

核データ部会、シグマ調査専門委員会合同セッション

「原子炉の廃止措置における放射化断面積データの現状と利用」

(4) 埋設処分に向けた研究炉の放射能評価計算とその適用方法について

原子力機構
埋設事業センター
河内山 真美

kochiyama.mami@jaea.go.jp

1. はじめに

原子力機構では、研究施設等廃棄物の埋設処分に必要な研究炉の解体廃棄物の計算による放射能インベントリの評価手法を検討している。本稿では、企画セッションでの発表内容 [1]を基に、近年の研究炉に対する放射能評価計算の検討状況と、計算で評価した放射能の埋設事業への適用方法について紹介する。

2. 新しいライブラリを用いた近年の放射能評価計算の検討

研究炉の放射能評価計算では、DORT コードなどを用いて炉内の中性子輸送計算を実施し、得られた中性子スペクトルを用いて ORIGEN-S コードによる炉内構造物の放射化計算を実施する方法を検討してきた。核データライブラリの更新に伴い、近年、JENDL-4.0 [2]及び JENDL/AD-2017 [3]などを基に作成したライブラリを導入して評価を実施しており、放射能の分析データを実施した実績がある立教大学研究炉を対象にした評価結果を報告する。

H28 年度から 30 年度にかけて研究炉の共通的な放射能評価法の構築を目的に、立教大学研究炉を対象に、試料採取及び残存放射能の化学分析と放射能評価計算を実施した [4]。立教大炉の側面図と試料採取位置を図 1 に示す。本検討では、新規ライブラリを用いて放射能評価計算を再度実施し、中性子束の評価及び試料採取位置における放射能濃度評価を実施した [5]。

従来の検討では、JENDL-3.2 から作成された 100 群断面積ライブラリ JSSTDJ-J32 及び SCALE4.4a に付属している ORIGEN-S 用の 3 群断面積を用いて DORT 計算及び放射化計算を実施していた。本検討では、図 2 に示すように JENDL-4.0 を基に作成された多群断面積ライブラリ MATXS-LIB-J40 [6]を使用した DORT 計算に加え、JENDL/AD-2017 を基

に作成された 199 群放射化断面積ライブラリ MAXS/AD-2017 [7]及び DORT 計算で得られた評価地点の中性子スペクトルから作成した 3 群断面積を用いた放射化計算を実施した。

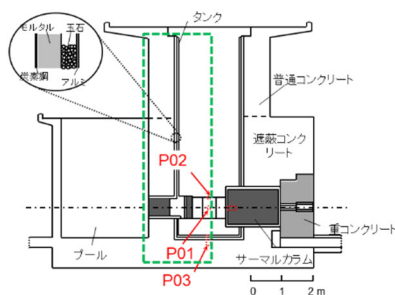


図 1 立教大学原子炉の側面図

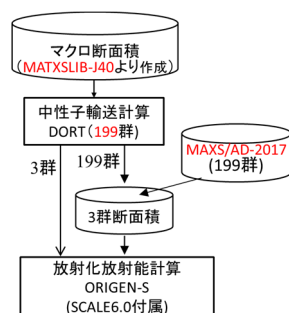


図 2 本検討の放射能評価フロー

図 3 に、立教大炉の炉心高さにおける JSSTDJ-J32 を用いた従来の検討と MATXSLIB-J40 を用いた本検討による熱中性子束の分布を示す。なお、グラフ中に試料採取位置 P01 の位置を併せて示す。これより、MATXSLIB-J40 を用いた中性子輸送計算の方が中性子束が小さい結果が得られた。これは、従来の中性子輸送計算では熱群が少なく、熱中性子の計算を適切に再現できなかったことに起因すると考えられる。

