

令和4年度の成果と次年度以降の計画

—技術開発—

2023年3月3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）

令和4年度第2回核不拡散科学技術フォーラム

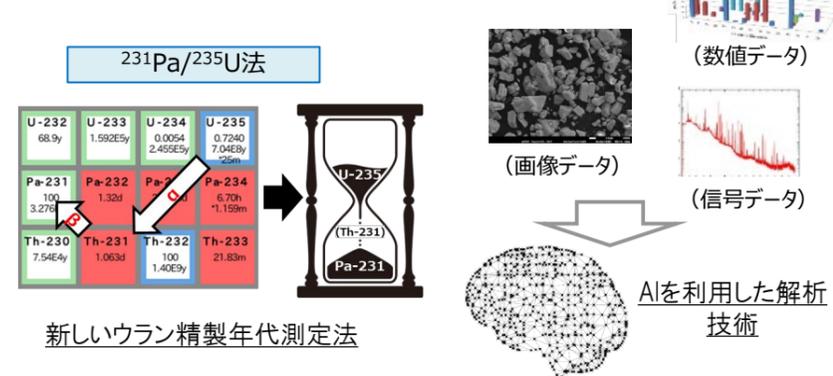
主な技術開発

核セキュリティ技術開発

核鑑識技術開発

核物質の不法取引等の現場から警察当局に押収された核物質や、核・放射線テロの発生現場で採取された核物質・汚染試料について、精密な測定により、試料に含まれるウラン・プルトニウム等の同位体比の違いや精製年代を同定し、犯罪行為に使用された当該物質の由来の特定を可能とする技術開発を日米欧の協力の下実施する。

【核鑑識技術例】



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

核燃料サイクル施設に対する核セキュリティ上の3つの脅威である、核爆発装置（NED）を目的とした盗取、放射性物質の飛散装置（RDD）を目的とした盗取、妨害破壊行為（sabotage）について、核燃料サイクル施設に存在する核・放射性物質及びそのプロセスの魅力度も評価する手法開発等を日米の協力の下で実施する。また、評価手法の開発に加えて、魅力度を削減する概念と技術を開発する。脆弱性対策や核物質防護措置の適正化への応用に期待できる。

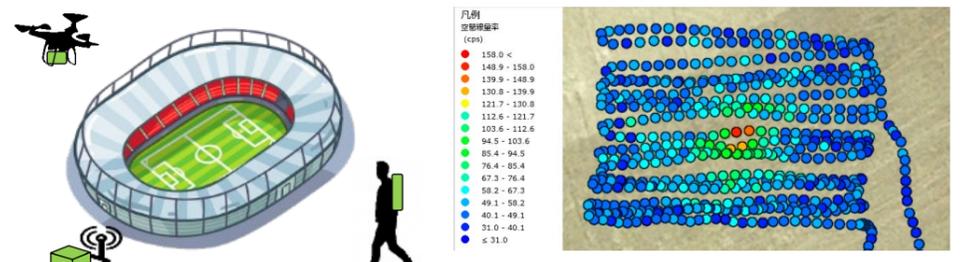


注：②～④が対象

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

広域かつ迅速な核・放射性物質検知技術開発

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のため、広範囲での迅速な核物質、放射性物質の検知能力を高める必要がある。本研究では、ガンマ線検出器、中性子検出器、ガンマ線カメラなどを用いた放射線計測技術、放射能マッピング技術、及び放射線イメージング技術の開発を行う。



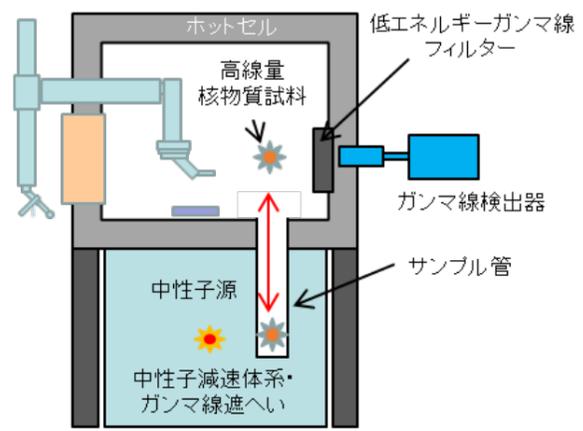
放射線源探知試験
(線源は18X30mの領域の中央)

ガンマ線検出器、中性子検出器、放射線イメージング技術を用いて核物質や放射性物質を広域かつ迅速に検知する能力を向上

核不拡散技術開発

(実装型遅発ガンマ線分析非破壊測定システム開発)

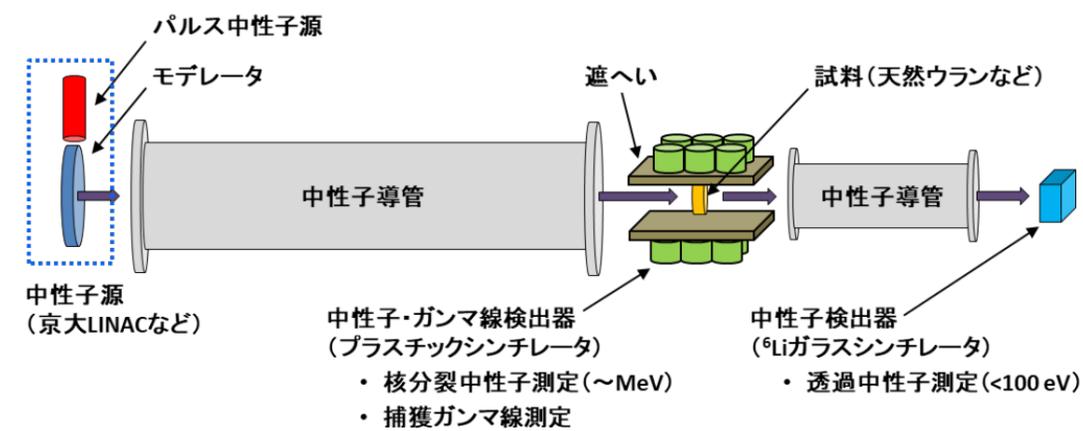
使用済み核燃料溶解液など、高線量核物質含有物中の核分裂性核種比を測定するための非破壊（NDA）測定システムをシミュレーションをベースとして設計する。シミュレーションの妥当性検証を日欧協力で進行。今フェーズでは実装型として小型化等を目指した開発を行う。



