

重遮蔽された貨物コンテナの中に隠された 核物質の検知技術開発について ～LCS γ 線NRFの開発成果～

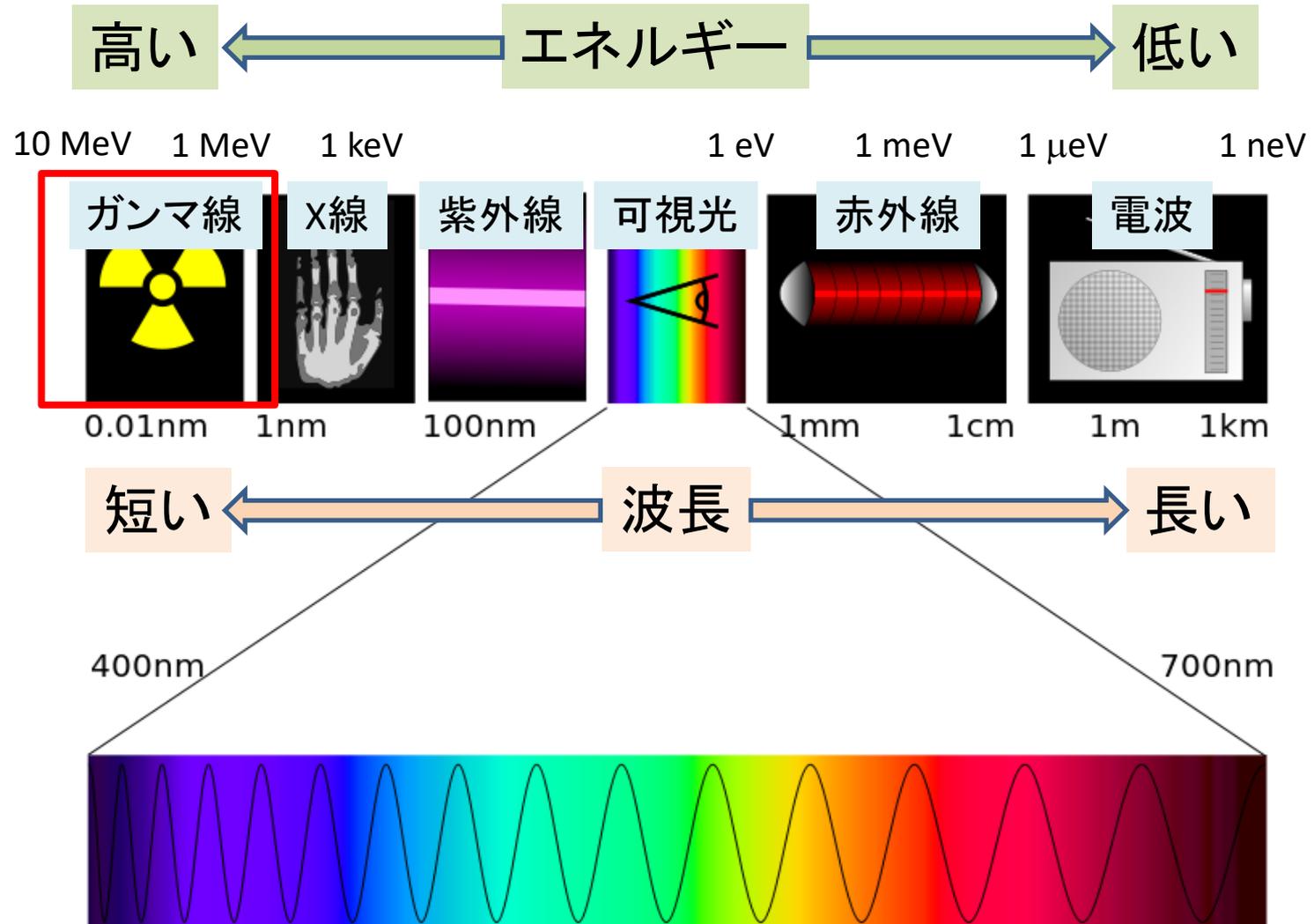
2020年9月9日



量子科学技術研究開発機構 (QST)
量子ビーム科学部門 上席研究員
JAEA連携協力職員
羽島 良一

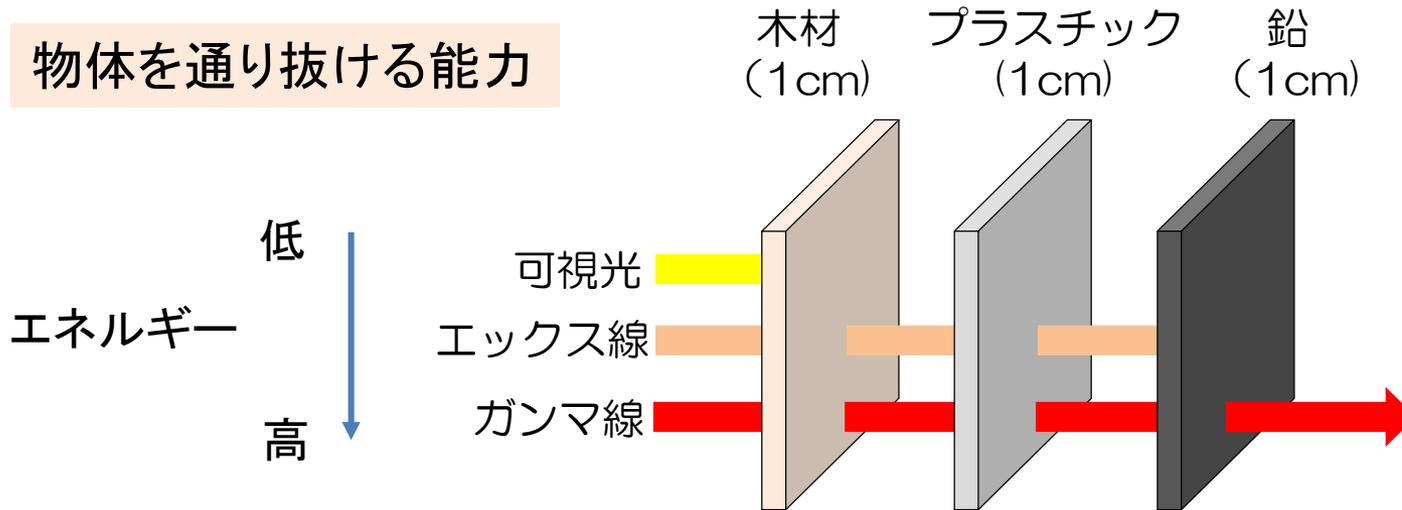
令和2年度 第1回 核不拡散科学技術フォーラム

ガンマ線＝光(電磁波)の仲間

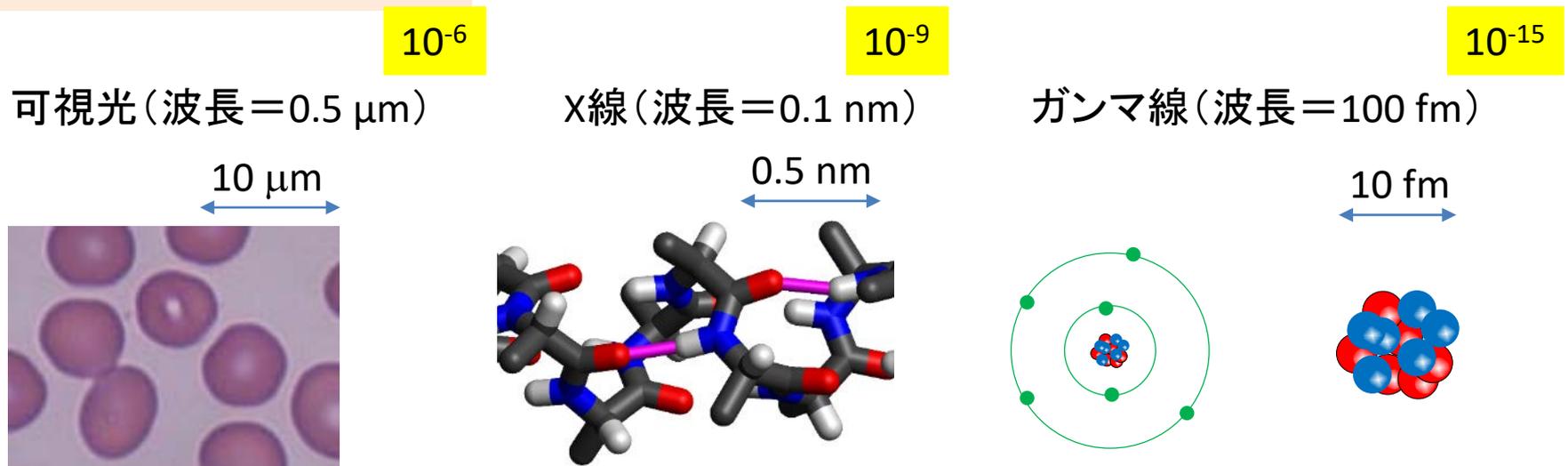


光のエネルギー、波長による性質の違い

物体を通り抜ける能力

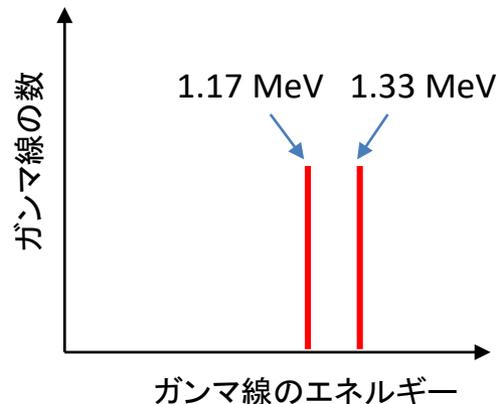
