

廃棄物確認における C1-36 の放射能濃度評価方法について

1. はじめに

事業変更許可申請における線量評価結果を踏まえ、新たに 1 号廃棄物埋設施設において C1-36 を放射性廃棄物の受入れ基準の対象とすることから、廃棄物確認に適用する廃棄体中の C1-36 の放射能濃度評価方法等について以下に示す。

2. 廃棄体中の C1-36 放射能濃度の評価方法

2.1 均質・均一固化体中の C1-36 の廃棄物確認方法について

(1) C1-36 放射能濃度の設定

発電所の廃棄体種類別に、濃縮廃液の C1-36 濃度(Bq/t)を均質・均一固化体の放射能濃度(Bq/本)へ換算する。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、平均放射能濃度(Bq/t)として設定する。均質・均一固化体に含まれる C1-36 の平均放射能濃度を第 1 表に示す。

また、第 1 表の平均放射能濃度の計算方法及び設定パラメータを別紙-1 に示す。

(2) 廃棄物確認方法

評価対象となる放射性物質(以下、「評価核種」という。)として C1-36 の廃棄物確認が必要となるため、第 1 表の設定値を用いて均質・均一固化体に含まれる放射能濃度を算定し、廃棄物確認を行う。また、第 1 表の設定値は、濃縮廃液の分析データが取得されている 2014 年度まで適用する。

ただし、東海発電所などのように、2014 年度までに既に廃止措置に移行しているプラントについては、廃止措置に移行する以前の年度までを適用とする。

なお、C1-36 の申請データについては、機能を確認した検査装置あるいは品質マネジメントシステムで定めた手順に従い算出する。

(3) 2015 年度以降に発生する廃棄物に対する第 1 表の継続使用方法について

他の廃棄物確認対象核種の場合と同様に、既に認められている方法に従って第 1 表が適用できることを確認する。

ただし、既に認められている方法で第 1 表の継続使用が確認できない場合は、C1-36 の主たる生成起源は、原子炉冷却材中の安定塩素であることから、従来のスケーリングファクタ(以下、「SF」という。)等の変動の三要素(大規模な原子炉構成材料の変更、燃料損傷、固化処理装置の変更)に加え、原子炉冷却材中の安定塩素濃度の定期的な管理値の変動(継続したい年度に該当する運転サイクルの平均値が、平成 26 年度(2014 年度)までに運転していた数年分又は数運転サイクル分の平均値の 10 倍を超えないこと)を確認し、第 1 表が適用できることを確認する。

第1表 均質・均一固化体に含まれる C1-36 の平均放射能濃度(Bq/t) (1/2) *1,2

		セメント固化体(セメントガラス固化体)				アスファルト 固化体	プラスチック 固化体		
		濃縮廃液	使用済 樹脂	スラッジ	濃縮 廃液 ペレット	ペレット 固化体 (重曹等添加)	濃縮 廃液	濃縮 廃液	使用済 樹脂
B W R	女川 1号	1.4×10 ⁴	2.9×10 ⁴ *3 2.8×10 ⁴ *4 2.2×10 ⁴ *5	—	—	—	—	—	—
	福島第一 1/2号	1.4×10 ⁴	—	—	6.1×10 ⁴ *6 8.5×10 ⁴ *7	—	—	—	—
	福島第一 3/4号		—	—		—	—	—	—
	福島第一 5/6号		—	—		—	—	—	—
	福島第二 1/2号	1.4×10 ⁴	—	—	—	—	—	※	—
	浜岡 1/2号	1.4×10 ⁴	—	1.4×10 ⁴	—	—	—	※	5.8×10 ⁵
	浜岡 1～3号		—	—	—	—	—	※	—
	島根 1/2号	1.8×10 ⁴	3.5×10 ⁴ *3 1.4×10 ⁴ *8 1.9×10 ⁴ *9	1.0×10 ⁴	—	—	—	1.2×10 ⁵	8.0×10 ⁴
	東海第二	1.4×10 ⁴	—	—	1.1×10 ⁵	1.1×10 ⁵	—	—	—
	敦賀1号	1.4×10 ⁴	—	—	—	—	2.2×10 ⁵	—	—

*1 : 本表は平成 26 年度(2014 年度)までの濃縮廃液の分析データに基づき設定した。

*2 : 「※」は、C1-36 以外の評価核種の SF は設定済みであるが、平均放射能濃度は設定されていないことを、「—」は該当廃棄体未発生であることを示す。

*3 : 濃縮廃液+使用済樹脂 *4 : ランドリー廃液+使用済樹脂

*5 : 使用済樹脂 *6 : 濃縮廃液ペレット(100kg)

*7 : 濃縮廃液ペレット(150kg) *8 : 使用済樹脂(粉状樹脂)

*9 : 使用済樹脂(粒状樹脂) *10 : 溶離廃液含まない

*11 : 溶離廃液含む(Bモード)

第1表 均質・均一固化体に含まれる C1-36 の平均放射能濃度(Bq/t) (2/2) *1,2

		セメント固化体(セメントガラス固化体)					アスファルト 固化体	プラスチック 固化体	
		濃縮廃液	使用済 樹脂	スラッジ	濃縮廃液 ペレット 又は粉体	ペレット 固化体 (重曹等添加)	濃縮廃液	濃縮 廃液	使用済 樹脂
P W R	泊1号	—	—	—	—	—	※	—	—
	泊 1/2号	—	—	—	—	—	1.3×10^4	—	—
	美浜 1~3号	9.1×10^2	—	—	—	—	1.1×10^4 *10 5.9×10^5 *11	—	—
	高浜 1~4号	9.1×10^2	—	—	—	—	2.0×10^4 *10 1.1×10^6 *11	—	—
	大飯 1/2号	9.1×10^2	—	—	—	—	1.3×10^4 *10 6.7×10^5 *11	—	—
	伊方 1/2号	8.2×10^2	—	—	—	—	2.1×10^4	—	—
	伊方 3号	4.6×10^3	—	—	—	—	—	—	—
	玄海 1/2号	8.9×10^2	—	—	—	—	8.8×10^3	—	—
	玄海 3/4号	7.6×10^3	—	—	—	—	—	—	—
	川内 1/2号	※	—	—	—	—	8.6×10^3	—	—
	敦賀 2号	※	—	—	—	—	1.2×10^4	—	—

*1 : 本表は平成26年度(2014年度)までの濃縮廃液の分析データに基づき設定した。

*2 : 「※」は、C1-36以外の評価核種のSFは設定済みであるが、平均放射能濃度は設定されていないことを、「—」は該当廃棄体未発生であることを示す。

*3 : 濃縮廃液+使用済樹脂

*4 : ランドリー廃液+使用済樹脂

*5 : 使用済樹脂

*6 : 濃縮廃液ペレット(100kg)

*7 : 濃縮廃液ペレット(150kg)

*8 : 使用済樹脂(粉状樹脂)

*9 : 使用済樹脂(粒状樹脂)

*10 : 溶離廃液含まない

*11 : 溶離廃液含む(Bモード)

2.2 充填固化体中の C1-36 の廃棄物確認方法

(1) 廃棄体(固体状廃棄物(PWR 液体フィルタ、GCR 溶融固化体を除く))の放射能濃度

固体状廃棄物に付着する C1-36 の汚染メカニズムから、廃棄体中の放射能濃度(Bq/本)を検討した結果を第2表に示す。第2表に関して、設定の考え方は以下のとおりである。

- ・①吸着平衡の原子炉冷却材の C1-36 濃度は、原子炉冷却材の分析データに基づき設定する。値の設定に当たっては、PWR における分析データ(13点)と BWR における分析データ(6点)の最大値を比較し C1-36 濃度の高い PWR における分析データ(13点)の最大値を保守的に丸めた 4.0×10^{-4} Bq/mL を設定値とする。
- ・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、SF の成立性を確認した上で、この分析データの算術平均を設定値とする。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、SF の成立性を確認した上で、この C1-36/Co-60 濃度比の算術平均は、 6.0×10^{-9} となり、PWR (C1-36/Co-60 濃度比 5.0×10^{-8}) よりも小さくなることを確認する。
- ・②クラッドの Co-60 の充填固化体放射能濃度は、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%信頼区間の上限を設定値とする。
- ・①吸着平衡及び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及び充填量は実規模大の模擬廃棄物の試験結果に基づき設定する。なお、いずれの設定値も「充填固化体の標準的な製作方法」⁽²⁾に基づいている。
- ・溶融固化体については、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、保守的に移行は生じないものとする。

(2) 廃棄物確認方法

評価核種として C1-36 の廃棄物確認が必要となるため、第2表の設定値を用いて放射能濃度を設定し、廃棄物確認を行う。

ただし、②クラッドの Co-60 充填固化体放射能濃度(Bq/本)は、廃棄体検査時に非破壊検査装置にて測定された Co-60 濃度から算定する。

また、固体状廃棄物の汚染源は冷却材であり、この C1-36 濃度の変動性は濃縮廃液の C1-36 濃度で確認できるため、固体状廃棄物の設定値は、濃縮廃液の設定年度である 2014 年度まで適用できるものとする。ただし、東海発電所などのように、2014 年度までに廃止措置に移行している発電所は、廃止措置対象となる廃棄物が発生する以前の年度までとする。

