

敦賀発電所1号炉における クリアランスの測定及び評価方法について

2019年7月1日

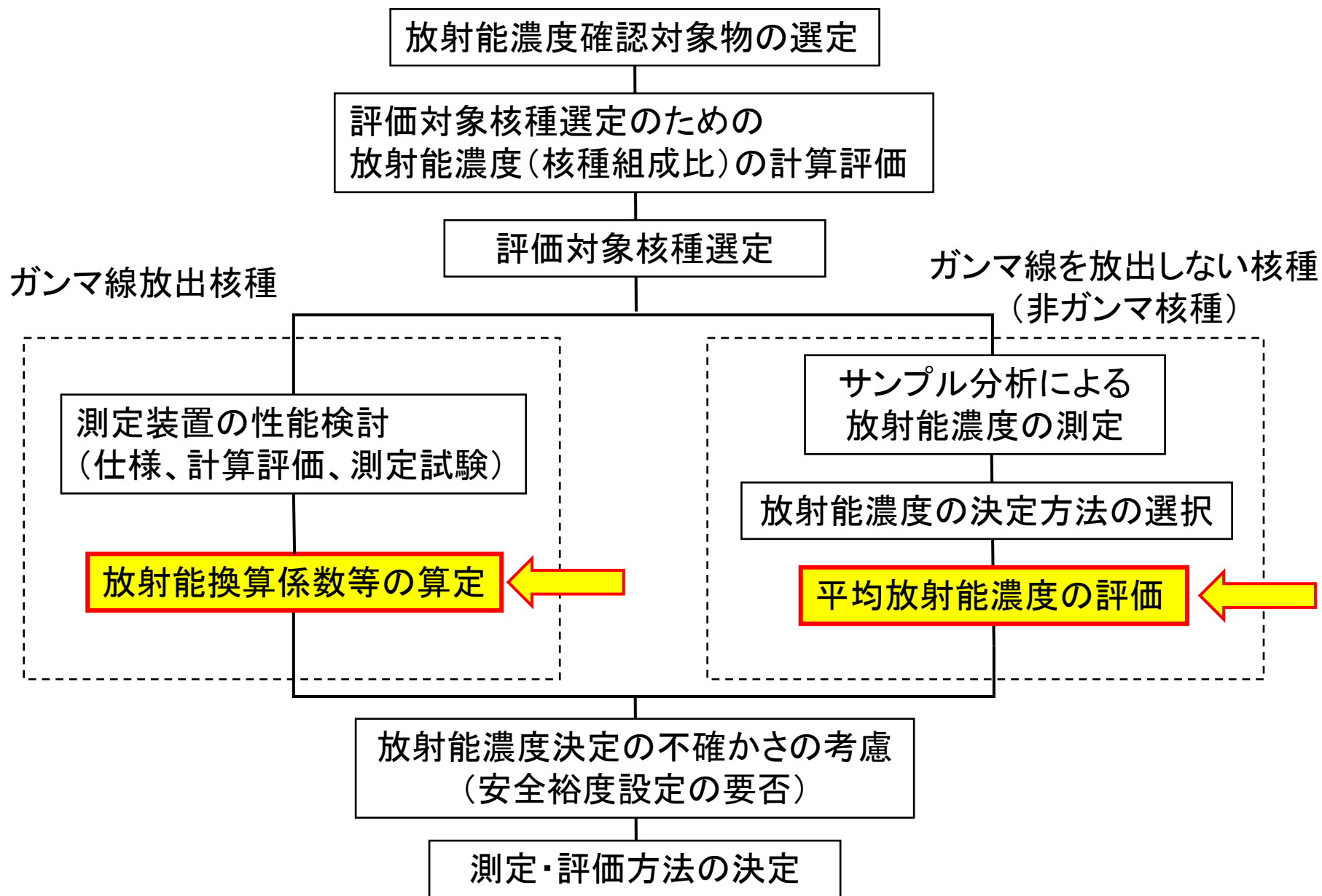
日本原子力発電株式会社

目次

1. 放射能濃度測定・評価方法の保守性について
2. 不確かさの考慮
3. 敦賀1号炉における不確かさの影響評価結果
4. まとめ
5. 参考

1. 放射能濃度測定・評価方法の 保守性について

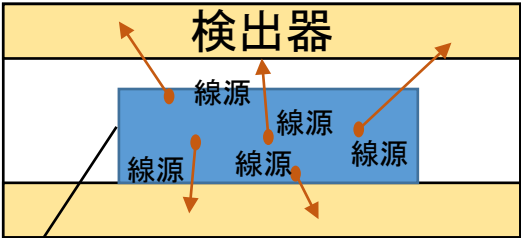
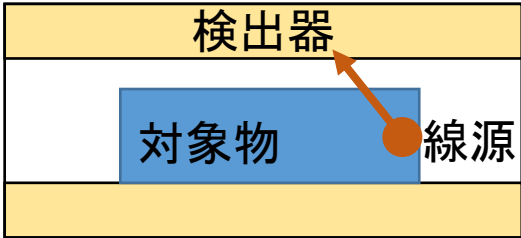
1-(1) 当申請における測定及び評価方法について(測定・評価方法の保守性)



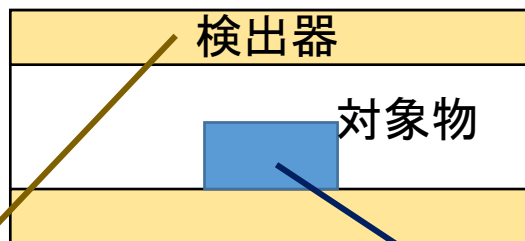
1－(2)放射能濃度換算係数等の保守性

東海発電所(認可済み)	敦賀発電所1号機
放射能濃度換算係数及び安全率※¹に以下の十分な保守性を有している。 ・安全率の評価モデルにおいて線源を最も検出効率の低い位置に設定する。 ・最も検出効率の低い核種の検出効率を採用 ・全てのガンマ線放射能濃度を主要核種のものとする。 数倍の保守性 ※¹ 均質な線源を想定した放射能換算係数に対する、線源の偏在を考慮した補正係数	放射能濃度換算係数(安全率※²を含む)に以下の十分な保守性をしている。 ・換算係数の評価モデルにおいて線源を最も検出効率の低い位置に設定、標準線源を用いた試験により換算係数を補正。 ・最も検出効率の低い核種の検出効率を採用 ・全てのガンマ線放射能濃度を主要核種のものとする。 数倍の保守性 ※² 計算評価した放射能換算係数に対する、実際の放射能への補正を考慮した係数

1－(3)測定プロセスにおける保守性

実際の線源・放射線	敦賀1号機クリアランス測定・評価 (保守的な線源・放射線)
 The diagram shows a yellow rectangular frame representing the detector area. Inside, there is a blue rectangular object labeled '対象物' (Target). Five orange dots, each labeled '線源' (Source), are positioned at various locations within the blue object. Orange arrows point from each source dot towards the top yellow area, which is labeled '検出器' (Detector).	 The diagram shows a yellow rectangular frame. Inside, there is a blue rectangular object labeled '対象物' (Target). A single orange dot labeled '線源' (Source) is located at the bottom-right corner of the blue object. An orange arrow points from this source dot towards the top yellow area, which is labeled '検出器' (Detector).
対象物の形状・重量に依存する自己遮蔽、検出器と線源の距離により、線源の放射能と検出される放射線の量の比率（検出効率）は一律に決まる。	対象物の形状をレーザ計測するとともに、重量を測定し、放射線の測定単位で、最も検出効率の低い位置を割り出す。この位置に測定可能な線源が集中しているものとして、検出した放射線から放射能を求めることにより、検出可能な核種の放射能を保守的(高め)に評価する。

