

核鑑識技術開発の現状と今後の計画



2018年10月4日

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

平成30年度第1回核不拡散科学技術フォーラム

核鑑識とは

- 核鑑識とは、捜査当局によって押収、採取された核物質について、核物質、放射性物質及び関連する物質の組成、物理・化学的形態等を分析し、その物品の出所、履歴、輸送経路、目的等を分析・解析する技術的手段。
- 核鑑識技術により、不正に取引及びテロ等で使用された核物質の起源を特定できるため、犯人を特定し、刑事訴追できる可能性が高まり、核テロ等に対する抑止効果が高まるとともに、核鑑識に関する国際的なネットワークを構成し、グローバルな核セキュリティ体制強化に貢献できる。

核セキュリティサミットにおける声明

(2010年4月12-13日、ワシントンDC)

核物質の測定、検知及び核鑑識に係る技術の開発(一部抜粋)

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。



技術的課題と開発の方向性

同位体比分析、不純物分析、粒子形状分析、ウラン精製年代測定、ライブラリ概念構築など基本的な核鑑識技術を確立した上で、以下に示す技術課題解決に向け、技術の高度化などに取り組んでいる。

- 分析の迅速化、確度向上
 - 複数のウラン年代測定法の開発
 - 画像解析処理ソフトを用いた微細構造解析手法開発
- 解析結果の信頼性（再現性、客観性）の向上
 - 統計解析や人工知能(AI)による解析技術開発

核鑑識の事例は少なく世界的に標準的な手法は確立していないため、開発した手法について、米国DOEやEC/JRCとの共同研究により技術の検証を行ったり、国際演習に参加し技術力の確認を行うなど国際協力のもと技術開発を行うことが重要。

上記に加え、JAEAがこれまで実施してこなかった課題として下記を実施

- 核・放射線テロ事象後(Post-dispersion)を対象とした核鑑識に関する技術開発

核鑑識技術開発概要

概要

基本的な核鑑識技術の整備（H24-H26）、核鑑識技術の高度化（H27-H30）を踏まえ、核物質や放射性物質を使用したテロ行為等からの国民の安全確保、警察等による捜査に貢献する核鑑識技術の実用化（社会実装）に向けて以下を実施。

- ✓ 核物質や放射性物質がテロ等に使用されてしまった後（テロ事象後：Post-dispersion）を対象とした核鑑識技術開発
- ✓ 人間よりも迅速・客観的な核鑑識分析・解析を行う人工知能(AI)解析技術開発など革新的な核鑑識技術を開発(核物質や放射性物質を用いたテロ事象前を対象)

革新的な核鑑識技術開発(テロ事象前)

- 世界に先行する新しい核鑑識技術の開発

(国外共同研究機関:DOE、EC/JRC)

H24年度 ~ H26年度

H27年度 ~

H31年度(計画)~

(テロ事象前を対象)

H30年度 ~

(テロ事象後を対象)

基本的な核鑑識技術の整備

- ウラン精製時期測定法
- ウラン同位体比測定法
- 粒子分析手法
- 不純物分析手法

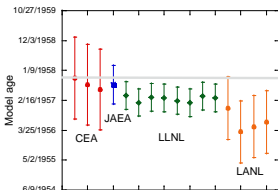


図: ウラン精製時期測定の確認試験

- 基本的な核鑑識技術を確立

核鑑識技術の高度化

- 新たな精製時期測定法の開発
- 顕微鏡画像の定量評価手法の開発

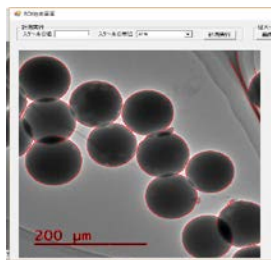


図: 核物質粒子形状定量化のための顕微鏡画像解析ツール(位目0時)

- 核鑑識技術の迅速化、信頼性向上

核・放射線テロ事象後(Post-dispersion)を対象とした核鑑識に関する技術開発

- テロ現場での核物質、残留放射性物質の検出・回収技術
- 現場の土壌等に含まれる核物質・放射性物質の分析手法開発
- テロ使用前の物質とその起源特定(原子炉等)のための特徴解析手法開発



