

核測定・検知技術開発の現状と 今後について

2019年9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（ISCN）

Integrated Support Center for Nuclear Nonproliferation and Nuclear Security

令和元年度 第1回 核不拡散科学技術フォーラム

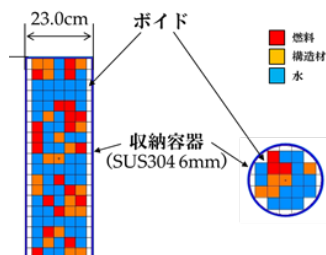
技術開発の基本的な考え方

- 原子力機構の持つ施設、核・放射性物質、知見・経験、基盤技術を活用する。
- 核不拡散・核セキュリティを取り巻く海外動向の調査・分析を踏まえた課題・ニーズの特定する。
- 国際協力のパートナーであるDOE/NNSA、EC/JRCの意向を踏まえ、基本的に国際共同研究で進める。

実施中の核不拡散・核セキュリティ技術開発

福島溶融燃料中核燃料物質測定技術開発

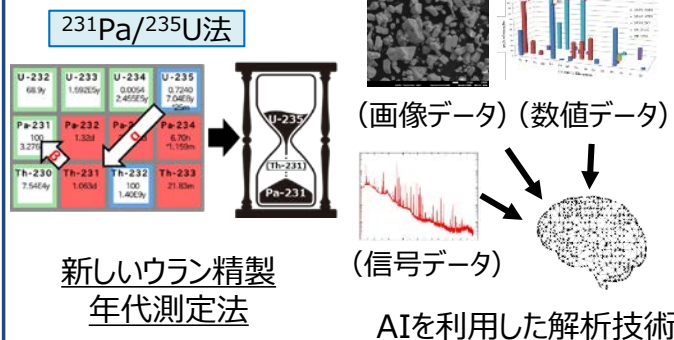
溶融燃料中の核燃料物質測定技術開発を実施するとともに計量管理方策を検討し関係機関と共有



実際の燃料デブリを模擬した不均質モデルを用いた解析

核鑑識技術開発

核物質等の不法取引や核テロ行為の際に、押収又は採取されることが想定される核物質の起源等を特定するための技術開発



核セキュリティ事象における核物質魅力度評価に係る研究

米国と共同で核セキュリティに係る核物質を含む放射性物質の魅力度(その物質がどの程度テロ行為に使われやすいかという指標)評価に関する研究を実施



注：①は対象外 外務省HPより

核燃料サイクル施設を対象とした包括的評価手法の開発

核測定・核検知技術開発（今回報告）

- 核共鳴蛍光(NRF)-非破壊測定(NDA)技術実証試験
- アクティブ中性子非破壊測定技術開発
- 放射線イメージングを用いた広域かつ迅速な核・放射性物質検知技術開発 (実施計画中)

1. 核共鳴蛍光(NRF)-非破壊測定 (NDA)技術実証試験

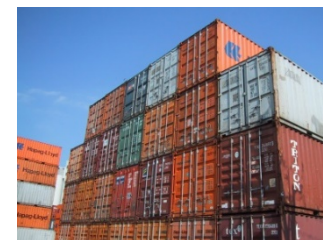
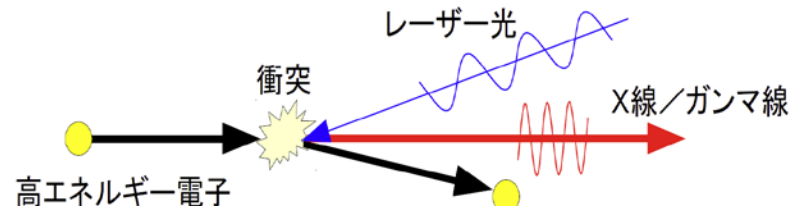
港湾等において重遮蔽物（コンテナなど）の中に隠された核物質の持ち込みは、従来の技術では検知が難しく核セキュリティにおいて課題とされている。本研究では、疑わしい物体の中に隠された核物質を、外部から検知する技術の実証試験を行う

NRF: Nuclear Resonance Fluorescence
NDA: Non-Destructive Assay

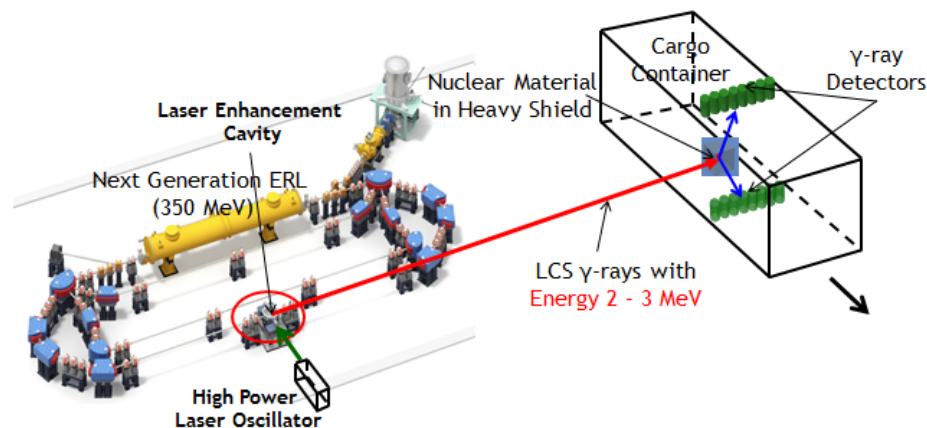
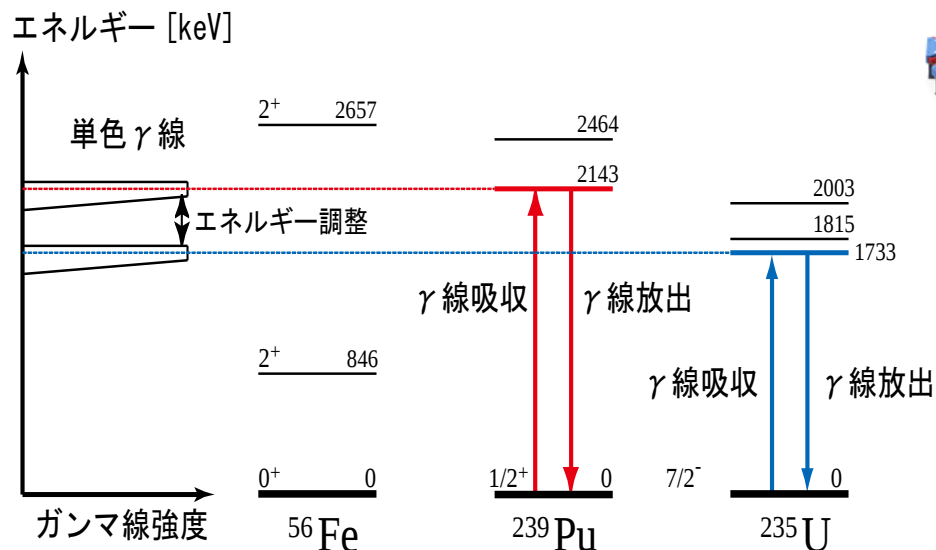
実施担当：ISCN, 量子科学技術研究開発機構, 兵庫県立大学

