

可搬型高エネルギーX線源を使用した スペクトラルCTによる燃料デブリ成分解析の研究

Fukushima Nuclear Fuel Debris Component Analysis
by Spectral CT with Portable High Energy X-ray Source

東京大学
東京大学
東京大学
東京大学
東京大学
東京大学
東京大学
東京大学
JAEA

小沢 壱生
福岡 潤也
三津谷 有貴
土橋 克広
上坂 充
島添 健次
高橋 浩之
阿部 弘亨
芝 知宙

Issei OZAWA
Junya SHIBA
Yuki MITSUYA
Katsuhiko DOBASHI
Mitsuru UESAKA
Kenji SHIMAZOE
Hiroyuki TAKAHASHI
Hiroaki ABE
Tomooki SHIBA

Abstract

In order to decommission TEPCO Fukushima Daiichi nuclear power plant, the removal of fuel nuclear debris is planned from 2021. It is demanded to grasp nuclear material element contents of the debris remaining inside the accident reactors for the effective and safe removal. Our research team aims to do the on-site analysis of the extracted debris by the Spectral X-ray CT method with the portable X-band (9.3 GHz) 950 keV/3.95 MeV electron linac X-ray sources and GAGG X-ray detector. It is expected to realize the atomic number evaluation. In this paper, the resolution of measurement with respect to atomic number, volume and weight are to be described and discussed. We have also performed a preliminary experiment of energy-selected X-ray imaging with the system and could have successfully obtained different transmission images by changing X-ray energy ranges.

Keywords: Fukushima Decommission, Nuclear Fuel Debris, Spectral CT, Photon Counting CT, Portable High Energy X-ray Source

1. 背景

東京電力福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップによると、燃料デブリ取り出しが2021年から開始されることが予定されている。原子炉格納容器内部に存在する燃料デブリの位置や量、形状や性状に関しては現在もその多くが不確かであり、それらを明らかにすることは取り出し作業の効率化や作業員の低被曝化、また計量管理の観点から望ましいと考えられる。

我々の研究チームでは、燃料デブリ塊の性状分布測定を目的としたシステムの開発を行っている。本システムでは、遠隔操作ロボットによって採取された燃料デブリ小片についてオンサイトで可搬型X線源を用いた元素識別型X線CT等による精密分析を行い、得られた情報群

に対してクリギングと呼ばれる地球統計学手法を用いることでデブリ塊全体の性状分布推定を行う。(図1) その中でも本研究では可搬型X線源を使用したスペクトラルCTイメージングによる元素識別を対象としており、今回はモンテカルト・シミュレーションによる原理実証実験とエネルギー分解型検出器のプロトタイプを使用した予備実験に関して発表を行う。

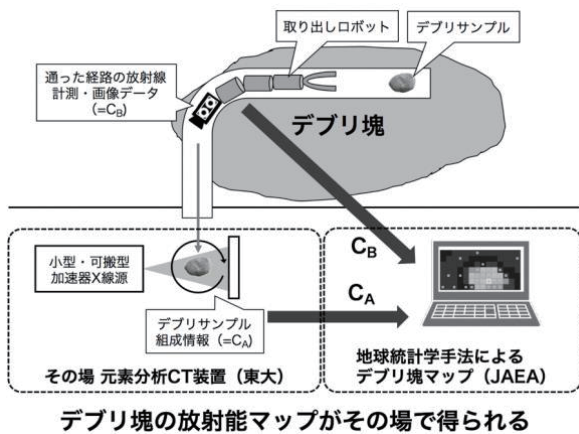


図1 燃料デブリ性状分析システムの全体像

2. スペクトラルCTの原理

X線イメージングは、X線が物質を透過する際の減弱率の違いを利用したものである。入射光子数と透過光子数の関係式から線減弱係数 μ (1/cm)が導かれるが、その値は同一物質でも密度 ρ (g/cm³)に比例して変化する。