なお、追加する C1-36 の申請データについては、機能を確認した検査装置あるいは品質マネジメントシステムで定めた手順に従い算出する。

以上から、廃棄物確認における充填固化体に含まれる本数換算及び重量換算の C1-36 放射能濃度(Bq/本、Bq/t)の算出方法、及びこれに用いる平均放射能濃度(Bq/本)、SF 及び溶融体の残存率(「(1) 廃棄体(固体状廃棄物(PWR 液体フィルタ、GCR 溶融固化体を除く))の放射能濃度」で前述したとおり保守的に設定する。具体的には以下のとおりとする。

【溶融固化体以外の場合】

- ・ C1-36 の放射能濃度(本数換算 : Bq/本)

=C1-36 の平均放射能濃度 (Bq/本) + Co-60 の放射能濃度 (Bq/本) × C1-36 の SF (-)

・ C1-36 の放射能濃度 (重量換算 : Bq/t)

=C1-36 の放射能濃度 (本数換算 : (Bq/本)) / 廃棄体重量 (t/本)

【溶融固化体の場合】

・ C1-36 の放射能濃度 (本数換算 : Bq/本)

=C1-36 の平均放射能濃度 (Bq/本) × C1-36 の残存率 (-)

+ Co-60 の放射能濃度 (Bq/本) / Co-60 の残存率 (-) × C1-36 の SF (-) × C1-36 の残存率 (-)

・ C1-36 の放射能濃度 (重量換算 : Bq/t)

=C1-36 の放射能濃度 (本数換算 : Bq/本) / 廃棄体重量 (t/本)

ここで、

C1-36 の平均放射能濃度は第 3 表

C1-36 の SF は第 4 表

C1-36 の残存率は第 5 表

とする。

また、充填固化体の SF 法を適用するためのスクリーニングレベルは、第 6 表とする。ただし、実際には C-14 のスクリーニングレベルの方が小さいので、これで制限される。

(3) 2015 年度以降に発生する廃棄物に対する第 2 表の継続使用方法について

他の廃棄物確認対象核種の場合と同様に、「2.1(3) 2015 年度以降に発生する廃棄物に対する第 1 表の継続使用方法について」で示した均質・均一固化体の継続使用の確認、又は既に認められている方法に従って第 3 表又は第 4 表のいずれかが適用できることを確認する (平均放射能濃度法及び SF 法から求まる放射能濃度を加算するので、いずれかが確認できると良い)。ただし、既に認められている方法で、これらの継続使用が確認できない場合は、「2.1(3) 2015 年度以降に発生する廃棄物に対する第 1 表の継続使用方法について」で示した均質・均一固化体の継続使用の確認と同様とする。

第2表 固体状廃棄物の充填固化体 C1-36 放射エネルギーの設定値*1

項目		設定値	出典
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)	文献値 ⁽¹⁾
	原子炉冷却材 C1-36 濃度 (Bq/mL)	4.0 × 10 ⁻⁴ (分析データ 13 点の最大値 3.77 × 10 ² Bq/t を基に 設定した値)	別紙-2「原子炉冷却材における C1-36 濃度について」 第1表
	比表面積 (cm ² /g)	0.88 (既往の実態調査結果)	文献値 ⁽²⁾
	充填量 (kg/本)	305 (既往の実大規模試験結果)	文献値 ⁽²⁾
	放射エネルギー (Bq/本) (=上記の積)	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)	別紙-3「7.2(1) d. スケーリングファクタの計算」
	Co-60 充填固化体 放射エネルギー (Bq/本)	1.0 × 10 ⁷ (埋設実績の算術平均の 95%信頼区間上限)	-
	放射エネルギー (Bq/本) (=上記の積)	5.0 × 10 ⁻¹	-
③ 付着水	付着水厚さ (μm)	50 (測定結果の最大値を基に設定した値)	文献値 ⁽¹⁾
	原子炉冷却材 C1-36 濃度 (Bq/mL)	4.0 × 10 ⁻⁴ (上記)	別紙-2「原子炉冷却材における C1-36 濃度について」 第1表
	比表面積 (cm ² /g)	0.88 (既往の実態調査結果)	文献値 ⁽²⁾
	充填量 (kg/本)	305 (既往の実大規模試験結果)	文献値 ⁽²⁾
	放射エネルギー (Bq/本) (=上記の積)	5.4 × 10 ⁻¹	-
放射エネルギー合計 (Bq/本)		1.1 × 10 ⁰	-

*1：本表で用いた原子炉冷却材の C1-36 濃度及び C1-36/Co-60 濃度比が変動していないことは、原子炉冷却材の濃度変動がある場合に影響を受ける濃縮廃液の C1-36 濃度が変動していないことで確認した。

第3表 C1-36の平均放射能濃度(Bq/本)

難測定核種	BWR	PWR
C1-36	6.0×10^{-1} *1	

*1：第2表の①合計 3.2×10^{-2} と③合計 5.4×10^{-1} を加算して端数処理して設定した。

第4表 SF[key核種：Co-60]

難測定核種	BWR	PWR
C1-36	5.0×10^{-8} *1	

*1：第2表の②の C1-36/Co-60 濃度比にて設定した。

第5表 熔融体の残存率

難測定核種	残存率 (%)	
	高周波誘導加熱方式	プラズマ加熱方式
C1-36	100	

第6表 スクリーニングレベル[key核種：Co-60]

1号廃棄物埋施設の場合*1

難測定核種	BWR	PWR
C1-36 (熔融以外の固化体)	1.8×10^{14}	
C1-36 (熔融固化体)	1.8×10^{14}	

*1：最大放射能濃度 (1号廃棄物埋施設) /SF から設定した。

2号廃棄物埋施設の場合*1,2

難測定核種	BWR	PWR
C1-36 (熔融以外の固化体)	4.8×10^{14}	
C1-36 (熔融固化体)	4.8×10^{14}	

*1：最大放射能濃度 (2号廃棄物埋施設) /SF から設定した。

*2：参考として、2号廃棄物埋施設における自主管理に用いる値を示す。

3. 参考文献等

- (1) 本山光志、鈴木泰博、森本恵次、脇寿一、佐々木隆之(2015)：放射性固体廃棄物となるステンレス鋼等における C1-36 の付着係数評価、原子力バックエンド研究、Vol. 22、No. 2
- (2) 北海道電力他 9 電力(2016)：充填固化体の標準的な製作方法

以上

濃縮廃液の C1-36 濃度から均質・均一固化体の放射エネルギーへの 換算方法及びパラメータについて

本資料は、濃縮廃液の C1-36 放射能濃度から均質・均一固化体の放射エネルギーへ換算方法及びパラメータの詳細について示す。廃棄物種類ごとの C1-36 放射能濃度の計算方法及び設定パラメータを第 1 表に示す。

均質・均一固化体の C1-36 の平均放射能濃度は、第 1 表に示すように、これまでに取得した濃縮廃液の分析データ等から設定した濃縮廃液中及び樹脂中の C1-36 の放射能濃度(A 及び B)をもとに、濃縮倍率、濃縮廃液の投入量、廃棄物(樹脂)投入量等(C~Q)を用いて算定している。

濃縮廃液中及び樹脂中の C1-36 の放射能濃度(A 及び B)については、第 2 表に示すように、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し、C1-36 に対して保守的となるような設定としている。また、C~Q の各評価パラメータの設定については、各発電所のこれまでの廃棄体製作実績等に基づき、平均的な値を用いているが、これらの値は、濃縮廃液中及び樹脂中の C1-36 の放射能濃度(A 及び B)に比べて、ばらつきは小さい。

均質・均一固化体における C1-36 の平均放射能濃度のばらつきは、濃縮廃液中及び樹脂中の C1-36 の放射能濃度(A 及び B)によるものが大きいと考えられるが、濃縮廃液中及び樹脂中の C1-36 の放射能濃度(A 及び B)は、保守的となるような設定としているため、放射能濃度が大きくなる方向にばらつく可能性は小さい(第 1 図参照)。

