

1～3 号廃棄物埋設施設の C1-36 総放射エネルギー・最大放射能濃度の設定について

1. はじめに

当社は C1-36 に関して「日本原燃(株)六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターにおける低レベル放射性廃棄物の線量評価と今後の対応の報告について」を 2011 年 8 月 31 日に旧原子力安全・保安院に提出した。その後、本報告書の妥当性評価のため、「六ヶ所低レベル放射性廃棄物の線量評価に係る意見聴取会」(以下「意見聴取会」という。)が 2011 年 9 月 29 日～2012 年 3 月 13 日に計 4 回開催され、意見聴取会の結果を受けて、旧原子力安全・保安院から当社に対して 2012 年 3 月 30 日に「日本原燃株式会社六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターにおける低レベル放射性廃棄物に係る塩素 36 の線量評価及び今後の対応について(指示)」が出された。

この指示を受けて、C1-36 の総放射エネルギー及び最大放射能濃度の設定に際して必要となるデータ取得等は、主に電気事業者において検討を進めてきた。

本変更申請における C1-36 の総放射エネルギーと最大放射能濃度の設定方法は、以下の理由から、他の放射性物質とは別に、本書で整理することとする。

- ・ C1-36 は、主に冷却材中に不純物として微量に含まれる安定塩素(C1-35)が炉心で放射化[C1-35(n, γ)C1-36]して生成すると考えられており、他の放射性物質とは相違する生成源であるため、固有の検討が必要である。
- ・ 均質・均一固化体においては、濃縮廃液の分析データに基づき C1-36 の放射エネルギーを検討しているため、この検討は、プラント分類を含め、C1-36 固有のものとなる。
- ・ 一方、充填固化体においては、イオンとして存在する C1-36 と、クラッド中に存在する C1-36 の両者が相違する挙動を示すため、この検討も C1-36 固有のものとなる。

2. 1 号廃棄物埋設施設

2.1 均質・均一固化体となる廃棄物中の C1-36 濃度

1 号廃棄物埋設施設では、加圧水型原子炉(PWR)及び沸騰水型原子炉(BWR)から発生する濃縮廃液の均質・均一固化体、一部に BWR から発生する樹脂の均質・均一固化体が対象となる。

a. 濃縮廃液

(a) プラント分類

濃縮廃液の分析データを、PWRは使用済樹脂の溶離処理あり／なし、BWRは復水浄化系樹脂の再生あり／なしにプラント分類している。

なお、黒鉛減速ガス冷却炉(GCR)は1発電所のため、個別の扱いとなる。

PWRとBWRでこのように分類することの妥当性は以下のとおりである。

- ・冷却材(PWR・BWR共通)中のC1-36濃度：C1-36は、主に冷却材中の安定塩素が炉心で放射化して生成するものと推定されているが、炉内構造物の腐食低減対策の観点から冷却材中の安定塩素濃度は管理されているため、生成されるC1-36の濃度の変動は小さいと考えられる。
- ・PWR：PWRの使用済樹脂の処理(溶離処理)を行うプラントでは、使用済樹脂から溶出する濃度の高いC1-36を含む廃液の混入により、濃縮廃液中のC1-36の濃度が高くなることから、溶離処理のあり／なしで分類する。
- ・BWR：復水浄化系樹脂の薬品再生を行うプラントでは、樹脂に蓄積にしていたC1-36が濃縮廃液に移行し、濃縮廃液中のC1-36の濃度が高くなるため、復水浄化系樹脂の再生のあり／なしで分類する。
- ・分析データを取得できない運転初期に発生した廃棄体については、これまでに取得した濃縮廃液の測定データについて経年的な変化の傾向が認められないこと、また、C1-36と同様に原子炉内で放射化して生成するC1-38の冷却材中の濃度の分析結果を調査したところ経年的な変動の傾向はみられないことから、至近のデータを用いて評価しても妥当と判断している(第2回意見聴取会資料3-1)。

(b) 分析データの統計処理

分析データを統計処理して濃縮廃液のC1-36濃度を設定する際、当初は分析データの算術平均の95%信頼区間上限としていた。しかし、分析データは正規分布を示しておらず、中心極限定理を仮定するにはデータ数が必ずしも十分ではなかったことから、この評価方法については再検討が必要とされていた。電気事業者にて評価方法を検討した結果、以下のとおり、ブートストラップ法(t-信頼区間の