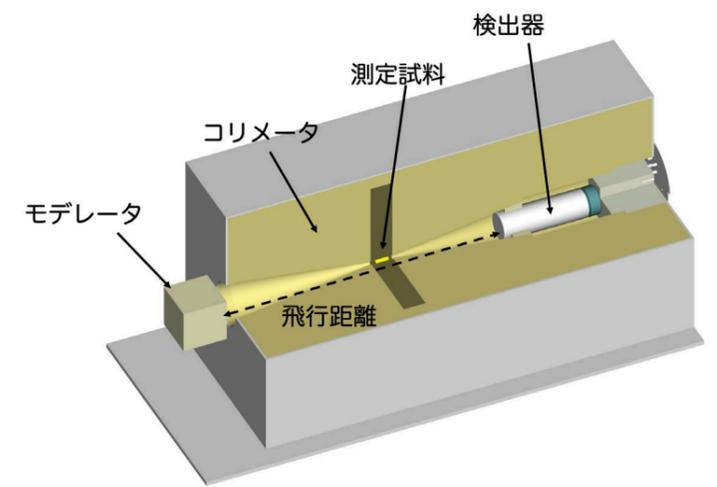
ホットセルに装着した実装型遅発ガンマ線分析非破壊測定システム
(イメージ図)

(中性子共鳴非破壊分析技術の開発)

これまで培ってきたアクティブ中性子非破壊測定技術を基に、中性子共鳴核分裂中性子分析（NRFNA）技術を新たに提案、開発し、試料中に少量含まれる核分裂性物質の分析能力向上を目指す。また、小型で設置および取り扱いが容易な装置を目指し、Cf線源を用いた卓上型NRTA装置の開発を行う。



中性子共鳴分析装置 (イメージ図)

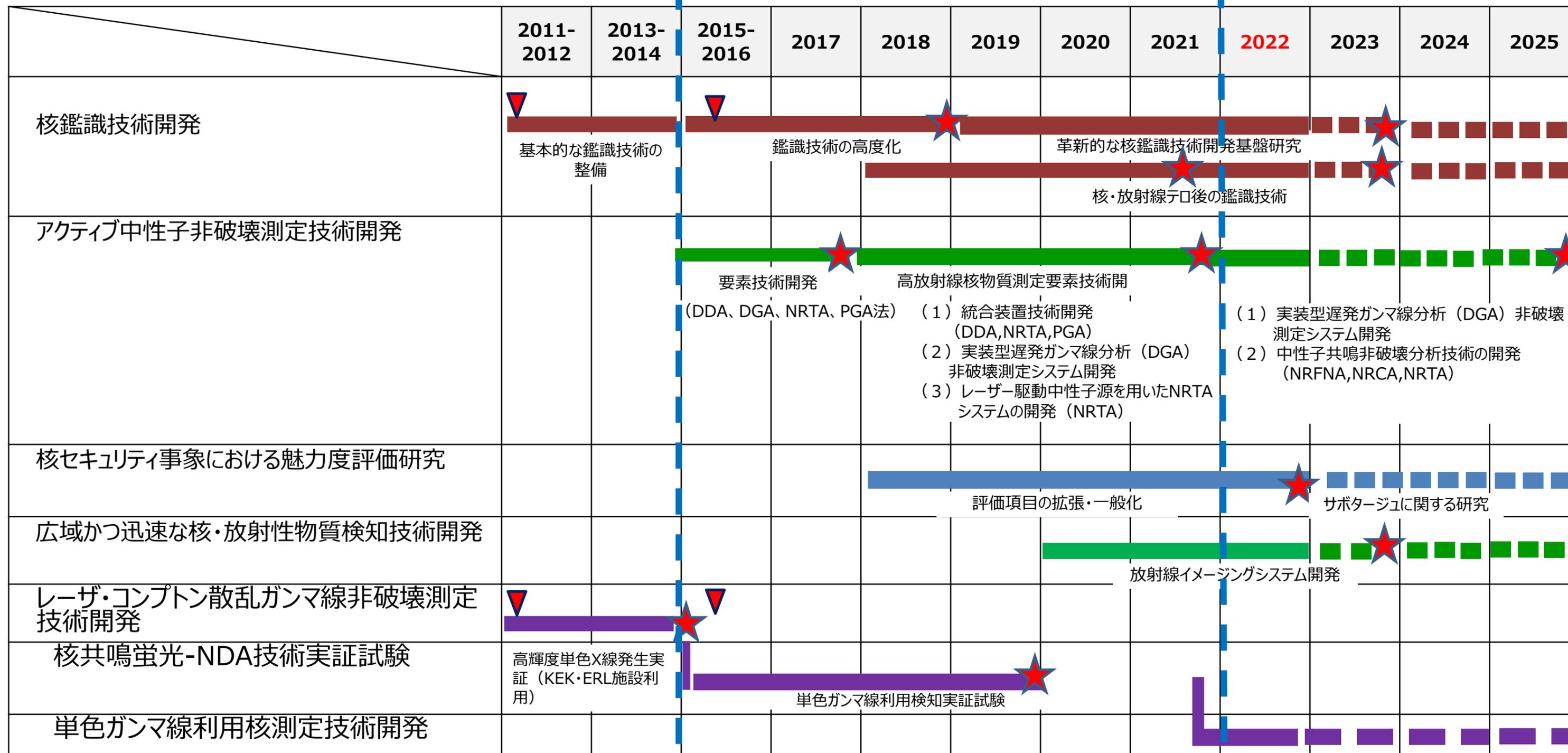


卓上型NRTA装置 (イメージ図)

