

リサイクル燃料備蓄センター設工認
設 2-補-004
2021 年 11 月 29 日

リサイクル燃料備蓄センター
設計及び工事の計画の変更認可申請書
(補足説明資料)

放射線による被ばくの防止について

令和3年11月

リサイクル燃料貯蔵株式会社

目次

1. 目的	1
-------------	---

(金属キャスクの放射線の遮蔽に関する補足説明)

2. BWR用大型キャスク (タイプ2A) の遮蔽評価条件等の 妥当性について	1
3. 解析に使用した基本的なデータについて	2
4. 二次元輸送計算コードで使用する断面積ライブラリについて	6

(使用済燃料貯蔵建屋の放射線の遮蔽に関する補足説明)

5. 金属キャスクの解析モデルの妥当性について	8
-------------------------------	---

1. 目的

本資料は、被ばく解析の対象とする使用済燃料集合体の妥当性及び被ばく解析に入力する材料物性値や核反応データセットの妥当性について補足し、今回申請する金属キャスクと貯蔵建屋による被ばくの防止についてより詳しく説明するものである。

(金属キャスクの放射線の遮蔽に関する補足説明)

2. BWR用大型キャスク(タイプ2A)の遮蔽評価条件等の妥当性について

BWR用大型キャスク(タイプ2A)に収納する燃焼度が同じ最高燃焼度40,000 MWd/t、平均燃焼度34,000 MWd/tである新型8×8ジルコニウムライナ燃料と高燃焼度8×8燃料をそれぞれ全数収納した場合の金属キャスク表面及び表面から1mの位置における線量当量率評価にあたっては、各使用済燃料集合体の軸方向燃焼度分布、中性子実効増倍率、燃料構造材の材質及び質量を考慮している。

いずれの部位においても高燃焼度8×8燃料全数収納時よりも新型8×8ジルコニウムライナ燃料全数収納時の線量当量率が高いことから、BWR用大型キャスク(タイプ2A)の遮蔽評価としては、新型8×8ジルコニウムライナ燃料を全数収納した場合が最も厳しくなる。

線量当量率の評価では、中性子実効増倍率(k_{eff} : 0.259(新型8×8ジルコニウムライナ燃料), 0.272(高燃焼度8×8燃料))を用いて中性子の増倍効果($1/(1-k_{\text{eff}})$)を考慮しているが、その効果(1.350(新型8×8ジルコニウムライナ燃料), 1.374(高燃焼度8×8燃料))の差は僅かである。従って、中性子実効増倍率の差異による影響についても、元々の一次中性子線源強度が高燃焼度8×8燃料と比較して4割程大きい新型8×8ジルコニウムライナ燃料の線量当量率に包絡される。

3. 解析に使用した基本的なデータについて

(1) 遮蔽材の密度について

解析で使用した遮蔽材の密度は、ばらつきを考慮し、最小密度としている。

金属材料の最小密度は、文献値や購入実績を参考にして定めたメーカー設定値である。レジンの最小密度は、メーカーで保証値を定めて、密度測定により保証値を下回らないことを確認している。(第3-1表参照)

(2) 遮蔽厚さについて

解析モデルの各種寸法は、公称値でモデル化している。遮蔽厚さは、各遮蔽体の最小密度に係数(最小寸法/公称寸法)を乗じることで、解析において最小厚さの評価となるようにしている。

(3) 元素組成について

ガンマ線の遮蔽能力は、ほぼ密度で決まるため微量元素の影響は無視できる。

中性子の遮蔽能力は、特定の元素である水素の密度で決まり、その他の元素の寄与は少ないため、微量元素の影響は無視できる。また、組成のばらつきの影響は、無視できるレベルである。主な遮蔽材料である炭素鋼について、微量元素を無視しても線量当量率に有意な影響を与えないことを確認している。(第3-2表～第3-4表参照)

