

ISCNにおけるアクティブ中性子 非破壊分析技術開発



2024年1月16日

第1回 原子力委員会定例会議

山口 知輝

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 (JAEA)
核不拡散・核セキュリティ総合支援センター (ISCN) 技術開発推進室

目次

1. ISCN/JAEAの核不拡散・核セキュリティ技術開発
2. アクティブ中性子非破壊分析とは
3. ISCNが行うアクティブ中性子非破壊分析技術開発
4. アクティブ中性子非破壊分析の適用例

1. ISCNの核不拡散・核セキュリティ技術開発

- 2010年の第1回核セキュリティサミットにおける日本声明を受けて、「核検知・核鑑識技術」開発に着手。
文科省原子力科学委員会、核セキュリティ作業部会等での審議を受けて技術開発を実施。
- 原子力科学委員会の中間評価を受け（2015年）、その結果を踏まえ技術開発を展開。以後も、同作業部会での議論を継続。
- 核セキュリティサミット終了（2016年）以後の技術開発課題については、国際機関等のニーズ、核セキュリティ作業部会で議論が行われている俯瞰図、技術シンポジウム・ワークショップで得られた情報等に基づいて、技術開発を展開（2017年6月同作業部会中間とりまとめ）。
- 2018年6月、第16回核不拡散・核セキュリティ作業部会（第16回）において、核不拡散・核セキュリティ総合支援センター（ISCN）の2019年度以降の取組の方向性について了承。

技術開発の基本的な考え方

- JAEA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・ニーズを特定する。
- 国際機関（IAEAの核セキュリティ協調研究プロジェクト（CRP））、国際協力のパートナーであるDOE/NNSA、EC/JRC等の意向を踏まえ、基本的に国際共同研究で進める。

ISCNが実施している主な技術開発

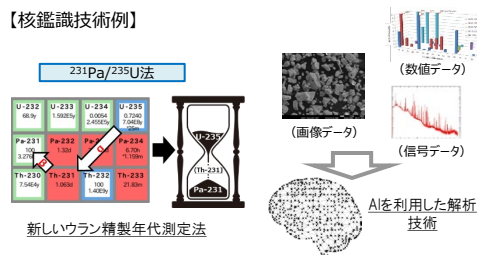
主に文科省核セキュリティ強化等推進事業費補助金にて実施

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】

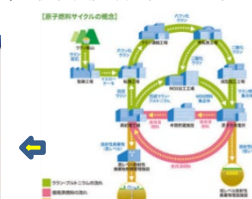


核セキュリティ事象における核物質魅力度評価に係る研究

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。



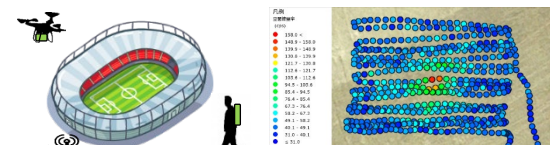
注：②～④が対象



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)

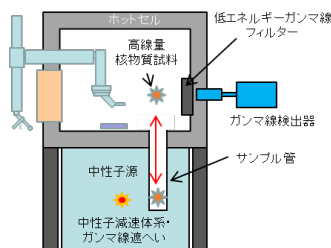
ガンマ線検出器、中性子検出器、放射線イメージング技術を用いて核物質や放射性物質を広域かつ迅速に検知する能力を向上

核不拡散技術開発

アクティブ中性子非破壊分析技術開発

実装型遅発ガンマ線分析非破壊測定システム開発

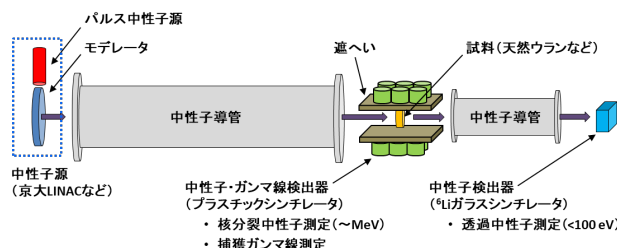
使用済み核燃料溶解液など、高線量核物質含有物中の核分裂性核種比を測定するための非破壊（NDA）測定システムをシミュレーションをベースとして設計する。シミュレーションの妥当性検証を日欧協力で行う。今フェーズでは実装型として小型化等を目指した開発を行う。



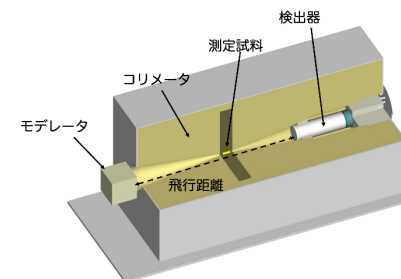
ホットセルに装着した実装型遅発ガンマ線分析非破壊測定システム
(イメージ図)

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、C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）



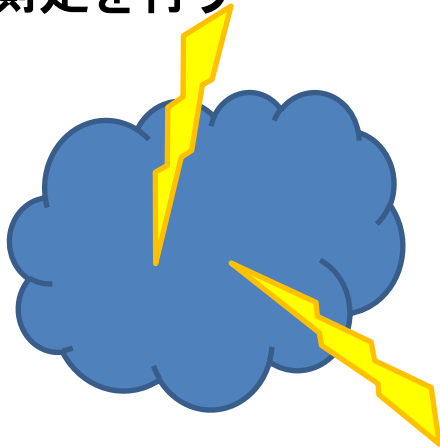
卓上型NRTA装置（イメージ図）

※基礎工センターにて実施

2. アクティブ中性子非破壊分析とは

パッシブNDA法

核物質が自ら発する放射線（中性子、ガンマ線）を利用して測定を行う

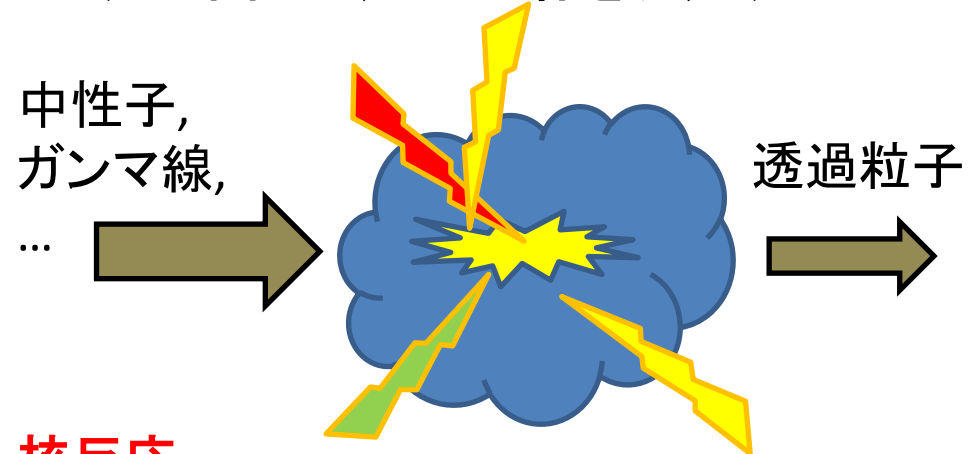


自発核分裂、崩壊

中性子
ガンマ線 ...

アクティブNDA法

核物質に外部より中性子やガンマ線等を照射して新たな反応を起こし、それにより発生する中性子、ガンマ線を測定する



核反応

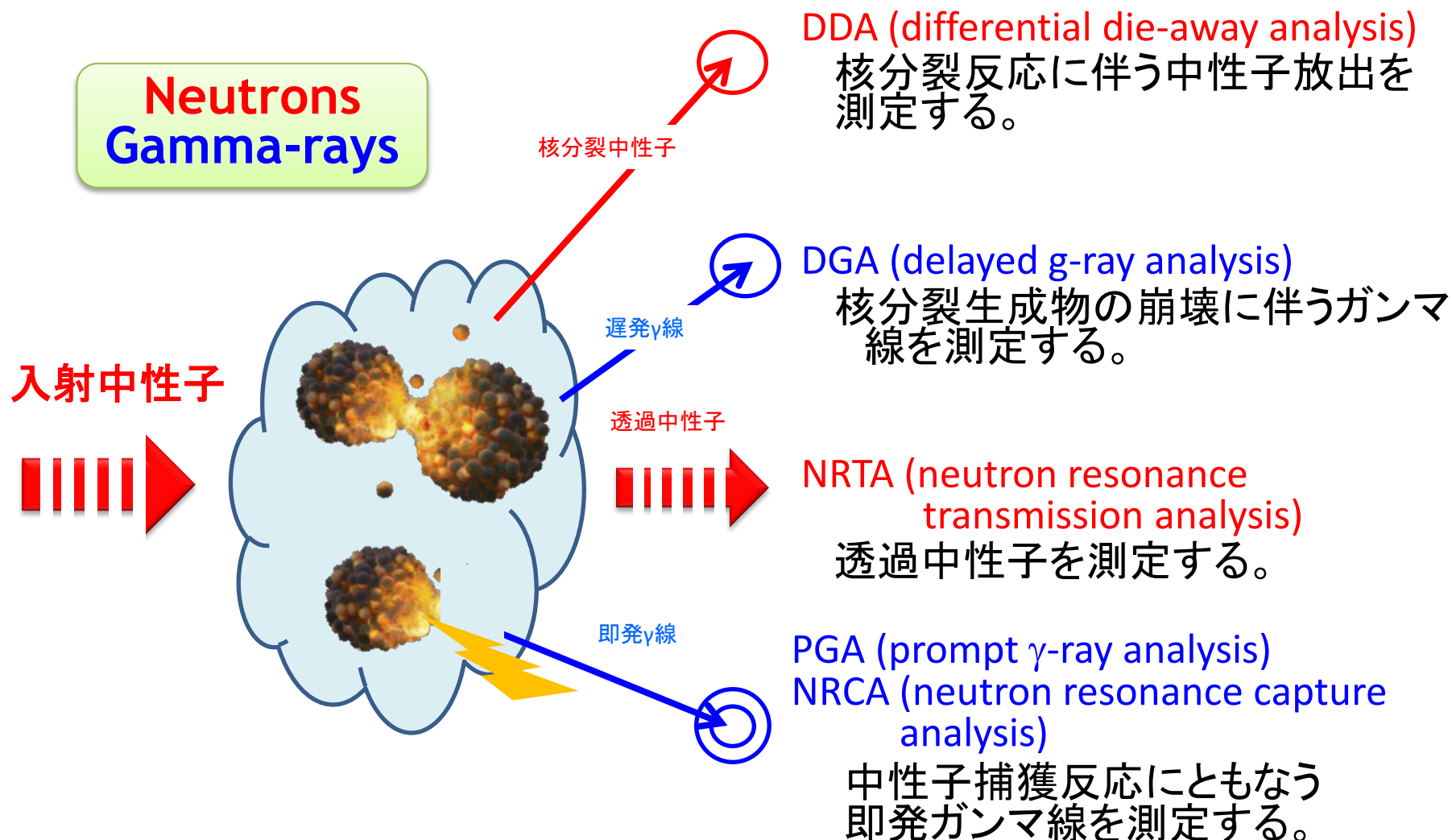
散乱, 捕獲, 核分裂, ...

