

平成 17 年 2 月 2 日
日本原子力研究所

主な原子炉施設（軽水炉及びガス炉）及び重水炉（JRR-2）における
重要放射性核種の選定について
（原子力安全委員会のクリアランスレベルと IAEA 安全指針 RS-G-1.7 放射能濃度値の比較）

1. 目的

原子力安全委員会（以下、原安委）で導出したクリアランスレベルと IAEA 安全指針 RS-G-1.7（旧 DS-161）の放射能濃度値の比較を行い、主な原子炉施設（軽水炉及びガス炉）及び重水炉（JRR-2）の廃止措置等に伴い発生する金属及びコンクリートがクリアランスレベル以下であることを判断する場合に評価対象とする重要放射性核種の選定及び D/C の総和への影響について検討した。

重要放射性核種：線量評価において相対的に重要となる放射性核種

原子炉施設の廃止措置等に伴い発生する廃棄物等は、汚染経路毎の放射性核種組成が大きく異なることはないと考えられるため、線量評価の観点から影響度の大きい限られた放射性核種の濃度を制限することで、その他の放射性核種の濃度も自ずと制限されると考えられる。よって、重要放射性核種を定め、それを検認における評価対象核種とすることが基本である。

（原安委「主な原子炉施設におけるクリアランスレベルについて」（クリアランスレベル報告書 平成 11 年 3 月）より）

2. 検討結果

(1) 原安委クリアランスレベルと RS-G-1.7 放射能濃度値の比較

原安委が算出した 32 核種（重水炉の重要放射性核種 Ba-133 を含む）のクリアランスレベルと RS-G-1.7 に示された放射能濃度値を表 1 に示す。原安委クリアランスレベルと RS-G-1.7 放射能濃度値を、原安委で抽出した重要放射性核種（9 核種）で比較すると Sr-90 以外の核種はその濃度値が下がっており、Co-60 が 1/4、Cs-137 が 1/10 などである。

クリアランスレベルに RS-G-1.7 を適用した場合、重要放射性核種のうち、H-3、Sr-90、全 α の 3 核種は相対重要度が低くなる。一方、重要放射性核種以外の核種では、C-14、Ni-59、Ni-63、Zn-65、Ru-106、I-129、Ta-182 の相対重要度が高くなり、特に、Ru-106、I-129 は相対重要度が 1 桁高くなる。

相対重要度： 炉型、対象物及び汚染経路毎に最大となった放射性核種の D/C
を 1 とし、他の放射性核種の D/C を規格化したもの。

$$\text{相対重要度比率} = \frac{D_i / C_i}{(D_j / C_j)_{\text{MAX}}}$$

D_i : 核種 i の放射能濃度 (Bq/g)

C_i : 核種 i のクリアランスレベル (Bq/g)

j : D/C が最大となる核種

(2) 重要放射性核種の選定

「クリアランスレベル報告書」における重要放射性核種の抽出と同様に、各炉型（BWR、PWR、GCR、軽水炉型試験研究用原子炉施設及び重水炉（JRR-2））、対象物及び汚染経路（放射化物、汚染物）毎の推定濃度を用いて、クリアランスレベルに RS-G-1.7 を適用した場合の相対重要度を評価し、相対重要度比率が 0.01 以上（2 桁の範囲に入る）となる放射性核種を重要放射性核種として抽出した。

各炉型、対象物及び汚染経路毎の相対重要度の評価結果を表 2、表 3 及び表 4 に示す。この結果から、重要放射性核種を以下のとおり抽出した。ここでは、「クリアランスレベル報告書」に示された重要放射性核種に対して、RS-G-1.7 を適用した場合に相対重要度（桁数）が変化した核種を下線及び二重取り消し線で、また、新たに重要放射性核種として抽出された核種を二重下線で示した。