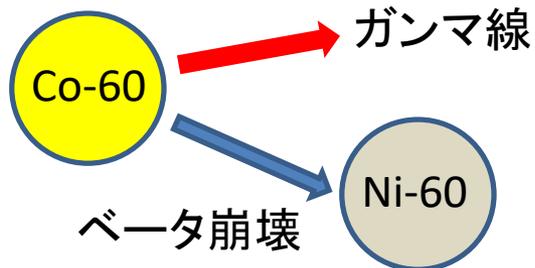


小さなものを調べる能力



ガンマ線の発生源

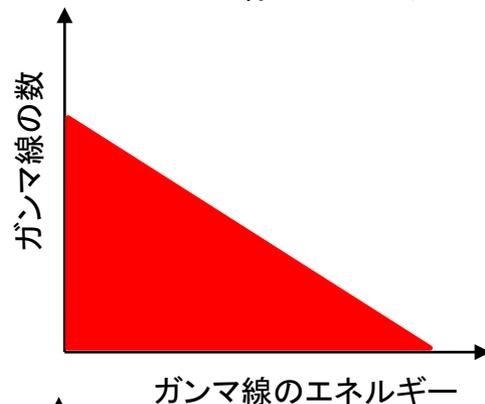
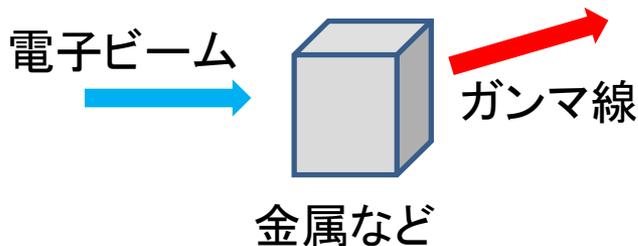
放射性同位体



Co-60照射施設(QST高崎)



制動放射

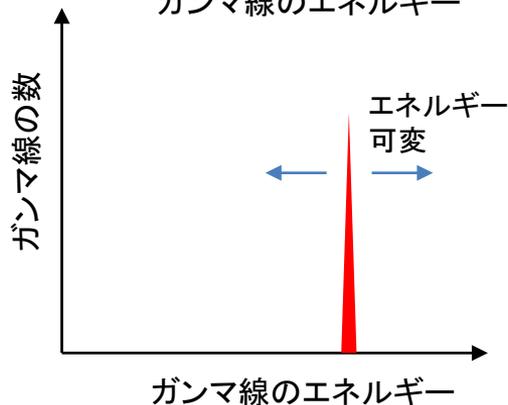


電子線照射施設(QST高崎)

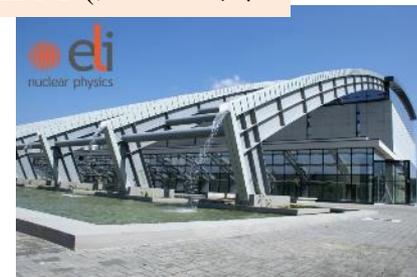


レーザー・コンプトン散乱

本日の話題

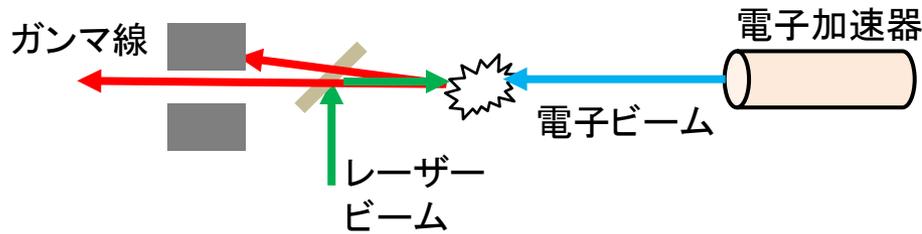


ELI-NP (ルーマニア)



