



2019年7月26日

可搬型XバンドライナックX線・中性子源による
福島燃料デブリその場U/Pu濃度分析

On-site Fukushima Fuel Debris U/Pu Density Analysis
by Portable X-band Linac X-ray/Neutron Sources

上坂 充, 三津谷有貴

東京大学大学院工学系研究科・原子力専攻

芝 知宙

日本原子力研究機構

内容

1. 全体の計画
2. 可搬型950keV/3.95MeV X線源による
2色X線CT
3. 可搬型3.95MeV中性子源によるU/Puの判定
4. まとめと今後の課題



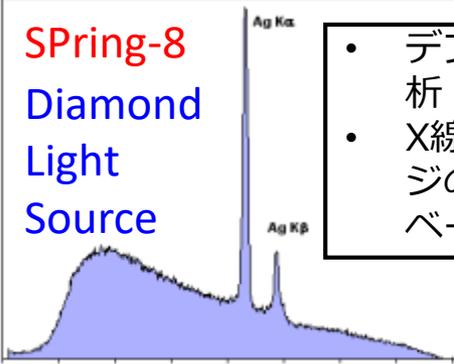
英・日で作る模擬デブリ



- デブリの化学分析
- X線CTイメージのデータベースの作成

本事業のシナリオ

SPring-8
Diamond
Light
Source