分散安定化変換)を適用することとした。

- ・廃棄体中の放射能濃度評価方法として、H-3、C-14(BWR)、Tc-99 は平均放射能濃度法を適用しており、その設定方法では分析データの算術平均を 1.2 倍しているが、C1-36 に対して採用していない(参考までに、算術平均を 1.2 倍した結果を表 1 に示す)。
- ・意見聴取会の委員及び統計学の専門家にご相談した結果、実際のデータのばらつきを考慮して、比較的信頼性の高い信頼区間を求めることができるブートストラップ法を採用することとし、ブートストラップ法にある信頼区間の算出方法(パーセンタイル、BCA 法など)の中でも、比較的保守的な評価結果となる t-信頼区間を分散安定化変換する方法(汪金芳、桜井裕仁著「R で学ぶデータサイエンス 4 ブートストラップ入門」共立出版)が妥当であると判断した。

電気事業者にて、プラント分類毎に 30 点以上を目安として分析データを蓄積した結果、濃縮廃液の C1-36 濃度の計算結果は、表 1 に示すとおりとなった。

なお、GCR についても計算すると以下のようになるが、GCR の均質・均一固化体は 1 号廃棄物埋設施設には埋設していない。

表 1 濃縮廃液の C1-36 濃度の計算結果

(単位：Bq/t)

プラント分類		PWR		BWR		GCR
		溶離あり	溶離なし	再生あり	再生なし	—
算術平均		9.91×10^4	1.87×10^3	3.12×10^4	3.63×10^3	1.87×10^5
母平均 95% 信頼区間上 限	ブートストラップ法*1	1.43×10^5	2.59×10^3	4.33×10^4	5.14×10^3	2.55×10^5
	参考：算術上	1.34×10^5	2.39×10^3	4.13×10^4	4.80×10^3	2.54×10^5
参考：算術平均×1.2 倍		1.19×10^5	2.24×10^3	3.74×10^4	4.36×10^3	2.24×10^5
データ数*2		37	71	33	51	11

*1：t-信頼区間の分散安定化変換、*2：ND 除く

b. BWR から発生する樹脂

BWR 樹脂は、主に復水浄化系で発生している粉状樹脂又は粒状樹脂である。これらは、タンクに一括で貯蔵されているため分析データの蓄積が難しく、BWR 樹脂の均質・均一固化体を既に埋設している発電所(3 発電所)から、各発電所 1 点以上を原則として、電気事業者にて可能な範囲で分析データを蓄積した結果、全データ 9 点の内 7 点が検出限界以下となり、再生ありの濃縮廃液の最大値を超える値は測定されなかった。これらの樹脂は、薬品再生を行う前の樹脂が主要な発生源であ

り、プラント内の移行量を評価すると、再生ありの濃縮廃液の濃度とほぼ同じになると推定されるので、BWR 再生ありの濃縮廃液の最大値を採用することとした。

2.2 均質・均一固化体中放射エネルギーへの換算

発電所の廃棄物種類別に、上記の濃縮廃液中 C1-36 濃度(Bq/t)から均質・均一固化体中放射エネルギー(Bq/本)へ換算した。この換算に必要なパラメータは、該当する電気事業者が各発電所の運転実績等を調査して設定した。

2.3 総放射エネルギーの算出

発電所の廃棄物種類別の埋設実績から、上記の均質・均一固化体中放射エネルギーを用いて、1号廃棄物埋設施設の1～6群の各群の放射エネルギーの積算値を求めた。この結果を表2に示す。

表2 1号廃棄物埋設施設の1～6群に想定される総放射エネルギー
(単位：Bq)

