯罪捜査、現場初動対応: **核鑑識**
- テロ・妨害破壊行為の影響緩和措置



# 核セキュリティ分野の技術的課題・ニーズ

## 理想的な検出器＝高い費用対効果、広範な利用目的

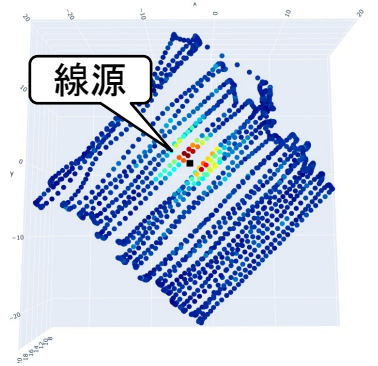
- 高効率・高分解能、低価格
- 様々な環境下での高い信頼性、迅速性
- 放射線の専門家以外でも使い易い

### 核検知：

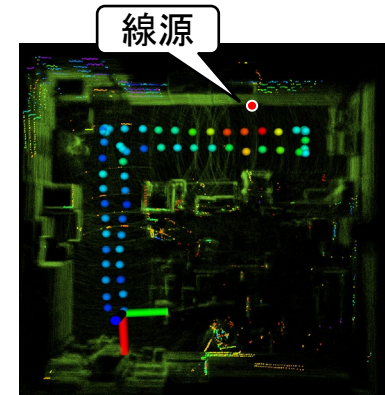
- 重遮蔽物核物質の検知
- 広域モニタリング
  - 屋内・屋外での放射線検知
  - 線源位置の特定
  - 誤検知・誤警報の低減
  - 情報の集約・統合化

### 核鑑識：

- 迅速、高精度な核種判定
- 線源位置／分布の特定
- 核鑑識分析とのリンク



ガンマ線カメラ搭載ドローン試験



LiDAR SLAMによるマッピング

# 核鑑識 (Nuclear Forensics)

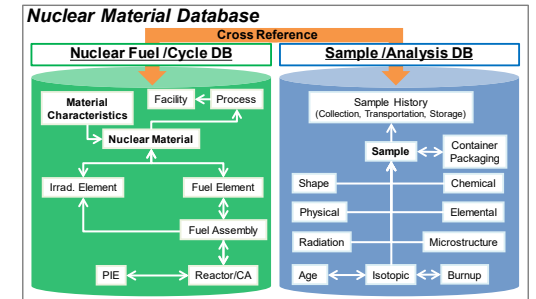
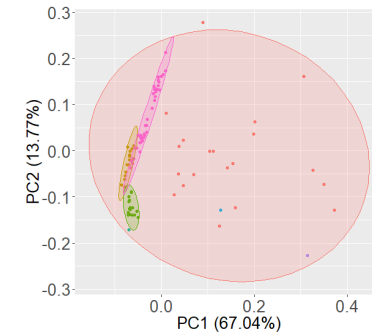
不法行為者の特定や犯罪捜査、訴追を支援する情報を提供することでRN（核・放射線）テロの抑止・事案対応に貢献する技術的手段

- 核物質・放射性物質に関連する事案を対象とした鑑識活動
- 不法移転やテロ行為などの現場から押収される、法規制管理外の核・放射性物質 (Material Out of Regulatory Control: MORC)
  - MORCや関連する証拠品を押収・分析
  - MORCの出所・履歴・本来の使用目的などを物質の物理的・化学的特徴から特定