- デブリのSR解析
- X線CTイメージのデータベースの作成

IRIDで開発が進められている燃料デブリ内で取得する情報（放射能分布等）のソフトデータ（=C_B）への取り込み検討

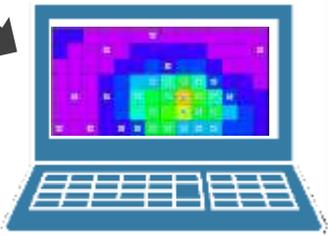


小型・可搬型
加速器X線源



デブリサンプル
組成情報（=C_A）

C_B
C_A



クリギングを用いた
デブリ塊マップ

その場 元素分析CT装置



- デブリの顕微分光分析
- X線CTイメージのデータベースの作成

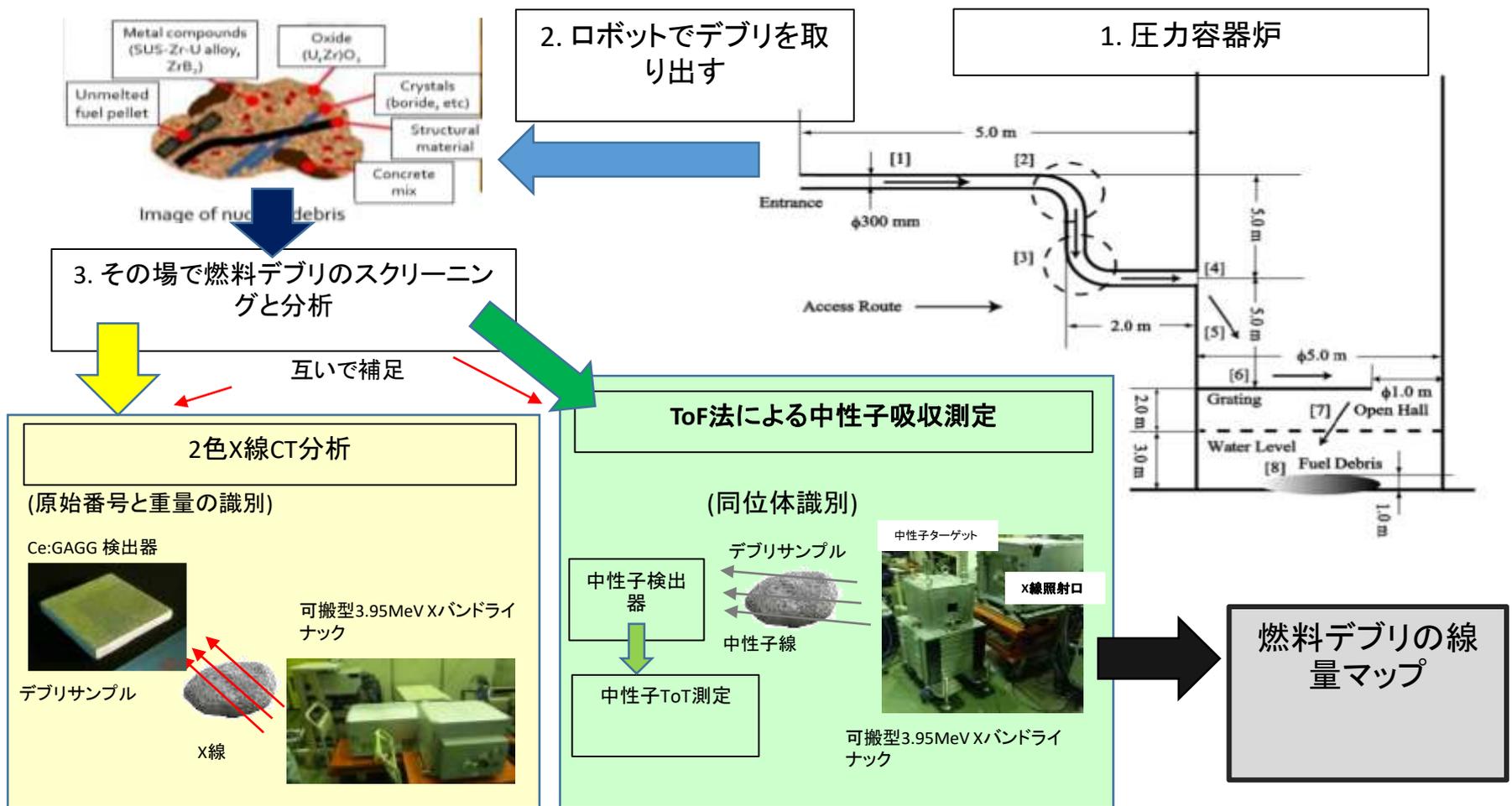
安全な
デブリ取り出し
戦略への応用



デブリ計量管理への応用



福島1F燃料デブリその場分析システム



燃料デブリ取り出しロードマップ

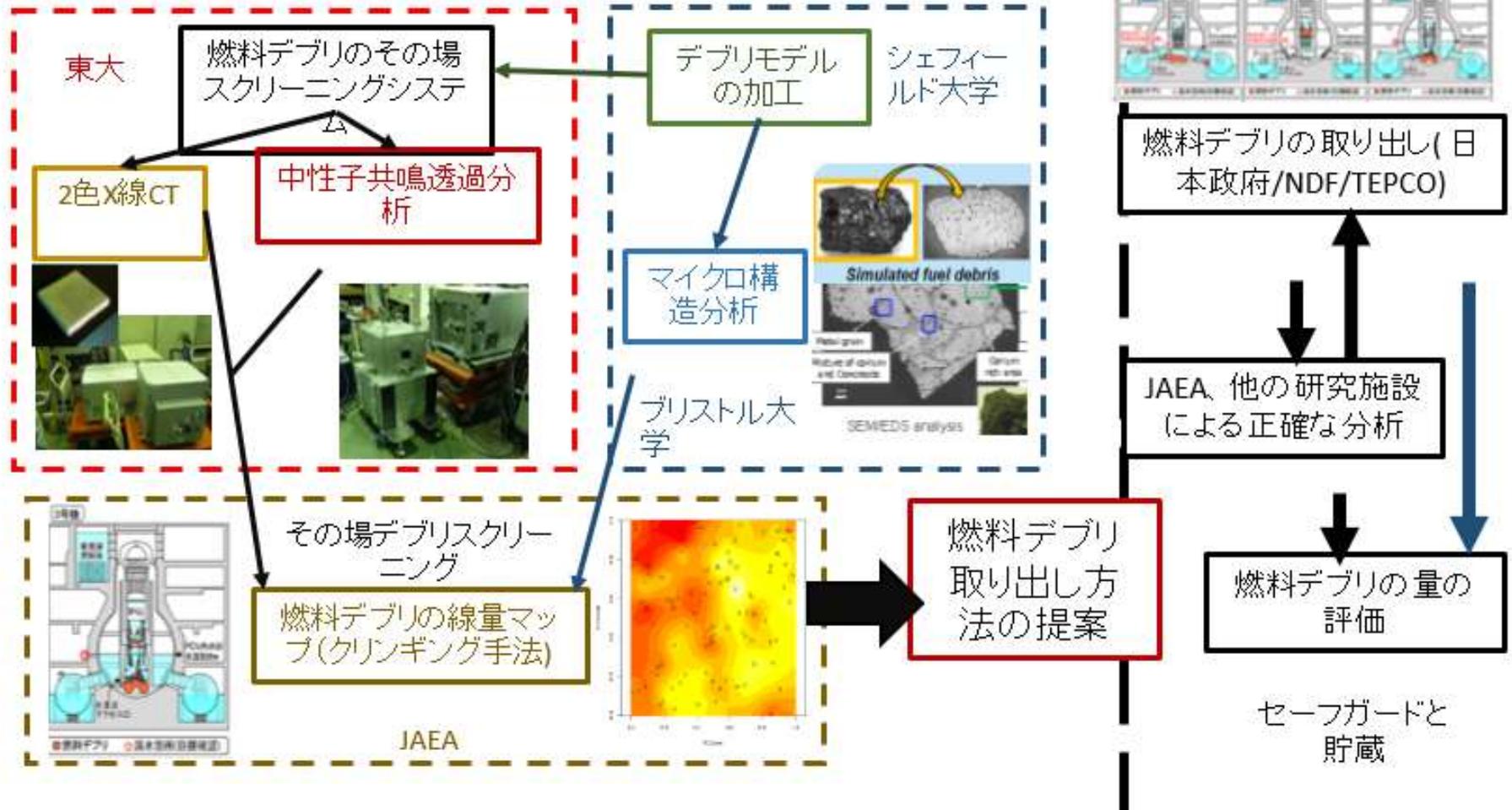
2018

2019