核共鳴蛍光(NRF)-非破壊測定(NDA)の原理

1) レーザー・コンプトン散乱による準単色ガンマ線の発生



2) 核共鳴蛍光現象 核種固有の反応



- ✓ **ガンマ線の貫通力**
- ✓ **核種検知能力**
- ✓ **照射で放射化しない**

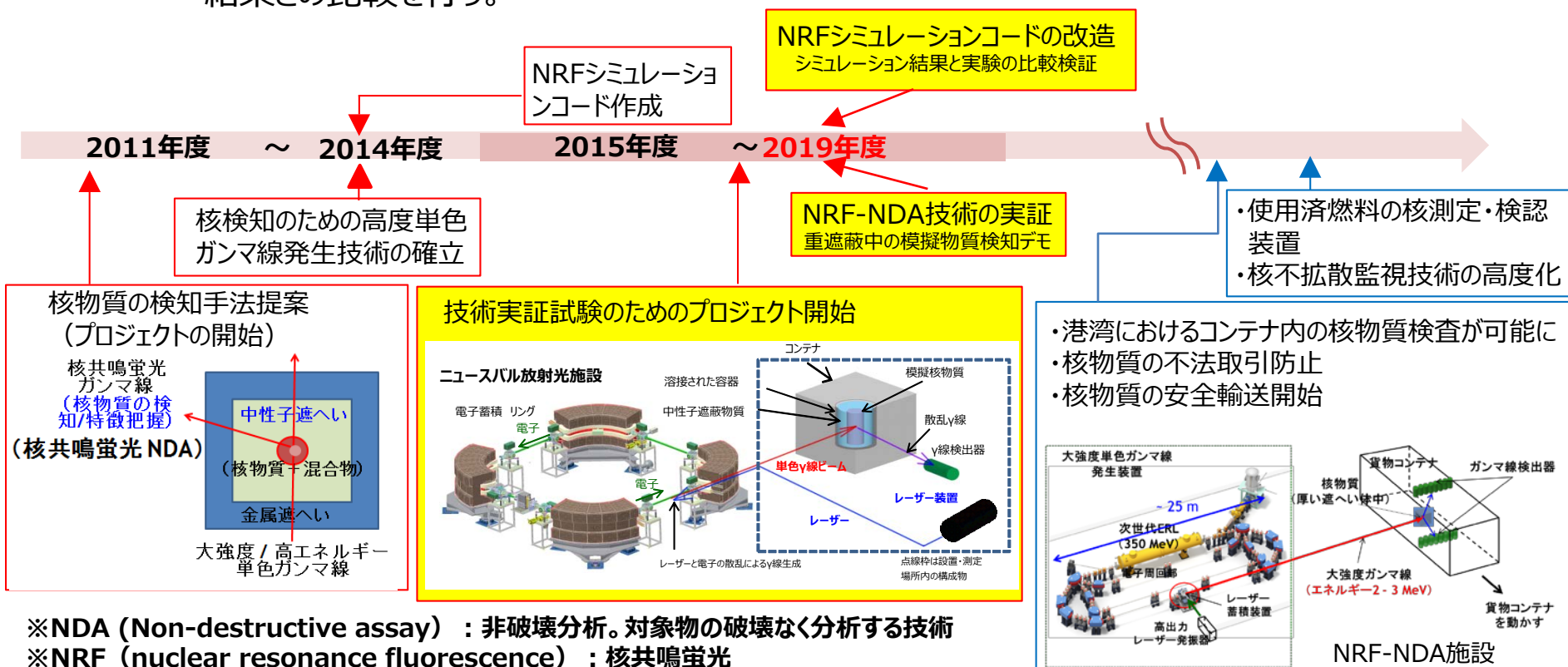
ERL (Energy Recovery Linac)	エネルギー回収型Linac
LCS (Laser Compton Scattering)	レーザー・コンプトン散乱

1.核共鳴蛍光(NRF)-非破壊測定(NDA)技術実証試験

概要

特定のエネルギーを持つガンマ線を照射すると、特定の原子核がガンマ線を吸収・放出する。この現象（核共鳴蛍光）を利用して、対象物を破壊することなく隠された核物質を探し出す技術を開発する。

- ✓コンテナ内の重遮蔽物の中に隠された核物質を外部から検知する技術を確認するため、技術的な実証試験をニューバル放射光施設で行う。
- ✓実用装置の設計に使用するため、ガンマ線光弾性散乱のNRF測定に対する影響を評価するためにシミュレーションコードを改造し、Duke大学(米国)でのガンマ線ビームを用いて得られた実験結果との比較を行う。



※NDA (Non-destructive assay) : 非破壊分析。対象物の破壊なく分析する技術

※NRF (nuclear resonance fluorescence) : 核共鳴蛍光

※シミュレーション : コンピューターの仮想空間で各要素について物理法則に従った現象を起こし、全体として起きる現象を調べる手法

実証試験デモンストレーション及びワークショップの開催

目的：本研究の評価及びエンドユーザーを含めた関係者への研究成果の共有

計画概要

日程(予定) 2020年1月24日(金) ワークショップ

2020年1月25日(土) デモンストレーション・ニュースバル放射光施設視察

場所 ニュースバル, 兵庫県立大学

招待/参加予定 (評価者、オブザーバー)

国外

米国国土安全保障省(DHS), IAEA, 欧州委員会共同研究センター(EC-JRC), 米国エネルギー省(DOE)

国内

警察庁, 文科省, 税関, 規制庁, 大学研究者

主催 ISCN

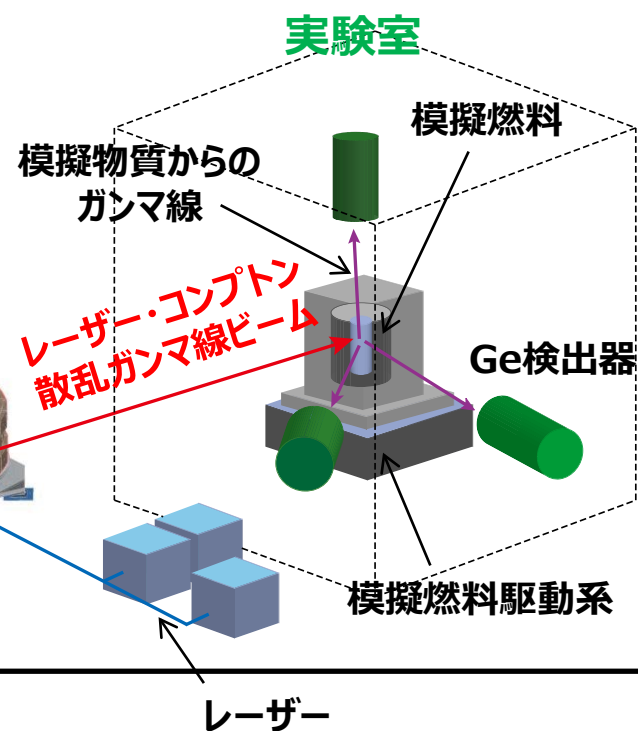
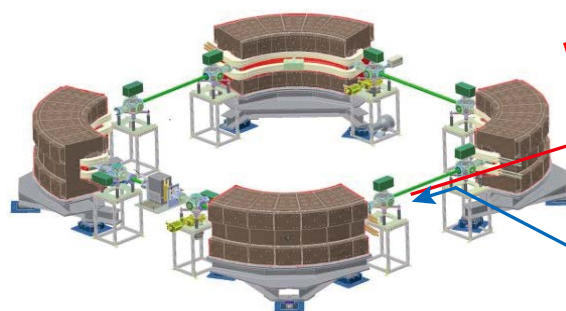
実証試験施設