⇒RNテロの抑止により、核セキュリティを強化し、原子力利用をサステイナブルに

# 核鑑識プロセス

現場対応、捜査 | 核鑑識分析



- 汚染状況の把握
- 核種, 線量の同定
- 証拠品の分類と押収

- 押収証拠品の分類
- 鑑定, 分析計画
- サンプル採取・分取
- 分析測定

- 分析データ解析
  - 既知物質(データベース等)との比較
  - 試料の異同識別
  - 専門知見による解釈

# 核鑑識技術開発

2011-2014

## 基本的分析能力の整備：

- ✓ ウラン同位体比、微量元素濃度測定手法
- ✓ ウラン年代測定法（精製時期特定法）
- ✓ 核鑑識プロトタイプデータベース

2015-2018

## 分析能力の高度化：

- ✓ ウラン年代測定法の適時性・信頼性向上
- ✓ 核物質粒子形状分析技術
- ✓ 核物質の分析データ解析のケーススタディ

2018 -

## 社会実装に向けた技術的課題の解決：

- ✓ RNテロ発生後を対象とした核鑑識の課題解決
- ✓ 新技術(AIなど)の応用、技術の低コスト化
- ✓

## 国際協力活動：

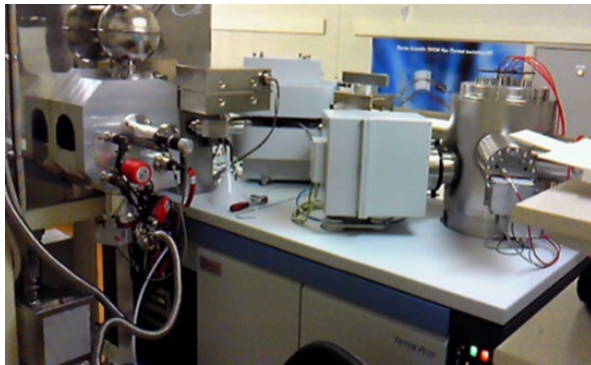
- ✓ 米国DOE、欧州委員会共同研究センターとの協力
- ✓ 核鑑識国際技術ワーキンググループ主催演習（共同試料分析、机上演習）への参加
- ✓ 多国間国際協力プロジェクトへの参画



# 基本的分析能力の整備（2011～2014）

- 高精度なウラン同位体比、微量元素濃度測定法：質量分析による測定
  - ウラン年代（精製時期）測定法：質量分析による $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 比測定
  - 電子顕微鏡分析法：粒子形状、微細構造観察
  - 核鑑識プロトタイプデータベース：核物質・放射性同位元素データベース
- 核物質の鑑定に必要な基本的な分析能力の整備

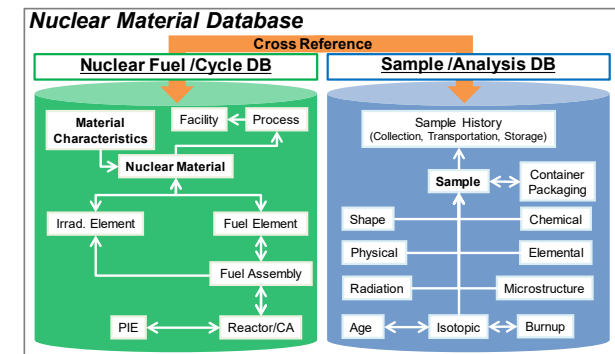
→ 国際協力等により、ISCNの分析能力を確認



質量分析装置（TIMS）



電子顕微鏡（TEM）



プロトタイプ核物質データベース

# 分析能力の高度化（2015～2018）

- ウラン年代測定法の適時性・信頼性向上：In-situ法、 $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$  比測定
- 核物質粒子形状分析技術：顕微鏡画像解析ソフトウェア
- 核物質の分析データ解析のケーススタディ

## ➤ 核物質鑑定の適時性・信頼性の向上

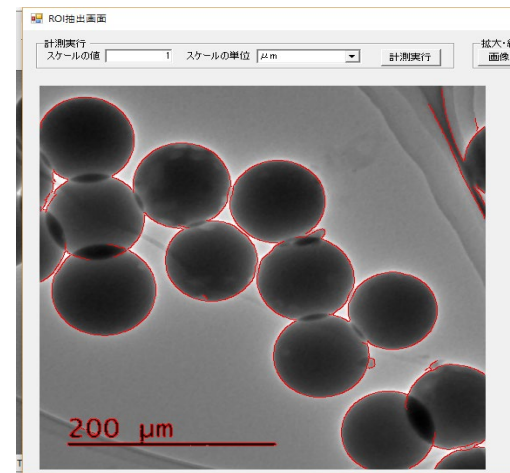
Th isotope ratio

$$\underbrace{\left( \frac{^{230}\text{Th}}{^{234}\text{Th}} \right)}_{\text{measured}} \times \underbrace{\left( \frac{^{234}\text{Th}}{^{238}\text{U}} \right)}_{\substack{=1.45 \times 10^{-11} \\ \text{(Radioactive} \\ \text{equilibrium)}}} \div \underbrace{\left( \frac{^{234}\text{U}}{^{238}\text{U}} \right)}_{\text{measured}} = \frac{^{230}\text{Th}}{^{234}\text{U}}$$

