

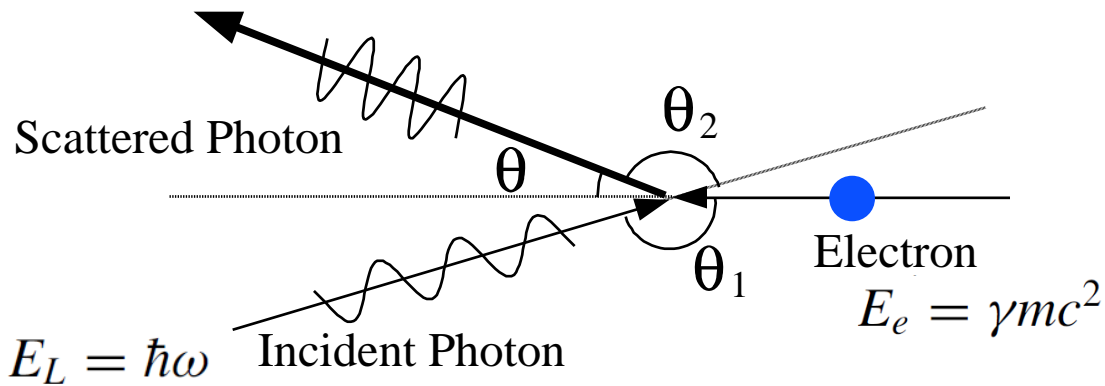
# レーザー・コンプトン散乱による 高輝度ガンマ線の実現とその応用

羽島良一、沢村勝、永井良治、西森信行、  
早川岳人、静間俊行、Christopher T. Angell

日本原子力研究開発機構

第12回日本加速器学会年会  
2015年8月5日  
福井県敦賀市

# レーザーコンプトン散乱 (Laser Compton Scattering (LCS))

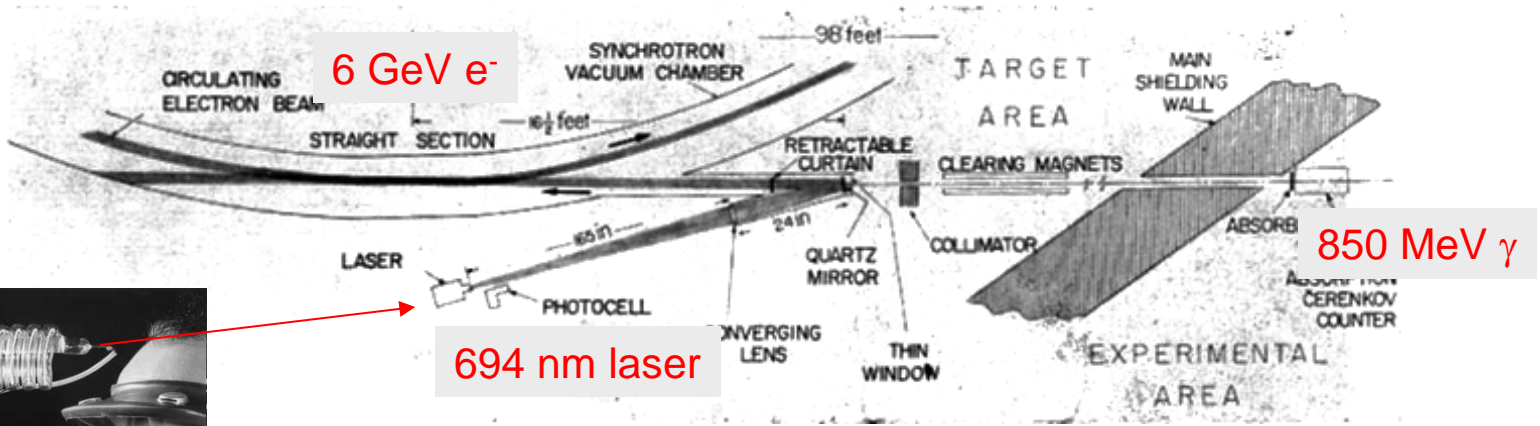


$$E_X = \frac{E_L(1 - \beta \cos \theta_1)}{1 - \beta \cos \theta + (E_L/E_e)(1 - \cos \theta_2)}$$

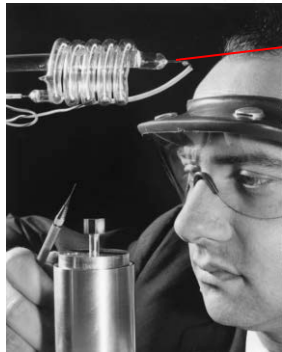
$$E_X \simeq \frac{4\gamma^2 E_L}{1 + (\gamma\theta)^2 + 4\gamma E_L/(mc^2)} \quad \text{for head-on collision}$$

- ✓ 点光源からのコーン状ビーム
- ✓ エネルギー可変
- ✓ 偏光 (直線、円)
- ✓ エネルギーと散乱角に相関 → コリメータによる単色化

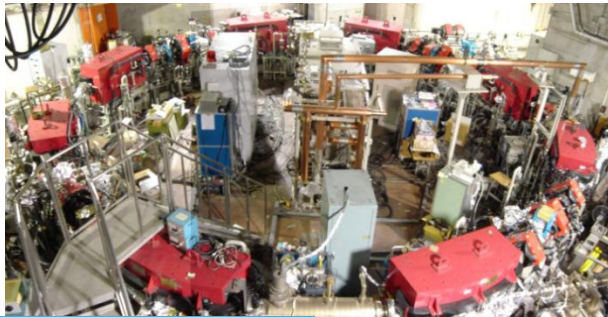
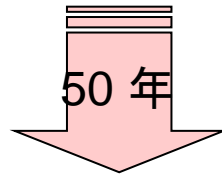
# LCSの歴史