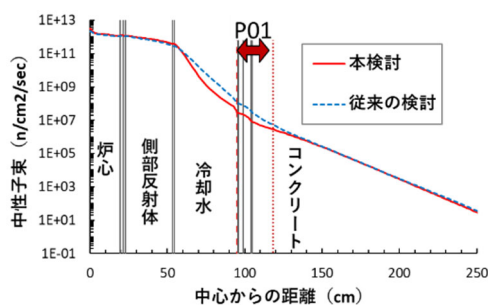


図 3 炉心中心高さでの熱中性子束の分布

アルミニウムタンクの周り（アルミニウム、炭素鋼、デンスコンクリートを含む）から採取したコア試料における H-3、Co-60、Ni-63、Eu-152 の放射化学分析結果（測定）と、本検討の計算による放射能評価の結果（本計算）及びそれらの比較結果を表 1 に示す。従来の検討での放射能評価の結果（従来計算）及び本計算との比較結果についても示した。測定に対する本計算の放射能濃度の比は、測定値が得られたものに関しては、P01 において 0.4～0.9 倍、P02 において 0.9～1.4 倍程度でよく一致していると言える。また、P03 においては概ね 1.5～3.2 倍程度となっており、アルミニウム及び炭素鋼の H-3 においては 16 倍と大きく違っている。これは、放射化計算の元素組成の設定において、起源元素である Li の分析で得られた定量下限値が比較的大きかったため文献値を使用したことが、これが実際の濃度を大きく上回っていたためだと考えた。また、従来計算に対する本計算の値から、本検討による計算が従来の結果の 0.1～0.9 倍と小さくなったが、これは、図 3 で P01 の位置における本検討の熱中性子束が従来の検討のものに比べて小さくなっていることから説明できる。放射化計算の結果は、従来計算と本検討の計算の双方において分析値によく一致しているが、熱中性子束の分布をより正確に反映できている本検討の方がより適切な計算であると考えられる。実際に廃棄物の放射能濃度を評価する際には、計算結果にこれらの差を考慮して値を設定する必要がある。

表 1 測定と計算による採取試料の放射能濃度

材質	核種	試料採取位置	(a)測定 (Bq/g)	(b)従来計算 (Bq/g)	(c)本計算 (Bq/g)	(d) 本計算/ 測定	(e) 本計算/ 従来計算
アルミニウム	H-3	P01	0.105 ± 0.001	0.962	0.0570	0.54	0.06
		P02	0.0255 ± 0.0007	0.762	0.0364	1.4	0.05
		P03	0.00234 ± 0.00052	0.401	0.0367	16	0.1
	Co-60	P01	0.154 ± 0.006	0.315	0.100	0.65	0.32
		P02	0.0682 ± 0.0045	0.205	0.0647	0.95	0.32
		P03	0.0417 ± 0.005	0.148	0.0630	1.5	0.43
	Ni-63	P01	0.314 ± 0.009	0.190	0.135	0.43	0.71
		P02	0.119 ± 0.009	0.118	0.0986	0.83	0.84
		P03	0.0588 ± 0.005	0.117	0.107	1.8	0.91
炭素鋼	H-3	P03	<0.0016	0.421	0.173	>108	0.41
	Co-60	P01	3.38 ± 0.07	7.91	3.09	0.91	0.39
		P02	1.45 ± 0.03	4.88	1.97	1.4	0.40
		P03	0.785 ± 0.019	4.50	1.35	1.7	0.30
	Ni-63	P01	0.588 ± 0.019	0.990	0.364	0.62	0.37
		P02	0.253 ± 0.016	0.625	0.256	0.99	0.41
		P03	0.0727 ± 0.0085	0.414	0.162	2.2	0.39
	Eu-152	P03	<0.077	0.0820	0.0347	>0.45	0.42
コンクリート	H-3	P01	9.91 ± 0.01	23.0	7.95	0.80	0.35
		P02	4.79 ± 0.01	15.5	5.69	1.2	0.37
		P03	1.136 ± 0.003	6.05	3.60	3.2	0.60
	Co-60	P01	1.13 ± 0.02	1.92	0.890	0.79	0.46
		P02	0.518 ± 0.01	1.26	0.617	1.2	0.49
		P03	0.18 ± 0.002	0.958	0.383	2.1	0.40
	Eu-152	P01	1.38 ± 0.02	1.97	0.690	0.50	0.35
		P02	0.536 ± 0.01	1.32	0.577	1.1	0.44
		P03	0.116 ± 0.002	0.647	0.328	2.8	0.51