反応後の粒子放出⁴

ガンマ線, 中性子, 陽子, アルファ線, ...

アクティブNDA法は、高線量試料の核物質測定や、隠蔽された試料の検知に有効と考えられ、パッシブ法で測定できない試料へ適用可能。

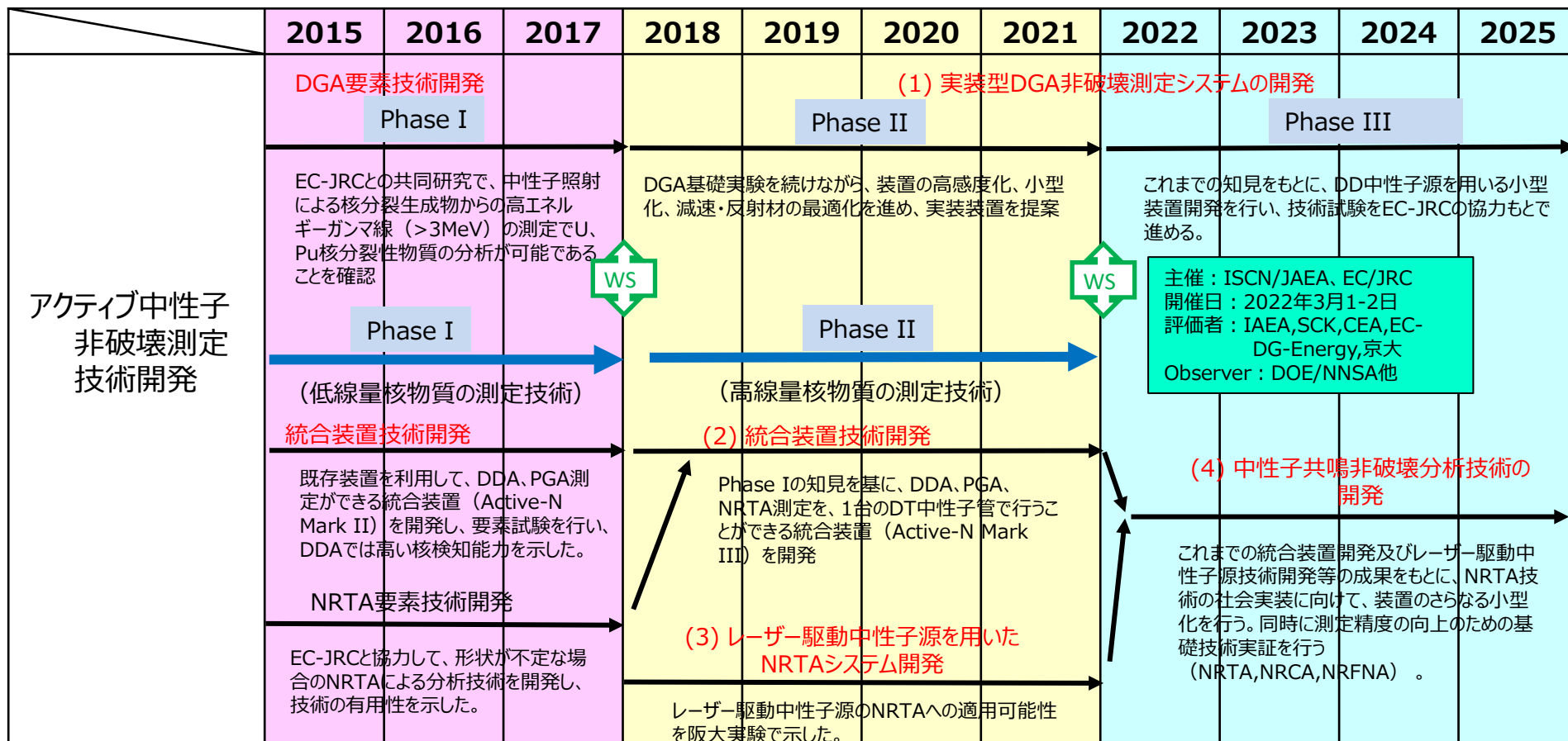
アクティブ中性子非破壊分析とは



利用する核反応により得られる情報が異なり、総合的（相補的）な分析が可能。

3. ISCNが行うアクティブ中性子非破壊分析技術開発

これまでのアクティブ中性子非破壊測定技術開発の経緯



WS: ワークショップの開催

3.1 実装型遅発ガンマ線分析非破壊測定システム開発

概要

再処理施設などで**高線量核物質量の検認作業を効率化**し、核物質を含む廃棄物を低減する新たな非破壊分析技術を確立し、**実際に使える非破壊測定システムを提案**する。核物質に中性子を照射して核分裂を引き起こし、それによる生成核（核分裂生成物）が崩壊する際に放出する遅発ガンマ線を分光・分析して、核物質中のU、Pu等の核分裂性核種比を求めるDGA法の技術開発を行う。

- ✓ **実用可能な小型装置開発**のため、試料に中性子を効率的に照射できる中性子発生源や装置の材質を検討するため、**シミュレーション研究**を行う。
- ✓ 実用化において、より扱いやすく小型な装置にするため、中性子発生装置（**DD中性子源***）を導入。これを用いた装置開発を進め、**システム実証実験**をおこなう。

（国外共同研究機関：EC共同研究センター（EC-JRC））

アクティブ中性子非破壊測定技術開発開始

実装型遅発ガンマ線分析非破壊測定システム開発

システムの提案 提案システムの実証

2015 ～ 2017年度

ワークショップ ▲

2018 ～ 2021年度

ワークショップ ▲

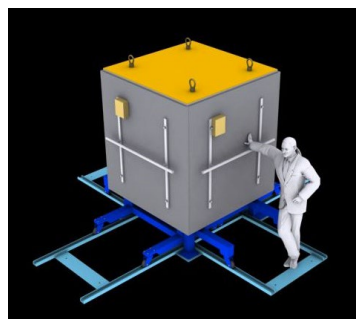
2022 ～ 2025年度

ワークショップ ▲

・再処理施設、次世代革新炉等での高線量核物質の計量管理・査察検認に適用
・業務の迅速化・廃棄物の低減化が実現

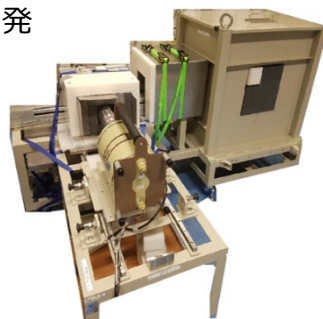
社会実装イメージ

DGA基礎技術開発



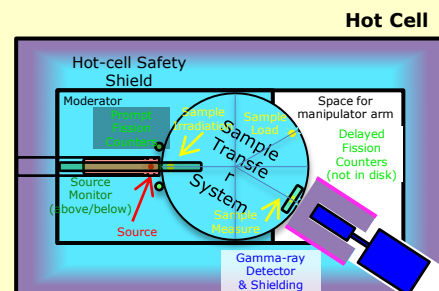
EC-JRC Ispraでの共同研究

Cf線源を用いた装置開発



EC-JRC Ispraでの共同研究

遅発ガンマ線分析装置



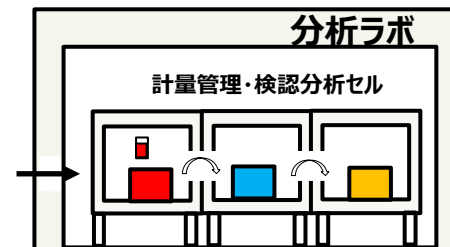
DD中性子管を用いた装置をホットセル内に収納（概念図）。回転型試料輸送システムを用い、中性子照射と測定を繰り返す。

DGA・DDA融合

各プロセスから送られてきた試料に対し、HKED、DGA、DDAといった非破壊分析技術を組み合わせた分析を行う

分析ラボ

計量管理・検認分析セル



※DD中性子源：二重水素（D, ^2H ）同士を衝突させて中性子を発生させる小型装置。DT中性子源より中性子強度が弱い。

これまでの技術開発成果

技術開発課題

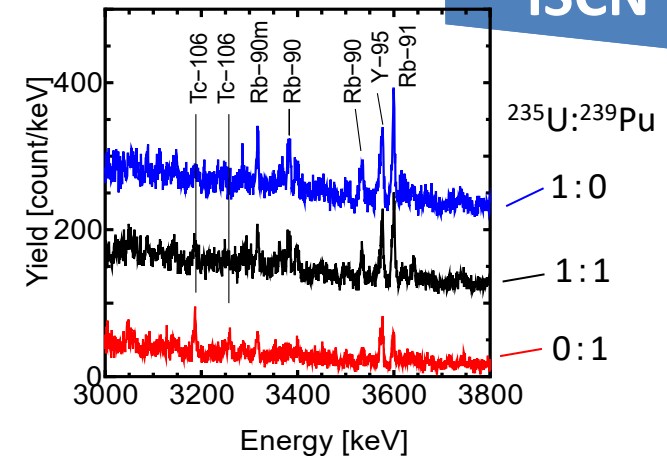
- 遅発ガンマ線分析用の**小型装置の開発**
- 遅発ガンマ線測定における要素技術の高度化