なお、今回設定した C1-36 平均放射能濃度は、平均放射能濃度法を用いている他の放射性物質と同様の考え方で、継続使用の判断を行うこととする。

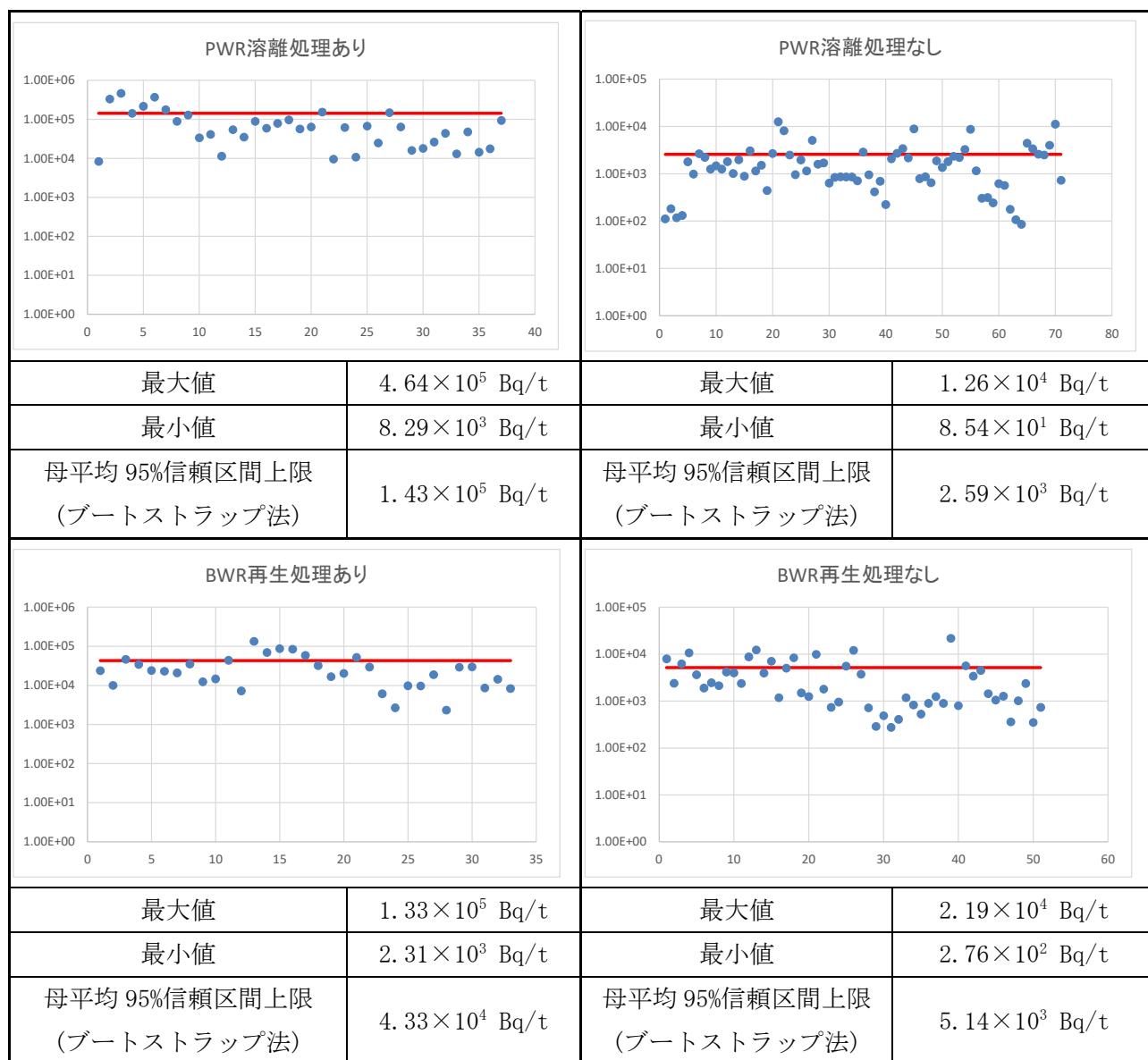
第2表 濃縮廃液の C1-36 濃度の計算結果

(単位：Bq/t)

プラントの分類		PWR		BWR	
		溶離処理あり	溶離処理なし	再生処理あり	再生処理なし
算術平均		9.91×10^4	1.87×10^3	3.12×10^4	3.63×10^3
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
	参考：算術上	1.34×10^5	2.39×10^3	4.13×10^4	4.80×10^3
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
データ数*2		37	71	33	51

*1：t-信頼区間の分散安定化変換

*2：ND 除く



第1図 濃縮廃液の分析データの分布

以上

原子炉冷却材における C1-36 濃度について

1. 原子炉冷却材の分析データ

これまでに取得された原子炉冷却材の分析データを第 1 表及び第 1 図に示す。

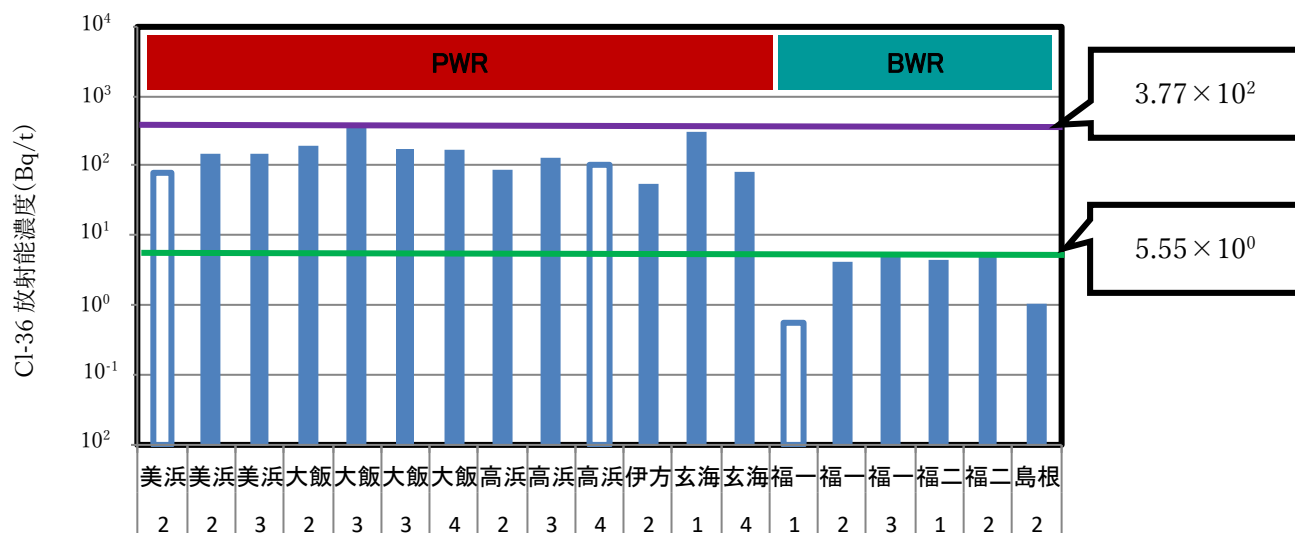
BWR と比較すると、PWR の C1-36 濃度の方が高い傾向にあるが、PWR 内及び BWR 内でそれぞれ比較すると、おおむね同じような C1-36 濃度であった。

第 1 表 原子炉冷却材の分析データ

炉型	発電所	号機	溶離/再生 処理あり*1	対象試料中 C1-36 放射 能濃度 (Bq/t)	検出限界 濃度 (Bq/t)	回収率 (%)	対象試料 の 発生時期	分析・測定 年月日	意見聴 取会以 降のデ ータ*2			
PWR	美浜	2号機	○	ND	7.97×10^1	21.3	2010	2011/3/29	-			
				1.50×10^2	3.40×10^1	76.4	2011	2014/2/27	○			
		3号機	○	1.44×10^2	1.52×10^1	46.3	2011	2011/6/24	-			
	大飯	2号機	○	1.97×10^2	1.09×10^1	49.2	2010	2010/6/15	-			
				3.77×10^2	7.85×10^0	68.1	2010	2010/7/22	-			
		3号機	-	1.73×10^2	8.86×10^0	89.6	2013	2014/2/18	○			
		4号機	-	1.71×10^2	9.82×10^0	80.8	2013	2014/2/5	○			
				高浜	○	8.52×10^1	3.21×10^1	61.3	2011	2011/6/20	-	
						3号機	-	1.29×10^2	2.70×10^1	85.7	2011	2014/3/12
	4号機	-	ND			1.05×10^2	51.8	2011	2011/6/17	-		
	伊方	2号機	-	5.58×10^1	1.91×10^1	89.4	2011	2011/12/17	-			
				玄海	1号機	-	3.04×10^2	4.84×10^1	86.8	2011	2011/12/21	-
							4号機	-	8.06×10^1	6.27×10^1	67.0	2011
	BWR	福島第一	1号機	○	ND	5.51×10^{-1}	27.6	2009	2010/1/21	-		
			2号機	○	4.21×10^0	5.63×10^{-1}	31.5	2009	2010/2/15	-		
3号機			○	5.55×10^0	3.76×10^{-1}	32.1	2009	2010/2/15	-			
福島第二		1号機	-	4.62×10^0	3.99×10^{-2}	61.5	2009	2010/1/23	-			
		2号機	-	5.47×10^0	4.06×10^{-2}	67.6	2009	2010/1/23	-			
島根		2号機	-	1.04×10^0	1.07×10^{-1}	93.8	2011	2011/12/21	-			

