

^{59}Ni の放射能が廃止措置計画に及ぼす影響

Influence of ^{59}Ni radioactivity on decommissioning

*江連 秀夫 株式会社 ナイス

原子炉構造材に大量に使用される SUS が中性子照射されて ^{59}Ni が生成され、その内部制動放射 (IB) によって放出される γ 線 (1.07MeV までの連続スペクトル) による線量は定量的に評価されてない。そこで、SUS とその不純物の放射化核種による線量が廃止措置計画に及ぼす影響について考察する。なお、本報は 2016 年秋の大会 1C04 に用いられた計算式、その結果等の改訂版である。

キーワード : SUS、EC 崩壊、 ^{59}Ni 、放射能、連続スペクトル、線量、廃止措置、内部制動放射

1. 緒言 原子炉構造材として大量に使用される鋼材、SUS 等は中性子照射され、放射性核種 ^{60}Co 、 ^{59}Ni 等が生成される。それらの線量率、廃棄物量等を評価して、廃止措置計画が作成されている。しかし、 ^{59}Ni は EC 崩壊し、その際に内部制動放射 (IB) によって 1.07MeV までの連続スペクトルを持つ γ 線を放出する。しかし、被ばく線量が具体的に評価されていない。このために、M.Pfützner 等¹⁾ が測定で実証した理論から求めた「 ^{59}Ni の EC 崩壊の IB γ 線放出確率対電子 K 殻捕獲確率比」を用いて JPDR のシュラウド (SUS304) で生成される ^{59}Ni からの γ 線放出量を求め、更に、Z.Janas 等²⁾ が測定・解析して得た γ 線スペクトルから平均 γ 線エネルギーを求めて、その線量換算係数から表面線量率を評価した。この値及びその他の放射化核種の線量が廃止措置計画に及ぼす影響について考察する。

2. 解析 JPDR のシュラウドの中央位置で放射能濃度の測定、解析³⁾ を行なっているため、測定値、運転履歴、核断面積等を用いて年間 80% の稼働率で 40 年間、商業炉と同じ出力密度で運転したとし、次式によって核種の放射能濃度を求めた。ただし、放射能が測定されていない核種もあるので、 ^{60}Co の測定値を用いた。その結果を図 1 に示す。

$$(\lambda n)_\ell = (\lambda n)_k \frac{\sum_\alpha \sum_{i=0}^p \sigma_{\alpha \rightarrow \ell} \varphi_i N_\alpha (1 - \exp(-(\lambda_\ell + \sigma_\ell \varphi_i) T_i)) \exp(-\lambda_\ell t_i)}{\sum_\beta \sum_{j=0}^q \sigma_{\beta \rightarrow k} \varphi_j N_\beta (1 - \exp(-(\lambda_k + \sigma_k \varphi_j) T_j)) \exp(-\lambda_k t_j)}$$

記号: 汎用例と同じ。孫核種、異性体転移: 省略。 $\sigma_k, \sigma_\ell: (n, \gamma), (n, p)$ 等の反応断面積の和。サフックス k と ℓ 及び i と j はそれぞれ放射能を測定、評価する核種とその照射時の運転履歴を表す。中性子束は運転履歴毎の平均炉出力に比例し、放射化断面積は運転条件に対して一定⁴⁾ と仮定した。図 1 から運転停止直後から ^{59}Ni と ^{60}Co が放射能濃度の主要核種で、その他の核種は少ないことが分かる。 ^{94}Nb 、 ^{152}Eu 等は不純物によるものである。更に、 ^{59}Ni の IB γ 線放出確率対電子 K 殻捕獲確率比¹⁾ 7.92×10^{-4} 、K 殻捕獲確率⁵⁾ 及び ^{59}Ni の放射能を用いて EC 崩壊の IB γ 線放出率を求めた。なお、L、M 殻からの IB γ 線についても K 殻と同様な処理⁶⁾ をした。また、IB γ 線スペクトル⁷⁾ とそのあてはめ関数から平均 γ 線エネルギーを求め、その線量換算係数⁸⁾ からシュラウドの表面線量率^{7,8)} を算出した。この結果を他の核種の線量率と共に図 2 ($^{59}\text{Ni}(X)$: 特性 X 線, $^{59}\text{Ni}(IB)$: IB γ 線による線量率) に示す。運転停止直後は ^{60}Co が線量率の主要核種であるが、50 年を過ぎると、 ^{59}Ni 及び ^{94}Nb による線量率が支配的になり、全線量率はほぼ一定となる。この IB γ 線による表面線量率は 74.2mSv/h、年間の被ばく線量が 650Sv/y、特性 X 線 (0.104mSv/h) の約 716 倍、 ^{94}Nb (49.9mSv/h) の約 1.5 倍である。