実施内容

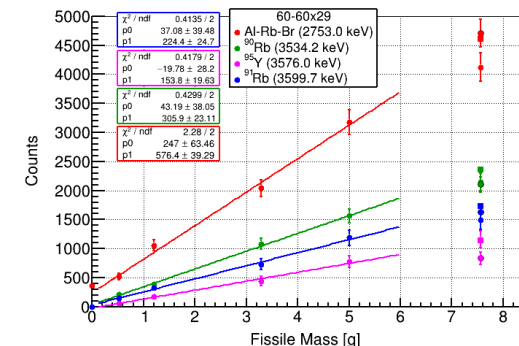
- 核物質を用いた遅発ガンマ線分析手法の確立
EC-JRCとの共同研究による、DT中性子源およびCf線源を用いた基礎的な遅発ガンマ線分析試験
- DD中性子源を用いた小型装置の開発
JAEAのJRR-3実験利用棟において装置開発を実施。装置の実証試験をおこなうことにより、シミュレーションの妥当性などを含め、評価を行う。

成果

- U-235とPu-239の分析の**原理実証**試験
- U-235**の重量による**ガンマ線量相関**を確認
- DD中性子源を用いた**小型装置設計・設置**



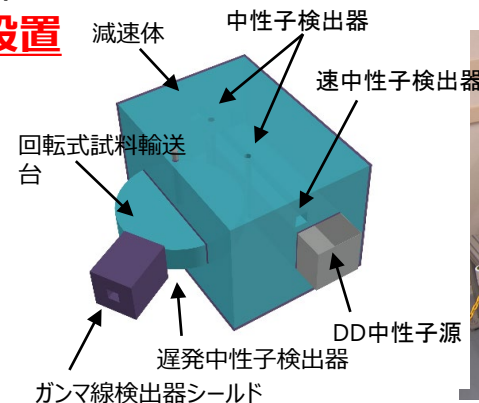
核分裂性物質の割合によるガンマ線スペクトルの変化



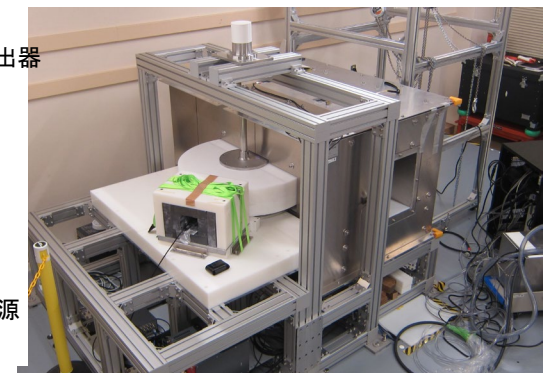
U-235重量に対するガンマ線



DD中性子源



DD中性子源を用いた小型DGA試験装置



3.2 中性子共鳴非破壊分析技術の開発

概要

中性子飛行時間（TOF）測定法を用いる中性子共鳴非破壊分析技術の開発を進める。本技術開発では、**中性子共鳴核分裂中性子分析（NRFNA）技術を新たに提案**し、これを導入することで、**試料中に少量含まれる核分裂性物質の分析能力を向上**させる。なお、この技術は、中性子共鳴透過分析（NRTA）法や中性子共鳴捕獲分析（NRCA）法と相補的な測定法として用いることができる。さらに、並行して設置が容易で可搬な、**卓上型装置の開発**を行う。

- ✓ 次世代施設における高線量の核燃料物質（固体）を非破壊測定する新しい技術として、NRFNA測定技術を確立する。
- ✓ NRFNAと、NRTAおよびNRCAと組み合わせた同時測定を行い、より高度な分析技術（複合測定技術）を開発。

アクティブ中性子非破壊測定技術開発（統合装置技術開発）

（国外共同研究機関：EC/JRC）

2012～2014年度

粒子状核物質の高精度測定技術実証

NRD技術実証ワークショップ
粒子状試料中核物質の定量

NRD技術（中規模施設）



EC-JRCとの共同研究

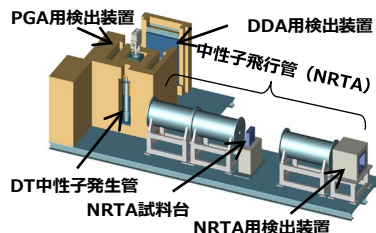
2015～2017年度

Phase-I

DT中性子源を用いた小型複合測定装置の開発
分析要素技術の確立

小型アクティブ中性子分析技術の確立

DDA・PGA・NRTA試験装置
（統合装置Mark-III@NUCEF）

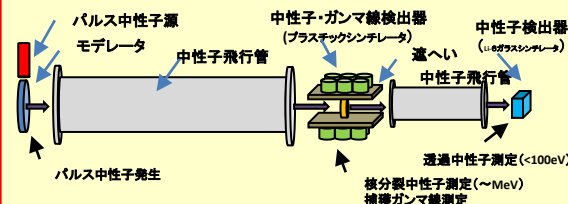


2018～2021年度

Phase-II

2022～2025年度

NRFNAの測定基礎技術の確立
卓上型装置の開発



NRFNA-NRCA-NRTA複合装置（概念図）

★ 技術実証・ワークショップ開催

高感度化・
実用開発

- ・福島デブリ非破壊分析
- ・次世代施設等での高線量試料測定
- ・核鑑識等への適用
- ・不審物の安全な取扱

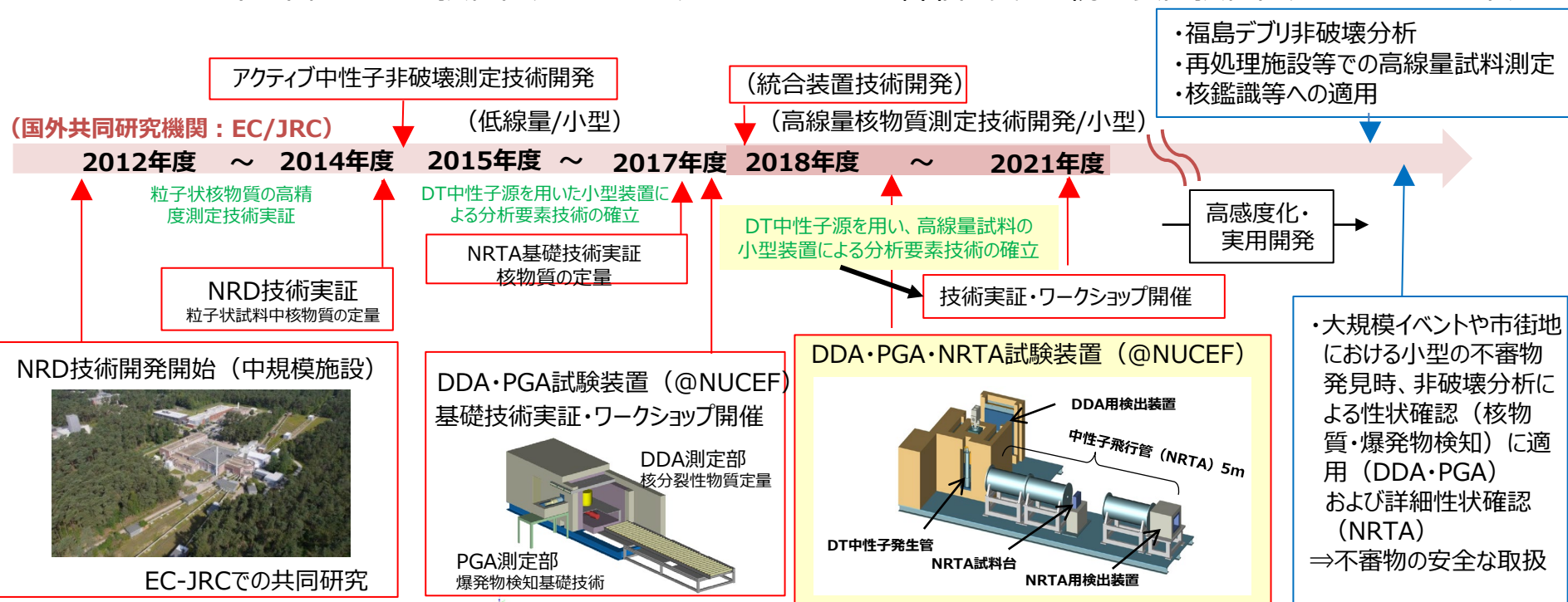
3.3 統合装置技術開発（R3年度で終了）

概要

中性子発生装置（DT中性子源）を使い、3つのアクティブ中性子非破壊測定技術を組み合わせ、総合的な分析ができるコンパクトな装置（統合装置）を開発する。

※3つのアクティブ技術：DDA法（核分裂性物質量の測定）、PGA法（対象物中の元素分析）、NRTA法（核物質などの核種量分析）

- ✓ 再処理工場などで高線量の核燃料物質を非破壊測定する技術を開発するため、日欧の協力の下に、DT中性子源を用いた統合装置を開発する。
- ✓ 本技術は、核セキュリティ分野へも適用も可能な技術である
（核物質があるかどうか（検知）、どのような種類の核物質で爆発物等が含まれるか（不審物の性状検査）、どのくらい核分裂性核種があるか（核兵器物質の量的把握）、核鑑識のための分析（高線量RIや照射済核物質などの分析））
- ✓ 令和3年度、各要素技術を組み込んだ統合装置を完成させ、性能試験を実施。
- ✓ アクティブ中性子NDA技術開発ワークショップ、プロジェクトの評価を受け、統合装置技術開発プロジェクトは終了。