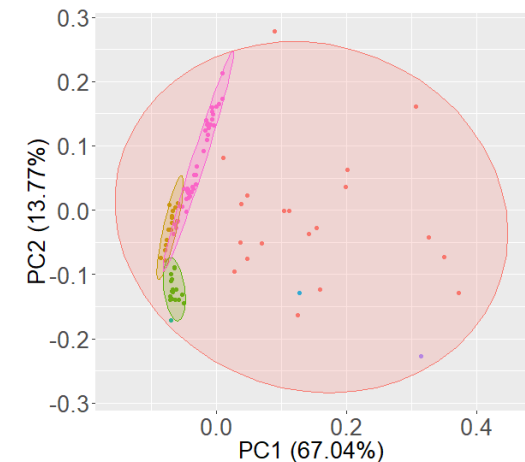
$$\frac{^{230}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$$

ウラン年代測定におけるIn-situ法

U isotope ratio



顕微鏡画像解析ソフトウェア



ウラン精鉱の微量元素濃度解析

# 社会実装に向けた技術的課題の解決

RNテロ・犯罪現場

分析ラボラトリ

プロセス

① 初動対応・現場捜査

② 鑑定・分析

③ データ解釈

活動

- 放射性核種(原因物質)特定
- 線源位置、汚染状況把握

- 核放射性物質(RN)試料鑑定
- 汚染された物品の鑑定

- 分析データ照合解析

既存技術

- 可搬型核種判定装置
- サーベイメータ, ガンマカメラ

- 放射線測定, 質量分析等
- 非接触による鑑定

- 既知物質データ(データベース等)との比較、専門家解釈

課題

- 資機材の低コスト、高性能化

- 試料鑑定手法の多様化、低コスト化
- 物質識別に有効な新しい特性
- 証拠品の汚染状況把握

- データ解析の標準化
- 数値的解析が困難なデータ(画像等)の解析

RNテロ発生後を対象とした核鑑識

技術開発

- 低コスト検出器による核種判定・線源位置特定、機能統合
- 機械学習モデル、AIを用いた核種判定手法

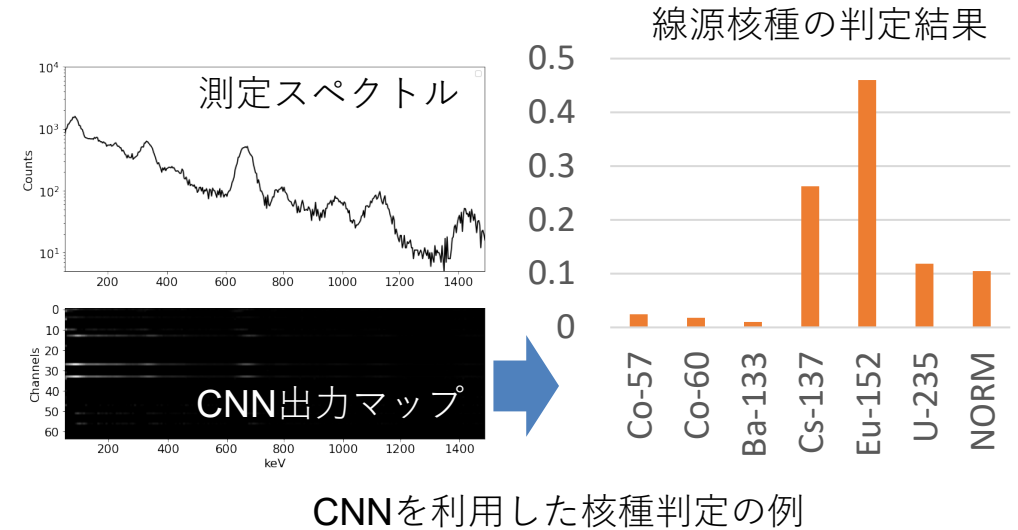
- 天然ウランの特性と分析法
- 低コスト装置による分析法
- 証拠品汚染分布の画像化
- プルトニウム試料の分析