兵庫県立大学 高度産業科学研究所
ニュースバル放射光施設



New SUBARU ビームライン (BL1)

ニュースバル電子蓄積リング
(抽象イメージ)



現状と今後について

- 本研究開発は、2011年度よりスタート。大強度LCSガンマ線の発生原理の実証（KEKとの共同研究で世界最高輝度を達成）、NRF反応に関するシミュレーションコードを開発。
- 2015年度より本プロジェクトを開始。本年度、重遮へい核物質の検知実証試験を実施。NRFのバックグラウンドとなる光散乱計算コードの開発（Geant-4のサブルーチンに採用）。
- 核物質の港湾からの持ち込みの脅威に対して、要請があれば、技術的には実装展開可能。
- 電子線加速器の小型化を期待。
- 本技術は、高い放射能を持つ試料中の核物質測定に有用。
- 精度の低い次世代原子炉等の燃焼計算コードに関し、本技術による燃料集合体中の核物質測定値との比較(ベンチマーク)による燃焼コードの高度化、その後の保障措置検認測定に寄与。

米国Passport systems Inc. の社会実験（例）

Conley Container Terminal (Boston, US)

2016年の資料より



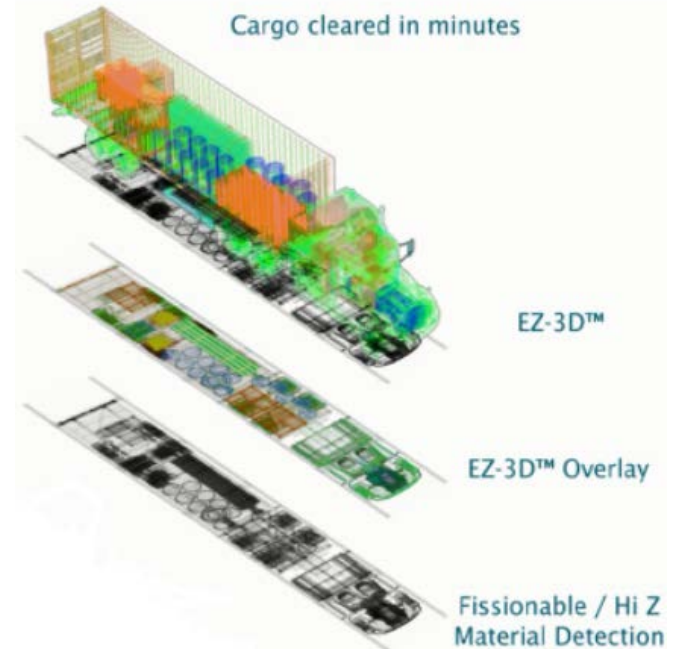
2018年のGoogle mapより



SmartScan 3D™
Automated Cargo Inspection
System



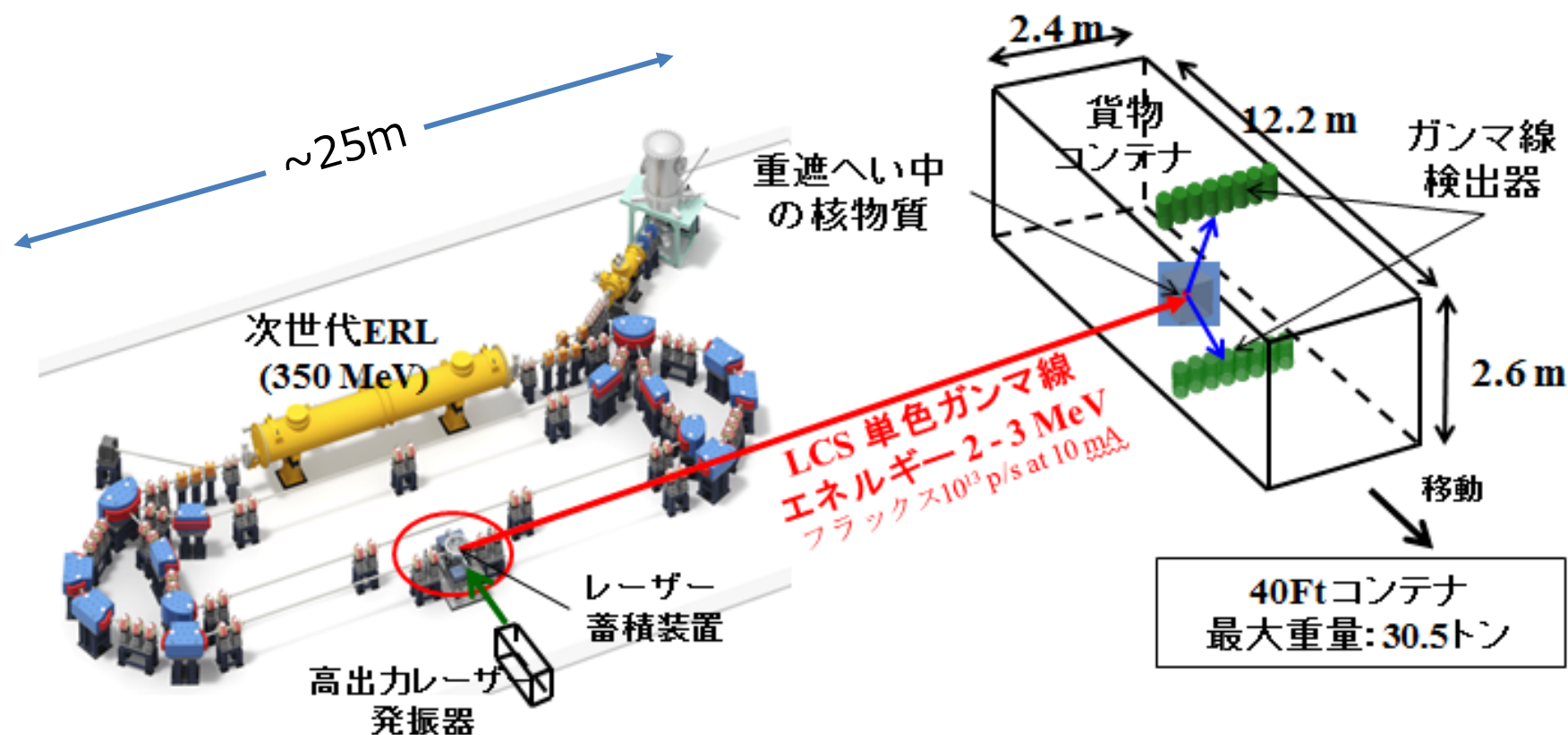
Cargo cleared in minutes



9-MeV 電子線ビームの連続制動放射光を用い、後方散乱放射光技術（EZ-3D）、X線透過法による画像化を行う。
また、光核分裂反応により核物質の有無の判定、核共鳴蛍光分光による成分分析を行うことができる。