※アクティブ中性子非破壊分析法：中性子を対象物に当ててその反応を調べ、対象物を非破壊で測定する技術

※DT中性子源：二重水素（D, ^2H ）イオンを加速し、三重水素（T, ^3H ）に衝突させて中性子を発生させる小型装置。放射性物質（T）を使用している。

アクティブ中性子ワークショップの開催

主催：ISCN/JAEA、EC/JRC

開催日：2022年3月1-2日（オンライン）

評価者：IAEA, SCK, CEA, EC-DG-Energy, 京大

Observer：DOE/NNSA他

参加者：43名

技術開発成果発表の内容について、評価者及び外部機関の参加者から以下のような講評をいただいた。

- 成果がよく整理されており、**開発が進捗している状況が確認できた。**
- 技術開発は時間がかかるものなので、これからも着実に技術開発を進めてほしい。
- 実用に供するためには、一般的に、**高精度、高効率、小型で、さらに安全で容易に使える**装置が必要で、よりその方向で技術開発を進めてほしい
- 小型化は重要であるが、難しく、野心的な技術開発である
- 保障措置技術開発では、**手法開発から、定量に使う技術開発**に移行していくことが重要である。また、最終段階では、**一般的な技術から一歩踏み出し**、試料、放射能、測定環境などを想定し、そこで用いる装置を開発する必要がある
- LDNSを用いたNRTAシステム開発には感銘を受けた。研究成果が論文化されたら送ってほしい
- JAEAとEC/JRCとの共同研究における連携は非常に良かった。

⇒ 概ね我々の技術開発の方向性に理解を得られたとの認識

4. アクティブ中性子非破壊分析装置の適用について

- 核不拡散
IAEA保障措置、核物質計量管理
- 核軍縮
核軍縮検証（核物質、高性能爆薬）
- 核セキュリティ
隠匿物質検知（コンテナ等に隠された核物質等）
核/放射性物質検知
爆発物検知
- その他（核以外）
化学兵器、インフラ予防保全、その他



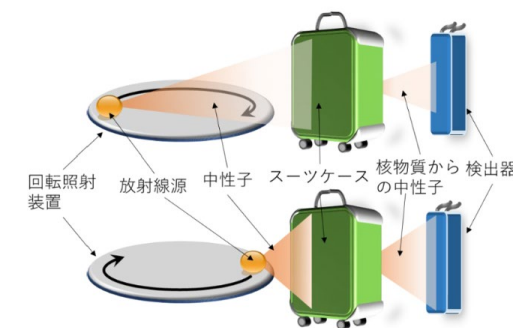
図4 人形峠に設置したウラン非破壊測定装置



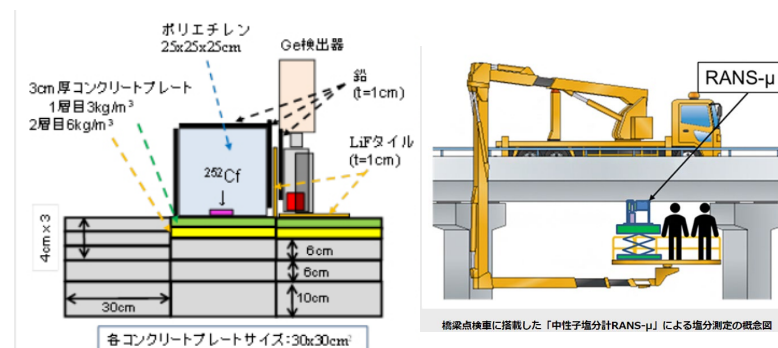
図5 金属系廃棄物模擬試験体

JAWAS-N (JAEA Active Waste Assay System - Ningyo)

JAEAプレス発表資料より (<https://www.jaea.go.jp/02/press2014/p14050201/01.pdf>)



放射線源を回転させて強弱をつけることで核物質を検知する手法を原理実証
JAEAプレス発表資料より (<https://www.jaea.go.jp/02/press2021/p21060402/>)



超小型非破壊検査装置「中性子塩分計RANS-μ」

理化学研究所、オリエンタル白石株式会社 https://www.riken.jp/press/2021/20211014_2/index.html

IAEA保障措置で査察に使用されているアクティブ中性子非破壊分析装置

新燃料のウラン分析（AmLi線源を利用）

- (1) Active Well Coincidence Counter (AWCC)
for LEU/HEU fresh fuel plats and assemblies
- (2) Uranium Neutron Collar-Light Water Reactor Fuel (UNCL)
for LEU fresh assembly
- (3) Fast Neutron Coincidence Collar (FNCL)
for LEU fresh fuel assemblies

参考文献：

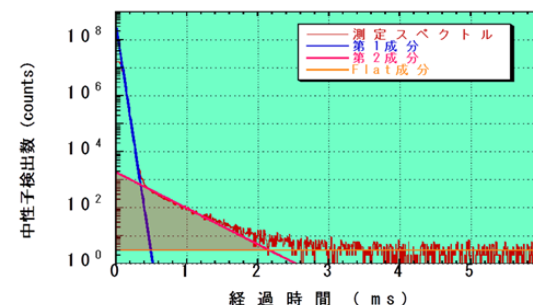
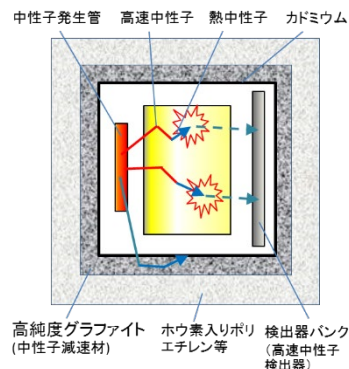
International Target Values for Measurement
Uncertainties in Safeguarding Nuclear Materials, IAEA
STR – 368 (Revision 1.1), Vienna, September 2022



課題： 新燃料にしか使用できない。AmLi線源の生産が行われていない

JAEAにおける装置開発（IAEA保障措置）

Differential Die-Away Analysis (DDA)法



原子力機構・基礎工・原子力センシングGr.のホームページより(<https://nscience.jaea.go.jp/index.html>)

DT中性子管で得られるパルス中性子を用い、核分裂による中性子減衰時間の変化から核分裂性物質量を決定する。DT中性子からの高速中性子を有効に利用する設計(FNDI法)にすることで、感度を上げることが可能。



開発成果は、人形峠におけるウラン非破壊測定装置(JAWAS-N)に用いられ、IAEA保障措置でも利用されている。



図4 人形峠に設置したウラン非破壊測定装置
JAWAS-N(JAEA Active Waste Assay System - Ningyo)

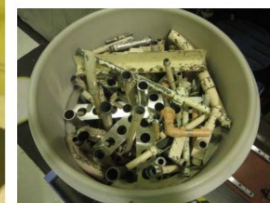


図5 金属系廃棄物模擬試験体

JAEAプレス発表資料より(<https://www.jaea.go.jp/02/press2014/p14050201/01.pdf>)

JAEAにおける装置開発（核セキュリティ）

イノベーション
創出

中性子で核物質を確実に検知する

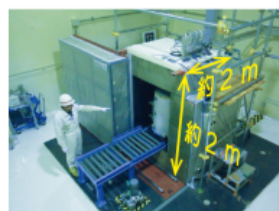
- 低コスト・高可搬性な核物質検知装置の開発に向けて -

課題

空港・港湾等の運輸関連施設では、テロ対策のために荷物に隠された核物質の検知が必要。しかし、中性子を用いる高性能な核物質検知装置は、高価かつ大型なのが課題。

成果

安価な中性子線源を高速回転させて核物質を検知する手法を考案し、原理を実証。低コスト・高可搬性な核物質検知装置の実現へ。



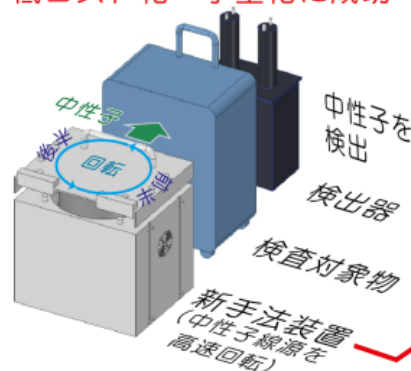
従来の核物質検知装置
高価かつ大型

	従来装置	新手法装置
コスト	3,000万円以上※	約400万円
サイズ	大 (2m×2m×2m)	小 (50cm×70cm×80cm)
可搬性	無	高

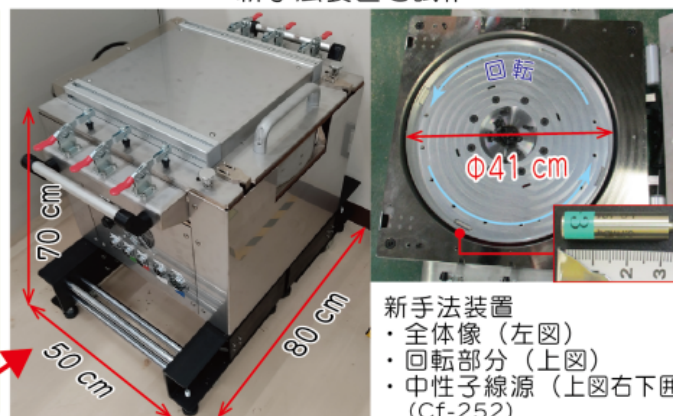
※中性子発生器のコスト

新手法装置を試作

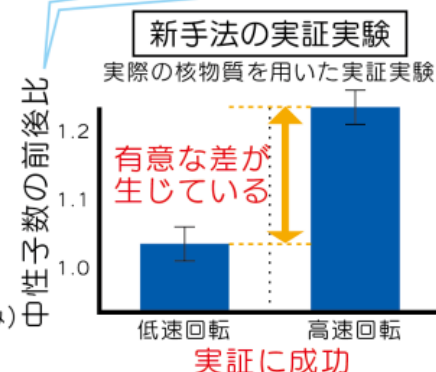
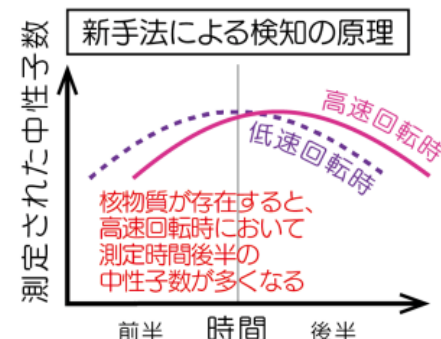
低コスト化・小型化に成功