主な技術開発のロードマップ

第3期中長期計画

第4期中長期計画



▼ 原子力科学技術委員会による評価

★ ワークショップ、チェックレビュー会合、技術会合、実証実験などによる成果発表

R4年度における主な成果

核鑑識技術開発

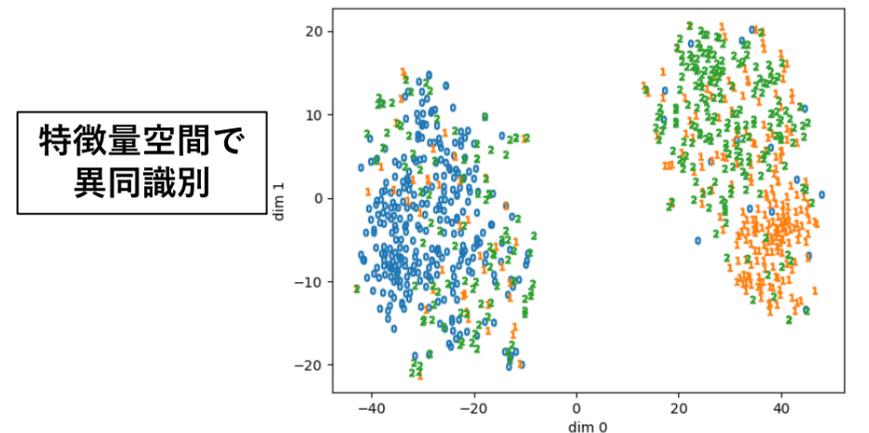
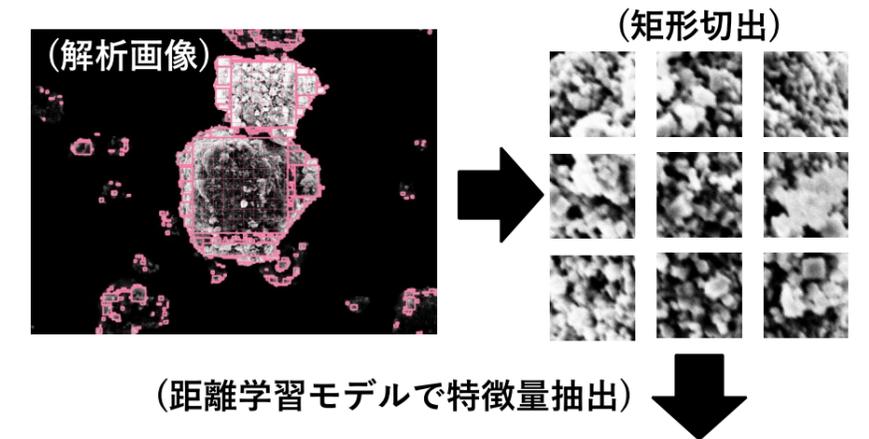
- DOE協力
 - ✓ 粒子形状解析のための画像解析ソフトウェア（独自開発）について、米国ロスアラモス国立研究所（LANL）開発ソフトウェアとの性能比較評価の成果を発表。
 - ✓ ウラン鉱石・ウラン精鉱の核鑑識シグネチャ及びその分析法に関する共同研究（ISCN, 人形峠環境技術センター, LANL, ローレンスリバモア国立研究所（LLNL））において、人形峠産を含むJAEA保有のウラン精鉱を共同分析試料として提供、ストロンチウム同位体比分析手法に関する技術会合を開催。
- 核鑑識国際技術ワーキンググループ（NF-ITWG）主催の第7回共同試料分析（CMX-7）の分析結果をデータレビュー会合で報告し、機構が高い技術レベルを有することを実証。

核鑑識の社会実装に向けた技術開発

- 深層距離学習モデルを用いた顕微鏡画像解析による核物質表面パターン解析技術について、高い性能で試料識別が可能であることを確認。AIによる解析結果の解釈支援技術として深層距離学習モデルの判断根拠可視化技術を開発。
- 金沢大学との共同研究としてアルファ線スペクトロメトリによるウラン年代測定技術開発に着手。

テロ発生後の核鑑識技術開発

- 警察等からのニーズを踏まえた核種判定技術の開発を進め、複数の低コスト小型検出器を使用したハイブリッド型放射線測定システムや機械学習を応用した核種判定技術などの成果を公開、テロ対策特別装備展（SEECAT2022）に出展。