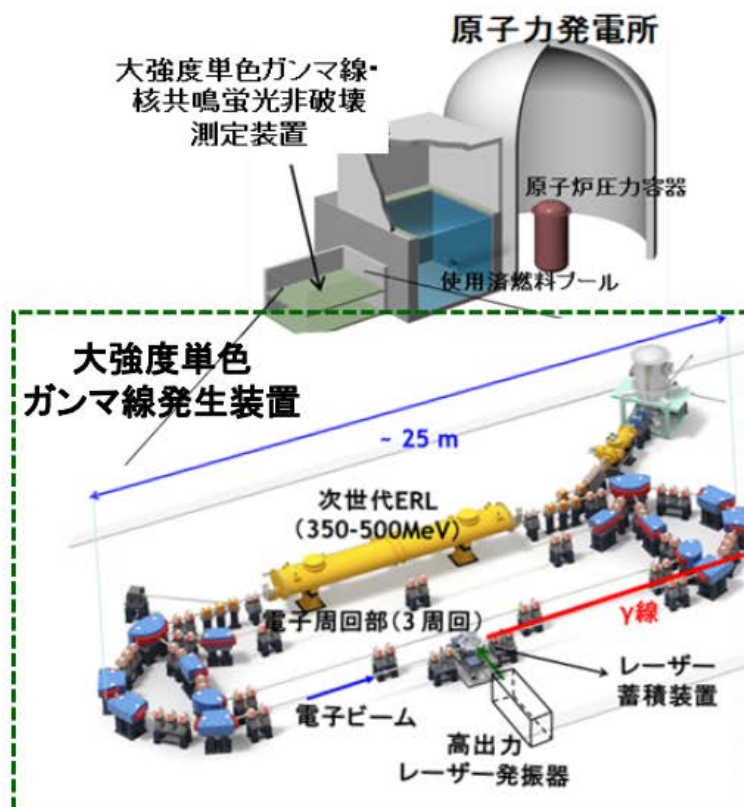
重遮蔽核物質検知システムでの核物質検知 (ERL-LCS単色ガンマ線利用NRF核物質非破壊検知装置)

(40フィート海上輸送コンテナ非破壊検知への適用)

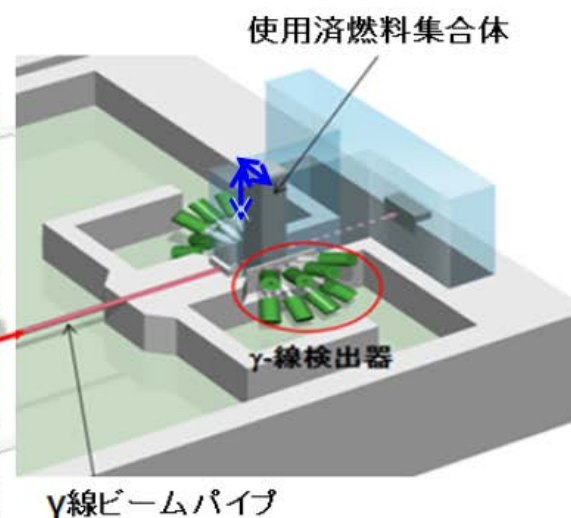


その他の適用先

・使用済燃料集合体の測定（革新炉等における）



- ・実測値との比較による燃焼計算コードの高精度化
- ・搬出時の核物質量の測定



T.Shizuma, et al., NIM A 737 (2014) 170.
T.Hayakawa et al., NIM A621 (2010) 695.