群	1群	2群	3群	4群	5群	6群
積算値	2.4×10^8	1.7×10^8	1.5×10^8	1.7×10^8	3.0×10^8	4.6×10^8

主要な放射性物質の選定用の放射エネルギーは、上記の積算値から、各群の最大の放射エネルギー(4.6×10^8 Bq)を他の群に当てはめた。

なお、1号廃棄物埋設施設の7,8群に埋設される予定の固体状廃棄物の充填固化体中放射エネルギーは、「3. 2号廃棄物埋設施設/3号廃棄物埋設施設」で検討するものとし、更に、均質・均一固化体と充填固化体を埋設する1号7,8群に関しては、放射エネルギーの設定が保守側となるよう、均質・均一固化体が7群及び8群のそれぞれに埋設されるものと想定して放射エネルギーを設定する。

一方、事業変更許可申請の総放射エネルギー(申請放射エネルギー)については、今後の放射エネルギーの変動に対する安全裕度を考慮することとし、主要な放射性物質の選定用放射エネルギーに対して、均質・均一固化体は10倍、充填固化体は5倍とした。

以上から、主要な放射性物質の選定用と事業変更許可申請の総放射エネルギーは、表3に示すとおりとした。

表3 1号廃棄物埋設施設の総放射エネルギーの設定値(7,8群の充填固化体を考慮)
(単位: Bq)

	1~6群	7,8群	
		均質・均一 固化体	充填固化体*
主要な放射性 物質の選定用	2.8×10^9	9.2×10^7	9.2×10^7
申請放射エネルギー	2.8×10^{10}	9.2×10^8	9.2×10^8
申請放射エネルギー の安全裕度	10倍	10倍	10倍

*: 均質・均一固化体が7群及び8群のそれぞれに埋設されるものと想定しているため、均質・均一固化体と同じ値となっている。

2.4 最大放射能濃度の算出

最大放射能濃度については、均質・均一固化体は、1号廃棄物埋設施設での他の主要な放射性物質の設定と同じ方法で算出すると $9.1 \times 10^7 \text{Bq/t} (= (2.76 \times 10^{10} + 9.2 \times 10^8 + 9.2 \times 10^8) \text{Bq} / 60,000 \text{t}^{*1} / (153,600 + 5,120 + 5,120) \text{本} \times 204,800 \text{本} \times 150^{*2})$ 、充填固化体は、2号廃棄物埋設施設での他の主要な放射性物質の設定と同じ方法で算出すると $1.1 \times 10^4 \text{Bq/t} (= 2.3 \times 10^5 \text{Bq} / 60,000 \text{t}^{*1} / 40,960 \text{本} \times 204,800 \text{本} \times 600^{*3})$ となり、高い側の $9.1 \times 10^7 \text{Bq/t}$ とした。

*1: 埋設総重量

*2: 現行の1号廃棄物埋設施設にて主要な放射性物質に設定されている係数

*3: 現行の2号廃棄物埋設施設にて主要な放射性物質に設定されている係数

3. 2号廃棄物埋設施設/3号廃棄物埋設施設

3.1 充填固化体となる廃棄物中のC1-36濃度

2号廃棄物埋設施設及び3号廃棄物埋設施設では、PWRとBWRの固体状廃棄物(溶融固化体を含む)、PWR液体フィルタ及びGCR溶融固化体(2号廃棄物埋設施設のみ)の充填固化体が対象となる。

a. 固体状廃棄物の充填固化体

固体状廃棄物に付着するC1-36の汚染メカニズムとして、以下の①~③を考慮して廃棄体1本当たりの放射能濃度を検討した。

なお、主要な放射性物質の選定の総放射エネルギーを算出する際に、他の放射性物質

との整合性から、過剰に保守的な放射エネルギーとならないように検討している。

- ① 配管内面等における陰イオンの C1-36 の付着
 - ② 配管内面等におけるクラッド(1 次冷却材等に存在する腐食生成物)に伴った C1-36 の付着
 - ③ 廃棄物表面に付着した系統水が蒸発することに伴う塩としての残留
- 上記について、検討した結果を表 4 に示す。