2020

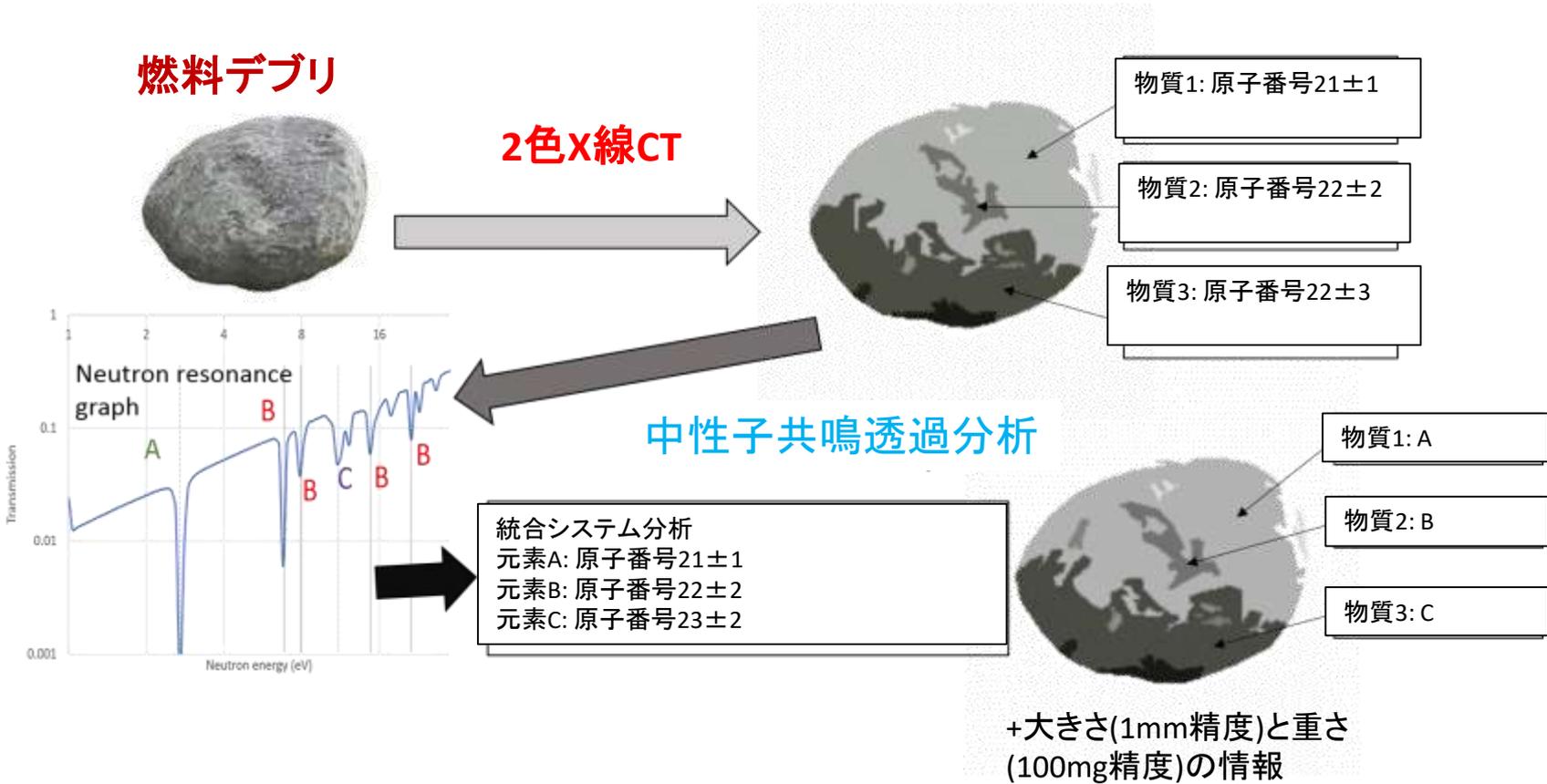
2021~

MEXT (Japan) and EPSRC (UK) との共同プロジェクト



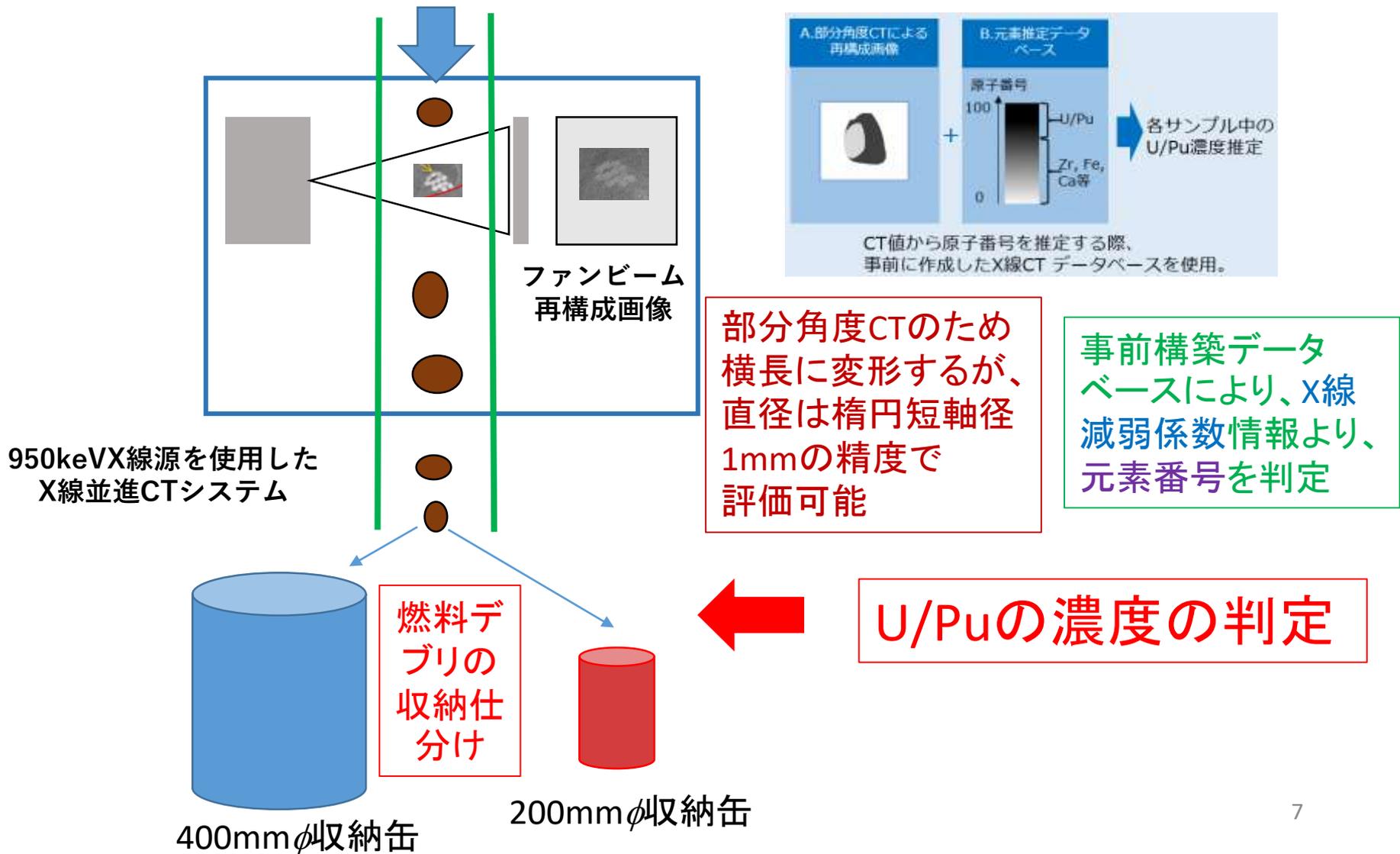
“燃料デブリ性状情報—X線減弱係数—元素番号”のデータベース作成

2018	2019	2020
------	------	------



本格取り出し時の高速流れ作業中の臨界安全のためのU/Pu濃度判定と収納缶仕分け

2021~



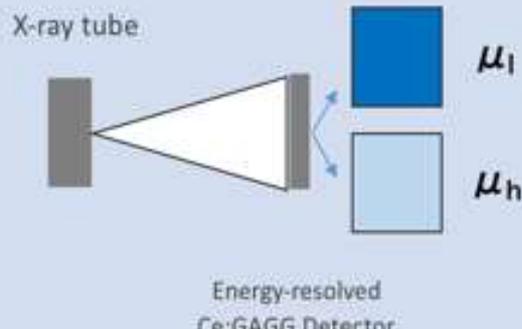
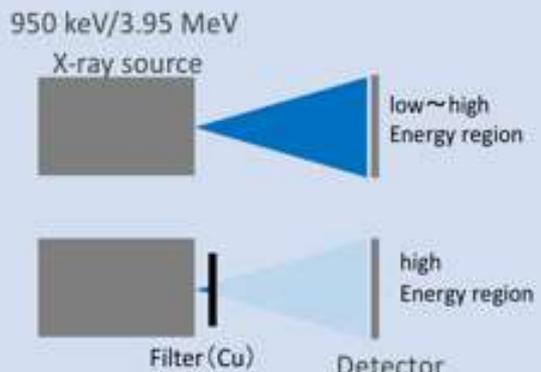
内容

1. 全体の計画
2. 可搬型950keV/3.95MeV X線源による
2色X線CT
3. 可搬型3.95MeV中性子源によるU/Puの判定
4. まとめと今後の課題