1-(4) 評価プロセスにおける保守性



主要ガンマ核種Aの放射エネルギーに、核種Aとの核種組成比を乗じて 非ガンマ核種Dの放射能濃度を評価

$$\text{主要核種A放射能濃度} \times \text{核種組成比} = \text{評価核種D放射能濃度}$$

検出器のガンマ線測定[cps]

対象物のガンマ核種放射能濃度[Bq/g]の評価

保守的に最も効率の低い、核種Aの検出効率aで評価

ガンマ核種C
ガンマ核種B
ガンマ核種A

検出効率c

検出効率b

検出効率a

ガンマ核種C
ガンマ核種B
ガンマ核種A

核種組成比
d/a

非ガンマ核種D

実際の検出効率による評価

ガンマ核種
(合計)

核種組成比
d/a

非ガンマ核種D

敦賀1号炉における評価

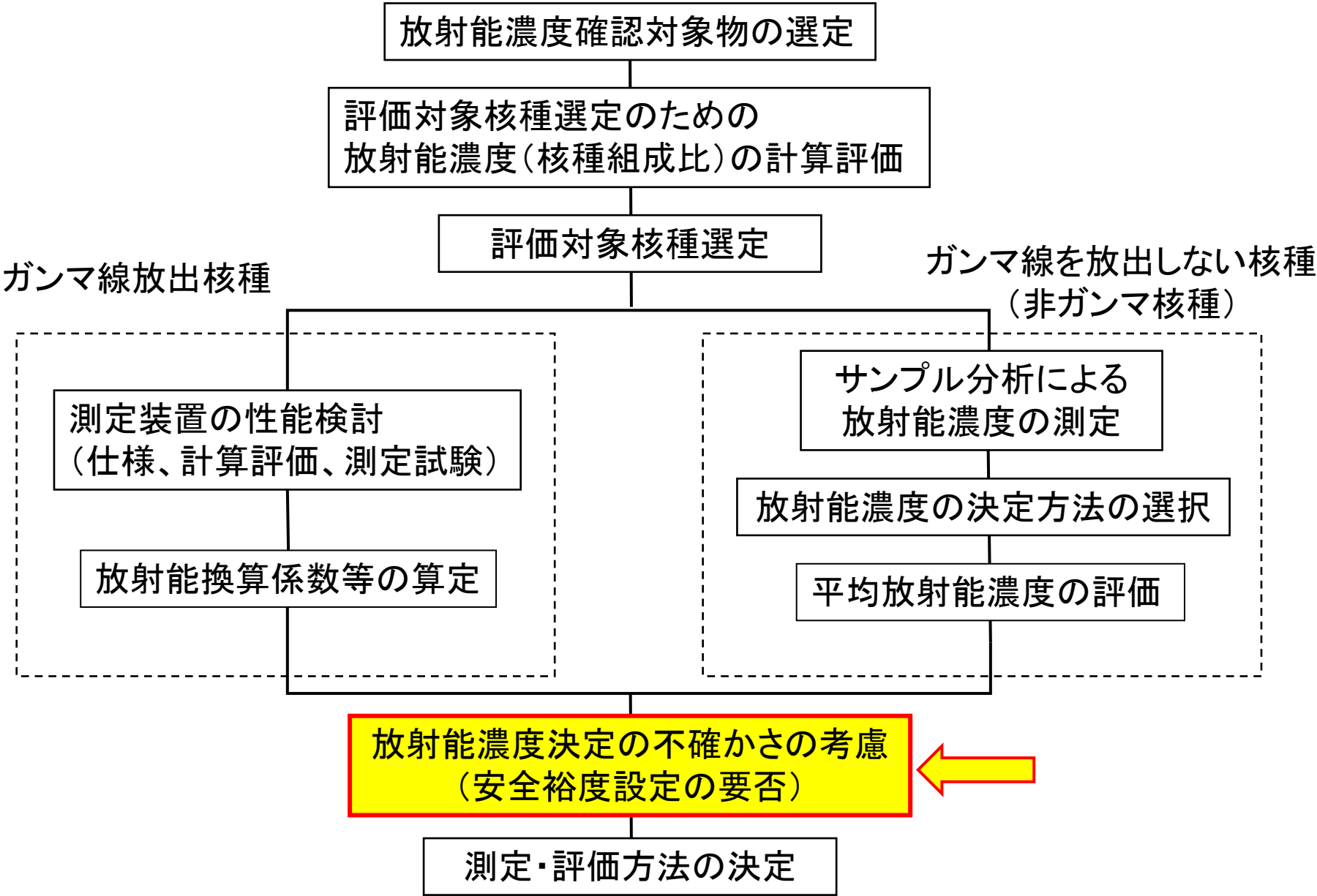
【規制委員会資料抜粋】

当時の既認可案件については、不確かさを定量的に考慮していないものの、被ばく線量への寄与率が低いにもかかわらず重要10核種全てを評価対象としていること、測定値に対して条件(線源効率等)を厳しく設定していること等、保守性を考慮した評価を行っていることは確認している。

【対応】 当申請においても、クリアランス測定・評価プロセスに保守性のある厳しい設定をしていることを説明した。

2. 不確かさの考慮

2-(1) 当申請における測定及び評価方法について(不確かさの考慮)



2-(2) クリアランスレベルを決める線量めやす値

「自然界の放射線との関係」と「リスクとの関係」の両面から、国際的な議論を経て、**「年に10μSvのオーダーあるいはそれ以下」**というめやす線量が定められている。

「自然界の放射線との関係」

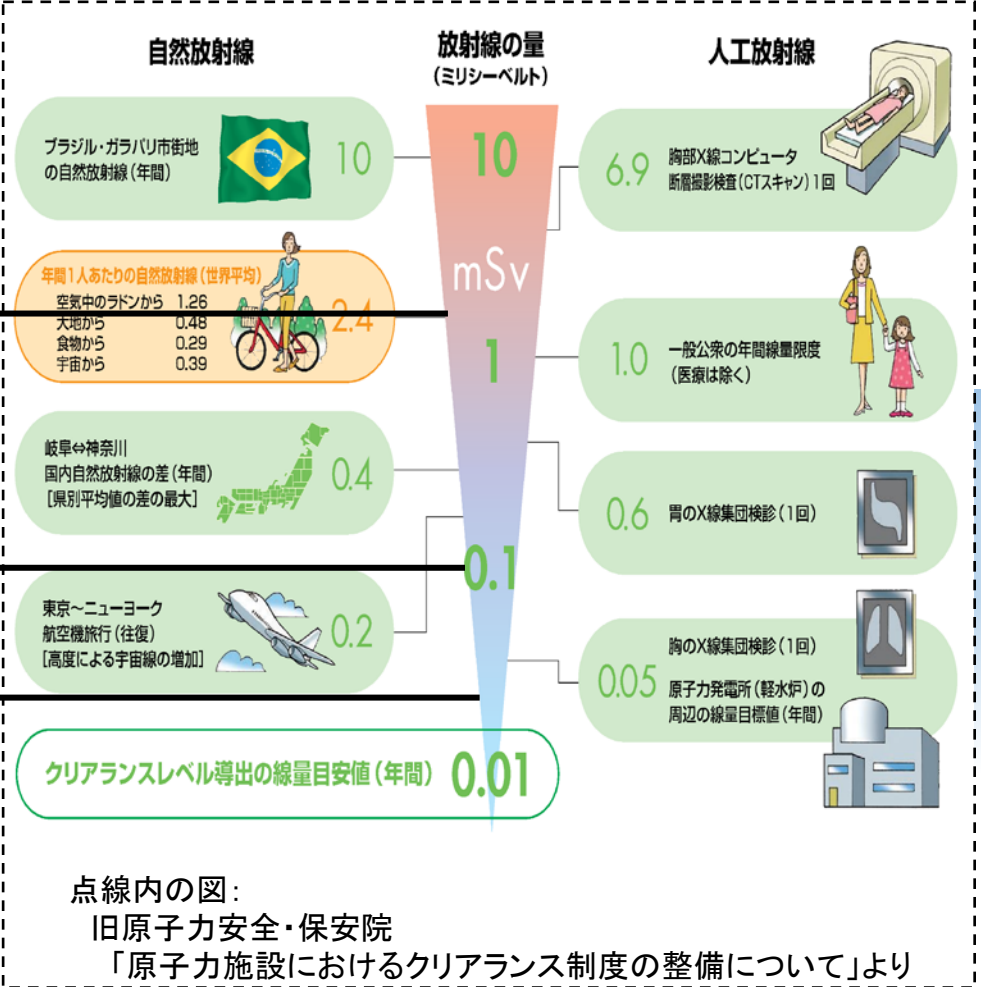
- ・世界平均: 2.4mSv/y
(国際科学委員会2008年報告)
- ・日本平均: 2.1mSv/y
(原子力安全研究協会2011年報告)