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

(I : 透過光子数、 I_0 : 入射光子数、 μ : 線減弱係数、 x : 物質内部の透過距離)

また、質量減弱係数は μ/ρ (cm²/g)と定義され、これは物質の元素組成固有の値とみなすことができる。

線減弱係数は物質やX線エネルギーによって変化する。燃料デブリに含有されると想定される元素ごとの線減弱係数曲線を示したのが図2である。

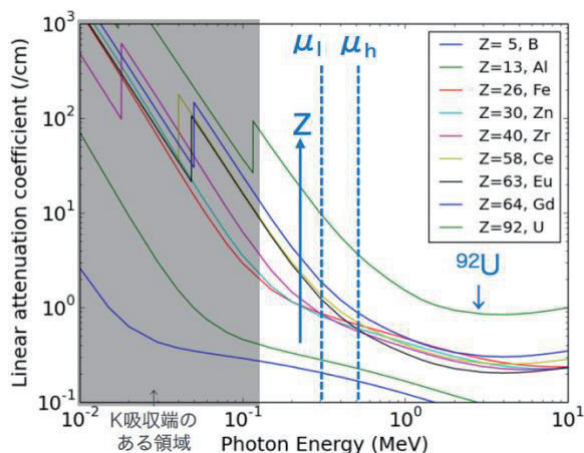


図2 原子力材料の線減弱係数(Hubbellのデータ)

線減弱係数は質量減弱係数と密度の積であるため、同一のX線エネルギーにおいて、質量減弱係数が低く密度の高い物質Aと、質量減弱係数が高く密度の低い物質Bは同様の線減弱係数を呈する可能性があり、これは元素識別の観点から望ましくない。

そこで、複数エネルギー領域における線減弱係数の変化を解析することで物質A、Bの識別が可能となり、この手法はスペクトラルCTイメージングと呼ばれる。

具体的には、図2における μ_l と μ_h のように2つのエネルギーにおける μ 値を取得し、それを連立方程式の要領で解くことで原子番号や電子密度を取得することができる。

$$\mu_l = f(E_l, Z, \rho_e) \quad \mu_h = f(E_h, Z, \rho_e)$$

Z : 原子番号、 ρ_e : 電子密度

実際にはこの連立方程式を解析的に解くことは困難であるため、多項式近似式を利用した近似的解法を適用する。これを利用すると、 μ_l と μ_h から求められる μ 値の変化(μ_l/μ_h)から原子番号が一意に求められる。(図3)

この手法は、X線エネルギーに対して線減弱係数が単調に変化することを前提としたものである。図2の低エネルギー側の領域(グレーでマスクがかかった領域)ではK吸収端と呼ばれる線減弱係数が不連続に変化する部分があり、使用するX線はこのエネルギー帯を回避する程度の高エネルギーなものである必要がある。具体的には、ウランのK吸収端が115 keV近辺にあるため、120 keV以上のX線エネルギーを使用することが求められる。

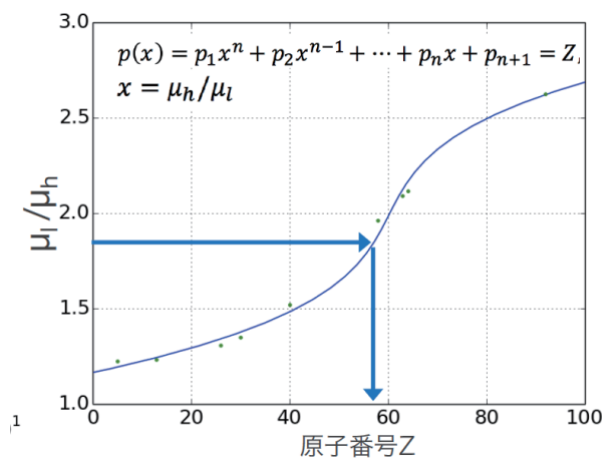


図3 300 keV、500 keVの μ 値のデータから作成した μ_l/μ_h と原子番号Zに関する曲線

μ_1 と μ_h を取得するためには、

- ・異なる2つの管電圧のX線源を使用する
- ・同一の連続X線を用いて、エネルギーごとの透過光子数をカウントできる検出器を使用する

などの方法が考えられ、前者はDual Energy CTイメージング(2色X線CTイメージング)、後者はPhoton Counting CTイメージングと呼ばれる。今回は、GAGGシンチレータ検出器を使用したPhoton Counting CT手法に関する発表を行う。