元素分析手法 - X線による分析

① フォトンカウンティングCT

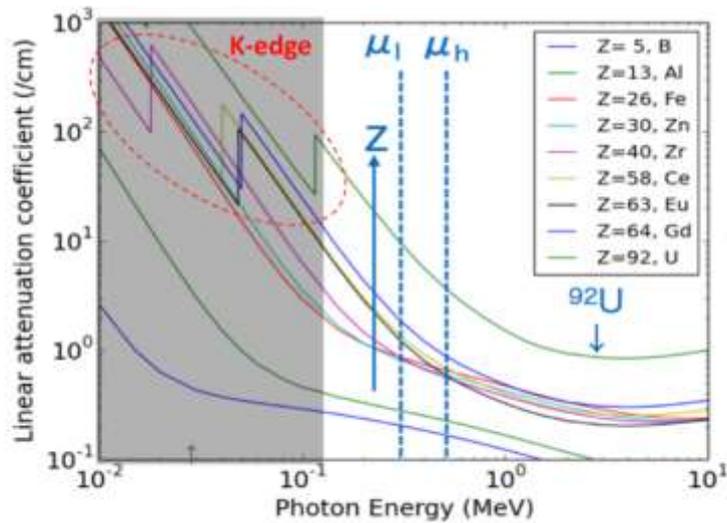
② 二色X線CT

	Photon Counting CT imaging	Dual Energy CT imaging
Overview	 <p>X-ray tube</p> <p>μ_l</p> <p>μ_h</p> <p>Energy-resolved Ce:GAGG Detector</p>	 <p>950 keV/3.95 MeV X-ray source</p> <p>low~high Energy region</p> <p>Filter (Cu)</p> <p>high Energy region</p> <p>Detector</p>
X-ray source	Portable X-ray tube (hundreds kV)	Portable 950 keV/3.95 MeV Linac X-ray source
Detector	Energy-resolved Ce:GAGG Detector	Conventional Energy-integrated Detector

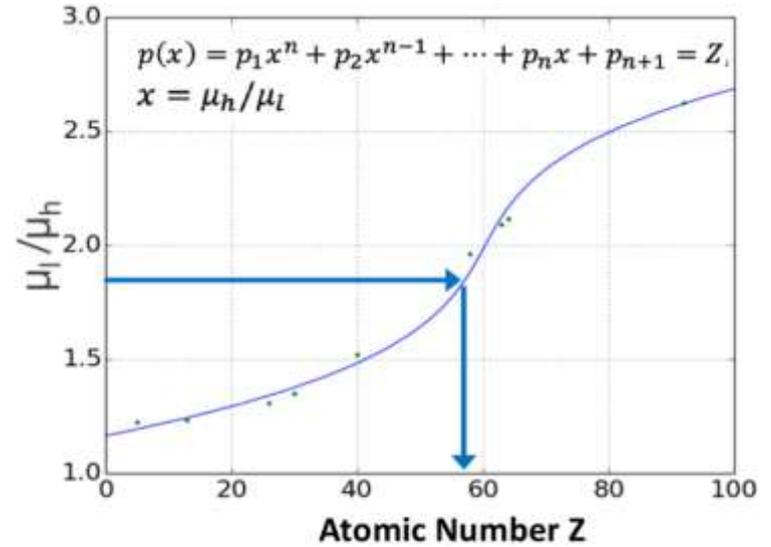
X線一つ一つのエネルギーを測定し、エネルギーごとにCT画像をとって元素識別をする。測定時間がかかるが、高精度。

エネルギースペクトルの異なるX線源を2つ用意し、積算型検出器によってCT撮像をする。フォトンカウンティングより精度は落ちるが、高速。

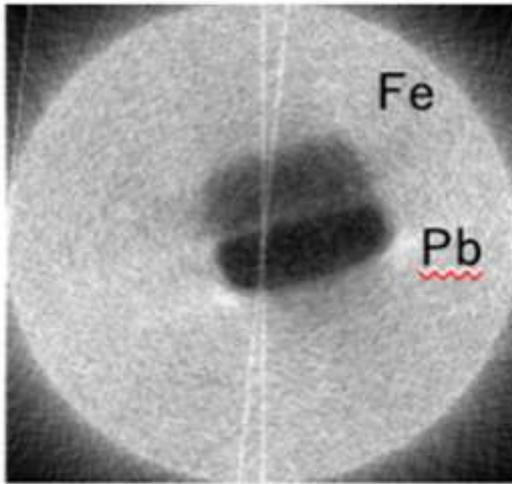
Determination of atomic number distribution by dual energy X-ray analysis



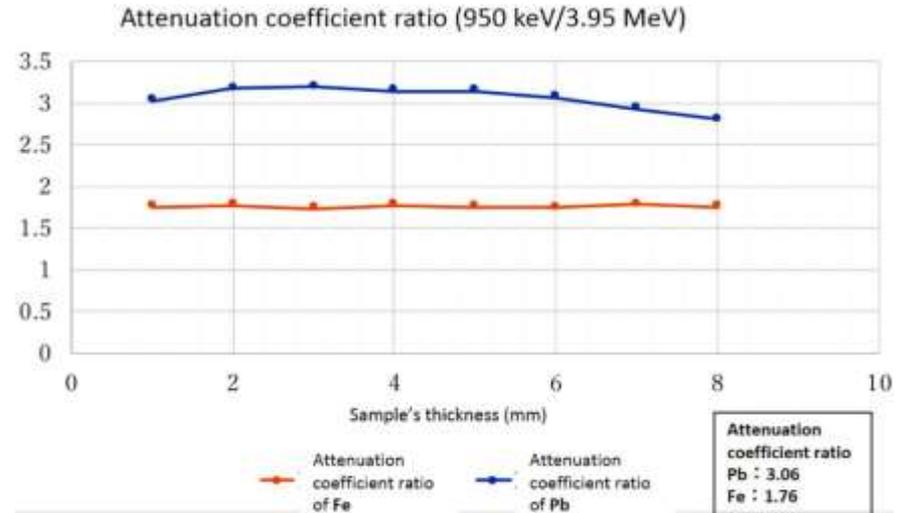
Relations between photon energy and linear attenuation coefficient of major nuclear materials



Relation between the ratio of attenuation coefficients for low / high energies, μ_l / μ_h and atomic number, Z .



Images related to the X-ray CT reconstruction experiment using nuclear debris dummy sample. Cross-section of the image reconstruction of the model sample.