新手法装置による核物質の検知



新手法装置
・全体像（左図）
・回転部分（上図）
・中性子線源（上図右下囲み）
(Cf-252)

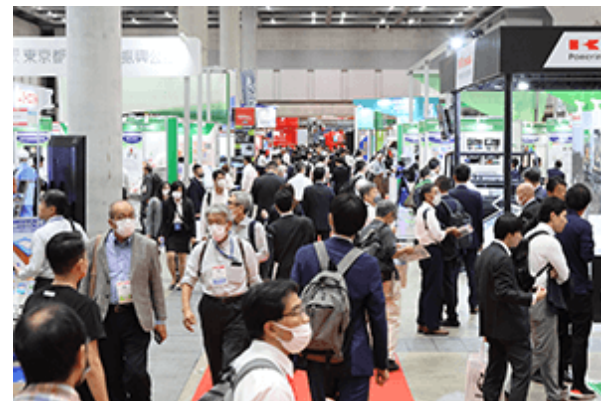


想定される
活用例

空港・港湾等の運輸関連施設における核物質検査への活用に期待。
大規模イベントにおける不審物検査等へも利用可能。

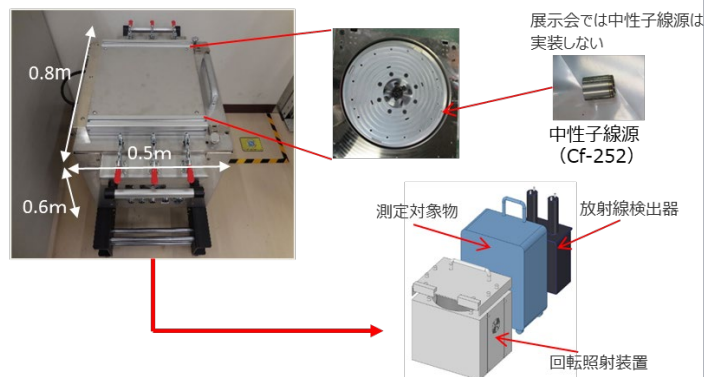
SEECAT：国内唯一のテロ対策専門展

- 社会実装を目指した新たな連携先（パートナー）の模索。
- 核セキュリティ技術開発の成果を警備・治安・危機管理等の関係者と共有、これらの関係者との連携を深め、核セキュリティの強化に貢献
- 2021年より出展
 核物質検知装置（2021）、アクティブN（2021）、積層型中性子検出器（2022）、ハイブリッド測定システム+深層学習(AI)を利用した核種判定アルゴリズム（2021-2023）



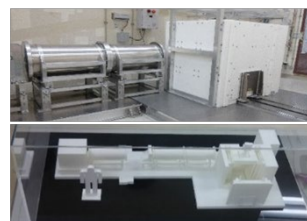
SEECAT23 HPより
 (<https://www.seecat.biz/outline/>)

核物質検知装置



Cf-252等の中性子線源を測定対象物近傍で高速回転させ、測定される中性子束の変化から核物質を検知する装置。従来法では検知困難なウランに対しても適用可能。低コストで可搬性があり、運輸関連施設等における検査だけでなく、大規模イベントにおける不審物検査等での活用も期待。

統合非破壊測定装置（Active-N）

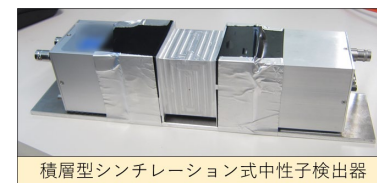


Active-Nの実物の写真（上）
 展示する3Dモデル（下）

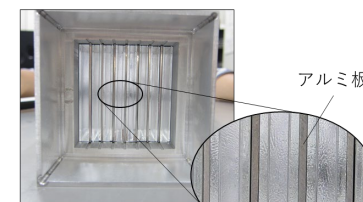
高線量核物質の非破壊測定技術の確立を目的として開発された装置。3つの非破壊測定技術による分析：①中性子タイアウェイ時間差分析、②中性子共鳴透過分析および③即発ガンマ線分析が可能で、それらから得られる相補的な情報により高線量核物質の分析を行う。

本研究開発は、文部科学省「核セキュリティ強化等推進事業費補助金」事業の一部。

積層型中性子検出器



積層型シンチレーション式中性子検出器

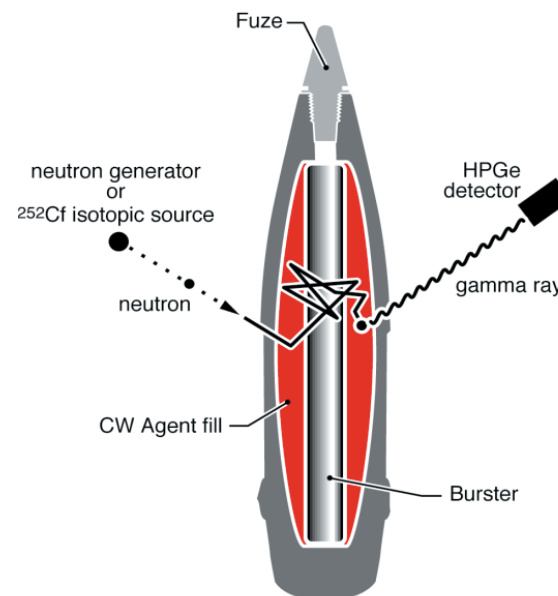
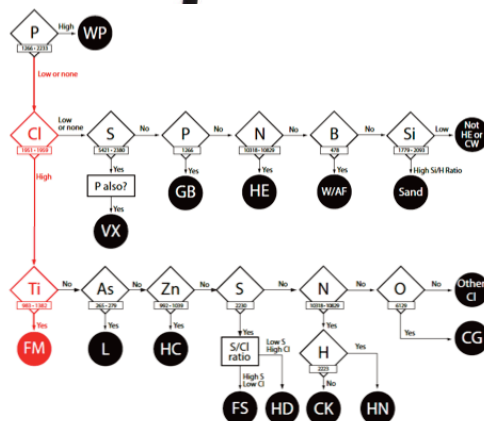
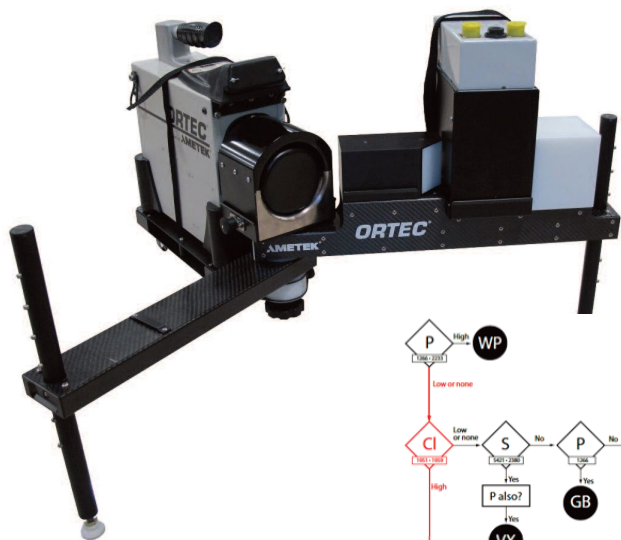


^6Li ガラスシンチレータ 合成石英

コマーシャルプロダクト例 - Chemical Weapons Identification Systems -

Prompt Gamma-ray Analysis (PGA)

AMETEK社製 Portable Isotopic Neutron Spectroscopy (PINS)



Ametek社ホームページより (<https://www.ortec-online.com/products/scn/nuclear-security-and-safeguards/chemical-weapons-identification>)

中性子捕獲反応により放出されるガンマ線を分析し、含有される成分から、危険物（爆薬物や化学兵器など）であることを判定することができる。可搬型Ge検出器と中性子源（Cf-252線源（ $\sim 100\text{MBq}$ ）またはDT中性子源（ $6 \times 10^6 \text{ n/s}$ ））を使う商品がAmetek社より販売されている。中性子発生管にトリチウムが含まれ、また中性子の被ばくも可能性があるため、日本国内では管理区域を設ける必要がある。

（U.S. Depart. Defence, INL, Ortecが開発）

ご清聴ありがとうございました。



ISCNホームページでは、活動を詳細に報告していますので、是非、アクセスください。

ISCNホームページ

<https://www.jaea.go.jp/04/iscn/>



最新のトピックス

2022.07 ISCNニュースレター

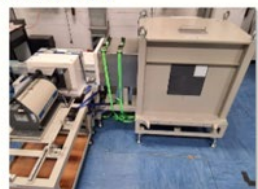
ISCNニュースレターを更新しました (No.307)。



中性子同時計数法実習の様子
(3-1 核物質の非破壊測定に関する地域トレーニング (NDAコース) の開催)

2022.06 ISCNニュースレター

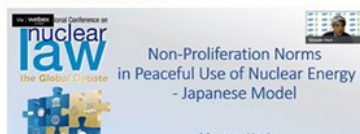
ISCNニュースレターを更新しました (No.306)。



ISCN Delayed Gamma-ray Test Spectrometer in PERLA
(3-1 核物質測定のための遅延ガンマ線分析技術の開発)

2022.05 ISCNニュースレター

ISCNニュースレターを更新しました (No.305)。



記念パンフレット

- ISCN設立10周年記念パンフレット「『第1回 核セキュリティ・サミット』から10年 ～ISCNが刻む『未来へのMilestone』～」 [PDF](#)
- 「核不拡散・核セキュリティにおける米国DOE/NNSAとJAEAの協力」30周年記念パンフレット [PDF](#)
- 「EC/JRCとJAEAの核不拡散・核セキュリティ協力30周年の成果と今後の方向性」 [PDF](#)