*1: PWR では「○」は「溶離処理あり」、「-」は「溶離処理なし」を、BWR では「再生処理あり」、「-」は「再生処理なし」を示す。

*2: 「○」は「追加取得データあり」を、「-」は「追加取得データなし」を示す。



注1 白抜きは検出限界値未満を示す。

第1図 各発電所における原子炉冷却材の Cl-36 濃度

2. 原子炉冷却材の分析データのサンプル条件

上記の原子炉冷却材の分析データのサンプル条件を以下に示す。

運転中にあるプラントを選定し、原子炉冷却材を採取し、0.45 μm ろ過を行い、ろ液中の Cl-36 濃度を分析した。

分析は一部のプラントでしか行っていないが、以下の理由から、分析データには代表性があると判断した。

- 原子炉冷却材中の Cl-36 は、原子炉冷却材中の安定塩素が放射化したものであり、原子炉冷却材の安定塩素濃度は管理されていること。
- 第6表及び第7表に示す PWR 及び BWR の代表的なモデルプラントにおいて原子炉冷却材の Cl-36 濃度を計算しているが、計算結果と分析データに大差がないこと。
- BWR は分析データが少ないものの、原子炉冷却材の安定塩素濃度が PWR よりも低いため、PWR の分析データで保守的に代表できると考えられること。
- 原子炉冷却材から濃縮廃液に至る過程において、PWR は溶離処理の有無、BWR は再生処理の有無によってプラントを分類しているが、この分類を考慮すると、PWR 及び BWR の濃縮廃液の Cl-36 濃度には大差がないこと。これは、原子炉冷却材の Cl-36 濃度に大きな相違がないことを示していると考えられる。

3. 原子炉冷却材の安定塩素濃度の管理

PWR 及び BWR では、炉内構造物の腐食低減対策の観点から、運転中の原子炉冷却材の安定塩素濃度が定期的に測定されており、海水リーク等による原子炉冷却材の安定塩素濃度への影響の有無が管理されている。

運転中の PWR 及び BWR における原子炉冷却材の安定塩素濃度実測値を第 2 表及び第 3 表に示す。

同一炉形式内では、安定塩素濃度はおおむね一定であることが分かる。また、炉形式別では、安定塩素濃度は PWR の方が BWR よりも全般的に高い。

第 2 表 PWR における原子炉冷却材の安定塩素濃度実測値(2011 年から過去 5 年間の最大値)

電力	発電所	号機	原子炉冷却材の 安定塩素濃度(ppb)
			実測値
北海道電力	泊	1号	<10
		2号	<10
		3号	<10
関西電力	美浜	1号	<10
		2号	<10
		3号	<10
	大飯	1号	<10
		2号	20
		3号	10
		4号	20
	高浜	1号	<10
		2号	<10
		3号	<10
4号		<10	
四国電力	伊方	1号	<50(管理値未満) (測定値:6)
		2号	
		3号	
九州電力	玄海	1号	<50(管理値未満) (測定値:16)
		2号	
		3号	
		4号	
	川内	1号	<50(管理値未満) (測定値:13)
		2号	

第3表 BWRにおける原子炉冷却材の安定塩素濃度実測値(2011年から過去5年間の最大値)

電気事業者	発電所	号機	原子炉冷却材の 安定塩素濃度(ppb)
			実測値
東北電力	東通	1号	<1
	女川	1号	<1
		2号	<1
		3号	<1
東京電力	福島第一	1号	7.2
		2号	5.4
		3号	2.4
		4号	2.1
		5号	3.3
		6号	2.1
	福島第二	1号	3.1
		2号	3.2
		3号	0.6
		4号	0.7
	柏崎刈羽	1号	0.7
		2号	0.3
		3号	0.2
		4号	0.6
5号		0.7	
6号		0.4	
7号		0.3	
中部電力	浜岡	1号	3.6
		2号	2.4
		3号	2.8
		4号	2
		5号	<1
北陸電力	志賀	1号	1.4
		2号	<1
中国電力	島根	1号	1
		2号	1
日本原子力発電	東海第二	-	1.03
	敦賀	1号	<0.2

4. 代表プラントにおける原子炉冷却材のCl-36濃度の計算

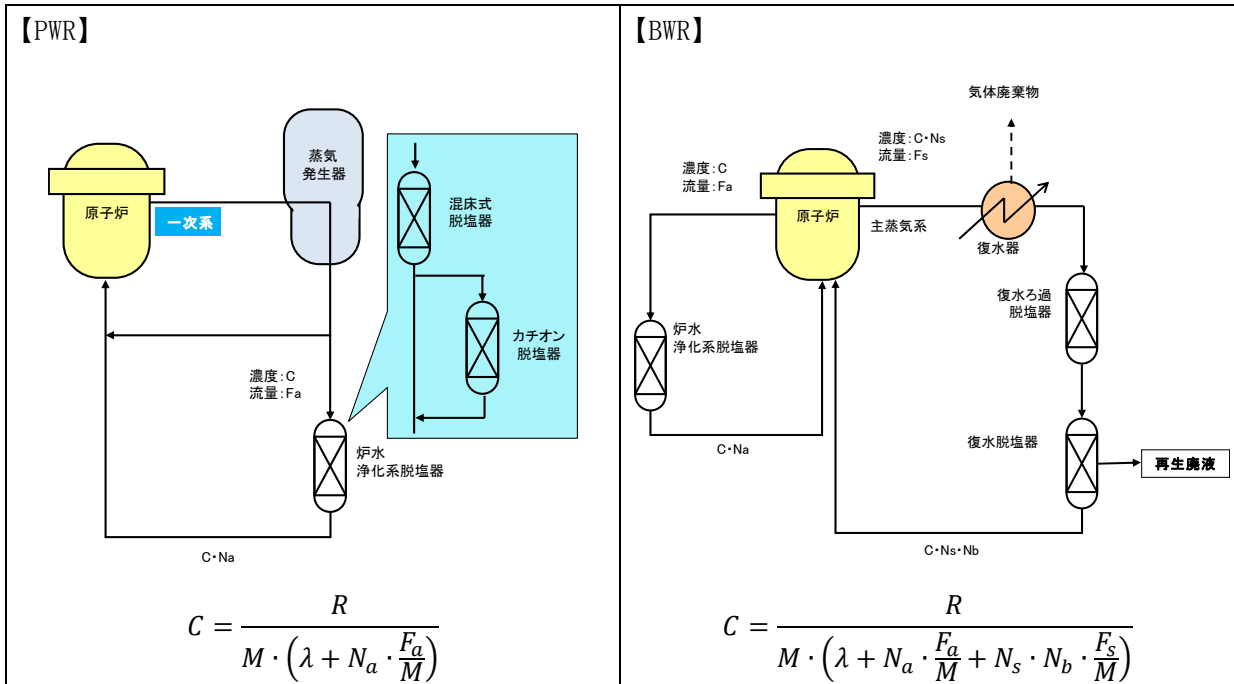
ORIGEN 計算コードを用いて、第6表及び第7表に示すPWR及びBWR代表プラントの原子炉冷却材のCl-36濃度を計算し、プラント規模ごとに原子炉冷却材のCl-36濃度に大差がないことを確認した。

原子炉冷却材のCl-36濃度のプラント規模ごとのばらつきを確認するため、PWRプラントでは、プラント規模(電気出力)に応じて3ケースを対象とした。一方、BWRプラントでは、同規模のプラントでも原子炉冷却材浄化系流量の差が大きいことから、5ケースを対象とした。

(1) 計算モデル

原子炉冷却材のCl-36濃度の計算モデルとして、PWR及びBWRにおけるプラント内のマスバランスを第2図のとおりモデル化する。

なお、PWRでは、BWR図中の主蒸気系が存在しない。



C : 原子炉冷却材の Cl-36 濃度 (Bq/t)	R : Cl-36 の発生量 (Bq/y)*1	N _a : 原子炉浄化系の除去率
M : 原子炉保有水量 (t)	F _a : 原子炉浄化系流量 (t/y)	F _s : 主蒸気流量 (t/y) (BWR のみ)
N _b : 復水浄化系の除去率 (BWR のみ)	λ : 崩壊定数 (1/y)	
N _s : キャリーオーバー率 (BWR のみ)		

*1 : ORIGEN 計算コードによって計算

第2図 PWR 及び BWR におけるプラント内のマスバランス

(2) 計算に用いたパラメータ

計算に用いた PWR 及び BWR のプラントのパラメータを第4表～第7表に示す。

第4表 PWR 共通パラメータ

PWR 項目	設定値	設定根拠
Cl-36 崩壊定数	2.30×10^{-6} (1/y)	文献値 (ICRP (2009): ICRP Publication 107: Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations)
原子炉浄化系の除去率	0.09 (-)	「線量目標値評価指針」*1 における原子炉冷却材浄化系除去率 (ヨウ素に対する値) の 0.9 の値に対して、塩素は除去率が小さくなり、1/10 とした。
原子炉冷却材の安定塩素濃度	10 (ppb)	「3. 原子炉冷却材の安定塩素濃度の管理」の実測値より