深層距離学習モデルによる表面パターン解析

⇒R5年度は上記の技術開発を継続するとともに、成果取りまとめと公開を進める。

R4年度における主な成果

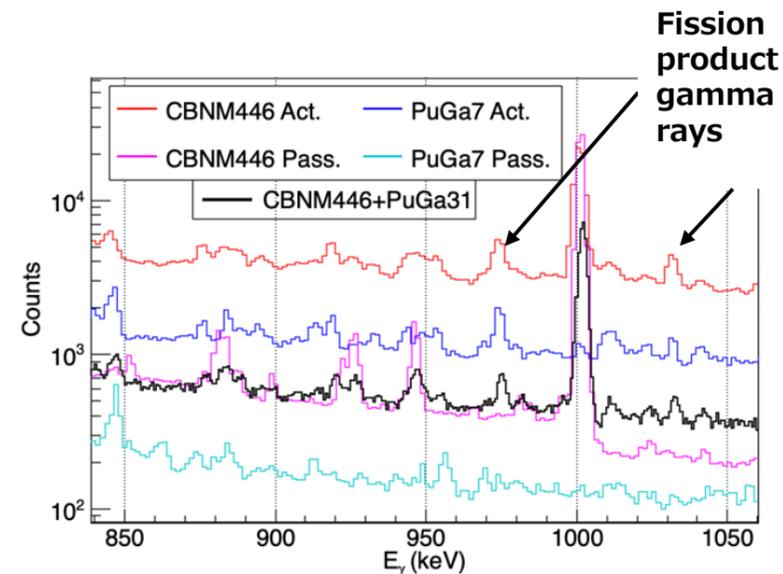
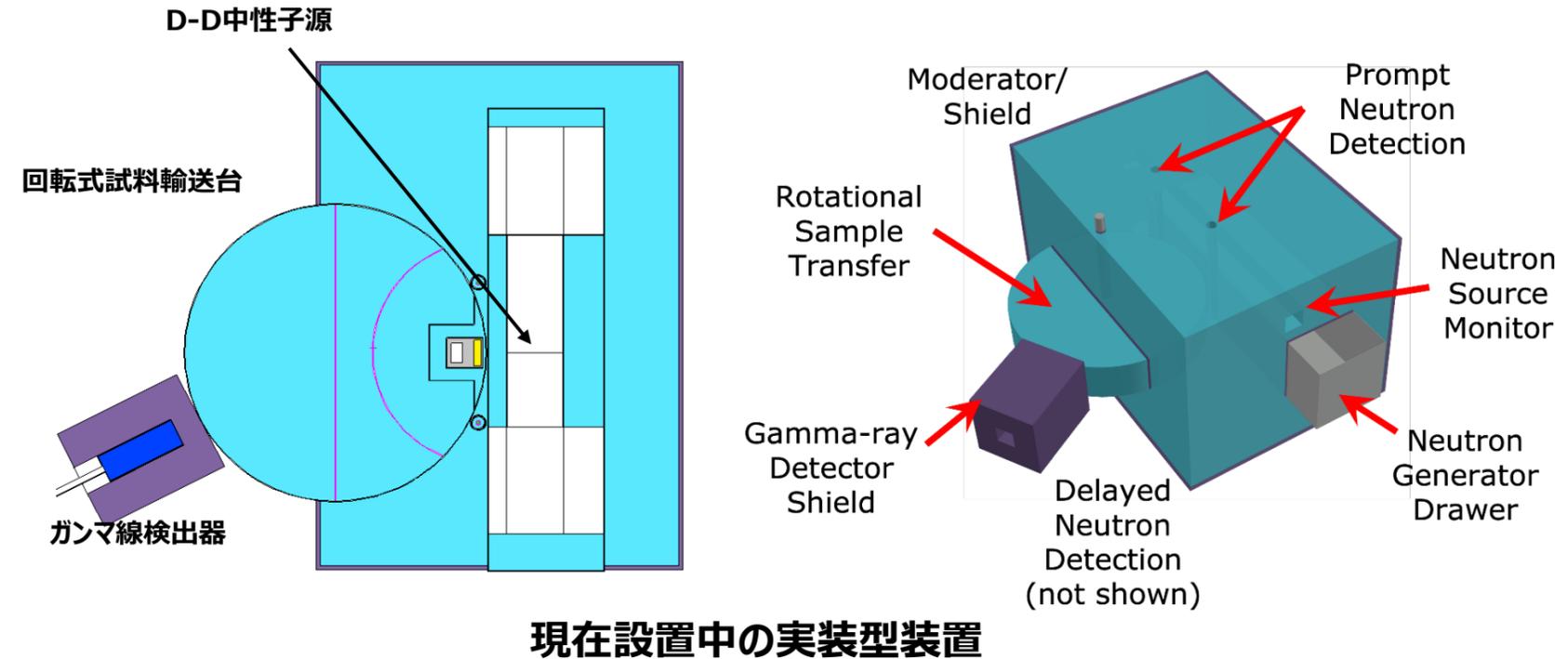
アクティブ中性子非破壊測定技術開発 (1) 実装型遅発ガンマ線分析 (DGA) 非破壊測定システム開発

- これまでの技術開発成果から実装型の非破壊測定システムを設計、設置 (本年度中)
 - D-D中性子源を用い、システム全体を小型化。
 - 遅発ガンマ線と遅発・即発中性子を用いた核分裂性物質分析の高度化
 - これまでの成果を設計に反映。許認可等の手続き実施

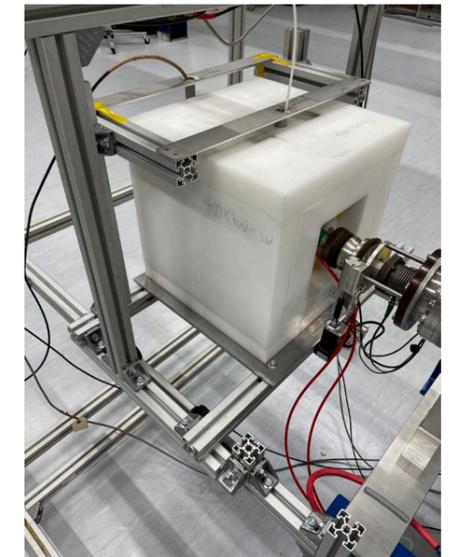
現在、装置設置中。R5年度より本格的な試験開始。

- コロナ禍以降、初の試験をEC-JRC-Ispla (イタリア) 及びGeel (ベルギー) にて実施
 - Ispla : U-235/Pu-239を用い、組成及び量の相関関係を評価
 - Geel : MONNETタンデム加速器を用いて減速材に関する試験を実施。シミュレーション結果と比較することにより、装置設計に反映