主な原子炉施設（軽水炉及びガス炉）

（最大） Co-60、Eu-152

（1 桁目） [Sc-46]、Mn-54、[Zn-65]、Cs-137、Eu-154

（2 桁目） H-3、[Co-58]、~~[Fe-59]~~、~~[Zn-65]~~、Sr-90、

[Ru-106]、[Ag-110m]、Cs-134、~~Cs-137~~、[Ta-182]、全 α

[]内は、運転に伴って発生する放射性核種として抽出され、かつ、「クリアランスレベル報告書」に示された以下の検討により重要放射性核種の対象外とした核種を示す。

- a) 重要放射性核種として抽出した放射性核種のうち、相対重要度が 2 桁目である Co-58、Fe-59、Zn-65、Ag-110m 及び Ta-182 は、運転に伴って発生する廃棄物等（以下「運転中廃棄物」）により抽出される放射性核種であり、いずれも半減期の短い γ 線放出核種である。運転中廃棄物は、廃止措置に伴って発生する廃棄物等（以下「解体廃棄物」）に比べ発生量が極めて少ないため、作業時間等の各評価パラメータの値が小さくなる。このため、運転中廃棄物の放射性核種の単位濃度当たりの線量が解体廃棄物に比べて小さくなり、クリアランスできる放射性核種の濃度が大きくなる。したがって、相対重要度は小さくなることから、重要放射性核種の対象外とした。
- b) Sc-46 は軽水炉型試験研究用原子炉施設の運転中廃棄物である放射化コンクリートから発生する放射性核種であり、その発生量が極めて少ないと考えられることから、同様に相対重要度は小さくなり、重要放射性核種の対象外とした。

RS-G-1.7 を適用した場合に新たに重要放射性核種として抽出された核種 Ru-106（半減期 1 年）は、燃料損傷のある PWR 施設からの運転に伴って発生する放射性核種であり、上記 a) と同様の理由により、重要放射性核種の対象外とすることができる。

重水炉（JRR-2）

（最大） H-3、Co-60、Ba-133、~~Eu-152~~

（1 桁目） ~~Ba-133~~、Eu-152、

（2 桁目） Eu-154

JRR-2 の生体遮へい体は粗骨材に重晶石を含む重コンクリートであり、そのため Eu-152 に替わって Ba-133 が最重要核種になるが、新たに重要放射性核種として抽出される核種は無い。

以上の検討から、主な原子炉施設（軽水炉及びガス炉）及び重水炉（JRR-2）における重要放射性核種は、クリアランスレベルに RS-G-1.7 を適用しても変更ないものと判断する。

なお、RS-G-1.7 の Table 2 に記載されていない Ag-108m 及び Ba-133 のレベル基準値については、原安委資料に引用されている下記文献を参照した。

IAEA, Derivation of Activity Concentration Levels for Exclusion, Exemption and Clearance, Draft Safety Report （出版準備中）

(3) D/C の総和への影響

原安委のクリアランスレベルと RS-G-1.7 の放射能濃度値に対して、(2)で計算した各炉型（BWR、PWR、GCR、軽水炉型試験研究用原子炉施設及び重水炉（JRR-2））、対象物及び汚染経路（放射化物、汚染物）毎の推定濃度を用いて、クリアランスレベル以下であることの判断基準となる D/C の総和を算出した結果を表 5 に示す。

RS-G-1.7 を適用した場合の D/C の総和は、原安委のクリアランスレベルを用いた場合に比べて 4～5 倍高くなる。これは最も重要な核種である Co-60 の濃度値が 1/4 になるため当然の結果である。このためクリアランスできる廃棄物の量は減少することが予想される。