自然B.G.: 約2mSv/y

自然B.G.の変動と比べて
小さいレベルは、
些細な線量とみなすことができる

20~100μSv/y
自然B.G.の1~数%

(ICRP Pub.104 67頁)



「リスクとの関係」

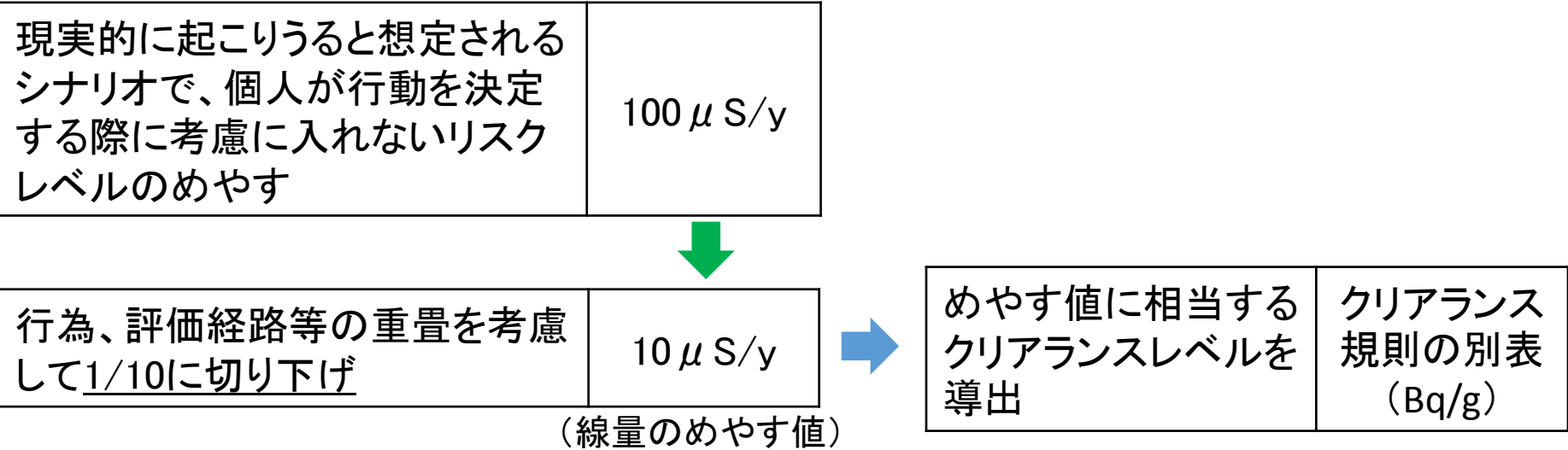
個人が自分のリスクに影響があるかもしれない行動を決定するさいに考慮する必要のないリスクレベル
10⁻⁶/yに相当する線量
100μSv/yのオーダー
(ICRP Pub.46 パラグラフ83)

重畳を考慮
(1桁切り下げ)

10μSv/yのオーダー
(ICRP Pub.46 パラグラフ84)

2-(3)線量のめやす値に基づいて算定されたクリアランス基準の保守性

原子力安全委員会「主な原子炉施設におけるクリアランスレベル」をはじめとする我が国のクリアランスレベルの導出に係る考え方



- 原子力安全委員会は、導出にあたり、評価パラメータのばらつきを考慮した個人の線量が $10\mu\text{Sv/y}$ の10倍の $100\mu\text{Sv/y}$ 以下であることを、すべてのシナリオに対して確認している。
- $\Sigma D/C$ が1以下でクリアランスレベル判断することは、行為、評価経路等の重畳を二重に考慮していることになる。

安全裕度設定の要・不要については、 $\Sigma D/C$ の97.5%片側信頼区間上限値が $\Sigma D/C$ の10倍($100\mu\text{Sv/y}$)を超えないことで判断することで十分。

2-(4) クリアランスレベル自体の保守性

クリアランスレベルの設定プロセスにおいて以下のような多くの保守性が考慮されており、クリアランスレベル自体が保守性を有している。

- ・個人が行動を決定する際に考慮に入れる必要のないリスクレベルの線量目安である100 μ S/y オーダーから、複数線源の重畳を見込んで1/10としている。
- ・線量目安からクリアランスレベルを評価する際に最も厳しいシナリオが考慮されている。

クリアランスレベル設定のイメージ

	10 μ Sv/y相当濃度[Bq/g]	
	シナリオA	シナリオB
核種①	<u>0.1</u>	0.4
核種②	0.2	<u>0.1</u>

クリアランスレベル
核種① : 0.1[Bq/g]
核種② : 0.1[Bq/g]