R5年度は試験データの評価、成果の公開を進める。



EC/JRC-IsplaにおけるPu/U測定時のスペクトル。比較的低いエネルギーにFPからのガンマ線を確認。



EC/JRC-Geel MONNET tandem acceleratorを使用した減速材評価試験

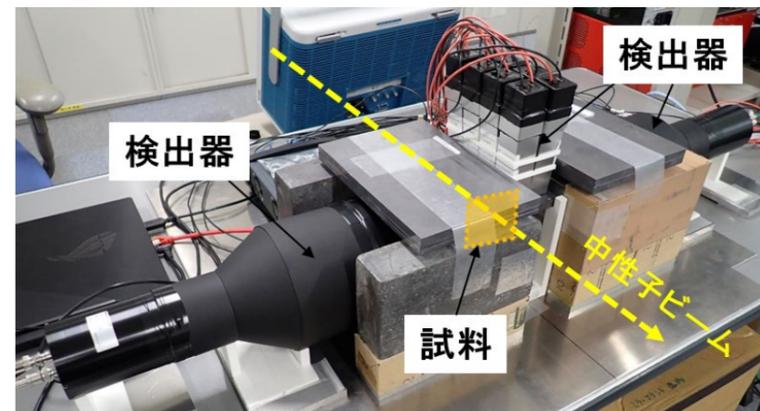
R4年度における主な成果

アクティブ中性子非破壊測定技術開発 (2) 中性子共鳴非破壊分析技術開発 NRFNA技術開発

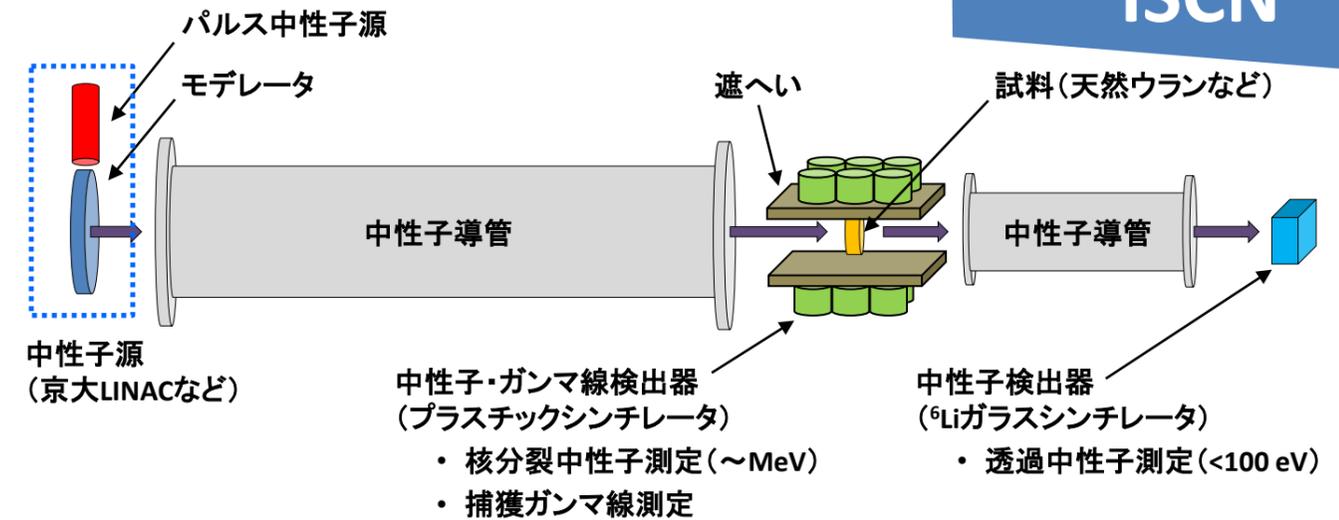
- 次世代施設における高線量試料（固体）中の核物質を非破壊で測定する新しい技術として開発を開始。
- 核分裂中性子、捕獲ガンマ線及び透過中性子測定を組み合わせた複合装置のシステム設計および相補的な分析手法の概念検討を完了。
- 京大複合研のパルス中性子源と天然ウランを用いたNRFNA実験により、高速中性子とガンマ線を弁別しながらエネルギースペクトルを取得することに成功。天然ウラン中の²³⁵U（存在比0.72%）のように試料中に少量含まれる核分裂性物質の分析能力向上が可能となる見込みを得た。

R5年度の計画

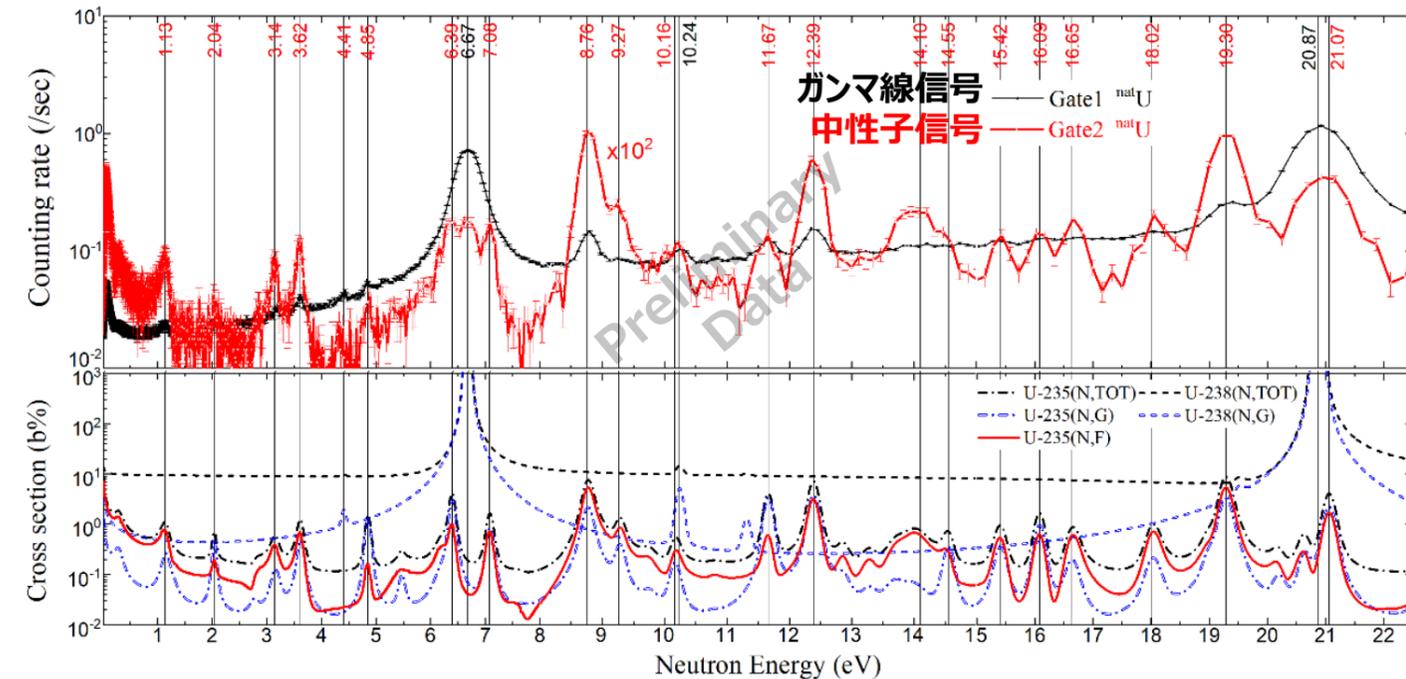
- R4年度末に京都大学で実施した実験データの解析を行い、高速中性子を高効率かつ低バックグラウンドで測定する検出器および波形弁別技術の開発を進める。
- 試料中の²³⁵Uの定量を目指し、NRFNAとNRTAで得られたスペクトルを相補的に解析する技術の開発を進める。