図: 放射性降下物粒子の電子顕微鏡写真例
出典: ORNL: Post detonation Nuclear Forensics

- 核・放射線テロ事象前後の包括的核鑑識技術の確立

最近の国際協力による技術開発

核鑑識技術の高度化の一環で、国際協力に基づく技術開発及び高度化技術の検証を実施。

- DOE/JAEA共同研究
 - 新ウラン年代測定法の開発
 - 核鑑識画像データに係る微細構造解析手法開発
- EC-JRC/JAEA共同研究
 - 核鑑識技術に関する協力
 - In-situウラン年代測定法の共同検証
- 核鑑識に係る国際技術ワーキンググループ(ITWG)
 - 共同試料分析
 - 核鑑識ライブラリに係る国際机上演習
- DOE-INP*(カザフスタン)-JAEAウラン鉱石共同試料分析

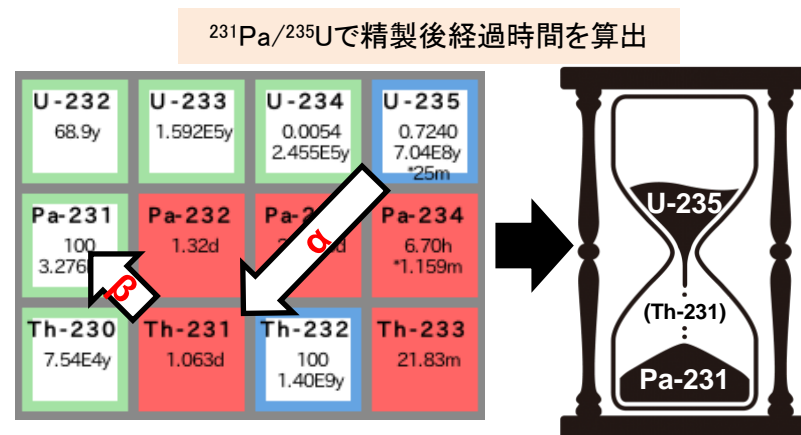
*: Institute of Nuclear Physics

DOE-JAEA 共同研究

● 新ウラン年代測定法の開発に関する協力

ウランの精製日を高精度かつ正確に決定する年代測定法は、核鑑識分析において重要である。従来の年代測定法($^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 法)に加えて、新たに $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$ 年代測定法を確立することで、分析試料について、より詳細な精製日の情報を得ることが期待できる。

- 分析方法についての情報交換
- 共同試料分析の実施
- 分析結果についてレビュー会合

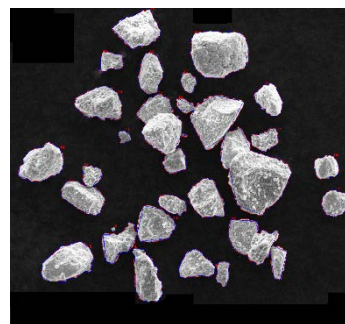


$^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$ 比を用いたウラン年代測定法の概念

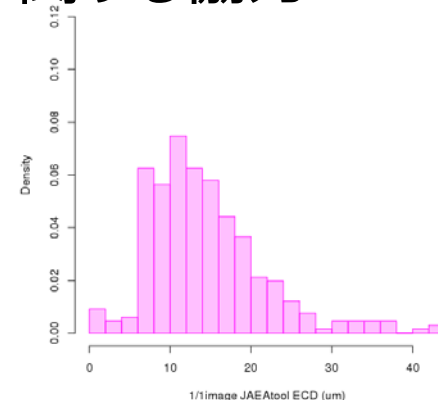
● 核鑑識画像データに係る微細構造解析手法開発に関する協力

JAEAにおいて核物質粒子形状を定量化する核鑑識顕微鏡画像解析ツールを開発し、電子顕微鏡による粒子画像の撮影を含む画像解析ツールによる解析結果の比較試験を実施。

- 微細構造解析ソフトウェア技術の開発のための解析手法、データの交換
- 分析手順、解析パラメータ等の情報交換



画像解析ツール性能比較用の顕微鏡画像



JAEAの画像解析ツールによる解析結果(粒子等価円直径の分布)

EC/JRC-JAEA 共同研究

- 核鑑識技術に関する協力
 - ✓ 核鑑識技術に関する技術会合(2017年10月、独カールスルーエ)でウラン不純物分析、画像解析手法について情報交換を実施
 - ✓ ISCN主催のアジア諸国を対象とした核鑑識トレーニングコース(2019年1月実施予定)における机上演習において、EC/JRCから講師を派遣
- in-situ 同位体法を用いたウラン年代測定法に関する協力
 - ✓ JAEAが開発したin-situ同位体法について、EC/JRCと共同試料分析を実施中。2018年10月以降にレビュー会合を開催予定。