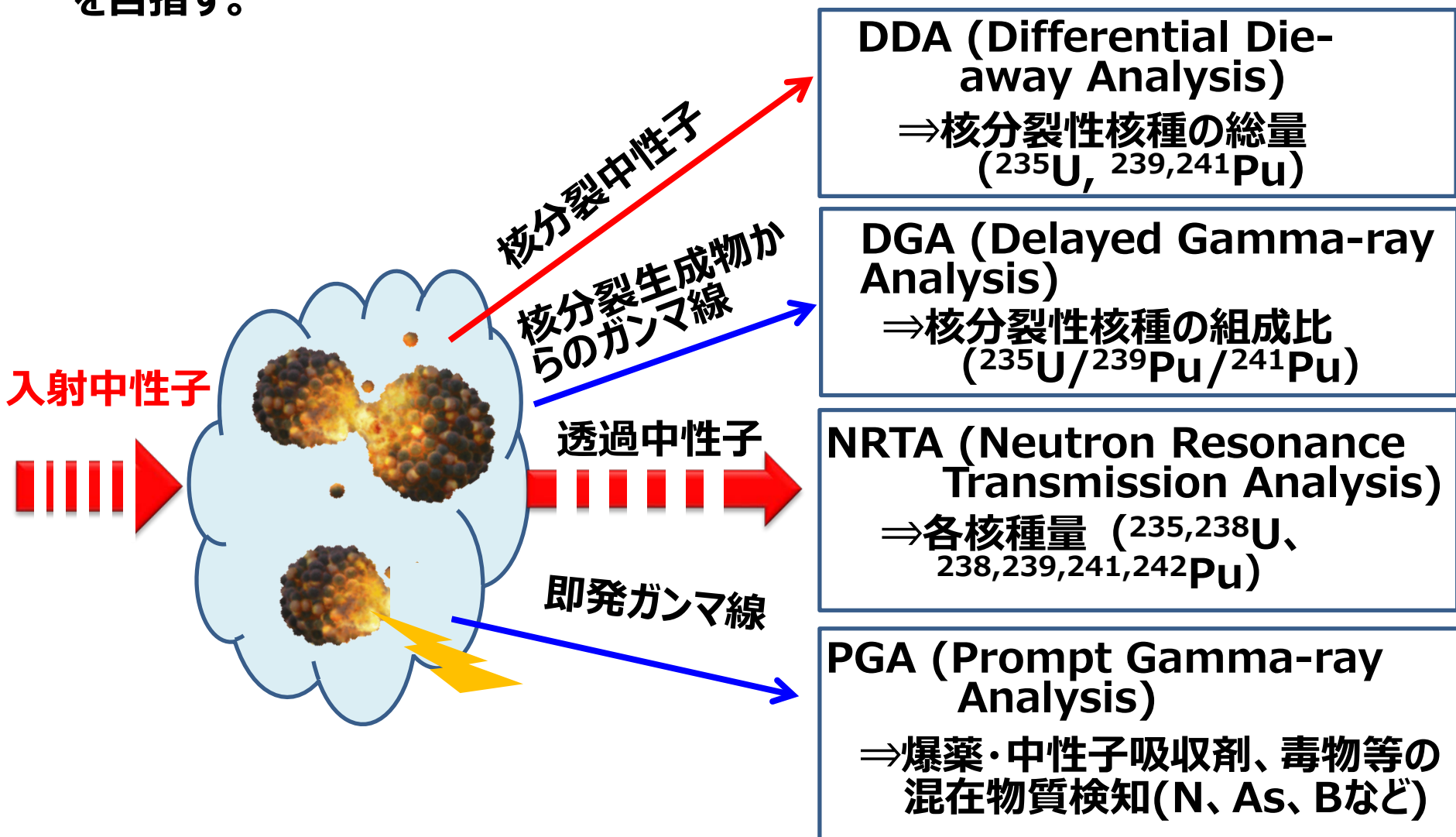
2. アクティブ中性子非破壊測定技術開発

試料から自発的に放出されるガンマ線や中性子を測定するパッシブ法では、検知・測定することができない試料に対し、中性子を照射して、核反応により生成したガンマ線や中性子などを測定するアクティブ法を開発する。また、複数の技術を相補的に用い、試料の分析を行う。

当該技術は、再処理施設などにおいて課題とされている高線量核物質試料の分析測定や、核セキュリティにおける不審物中の核物質などの検知・分析に用いることができる。

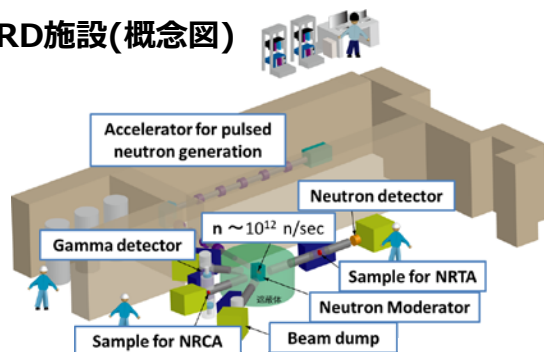
外部中性子源を用いたアクティブ法

外部中性子で核反応を起こし、それに伴う中性子放出やガンマ線の放出を測定する技術。従来手法での測定が難しい高線量試料中の核物質測定などに適用を目指す。



アクティブ中性子NDA技術開発の年度展開

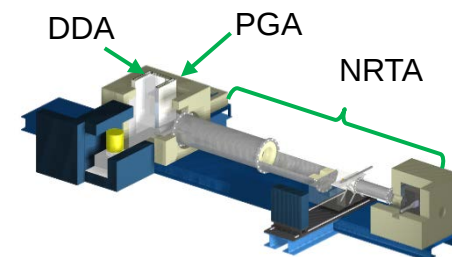
NRD施設(概念図)



Active-N II: DDA, PGA
統合システム(フェーズ1)

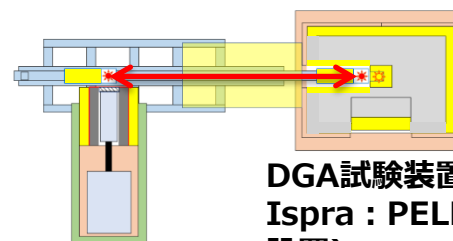
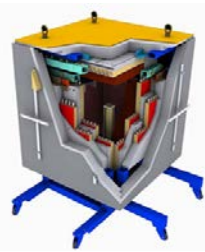


Active-N III: DDA, PGA, NRTA
統合システム(フェーズ2)



	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
開発技術	NRD (Neutron Resonance Densitometry)			フェーズ1 対象低放射性物質			フェーズ2 対象：高放射性物質			
DDA				JRC Ispra		JAEA NUCEF	JAEA NUCEF			
PGA		JRC Geel	JAEA NUCEF			Active-N II			Active-N III	
NRCA*1										
NRTA		JRC Geel		JRC Geel			JRC Geel			
			NRD施設 概念検討				レーザー駆動中性子源の利用(阪大)			
DGA				JRC Ispra			JRC Ispra			コンパクトDGA システム検討
							JRC Geel (MONNET)			

*1 : Neutron Resonance Capture Analysis (中性子共鳴捕獲分析)



DGA試験装置 (JRC Ispra : PELRA施設に設置)

現状と今後について

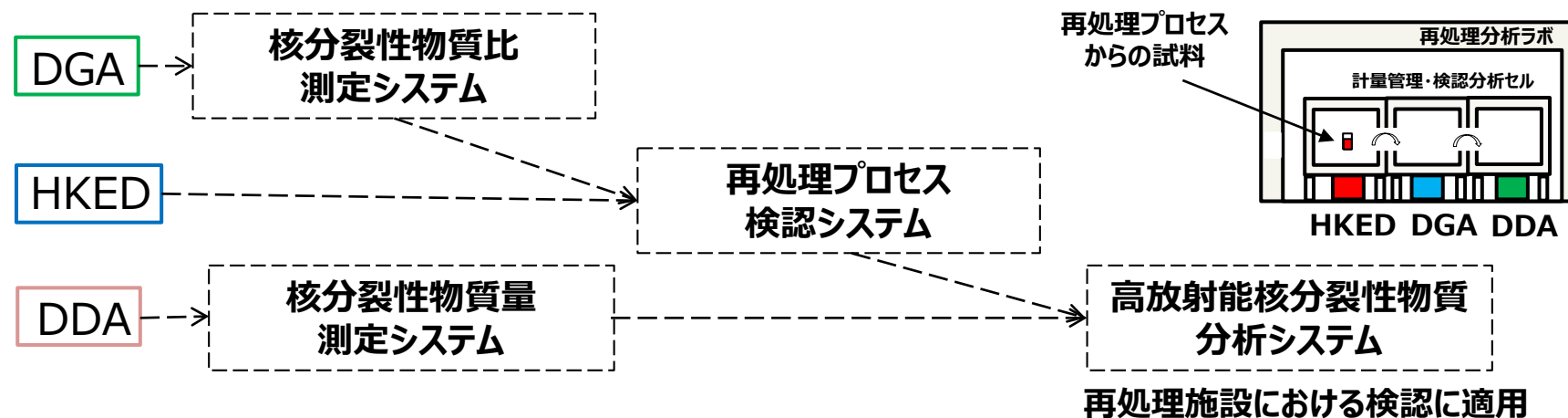
	現状	今後
DDA	・試料中の2mgのPu-239の検知できることを確認 ・放射能を含む試料を測定できるシステムを開発中	・再処理施設などで採取される試料中の核物質量の非破壊測定への適用技術開発を進める (単独、DDA+DGA、HKED+DDA+DGA)
PGA	・爆発物・毒物、中性子毒に含まれる元素分析ができることを確認 ・高感度化するため、よりバックグラウンドを低減するための測定システムを開発中	・統合装置を用いた高感度化、小型化の開発を進め、可搬装置を開発する (単独、DDA+PGA)