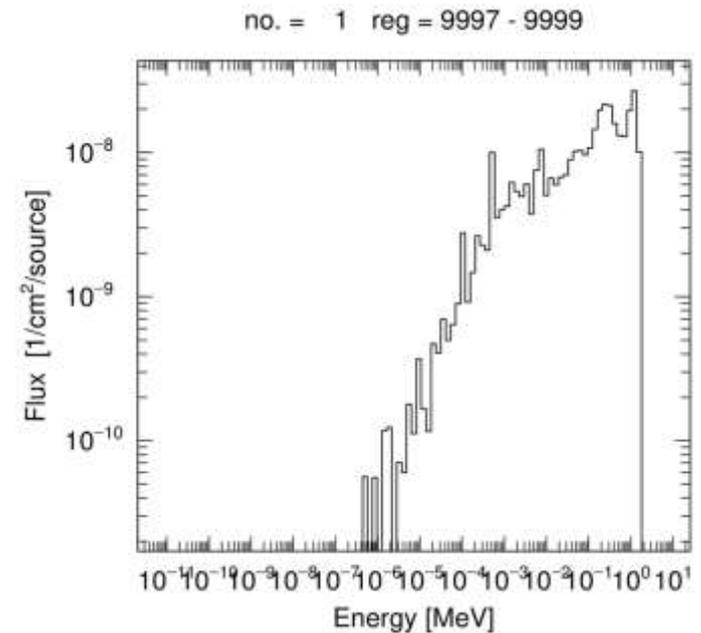
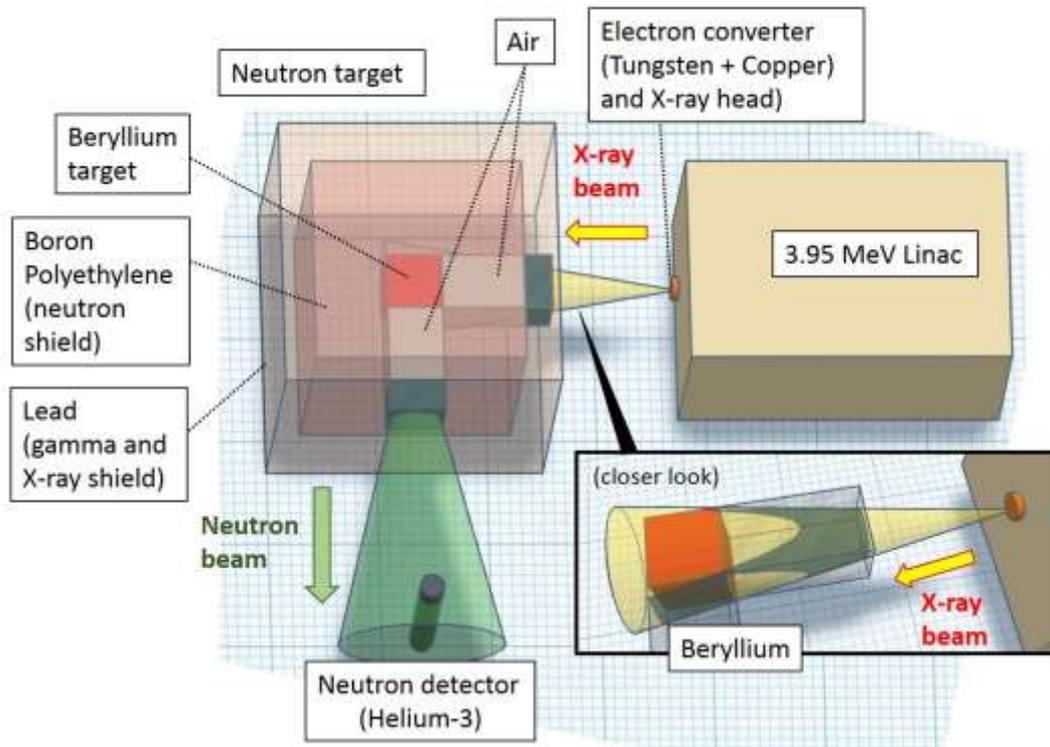
Plots of attenuation coefficient of Fe and Pb sample with different thickness. Attenuation coefficient ratio of Fe and Pb for measurement.

内容

1. 全体の計画
2. 可搬型950keV/3.95MeV X線源による
2色X線CT
3. 可搬型3.95MeV中性子源によるU/Puの判定
4. まとめと今後の課題