Th 同位体比

$$\left(\frac{{}^{230}\text{Th}}{{}^{234}\text{Th}} \right) \times \left(\frac{{}^{234}\text{Th}}{{}^{238}\text{U}} \right) \div \left(\frac{{}^{234}\text{U}}{{}^{238}\text{U}} \right) = \frac{{}^{230}\text{Th}}{{}^{234}\text{U}}$$

測定値

測定値

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

U 同位体比

$$\frac{{}^{234}\text{Th}}{{}^{238}\text{U}} = 1.477 \times 10^{-11}$$

★ (放射平衡時の値)

in-situ同位体法

230Th/234U年代測定について標準物質の添加を必要としない簡便・迅速な方法をJAEAで開発

核鑑識技術に係る国際ワーキンググループ

Nuclear Forensics International Working Group (ITWG)

- 冷戦後多発した核物質違法移転に対処するため、1996年に核鑑識技術の開発、共通の手法・技術を提供する目的で設立
- 5つのタスクグループ（核鑑識分野の教育・普及、演習、ラウンドロビン・エクササイズ、ガイドライン、ライブラリ）を設置し、核鑑識技術に係るガイドラインの作成、国際比較試験などの国際協力プログラムを実施

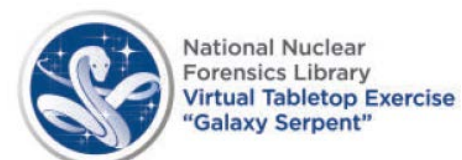
JAEAが参加している国際協力プログラム

① Collaborative Material Exercise (CMX)

- 核鑑識分析技術のベストプラクティスの共有を目的として、実際の核物質試料を対象とした分析比較試験をこれまでに5回開催。JAEAは第4回(2013)と第5回(2016-2017)の試験に参加。今年度第6回の試験に参加予定。

② Table Top Exercise “Galaxy Serpent”（銀河の蛇）

- ITWG ライブラリタスクグループ主催の核鑑識ライブラリに係る国際机上演習
- 仮想データを用いた核鑑識ライブラリの構築から押収物質の特定に至るプロセスについて学ぶことを目的としてこれまでに3回の演習を開催(2013, 2015, 2017)され、JAEAは全てに参加。



第5回ITWG 核鑑識共同試料分析演習 (CMX-5, 2016-2017)

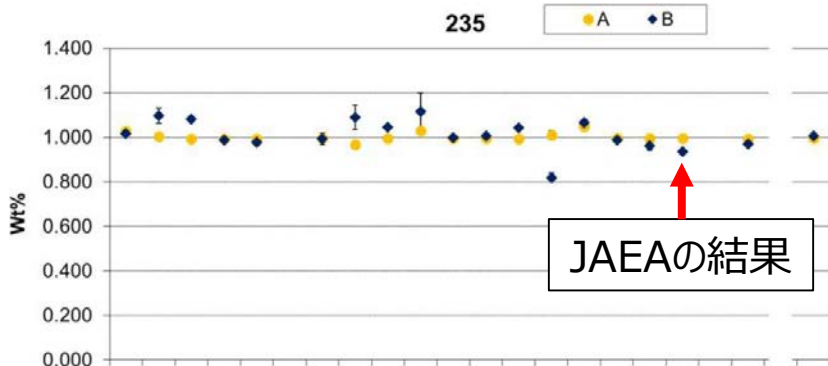
同一の二酸化ウラン原料を用いて異なる2種類の方法で加工されたウランペレット (試料A,B) について、2試料の同位体、不純物、精製時期等に関する共同試料分析を実施。