レーザー・コンプトン散乱(LCS)ガンマ線

レーザー・コンプトン散乱



ガンマ線
エネルギー

電子エネルギー

レーザー光子
エネルギー

$$E_{\gamma}^{max} = 4 \left(\frac{E_e}{mc^2} \right)^2 E_L$$

$$E_L = 1 \text{ eV } (\lambda = 1.2 \text{ } \mu\text{m}, \text{ 赤外})$$

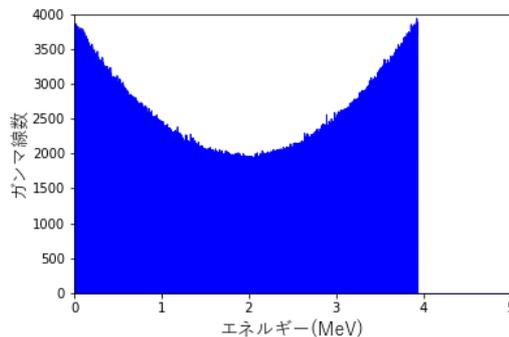
$$E_e = 500 \text{ MeV}$$

$$E_{\gamma}^{max} = 3.8 \text{ MeV} \quad \times 3,800,000$$

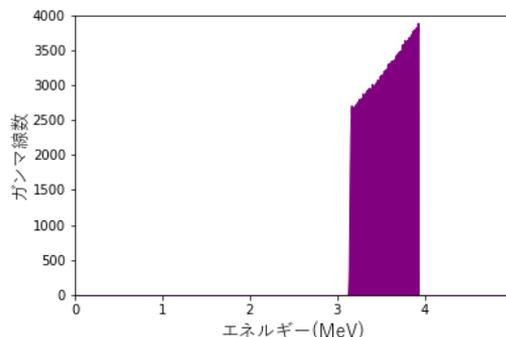
電子ビームエネルギー、レーザー波長を選んで
ガンマ線エネルギーが可変

コリメータで散乱角を制限することで
単色ガンマ線が得られる

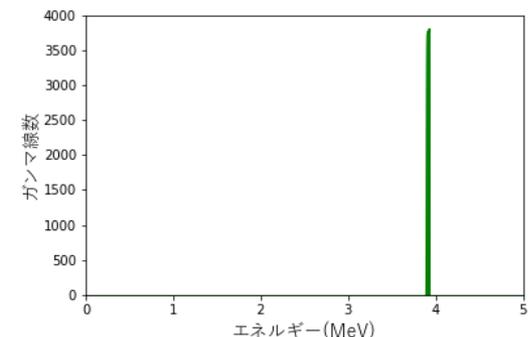
コリメータ = なし



コリメータ = 5 mm



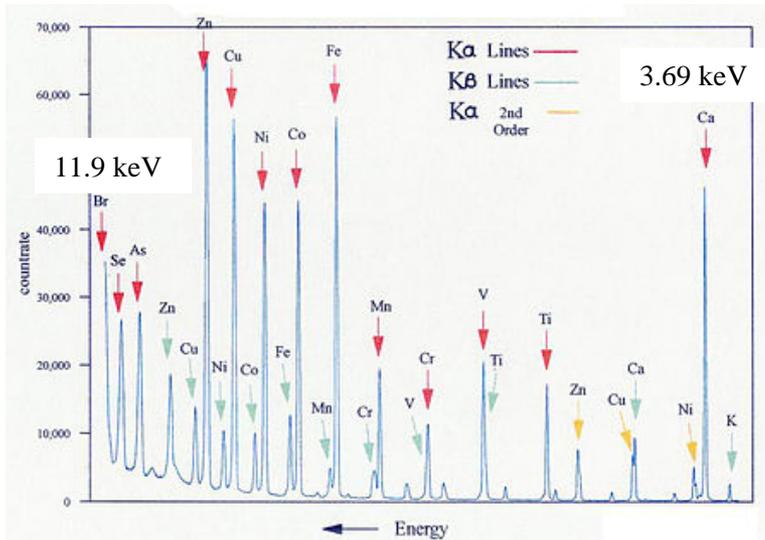
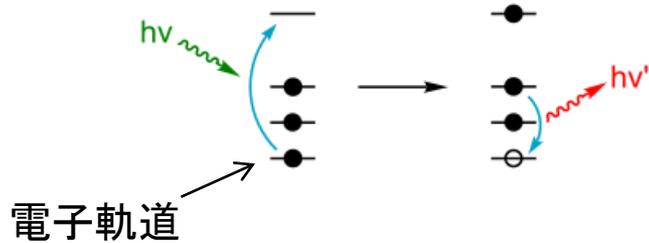
コリメータ = 1 mm



XRF と NRF

蛍光X線

X-ray Resonance Fluorescence



元素分析に利用可能

核共鳴蛍光

Nuclear Resonance Fluorescence

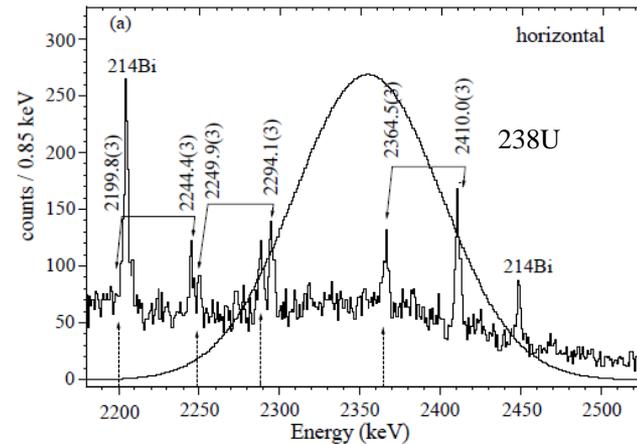
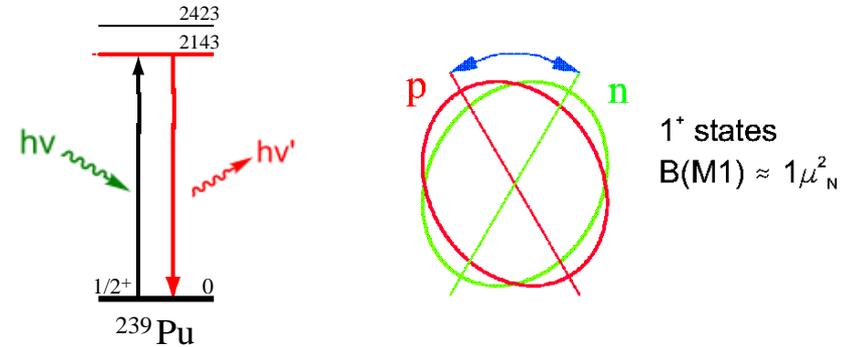
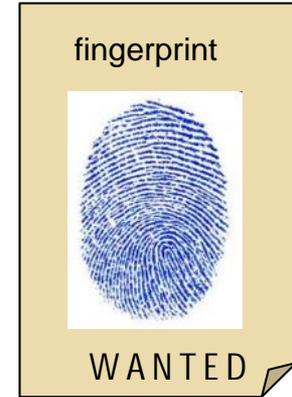
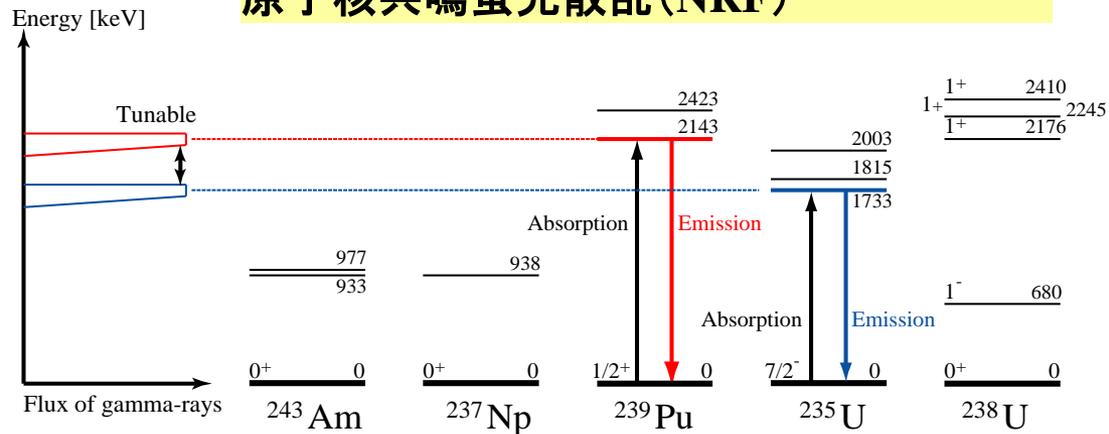


Figure from Hammond et al. Phys. Rev. C (2012)

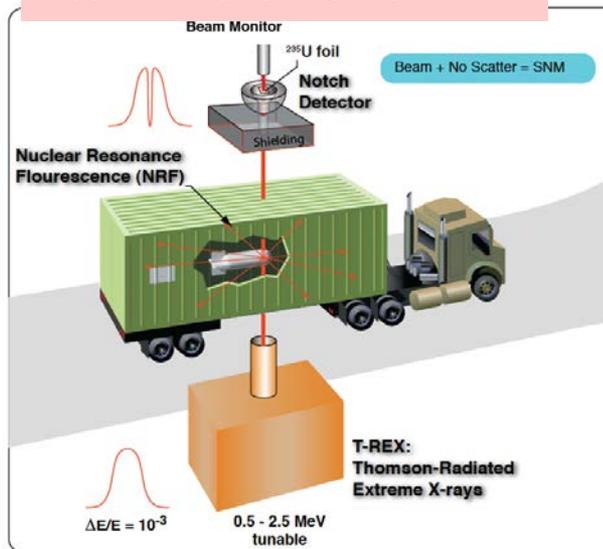
核種(同位体)分析に利用可能

ガンマ線による核物質の非破壊測定

原子核共鳴蛍光散乱 (NRF)