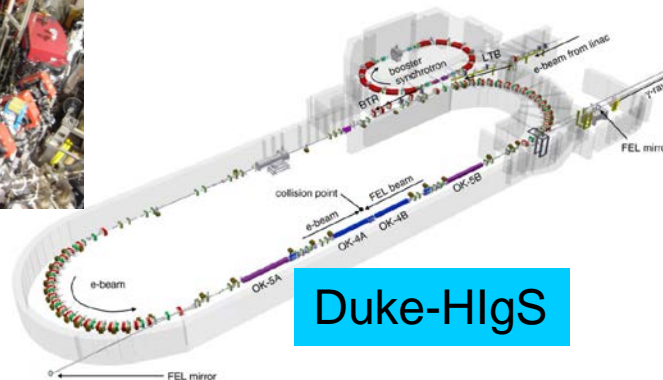
C. Bemporad et al., Phys. Rev. (1965)



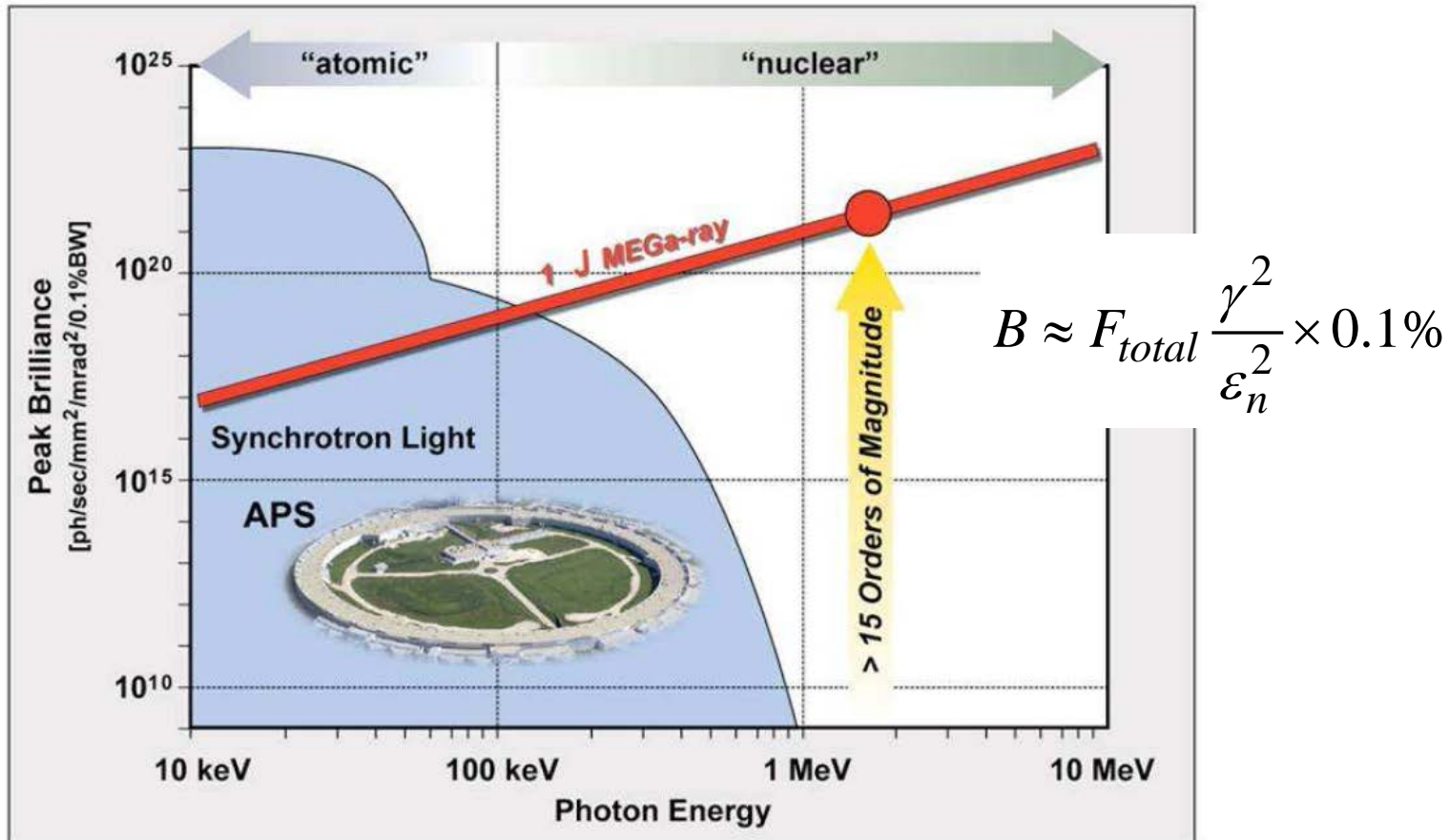
メイマンによるレーザーの発明の5年後に最初のLCS実験



AIST-TERAS



# LCS ガンマ線の輝度

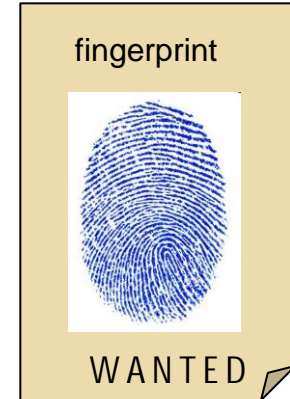
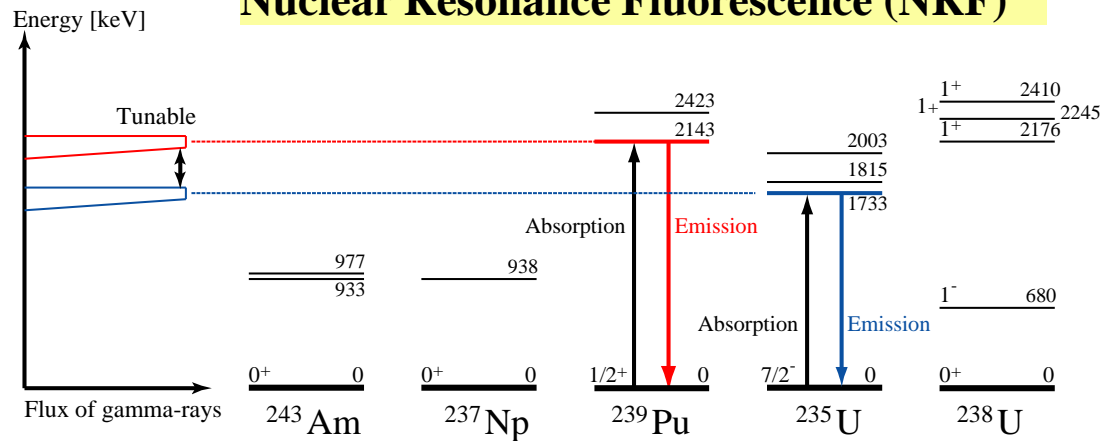