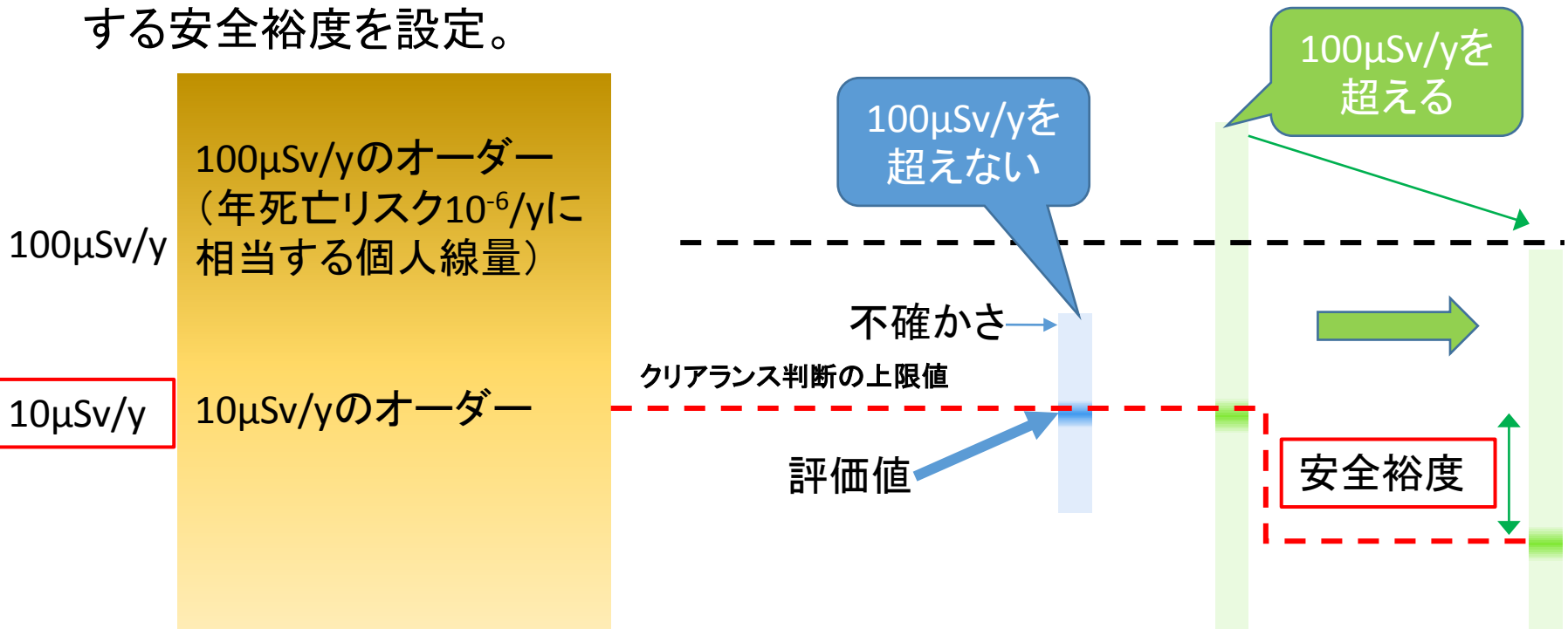
核種①と核種②の組成比が1:1の対象物を想定すると、 $\Sigma D/C=1$ のときの濃度は、
核種① : 0.05[Bq/g] 核種② : 0.05[Bq/g]

	線量[μ Sv/y]	
	シナリオA	シナリオB
核種①	$0.05/0.1 \times 10 = 5$	$0.05/0.4 \times 10 = 1.25$
核種②	$0.05/0.2 \times 10 = 2.5$	$0.05/0.1 \times 10 = 5$
線量合計	7.5	6.25

クリアランスできる最大
レベル($\Sigma D/C=1$)の量
の各核種が存在すると
想定しても、いずれのシ
ナリオでも
10 μ Sv/yに達しない

2-(5) クリアランス判断の基となる線量のめやす値の保守性

- ◆ クリアランスレベル自体の保守性を踏まえ、クリアランス評価値 $\Sigma D/C$ の中央値が1 (10 μ Sv/y) 以下。 $\Sigma D/C$ の97.5%片側信頼区間上限値が $\Sigma D/C$ の10倍 (100 μ Sv/y)を超えない場合は、安全裕度設定不要。
- ◆ 10倍 (100 μ Sv/y)を超える場合は、97.5%片側信頼区間上限値が100 μ Sv/yを超えないよう、クリアランス判断の上限値を(97.5%片側信頼区間上限値÷10)倍とする安全裕度を設定。



クリアランスレベルに係るこれまでの議論を踏まえると、安全裕度設定の要・不要については、 $\Sigma D/C$ の97.5%片側信頼区間上限値が $\Sigma D/C$ の10倍 (100 μ Sv/y)を超える・超えないことで判断可能。

2－(6)当申請における不確かさの評価

ΣD/Cの97.5%片側信頼区間上限値の評価

核種組成比法や平均放射能濃度法で取り扱う核種が多くの場合に示す、対数正規分布に適応した方法である。

	濃度の幾何平均	濃度の幾何標準偏差	クリアンスレベル
核種A	D_a	σ_a	C_a
核種B	D_b	σ_b	C_b
核種C	D_c	σ_c	C_c

核種A、B、CのD/C合計 $D_a/C_a + D_b/C_b + D_c/C_c$ の対数 $\log(D_a/C_a + D_b/C_b + D_c/C_c)$ が $\log D_a/C_a$ 、 $\log D_b/C_b$ 、 $\log D_c/C_c$ の四則演算で表現できない

→誤差伝播の法則にしたがった標準偏差を求めることができない



値を解析的に求めることができない場合に、一般的に用いられる数値解法の一つとして知られるモンテカルロ法を用いて、Σ(D/C)の確率分布を作成し、97.5%片側信頼区間上限値を算定する。

2-(7) 当申請における不確かさの考慮(まとめ)

我が国のクリアランス制度

個人が行動を決定する際に考慮に入れないリスクレベルの線量目安である $100 \mu\text{Sv/y}$ のオーダーに、行為、評価経路等の重畳に基づく保守性を見込んだ線量めやす値 $10 \mu\text{Sv/y}$ で算定されたクリアランスレベルを超えないことを確認する制度



クリアランスレベル自体に保守性を持っていることを踏まえ、原子力安全委員会「発生頻度が小さいと考えられるシナリオ」の一つとして取扱った97.5%片側信頼区間上限値が、 $\Sigma D/C$ の10倍 ($100 \mu\text{Sv/y}$) を超えないこと目安としてクリアランス判断の不確かさの考慮を行うことは妥当である。

日本原子力学会標準の不確かさの考慮方法は、同じ考え方に基づいており、放射線防護の観点からも不足している点はなく、クリアランスの判断に対する方法として妥当である。

3. 敦賀1号炉における不確かさ の影響評価結果

3－(1)放射能濃度の決定方法について①

- ◆ 敦賀発電所1号炉では、対象のγ線を測定し、γ線放出核種についてはは全γ線グループ法を、γ線放出核種との相関が認められる核種については放射線核種組成比法を、相関が認められない核種については平均放射能濃度法を用いて対象核種の放射能濃度を評価する。
- ◆ この評価手法において、評価値の不確かさに影響するものとして、測定誤差、核種組成比及び平均放射能濃度の不確定性の影響を考慮した。

○ γ線放出核種

評価方法	核種	減衰期間6年	減衰期間50年
全γ線グループ測定法	Co-60,Cs-137等	模擬対象物を用いた測定結果等から求めた測定誤差は8.9%であるが、放射線測定器の測定誤差は一般的に最大30%とされているため、保守的に30%と想定した。	

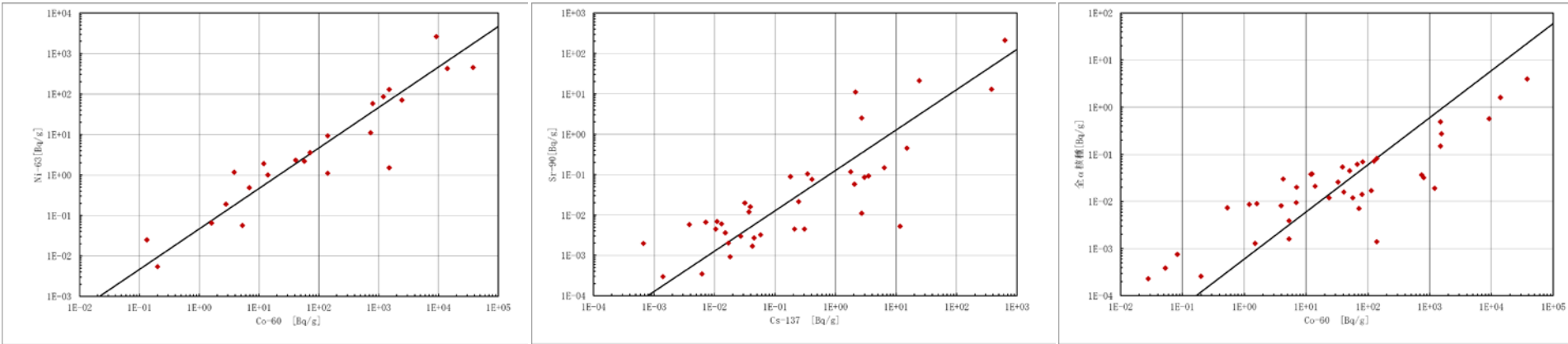
○ γ線放出核種との相関が認められない核種

評価方法	核種	平均放射能濃度(Bq/g)		幾何標準偏差
		減衰期間6年	減衰期間50年	
平均放射能濃度法	H-3	1.6×10^{-2}	1.3×10^{-3}	2.7