核分裂中性子検出システム



NRA (NRFNA+NRCA+NRTA) 複合装置概念図



NRFNA実験で取得したスペクトル

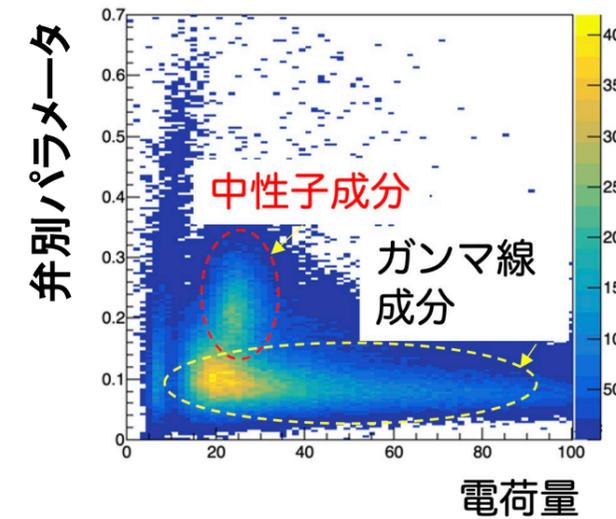
[上図] プラスチックシンチレータで測定した信号を波形弁別することで、線種別（中性子：赤線、ガンマ線：黒線）にエネルギースペクトルを示したもの。
 [下図] 天然ウラン中の²³⁵Uと²³⁸Uの核反応確率(b%)を示したもの。
 上図の中性子信号（赤線）において、²³⁵U (N,F)に特徴的なピークが検出されていることから、天然ウラン中に少量(0.72%)存在する²³⁵Uの核分裂により発生した高速中性子の検知に成功したことがわかる。

R4年度における主な成果

卓上型NRTA装置開発

- 小型で設置および取り扱いが容易な装置を目指し、Cf線源を中性子源とする卓上型NRTA装置の開発を開始。
- 装置設計のためのシミュレーション、透過中性子を検出する検出器の試験を進めた。

R5年度は、これらの成果を受け、本格的に実証装置開発を進める。



Li入り波形弁別型シンチレーターで、中性子をガンマ線と区別して測定できることを確認した。

レーザー駆動中性子源を用いたNRTA技術開発

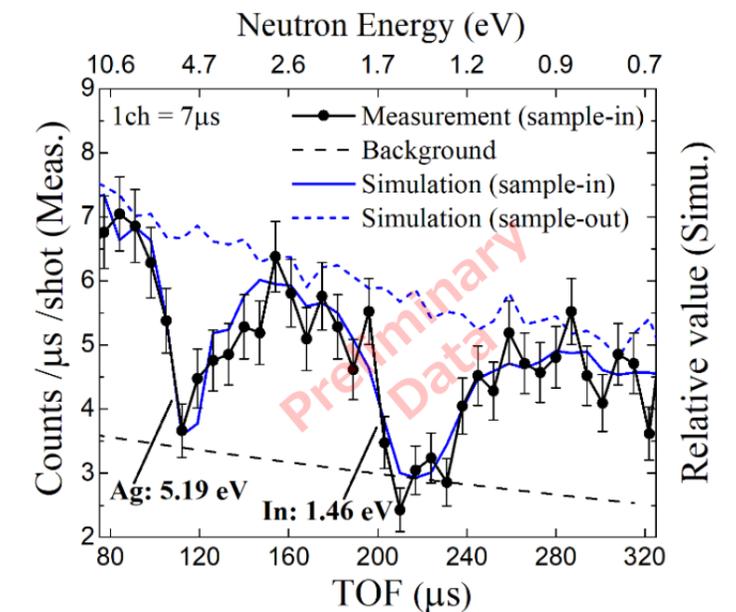
(研究は昨年度までに実施、今年度は成果発表のみ)

- 本研究の要素技術として開発した中性子検出器を海外（米・英）で特許出願した。
- 共同研究者（阪大）の論文（JAEA共著）がPhysical Review X※に掲載された。（プレスリリース）

※アメリカ物理学会が発行する物理学の専門誌としては最も権威がある学術雑誌



特許出願した積層型中性子検出器



阪大レーザー研のLDNSを用いたNRTA実験で取得したスペクトル

R4年度における主な成果

広域かつ迅速な核・放射性物質検知技術開発

- 慣性計測装置及び深度カメラを用いた2次元SLAM技術と可搬型放射線検出器を組み合わせ、屋内の放射線マッピングのための装置を開発した。
- 高エネルギーガンマ線に対応したガンマ線カメラ試験装置を用いてCo-60線源のイメージング試験を実施した。
- 中性子線源をより迅速に見つけ出すための装置として、2次元検出器の前面に遮蔽体を設置した体系を考案し、遮蔽体の影から線源方向を推定するための基礎データを取得した。

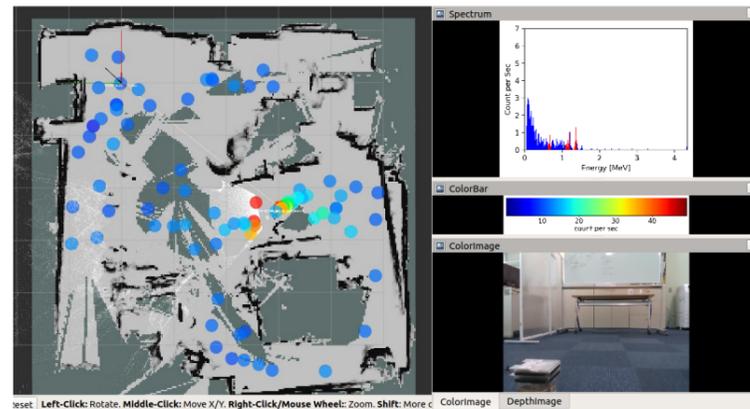
R5年度は、マッピング技術の高度化、ネットワークによる遠隔測定の基本試験を実施するとともに、装置の可搬化、統合化を進め、性能評価試験を行う。