*1 : 発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に対する評価指針 (以下、同様)。

第5表 BWR 共通パラメータ

BWR 項目	設定値	設定根拠
C1-36 崩壊定数	2.30×10^{-6} (1/y)	文献値(ICRP(2009):ICRP Publication 107: Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations)
原子炉浄化系の除去率	0.9(-)	「線量目標値評価指針」における原子炉冷却材浄化系の除去率(ヨウ素に対する値)の0.9の値とした。
キャリアオーバー率	0.01(-)	「線量目標値評価指針」におけるキャリアオーバー率(ヨウ素に対する値)の0.02に対して、やや小さな値とした。
復水浄化系の除去率	0.09(-)	「線量目標評価指針」における原子炉冷却材浄化系の除去率(ヨウ素に対する値)の0.9の値とした。
原子炉冷却材の安定塩素濃度	5(ppb)	「3. 原子炉冷却材の安定塩素濃度の管理」の実測値より

第6表 PWR 個別パラメータ

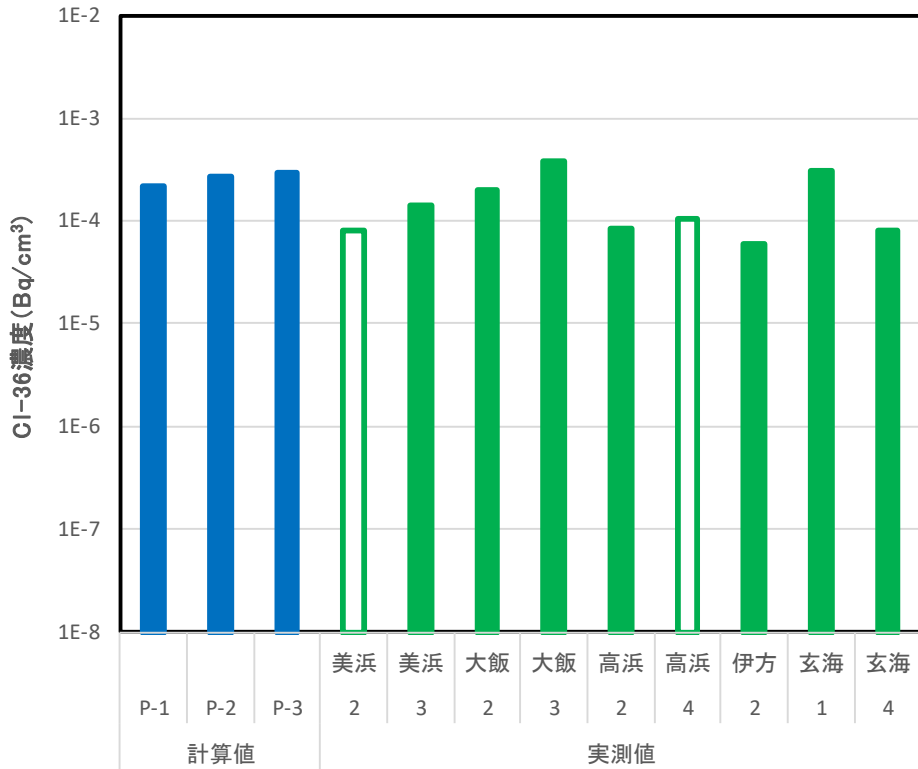
ケース	単位	P-1	P-2	P-3
出力クラス	MWe	600	800	1200
電気出力	MWe	580	826	1175
燃焼度	MWd/tU	49,500	49,000	50,000
濃縮度	%	4.8	4.6	4.8
比出力	MW/tU	34	34	38
原子炉保有水量	t	130	185	240
原子炉浄化系流量	t/h	10	14	17

第7表 BWR 個別パラメータ

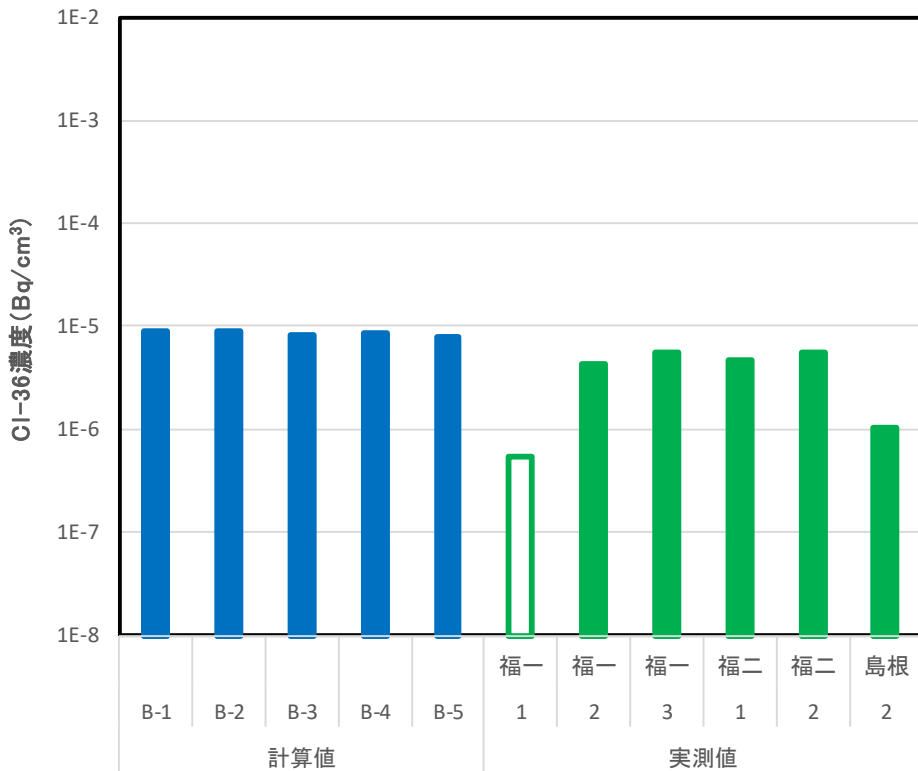
ケース	単位	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5
出力クラス	MWe	500	500	800	800	1100
電気出力	MWe	460	540	820	840	1,100
燃焼度	MWd/tU	45,000	27,500	45,000	27,500	45,000
濃縮度	%	3.6	2.78	3.7	2.74	3.78
比出力	MW/tU	20.3	23.5	25.1	23.6	25.1
原子炉保有水量	t	150	150	290	220	290
原子炉浄化系流量	t/h	86	30	220	45	120
主蒸気流量	t/h	2,470	2,920	4,740	4,750	6,410

(3) 計算結果

原子炉冷却材の C1-36 濃度の計算結果を第3図に示す。試験結果は実測値とほぼ一致しており、また、同一炉形式ではプラント規模による差異がないことを確認した。



第 3 図 原子炉冷却材の Cl-36 濃度の計算結果 (1/2)



第 3 図 原子炉冷却材の Cl-36 濃度の計算結果 (2/2)