3－(2)放射能濃度の決定方法について②

○ γ 線放出核種との相関が認められる核種

評価方法	核種	核種組成比		幾何標準偏差
		減衰期間6年	減衰期間50年	
放射性核種組成比法	Ni-63	4.4×10^{-2}	1.0×10^1	3.7
	Sr-90	1.3×10^{-1}	1.2×10^{-1}	6.5
	全 α 核種	5.9×10^{-4}	1.9×10^{-1}	6.1

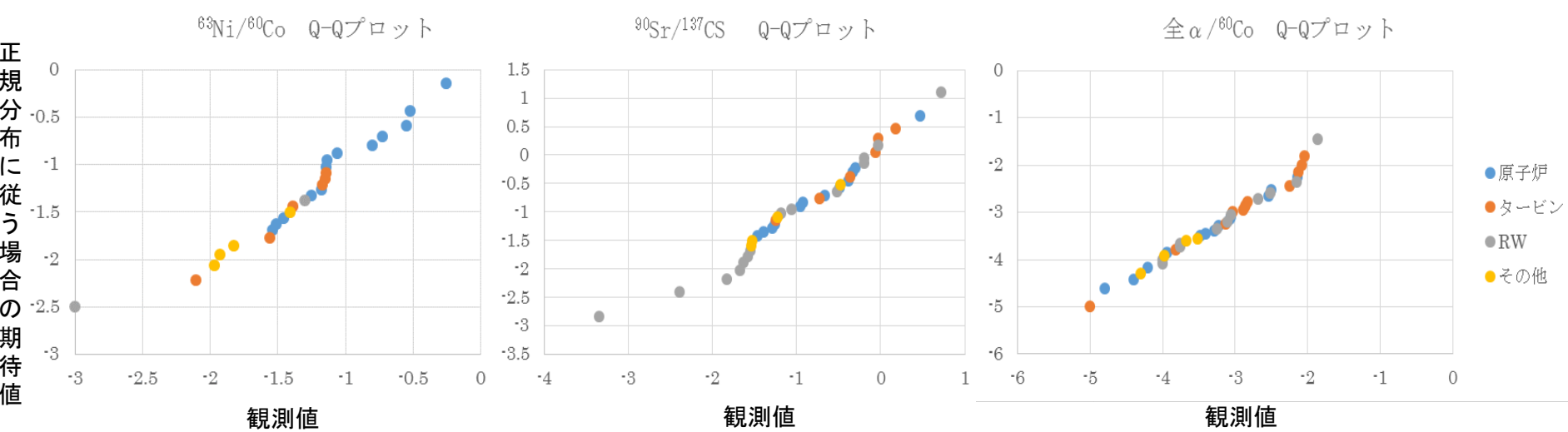


サンプルデータの放射能濃度の散布図(両対数グラフ)(左から、Ni-63／Co-60、Sr-90／Cs-137、全 α 核種／Co-60)

- ◆ 上記のサンプルデータには原子炉系、タービン系及び廃棄物処理系等のサンプルが含まれているが、 t 検定により相関性が確認できている。
- ◆ また、系統ごとに有意な差異がないことを分散分析検定(F 検定)により確認しており、系統ごとの分類が不要であることを確認している。
- ◆ よって、測定・評価単位のグルーピングにて対象物の系統の違いを考慮する必要はない。

3－(3)放射能濃度の決定方法の妥当性①

- ◆ 核種組成比等の代表値の算出には幾何平均を用いているが、対数正規分布に従う場合は幾何平均を用いるのが一般的である。
- ◆ そこで、サンプルから得られた核種組成比の常用対数に対してQ-Qプロットを確認したところ、以下のとおり直線状に並んでおり、観測値と期待値が大きく外れていないことから、核種組成比は対数正規分布に従っており、幾何平均を用いるのは妥当である。



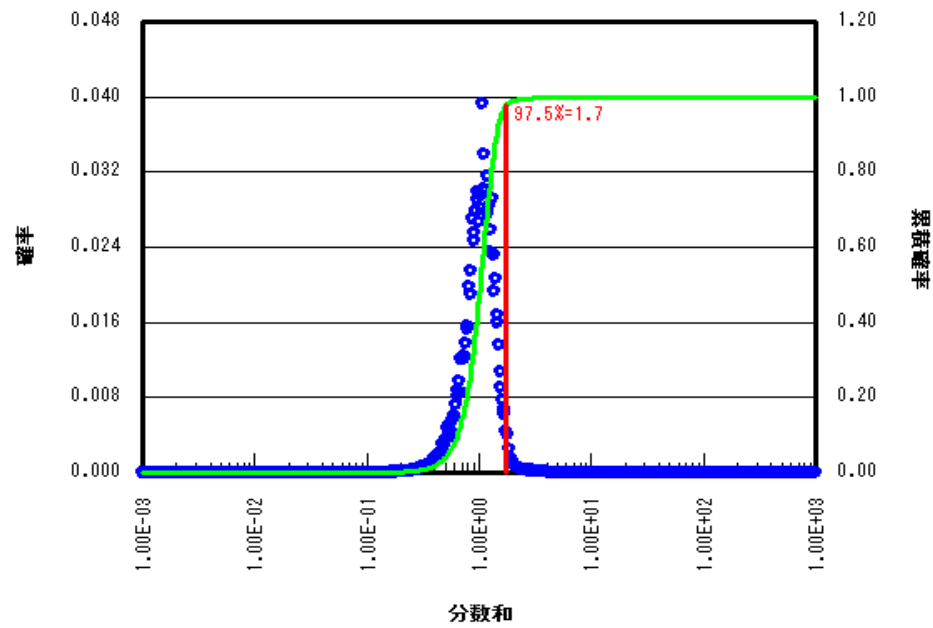
核種組成比の常用対数に対するQ-Qプロット(左から、Ni-63／Co-60、Sr-90／Cs-137、全α核種／Co-60)

3－(4)不確かさの上限値の評価結果

◆ 評価値($\Sigma D/C$)について、測定値、核種組成比及び平均放射能濃度の確率分布から、モンテカルロ法を用いて不確かさの上限値(片側97.5%信頼区間上限値)を評価した。