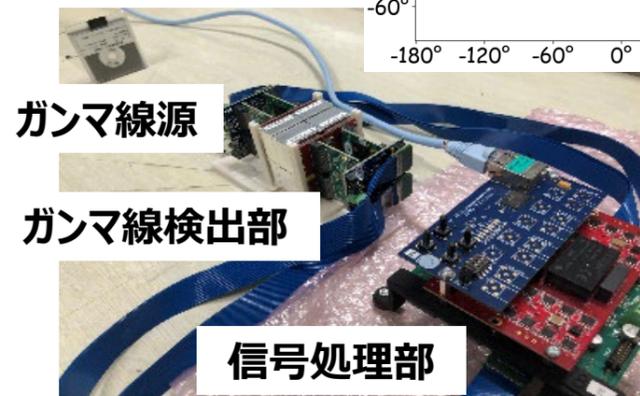
2次元SLAM用センサ



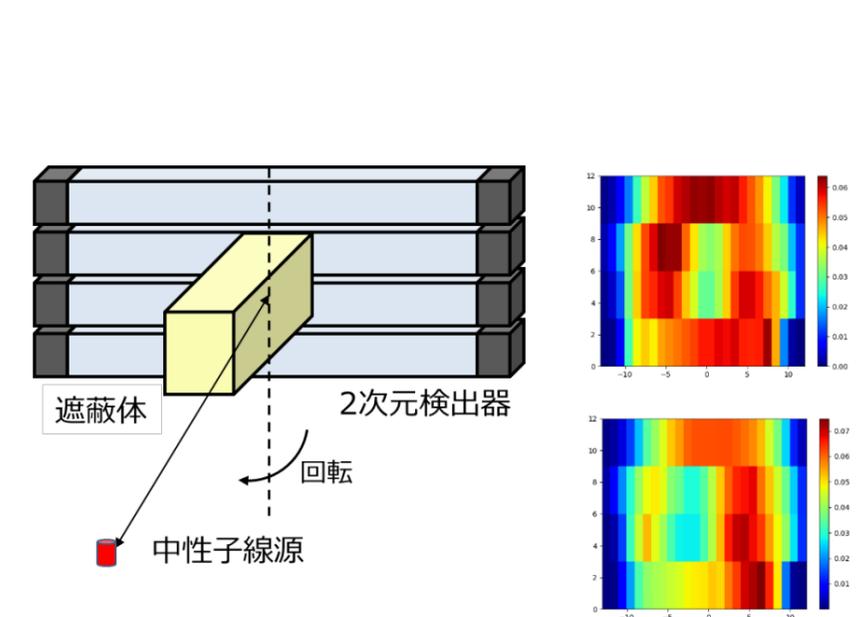
放射線検出器



屋内放射線マッピングの例



ガンマ線イメージング試験の様子

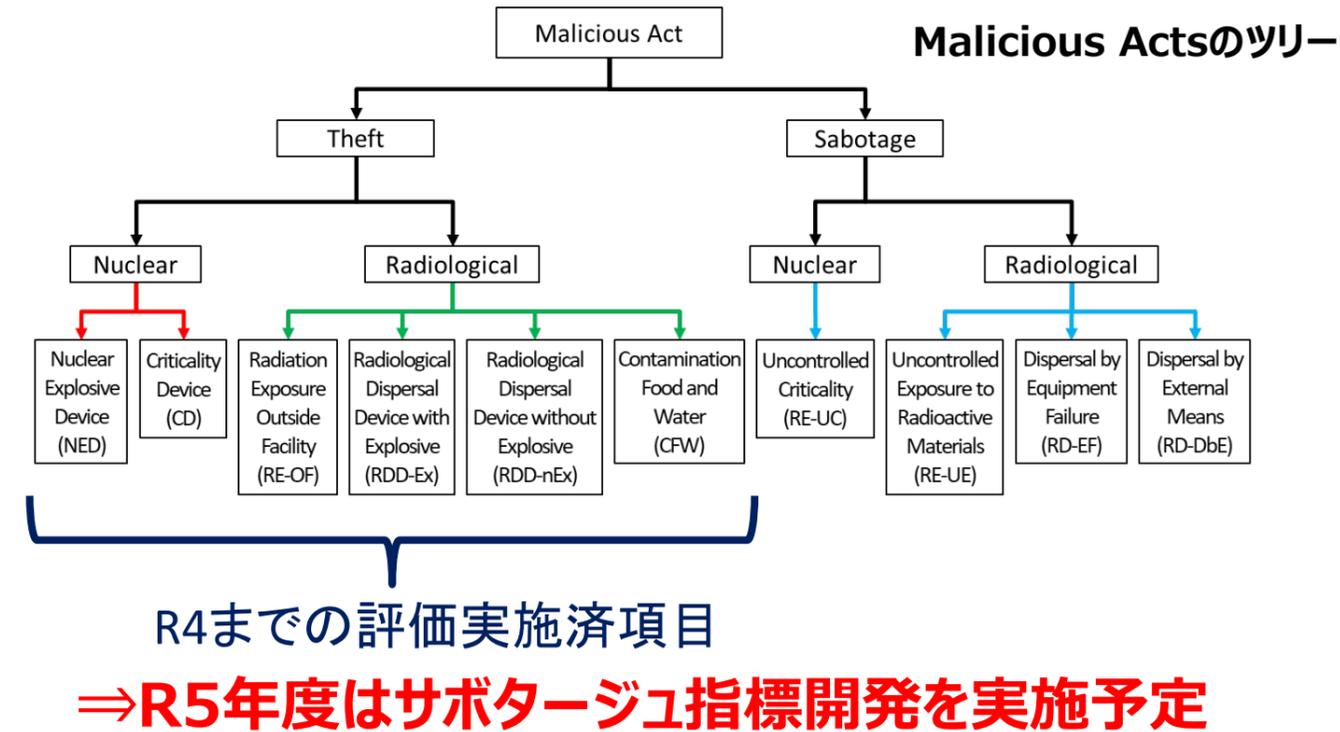


2次元検出器前面に設置した遮蔽体の影が変化する様子

R4年度における主な成果

魅力度評価研究

- DOE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（平成29年度～）。
- R4年度は開発した評価手法を様々なテロ行為に適用し、テロ後の結果を包括的に比較。
- テロ行為の分析と結果から、総合的な盗取に係る物質の魅力度を評価
- 得られた知見を盗取に係る最終報告書として取りまとめた。



