原子炉を用いた非破壊検査用中性子源 Cf-252 の生成

Production of Cf-252 neutron source for non-destructive inspection using nuclear reactor

*野村 拓朗¹, 高木 直行¹

1東京都市大学

インフラ設備の非破壊検査等に用いる移動可能な小型中性子源システム RANS-II を理科学研究所が開発 している。このシステムは全長 5m、全重量 5.5t であり、その移動には 11 トン以上の大型トラックが必要と されている^[1]。本研究では、自発核分裂で中性子を発生する超ウラン核種 Cf-252 を用いた小型軽量の中性子 源の実現可能性を調べるため、原子炉における種々照射条件下での Cf-252 生成特性評価を行った。

キーワード:中性子源, Cf-252, 核変換, 減速材

1. 緒言

Cf-252 の生成には中性子束の高い原子炉が必要となる。米国の高中性子束炉 HFIR では 1966 年~2019 年の間で累積 10.5g が生成され^[2]、また中国は高速実験炉 CEFR において 10g の Cm-244 から約 1.5mg の Cf-252 が生成可能との結果を解析によって示している^[3]。本研究では Cf-252 生成に適した照射条件の検討を行った。 2. 原子炉での Cf-252 生成

Cf-252 を生成する核変換パスを図 1 に示す。変換パスの中で Cm-245 から Cm-248 の 4 核種は「ボトルネック核種」と呼ばれている。こ れらは半減期が長いにもかかわらず、奇中性子核の Cm-245 と Cm-247 については $\sigma_f > \sigma_y$ のため核分裂による消費が大きく、偶中性子核の Cm-246 と Cm-248 は σ, が小さいため、Bk, Cf への生成につながりに くい[3]

本研究では、U と比較してより少ない中性子捕獲数で Cf に到達可 能なターゲット物質として、軽水炉使用済み燃料に多く存在する Pu を 想定した。RANS-IIと同等の中性子発生数 (1.0×10¹²n/s)を得るには、 1.6g (33TBq)の Cf-252 が必要であり、これを生成量の目標値とした。 3. 解析手法

予備解析として、軽水炉(PWR)及び高速実験炉「常陽」のスペクト ル場における Cf-252 生成特性を調べた。Cf-252 生成には減速スペクトルが有効であるため、常陽の解析では、反射体領域に設置した 6 体の Be 減速集合体に囲まれた照射集合体位置での中低速中性子照射を想

定した(図 2)。 燃焼解析コード ORIGEN2.2 および JENDL-4.0 から作成された無限 希釈一群断面積ライブラリを用い、中性子束を任意パラメータとして 長期連続照射時の Cf-252 生成量を評価した。解析条件を表1に示す。 ターゲットの Pu は、IAEA による保証措置で定義される 1 有意量(8kg) 未満の 7.9kg とした。

4. 解析結果及び今後の研究方針

解析結果を図3に示す。PWR スペクトル条件下では、中性子束が 5~50×10¹⁴ $n/cm^2/s$ の範囲では、7.9kgのPuから目標量の1.6gを越 える Cf-252 が得られた。この場合、中性子束を増大させても Cf-252 生 成量は変化せず、最大値となる照射期間が短縮(30 年~3 年)される 傾向となった

-方、常陽の反射体領域に設置した Be 減速集合体中心での生成量 は目標の1/10以下となり、中低速中性子スペクトルよりも熱化された スペクトルが適することが示唆された。

5. 結言

軽水炉使用済み燃料に含まれる Pu をターゲットとして、原子炉で Cf-252 を生成するための、予備的燃焼特性検討を行った。熱中性子炉 (PWR)と高速炉(常陽)反射体領域 Be 減速材集合体内でのスペクトル条 件下にて生成量を比較した結果、熱化された中性子照射が好ましいこ とが分かった

今後は、より多様な照射条件(減速能の異なる種々減速材、減速材 /燃料体積比など)について、連続エネルギーモンテカルロ解析を行い、 Cf-252 生成に適した中性子照射条件を明らかにする予定である。



表1 解析条件

| | ターゲット | 軽水炉使用済み燃料Pu 7.9kg (PWR 燃焼度50GWd/t5年冷却) | | | | |
|--|-------|---|--------|---|--------|--------|
| | Pu組成 | Pu-238 | Pu-239 | Pu-240 | Pu-241 | Pu-242 |
| | | 2.8% | 53.5% | 24.5% | 12.1% | 7.1% |
| | 照射体系 | 17×17型 燃料集合体PWR | | 高速実験炉「常陽」 炉心反射体領域Be減速材集合体中心 の中低速中性子照射場(第7列) | | |
| | 中性子束 | 1~50×10 ¹⁴ n/cm²/s | | | | |



図2「常陽」中低速中性子照射場設置炉心[4]



図3熱および中低速スペクトル下でのCf-252 生成

参考文献

[1] Tomohiro Kobayashi, Shota Ikeda, Yoshie Otake, Yujiro Ikeda, Noriyosu Hayashizaki. Completion of a new accelerator-driven compact neutron source prototype RANS-II for on-site use (2021) Table1

[2] S. M. Robinson, D. E. Benker, E. D. Collin, J. G. Ezold, J. R, Garrison, S. L. Hogle. Production of Cf-252 and other transplutonium isotopes at Oak Ridge National Laboratory (2020) p.1

[3] Mingyu Wu, Shixi Wang. The investigation and calculation of the transmutation paths for the production of 252 cf in fast reactors (2020)

. [4]文部科学省 令和3年度国内の原子力インフラを活用した医用 RI の自給技術確立に向けた研究開発 成果報告書. 東京 都市大学(2022) 図 3.3.1(1)-2

*Takuro Nomura¹, Naoyuki Takaki¹

¹Tokyo city Univ.