C.P.J. Barty, “White Book of ELI Nuclear Physics”

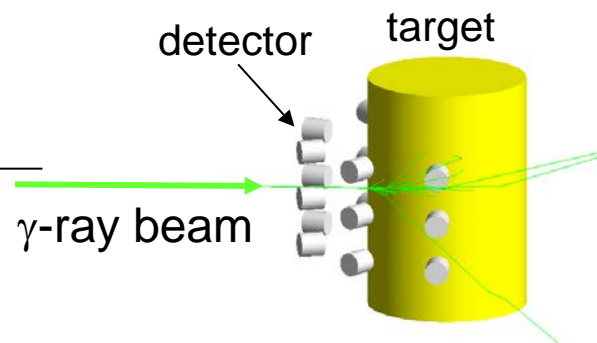
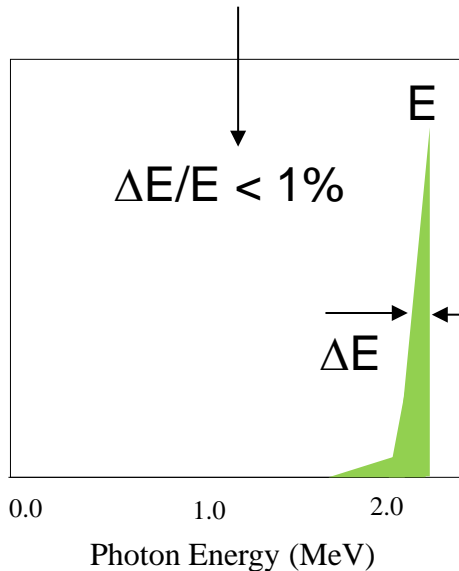
LCS は 1 MeV 以上で唯一の高輝度光源

# 原子核共鳴蛍光散乱に基づく核種の非破壊検知・分析

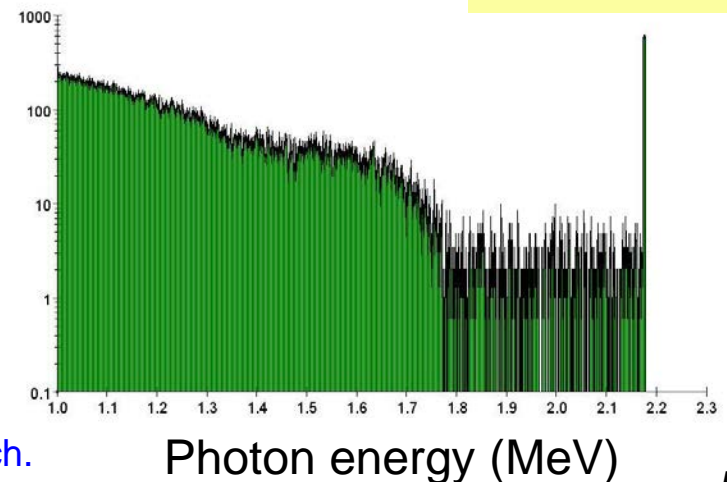
## Nuclear Resonance Fluorescence (NRF)



2.176 MeV for U-238



NRF signal  
U-238  
2.176 MeV



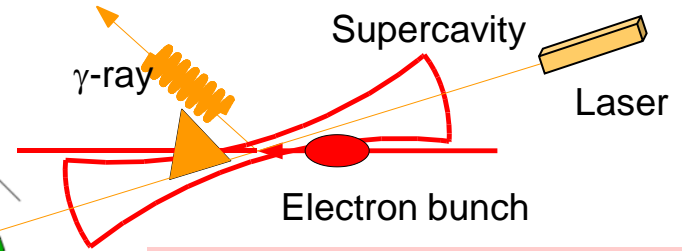
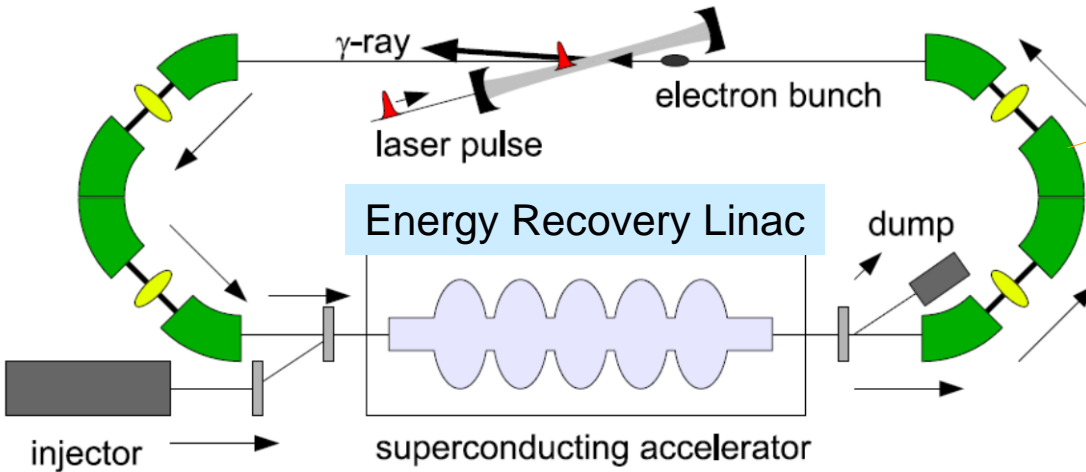
R. Hajima et al., J. Nucl. Sci. Tech.  
45, 441-451 (2008)