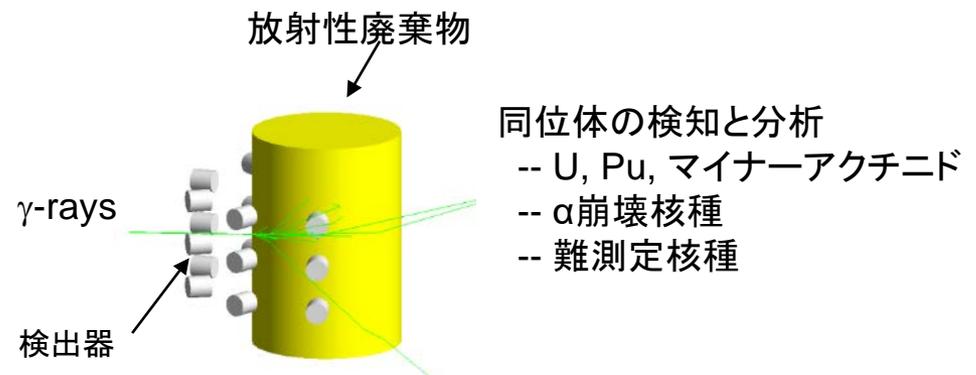


貨物中の核物質の検知



SNM: special nuclear material

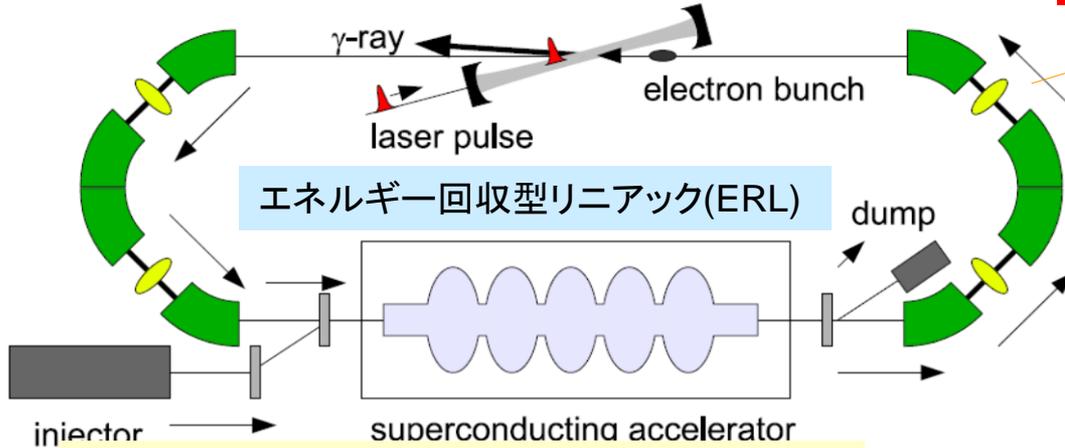
放射性廃棄物中のRIの非破壊測定



R. Hajima et al., J. Nucl. Sci. Tech. 45, 441 (2008)
 J. Pruet et al., J. App. Phys. 99, 123102 (2006)

ERLに基づくLCSガンマ線源の提案

低エミッタンス、大電流電子ビーム
高繰り返し、高密度の衝突
→ 大強度のガンマ線



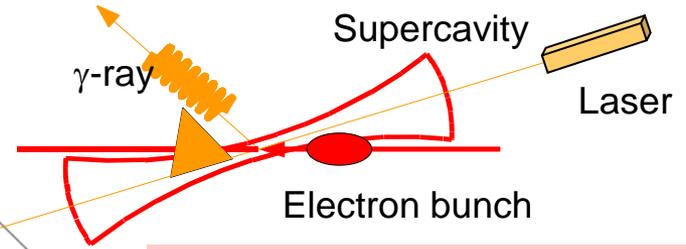
- Electron beam = 350 MeV, 13 mA
- Laser intracavity = 700 kW
- **LCS ~2MeV, 1×10^{13} ph/s**