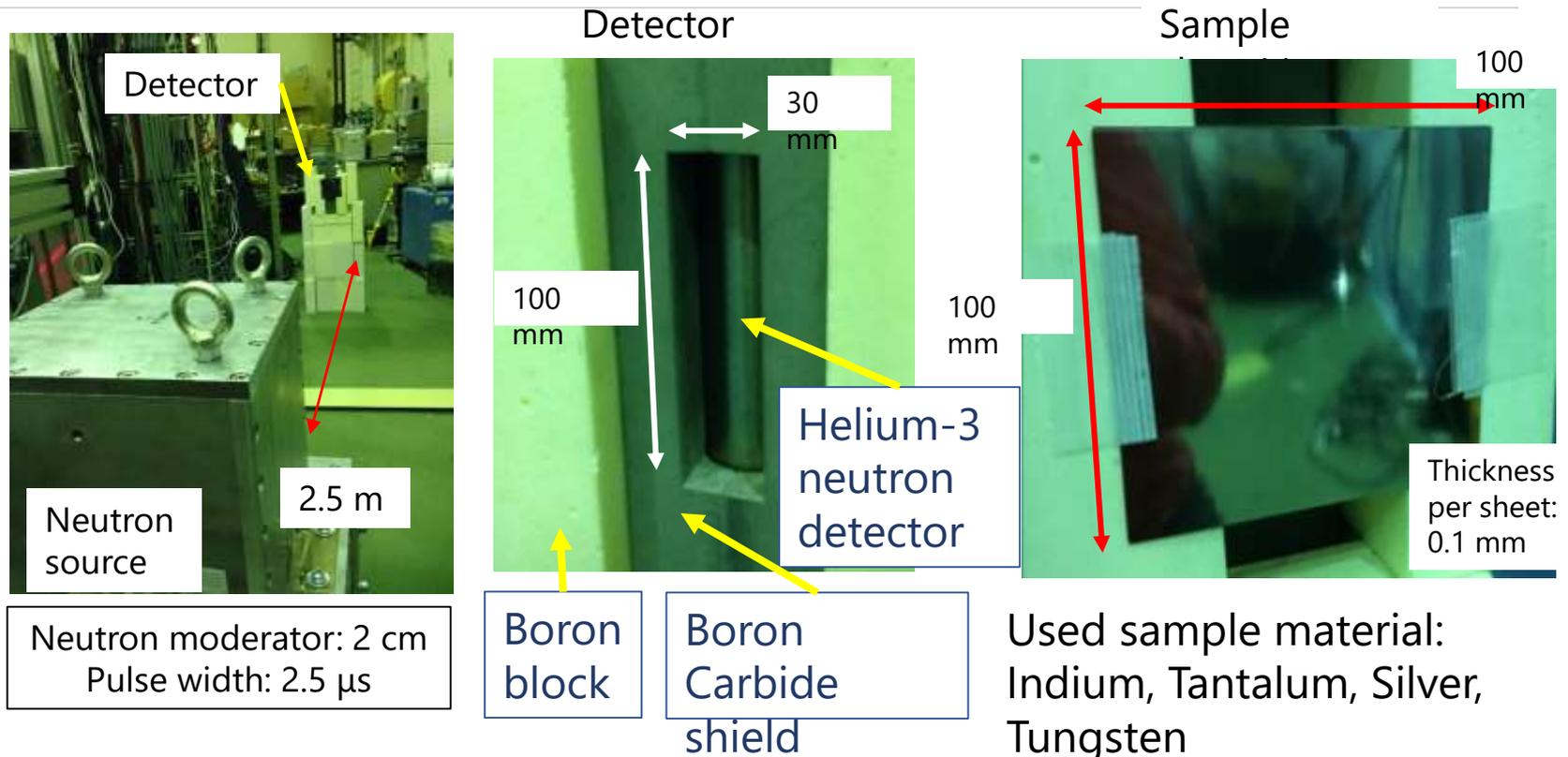
3.95MeV X線源 + ベリリウムによる中性子源

光核反応による中性子発生



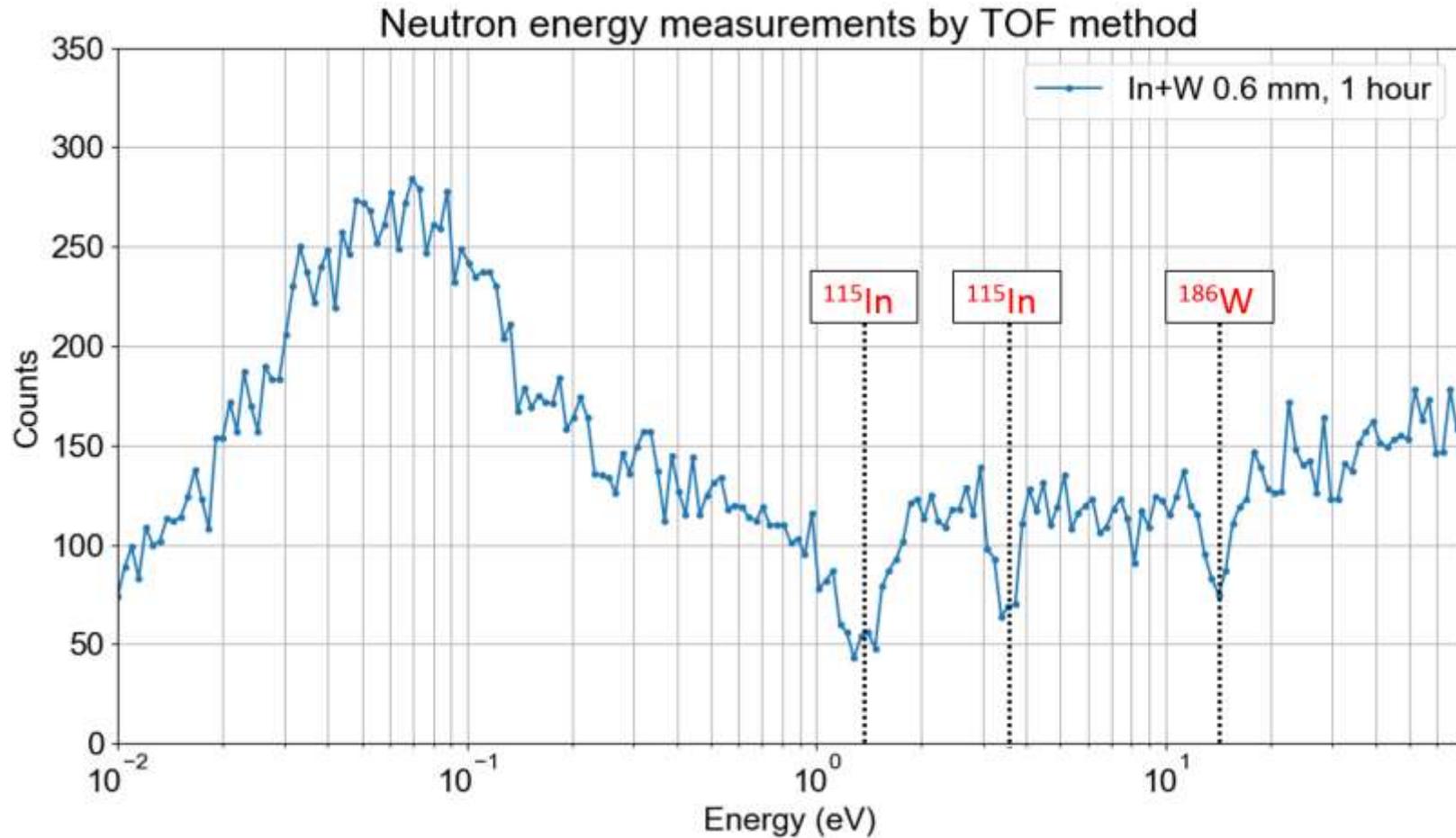
最大中性子生成率 3.38×10^7 n/s
(計算値)