HKED: Hybrid K-edge Densitometer

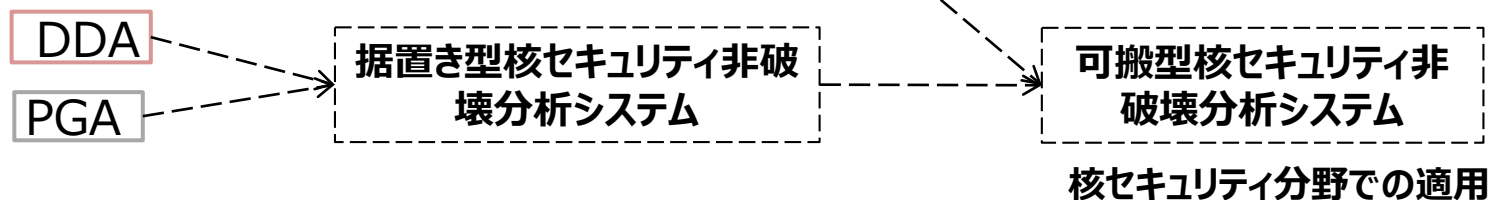
現状と今後について

	現状	今後
DGA	・JRC (Ispra) のPUNITAを用い、U-235,Pu-239試料からの高エネルギー遅発ガンマ線が測定できることを確認 ・Cf-252線源を用いた小型の試験装置でも遅発ガンマ線が測定できることを確認。 ・小型装置開発のための設計・要素基礎試験を実施中	・放射能を含む試料を測定できるシステムの開発 ・Pu-241を含む試料を用い適用性確認 ・標準試料を用いたガンマ線感度測定とそれによる核データへのフィードバック ・再処理施設小型試験装置の開発 (DDA+DGA、HKED+DDA+DGA) ・対IAEA保障措置支援計画(JASPAS)のタスクとしてIAEAの検認技術改良を支援 (ユーラトムとの共同タスク)
NRTA	・JRC(Geel)のGELINAを用い、高精度核物質試料分析ができることを確認 ・小型NRTA装置 (世界最小) を開発中 ・レーザー駆動中性子源の適用について原理実証研究中	・核燃料試料の簡易分析装置の開発 代替核物質 (NpやAm) を含めた核物質分析に適用 ・短パルス中性子源を用いた高精度核物質分析装置の開発 (次世代炉におけるの非破壊分析に適用)

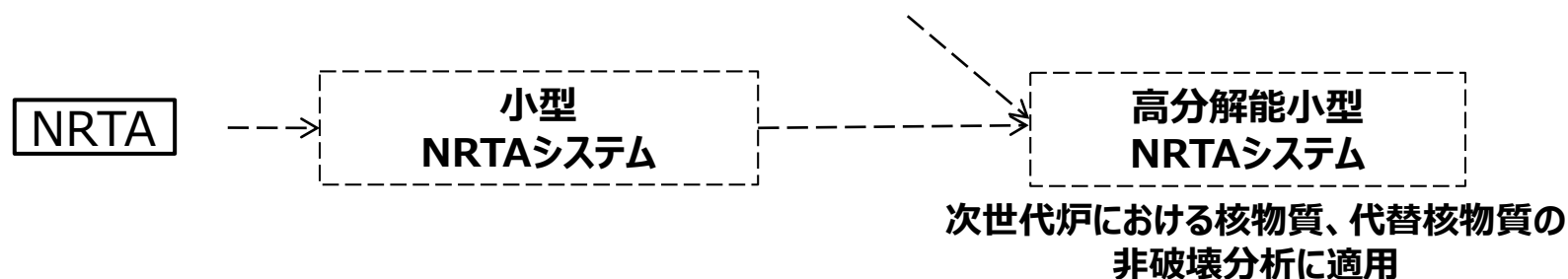
アクティブ中性子NDA技術開発の将来展開



可搬型中性子源



短パルス高強度中性子源



3. 放射線イメージングを用いた広域かつ迅速な 核・放射性物質検知技術開発（計画中）

大規模イベントなどにおける核セキュリティ強化のため、広いエリアをモニターするための、放射線イメージング等、核・放射性物質の検知技術を開発する。

実施担当予定：ISCN、廃炉国際共同研究センター

3. 放射線イメージングを用いた広域かつ 迅速な核・放射性物質検知技術開発

概要

- 大規模イベントや大型商業施設等における核物質や放射性物質を使用したテロ行為の未然防止を目的として、RDD*が使用される前に検知する能力を高める技術開発を行う。
- 福島第一原子力発電所周辺の広域汚染調査技術で使用されたドローン搭載型ガンマカメラ*を基として、検知対象核種の拡大、検出効率の向上を目指す。同時に、特に核物質検知において重要となる中性子の測定およびイメージング技術の開発を行う。

2019年度

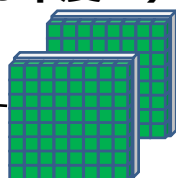
2020年度

2021年度

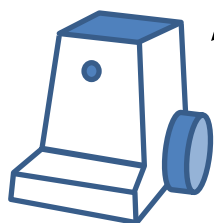
2022年度

2023年度

広域放射性物質探査用ガンマカメラの開発 (2020年度～)



多核種対応・
高効率ガンマ
カメラ



ドローンや自走式ロ
ボットに搭載する

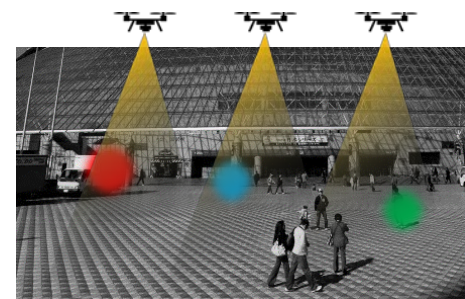
RDDへの使用が想定され
る種々のガンマ線源を迅速
に可視化するカメラの開発



放射性セシウムの3
次元イメージング

核物質探査用中性 子カメラの開発 (2021年度～)

より危険度の高い、中性子
線源や核物質の検知のため
の中性子カメラを開発する



大規模イベントや大型商業施設等における
核物質や放射性物質の検知能力の向上

*RDD(Radiological Dispersal Device)：放射性物質をまき
散らす爆弾や散布装置など。

*ガンマカメラ：ガンマ線を放出する放射性物質を可視化するカメラ。

実施内容(計画)

- CLADSの開発したガンマ線カメラをベースにして、安価で、検出効率の高い装置を開発
- ドローンや自走ロボットへの搭載・運用を検討
- スポットかつ移動する線源を想定し、ガンマ線源、中性子線源の方向を検出する装置開発も並行して進める
- 中性子カメラの要素技術開発を開始
- 他の検出器（モニタリングポストなど）との連携を検討