以 上

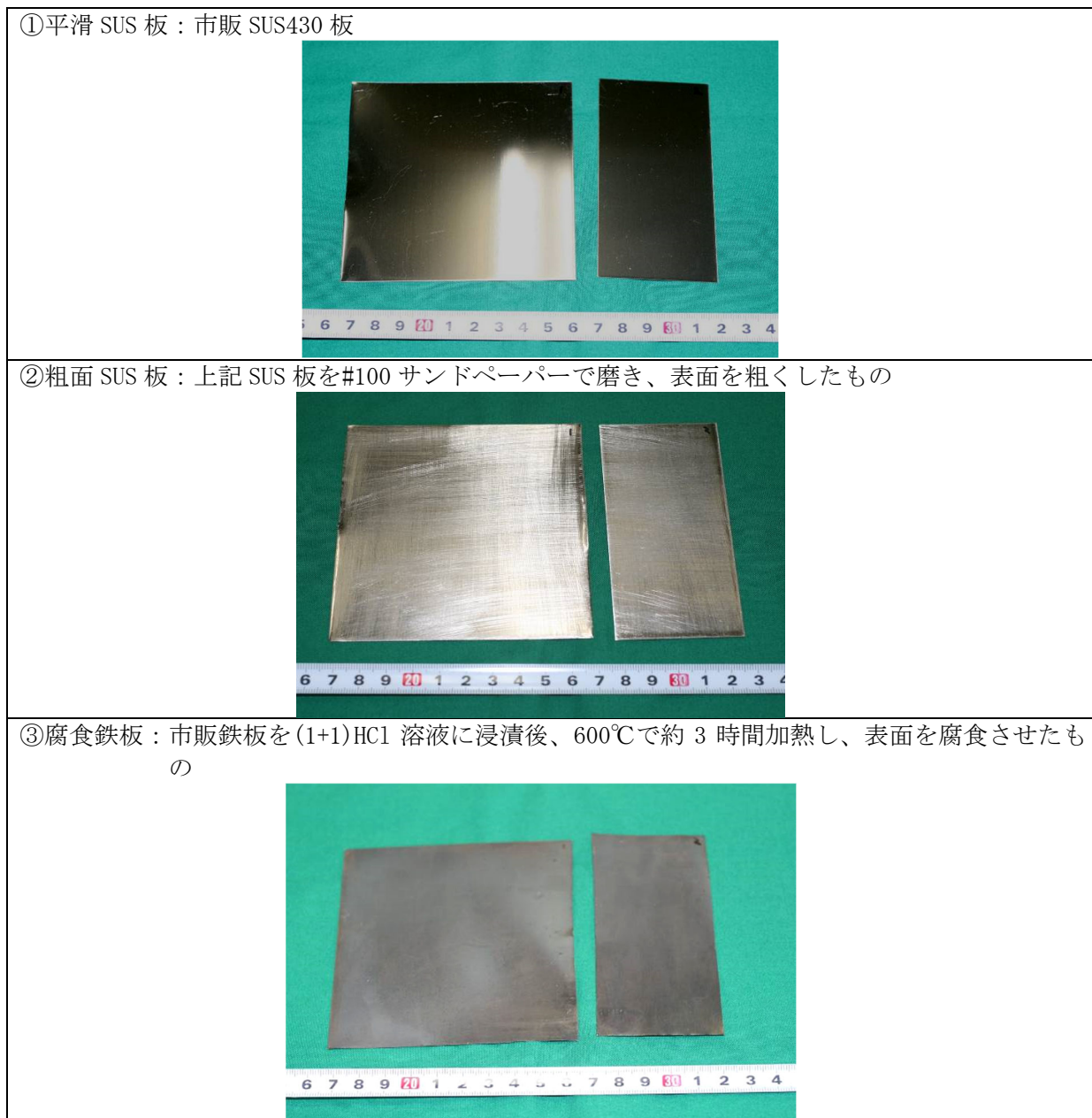
固体状廃棄物の Cl-36 濃度算定に関する根拠について

本資料では、固体状廃棄物に付着する Cl-36 の汚染メカニズムごとに、Cl-36 濃度算定に関する根拠を示す。

1. 充填固化体中の廃棄物表面への付着について

(1) 付着水量の測定方法について

付着水量の測定に用いた試料を第 1 図に示す。配管内面のような凹面をできるだけ模擬するため、3 種類の試料を準備した。

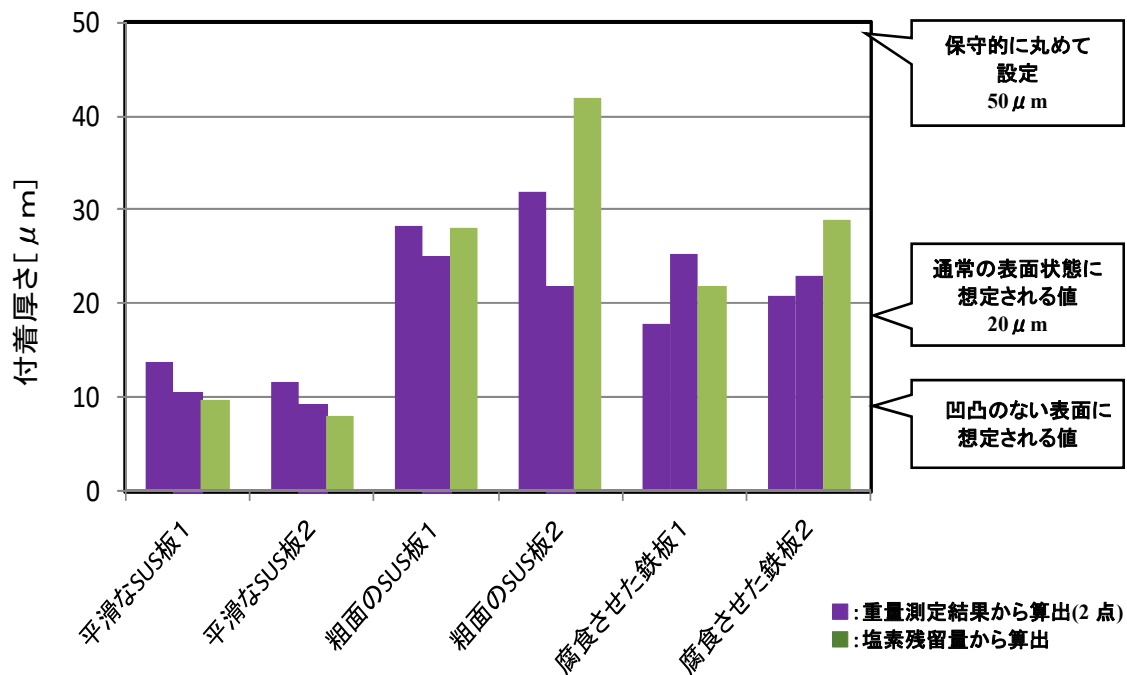


第 1 図 付着水量の測定に用いた試料

付着水量の測定方法は以下のとおりとした。

- ・ SUS 板を塩素含有溶液に浸漬した。
- ・ SUS 板を取り出し、垂直に保持して、自由落下により水切りした。
- ・ 乾燥する前の付着水量(付着厚さ)を測定(重量測定又は塩素残留量の測定)した。

付着厚さの測定結果を第 2 図に示す。



第 2 図 付着厚さの測定結果

(2) 実際の固体状廃棄物への適用性

本評価は、実際の固体状廃棄物が発生する際、原子炉冷却材等の系統水が付着した状態のまま、取り出され、これが乾いた状態となる場合に C1-36 が固体状廃棄物の表面に残留すると考えたものである。

通常の固体状廃棄物は、取り出された状態で濡れていた場合には、ウエス等で拭き取られることから固体状廃棄物に付着水が残留することはほとんど考えられない。

また、評価上は、50 μm の付着水が固体状廃棄物の全面を覆うとして想定しているため、実際の状況を過剰に保守的に扱っていると考えられる。

以上から、実際の固体状廃棄物への適用は妥当と考えている。

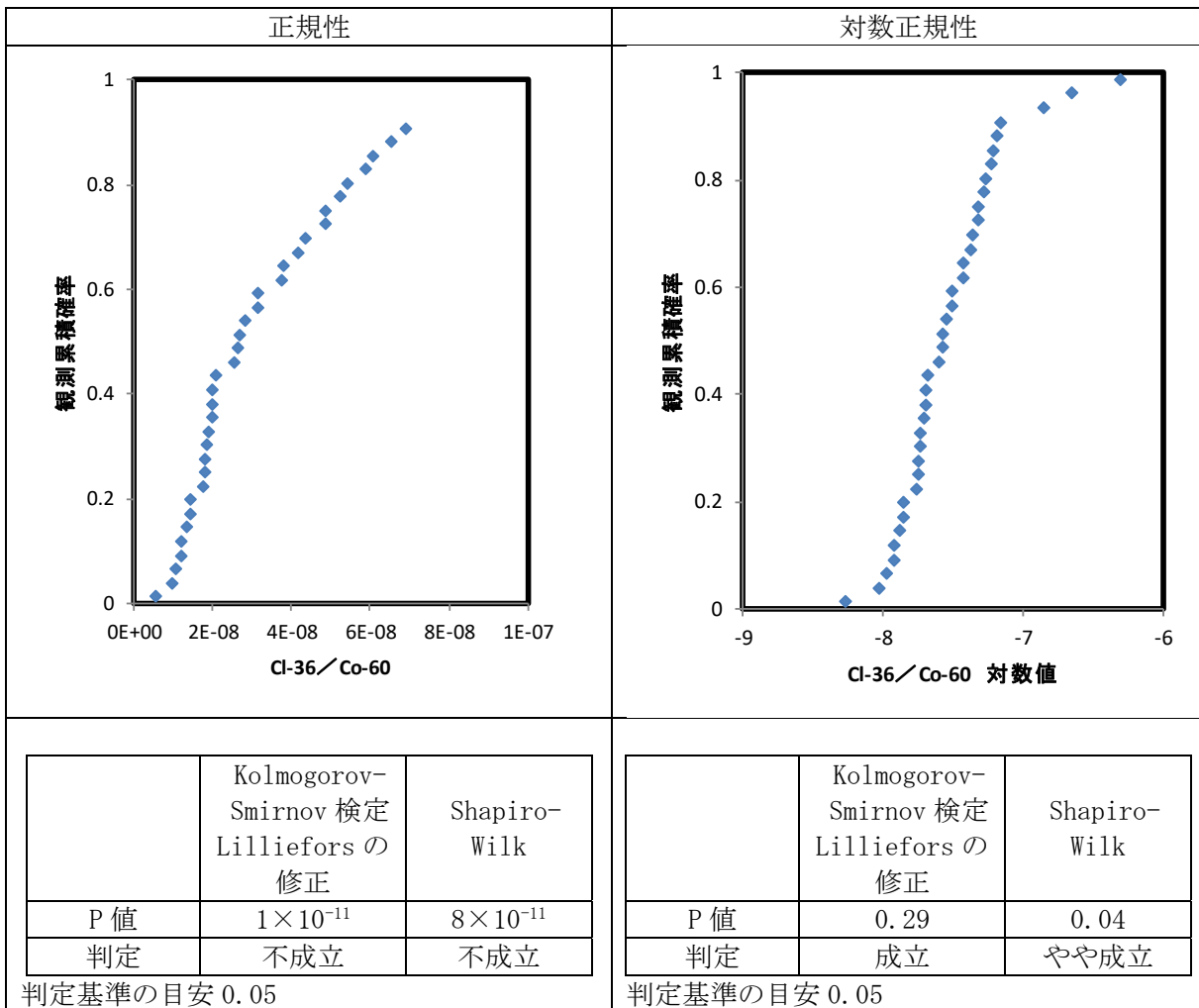
2. C1-36/Co-60 濃度比データの相関性

(1) PWR 液体フィルタの分析データによる C1-36/Co-60 濃度比の評価

PWR 液体フィルタは、原子炉冷却材をフィルタろ過した廃棄物であることから、不溶解性のクラッドが集まっていると考えられる。このため、PWR の固体状廃棄物全般に含まれるクラッドにおける C1-36/Co-60 濃度比を代表していると判断した。