ISCNニュースレター

No.0307 July, 2022

- <1. 核不拡散・核セキュリティに関する動向 (解説・分析) >
- <2. 技術・研究紹介 >
- <3. 活動報告 >
- <4. コラム >

「ISCNニュースレター」のページ

核不拡散ポケットブック

2022年2月更新

原子力平和利用と核不拡散・核セキュリティに係る国際フォーラム

結果報告／配布資料 原子力平和利用と核不拡散・核セキュリティに係る国際フォーラム2021～ポストコロナ時代の核不拡散・核セキュリティ～
(前夜祭 学生セッション「ポストコロナ時代に向けて学生からの提言」)

補足

令和3年度までの技術開発成果

技術開発課題

- 分析精度を上げるため相補的な分析を行える装置を開発
- 高線量試料の分析が可能な技術の開発

実施内容

- NUCEFにおいて統合装置を開発・設置
- 各測定技術を用いた試験を実施

成果

- 統合装置の設置終了。各要素技術の実証。

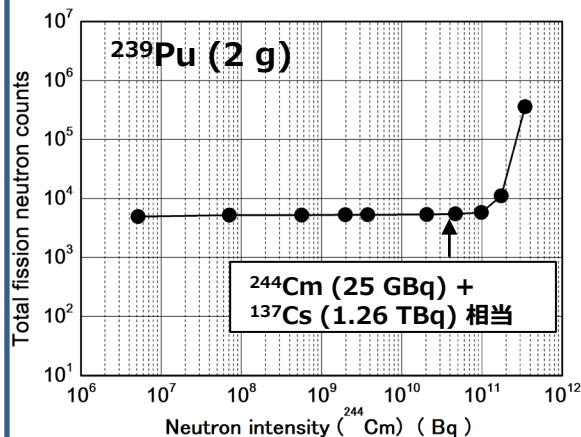
評価

- 技術的な向上が見られたことが評価された。完成した装置の試験を継続して行い、一部の技術については、より実装を目指した開発に展開するようコメントを得た。

ダイアウエイ時間差分析 (DDA)

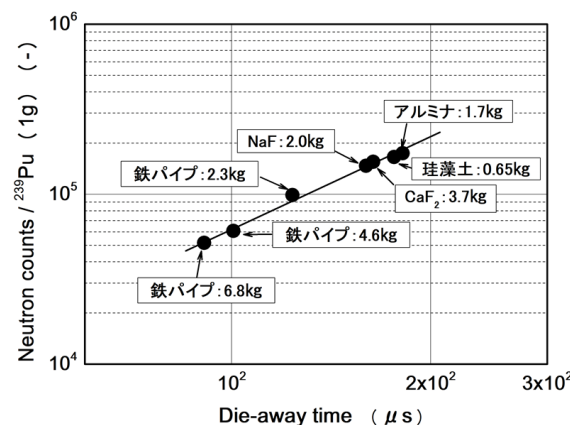
統合装置 (Mark-III) を設計・製作し、含有放射能の高い物質においても高感度な計測ができることを実証した。

強い中性子線を放出するPu-239試料の模擬測定試験



核物質試料に ^{244}Cm などの強い中性子線を放出する物質がある場合を想定し、 ^{252}Cf 線源を用いた測定を行った結果、再処理プロセスの溶液試料中の ^{239}Pu が測定できることを確認した。

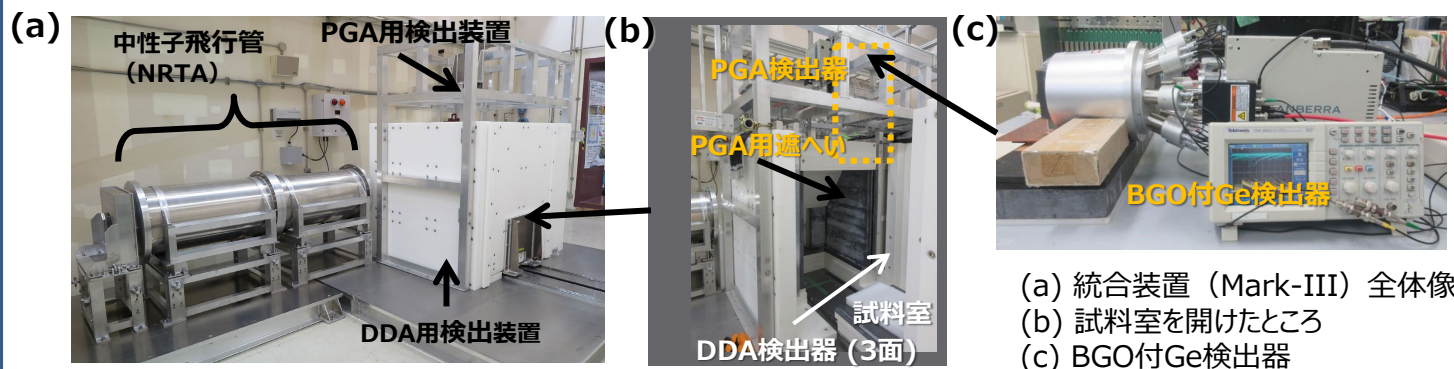
核物質と混入物等が混在する容器を模擬した測定試験



開発しているDDA部には、速中性子直接問かけ法 (FNDI) を採用している。減衰時間と中性子計数との関係を調べた結果、左図のような相関が得られた。混入物があっても核分裂性物質の定量ができることが確認できた。

即発ガンマ線分析法 (PGA)

統合装置 (Mark-III) の上部のPGA測定装置を完成させた。統合装置内部に、中性子による検出器へのダメージを減らすために、複合遮蔽体を設置した。これにより、検出器に到達する中性子束を2桁程度低減できた。また、試料室に鉛遮へいを施すことで、ガンマ線バックグラウンドを抑制した。ガンマ線検出装置は、Ge検出器とコンプトン抑止検出器 (BGO検出器) を組み合わせたもので、即発ガンマ線を高分解能で、かつ高いS/Nで測定することができる。



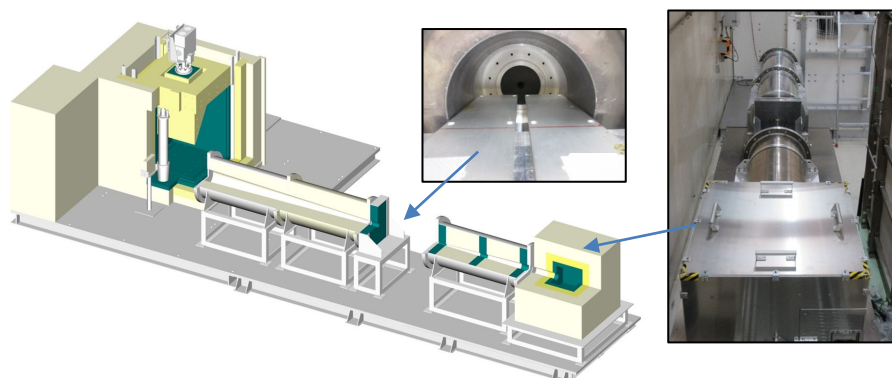
本装置で、DDAの測定の障害となるホウ素やガドリニウムが測定できることを確認した。

また、爆発物含有物質である窒素 ($\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$)、リン (Li_3PO_4) 化合物の検知も可能であることを確認した。

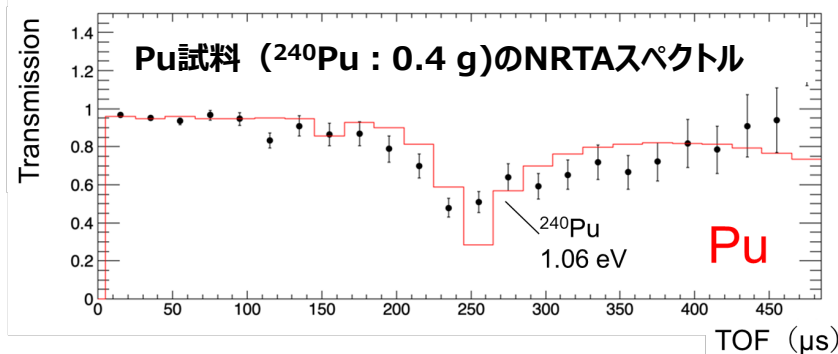
中性子共鳴透過分析法 (NRTA)

統合装置の小型NRTA装置部を完成した。飛行距離は、6mと3mで切り替え可能。高感度な測定を行うため、バックグラウンドとなる中性子は飛行管などの遮へいで低減し、ガンマ線は波形弁別型検出器を用いて低減した。実証実験で小型装置による分析が可能であることを示した。本技術開発の知見を活かし、「中性子共鳴非破壊分析技術の開発」で、可搬型装置開発などを進める。

統合装置



NRTA測定試験



レーザー駆動中性子源を利用したNRTAシステム開発

概要

レーザー駆動中性子源は、レーザー照射により中性子を発生させるため、パルス幅が短いことに特徴がある。またレーザー光をミラーで分析装置までレーザー光を輸送できるため、レーザー装置は別区域に設置可能であり、維持管理による影響が少ないと考えられる。高い放射能を発生する核燃料試料を高精度非破壊分析する中性子共鳴透過分析（NRTA）に、短パルス中性子源としての適用性を検討する。

- ✓ レーザー駆動中性子源を用いたNRTAシステムを設計するため、シミュレーション研究を進める。
- ✓ シミュレーション結果による中性子の挙動を確認するため、測定試験を行う。
- ✓ レーザーショットのX線バーストによる過酷条件下で、低バックグラウンド、高効率な測定を進めるための検出器開発を進める。
- ✓ 開発した検出器を用い、システム概念の確認試験を行う。