CLADS：廃炉国際共同研究センター

基礎技術開発を進めるとともに、実用化に向けた意見交換しながら開発を進めていく予定。

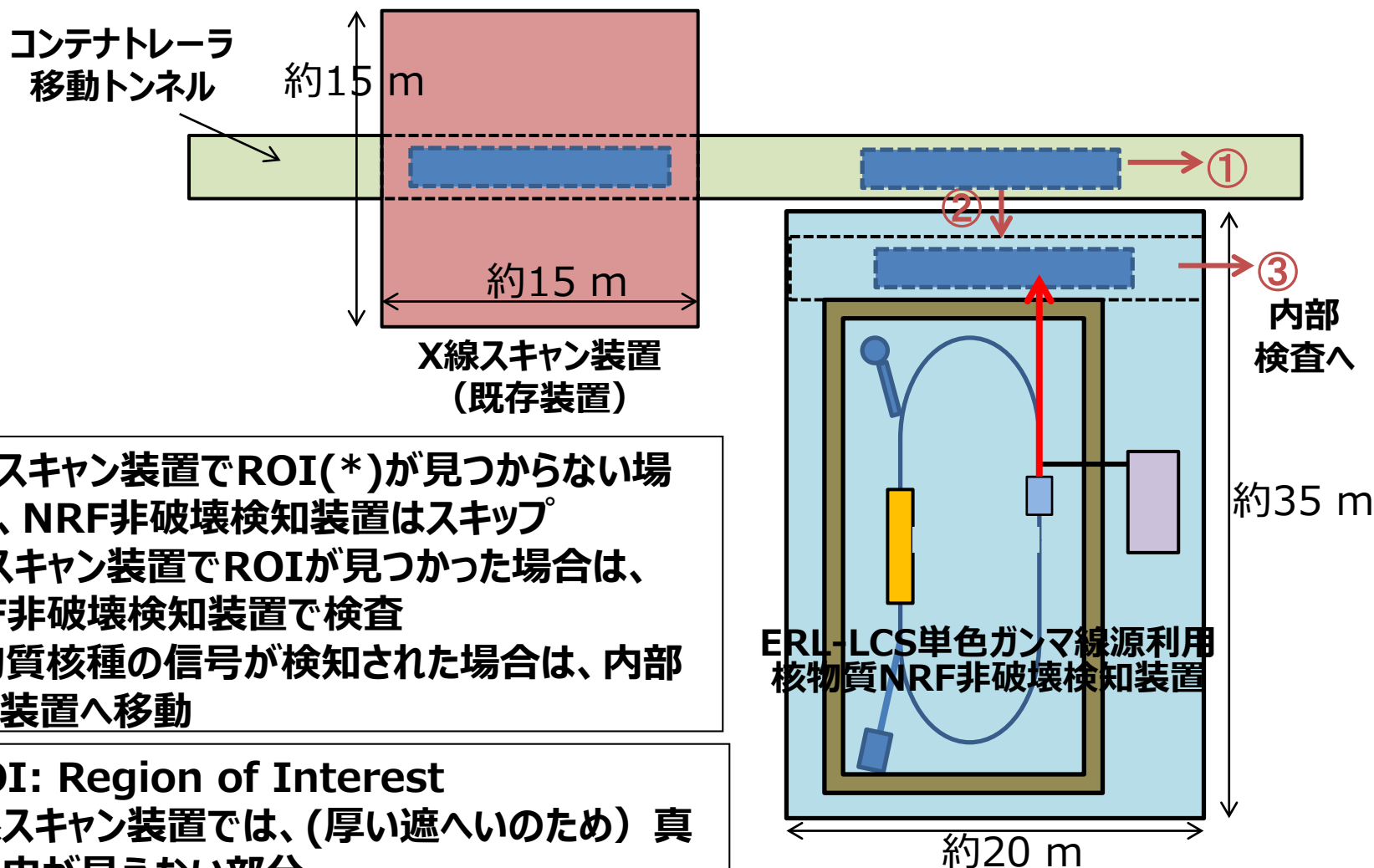
警備当局等のユーザーの意見を取り入れた開発：

- ・テロ事象後の処理にも有用なシステム
- ・国産・日本語システム、人員配置が分からないように独立したデータ情報管理システムが望ましい

參考資料

ERL-LCS単色ガンマ線利用NRF核物質非破壊検知装置

港湾での設置案（既存のX線スキャン装置と組合せ）



- ① X線スキャン装置でROI(*)が見つからない場合は、NRF非破壊検知装置はスキップ
- ② X線スキャン装置でROIが見つかった場合は、NRF非破壊検知装置で検査
- ③ 核物質核種の信号が検知された場合は、内部検査装置へ移動

(*)ROI: Region of Interest
X線スキャン装置では、(厚い遮へいのため) 真黒で中が見えない部分

破壊分析と非破壊分析

破壊分析 Destructive Analysis(*) (DA)	取得したサンプルに化学的な処理（破壊処理）を加え分析する。 ⇒核物質の施設計量管理の基礎分析手法であるとともに、査察側からは施設計量管理の適正さの検証に使われる。（核鑑識でも使われる。） ・高精度 ・長時間の分析 ・代表性の高い試料を採取する必要
非破壊分析 Non-destructive Assay(*) (NDA)	取得したサンプルあるいは核物質アイテムそのものを、そのままの状態（破壊せずに）測定を行う。 ⇒主として、査察時量的検認の手段として使われる。 ・（一般的には）精度は、DAより落ちる ・短時間での測定 ・対象物の取扱いが容易

(*) IAEA発行のSafeguards Glossaryより

アクティブNDA技術の組合せ

組み合わせ	測定値	決定できる核種量など
DDA + DGA	DDA: 核分裂性核種加重和 + DGA: 核分裂性核種比	各核分裂性核種量 (U-235, Pu-239, Pu-241)
HKED+DDA+DGA	HKED: U, Pu元素量 + DDA: 核分裂性核種量加重和 + DGA: 核分裂性核種比	U: U-235及び(U-238+他) Pu: Pu-239, Pu-241 及び (Pu-238+Pu-240+Pu-242)
HKED+DGA	HKED: U, Pu元素量 + DGA: 核分裂性核種比	核分裂性核種比 (U-235/Pu-239/ Pu-241) ⇒再処理プロセスの入量計量などの検認 等を利用
NRTA (10- μ s*)	核種量(数核種)	U: U-238 Pu: Pu-239, Pu-240, Pu-242
NRTA (10- μ s*) + DGA	NRTA: 核種量 (数核種) DGA: 核分裂性核種比	U: U-235, U-238 Pu: Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242
DDA + PGA	DDA: 核分裂性核種加重和 + PGA: 爆発物、化学物質検知	核検知応用