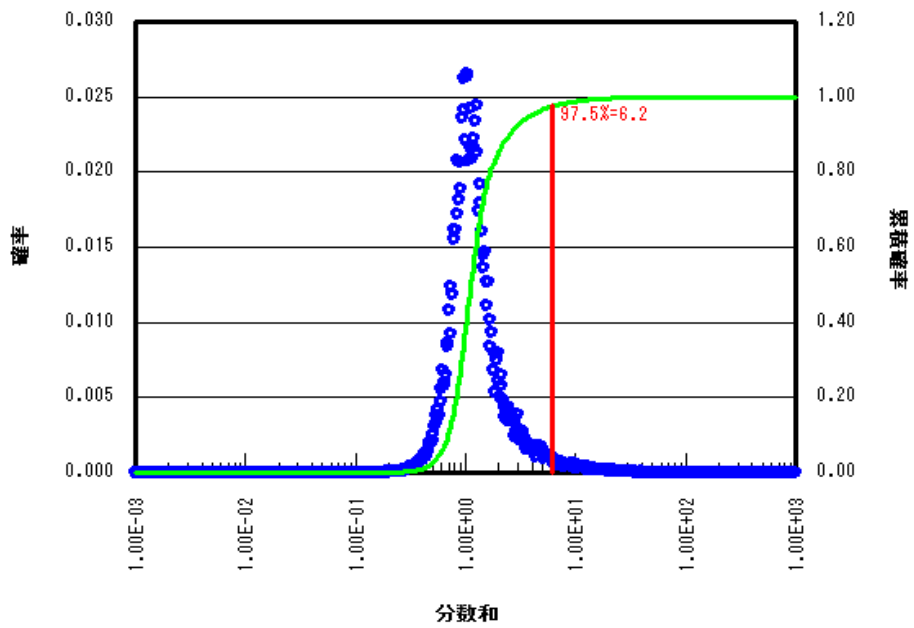
減衰期間6年

不確かさの上限値:評価値の1.7倍



減衰期間50年

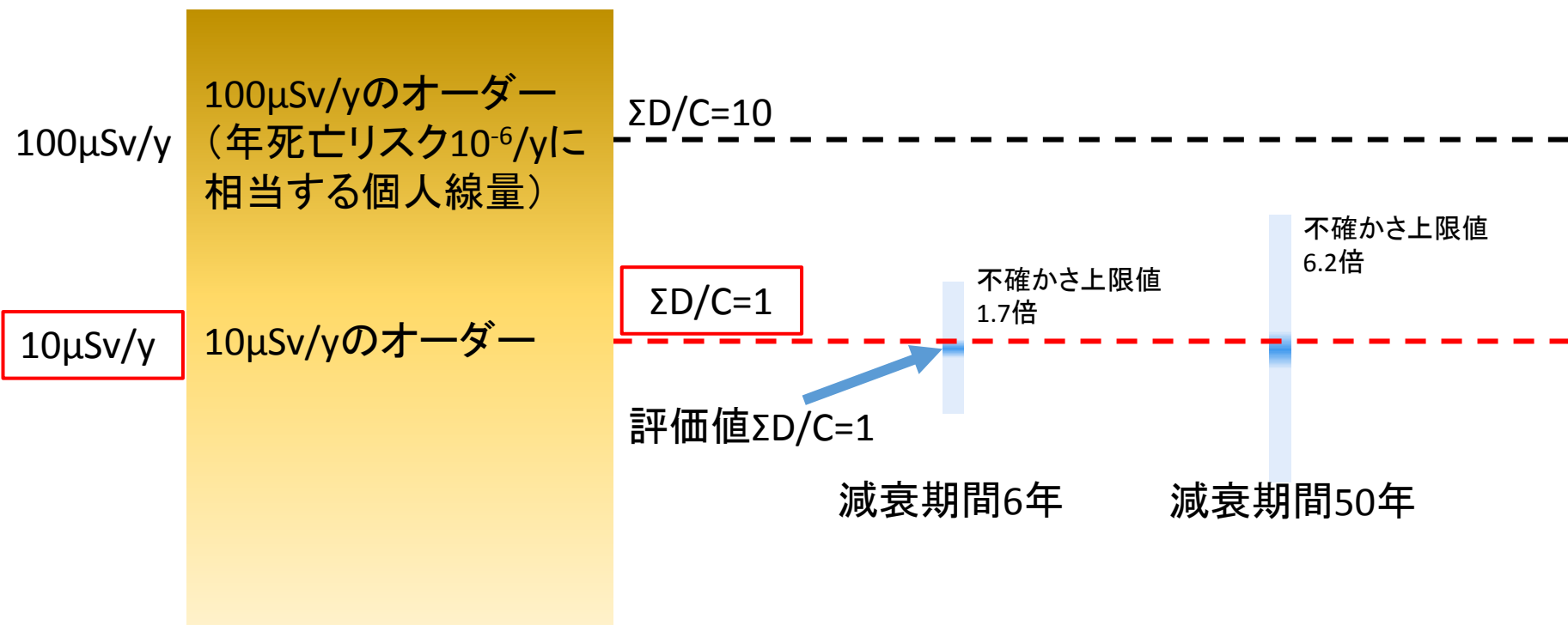
不確かさの上限値:評価値の6.2倍



評価値($\Sigma D/C$)の確率分布

3－(5)不確かさの影響評価結果

- ◆ 評価の結果、減衰期間6年において不確かさの上限値（片側97.5%信頼区間上限値）が評価値の1.7倍、減衰期間50年において不確かさの上限値が評価値の6.2倍となった。
- ◆ これにより、評価値がクリアランスレベル相当（ $\Sigma D/C=1$ ）であっても、不確かさの上限値が100 μ Sv/y相当を超えないことを確認しており、クリアランスレベルの設定根拠となったICRPの線量基準を満足している。



4. まとめ

まとめ

クリアランスの判断

- ・放射能濃度換算係数に十分な保守性
- ・ $\Sigma D/C$ が1を超えないことで、クリアランスを判断(→**現行規則に適合**)

規則第二条（放射能濃度の基準）

2 評価に用いる放射性物質の種類が二種類以上である場合にあっては、評価単位におけるそれぞれの放射性物質の平均放射能濃度の値を別表第一の第二欄に掲げるそれぞれの放射性物質に応じた放射能濃度の値で除して得られるそれぞれの割合の和が一を超えないこと。

不確かさの考慮

- ・「 $100\mu\text{Sv/y}$ 」を超えないことで不確かさを考慮
(97.5%片側信頼区間上限値が「 $100\mu\text{Sv/y}$ 」を超える場合は、その上限値が「 $100\mu\text{Sv/y}$ 」となるよう、
クリアランスレベルの判断の上限値に安全裕度を設ける)
- ・日本原子力学会標準をベースとした不確かさの考慮の方法

敦賀発電所1号炉のクリアランス測定・評価方法は、**現行規則に適合している。**

必要な場合、安全裕度を設け、基準を引き下げる

【規制委員会資料抜粋】

b.についてクリアランスの基準では測定の不確かさを考慮した値がクリアランスレベルの10倍以下とする規制要求とはなっていないことから、評価単位で平均放射能濃度に対し測定体系や核種組成比に係る不確かさを定量的に考慮した値（以下「不確かさを考慮した値」という。）がクリアランスレベル以下であること

- ➡ 当申請では、クリアランス制度の検討プロセスの考え方をベースに定められた学会標準の手法で考慮し、クリアランス判断をしている。これは現行規則に適合している。
- ➡ 現在検討されているIAEA DS500に係る専門家会合での情報も考慮する必要があるのではないか。パブコメ中の基準案については専門家の技術的検討は行われていない。

【規制委員会資料抜粋】

具体的には、現行内規に基づき、重要10核種を含めた評価対象核種に対し、不確かさを考慮した値がクリアランスレベル以下であること、又は、内規改正を待って、評価対象核種の絞り込みを行った上で、不確かさを考慮した値がクリアランスレベル以下であることの説明を求める。