(i) 正規性及び対数正規性の確認

正規性及び対数正規性の確認結果を第3図に示す。



第3図 正規性及び対数正規性の確認結果

(ii) 外れ値検定

対数正規性を仮定して Smirnov-Grubbs 検定(有意水準 0.05)を行うと、最大値が外れ値となった。

最大値は棄却しない方が保守的なため、以下では最大値も計算に用いた。

(iii) 相関性の検定

Co-60 濃度及び C1-36 濃度の対数値による相関性の検定結果を第1表に示す。

第1表 Co-60 濃度及び C1-36 濃度の対数値による相関性の検定結果

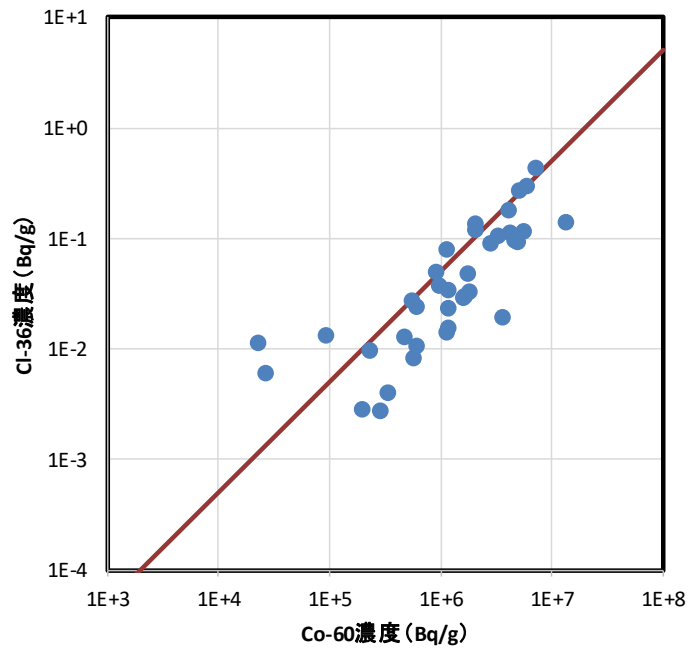
相関係数	0.80	-
無相関の検定	2×10^{-9}	< 0.05 で相関性あり

(iv) スケーリングファクタの計算

算術平均のスケーリングファクタを算出すると 5×10^{-8} となった。

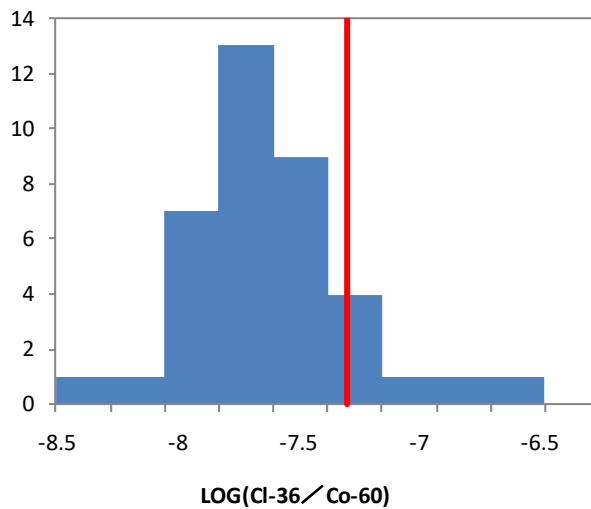
(v) 散布図とヒストグラム

Co-60 濃度及び Cl-36 濃度の散布図を第 4 図に示す。また、図中に $Cl-36/Co-60=5.0 \times 10^{-8}$ を示す直線を併記する。



第 4 図 Co-60 濃度と Cl-36 濃度の散布図

LOG(Cl-36/Co-60) のヒストグラムを第 5 図に示す。また、図中に $LOG(Cl-36/Co-60=5.0 \times 10^{-8})$ を示す直線を併記する。



第 5 図 LOG(Cl-36/Co-60) のヒストグラム

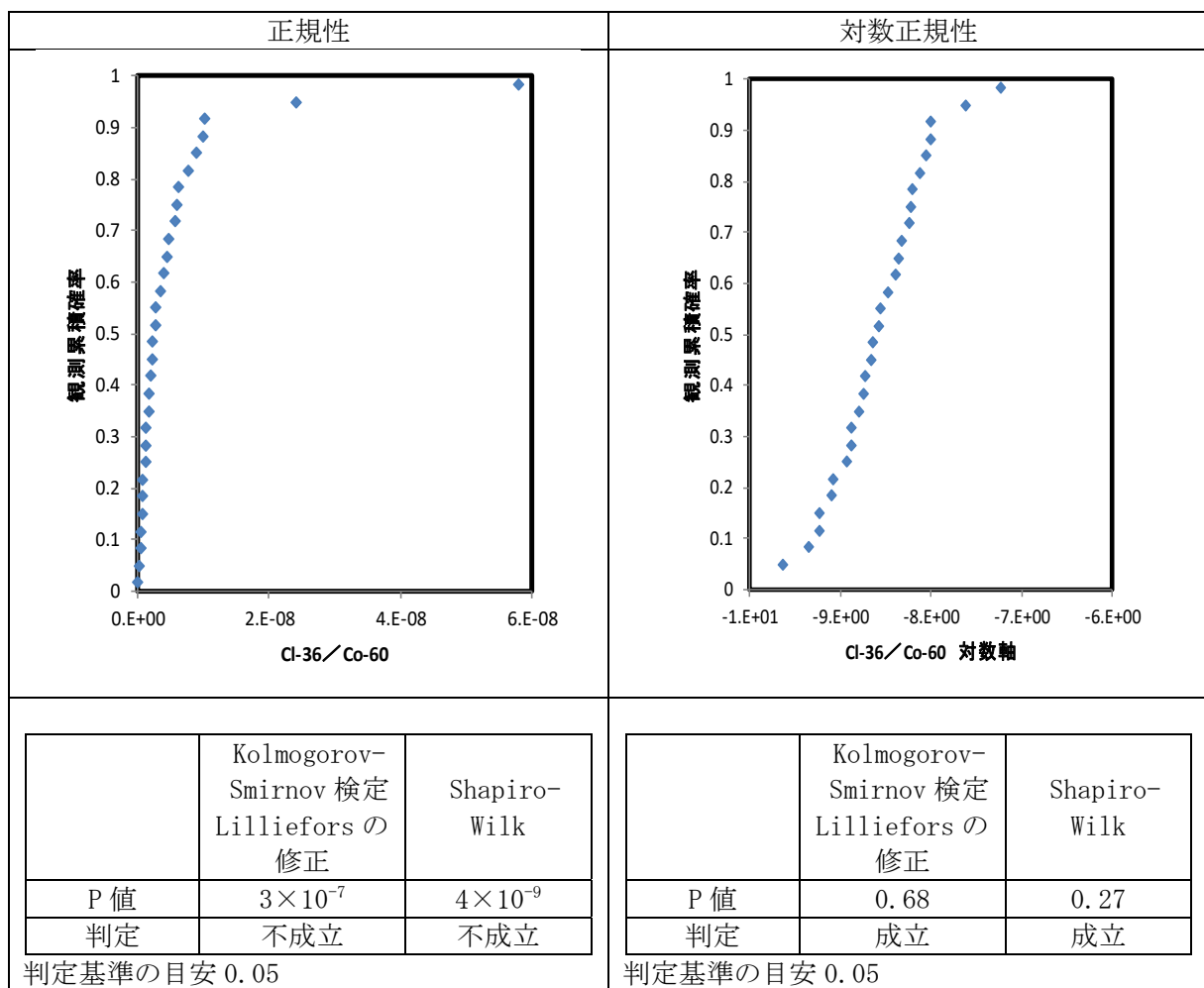
(2) BWR の固体状廃棄物及び原子炉冷却材中クラッドの分析データによる C1-36/Co-60 濃度比の評価

BWR の原子炉冷却材をフィルタに通液してクラッドを回収した不溶解性のクラッド及び比較的 Co-60 濃度の高い固体状廃棄物を用いて、BWR の固体状廃棄物全般に含まれるクラッドにおける C1-36/Co-60 濃度比を測定した。