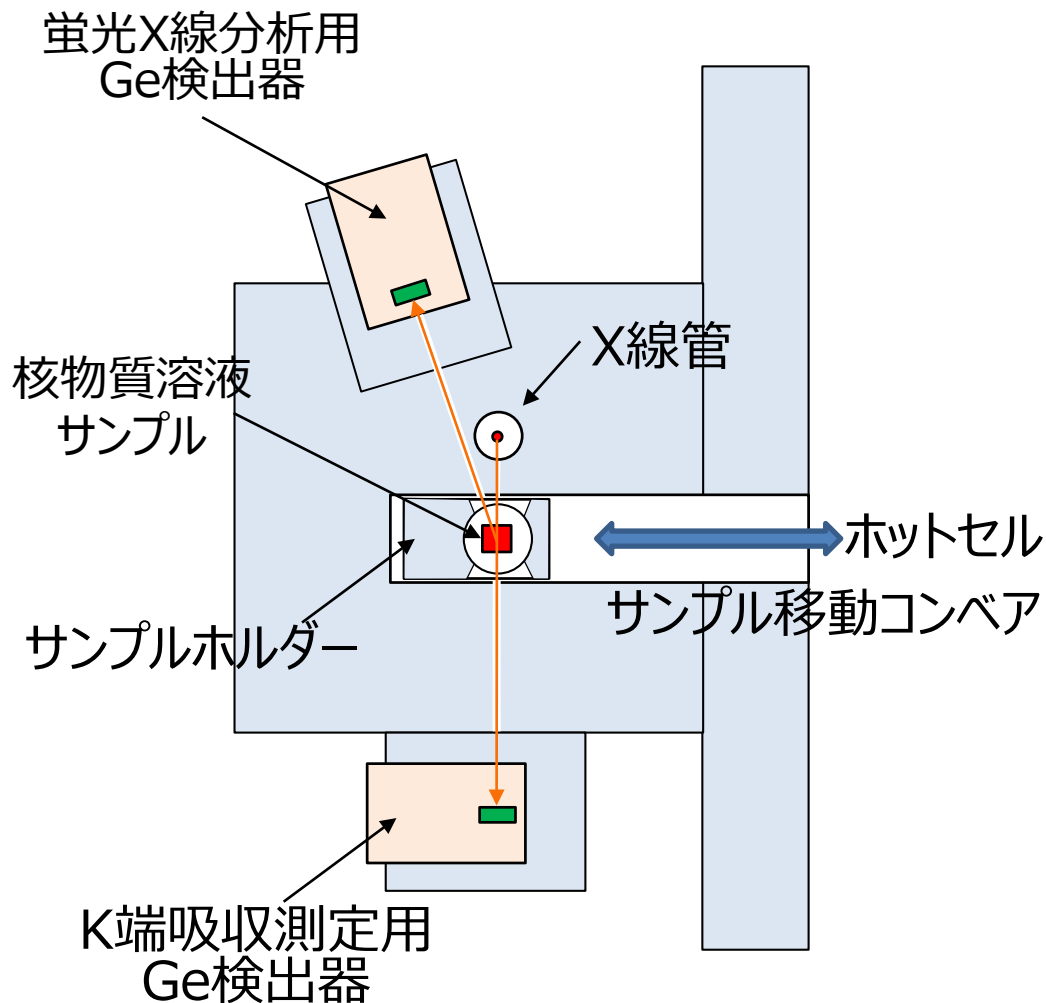
* : パルス中性子源のパルス幅

HKED (Hybrid K-Edge Densitometer): 溶液中のU及びPu元素濃度の分析 (既存技術)

なお、NRTAは溶液試料の測定には適していない

HKED (Hybrid K-Edge) (既存技術)

概念図



ハイブリッドK-エッジ法

- X線照射によるウランK端吸収と蛍光X線分析を組み合わせた、溶液試料中のウラン及びプルトニウム元素量を非破壊にて測定する技術である。

- (濃度の高い) ウラン濃度をウランK端吸収測定で求め、蛍光X線分析でのプルトニウム量とウラン量の比を用いて、プルトニウム濃度を求める。

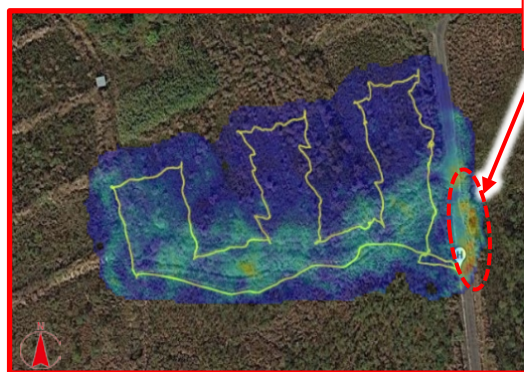
コンプトンカメラの核セキュリティへの適用

コンプトンカメラ搭載ドローンによる広域イメージング

(株)千代田テクノルと共同開発



コンプトンカメラ



高線量率箇所

- > 30 μ Sv/h
- 20 μ Sv/h
~30 μ Sv/h
- 10 μ Sv/h
~20 μ Sv/h
- < 10 μ Sv/h

コンプトンカメラ搭載ドローンによる放射性物質分布 + 航空写真

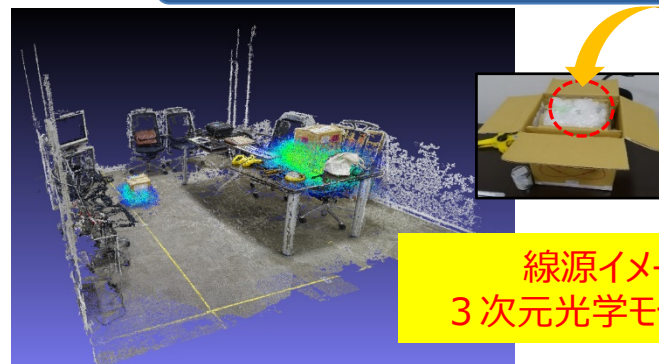
撮影に掛かった時間：約20分

測定エリア：約7000 m²

遠隔にて、短時間で、広範囲エリアにおける
放射性物質の分布を可視化することに成功

(JAEA-CLADS)

線源の3次元イメージング



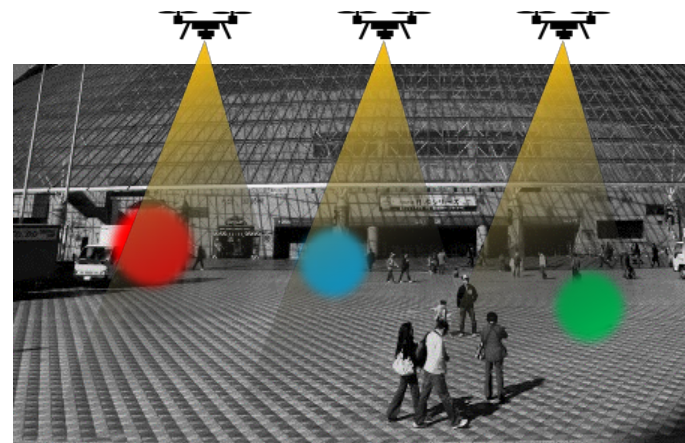
¹³⁷Cs

線源イメージを
3次元光学モデルに統合

(JAEA-

コンプトンカメラを用いた多視点測定による 放射性物質の3次元可視化

核セキュリティへの適用



※図は測定のイメージです。

ドローンや車両搭載型イメージャーのネットワークによる広域
連携測定により、大規模イベント時の放射性物質分布を3
次元的に把握