- データベース設計手法、プロトタイプシステム開発
- 照射済燃料、プルトニウムのデータ解析

# 現場初動対応支援技術開発 (2018～)

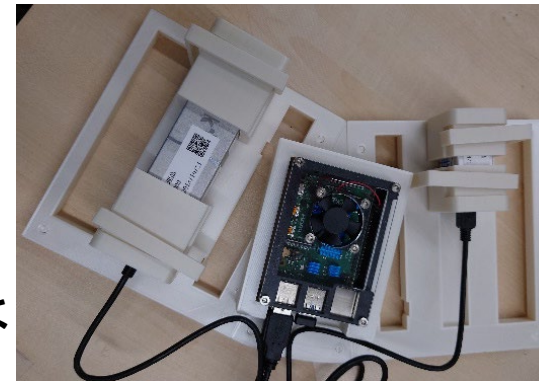
## 1. 核種判定資機材の低コスト化・高精度化

- ✓ ハイブリッドガンマ線検出器システム\*：  
検出器を複数組み合わせることで核種判定に必要なガンマ線ピーク検知性能を簡易的に向上
  - **低コスト検出器を使った測定時間短縮、高性能化**
- ✓ 機械学習による核種判定\*\*：  
畳込ニューラルネット(CNN)を利用したアルゴリズム
  - **低コスト検出器を対象とした従来法よりも高性能な自動核種判定技術**

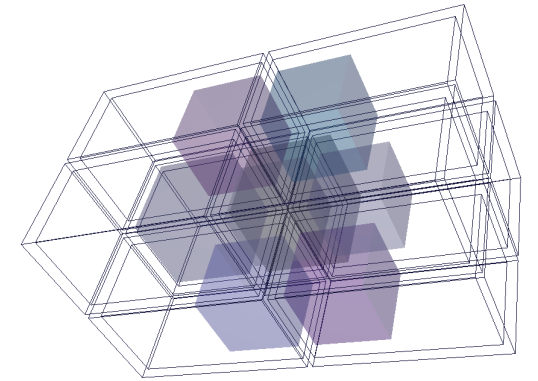


## 2. 放射線源位置特定資機材の低コスト化

- ✓ 指向性ガンマ線検出器 (基礎研究)：  
ボクセル型検出器モジュールによる線源方向・距離の推定
  - **ガンマカメラよりも低コスト・軽量な資機材による線源位置特定**
  - **検知・位置特定・核種判定機能の統合化**



ハイブリッド検出器システム (モックアップ)