なお、BWR の固体状廃棄物には、イオンも含まれているため、C1-36/Co-60 濃度比の分析データにはばらつきが発生しやすいと考えられる。

(i) 正規性及び対数正規性の確認

Co-60 濃度及び C1-36 濃度の正規性及び対数正規性の確認結果を第 6 図に示す。



第 6 図 正規性及び対数正規性の確認結果

(ii) 外れ値検定

対数正規性を仮定して Smirnov-Grubbs 検定(有意水準 0.05)を行ったところ、最小値が外れ値となった。

このため、スケーリングファクタの算出に当たっては最小値を棄却した場合も示す。

(iii) 相関性の検定

Co-60 濃度及び C1-36 濃度の対数値で相関性を検定した結果を第 2 表に示す。

第2表 Co-60 濃度及び C1-36 濃度の対数値による相関性の検定結果

相関係数	0.97	-
無相関の検定	3×10^{-19}	< 0.05 で相関性あり

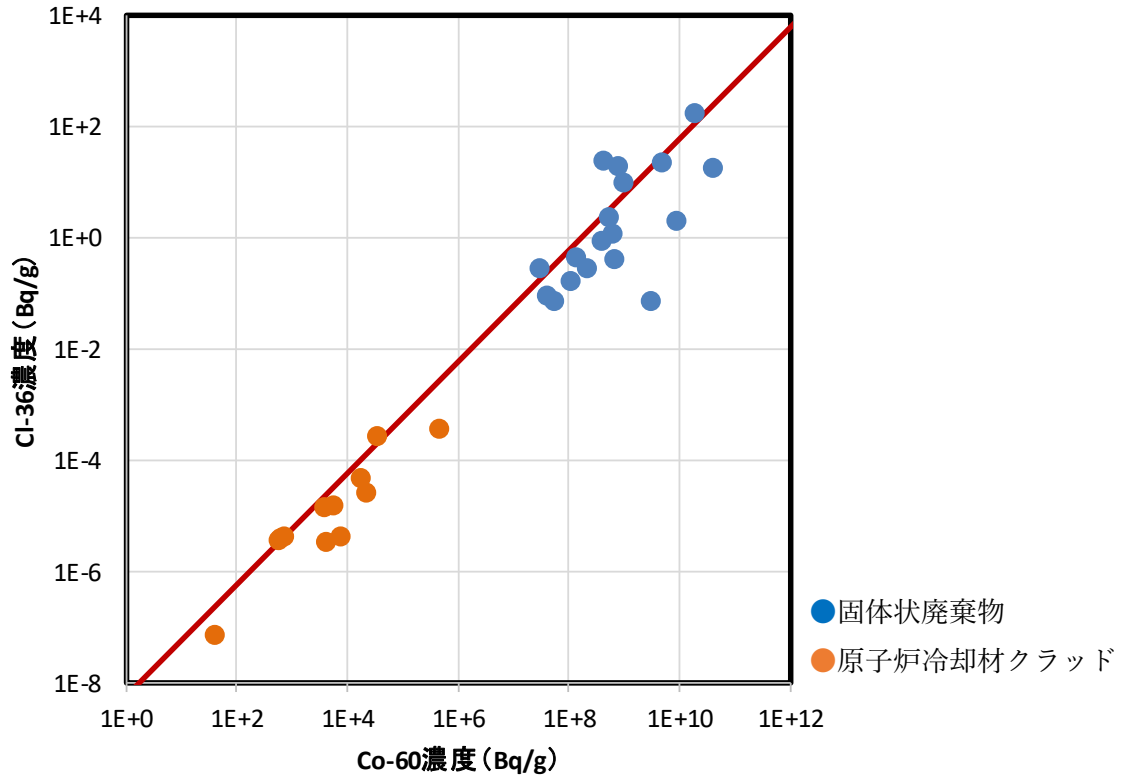
(iv) スケーリングファクタの計算

算術平均のスケーリングファクタを算出すると 6×10^{-9} となる。外れ値を除くと、 6.1×10^{-9} となる。

この値は PWR 液体フィルタにおける値 (5×10^{-8}) よりも小さいことから、スケーリングファクタは保守的に PWR で代表することが妥当であると判断した。

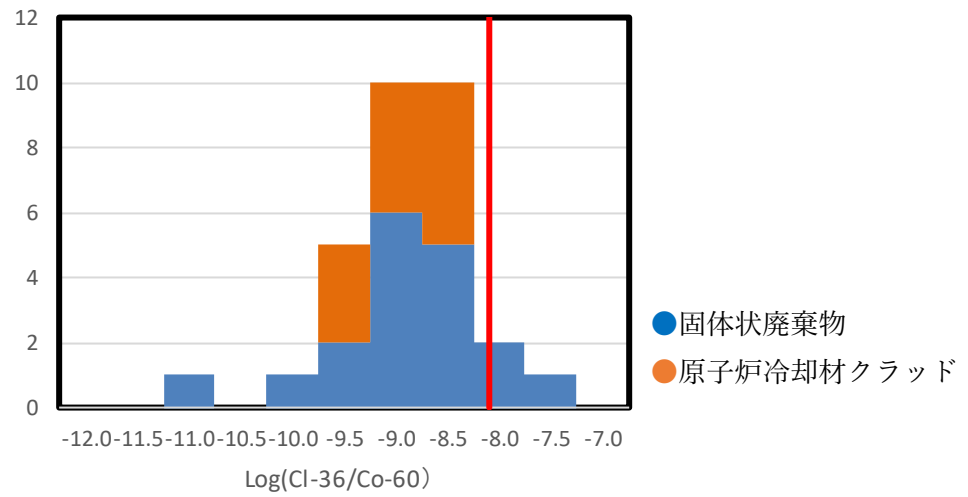
(v) 散布図とヒストグラム

Co-60 濃度と C1-36 濃度の散布図を第7図に示す。また、図中に $C1-36/Co-60 = 6.0 \times 10^{-9}$ を示す直線を併記する。



第7図 Co-60 濃度と C1-36 濃度の散布図

LOG(C1-36/Co-60) のヒストグラムを第8図に示す。また、図中に $C1-36/Co-60 = 6.0 \times 10^{-9}$ を示す直線を併記する。



第 8 図 LOG(Cl-36/Co-60) のヒストグラム

3. 液体フィルタの分析データ

液体フィルタの分析データを第 3 表に示す。

PWR 全発電所で網羅的に測定し、分析点数は 38 に達しており、十分なデータが得られていると考える。

第3表 液体フィルタの分析データ

発電所	号機	放射能濃度		発生年度	データの取得	
		Cl-36	Co-60		意見聴取会 時に取得	意見聴取会 以降に取得
		Bq/g	Bq/g			
泊	1号	2.96E-02	1.60E+06	H7年度		○
泊	1号	8.20E-03	5.81E+05	H8年度		○
泊	1号	3.74E-02	9.95E+05	H9年度		○
泊	2号	1.28E-02	4.84E+05	H10年度		○
美浜	3号	1.35E-01	2.06E+06	H14年度		○
美浜	3号	4.40E-01	7.22E+06	H16年度		○
美浜	3号	2.70E-01	5.15E+06	H19年度		○
美浜	3号	5.04E-02	9.30E+05	H23年度		○
大飯	1号	3.28E-02	1.84E+06	H4年度		○
大飯	2号	4.82E-02	1.79E+06	H2年度		○
大飯	3号	1.11E-01	4.34E+06	H8年度		○
大飯	4号	9.00E-02	2.86E+06	H8年度		○
大飯	1号	2.37E-02	1.18E+06	H3年度	○	
大飯	2号	1.08E-02	6.14E+05	H3年度	○	
高浜	1号	1.17E-01	5.62E+06	H17年度		○
高浜	1号	9.51E-02	4.73E+06	H18年度		○
高浜	1号	1.22E-01	2.07E+06	H21年度		○
高浜	1号	2.94E-01	6.06E+06	H22年度		○
高浜	1号	1.81E-01	4.15E+06	H23年度		○
高浜	2号	9.76E-02	4.89E+06	H19年度		○
高浜	2号	1.04E-01	3.30E+06	H20年度		○
高浜	2号	9.28E-02	4.94E+06	H21年度		○
高浜	2号	1.42E-01	1.34E+07	H23年度		○
伊方	1号	2.70E-02	5.56E+05	H22年度		○
伊方	1号	3.03E-02	1.68E+06	H22年度		○
伊方	2号	1.40E-02	1.15E+06	H22年度		○
伊方	2号	1.95E-02	3.65E+06	H15年度		○
玄海	1号	1.15E-02	2.33E+04	H12年度		○
玄海	2号	9.69E-03	2.31E+05	H13年度		○
玄海	3号	3.40E-02	1.20E+06	H14年度		○
玄海	4号	1.32E-02	9.32E+04	H24年度		○
川内	1号	6.07E-03	2.69E+04	H15年度		○
川内	1号	2.38E-02	6.24E+05	H12年度		○
川内	2号	4.07E-03	3.39E+05	S61年度		○
川内	2号	1.57E-02	1.17E+06	S62年度		○
敦賀	2号	2.74E-03	2.87E+05	H18年度		○
敦賀	2号	2.87E-03	2.02E+05	H21年度		○
敦賀	2号	8.03E-02	1.16E+06	H22年度		○

*1：発生年度における「H」は平成、「S」は昭和を示す(例えば、「H7年度」は「平成7年度」を示す。)

以上