別添 3-1 表 金属キャスクの遮蔽材の密度及び元素組成

項目 材料	遮蔽材の 密度 (g/cm ³)	元素組成 (重量%)	備考
炭素鋼 ()	[Redacted]	Fe: 100	密度：文献値や購入実績を参考に定めたメーカー設定値 組成：微量元素無視
オーステナイト系 ステンレス鋼 ()		Fe: 72 Cr: 19 Ni: 9	密度：文献値や購入実績を参考に定めたメーカー設定値 組成：JIS G4303 [Redacted] 記載値の中央値
析出硬化系 ステンレス鋼 ()		Fe: 76 Cr: 16 Ni: 4 Cu: 4	密度：文献値や購入実績を参考に定めたメーカー設定値 組成：JIS G4303 [Redacted] 記載値の中央値
ほう素添加 ステンレス鋼 ()		B: 1 Fe: 71 Cr: 19 Ni: 9	密度：文献値や購入実績を参考に定めたメーカー設定値 組成：Bの組成は最小保証値 [Redacted]
アルミニウム合金 ()		Al: 100	密度：文献値や購入実績を参考に定めたメーカー設定値 組成：微量元素無視
レジン*1		—*2	密度：メーカー保証値*1 組成：メーカー保証値*1

*1：このレジンはBWR用大型キャスク(タイプ2A)の製造者の開発品である。

*2：主成分とその配合比を管理している。主成分(配合比)は以下の通りである。

[Redacted]

別添 3-2 表 側部表面における線量当量率^{注1)}比較

(μ Sv/h)

計算ケース ^{注2)}								
中性子								
ガンマ線	二次ガンマ線	26.9	26.6	26.8	26.5	26.9	26.9	26.4
	燃料有効部	95.8	95.6	95.6	96.2	95.8	95.7	95.8
	構造材放射化	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
合計		195.5	192.4	194.8	193.9	195.4	195.3	190.3
Fe100%に対する比 (各ケース合計 /本評価の合計)		—	0.984	0.996	0.992	0.999	0.999	0.973

注1) : 評価方法, 計算条件

- ・ BWR用大型キャスク(タイプ2 A)の燃料中心高さ半径方向一次元輸送計算を各ケースで実施し, 得られた 1 cm 線量当量率の比を, 申請値(Fe100%の評価)に乗じて算出。^{注3)}
- ・ 炭素鋼の密度を保存して組成のみを変更。
- ・ 計算に使用している核データ DLC23 に含まれない は, MATXSLIB-J33 ライブラリを縮約して使用。

注2) : BWR用大型キャスク(タイプ2 A)の胴で使用している炭素鋼の化学成分(別添3-3表参照)

注3) : BWR用大型キャスク(タイプ2 A)の燃料中心高さ半径方向一次元輸送計算結果(別添3-4表参照)

第 3-3 表 炭素鋼の化学成分
(BWR用大型キャスク(タイプ2A)の胴)

材料名	炭素	けい素	マンガン	りん	硫黄

第 3-4 表 燃料中心高さ半径方向一次元輸送計算結果 (μ Sv/h)
()内は Fe:100%の結果との比

計算ケース	Fe:100 %						
中性子							
ガンマ線	二次ガンマ線						
	燃料有効部						
		(0.964)	(0.994)	(0.978)	(0.999)	(0.999)	(0.936)
		(0.988)	(0.998)	(0.984)	(1.000)	(0.999)	(0.980)
		(0.998)	(0.998)	(1.004)	(1.000)	(0.999)	(1.000)

- ・ 構造材放射化は値が小さいため評価対象としていない。
- ・ 一次元計算であるため、燃料中心部が上下方向に無限に続く体系になり、計算結果は有限体系(R-Z)の申請値より高くなる。

4. 二次元輸送計算コードで使用する断面積ライブラリについて

4.1 断面積ライブラリの妥当性

金属キャスクの遮蔽解析では、最も実績のある手法である二次元輸送計算コードDOT3.5及び断面積ライブラリDLC-23/CASKの組合せで評価をしている。しかし、本断面積ライブラリは、鉄等の共鳴領域の反応を補正する自己遮蔽因子が考慮されていないため、鉄透過の際の中性子線量当量率を過小評価することが文献等で知られている。

そこで、鉄の共鳴領域の自己遮蔽因子も考慮でき、中性子線量当量率の評価が向上するとされている断面積ライブラリMATXSLIB-J33を用いたBWR用大型キャスク（タイプ2A）の金属キャスク表面及び同表面から1m位置の線量当量率による評価⁽¹⁾を確認・分析した結果、金属キャスク表面における最大線量当量率は1.811 mSv/hであり2 mSv/h以下となること、金属キャスク表面から1mの位置における最大線量当量率は98.6 μ Sv/hであり100 μ Sv/h以下となることが、それぞれ確認されている（第4-1表）。