3. 可搬型高エネルギーX線源とCe:GAGG検出器

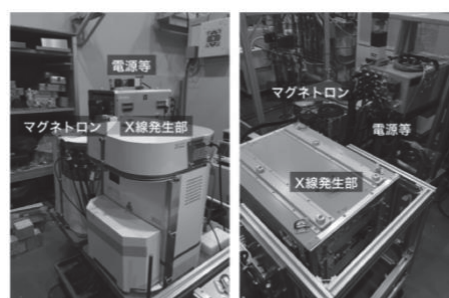
東京大学上坂研究室では、可搬型の950 keV、3.95 MeV加速器X線源を開発・所有している。(図4)可搬型かつ高エネルギーであるため、X線減弱能力の高い屋外構造物の内部検査に使用することができ、老朽化したコンクリート橋梁の屋外検査に使用するための研究も進めている。

950 keV X線源は200~350 mm、3.95 MeV X線源は350~740 mmのコンクリート透視能力を有する。

福島第一原子力発電所の燃料デブリ分析については、この可搬性とK吸収端を回避する高エネルギー性を生かし、原子炉建屋周辺のオンサイトにてデブリ小片採取後に即座に検査することを想定している。

表1 可搬型950 keV、3.95 MeV X線源の諸性能

Parameter	950 keV Linac	3.95 MeV Linac
Operating frequency	9.3 GHz	9.3 GHz
RF source	Magnetron	Magnetron
RF electric power	250 kW	1.5 MW
Beam current	130 mA	100 mA
Beam energy	950 keV	3.95 MeV
Electron gun voltage	20 kV	20 kV



小型・可搬型 加速器X線源
(左:最大950keV、右:最大3.95MeV)

図4 可搬型950 keV、3.95 MeV X線源の外観

また、数百keVに対して高い検出効率を示すCe:GAGGシンチレータとSiPMの2次元アレイを使用したフォトンカウンティング型検出器を開発している。(図5)

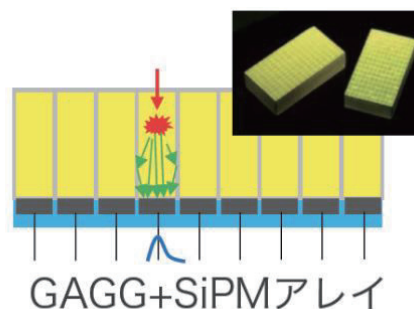


図5 Ce:GAGG検出器のシンチレータ

表2 Ce:GAGG検出器の諸性能

シンチレータ	Ce:Gd ₃ Al ₂ Ga ₃ O ₁₂ Ce:GAGG
密度(g/cm ³)	6.63
光収率(光子/MeV)	~56 000
減衰時間	92 ns [86%], 174 ns [14%]
ピーク発光波長	520 nm
吸湿性	なし

通常の高エネルギー積分型検出器はノイズを含む全ての光子のエネルギーを積分して検出するため、S/N比が低下する傾向にあるが、フォトンカウンティング型検出器ではエネルギーに関して閾値を設定し、十分にシグナルと

みなせるエネルギーの光子に関してのみ計数を行うため、S/N 比を向上させることができる。

4. モンテカルロ・シミュレーションによる原理検証実験

粒子反応シミュレータ GEANT4 により、エネルギー選択型 CT と原子番号推定に関する原理検証と精度評価を目的としたシミュレーションを実施した。

図6に示した体系のように、950 keV X線源と GAGG シンチレータを使用し、Fe と Pb、Fe と CeO₂ の原子番号識別に関する試験を行った。300 keV と 500 keV の2つのエネルギー帯で μ_l と μ_h を取得し、 μ_l / μ_h と Z の関係式から原子番号 Z を算出した。