（国外共同研究機関：EC共同研究センター）

パルス中性子源を用いた
NRD技術開発期

アクティブ中性子非破壊測定技術開発

レーザー駆動中性子
源利用NRTAシステム
の提案

レーザー中性子源の開発

レーザー中性子源利用
小型NRTA装置の開発

2012年度 ～ 2014年度 2015年度 ～ 2017年度 2018年度 ～ 2021年度

▲ 本事業
▲ 他事業

レーザー駆動中性子源からの
パルス中性子の性状確認

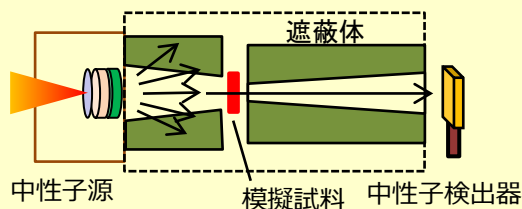
ワークショップ

DDA・PGA

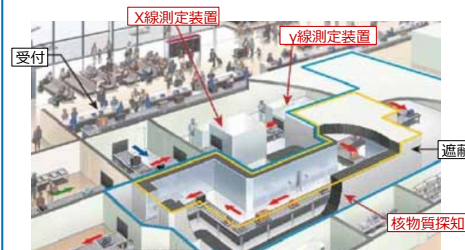
NRTA

レーザー駆動中性子源を利用したNRTAシ
ステムのシミュレーション開発

NRTA装置概念図

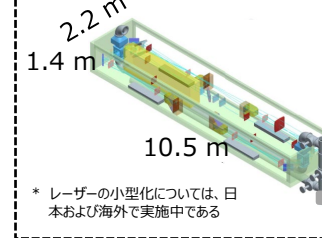


空港等での核セキュリティ用非破壊
分析装置用中性子源に適用



高線量核物質の計量管理・査察検認で高精度非破壊分析に適用

小型レーザー装置の実現
レーザー室（別区域）



管理区域内

分析ラボ

分析装置

レーザー

※ NRTA（neutron resonance transmission analysis）：核物質などの核種量分析を行う。高精度な測定には狭い中性子パルス幅が必要。
※ 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

これまでの技術開発成果

技術開発課題

- ・ レーザーショットに伴う電磁ノイズの影響
- ・ 数少ないレーザーショットで有用な情報を得ること
- ・ レーザーショットで大量に発生する中性子によるパルス信号の扱い技術

実施内容

- ・ ゲート付き検出器の開発
- ・ ガンマ線の感度低減技術の開発
⇒ 積層型検出器の開発
- ・ ショット毎、全波形をデジタイズして記録
- ・ 波形解析によるノイズ除去などの波形解析手法の開発

成果

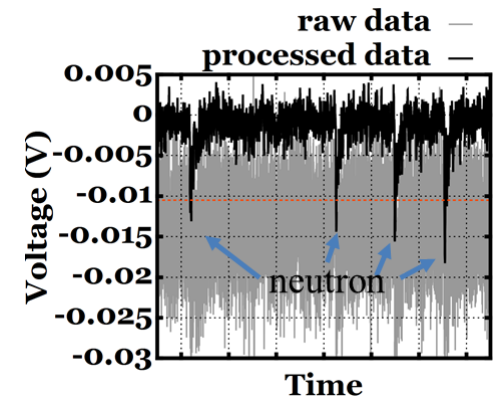
- ・ 京都大学でのパルス中性子源を用いた技術開発
⇒ 検出器のガンマ線感度低減化に成功
積層型検出器の開発（特許申請）
⇒ 全波形データを取得し解析手法の最適化を行った。
- ・ 大阪大学におけるLDNSを用いたNRTA実験
⇒ LDNSがNRTAに適用可能であることを示した。

評価

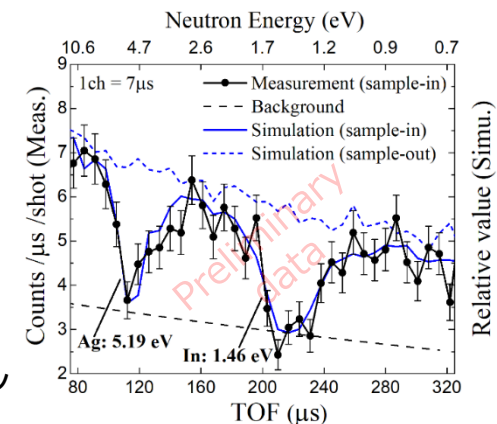
- ・ LDNSの将来性は、レーザー装置の開発にかかっているが、本研究で示した可能性に関しては、総じて高い評価を得た。



ゲート付き積層型中性子検出器



波形処理によるノイズ除去



阪大で取得したスペクトル

破壊分析と非破壊分析

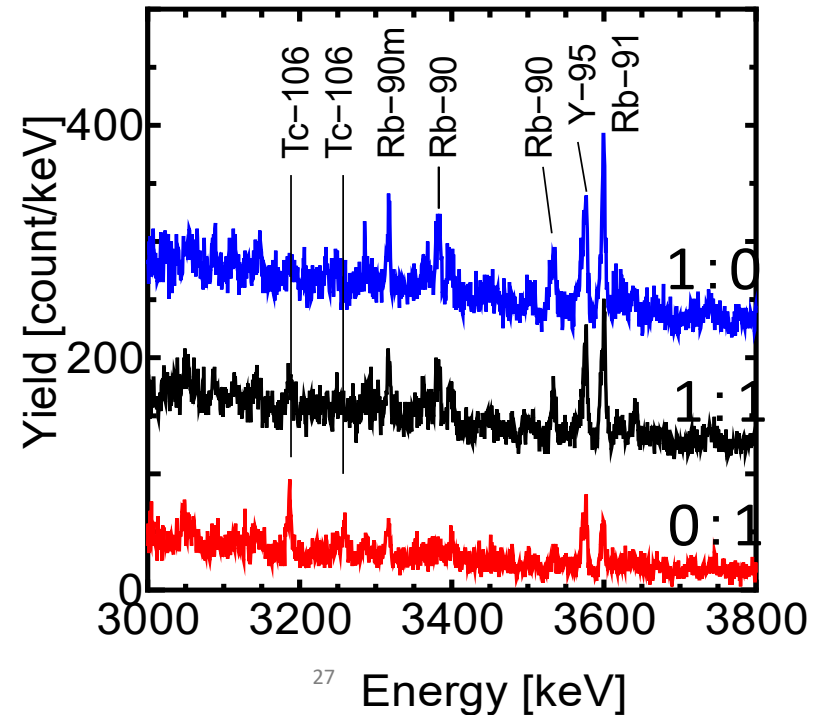
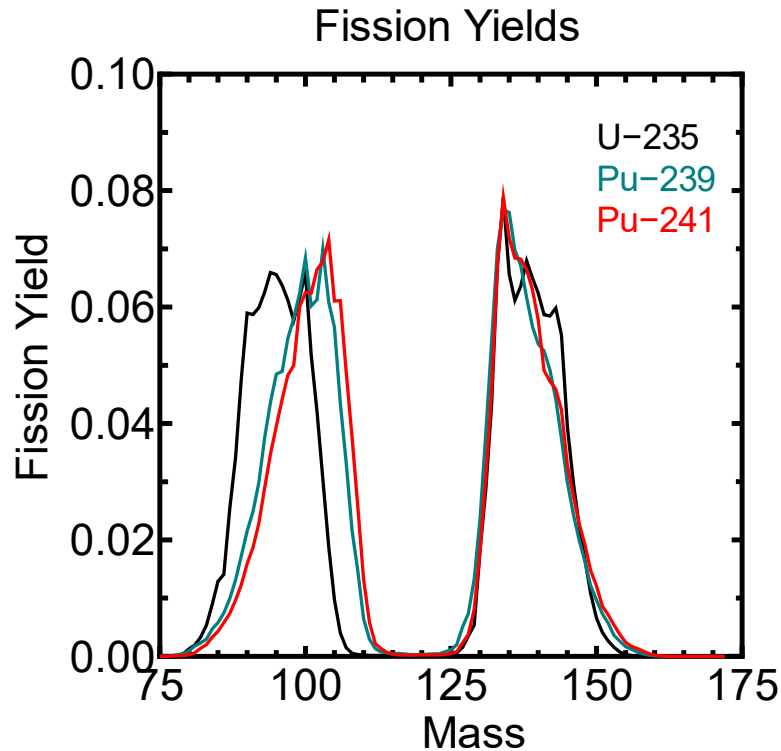
破壊分析 Destructive Analysis(*) (DA)	取得したサンプルに化学的な処理(破壊処理)を加え分析する。 ⇒核物質の施設計量管理の基礎分析手法であるとともに、査察側からは施設計量管理の適正さの検証に使われる。(核鑑識でも使われる。) ・高精度 ・長時間の分析 ・代表性の高い試料を採取する必要
非破壊分析 Non-destructive Assay(*) (NDA)	取得したサンプルあるいは核物質アイテムそのものを、そのままの状態(破壊せずに)測定を行う。 ⇒主として、査察時量的検証の手段として使われる。 ・(一般的には)精度は、DAより落ちる ・短時間での測定 ・対象物の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

技術開発を進めきたアクティブ中性子非破壊測定技術

技術	利用する反応 (放射線)	測定対象
DDA (Differential Die-away Analysis)	核分裂 (中性子)	^{239}Pu-effective
DGA (Delayed Gamma-ray Analysis)	核分裂 (核分裂生成物からの遅発ガンマ線)	$^{235}\text{U}/^{239}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}$
NRTA (Neutron Resonance Transmission Analysis)	全核反応断面積 (中性子の透過)	各核種 (U and Pu等)の面密度
PGA (Prompt Gamma-ray Analysis)	中性子捕獲反応 (即発ガンマ線)	核種の存在検知 (爆発物などの検知)
NRCA (Neutron Resonance Capture Analysis)	中性子捕獲反応 (即発ガンマ線)	各核種 (U and Pu等)の面密度
R4～ NRFNA (Neutron Resonance Fission Neutron Analysis)	核分裂 (核分裂中性子)	各核分裂性核種 (U and Pu等)の面密度比