4.2 参考文献

- (1) 日立GEニュークリア・エナジー株，「補足説明資料 1-2 HDP-69B(B)型の遮蔽設計に関する説明資料」，FRO-TA-0003/REV.1，平成30年4月

第4-1表 線量当量率評価結果の比較の例 (配置A*5) (1)

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部				側中央		底部								
	軸方向		径方向 (トラニオン部)				径方向 (トラニオン部)		軸方向						
	①	③a		③b		⑤		⑦a		⑦b		⑩			
ライブラリ* 2</td <td>A</td> <td>B</td> <td>A</td> <td>B</td> <td>A</td> <td>B</td> <td>A</td> <td>B</td> <td>A</td> <td>B</td> <td>A</td> <td>B</td> <td>A</td> <td>B</td>	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	
ガンマ線	燃料有効部	0.1	0.1	0.5	0.3	0.5	0.3	95.8	70.6	1.3	0.9	24.2	17.5	3.0	2.0
	構造材放射化	4.9	3.9	132.5	169.7	110.4	118.2	< 0.1**	< 0.1**	12.8	9.8	68.2	47.6	19.1	13.3
	二次ガンマ線	0.7	0.6	2.0	2.6	2.1	2.7	26.9	36.9	4.6	7.8	7.8	10.8	2.3	3.2
中性子		188.2	295.3	253.9	347.2	505.2	770.1	72.7	87.8	705.9	1445.7	1012.5	1735.1	265.9	598.4
	合計	193.9	300.9	388.9	519.8	618.2	891.3	195.5	195.4	725.6	1454.2	1107.7**	1811.0**	290.3	616.9
評価点	②		④a		④b		⑥		⑧a		⑧b		⑩		
ライブラリ* 2</td <td>A</td> <td>B</td> <td>A</td> <td>B**</td> <td>A</td> <td>B**</td> <td>A</td> <td>B</td> <td>A</td> <td>B**</td> <td>A</td> <td>B</td> <td>A</td> <td>B</td>	A	B	A	B**	A	B**	A	B	A	B**	A	B	A	B	
ガンマ線	燃料有効部	0.5	0.3	12.9	8.9 (2.6)	12.9	8.9 (3.2)	40.5	29.6	21.2	15.4 (0.8)	21.2	15.4	3.9	2.9
	構造材放射化	45.6	45.4	24.0	20.4 (27.1)	24.0	20.4 (25.2)	0.7	0.5	8.1	6.3 (8.8)	8.1	6.3	59.3	44.9
	二次ガンマ線	0.2	0.2	3.1	4.3 (2.0)	3.1	4.3 (2.2)	10.5	14.3	5.3	7.3 (0.6)	5.3	7.3	0.9	1.0
中性子		28.7	52.7	17.3	23.0 (38.4)	20.9	30.5 (39.1)	23.2	32.2	13.4	16.7 (53.8)	24.5	40.8	16.2	31.4
	合計	75.0	98.6* 2</td <td>57.3</td> <td>56.6 (70.1)</td> <td>60.9</td> <td>64.1 (70.7)</td> <td>77.9</td> <td>76.6</td> <td>48.0</td> <td>45.7 (64.0)</td> <td>59.1</td> <td>66.8</td> <td>90.3**</td> <td>80.2</td>	57.3	56.6 (70.1)	60.9	64.1 (70.7)	77.9	76.6	48.0	45.7 (64.0)	59.1	66.8	90.3**	80.2

注記*1: " $<0.1^*$ "の値は、" 0.1^* "として合計値に合算した。

*2: 下線で示す値は、表面及び表面から1m離れた位置における線量当量率の最大値である。

*3: DLG-23/GASRを用いた評価をA、MATSLIB-J33を用いた評価をBとする。

*4: AとBで評価方向ごとの最大値を与える位置が異なる。Aと同じ評価位置における結果を示し、()内にはBの評価位置における結果を示す。

*5: 申請書添付書類3 添付3-1-1 第2表に基づく配置Aを示す。

(使用済燃料貯蔵建屋の放射線の遮蔽に関する補足説明)

5. 金属キャスクの解析モデルの妥当性について

5.1 妥当性の考え方

金属キャスクは、線源であると同時に遮蔽体でもあり、金属キャスク相互の遮蔽効果が期待できる。この効果を線量評価において考慮するため、金属キャスク内部には吸収体（黒体）を設けている。