3. 放射能評価計算結果の埋設処分への適用について

放射能評価を実施した廃棄物を埋設処分するためには、ピット処分やトレンチ処分の放射能濃度の受入基準に適合している（以下「埋設処分区分」という）ことを評価し、埋設施設の安全評価の結果、線量への寄与の大きい重要核種を選定することが必要である。ここで、重要核種とは、埋設事業の事業許可申請書に、廃棄物当たりの最大放射能濃度と埋設施設における総放射能を記載するとともに、廃棄物を埋設する際には、廃棄物に含まれる放射能濃度が事業許可申請書に記載した最大放射能濃度を超えないことを規制機関

から確認を受ける核種のことである。

上記の原子炉施設の放射能評価結果を埋設処分する廃棄物の放射能濃度として適用するため、図4のフローに従って、解体で発生したJPDRの生体遮蔽コンクリートのうち現在保管されている廃棄物を対象（以下「埋設対象廃棄物」という）に検討をした結果を紹介する。

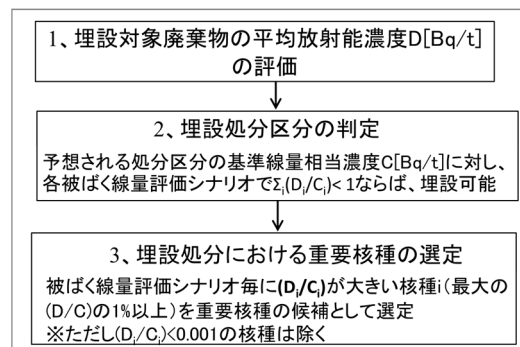


図4 埋設処分に必要な検討のフロー

なお、埋設施設の設置場所や施設設計はまだ決まっていないため、概念設計[8]に従って想定される被ばく線量評価シナリオにおける核種 i 毎の基準線量相当濃度 C (Bq/t)[9]と、JPDR原子炉の計算結果により得られた埋設対象廃棄物の平均放射能濃度 D (Bq/t)との比である相対重要度 (D_i/C_i) を用いてこれらの評価を行った。

埋設対象廃棄物の放射能評価計算では、MATXSLIB-J40から作成した断面積を用いてJPDR原子炉全体のDORT計算を行い、3群化した中性子スペクトルとSCALE6.0内蔵の3群断面積を用いて図5に示す保管コンクリートを対象にORIGEN-S計算を行った[10]。

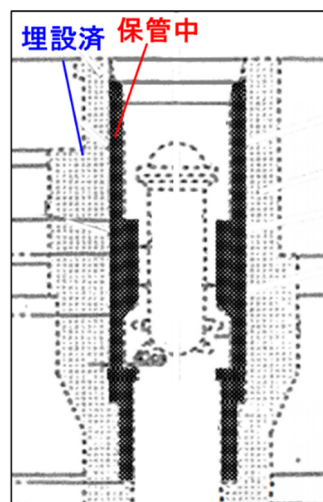


図5 JPDRの生体遮蔽コンクリート

トレンチ処分の線量評価シナリオ毎に、140 核種 i に対する相対重要度 (D_i/C_i) の合計 ($\Sigma(D_i/C_i)$) を計算したところ、JPDR の保管コンクリートでは、表 2 に示すように全ての線量評価シナリオにおいて 1 を超えない ($\Sigma(D_i/C_i) < 1$) ため、トレンチ処分の基準線量相当濃度を満足でき、トレンチ埋設処分が可能と判定した。

表 2 線量評価シナリオ毎の相対重要度の和 $\Sigma(D_i/C_i)$

No.	核種	河川水	灌漑水	河川岸			跡地利用	
		河川水 利用	河川水/ 灌漑水利用	河川岸 建設	河川岸 居住	河川岸 農耕作業	建設	居住
1	H-3	1E+00	1E+00	3E-05	1E-05	1E+00	2E-06	1E+00
3	C-14	3E-01	2E-03	8E-07	1E-06	3E-03	2E-06	2E-02
7	Cl-36	7E-05	2E-03	1E-05	5E-06	7E-03	3E-06	4E-02
9	Ca-41	5E-04	8E-03	7E-06	2E-06	--	1E-06	8E-02
21	Sr-90	3E-06	8E-05	2E-07	3E-08	3E-04	7E-07	5E-02
66	Eu-152	5E-10	3E-08	1E-05	7E-06	6E-07	1E+00	3E-01