表 1 原安委クリアランスレベルと RS-G-1.7 放射能濃度値の比較

No.	放射性核種	半減期 (年)	原安委 クリアランスレベル A (Bq/g)	RS-G-1.7 放射能濃度値 B (Bq/g)	A/B	D/C最大をCo-60又は Eu-152とした場合の 相対重要度増減率
1	H-3	1.23E+01	200	100	2	0.5
2	C-14	5.73E+03	5	1	5	1.25 ↑
3	Cl-36	3.00E+05	2	1	2	0.5
4	Ca-41	1.03E+05	80	100	0.8	0.2
5	Sc-46	2.30E-01	0.4	0.1	4	1
6	Mn-54	8.55E-01	1	0.1	10	2.5 ↑
7	Fe-55	2.70E+00	3000 (Bq/cm ²)	1000 (Bq/cm ²)	3	0.75
8	Fe-59	1.22E-01	0.7	1	0.7	0.175
9	Co-58	1.94E-01	0.9	1	0.9	0.225
10	Co-60	5.27E+00	0.4	0.1	4	1
11	Ni-59	7.50E+04	600	100	6	1.5 ↑
12	Ni-63	1.00E+02	2000	100	20	5 ↑
13	Zn-65	6.69E-01	1	0.1	10	2.5 ↑
14	Sr-90	2.91E+01	1	1	1	0.25
15	Nb-94	2.03E+04	0.2	0.1	2	0.5
16	Nb-95	9.59E-02	1	1	1	0.25
17	Tc-99	2.13E+05	0.3	1	0.3	0.075
18	Ru-106	1.01E+00	5	0.1	50	12.5 ↑
19	Ag-108m	1.27E+02	0.3	0.1	-	-
20	Ag-110m	6.90E-01	0.4	0.1	4	1
21	Sb-124	1.65E-01	0.5	1	0.5	0.125
22	Te-123m	3.28E-01	4	1	4	1
23	I-129	1.57E+07	0.7	0.01	70	17.5 ↑
24	Ba-133	1.07E+01	2	0.1	20	5 ↑
25	Cs-134	2.06E+00	0.5	0.1	5	1.25 ↑
26	Cs-137	3.00E+01	1	0.1	10	2.5 ↑
27	Eu-152	1.30E+01	0.4	0.1	4	1
28	Eu-154	8.50E+00	0.4	0.1	4	1
29	Tb-160	1.98E-01	0.9	1	0.9	0.225
30	Ta-182	3.15E-01	0.7	0.1	7	1.75 ↑
31	Pu-241	1.44E+01	10	10	1	0.25
32	全α		0.2	0.1	2	0.5

$$\frac{D_i / C_{Bi}}{D_i / C_{Ai}} = \frac{C_{Ai}}{C_{Bi}}$$

RS-G-1.7 を適用した場合の核種 i の相対重要度比率

原安委クリアランスレベルを適用した場合の核種 i の相対重要度比率

$$\frac{D_{Co-60} / C_{BCo-60}}{D_i / C_{Ai}} = \frac{C_{BCo-60} / C_{Bi}}{C_{ACo-60} / C_{Ai}} = \frac{C_{Ai} / C_{Bi}}{C_{ACo-60} / C_{BCo-60}} (= 4)$$

表 2 放射性核種組成に基づく相対重要度評価結果 (BWR、PWR、GCR)(1 / 2)

BWR	原子炉停止後 0.5 年 (運転廃棄物)					原子炉停止後 6 年後 (解体廃棄物)				
	放射化物			汚染物		放射化物			汚染物	
	ステンレス	炭素鋼	コンクリート	汚染	燃料 損傷	ステンレス	炭素鋼	コンクリート	汚染	燃料 損傷
最重要	Co-60	Co-60	Eu-152	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Eu-152	Co-60	Co-60
1 桁目		Mn-54	Co-60	<u>Mn-54</u>	<u>Mn-54</u>			Co-60		
2 桁目	Mn-54	Fe-59	H-3 Sc-46 <u>Mn-54</u> Fe-59 <u>Zn-65</u> Eu-154	Mn-54 Co-58	Mn-54 Co-58 Cs-134 <u>Cs-137</u>			H-3 Eu-154		<u>Cs-137</u>
3 桁目	Co-58 Fe-59 <u>Zn-65</u>	Fe-55 <u>Fe-59</u> Co-58 Zn-65 Sb-124 Eu-152	<u>C-14</u> Mn-54 Fe-55 <u>Fe-59</u> Zn-65 Ta-182	Fe-59 Zn-65	Fe-59 Zn-65 Sr-90 Cs-137 <u>Ru-106</u>		Fe-55 Eu-152	C-14		Sr-90 Cs-134 Cs-137