0.1 ph/eV/s → 10^7 ph/eV/s

AIST

ERL

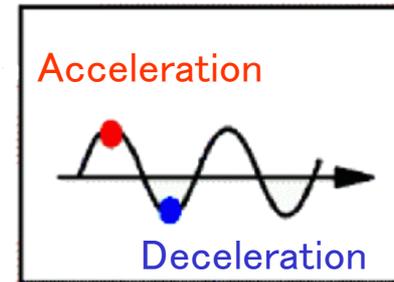
レーザー蓄積装置



レーザー光子を再利用する

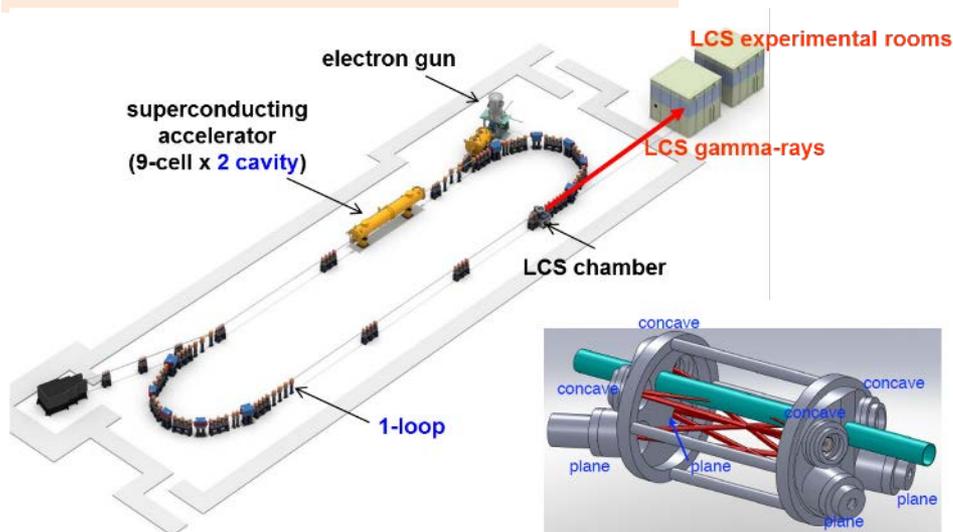
大強度 γ -ray

電子エネルギーを再利用する

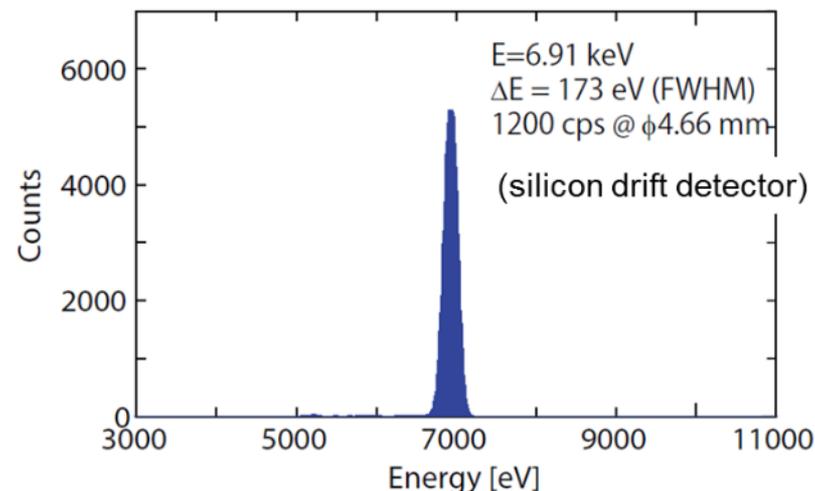


技術開発と実証実験

LCS発生の技術開発、実証実験



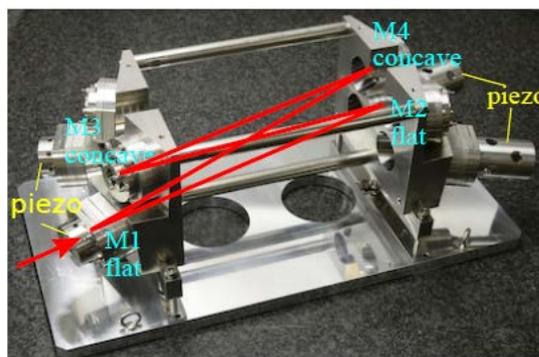
狭帯域のLCSビーム生成を実証



T. Akagi et al., Phys. Rev. Acc. Beams 19, 114701 (2016).



周回軌道



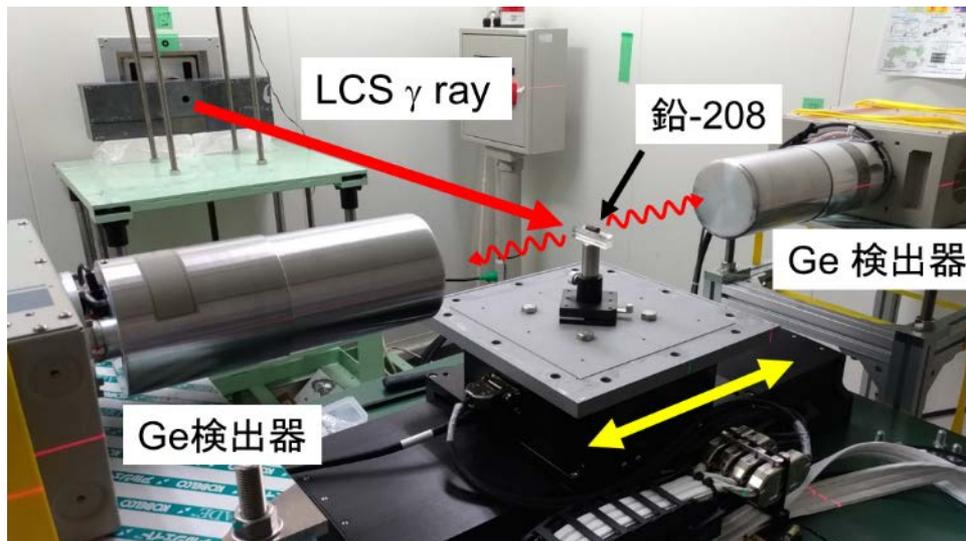
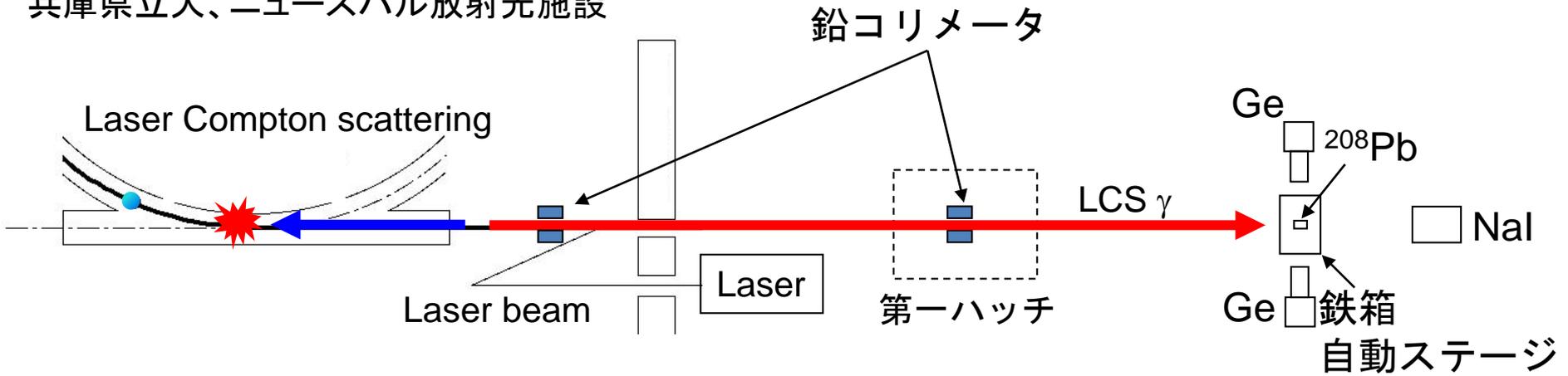
レーザー蓄積装置



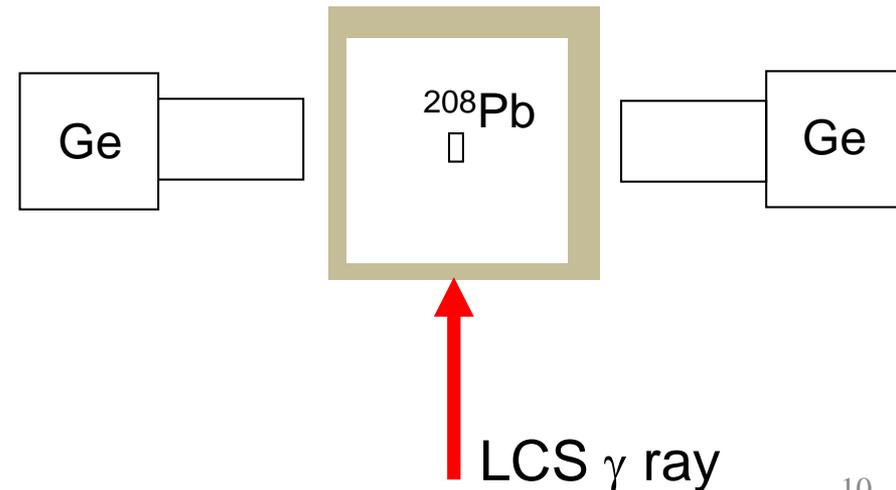
研究チーム

重遮蔽された物質の非破壊検知の技術実証

兵庫県立大、ニュースバル放射光施設



鉛208 (核物質模擬)
鉄箱の壁厚さ = 1.5cm, 3 cm



核物質の濃度が小さい場合の測定に対する懸念

Nondestructive Spent Fuel Assay Using Nuclear Resonance Fluorescence

B. J. Quiter^a, B. A. Ludewigt^b, V. V. Mozin^a, S. J. Tobin^a

Abstract
Quantifying the isotopic composition of spent fuel is an important challenge and essential for many nuclear safeguards applications, such as independent verification of the Pu content declared by a regulated facility, shipper/receiver measurements, and quantifying isotopic input masses at a reprocessing facility. As part of the Next Generation Safeguards Initiative, NA-241 has recently funded a multilab/university collaboration to investigate a variety of nondestructive methods for determining the elemental Pu mass in spent fuel assemblies. Nuclear resonance fluorescence (NRF) is one of the methods being investigated. First modeling studies have been performed to investigate the feasibility of assaying a single fuel pin using a bremsstrahlung photon source. MCNPX modeling results indicate that NRF signals are significantly more intense than the background due to scattered interrogation photons even for isotopes with concentrations below 1%. However, the studies revealed that the dominant contribution to the background is elastic scattering, which is currently not simulated by MCNPX. Critical to this effort, we have added existing NRF data to the MCNPX photonuclear data files and are now able to incorporate NRF physics into MCNPX simulations. Addition of the non-resonant elastic scattering data to MCNPX is in progress. Assaying fuel assemblies with NRF poses additional challenges: photon penetration through the fuel assembly lead to evaluate the efficacy of NRF.