# 高輝度ガンマ線源の提案 – エネルギー回収型リニアック(ERL)

## エネルギー回収型リニアック

・高繰り返し、大電流、低エミッタンスの電子ビーム

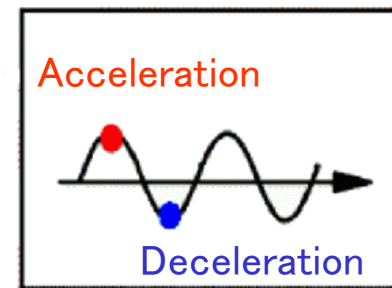
## レーザー蓄積装置



レーザー光子を蓄積、再利用

高輝度ガンマ線

電子エネルギーを回収、再利用



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

0.1 ph/eV/s →  $10^7$  ph/eV/s

産総研TERAS

ERL

# 核セキュリティ技術としてのLCSガンマ線

核不拡散・核セキュリティへの国際的な関心の高まり  
→ 核セキュリティサミット 2010年から隔年開催



核物質の測定、検知及び  
核鑑識に係る技術の開発

日本が貢献できる先端技術として  
LCS ガンマ線NDAが取り上げられた

NDA=Non-Destructive Assay

核セキュリティ強化等推進事業費補助金の交付を受けて、以下の技術開発を実施

- (1) 大強度LCS発生のための基盤技術  
→ cERL における LCS発生の実証試験
- (2) 高レベルの放射能を有する試料にも適用可能な測定手法  
→ 測定手法の提案と Duke 大学における実証試験  
→ モンテカルロコードの開発(NRFGeant4)

# コンパクトERLにおけるLCSの発生実証



ERL開発棟

- 周回軌道、LCSの発生と測定に必要な装置の製作と設置
- 高出力モードロックレーザーの開発
- LCSの発生実験

超伝導加速器  
(9-セル x 2 台)

電子銃

LCS 実験室

LCS ガンマ線

LCS 発生部

周回軌道

- 電子ビーム = 20 MeV, 0.1 mA
- LCS フラックス ~  $4.3 \times 10^7$  ph/s





# cERLにおけるLCS発生実験(2015年3月-4月)

## Parameters of electron beams:

Energy [MeV]	20
Bunch charge [pC]	0.36
Bunch length [ps, rms]	2
Spot size [ $\mu\text{m}$ , rms]	30
Emittance [mm mrad, rms]	0.4
Repetition Rate [MHz]	162.5
Beam current [ $\mu\text{A}$ ]	58

## Parameters of laser (enhanced by cavity):

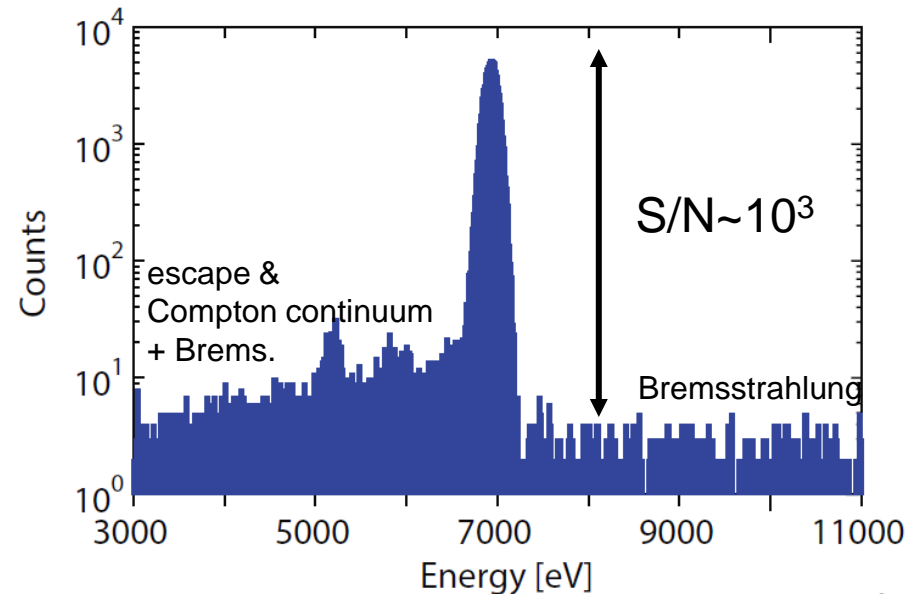
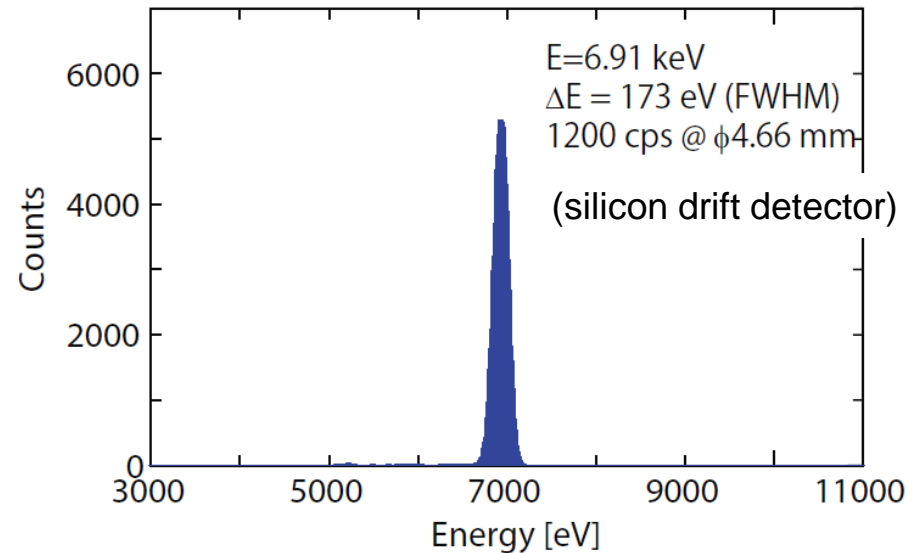
Center wavelength [nm]	1064
Pulse energy [ $\mu\text{J}$ ]	64
Pulse length [ps, rms]	5.65
Spot size [ $\mu\text{m}$ , rms]	30
Collision angle [deg]	18
Repetition rate [MHz]	162.5
Intracavity power [kW]	10