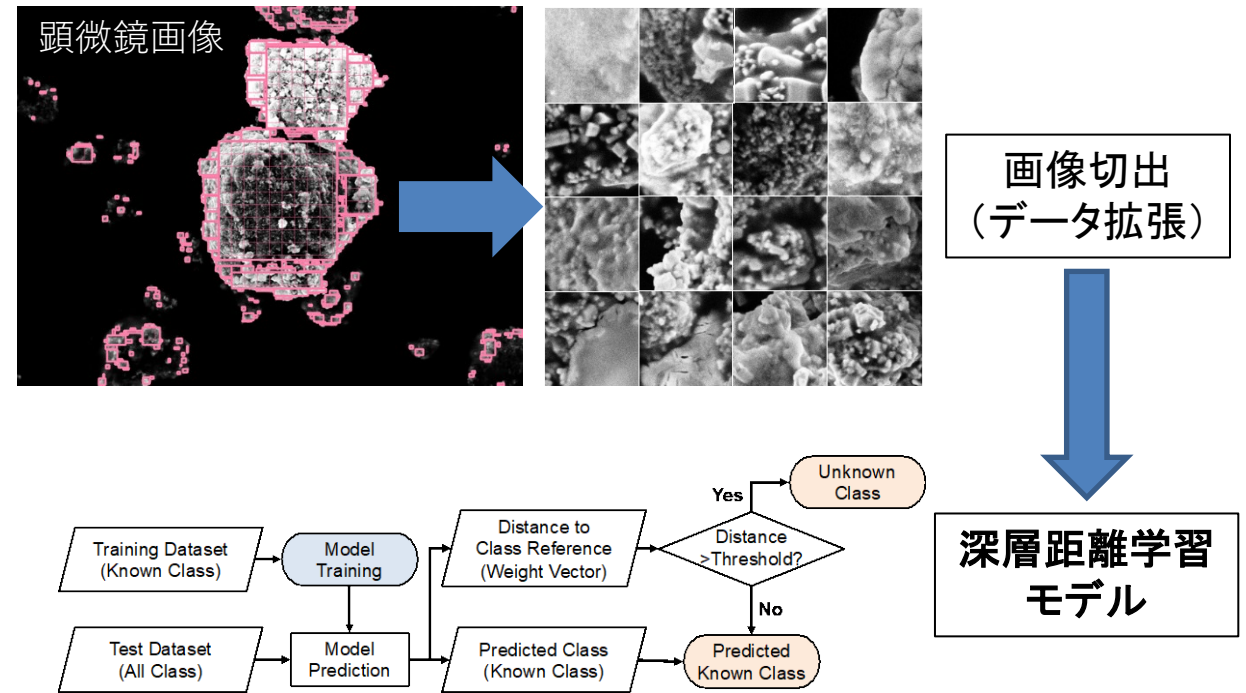
ボクセル型検出器モジュール (イメージ)

\* Y.Kimura, T.Yamaguchi, IZES, Tokyo (2023).

\*\* Y.Kimura, K.Tsuchiya, RADIOISOTOPES (2023).

# 核鑑識分析技術・鑑定支援技術（2018～）

1. AIによる形態学的特徴の解析
  - ✓ 深層距離学習による電子顕微鏡画像解析\*
    - **表面パターン、元素マップに基づく再現性と精度の高い試料識別**
2. 天然ウラン試料の特性・分析法
  - ✓ 国内外のウラン鉱石、イエローケーキ・ADU試料の分析（米国DOE共同研究）
    - **ウラン鉱石、イエローケーキ等の産地毎の特徴の解明**
    - **天然ウラン試料の標準的な分析法の確立**
3. プルトニウムの核鑑識分析
  - ✓ 軽水炉使用済核燃料の識別特性の解明（東工大共同研究）
  - ✓ プルトニウム試料の測定技術（R7年度～予定）
  - **プルトニウム関連事案への対応能力整備**



比較的少数(100枚以下)の顕微鏡画像から、

1. 既知の比較物質に対する分類
2. **比較物質にない未知物質の検知**

を高い精度・再現性で実現

\* Y.Kimura, T.Matsumoto, T.Yamaguchi, RANC-3, Budapest (2023).

# 核鑑識分析技術・鑑定支援技術（2018～）

4. 低コスト装置による核物質試料分析
  - ✓ アルファ線スペクトロメトリによるウラン年代測定（金沢大共同研究）
    - **ウラン年代（精製時期）測定技術の大幅な低コスト化**
  - ✓ 測色分光法による天然ウラン試料の識別法
    - **低コスト装置による簡便・迅速な核物質の識別**
5. RNテロ現場での回収試料分析
  - ✓ 環境試料（土壌、水など）からの核種分離と測定法
  - ✓ 模擬核物質の爆破試験回収サンプルの分析
    - **RNテロ発生を想定した試料分析の課題洗い出し、基本的な分析能力整備**
6. 放射能汚染分布の可視化
  - ✓ CMOSカメラ（一眼レフ）をベースとした $\alpha$ ・ $\beta$ 線汚染分布の可視化モジュール開発
    - **サーベイメーターよりも空間分解能の高い証拠品汚染分布の把握**