3. 結論 M.Pfützner 等の ^{59}Ni の IB γ 線放出確率対電子 K 殻捕獲確率比及び、 γ 線スペクトルの測定・解析値等を用いて求めた ^{59}Ni の IB γ 線による表面線量率は、特性 X 線及び ^{94}Nb の線量率より大きく、年間の表面被ばく線量は 650Sv/y にもなる。従って、これまで安全貯蔵-解体撤去時の被ばく及び解体廃棄物の長期保管時の支配核種は、 ^{94}Nb であるとしてきたが $^{59}\text{Ni}(IB)$ になる。また、長寿命運転になると、長半減期核種の放射能が増加し安全貯蔵してもメリットが益々少なくなる。今後、種々の課題について十分な検証・評価を行う予定である。

参考文献 1) M.Pfützner, K.Pachcki and J.Żylicz, "Evidence for the virtual $\beta\text{-}\gamma$ transition ^{59}Ni decay", *Physical Review C* 92, 044305, 7, Oct. 2015. 2) Z.Janas, M.Pfützner etc., "Study of the internal bremsstrahlung accompanying the (2 ν)-forbidden electron capture decay of ^{59}Ni ", *Nuclear Physics A* 525(1991), pp391-403. 3) 助川武則, 畠山睦夫, 柳原敏, 原子炉の廃止措置における残存放射能評価方法の検討, JAERI-Tech 2001-058, 2001 年 9 月. 4) H.Ezure, "Effect of Neutron Spectrum on Effective Cross Section in Evaluation of Residual Radioactive Inventory in Nuclear Reactors", *J. Nucl. Sci. Technol.* 35, 4, pp255-263, April 1998. 5) Table of radionuclides Introduction, 2011: Marie-Martine BÉ(CEA/LIST-LNE/LNHB, ^{59}Ni). 6) ICRP 116, 付属書 A, 2010. 7) アイソトープ手帳 11 版, p29, 日本アイソトープ協会, 平成 23 年 3 月. 8) www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients, July 2004 NISTIR 5632. 9) M.Pfützner からの私信。

*Hideo Ezure Nippon Advanced Information Service Company, Inc. (NAIS)

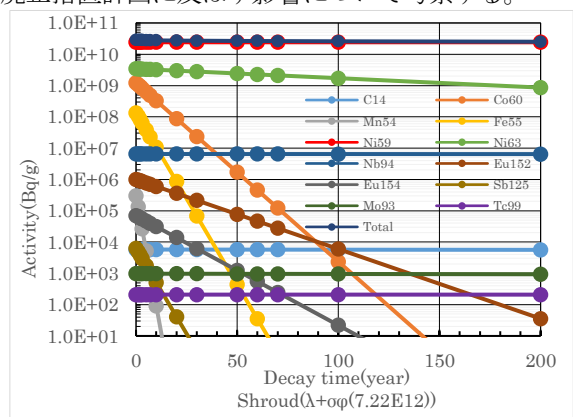


図1 炉心シュラウドの放射能濃度の時間変化

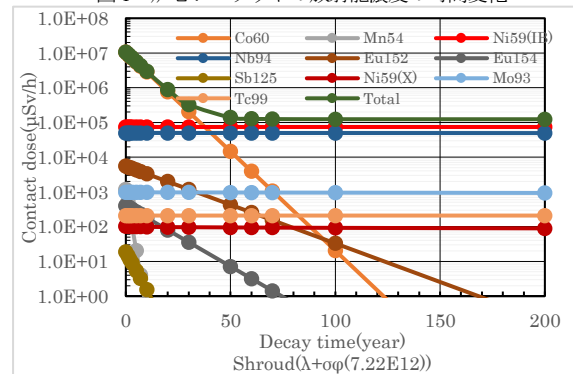


図2 炉心シュラウドの表面線量率の時間変化