Neutron source and sample actual setup

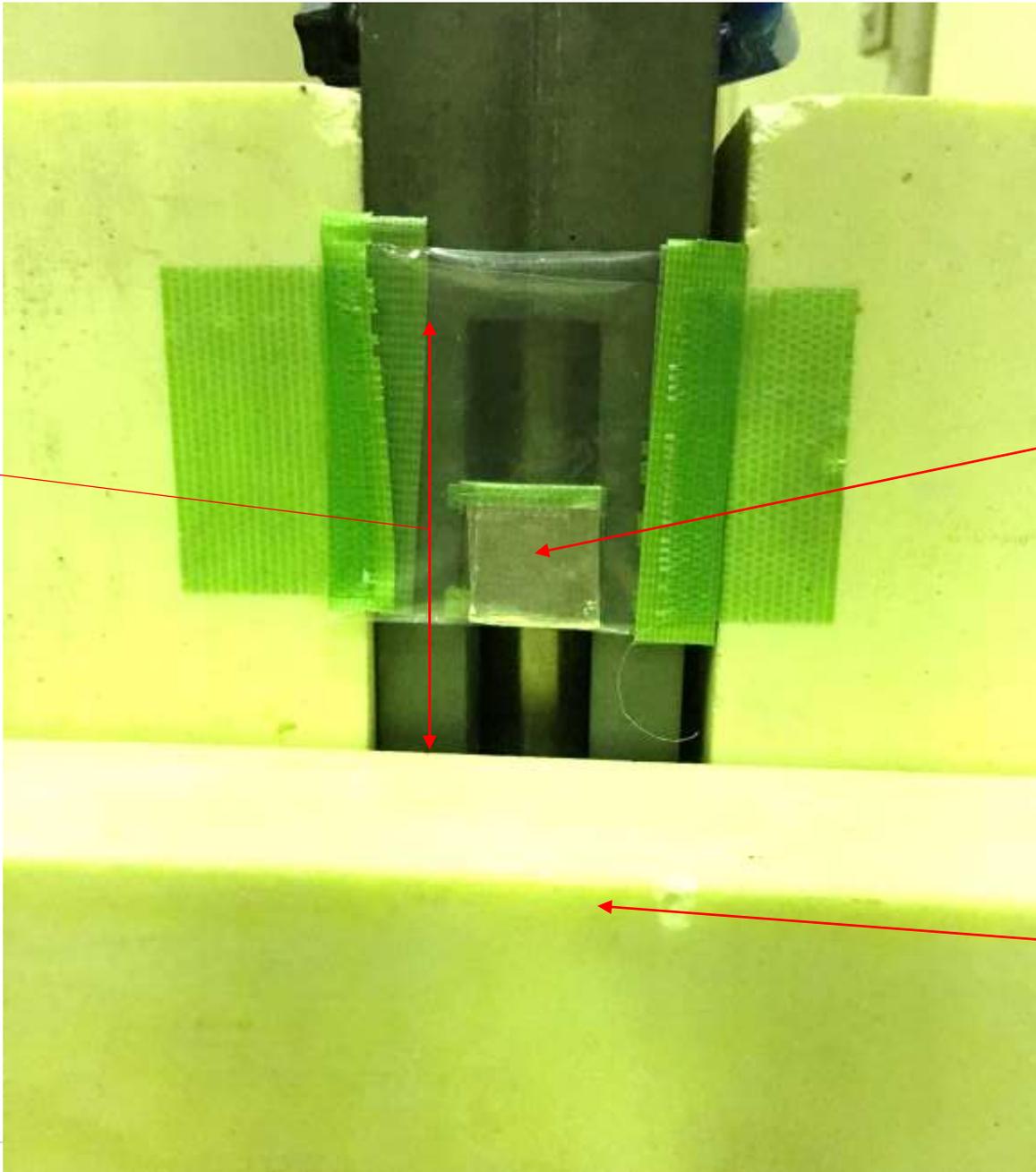


- The experiment was done in room temperature area, with the **ToF path distance of 2.5 meters**, and **measurement time 1-2 hour** for each experiment.
- Sheet-shaped samples were used, where each sheet size is **100x100x0.1 mm³**, but the size of **detector window is 30x100 mm²**.
- Measurements were done with various sample thickness and mixed sample by joining separate sheets together.