製作した簡易グローブボックスにてウランペレット試料を粉碎し、不純物分析・同位体比分析・年代測定用の試料を分取

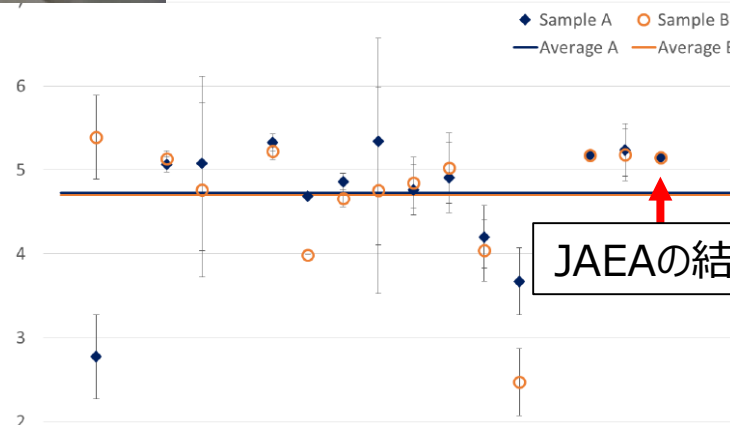


ウランペレット試料



(試料Bの²³⁵U含量は、試料ごとに不均一であった可能性が示唆された)

図: ²³⁵U同位体比



(2試料は同一の精製日を持つことを明らかにした)

図: ウラン精製時期

第3回核鑑識ライブラリに係る国際机上演習 (Galaxy Serpent v3)

- 対象物質：ウラン精鉱
- データ項目（データベース構築用）
 - Affinity (起源)：4 産地 (Group1-4)
 - 一般情報：サンプルID, 試料採取緯度/ 経度
 - 物性：ウラン濃度, 元素濃度 (44元素)

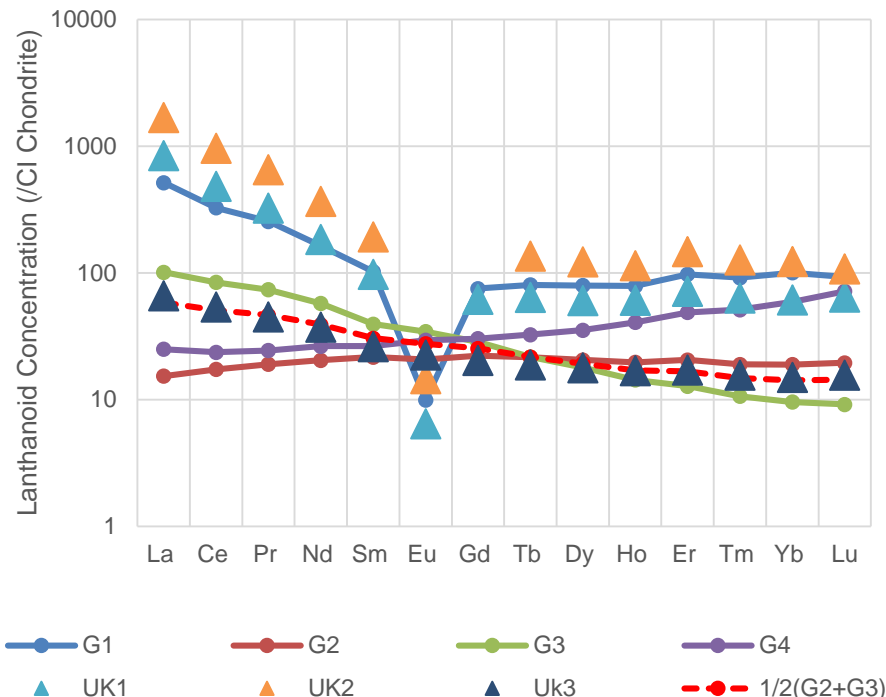
⇒① **与えられた情報をもとにデータベースを作成**

- 課題：押収された3バレルのウラン精鉱未知試料 (Unknown 1-3)について
 - 各バレルのウラン精鉱に関連性があるか？
 - データベースのウラン精鉱との関連性は？
 - どのような手法で解析したのか？
 - (国内関係機関にどのように情報展開するか？)

⇒② **未知試料(3個)の情報とデータベースとを比較し解析**

- JAEAは、多変量解析による核物質異同識別解析手法の検証を合わせて実施

(各産地のランタノイド元素の平均分布との比較)



(多変量解析例：マハラビス距離に基づく判別分析による分類)

	Group1	Group2	Group3	Group4
Unknown1	5.83	142.89	42.81	65.56
Unknown2	18.34	451.13	80.60	121.79
Unknown3	1280.42	5948.94	785.30	1834.32

マハラビス距離が小さいと最も近い産地に分類される

解析結果

- 上図に示すランタノイド元素の平均分布から、未知試料(Unknown) 1と2はGroup1に属すると推定されるが、未知試料3は不明。
- 多変量解析の一つ、データ群の散らばりを考慮して類似性を判別するマハラビス距離に基づく結果から、未知試料3はGroup3に属すると推定可能。ただし、値が大きいため他の手法を用いた解析が必要。