表 4 固体状廃棄物の充填固化体 C1-36 放射エネルギーの検討結果

設定値		検討結果
① 吸着 平衡	付着係数 (ml/cm ²)	3.0×10 ⁻⁴ (SUS の C1 に対する測定値)
	冷却材 C1-36 濃度 (Bq/ml)	4.0×10 ⁻⁴ (分析データ 9 点の最大値)
	比表面積 (cm ² /g)	0.88(既往の実態調査結果)
	充填量 (kg/本)	305(既往の実大規模試験結果)
	合計 (Bq/本)	3.2×10 ⁻²
② クラ ッド	C1-36/Co-60 濃度比	5.0×10 ⁻⁸ (PWR 液体フィルタ 38 点の算術平均、BWR でも検証)
	Co-60 充填固化体 放射エネルギー (Bq/本)	1.0×10 ⁷ (埋設実績の統計的平均)
	合計 (Bq/本)	5.0×10 ⁻¹
③ 付着 水	付着水厚さ (μm)	50(測定結果の最大)
	冷却材 C1-36 濃度 (Bq/ml)	4.0×10 ⁻⁴ (上記)
	比表面積 (cm ² /g)	0.88(既往の実態調査結果)
	充填量 (kg/本)	305(既往の実大規模試験結果)
	合計 (Bq/本)	5.4×10 ⁻¹
合 計 (Bq/本)		1.1×10 ⁰

表 4 に関して、設定の考え方は以下のとおりである。

- ・ ①吸着平衡の付着係数及び③付着水の付着水厚さは、基礎的な試験を実施した結果(原子力バックエンド研究 December 2015 Vol.22 No.2)である。
- ・ ②クラッドの C1-36/Co-60 濃度比は、30 点以上を目安として PWR 液体フィルタにて分析データを蓄積し、スケーリングファクタの成立性を確認した上で、この分析データの算術平均とした。また、BWR でも固体状廃棄物(18 点)及び

炉水クラッド(12点)にて分析データを取得し、スケーリングファクタの成立性を確認した上、この C1-36/Co-60 濃度比の算術平均は、 6.0×10^{-9} となり、PWR よりも小さくなることを確認した。

- ・②クラッドの Co-60 の充填固化体放射エネルギーは、2号廃棄物埋設施設の現状までの埋設実績に基づき、算術平均の 95%信頼区間上限とした。
- ・①吸着平衡と③付着水における固体状廃棄物の比表面積は既往の実態調査結果、充填量は実規模大の模擬廃棄物の試験結果で設定した。いずれも、「充填固化体の標準的な製作方法」に基づいている。
- ・溶融固化体は、溶融処理により C1-36 が気体廃棄物に移行する可能性があるが、保守的に考慮していない。

b. PWR 液体フィルタ

PWR 液体フィルタの C1-36 濃度は、分析データ(38点)から、濃縮廃液の統計処理に合わせて、算術平均の 95%信頼区間上限(ブートストラップ法:t-信頼区間の分散安定化変換)の計算結果 $1.2 \times 10^5 \text{Bq/t}$ とした。

また、充填固化体の C1-36 放射エネルギーの換算は、 $1.2 \times 10^5 \text{Bq/t} \times 500 \text{g/個}$ (液体フィルタの平均的な想定重量) $\times 13$ 個/本(ドラム内への液体フィルタの平均的な想定収納個数)から、 $7.8 \times 10^2 \text{Bq/本}$ とした。

c. GCR 溶融固化体

GCR 溶融固化体(埋設済 144 体)の放射エネルギーは、溶融処理を行う際の塩素の移行バランスに基づき $2.0 \times 10^7 \text{Bq}$ とした。

なお、電気事業者において溶融処理を行う際の塩素の移行バランスを東海発電所の原子炉に近い条件で評価を行い、溶融固化体への移行率(2%)が保守的な結果であることを確認している。

3.2 2号廃棄物埋設施設の総放射エネルギーの算出

次の①と②から、1,2群~7,8群の各2群分の放射エネルギーの積算値を求め、これを、表5の積算値に示す。

なお、液体フィルタの2号廃棄物埋設施設への埋設実績はなく、今後も埋設する

予定はないことから、2号廃棄物埋設施設の検討対象には含めないこととした。

①固体状廃棄物は、「a. 固体状廃棄物の充填固化体」の充填固化体中放射エネルギー(1.1×10⁰Bq/本)と埋設本数(25,920本/群)から放射エネルギーを計算した。

②GCR 溶融固化体は、上記「c. GCR 溶融固化体」の埋設済の放射エネルギーとした。
 主要な放射性物質の選定用の放射エネルギーは、上記の積算値から、各2群分の最大の放射エネルギー(2.0×10⁷Bq)を他の2群に当てはめて算出した。