# 核鑑識に関する国際的な取組み

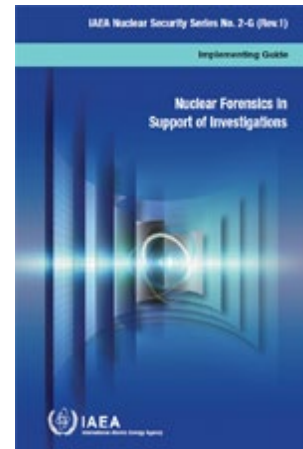
## ✓ 核セキュリティサミット

- 国際認知の向上
- 各国の能力整備、国際協力の促進



## ✓ 国際原子力機関 (IAEA)

- 加盟国支援
- IAEA文書の発行
- 国際会議、技術会合の開催
- トレーニングコース提供

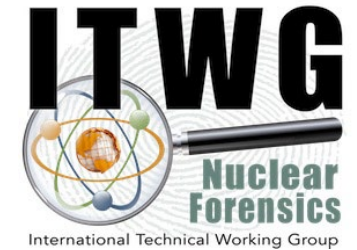


## ✓ その他国際機関：EU、INTERPOL、UNODC、UNICRI

## ✓ 二国間、他国間協力：日米NSWG、FNCA、ARFなど

## ✓ 核鑑識国際技術ワーキンググループ (NF-ITWG)

- 核鑑識のアウトリーチ
- 技術動向、良好事例の共有
- 分析演習、机上演習の開催
- 技術ガイドラインの策定



## ✓ 核テロリズムに対抗するためのグローバルイニシアティブ (GICNT)

- 国家対応計画、政策、運用強化に向けた協力
- ワークショップの開催
- 核鑑識実施能力自己評価ツールの開発、提供



# 国際協力活動

## ✓ 米国DOE (LLNL, LANL) との共同研究

- 過去5件：ウラン年代測定、核鑑識ライブラリ、粒子形状分析など (2011年～)
- 実施中1件：ウラン鉱石・精鉱の核鑑識シグネチャと測定法 (NP-13)

## ✓ 欧州委員会共同研究センター (EC-JRC Karlsruhe) との協力

- 核鑑識技術開発に関する情報交換、標準サンプルの共同分析試験、トレーニングコース講師派遣、ワークショップでの講演など

## ✓ 核鑑識国際技術ワーキンググループ (NF-ITWG)の活動

- 共同試料分析演習 (CMX 4-7)：3～4年毎に開催、初動対応・現場捜査演習キットと核物質・指紋・DNAを含む模擬押収品を配布
- 核鑑識ライブラリに関するWeb机上演習 (*Galaxy Serpent v1-v5*)：模擬事案における模擬分析データ、仮想データベースを配布

## ✓ その他

- カザフスタン産ウラン精鉱試料共同分析
- カナダウラン精鉱標準試料認証値策定のための共同分析
- ウラン試料顕微鏡画像共同分析
- 核鑑識地域トレーニングコース (2019年、2023年)



NP-13技術会合 (R5年1月@人形峠センター)



# 核鑑識・技術開発成果の国内展開

- ✓ 大学講義（2020年～）：核セキュリティ・核鑑識の基礎
  - 3コース（福井大学部、北大・上智大学院）
- ✓ 夏期実習生（2020年～）：核鑑識プロセスのハンズオン演習
  - 2023年までに5大学から計9学生（学部生・院生）を受入
- ✓ 大学共同研究
  - 使用済核燃料の重要シグネチャ核種に関する研究（東工大）
  - アルファ線スペクトロメトリによるウラン年代測定に関する研究（金沢大）
- ✓ テロ対策特別装備展：SEECAT（2021年～）
  - ハイブリッド検出器システムモックアップ、核種判定アルゴリズムの成果を展示

核・放射線テロの現場初動対応を支援する技術

ISCN

核テロ等の現場初動対応では原因物質(=放射性核種)の特定が必要不可欠  
 → 査察に求められる要件

- 小型・安価な装置による迅速・高精度な核種検知や核種特定が可能
- 放射線に関して十分な知識がなくても容易な(自発的な)核種特定が可能

テロ現場初動対応を支援する核種特定のための放射線測定技術開発

- ① 小型・安価な検出器を使用したハイブリッド測定システム(ハード)
- ② 深層学習(AI)を使用した核種判定アルゴリズム(ソフト)