核鑑識技術開発の今後の展開

JAEAに対する技術開発のニーズ

原子力科学技術委員会核不拡散・核セキュリティ作業部会

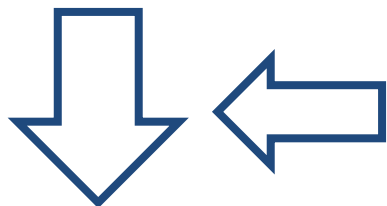
※今後の核不拡散・核セキュリティ研究開発の進め方について（中間とりまとめ）、第14回 議事要旨より

- 核セキュリティ事象発生時の対応の観点から核鑑識技術の維持、国際協力に支障のない範囲で技術開発を継続することが必要。
- **核物質が盗まれた後の対応に必要な研究開発**（例えば革新的放射線イメージング技術の開発により核物質・放射性物質の同定、隠匿された位置情報の取得の精度向上。ダーティボムの飛散予測と飛散検知の基盤研究、緊急時の放射線環境下で遠隔計測等ができる技術の研究開発。）
- **AIやバーチャルリアリティ技術への取り組み**

ISCN主催技術シンポジウム、GICNT*、ITWG専門家会合等

- **新しいシグネチャ、核・放射性物質の分析、核燃料サイクル等に関する豊富な知見をもとにした最新技術**
- 関係機関（捜査機関等）を含めた国内連携、核鑑識ラボネットワークの構築

*Global Initiative Combat to Nuclear Terrorism：2006年7月のG8 Санктペテルブルク・サミットに際し、米露両国の大統領が、核テロリズムの脅威に国際的に対抗していくことを目的としたもの。現在、核検知、核鑑識、対応・緩和の3つの作業部会がある。



国内外の専門家が挙げた核鑑識技術開発に係る今後の課題

- 適時性・信頼性の高い分析
- シグネチャ解析・解釈の円滑化
- データベースの構築、シグネチャの拡充
- 捜査機関のニーズへの対応

Post-dispersion核鑑識技術開発

- **核・放射線テロ事象発生後の現場対応、試料分析とシグネチャ解析に寄与する技術の開発。**

革新的な核鑑識技術の基盤研究

- 核鑑識への利用経験が無いまたは少ない革新的技術の基盤研究によって、**信頼性の向上及び迅速化**に加えて、**社会実装に向けた捜査機関からのニーズを踏まえた核鑑識技術の実現**を目指す。

核鑑識技術開発の今後の計画

- Post-dispersion核鑑識技術開発(H30年度～)
 - 現場に残留する核物質・放射性デブリの検出・回収技術
 - 現場で採取した物質の分析技術、シグネチャ解析技術
- 革新的な核鑑識技術の基盤研究(H31年度(計画)～)
 - 人工知能(AI)を用いた核物質シグネチャ解析技術
 - 微細構造分析(透過型電子顕微鏡)試料薄膜化処理技術
 - 核鑑識におけるオートラジオグラフィ技術
 - レーザーを使用した新しい同位体・不純物分析技術 (将来的に検討)

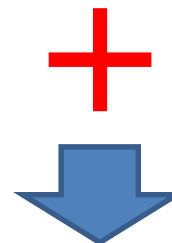
現場残留核物質・放射性デブリの検出・回収技術

Phase1: 現場対応者による核種検知・判定のための放射線測定技術開発

- 複数の小型検出器による高性能な放射線測定技術開発
- 機械学習による放射線測定アルゴリズムの開発による放射性核種検知・判定精度向上

Phase2 (計画): 放射性核種飛散分布の遠隔マッピング技術、放射性物質の遠隔回収技術の開発

機械学習アルゴリズム



複数の小型・安価な放射線検出器による測定



現場対応者を支援する、自律的な放射性核種の検知・判定及び放射性核種の現場飛散分布の把握が可能な放射線測定技術

現場採取物質の分析技術、シグネチャ解析技術

Phase1:

- 環境試料（土壌、雨水等）からの核種分離・分析技術の開発、環境中のバックグラウンド存在核種の影響評価
- Post-dispersion試料における重要シグネチャ核種の研究（使用前物質の同定など）
- 爆発によるシグネチャ変性特性解明のための研究

Phase2(計画):