ただし、金属キャスクを全て吸収体とした場合には、建屋内の線量や敷地境界外における線量を過小評価する可能性があることから、粒子の散乱を考慮するために金属キャスクの外筒やその内側の中性子遮蔽材を模擬している。

金属キャスクモデルは、相互遮蔽効果実験⁽¹⁾で得られた知見をもとに、外筒厚さを4 cm、中性子遮蔽材の厚さを10 cm、中性子遮蔽材の内側を吸収体（黒体）としている。この妥当性を確認するため、外筒厚さ、中性子遮蔽材の厚さをパラメータとした貯蔵区域内の線量評価を行っている（評価条件、評価方法は、貯蔵建屋遮蔽評価と同一。ただし、貯蔵建屋モデルは平成19年当時のモデルを使用。キャスクの考察のため、貯蔵建屋モデルの違いの影響はなし）。

貯蔵区域内の中性子線量評価結果（第5-1表）から、相互遮蔽効果実験と同様に、下記を確認している。

- ・外筒厚さは4 cmとすることが保守的な評価となる
- ・中性子遮蔽材の厚さは10 cm確保すれば、それ以上厚くしても評価結果に影響は生じない

また、ガンマ線については、外筒厚さを2 cmから4 cmに変更しても評価結果には殆ど影響しないことを確認している。（第5-2表参照）

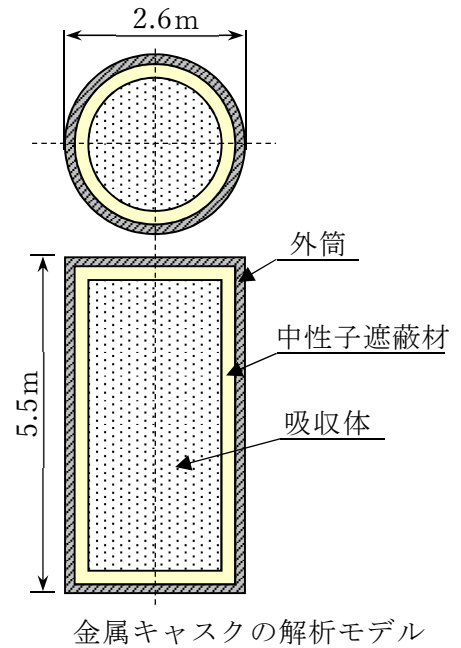
以上より、外筒4 cm、中性子遮蔽材10 cm、中性子遮蔽材の内側を吸収体（黒体）としている金属キャスクモデルは妥当なものとする。

5.2 参考文献

- (1) 小佐古敏莊, 飯本武志, 石川智之, 坪井孝文, 寺村政浩, 岡村知巳, 成宮祥介, 研究論文“MCNP コードの金属キャスク貯蔵方式中間貯蔵施設線量評価への適用”, 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 6, No. 2, p. 225-238 (2007)

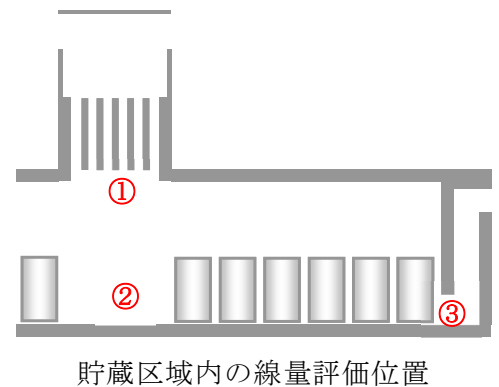
第5-1表 貯蔵区域内の実効線量率（中性子）

		評価位置	実効線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	
			外筒厚さ	
			2cm	4cm
中性子遮蔽材厚さ	5cm	①	365	387
		②	346	380
		③	278	295
	10cm	①	362	392
		②	355	379
		③	282	294
	20cm	①	366	389
		②	356	379
		③	282	292



第5-2表 貯蔵区域内の実効線量率（ガンマ線）

評価位置	実効線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	
	外筒厚さ	
	2 cm	4 cm
①	173	172
②	146	146
③	130	130



(注) 貯蔵建屋は耐震の裕度確保の観点から設計を変更しているが、本資料の評価は設計変更前のものである。