【コメント】「現行内規に基づき」とあるが、当案件の審査において、現行内規の法的位置づけをご教示願いたい。

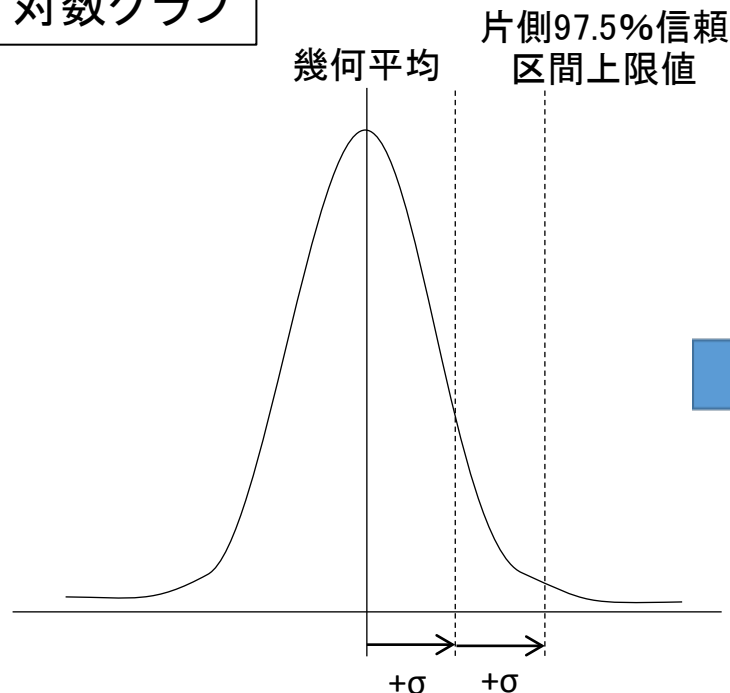
- 「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律等に基づく原子力規制委員会の処分に係る審査基準等」(H29.9.11改正、委員会決定)において、原子炉等規制法第61条の2第2項のクリアランス制度については、「基準は、試験炉等クリアランス規則第6条に規定されている。※6:申請件数が乏しい、又は申請内容によって審査に要する期間が大きく変動すること等の理由により設定しない。」とされており、審査基準ではない。

5. 参考

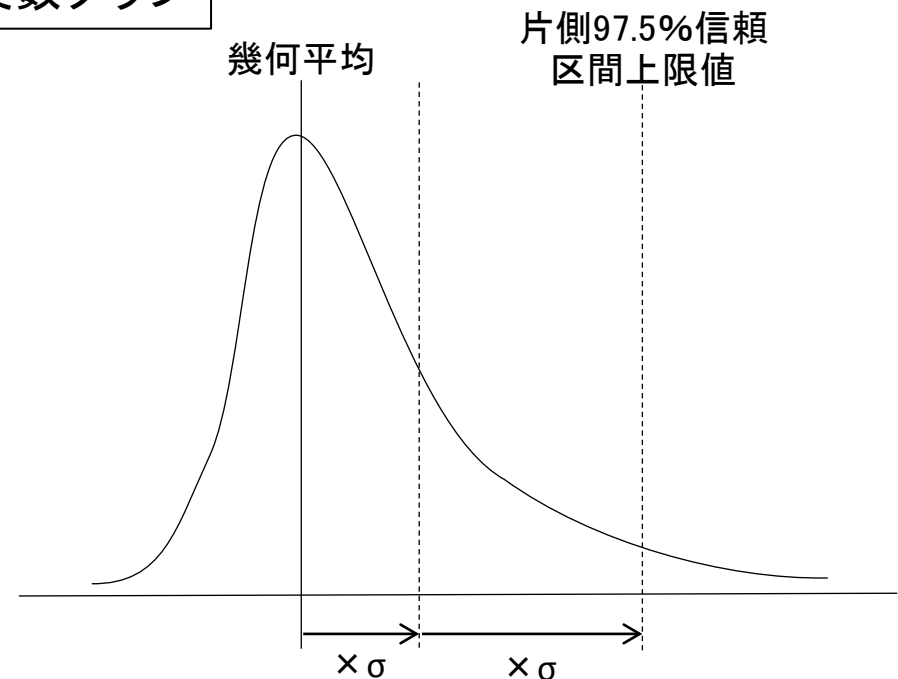
対数標準偏差を実数に変換した場合の違いについて

- ◆ 対数正規分布にて、片側97.5%信頼区間上限値を求める場合、対数にて
平均値_(対数) + 2σ _(対数) を計算する必要がある。
- ◆ これを実数とするため、平均値 $\times \sigma^2$ となる。
 σ の値によっては、片側97.5%信頼区間上限値が平均値の数十倍となることもある。