- 模擬試料（環境試料、放射性デブリ）の分析試験による、核種分離・分析技術の検証

Post-dispersion試料の例
(独における再処理施設からの放射性廃棄物の盗難事案)



(盗難物品：
放射性廃液を含む廃棄物)



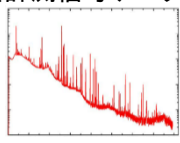
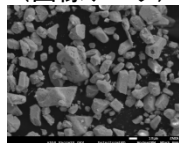
(現場採取物質：掃除機バッグ)

https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/jrc_aaas2008_presentation_06_atomic_detectives.pdf

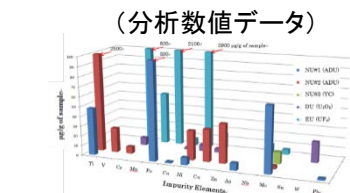
① AIによるシグネチャ解析技術

目的: 多種多様なシグネチャ解析・解釈の円滑化、解析結果の信頼性(再現性、客観性)の向上をめざしたAIによる解析技術の開発

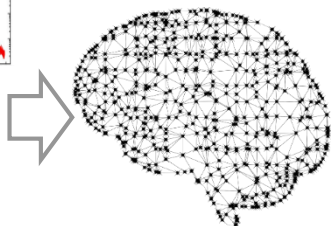
(画像データ) (計測信号データ)



AIアルゴリズム



多種多様なシグネチャのデータ

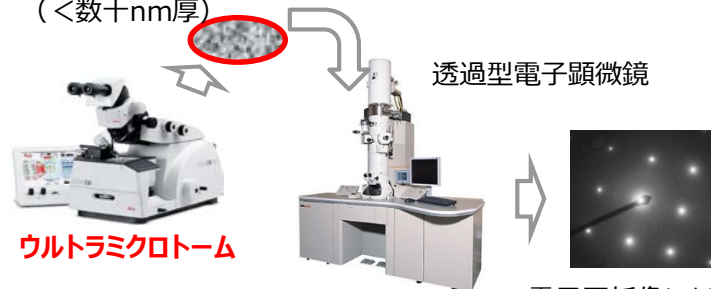


- 分析結果解析・解釈の自動化、円滑化
- 結果の再現性、客観性の向上

② 微細構造分析試料薄膜化処理技術

目的: 核鑑識におけるシグネチャ拡充を目的とした、核物質の結晶構造、内部元素構造などの微細構造分析技術の開発

薄片試料 (<数十nm厚)



ウルトラマイクローム

透過型電子顕微鏡

電子回折像による結晶構造解析

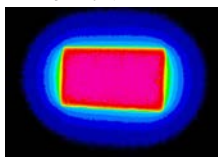
③ 核鑑識におけるオートラジオグラフィ技術

(核・放射性物質に関連する不法行為に対する捜査活動)

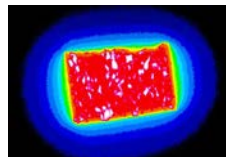
目的: 捜査機関による放射性物質による汚染証拠品の取り扱い、信頼性の高い分析結果に貢献する小型のオートラジオグラフィ技術の開発

オートラジオグラフィ

サンプルA



サンプルB



- 核物質、放射性物質サンプルの大きさ、形状及び位置に加え、不均質性の有無を視覚的に観察可能
- 証拠品の汚染状況を把握可能とし、捜査機関による証拠品の取扱いのサポート技術として貢献

デジタル技術による小型オートラジオグラフィ



初動対応

サーベイ、イメージングによるデブリ位置、現場汚染状況の把握

証拠品回収

汚染証拠品の遠隔回収

証拠品鑑定

証拠品の汚染状況の把握
分析・鑑定方法決定

オートラジオグラフィ

GICNTやITWG等の専門家会合で議論されている 核鑑識に関する課題

- 国際指針に基づく国家対応計画の策定（特に、事象発生時のイニシアティブ）
- 警察、原子力規制当局及び司法などの関連省庁間の連携
- 警察の一般鑑識（指紋、DNAなど）との協力
- 核鑑識活動のイニシアティブとイベント発生時の責任体制（米英などは国家対応計画あり）
- 教育・訓練・演習（核・放射線の専門家育成）
- 核鑑識に係る国家能力の確立（オーストラリア、米国、英国、カナダ、フランス、ロシア、オランダ、EUは分析体制や対応体制を整備した）