PWR	原子炉停止後 0.5 年 (運転廃棄物)					原子炉停止後 6 年後 (解体廃棄物)				
	放射化物			汚染物		放射化物			汚染物	
	ステンレス	炭素鋼	コンクリート	汚染	燃料 損傷	ステンレス	炭素鋼	コンクリート	汚染	燃料 損傷
最重要	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Eu-152	Co-60	Co-60
1 桁目	<u>Mn-54</u>	Mn-54	Mn-54 Eu-152					Co-60		<u>Cs-137</u>
2 桁目	Mn-54 Co-58	Fe-59	H-3 Sc-46 Cs-134 Eu-154 <u>Ta-182</u>	Mn-54 Co-58	Mn-54 Co-58 Sr-90 <u>Ru-106</u> Cs-134 Cs-137 全 α			H-3 Eu-154		Sr-90 Cs-137 全 α
3 桁目	Fe-59 Zn-65	Fe-55 <u>Fe-59</u> Co-58 Zn-65 Eu-152	<u>Fe-59</u> Co-58 <u>Zn-65</u> Te-123m Tb-160 Ta-182	<u>Ni-63</u> Nb-94	<u>Ni-63</u> Sr-90 Nb-94 Ru-106 Eu-154 Pu-241 全 α		Eu-152	Cs-134	C-14 <u>Ni-63</u> Nb-94	C-14 <u>Ni-63</u> Nb-94 <u>Ru-106</u> Cs-134 Eu-154 Pu-241

表 2 放射性核種組成に基づく相対重要度評価結果 (BWR、PWR、GCR)(2 / 2)

GCR	原子炉停止後 6 年 (運転廃棄物)				原子炉停止後 10 年後 (解体廃棄物)			
	放射化物			汚染物	放射化物			汚染物
	ステンレス	炭素鋼	コンクリート	汚染	ステンレス	炭素鋼	コンクリート	汚染
最重要	Co-60	Co-60	Eu-152	Co-60	Co-60	Co-60	Eu-152	Co-60
1 桁目			Co-60	<u>Zn-65</u>			Co-60	
2 桁目			H-3 Cs-134 Eu-154	Zn-65			H-3 Eu-154	
3 桁目	Nb-94	Mn-54 Eu-152		C-14 Mn-54 <u>Cs-137</u>	Nb-94	Eu-152	<u>C-14</u> Cs-134	C-14 Sr-90 Cs-137

- *1：上記表は各放射性核種のうち D/C の最大となった放射性核種の D/C で規格化し、桁で分類したもの。
- *2：燃料損傷を考慮する場合は、標準プラントの推定結果のうち、FP (核分裂生成物) 及び TRU (超ウラン) の核種組成を補正した。(BWR : 1000 倍、PWR : 600 倍)
- *3：運転廃棄物の場合は、原子炉停止後からクリアランスされるまでの期間として、定期点検期間等を考慮して、原子炉停止後 0.5 年後とした。解体廃棄物は原子炉停止後 6 年後とした。ただし、GCR については既に原子炉を停止しているので解体廃棄物は原子炉停止後 10 年、運転廃棄物は 6 年とした。
- *4：運転廃棄物では半減期 1 カ月未満及び解体廃棄物では半減期 1 年未満の放射性核種は、減衰により放射性核種の濃度が初期濃度の 0.02 以下となるため対象外とした。また、放射性希ガスも対象外とした。
- *5：相対重要度 (桁) が原安委クリアランスレベルを適用した場合と比べて変化した核種を「二重取り消し線」及び「下線」で示した。