その他の技術開発

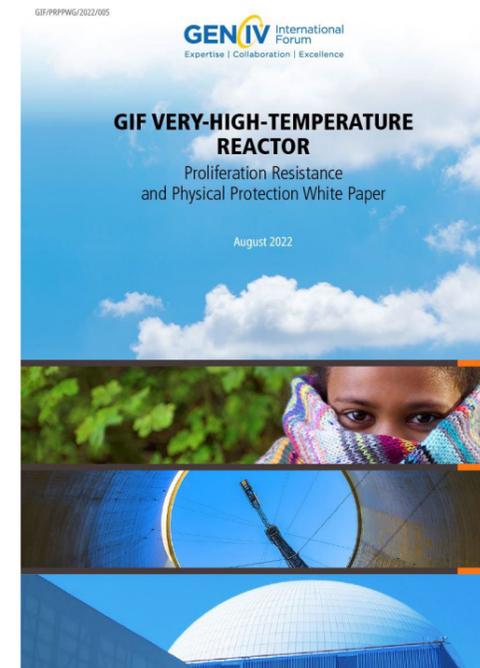
核拡散抵抗性技術開発

第4世代原子力システム国際フォーラムの核拡散抵抗性及び核物質防護評価手法作業部会(PRPP WG)の活動に参加し、高温ガス炉を対象としたPRPP白書の執筆を担当するなど国際的な貢献を行った。

レーザーコンプトン散乱ガンマ線非破壊測定技術開発

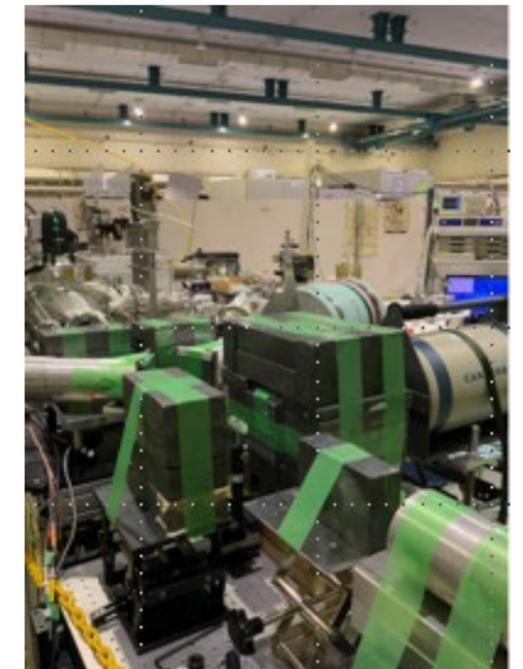
単色ガンマ線利用核測定技術開発

- ガンマ線を用いた非破壊測定法。核物質の定量や隠匿核物質等の検知に応用可能。
- 分子研UVSOR施設及び兵庫県立大学NewSUBARU施設において試験を実施。R5年度は継続して試験を実施するとともに試験結果の解析を行う。



VHTR白書

(GEN IVウェブサイト公開中)



NRF試験@分子研

R4年度における主な成果

包括的核実験禁止条約（CTBT）に係る国際検証体制への貢献

CTBT国際監視制度施設の暫定運用

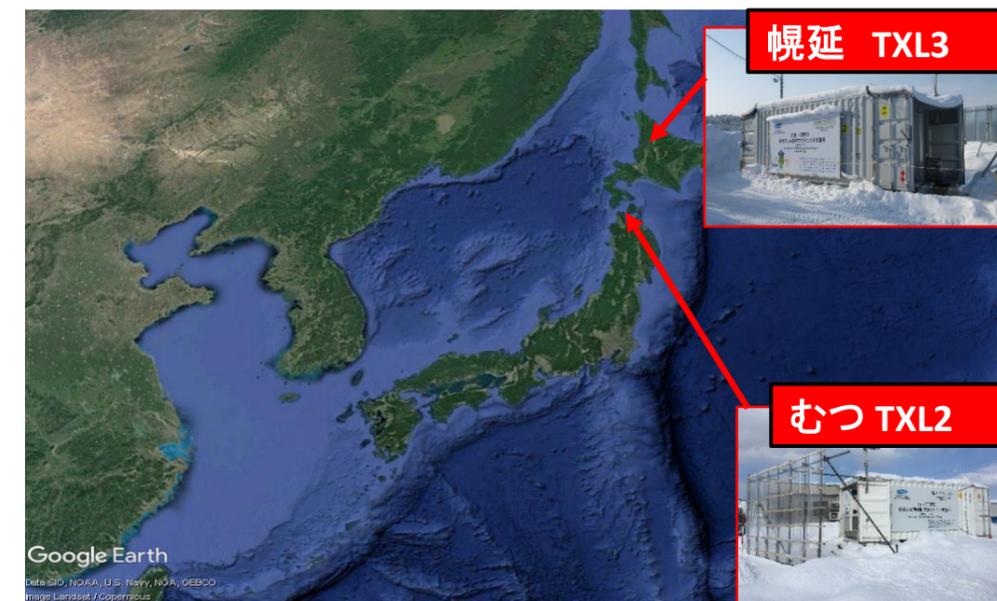
- CTBT国際監視制度施設（高崎、沖縄及び東海）の安定的な暫定運用を継続。
- 東海公認実験施設は、CTBTOからサーベイランス審査を受け、手順書等への是正事項を条件に認証を維持。また、CTBTOが実施する国際技能試験2022に参加し最高評価（A）を得て、高い分析能力をもって観測所試料の依頼分析を実施。

放射性核種に係る検証技術開発

- CTBT国内運用体制に参画して放射性核種に係る国内データセンター（NDC-2）を暫定運用し、希ガス観測データ及び粒子観測データの解析評価を継続。
- ザポリジャ原発への砲撃以降、ウクライナ周辺のCTBT放射性核種監視観測所の監視を実施。
- 検証技術開発の一環として、大気輸送モデル用システムの支援ソフトを開発。

CTBTOとの放射性希ガス共同観測プロジェクト

- 2018年より幌延町とむつ市に移動型希ガス観測装置(TXL)を設置し、CTBTOと希ガス共同観測プロジェクトを実施中。日本を含む東アジア地域における放射性キセノンバックグラウンド挙動の解明に資するデータを取得し、CTBTOの核実験検知能力の強化に貢献。当初、2020年度までの予定が、安定した観測の実績が評価され、今年度まで延長され、更に2024年3月までの観測延長が決定。



移動型希ガス観測装置の配置図