インジウム+タングステン 100x100x0.6mm³厚



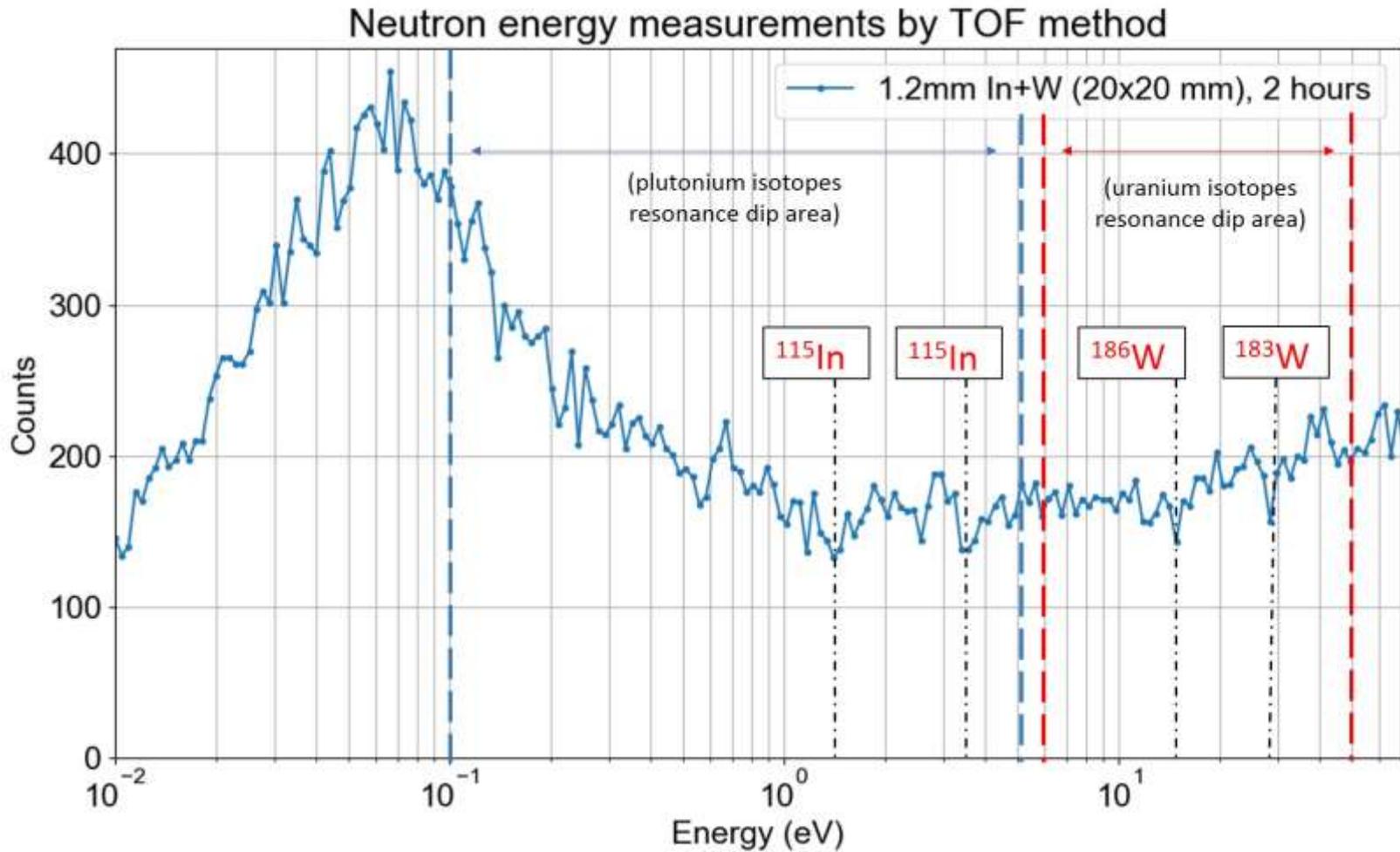
Detector window



20x20
mm
sample
(indium
+tungst
en)

Boron
block

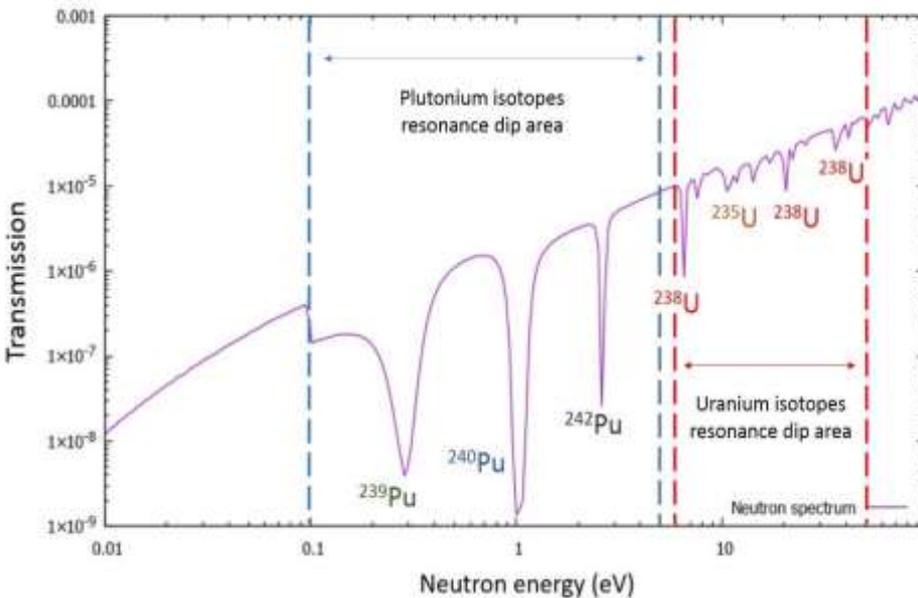
1.2mm厚, 20mm×20mmサンプル



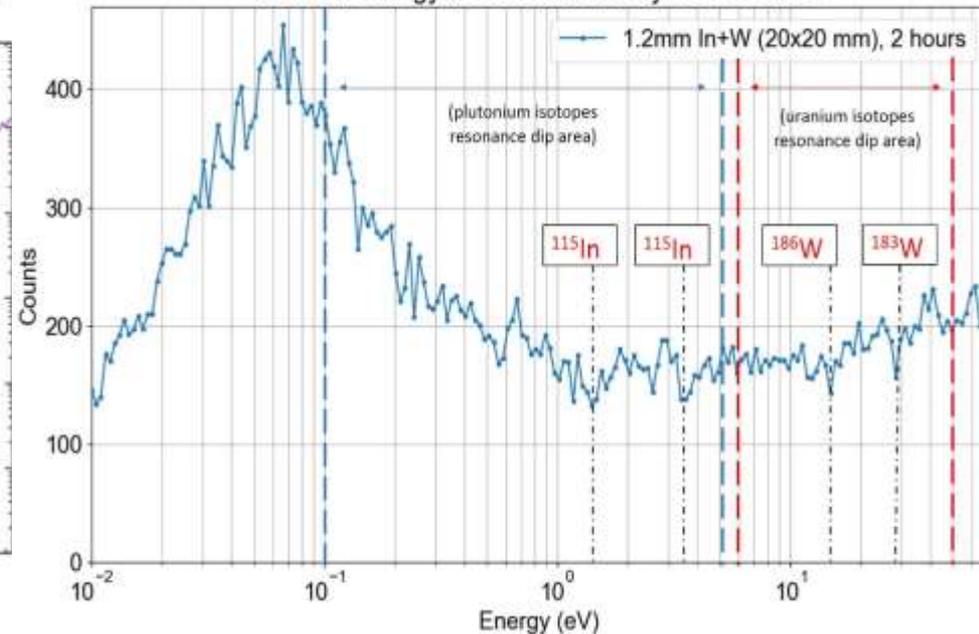
Feasibility of NRTA with compact neutron source to identify uranium/plutonium in nuclear debris

- To know the feasibility of this neutron source system for nuclear debris NRTA, an NRTA simulation with material containing U-238, Pu-239 and Pu-242 has been performed.
- From the graph result, distinguished resonances were formed in the neutron spectrum, with resonances locations that are quite clear to pinpoint whether it belongs U-238/Pu-239/Pu-242.
- By comparing the resonance result from the experiment with the simulation one, this system can be used to detect the U/Pu important isotopes that have distinguished resonances.

NRTA simulation spectrum of Uranium-Plutonium mix sample



Neutron energy measurements by TOF method



NRTA simulation (Monte Carlo code with PHITS)

NRTA experiment result

成果のまとめ

1. 2色X線CTによる元素番号決定の実証（東大）
 - ・ 950keV/3.95MeVX線CTによる減弱係数と元素番号の相関の取得
 - ・ GAGG検出器によるフォトンカウンティングX線CTシステムの構築
2. 3.95MeVX線中性子源による中性子共鳴吸収の実証と測定限界核物質サイズの評価（東大）
3. 模擬燃料デブリの作成（東大/U.Sheffield）
4. 放射光分析への準備進展
(U.Sheffield/JAEA/SPring8)

2019年度の課題

1. 2色X線CT/中性子共鳴吸収/放射光分析による
福島燃料デブリ中のU/Pu濃度の評価法の実証
2. U.Sheffield作成のU入り燃料デブリのSPring8
と東大でのU/Pu濃度の評価
3. 炉内核物質量の推定用クリギングシステムの
完成 (JAEA)