(出典 : 「原子力発電所の運転及び解体に伴い発生する廃棄物の物量、性状等に関する資料集」(財) 原子力環境整備センター)

表 3 放射性核種組成に基づく相対重要度評価結果
(軽水炉型試験研究用原子炉施設)

軽水型 試験用 原子炉	原子炉停止後 0.5 年 (運転廃棄物)				原子炉停止後 5 年後 (解体廃棄物)			
	放射化物			汚染物	放射化物			汚染物
	ステンス	アルミウム	コンクリート	汚染	ステンス	アルミウム	コンクリート	汚染
最重要	Co-60	Co-60	Eu-152	Co-60	Co-60	Co-60	Eu-152	Co-60
1 桁目			Sc-46 Co-60 Eu-154				Co-60 Eu-154	
2 桁目	<u>Mn-54</u> Co-58	Zn-65 Ag-110m	H-3 Mn-54 Fe-59 Zn-65 Cs-134 Ta-182	Zn-65 Ag-110m			H-3 Cs-134	
3 桁目	Mn-54 <u>Co-58</u> Fe-59	H-3 Mn-54 Fe-59 Ag-108m	<u>Fe-59</u> Nb-95 Ag-110m Sb-124 Tb-160	H-3 Mn-54 Co-58 Fe-59 Ag-108m		H-3 Ag-108m		H-3 Ag-108m

- *1：上記表は各放射性核種のうち D/C の最大となった放射性核種の D/C で規格化し、桁で分類したもの。
- *2：試験研究用原子炉施設としては、JPDR をモデルとした軽水炉型試験研究用原子炉施設について放射性核種組成を算出した。
計算モデル：JPDR (定格出力換算運転年数：約 1.2 年、熱出力：約 21,000MWD)
- *3：運転廃棄物の場合は、原子炉停止後からクリアランスされるまでの期間として、定期点検期間等を考慮して、原子炉停止後 0.5 年後とした。解体廃棄物は原子炉停止後 5 年後とした。
- *4：運転廃棄物では半減期 1 カ月未満及び解体廃棄物では半減期 1 年未満の放射性核種は、減衰により放射性核種の濃度が初期濃度の 0.04 以下となるため対象外とした。また、放射性希ガスも対象外とした。汚染物の評価においては、汚染源を構造材からの CP 核種 (腐食生成核種) と照射燃料における FP 核種とし、CP 核種については JRR - 3M (アルミニウムを使用) の一次冷却材中の実測データを、また、FP 核種については BWR の一次冷却材水中における主要 CP 核種と FP 核種の存在比を、それぞれ使用した。
- *5：相対重要度 (桁) が原安委クリアランスレベルを適用した場合と比べて変化した核種を「二重取り消し線」及び「下線」で示した。

(出典：日本原子力研究所調べ)

表 4 放射性核種組成に基づく相対重要度評価結果
(重水炉「JRR-2」)

重水炉 「JRR-2」	原子炉停止後 5 年 (解体廃棄物)				
	放射化物				汚染物
	ステンレス	アルミニウム	重コンクリート ^{*1} (バライト)	重コンクリート ^{*2} (鉄パンチ)	汚染 ^{*3}
最重要	Co-60	Co-60	Ba-133 Eu-152	Co-60	H-3
1 桁目			Co-60 Ba-133 Eu-152	Eu-152	
2 桁目			H-3 Eu-154	H-3 Eu-154	
3 桁目		H-3 Ag-108m	H-3 Cs-134	Fe-55 Ag-108m Ba-133 Cs-134	