## Results:

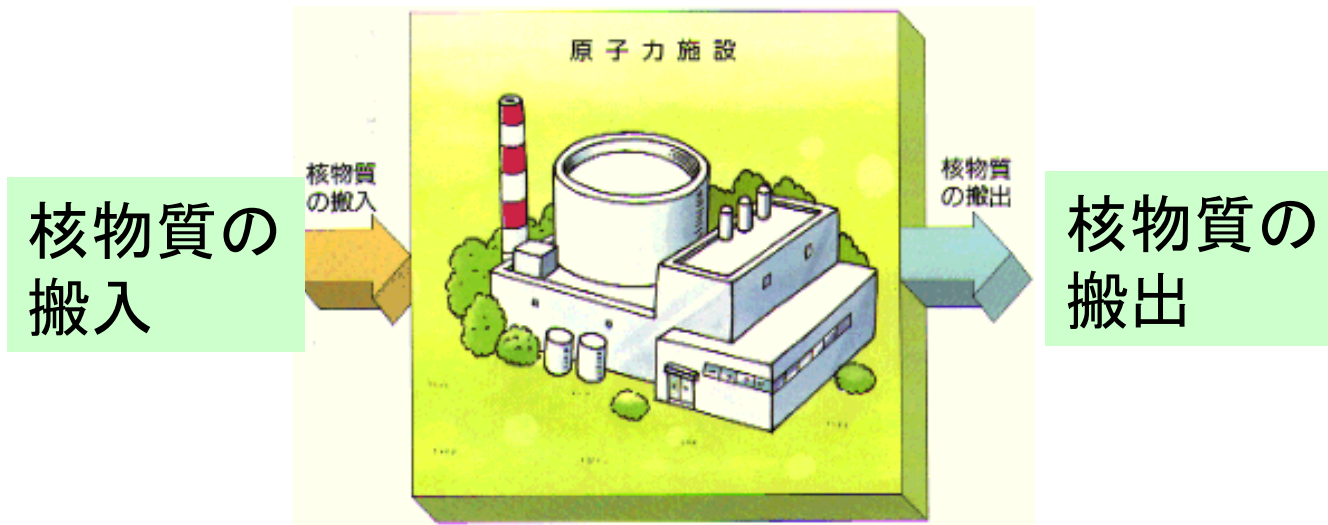
Photon energy = 6.9 keV  
Detector count rate = 1200 cps @  $\phi$ 4.66mm (\*)  
Source flux =  $4.3 \times 10^7$  ph/s (\*\*)

(\*) Detector collecting angle is  $4.66\text{mm}/16.6\text{m} = 0.281$  mrad

(\*\*) CAIN/EGS simulations with the detector count rate



# 保障措置(核不拡散)

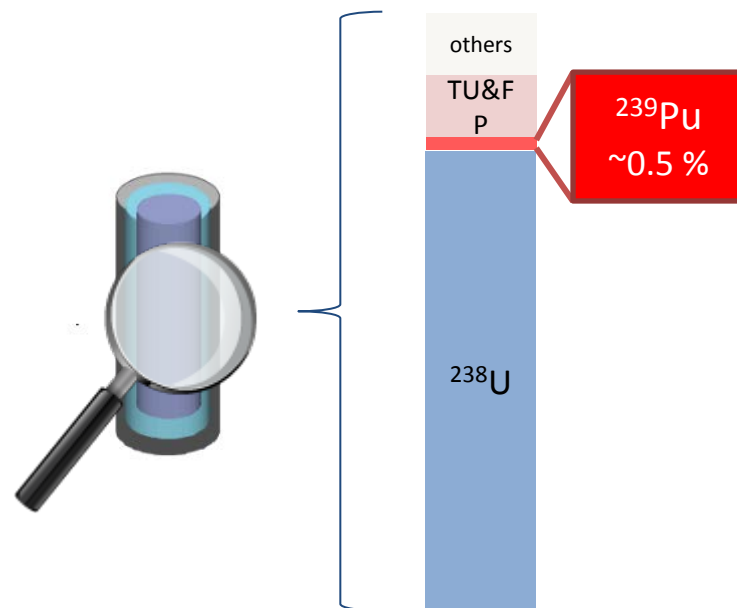


## 計量管理

- ◆ 核物質量の測定と申告
- ◆ 事業者の責任で実施

## 査察

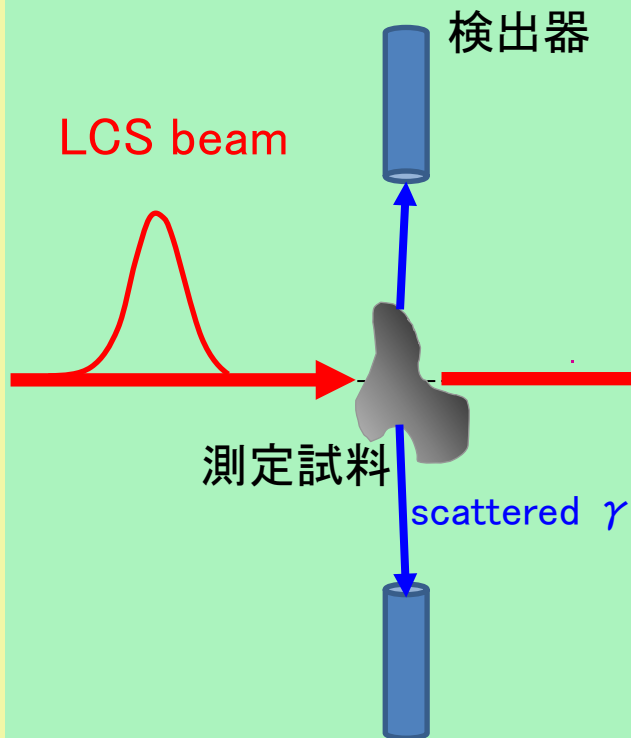
- ◆ 帳簿確認、現場測定による核物質量の確認
- ◆ 封印、監視
- ◆ 国際原子力機関(IAEA)、政府が実施