B.J. Quiter et al. (2009), LBNL

LLNL-TR-483851

Preliminary Study of the Efficacy of Using Nuclear Resonance Fluorescence with Quasi-Monoenergetic Gamma-Ray Sources for Nuclear Safeguards Assay

M. S. Johnson, D. P. McNabb, J. M. Hall, J. J. Gonzalez

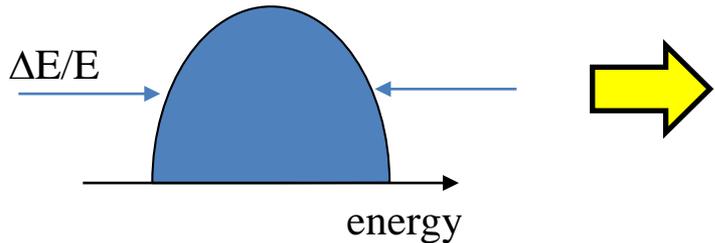
M.S. Johnson et al. (2011), LLNL

弾性散乱が主要なバックグラウンドとなる可能性がある

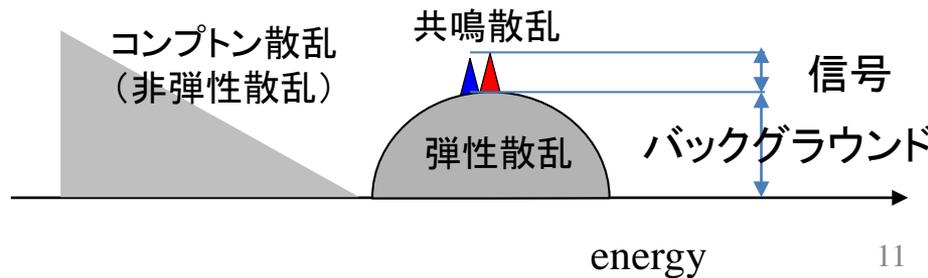
原子核共鳴蛍光散乱と競合する弾性散乱

測定すべき核種の濃度が小さいと S/N が悪化
→ 実用上の問題となる

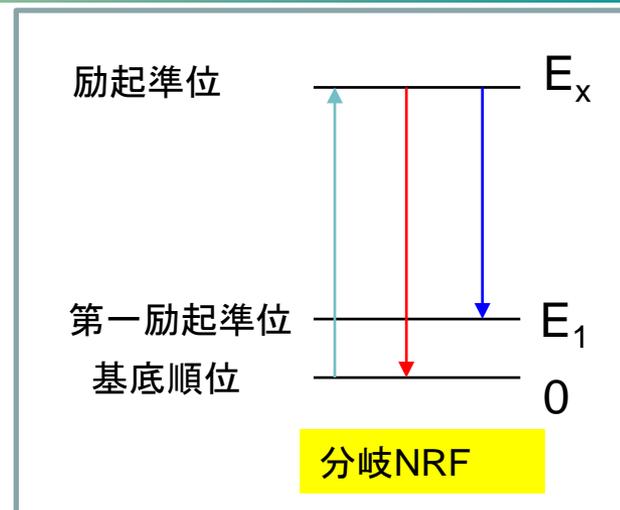
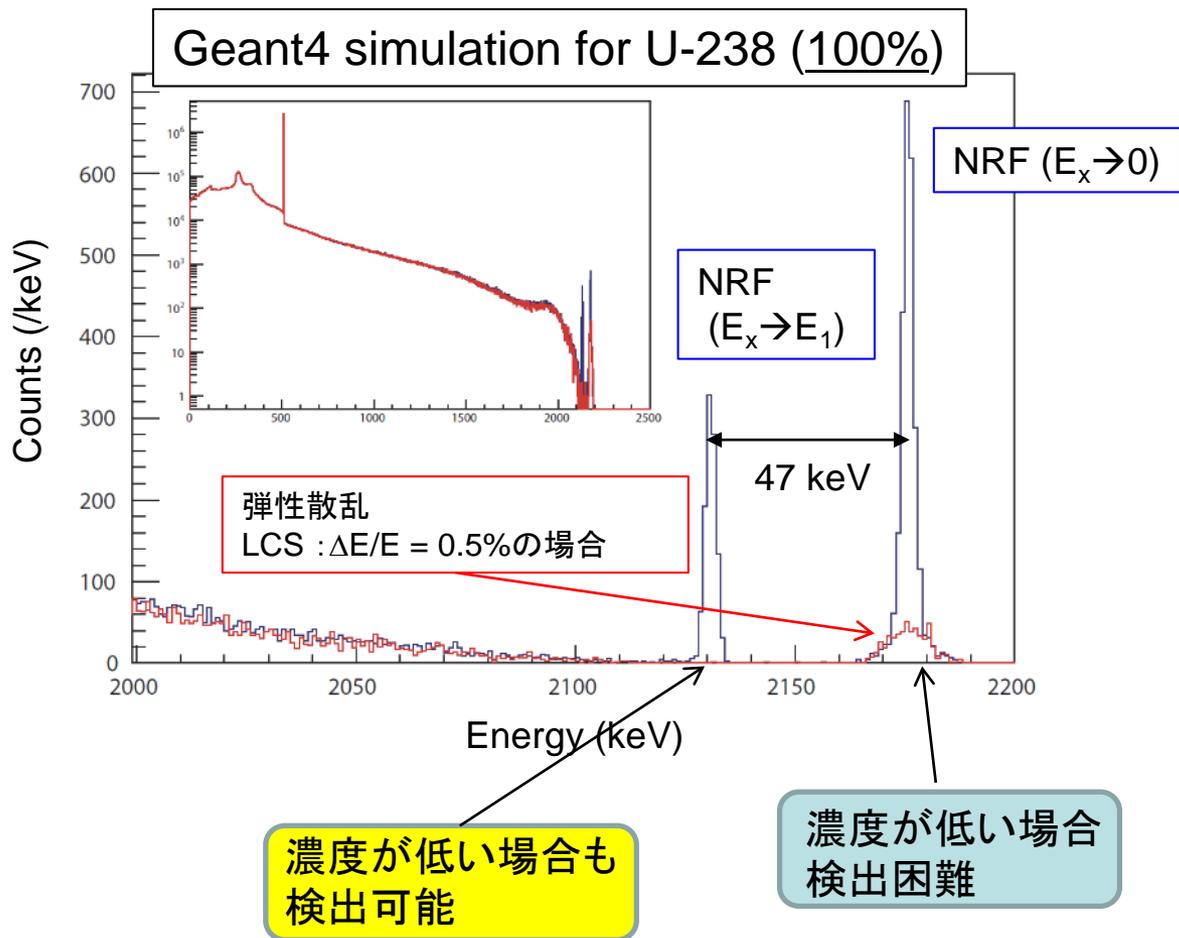
入射LCSガンマ線
エネルギースペクトル