**複数のガンマ線検出器を使用したハイブリッド測定システム**

ガンマ線の検出しやすさ(効率)とエネルギー差別能(分解能)が異なる2種類の検出器で測定したガンマ線スペクトルを合成

効率:高/分解能:低 Hybrid Spectrum  
 相互補完的に高感度な核種検知を実現  
 → 検出時間・検出下限性能の向上

効率:低/分解能:高  
 小型で比較的安価な検出器でも、顕著的に高感度な核種検知性能を得られる  
 核種検知や核種識別の目的であれば、どのような検出器にも応用可能

本システムの適用例

- 効率:低/分解能:高 → CZT検出器
- 効率:高/分解能:低 → CsI(Tl)検出器

→ 各検出器単体での測定した場合と比較し、<sup>137</sup>Csのピーク検出時間を40倍以上短縮  
<sup>239</sup>Puの最低検出可能量を半分以下に削減

	CsI(Tl)	CZT	Hybrid
<sup>137</sup> Cs検出時間(10%Cs/90%Cs線源)	>1200 sec	440 sec	<10 sec
<sup>239</sup> Pu検出可能量	N.A.	≥36.2 g	≥13.9 g

**深層学習(AI)を使用した放射性核種判定アルゴリズム**

深層ニューラルネットワーク(DNN)モデルを使用したガンマ線スペクトル解析による高精度な核種判定アルゴリズムを構築

測定したガンマ線スペクトルを1次元量込みDNNモデルで解析し、各核種に起因する計数成分を自動的に予測  
 シミュレーションで学習データを構築しているため、どのような検出器にも適用可能

核種判定アルゴリズムの性能評価

- 高分解能検出器(HPGe)対象アルゴリズム
- 低分解能検出器(CsI(Tl))対象アルゴリズム

→ 5種類の人工放射性核種の検出判定において90ポイント以上の性能を達成

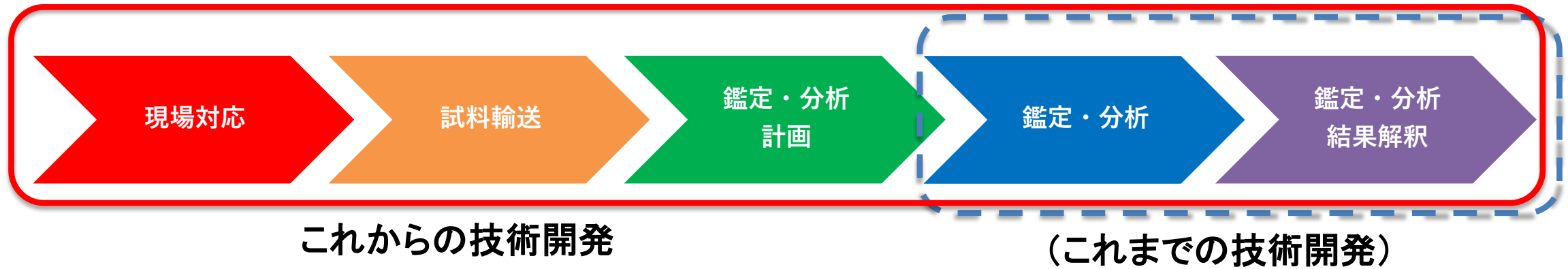
	DNNモデル	従来法
HPGe	100	84.8
CsI(Tl)	93.9	72.7

\* フスコア(適合率と再現率の平均)で評価  
 \*\* ピークサーチャ法による判定性能

未来へげんき  
 To the Future / JAEA

SEECATポスター

# 核鑑識技術の課題・ニーズ



- 法執行機関等からのニーズ
    - RNテロ発生後の核鑑識技術
    - 初動対応、現場捜査の支援
    - 汚染証拠品のハンドリング
  - 分析、解釈における課題
    - 新しい測定技術とシグネチャ（＝試料を識別する特徴）
    - 分析結果の信頼性
    - 国内ラボラトリネットワーク（大学、研究機関など）
- **核鑑識の社会実装に向けた技術開発**