事業変更許可申請の総放射エネルギー(申請放射エネルギー)は、主要な放射性物質の選定用放射エネルギーに対して、安全裕度を考慮することとし、全ての充填固化体について10倍とした。

上記から、主要な放射性物質の選定用と事業変更許可申請の総放射エネルギーは、表5に示すとおりとした。

表5 2号廃棄物埋設施設の総放射エネルギーの設定値

(単位：Bq)

群	1, 2 群	3, 4 群	5, 6 群	7, 8 群	合計
積算値	5.7×10 ⁴	2.0×10 ⁷	5.7×10 ⁴	5.7×10 ⁴	2.0×10 ⁷
備考	1, 2 群の固体状廃棄物 1.1×10 ⁰ Bq/本× 25,920本×2群= 5.7×10 ⁴ Bq	GCR 溶融固化体(2.0× 10 ⁷ Bq)は3群に埋設済 3, 4 群合計 5.7×10 ⁴ + 2.0×10 ⁷ =2.0×10 ⁷ Bq	1, 2 群と同じ		—
主要な放射性物質の選定用	2.0×10 ⁷	2.0×10 ⁷	2.0×10 ⁷	2.0×10 ⁷	8.0×10 ⁷
申請放射エネルギー	2.0×10 ⁸	2.0×10 ⁸	2.0×10 ⁸	2.0×10 ⁸	8.0×10 ⁸
申請放射エネルギーの安全裕度	10倍	10倍	10倍	10倍	—

3.3 3号廃棄物埋設施設の総放射エネルギーの算出

主要な放射性物質の選定用の放射エネルギーは、固体状廃棄物は「a. 固体状廃棄物の充填固化体」の充填固化体中放射エネルギー(1.1×10⁰Bq/本)と埋設本数(26,400本/埋設設備)から、液体フィルタは「b. PWR 液体フィルタ」の充填固化体中放射エネルギーと1,2群埋設設備～7,8群埋設設備の2埋設設備毎に75本ずつ埋設するとして算出した。

なお、液体フィルタの埋設本数は、他の放射性物質の総放射エネルギーの制約から、想定される最大に近い値である。

事業変更許可申請の総放射エネルギー(申請放射エネルギー)は、主要な放射性物質の選定用の

放射エネルギーに基づき評価すると、放射エネルギーが十分小さく主要な放射性物質とはならないことから、算出していません。

上記から、主要な放射性物質の選定用の総放射エネルギーは、表 6 に示すとおりとした。

表 6 3号廃棄物埋設施設の総放射エネルギーの設定値

(単位：Bq)

埋設設備	1, 2 埋設設備	3, 4 埋設設備	5, 6 埋設設備	7, 8 埋設設備	合計
主要な放射性物質の選定用	1.2×10^5	1.2×10^5	1.2×10^5	1.2×10^5	4.8×10^5
備考	固体状廃棄物のうち PWR 液体フィルタ 75 本を埋設 $1.1 \times 10^9 \text{Bq/本} \times (26,400 \times 2 - 75) \text{本} + 7.8 \times 10^2 \text{Bq/本} \times 75 \text{本} = 1.2 \times 10^5 \text{Bq}$	同左	同左	同左	—

3.4 2号廃棄物埋設施設の最大放射能濃度の算出

2号廃棄物埋設施設では、固体状廃棄物の充填固化体は $9.8 \times 10^5 \text{Bq/t} (= 9.8 \times 10^7 \text{Bq}/60,000 \text{t} (\text{埋設総重量}) \times 600 (\text{現行の 2号廃棄物埋設の主要な放射性物質に設定されている係数}))$ となり、GCR 溶融体は $2.4 \times 10^8 \text{Bq/t} (= 2.0 \times 10^7 \text{Bq}/0.851 \text{t} (144 \text{本の最低重量}))$ となるので、高い側の $2.4 \times 10^8 \text{Bq/t}$ とした。

なお、3号廃棄物埋設施設では、C1-36 は主要な放射性物質とはならないため、最大放射能濃度を設定していない。

以上