燃料デブリのβ線および制動 X 線の特性評価

Characterization of beta-rays and bremsstrahlung x-rays of fuel debris

*松村 太伊知 [1], 藤田 学 [2], 寺島 顕一 [1], 坂本 雅洋 [1], 奥村 啓介 [1]
[1] 日本原子力研究開発機構, [2]JPC

今後、福島第一原子力発電所からの取出しが予定されている多種多様な燃料デブリを想定し、β 線及び制動 X 線のエネルギースペクトルと線量率を粒子輸送モンテカルロコードによって計算し、それらの特性評価を行った。

キーワード：福島第一原子力発電所・燃料デブリ・β線・制動X線

1. 緒言

原子力機構では、これまでに多種多様な取出し燃料デブリに対する崩壊ガンマ線の特性評価を行ってきたが[1]、β線及び制動X線については考慮してこなかった。福島第一原子力発電所（1F）の燃料デブリは、燃料に由来するU、TRU、FP、および構造材に由来するジルカロイ、SUS、ペデスタル内のコンクリートなどと溶融混合し、号機や部位に依存して複雑な組成になっていると考えられている。使用済燃料を対象とする従来のコードはこのような多種多様な組成の燃料デブリから放出されるβ線や制動X線への適用は想定されていない。そこで、β線スペクトルの理論式、崩壊データ、および粒子輸送モンテカルロ計算コードPHITS[2]を用いて、燃料デブリの取出し時期、揮発性FP放出、燃料デブリ組成、嵩密度、サイズ等に依存した燃料デブリのβ線と制動X線の特性評価を行った。

2. 計算方法

取り出し燃料デブリは単純化のため球形状を仮定し、その性状の多様性として以下の条件の組み合わせを考慮した。1) 取り出し時期：事故後 11 年後、20 年後、40 年後、2) 揮発性 FP 放出モデル：無放出、Phebus-FPT4 試験結果[3]に基づく FP 放出率、3) デブリ組成タイプ：UO_2（切り株燃料）、溶融燃料デブリ（$(U,Zr)O_2$）、MCCI、4) 気孔率：0～80 %、5) 直径：1 cm, 5 cm, 10 cm。

2 号機の燃料燃焼計算の組成[4]を基に、取り出し時期までの放射性核種の壊変と揮発性 FP の放出を模擬した放射性核種のインベントリを評価し、各核種の{β 線強度(I)×平均エネルギー(E_{av})}の値を基に積算値が 99.99%以上となる β^-崩壊核種を選定した。選定した核種について、Siegbahn の β 線スペクトル式[5]を用いて、β^-崩壊核種について合算し、PHITS 用の β 線源データを作成した。

作成した β 線源を球形上の燃料デブリの体積内に均一に分布させ、電子と光子の輸送計算を行い、燃料デブリ表面から放出される特性 X 線のエネルギースペクトルと線量率を以下の条件で求めた。6) エネルギースペクトルと線量率の観測位置：燃料デブリ表面、1cm、10cm、50cm、100cm。

3. 結果

β 線スペクトルの形状は取り出し時期と揮発性 FP 放出モデルによって大きく異なった。一例として図 1 に、FP 無放出の各取り出し時期における β 線スペクトルの変化を示す。取り出し時期によって β 線スペクトルは 2.28MeV を境に大きく異なった。この最大エネルギー E_{max}=2.28MeV の β 線を放出する核種は ^{90}Y であり、これ以下のエネルギーでは大きな変化はなかった。2.28MeV 以上で β 線の強度が大きく下がっている原因は E_{max}=3.54MeV の β 線を放出する ^{106}Rh (半減期 $T_{1/2}$=30 秒)の親核種である ^{106}Ru の $T_{1/2}$ が 372 日であり、放射能が大きく減少しているためである。発表では β 線スペクトルの変化に加えて FP 放出モデルや取り出し時期の違いによる制動 X 線の平均エネルギーの変化等についても報告する。

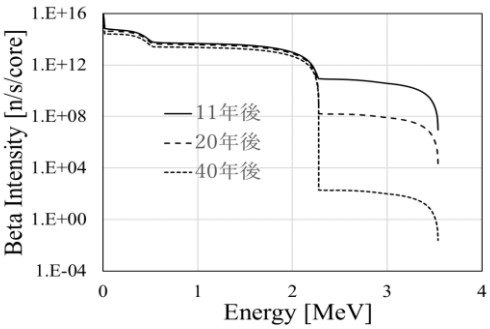

図 1　FPs 無放出での各取り出し時期による β 線スペクトルの変化

参考文献

[1] K. Terashima, et al., “A Prediction Method for the Dose Rate of Fuel Debris Depending on the Constituent Elements”, (2021). [2] T. Sato, et al., “Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02”. (2018). [3] P.D.W. Bottommley, et al., "Fission product and Actinide release from the Debris bed test Phebus FPT4: Synthesis of the Post Test Analyses and of the Revaporisation testing of the Plenum samples", (2006). [4] K. Nishihara, et al., “Estimation of Fuel Compositions in Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant”, (2012). [5] Siegbahn K., “Beta-and Gamma-Ray Spectroscopy", (1955).

*T. Matsumura[1], M. Fujita[2], K. Terasima[1], M. Sakamoto[1], K. Okumura[1]
[1]Japan Atomic Energy Agency (JAEA), [2]Japan Prime Computing Corporation (JPC)