また、トレンチ処分の線量評価シナリオ毎に相対重要度が最大となる核種の値 $(D_i/C_i)_{MAX}$ に対して 1%以上の値となる核種を選定した。 $(D_i/C_i)_{MAX}/(D_i/C_i)$ の値の一部を表 3 に示す。ただし、相対重要度 (D_i/C_i) が 0.001 より小さいものは十分に被ばく線量が小さいため除外した。本試算では、H-3、C-14、Cl-36、Ca-41、Sr-90、Eu-152 が該当し、これらの核種が重要核種の候補となると想定される。実際の埋設事業許可申請の際には、埋設施設の設計及び線量評価を反映した上で、上記の方法で埋設処分区分の判定及び重要核種の選定を実施することとなる。

表 3 対象廃棄物に対する $(D_i/C_i)/(D_i/C_i)_{MAX}$ の試算結果

	(自然事象10μSv/y)					(人為事象300μSv/y)	
	河川水	灌漑水	河川岸			跡地利用	
	河川水 利用	河川水/ 灌漑水利用	河川岸 建設	河川岸 居住	河川岸 農耕作業	建設	居住
(D_i/C_i) の合計	8.2E-01	1.1E-01	4.3E-03	7.9E-04	6.9E-02	1.1E-01	1.5E-01

4. おわりに

埋設処分においては、中性子輸送計算及び放射化計算によって廃棄物の放射能濃度を評価した上で、埋設処分区分の判定及び重要核種の評価をする必要がある。研究炉の解体の事前に埋設処分区分を考慮することにより、合理的な解体作業や埋設処分に向けた処理等の廃棄物管理が可能になると考えられる。放射能評価計算の結果が、埋設処分において規制機関による確認に直接用いられることも想定されることから、精度の高い放射能評価計算が必要となると考えられる。今後も新しい計算コードやライブラリの導入を検討し、放射能評価手法に盛り込んでいくとともに、研究炉の管理者等と意見交換を行い、研究炉に共通的な放射能評価手法の確立 [11]を進めていくことを考えている。

参考文献

- [1] 河内山真美ほか, “原子炉の廃止措置における放射化断面積データの現状と利用 (4) 埋設処分に向けた研究炉廃棄物の放射化計算の検討状況”, 日本原子力学会 2022 年秋の年会, 3N P04, (2022).
- [2] Shibata, K. et al., JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering, J.Nucl. Sci. Technol., vol.48, No.1, pp.1-30, (2011).
- [3] Shibata, K. et al., Activation Cross-section File for Decommissioning of LWRs, JAEA-Conf 2016-004, pp.47-52, (2016).
- [4] 村上昌史ほか, 試験研究用原子炉の解体により発生する廃棄物の放射能濃度評価方法の検討, JAEA-Technology 2019-003, 50p, (2019).
- [5] 河内山真美ほか, “DORT コード及び MCNP コードを用いた試験研究炉の放射能評価手法の検討”, JAEA-Technology 2022-009, 56p, (2022).
- [6] 日本原子力研究開発機構炉物理標準コード研究 Gr., MATXS LIB-J40, https://rpg.jaea.go.jp/main/ja/library_matxslibj40/ (accessed 2022-9-1).
- [7] Konno, C., Development of multi-group neutron activation cross-section library from JENDL/AD-2017, Proceedings of the 2019 Symposium on Nuclear Data, November 28-30, 2019, Kyushu University, Chikushi Campus, Fukuoka, Japan, JAEA-Conf 2020-001, pp.193-197, (2020).
- [8] 天澤弘也ほか, 研究施設等廃棄物浅地中処分施設の概念設計, JAEA-Technology 2012-031, 338p, (2012).
- [9] 菅谷敏克ほか, “研究施設等廃棄物の浅地中処分のための基準線量相当濃度の検討(その 1)”, JAEA-Technology 2021-004, 79p, (2021) .
- [10] 河内山真美ほか, “浅地中処分のための JPDR 生体遮蔽コンクリートの放射能評価手法の検討”, JAEA-Technology 2021-010, 61p, (2021).
- [11] 岡田翔太ほか, “試験研究用原子炉から発生する解体廃棄物に対する理論計算法による放射能濃度の共通的な評価手順”, JAEA-Testing 2022-002, 66p, (2022).