散乱ガンマ線
エネルギースペクトル



分岐NRF測定＝弾性散乱バックグラウンドの分離



ガンマ線源のエネルギー幅

既存の LCS : $\Delta E/E \sim 3-5\%$

次世代 LCS : $\Delta E/E < 0.5\%$

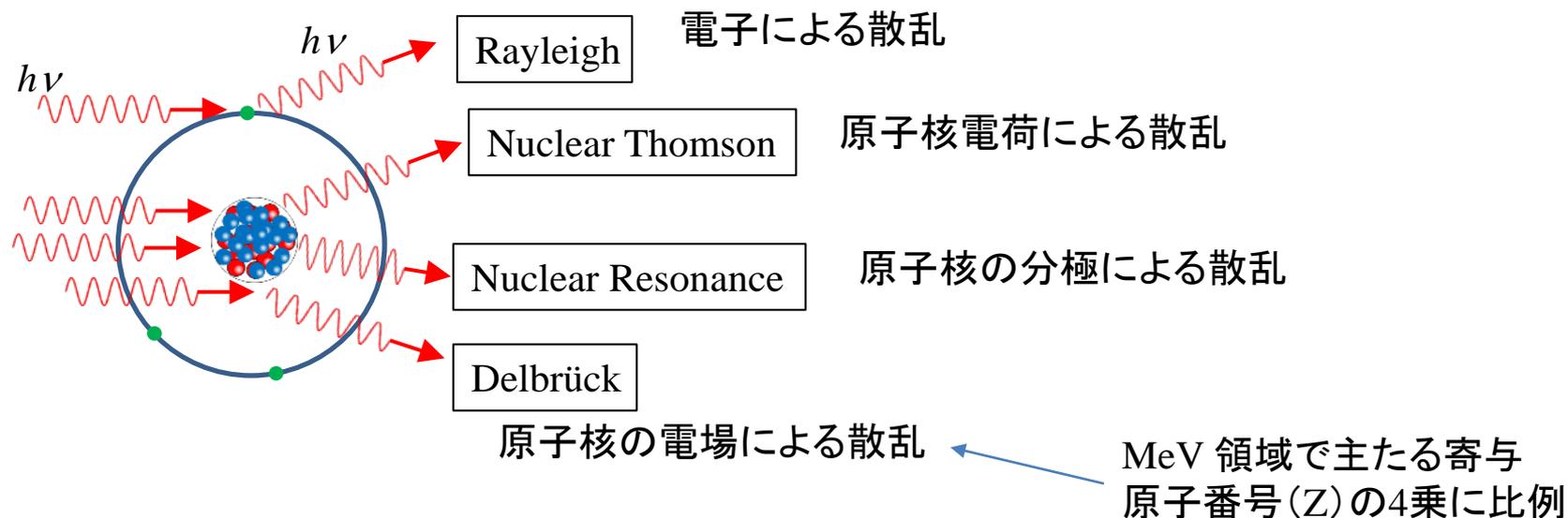
分岐NRF と弾性散乱を識別

LCSの単色度が向上すれば、弾性散乱のバックグラウンドを分離して測定できる。

T. Shizuma et al.,
Nucl. Instr. Meth. A 737, 170 (2014)

MeVガンマ線の弾性散乱

MeV ガンマ線の弾性散乱



それぞれの散乱は位相を考慮して足し合わされる = 量子力学的干渉効果

特に計算が難しいのが、Delbrück散乱

入射光子と原子核電場(仮想光子)の散乱 → QED(量子電磁力学)で記述

精確な断面積を得るには膨大な計算(特異点を含む積分)。「京」でも困難。

いくつかの近似のもとで計算した断面積データのみが存在。

Geant4 へのデルブリュック散乱の組み込み

核物質の検知分析装置の設計、
QED検証実験の立案のため、
Delbrück 散乱を含む
モンテカルロコードが必要

Delbrück 散乱を計算できる
モンテカルロコードが存在しない

Geant4 に Delbrück 散乱を組み込み

The screenshot shows the Geant4 website. The top navigation bar includes 'Collaborator Login', 'Download', 'User Forum', 'Contact Us', and 'Gallery'. The main content area is titled 'Overview' and describes Geant4 as a simulation toolkit for particle passage through matter. Below this are four columns: 'Applications' (with an image of a satellite), 'User Support' (with a globe), 'Publications' (with a detector image), and 'Collaboration' (with a group photo). A 'News' section on the right lists recent releases: 'Release 10.5-BETA' (29 Jun 2018), 'Patch-02 to release 10.4' (25 May 2018), '2018 planned developments' (12 Mar 2018), and 'Patch-03 to release 10.3' (20 Oct 2017).

従来の Geant4 では、Rayleigh 散乱のみ考慮

量子力学的干渉を含め、3種の散乱を
考慮できるように拡張

Rayleigh $A^R = a_{Re}^R + a_{Im}^R \mathbf{i}$

Nuclear Thomson $A^T = \frac{Z^2 m}{M} (1 + \cos^2 \theta)^{1/2}$

Delbrück $A^D = a_{Re}^D + a_{Im}^D \mathbf{i}$

$\frac{d\sigma^{ES}}{d\Omega} = r_0^2 |A^R + A^T + A^D|^2$ M. Omer and R. Hajima, NIM-B (2017)



2018年12月
Geant4 10.5
に収録



さらなる拡張
偏極ガンマ線の弾性散乱

M. Omer and R. Hajima,
New J. Phys. (2019)

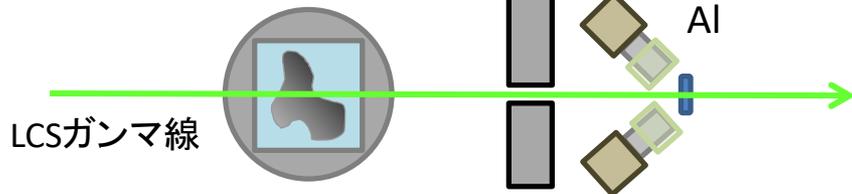


Geant4 10.7に収録

技術開発の成果(その他)

透過法による非破壊分析

TMI-2 キャニスター(模擬)

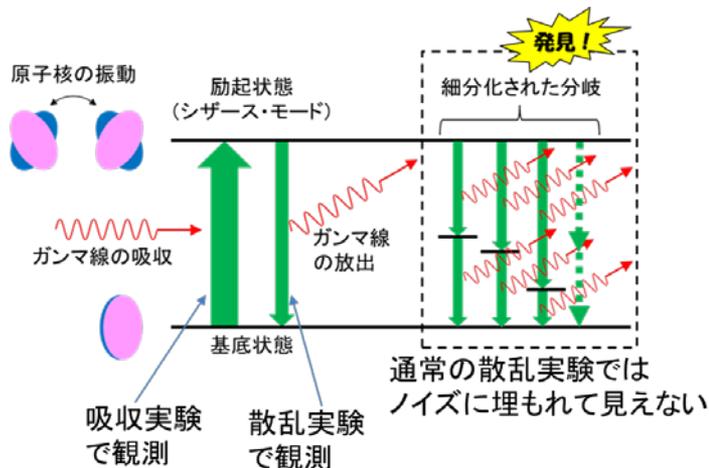


測定試料(上流)の共鳴吸収を標準試料(下流)の共鳴散乱の大きさから測定する

試料	計算値	測定値
コンクリート	0.96±0.01	0.95±0.02
キャニスター	0.96±0.01	0.97±0.03
Al	0.66±0.01	0.65±0.02

C.T. Angell et al., Nucl. Instr. Meth. B 347, 11 (2015)

原子核のはさみ状の振動を解明



ラグビーボール型の原子核(ウラン、プルトニウム含む)に共通する原子核の電磁氣的振動(はさみ状)を解明

C. T. Angell et al., Phys. Rev. Lett. (2016)
 静間俊行、日本物理学会誌 (2019)

国際会議、Nuclear Photonics の立ち上げ



- 第0回: 東海 (2014)
- 第1回: Monterey (2016)
- 第2回: Brasov, Rumania (2018)
- 第3回: 倉敷 (2020→2021)

- コンプトン光源のための加速器技術
- 超高強度レーザー、光学技術
- 光核反応の精密分光
- 同位体検知、分析、イメージング
- 核異性体の製造
- 光核分裂、光核変換
- 超相対論領域の光と物質の相互作用、QED効果
- レアアイソトープの製造と測定
- 天体光核物理
- ガンマ線光学素子、検出器
- ガンマ線による陽電子、中性子、電子、陽子発生
- 産業利用(セキュリティ、エネルギー、医療など)