アクティブ中性子非破壊分析技術では、得られた情報を相補的に利用した試料分析を行う。

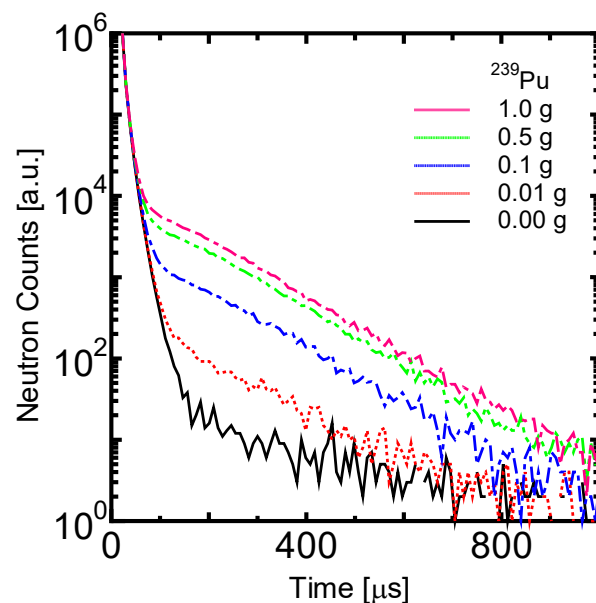
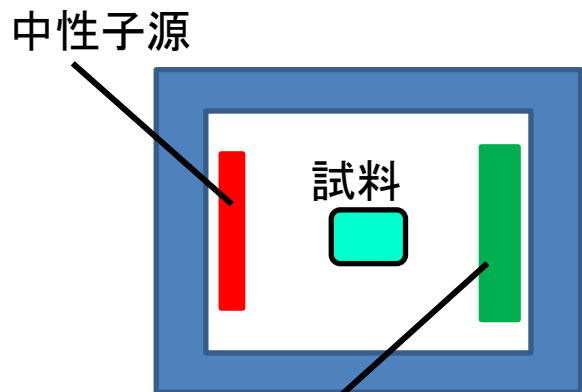
遅発ガンマ線測定



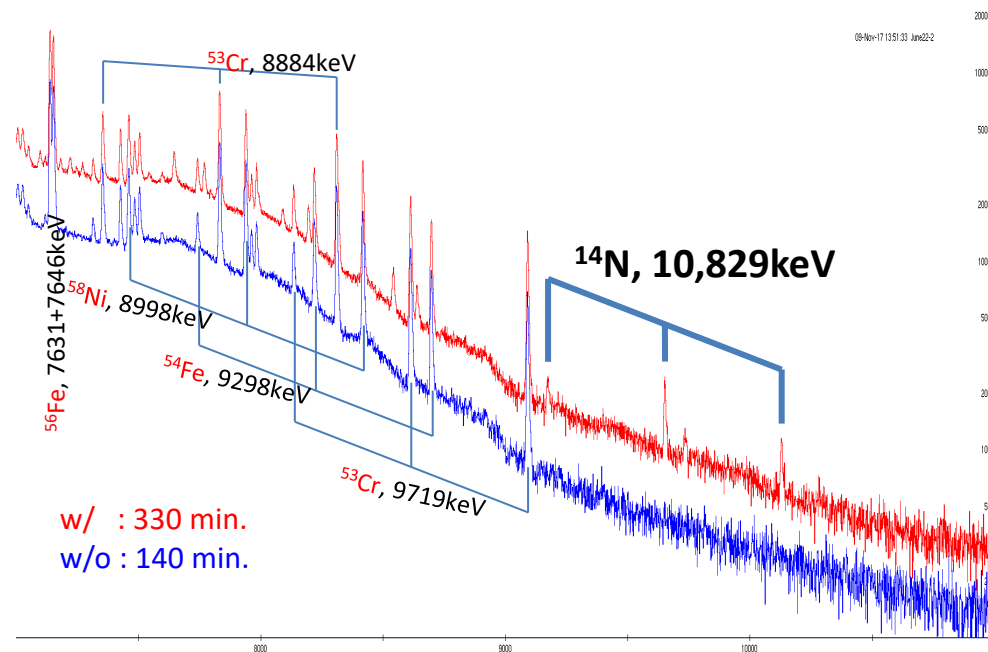
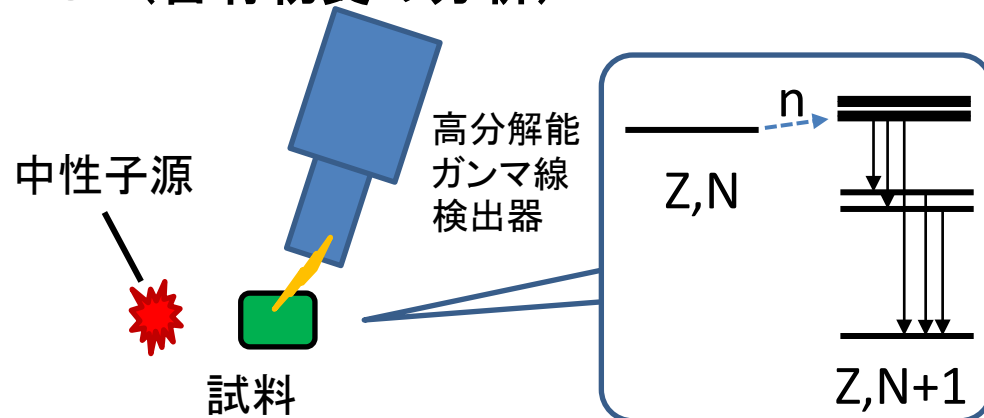
核分裂性核種の含有率により核分裂性核種の生成比率が変わるので、核分裂生成物の崩壊ガンマ線スペクトルは、核種により特有なピークの分布が現れる。このことを利用し、中性子照射後ガンマ線測定を行うことにより、核分裂性物質の相対量を分析することができる。

DDA・PGA測定手法

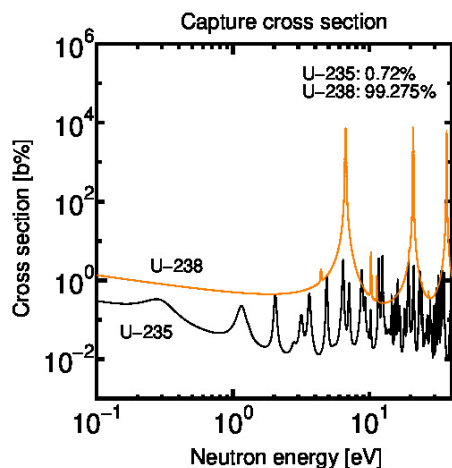
DDA(核分裂性物質の定量)



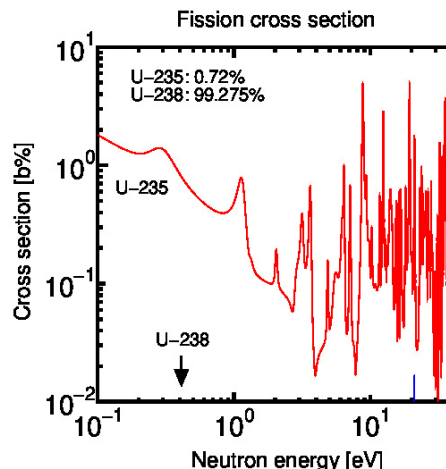
PGA(含有物質の分析)



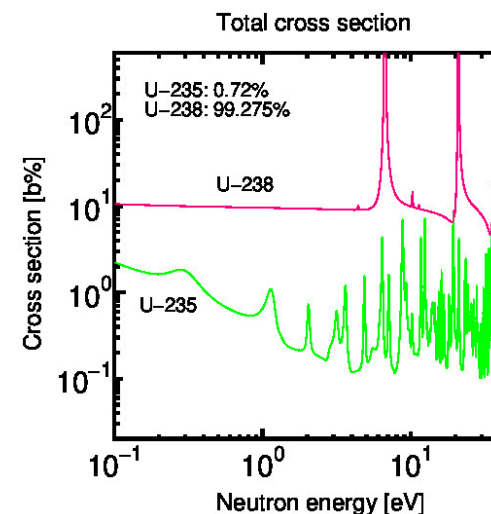
パルス中性子を用いた中性子共鳴分析手法



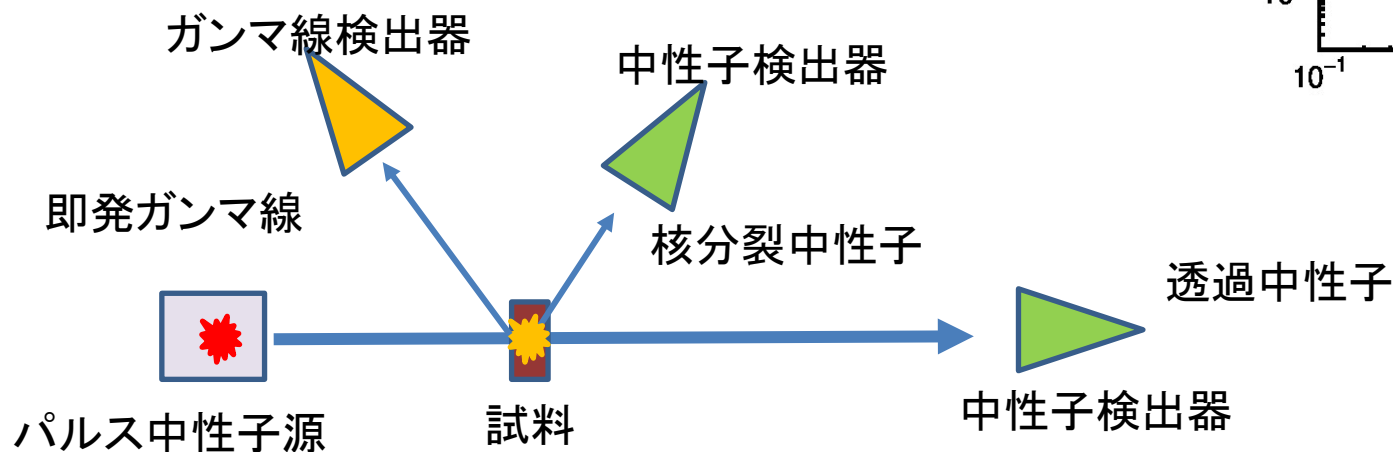
核種分析



核分裂性物質分析



核種の定量



異なる反応を用いることで、異なる角度からの試料分析ができる。