# LCS-NDA:非破壊測定の手法

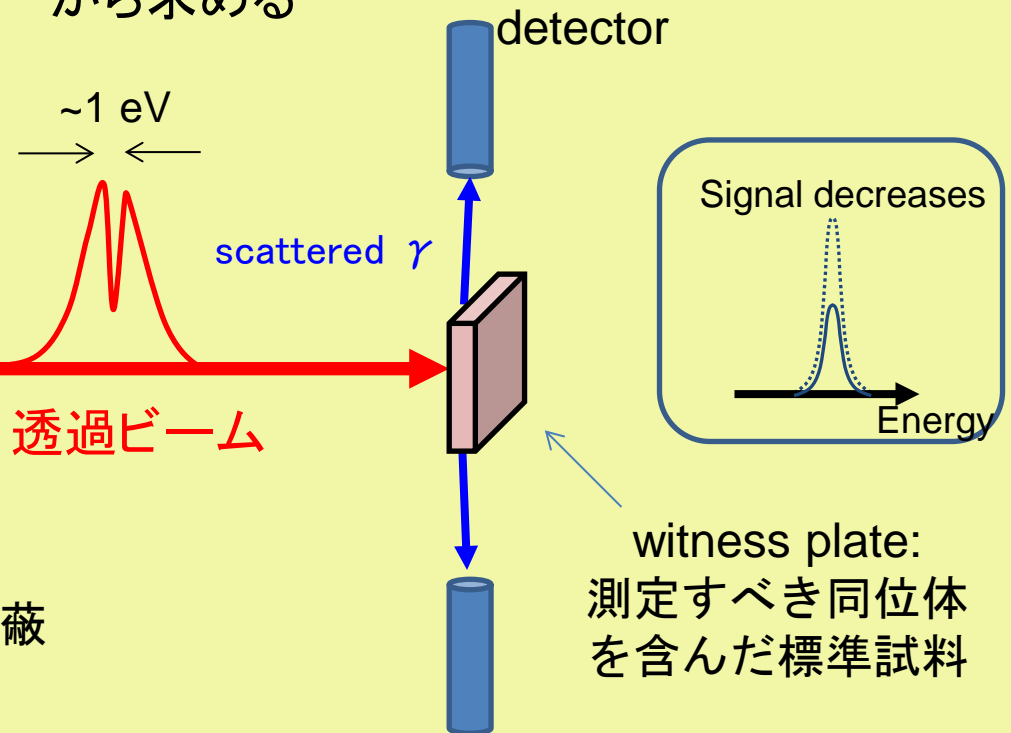
## 共鳴散乱法

測定試料からの  
共鳴散乱ガンマ線を測定



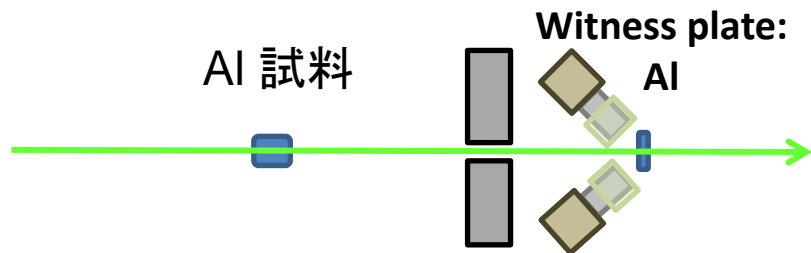
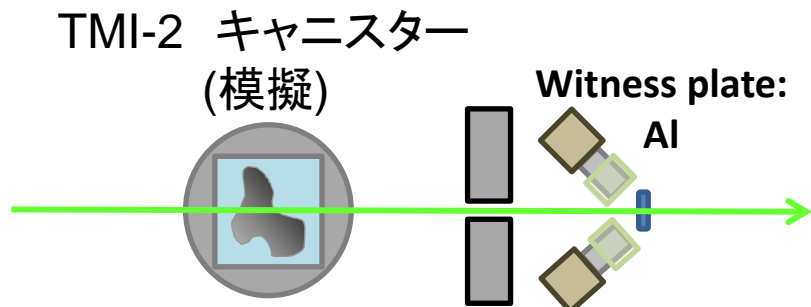
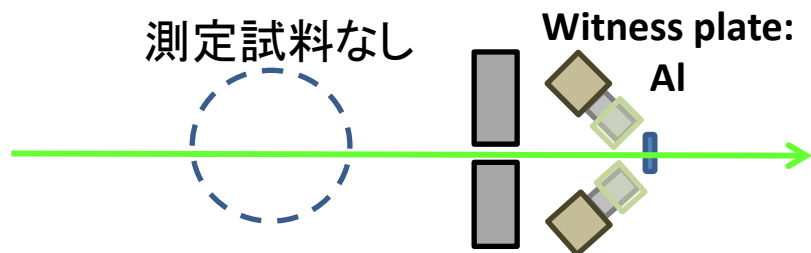
## 共鳴吸収法

