

⁵⁹Ni の放射能が廃止措置計画に及ぼす影響 (2)
Influence of ⁵⁹Ni radioactivity on decommissioning (2)

*江連 秀夫 株式会社 ナイス

「2019 年春の大会」では、主に BWR のシュラウドの ⁵⁹Ni の内部制動放射による線量率等について発表した。今発表では、RPV のクラッド及び母材の線量率を評価し、この結果が廃止措置計画に及ぼす影響、中性子スペクトル、中性子束及び不純物の含有率に関わる課題等について考察する。

キーワード：EC 崩壊、⁵⁹Ni、放射能、RPV、放射能、線量、廃止措置、内部制動放射

1. まえがき 「2019 年春の大会」では、BWR のシュラウド(SUS304)の ⁵⁸Ni が放射化し、⁵⁹Ni が生成され、その内部制動放射(IB)による線量率等について発表した。今回は、RPV (圧力容器) のクラッド及び母材の線量率を計算し、この結果が廃止措置計画に及ぼす影響、中性子スペクトル、中性子束及び不純物の含有率に関わる課題等について考察する。⁵⁹Ni の IB による線量の評価方法は前回¹⁾と同じである。

2. 解析 JPDR の RPV での放射能濃度の測定、解析²⁾を行なっているので、測定値、運転履歴、核断面積等を用いて年間 80% の稼働率で 60 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 RPV の放射能濃度、線量率を求めた。ただし、放射能が測定されていない核種もあるので、⁶⁰Co の測定値を用いた。クラッド及び母材の線量率をそれぞれ図 1 及び図 2 に示す。

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

記号：汎用例と同じ。孫核種、異性体転移：省略、ただし ^{166m}Ho は、半減期が 1200 年、直接 β 崩壊して安定核種になるので考慮。
 $\sigma_k, \sigma_\ell : (n, \gamma), (n, p)$ 等の反応断面積の和。サフィックス 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と仮定した。

図 1 及び図 2 から運転停止直後は ⁶⁰Co、¹³⁴Cs 及び ⁵⁴Mn が線量率の主要核種であるが、50 年を過ぎると ^{166m}Ho による線量率が支配的で、全線量率はほぼ一定となり、クラッドで約 190 μSv/h、母材で約 60 μSv/h である。⁵⁹Ni(IB)及び ⁹⁴Nb による線量率は、^{166m}Ho よりはるかに小さく、クラッドと母材とで大きさが反転している。その理由は、¹⁶⁵Ho と ^{166m}Ho の実効断面積が表 1 に示すように原子炉運転中の中性子スペクトルに左右されるからである。また、シュラウドの ⁵⁹Ni(IB)が大きく、約 59mSv/h である。従って、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、^{166m}Ho にならない。なお、^{166m}Ho の SUS 及び鋼材の含有率は 1ppm 以下で、その変動巾も大きい。

3. 結論 運転停止後 50 年を過ぎると、クラッド及び母材からの線量率は ^{166m}Ho による線量率が支配的になり、⁵⁹Ni(IB)及び ⁹⁴Nb よりはるかに大きい。しかし、この値はシュラウドの ⁵⁹Ni(IB)による線量率よりはるかに小さい。従って、安全貯蔵後の解体撤去開始時期、その被ばく及び解体廃棄物の長期保管時の決定要因核種に ^{166m}Ho はならない。

参考文献 1) 江連秀夫、⁵⁹Ni の放射能が廃止措置計画に及ぼす影響」、2019 年春の年会、2C14-17、2) 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。3) B. Pritychenko and S. F. Mughabghab, “Thermal cross sections, Wescott factors, resonance integrals, Maxwellian averaged cross sections and astrophysical reactions rates calculated from the ENDF/B-VII.1, JEFF-3.1.2, JENDL-4.0 ROSFONO-210, CENDL-3.1, and EAF-2010 evaluated data libraries”, National data center, Oct. 2012、4) JAEA NDC, JENDL/AD-2017、2018/05 5) JAEA NDC, Table of thermal cross sections, resonance integrals, etc., 2019/01 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) 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.

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

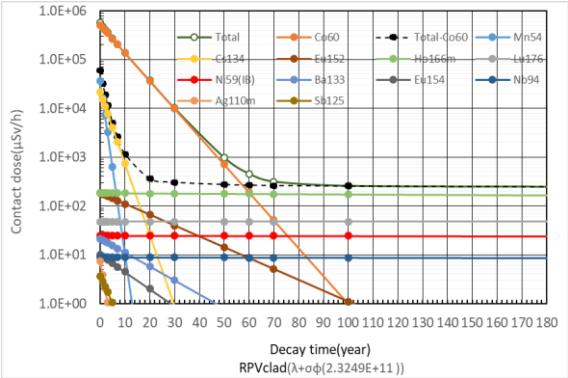


図 1 RPV クラッドの線量率の時間変化

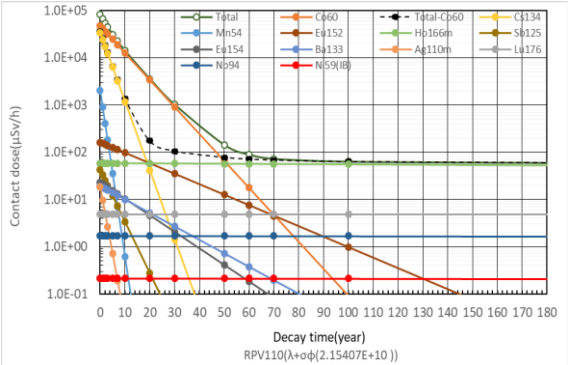


図 2 RPV 母材の線量率の時間変化

Reaction	Ni58(n,γ)Ni59	Nb93(n,γ)Nb94	Ho165(n,γ)Ho166m	Lu175(n,γ)Lu176
Cross section of mother nuclide(b)				
Mother nuclides	Ni58	Nb93	Ho165	Lu175
Thermal c.s.	4.6240E+00	1.1430E+00	3.4053E+00	6.5341E+00
RI	2.2140E+00	8.9820E+00	3.5879E+01	1.7598E+02
Fast c.s.	8.7000E-03	1.0020E-03	3.9800E-03	3.6209E-02
Equivalent effective cross section of mother nuclide(b)				
Core	3.2500E+00	1.7212E+00	6.1789E+00	2.8900E+01
Shroud	3.0507E+00	9.6701E-01	3.1719E+00	8.6872E+00
Cladding	3.1526E+00	1.3441E+00	4.6746E+00	1.6076E+01
Mother material	4.1122E+00	4.9171E+00	1.8891E+01	8.6258E+01
Cross section of daughter nuclide(b)				
Daughter nuclide	Ni59	Nb94	Ho166m	Lu176
Thermal c.s.	7.5650E+01	1.5760E+01	3.6090E+03	2.0970E+03
RI	1.1980E+02	1.2920E+02	6.7730E+02	9.2090E+02
Fast c.s.	1.0949E-01	3.8892E-02	5.4760E-02	1.2790E-01
Effective cross section of daughter nuclide(b)				
Core	6.2203E+01	2.4343E+01	2.4083E+03	1.4854E+03
Shroud	5.2006E+01	1.3474E+01	2.3516E+03	1.3797E+03
Cladding	5.7128E+01	1.8912E+01	2.3799E+03	1.4183E+03
Mother material	1.0569E+02	7.0554E+01	2.6493E+03	1.7850E+03

表 1 (n, γ) 反応の断面積と構成物の実効断面積