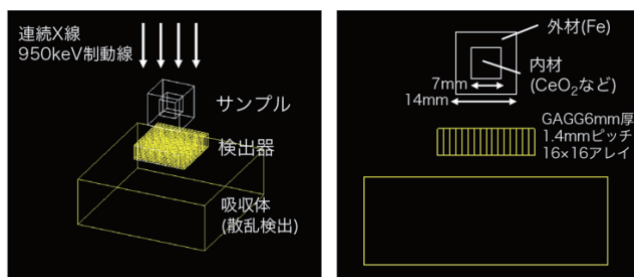


図6 モンテカルロ・シミュレーションの体系

この実験から導き出された Pb、CeO₂、Fe の原子番号の推定値を表2に示す。Pb、Fe は7以内、CeO₂ は4以内の誤差の範囲内に収まった。

表3 原子番号推定に関するシミュレーションの結果

元素	原子番号	原子番号の推定値	差異
Pb	82	75.4	6.6
CeO ₂	55.52	58.96	3.44
Fe	28	21.2	6.8

この精度のばらつきについては、図3の近似曲線において Pb、Fe は傾きが緩やかな箇所位置するのに対し、CeO₂ は傾きが急な箇所位置することから説明できる。

5. エネルギー選択型イメージングに向けた予備実験

元素識別のためのエネルギー選択型イメージングにむけた予備実験として、フォトンカウンティング型 Ce:GAGG 検出器のプロトタイプを作成し鉄と鉛に対し X線撮像を行った。X線源は可搬型 950 keV X線源、検出器は GAGG シンチレータ厚 6 mm、3 mm ピッチ、8×8 ピクセルのものを使用した。

図7に 100-300 keV、300-500 keV、500-600 keV でエネルギー帯を選択し X線透過画像を取得した結果を示す。

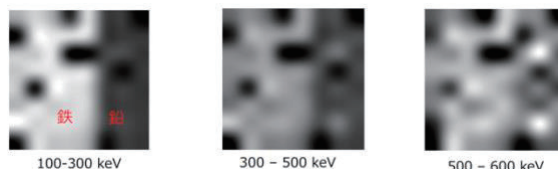


図7 エネルギー選択型イメージングの結果画像(黒点はデッドピクセル)

黒点としてデッドピクセルが残るものの、エネルギー帯を選択したイメージングに成功した。課題として、可搬型 950 keV X線源は加速器 X線源であり、X線光子が塊状に放射されるため、複数の X線信号が重なってしまうエネルギー弁別ができなくなる「パイルアップ」と呼ばれる問題が発生しやすいことが挙げられる。今回は鉛遮蔽板を検出器前に設置し、線量を落とすことでパイルアップをできるだけ抑制した。

6. 結論と今後の展開

福島燃料デブリ元素分析のための可搬型高エネルギー X線源を使用したスペクトラル CT 実現に向けて、モンテカルロ・シミュレーションを用いた原理検証実験と検出器プロトタイプを使用した予備実験を行なった。

今後はフルサイズの Ce:GAGG 検出器を作成し、福島燃料デブリの模擬サンプルを対象とした Photon Counting CT イメージングを行っていく予定である。

参考文献

- [1] 取越正己、角尾卓紀、“単色 X 線の医学診断応用”，日本放射光学会誌、Vol.17 No.4、2004、pp.185-193.
- [2] Hubbell, J. & Seltzer, M. Tables of X-ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients. Version 1.4, Report NISTIR-5632 (National Institute of Standards and Technology, 1995)
- [3] 兵頭朋子、村上卓道、“X-ray イメージングの Next Innovation、2.臨床編、2-3.Dual Energy CT の臨床”、日獨医報 第 57 巻、第 2 号、2012、pp.68-82.