測定試料による共鳴吸収を  
witness plate からの共鳴散乱量の減少  
から求める



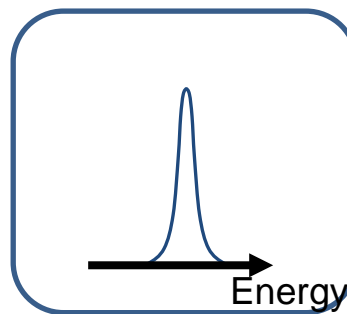
# スリーマイル島キャニスターの模擬測定実験

Duke/HIγS (LCS施設)にて実験

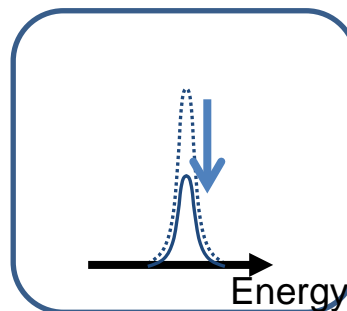


模擬物質として「アルミ」を使用  
--- Al-27 は Pu-239 とほぼ同じ  
エネルギーに共鳴準位をもつ

Witness plate の共鳴散乱に変化なし



共鳴散乱の減少があるはず

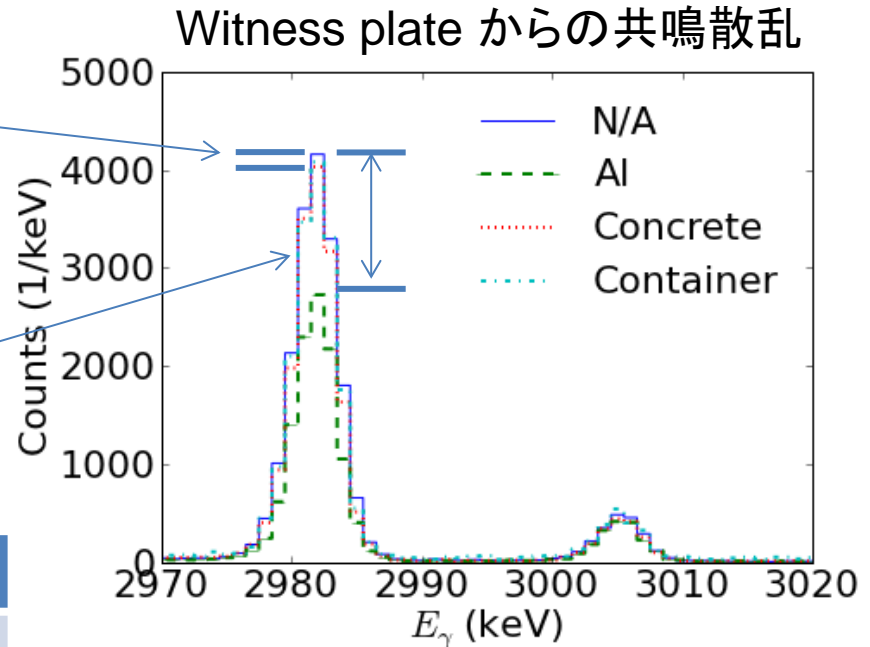


# TMI-2キャニスターの模擬測定実験

共鳴透過法により核物質が測定できることを確認

キャニスターによるわずかな吸収  
→ コンクリートがアルミを含んでいるため

アルミターゲットによる吸収



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

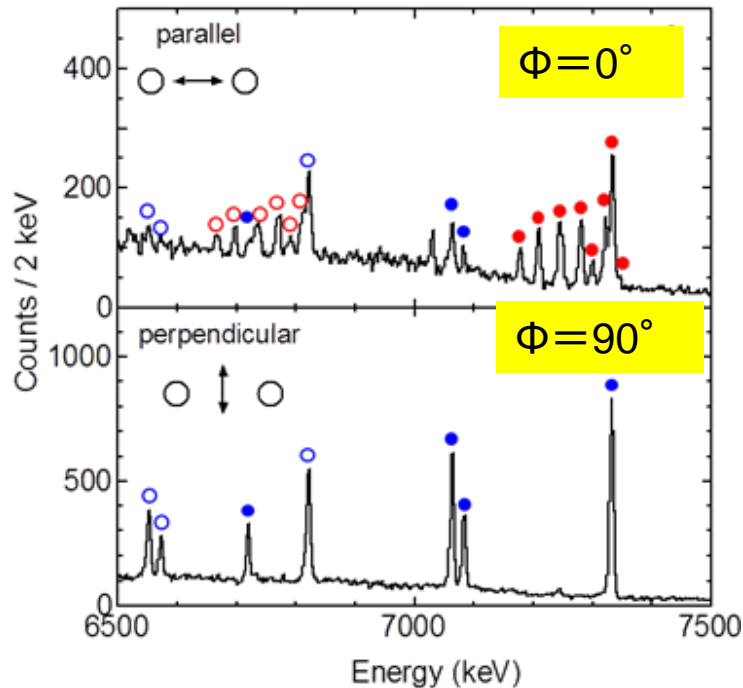
実験、理論解析から  
ERL-LCS を使えば、3.7-22 時間で  
溶融燃料中のPu-239 を3%の精度で  
測定できる。

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

C.T. Angell et al., to be published

# LCSガンマ線の基礎科学への応用

## 原子核構造



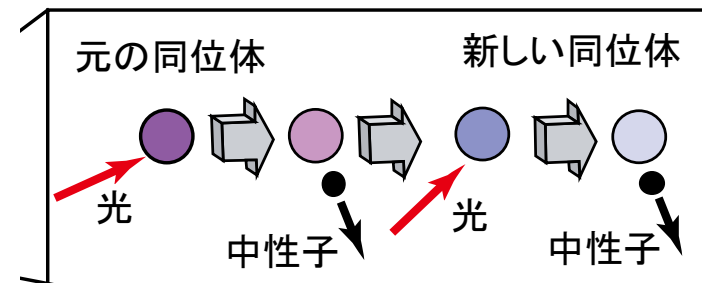
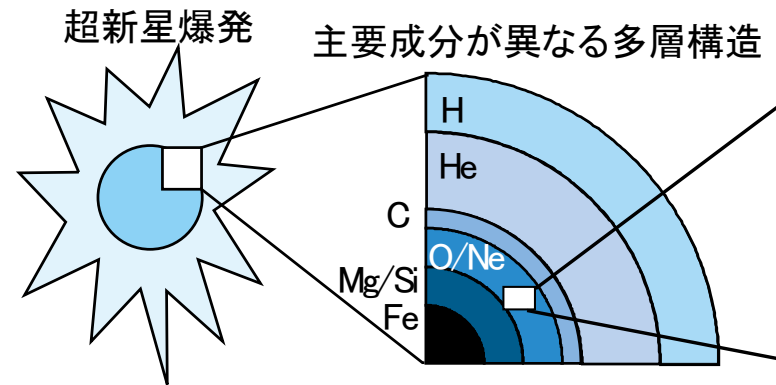
T. Shizuma et al., PRC (2008)