対数グラフ



実数グラフ



規制委員会資料(本資料にて抜粋)に記載された事項への対応

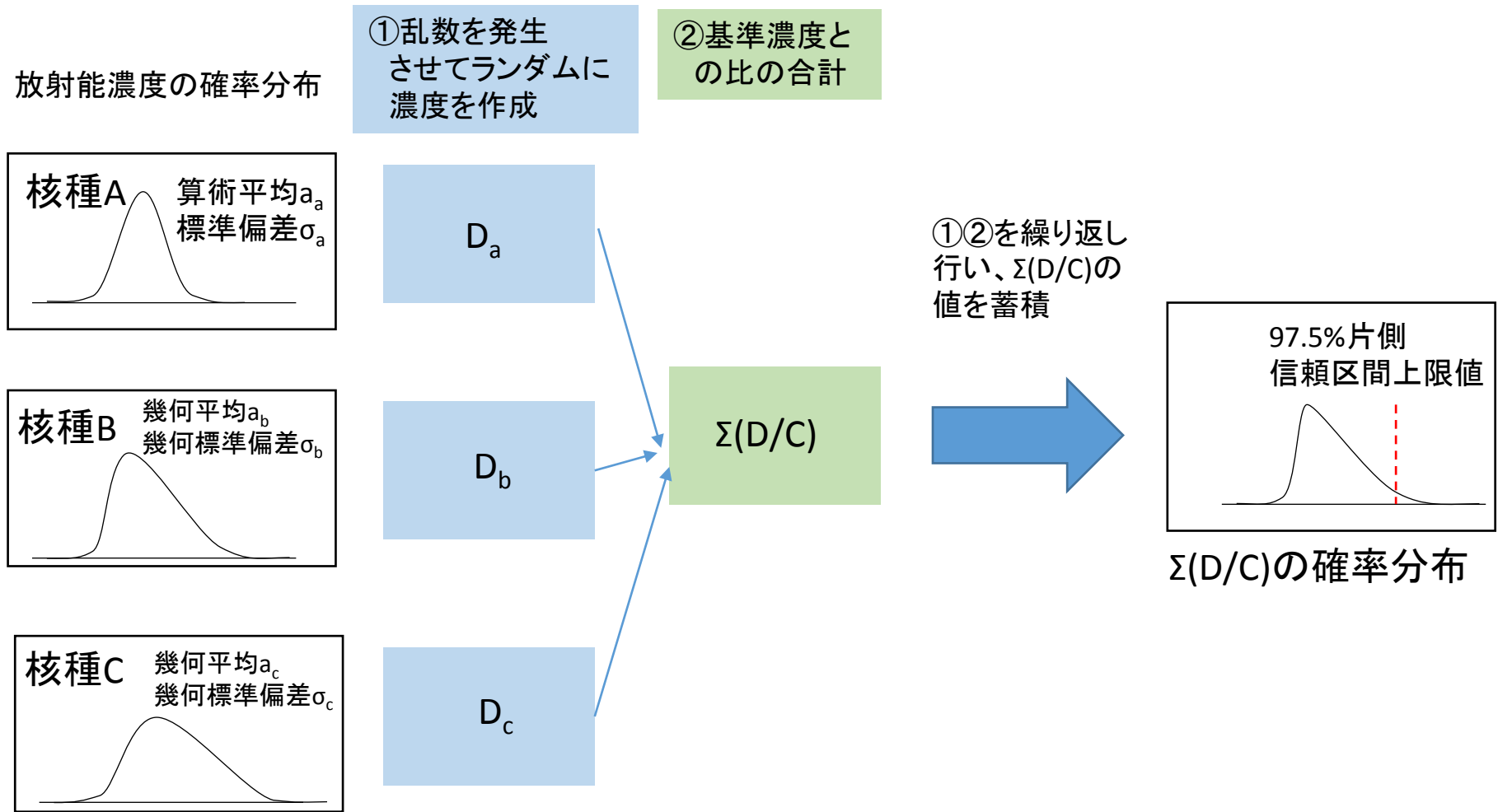
【規制委員会資料抜粋】

a.について同申請にある2次的な汚染の放射性物質組成比(幾何平均値)及び幾何標準偏差に基づけば、計算によって求める核種の値が不確かさを考慮した場合(97.5%信頼区間上限値。幾何平均値に幾何標準偏差の2乗を乗じた値)は考慮しない場合(幾何平均値)に比べ数十倍程度となっていること

【対応】 放射性物質組成比(幾何平均値)及び聞か標準偏差に基づく不確かさ(97.5%信頼区間上限値。幾何平均値に幾何標準偏差の2乗を乗じた値)が、実数に戻した場合に、理論的に数十倍になることを説明した。

モンテカルロ法を用いた当申請における不確かさの評価

$\Sigma D/C$ の97.5%片側信頼区間上限値評価方法



モンテカルロ法が一般的な手法であることについて

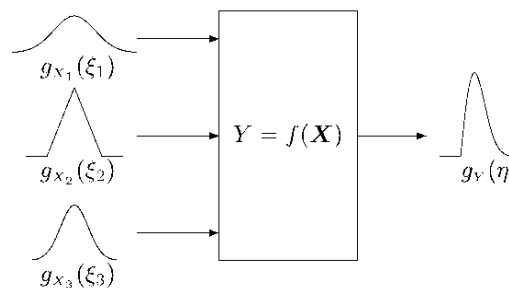
○モンテカルロ法とは(ウィキペディアによる記載)

シミュレーションや数値計算を乱数を用いて行う手法の総称。

数値解析の分野においてはモンテカルロ法はよく確率を近似的に求める手法として使われる。

○GUM補足文書、ISO 98-3/Supplement 1 (JCGM101:2008) モンテカルロ法による分布の伝播

→要因ごとの確率分布からサンプリングして、多数回の
測定のシミュレーションから出力量の分布を求める方法
を記載



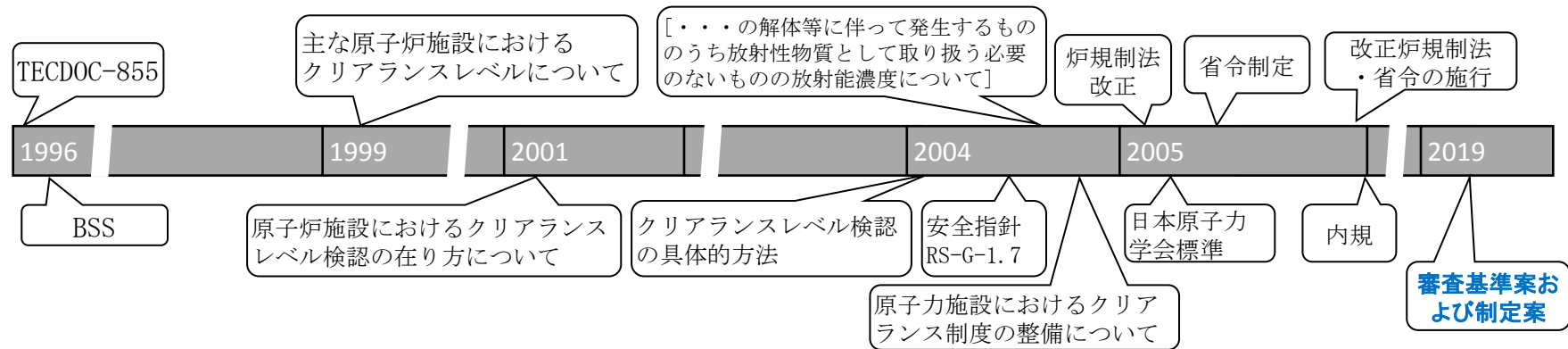
○モンテカルロ法を用いた確率分布の評価例

- ・原子力安全委員会「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の算出結果に対する評価パラメータのばらつき評価
- ・遮へい安全研究
スカイシャイン線の評価
- ・その他
物理学
食品安全性の研究
金融関係のリスク量評価
などにも適用例がある。

○モンテカルロ法を使用した計算コード

MCNP、Phits : 粒子・ガンマ線等の線源からの発生や遮へい体との反応に関する確率分布から測定点の
粒子・ガンマ線等のエネルギー・角度等に対する確率分布を求める。

クリアランス制度の検討の経緯



1996年1月	IAEAの技術文書「 TECDOC-855 (固体状物質に含まれる放射性核種のクリアランスレベル)」において、クリアランスレベル、導出方法についての考え方が示される。
1996年2月	「電離放射線に対する防護と放射線源の安全のための国際基本安全基準 (BSS)」(IAEA, 国連食糧農業機関、国際労働機関、世界保健機関他)において、規制除外、規制免除及びクリアランスの概念と中程度の量に関する規制免除レベルが示される。
1999年3月	「 主な原子炉施設におけるクリアランスレベルについて 」(原子力安全委員会 放射性廃棄物安全基準部専門部会)において、日本における主な原子炉施設のクリアランスレベルの基準値が示される。
2004年8月	「規制除外、規制免除及びクリアランスの概念の適用 (IAEA安全指針 RS-G-1.7)」において、国の規制当局等に対して、規制除外、規制免除及びクリアランスの概念の適用に関する指針が示される。
2004年9月	「 原子力施設におけるクリアランス制度の整備について 」(総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会)において、主に国内のクリアランスの検査・認定についての検討結果が示される。
2005年5月	「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律 (炉規制法)」 改正 、クリアランス制度の追加について可決される。
2005年11月	「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第六十一条の二第四項に規定する製錬事業者等における工場等に置いて用いた資材その他のものに含まれる放射性物質の放射能濃度についての確認等に関する規則 (クリアランス省令)」が 制定 される。
2005年12月	改正炉規制法およびクリアランス 省令 が 施行 される。
2005年12月	「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する 規則 」が 制定 される。
2006年1月	「放射能濃度の測定及び評価の方法の認可について (内規)」(経済産業省原子力安全・保安院)により、クリアランス省令における認可の留意点が示される。
2019年	クリアランスの測定及び評価の方法に係る 審査基準案および制定案 が示される。

保守的な不確かさの考慮により、クリアランス対象と想定していたものがクリアランスできなくなり、放射性廃棄物量が増加する。



不確かさの程度は個別施設によって異なるが、申請中の敦賀1号炉のケースでは、クリアランスからL3となるものが数10%と推定。