*1：粗骨材に重晶石（主要成分：BaSO₄）を含む重コンクリート

*2：鉄パンチを含む重コンクリート

*3：汚染については重水中の H-3 濃度が他の放射性核種の濃度に比べて格段に大きくなるため、相対重要度評価では H-3 が最重要となり、Co-60 が 6 桁目となる。

*4：上記表は各放射性核種のうち D/C の最大となった放射性核種の D/C で規格化し、桁で分類したもの。また、クリアランスレベルの算出結果がない放射性核種については、今回の算出結果を参考に計算した値を用いた。半減期 1 年未満の放射性核種は、減衰により放射性核種の濃度が初期濃度の 0.04 以下となるため対象外とした。また、放射性希ガスも対象外とした。

(出典：日本原子力研究所調べ)

表 5 重要放射性核種の D/C 総和の比較

炉型	対象物			重要放射性核種のD/Cの総和		
				原安委 クリアランスレベル Σ(D/C) _A	RS-G-1.7 放射能濃度値 Σ(D/C) _B	Σ(D/C) _B Σ(D/C) _A
BWR	運転廃棄物 (原子炉停止後0.5年)	放射化物	ステンレス	0.76	3.08	4.1
			炭素鋼	0.10	0.48	4.7
			コンクリート	0.13	0.51	4.0
		汚染物	汚染	0.70	3.00	4.3
			燃料損傷	0.72	3.13	4.3
	解体廃棄物 (原子炉停止後6年)	放射化物	ステンレス	1.00	4.00	4.0
			炭素鋼	0.18	0.73	4.0
			コンクリート	0.15	0.59	3.9
		汚染物	汚染	1.05	4.20	4.0
			燃料損傷	1.07	4.34	4.0
PWR	運転廃棄物 (原子炉停止後0.5年)	放射化物	ステンレス	0.52	2.36	4.5
			炭素鋼	0.24	1.32	5.6
			コンクリート	0.25	1.12	4.4
		汚染物	汚染	0.53	2.14	4.1
			燃料損傷	0.58	2.42	4.2
	解体廃棄物 (原子炉停止後6年)	放射化物	ステンレス	0.70	2.83	4.0
			炭素鋼	0.50	2.00	4.0
			コンクリート	0.23	0.92	4.0
		汚染物	汚染	0.57	2.29	4.0
			燃料損傷	0.66	2.78	4.2
GCR	運転廃棄物 (原子炉停止後6年)	放射化物	ステンレス	1.22	4.88	4.0
			炭素鋼	0.33	1.34	4.0
			コンクリート	0.18	0.71	4.0
		汚染物	汚染	0.33	1.32	4.0
	解体廃棄物 (原子炉停止後10年)	放射化物	ステンレス	1.20	4.79	4.0
			炭素鋼	0.50	2.00	4.0
			コンクリート	0.17	0.68	4.0
		汚染物	汚染	0.46	1.85	4.0
軽水炉型 試験研究用 原子炉施設	運転廃棄物 (原子炉停止後0.5年)	放射化物	ステンレス	0.82	3.33	4.1
			アルミニウム	0.81	3.25	4.0
			コンクリート	0.21	0.85	4.1
		汚染物	汚染	0.81	3.27	4.0
	解体廃棄物 (原子炉停止後5年)	放射化物	ステンレス	1.14	4.57	4.0
			アルミニウム	0.82	3.27	4.0
			コンクリート	0.27	1.07	4.0
		汚染物	汚染	0.83	3.31	4.0
重水炉 (JRR-2)	解体廃棄物 (原子炉停止後5年)	放射化物	ステンレス鋼	1.07	4.27	4.0
			アルミニウム	1.11	4.41	4.0
			重コンクリート(バライト)	0.23	1.93	8.4
			重コンクリート(鉄パンチ)	0.065	0.260	4.0
			汚染物	汚染	0.005	0.010

注：上記計算における D は、全放射能濃度を 1Bq/g とした場合の核種毎の放射能濃度（組成割合）を示す。