直線偏光ガンマ線による  
共鳴散乱の角度分布測定



励起状態のパリティを決定

## 超新星爆発、光核反応による元素合成



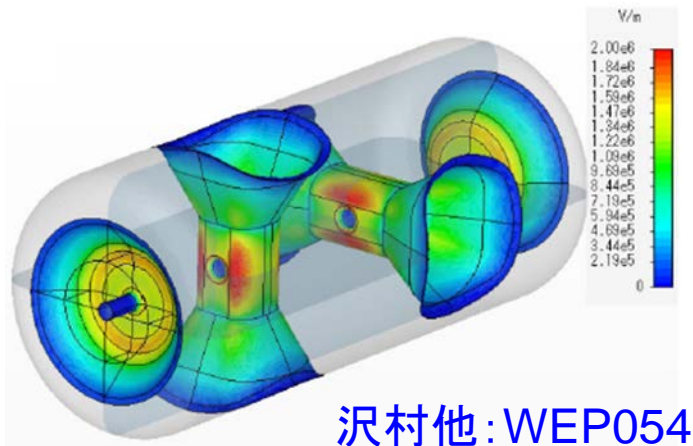
大強度ガンマ線による光核反応  
断面積の系統的な測定



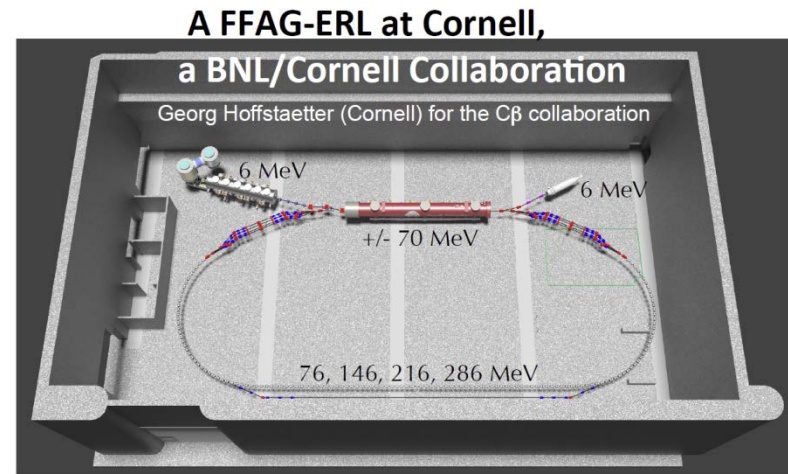
元素合成モデルの精密化

# 今後の研究: 加速器の省電力・小型化

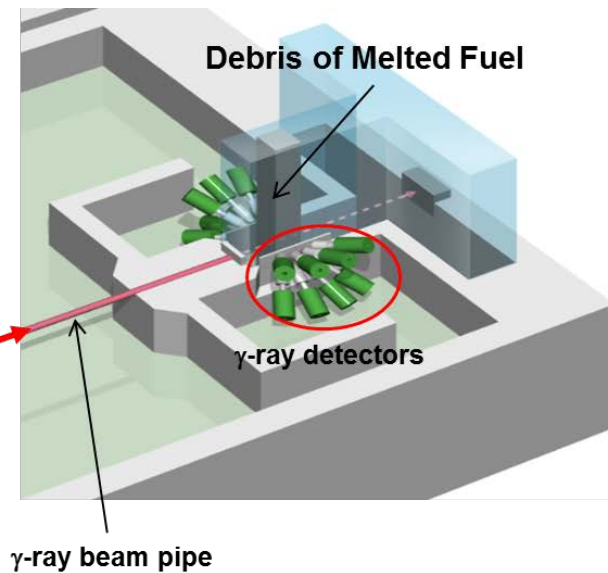
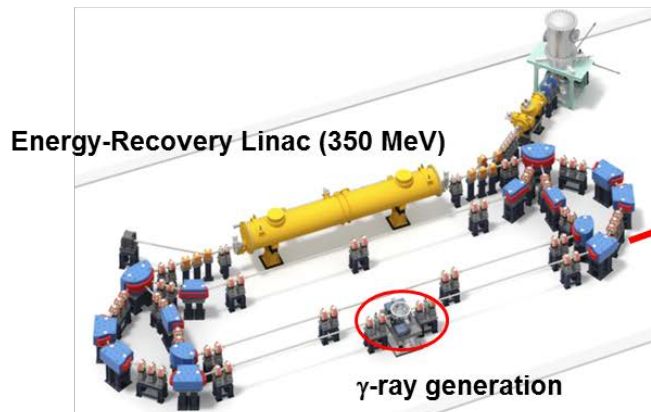
## 4K 動作可能なスポーク空洞



## 多重周回ERL



## 溶融燃料測定用ERL-LCS



# まとめ

- LCSガンマ線は、加速器、レーザーとともに発展
- MeV エネルギーで唯一の高輝度光源として期待
  - 核セキュリティ、核不拡散のための核種の非破壊測定
  - 原子核物理を中心とした基礎科学
- ERLとレーザー蓄積装置の組み合わせ
  - cERL にてLCS発生の実証
  - 小型化、省電力化の取り組み



# 謝辞

- JAEA、量子ビーム応用研究センター
  - 次世代レーザー研究グループ

森道昭



- JAEA、核セキュリティ核不拡散総合支援センター
  - 瀬谷道夫、小泉光生



- KEK

- 赤木智哉、小菅淳、本田洋介、荒木栄、浦川順治、照沼信浩
- 河田洋、小林幸則、cERL チーム