NRF技術実証試験ワークショップ

2020年1月24-25日、ニュースバル放射光施設にて開催。
文科省補助金：核セキュリティ等強化推進事業費(2011-2019)の事後評価



産業技術総合研究所、LLNL、IAEA、
EC/JRC、ANSTO、STUK から評価者

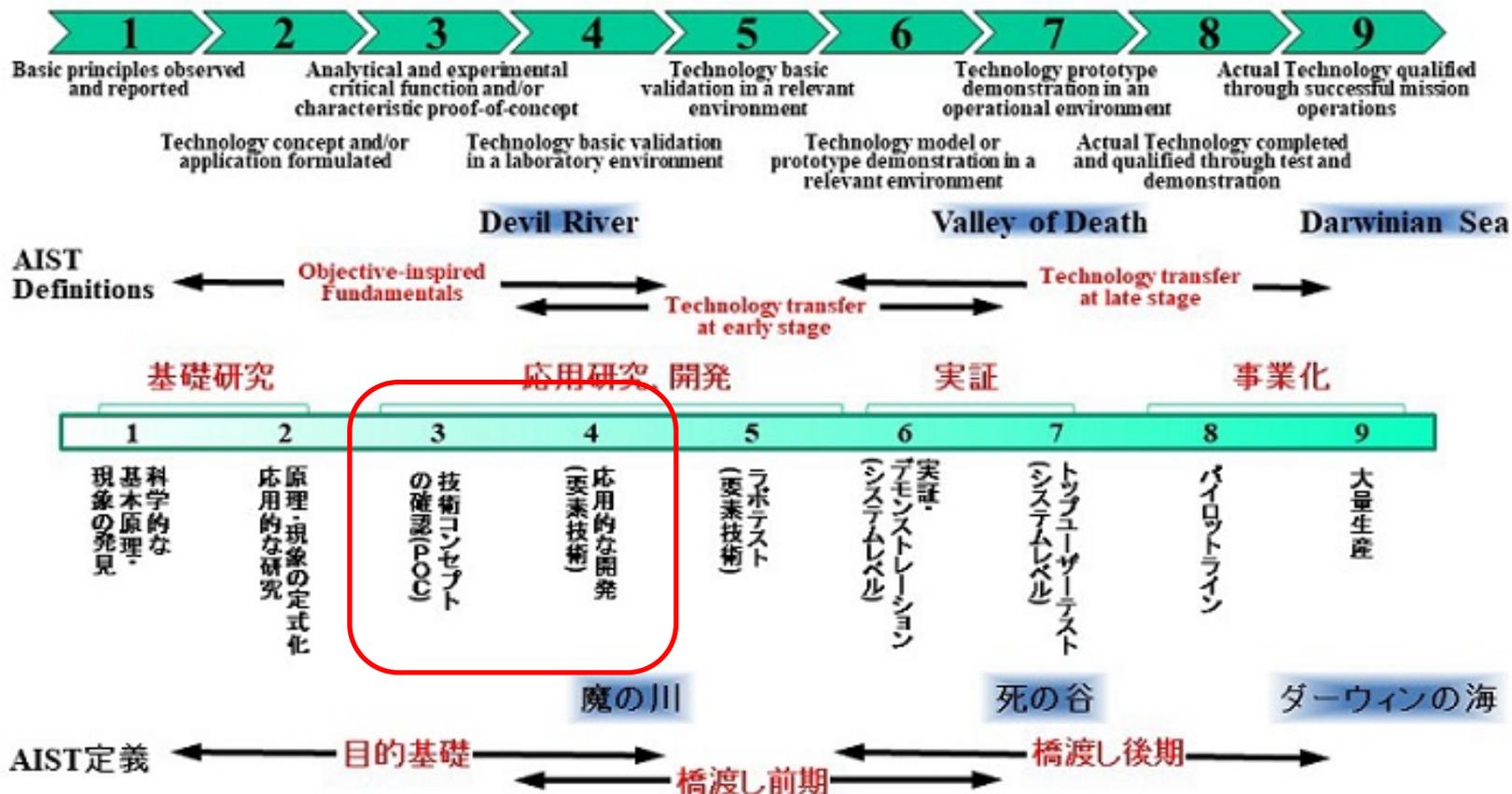


重遮蔽した核物質(模擬物質)の
検知実験のデモンストレーション

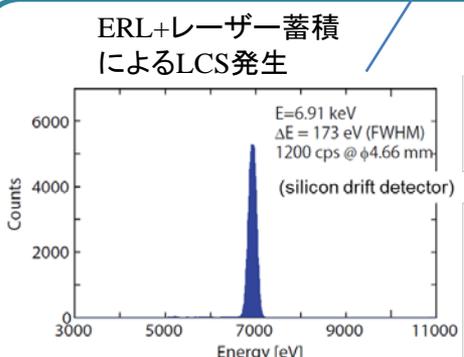
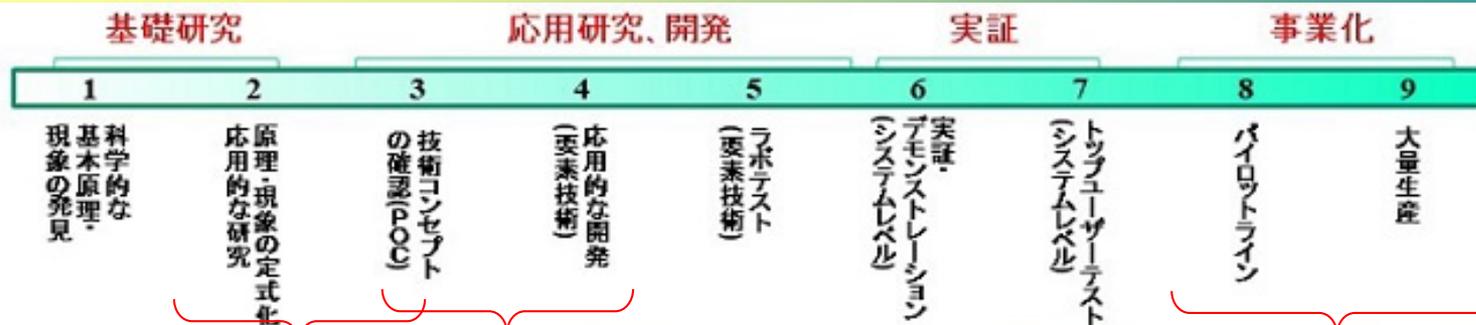
NRF NDA is a unique method that categorized as a long-term development technique. Applied research (TRL 3) and small scale prototype experiments (TRL 4) were carried out.

「核セキュリティ及び核不拡散分野における独創的な非破壊測定技術として注目に値する。目標と課題を達成したのみならず核データや基礎科学やその理解に有用なアプローチを提供した。」

• **Technology Readiness Level (TRL)** – originated by NASA for the first time (1989)
各技術レベルの定義には多くのバージョン



ロードマップ: 実用化を目指して (TRL=3→TRL=9)



鉄箱中の核物質 (模擬) の検知
設計、解析用シミュレーションコードの完成



これら実験に基づく試算。
→ 1.5 cm の鉄箱に隠ぺいされた 1 kg のU-235 の場合、検出器1台あたりの NRF 信号 18 cps (毎秒カウント数)
→ 検出器を複数台並べることで、1分以内で検知可能



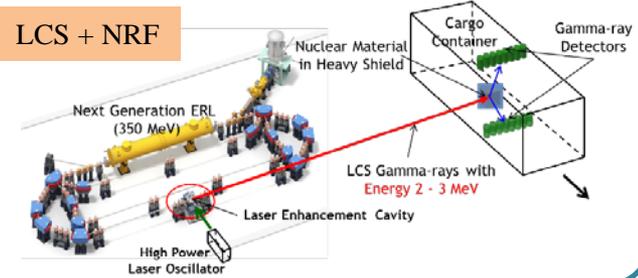
実用機イメージ

前段スクリーニング



X線透過イメージング
または、X線後方散乱イメージング

LCS + NRF



超伝導加速器の低コスト化、小型化が鍵

高压ガスの規制を受けない伝熱冷却方式、high-Q (低損失) の超伝導加速空洞など、国内外で精力的に研究が進んでいる。
小型化には、エネルギー回収型リニアックの多重周回も有効。