

## JPDR保管廃棄物に対する放射能濃度評価方法の検討 (2)

Study on the Evaluation Methods to Determine the Radioactivity Concentration  
in Low-level Radioactive Wastes Generated from JPDR Facilities - Part 2 -

辻 智之 坂井 章浩 出雲 沙理 天澤 弘也

Tomoyuki TSUJI, Akihiro SAKAI, Sari IZUMO and Hiroya AMAZAWA

バックエンド研究開発部門  
廃棄物対策・埋設事業統括部

Radioactive Waste Management and Disposal Project Department  
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

June 2015

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Institutional Repository Section,  
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2015

JPDR 保管廃棄物に対する放射能濃度評価方法の検討 (2)

日本原子力研究開発機構  
バックエンド研究開発部門 廃棄物対策・埋設事業統括部

辻 智之、坂井 章浩、出雲 沙理、天澤 弘也

(2015年3月6日受理)

日本原子力研究開発機構の研究施設から発生する低レベル放射性廃棄物を対象に、将来的に実施が予定されている浅地中埋設処分における廃棄体確認に向けて、廃棄体に含まれる放射性物質の種類ごとの放射能濃度を簡便に評価する方法を構築しておく必要がある。そこで、保管数量が比較的多い JPDR 施設の解体に伴って発生した固体廃棄物に含まれる放射性核種 (H-3、C-14、Cl-36、Ni-59、Co-60、Ni-63、Sr-90、Mo-93、Nb-94、Tc-99、Ag-108m、Cs-137、Eu-152、Eu-154、Ho-166m、全  $\alpha$ ) を対象とした放射能濃度評価方法の適用性について検討を行った。この結果、Ni-63 及び Nb-94 については Co-60 を Key 核種とする SF 法を、H-3、C-14、Cl-36、Sr-90、Mo-93、Tc-99、Eu-152、Eu-154、Ho-166m 及び全  $\alpha$  については平均放射能濃度法を、Ni-59 については理論計算法を適用できる見通しを得た。また、Co-60、Cs-137 及び Ag-108m は比較的測定が容易なエネルギーの  $\gamma$  線を放出する核種であることから、廃棄体外部から非破壊測定が可能と考えられるため、非破壊外部測定法を適用する。

Study on the Evaluation Methods to Determine the Radioactivity Concentration in  
Low-level Radioactive Wastes Generated from JPDR Facilities - Part 2 -

Tomoyuki TSUJI, Akihiro SAKAI, Sari IZUMO and Hiroya AMAZAWA

Radioactive Waste Management and Disposal Project Department  
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 6, 2015)

It is necessary to establish practical evaluation methods to determine radioactivity concentrations of the important nuclides for safety assessment on disposal of radioactive wastes in order to dispose of low-level radioactive wastes generated from various nuclear facilities in JAEA. In this report, it has been studied that the practical evaluation methods such as the scaling factor method or the mean activity concentration method are applied for the important nuclides (H-3, C-14, Cl-36, Ni-59, Co-60, Ni-63, Sr-90, Mo-93, Nb-94, Tc-99, Ag-108m, Cs-137, Eu-152, Eu-154, Ho-166m,  $\alpha$  nuclides) of radioactive wastes generated from JPDR facilities. As a result, it has been found that the appropriate methods to determine radioactivity concentrations such as the scaling factor method (Ni-63, Nb-94), the mean activity concentration method (H-3, C-14, Cl-36, Sr-90, Mo-93, Tc-99, Eu-152, Eu-154, Ho-166m,  $\alpha$  nuclides) and the theoretical method (Ni-59) can be applied and Co-60, Ag-108m and Cs-137 will be evaluated by gamma measurements from outside of the waste package.

Keywords: Disposal of Low-level Radioactive Wastes, Scaling Factor Method, Important Nuclide, JPDR

## 目 次

1. はじめに.....	1
2. 検討手順.....	2
2.1 検討手順について.....	2
2.2 放射能濃度評価方法の適用手順について.....	3
2.3 放射能濃度データの精査について.....	7
3. 放射能濃度評価方法の検討.....	8
3.1 相関関係の確認.....	8
3.2 放射能濃度評価方法適用の検討.....	8
3.3 SF法の適用性検討.....	10
3.4 平均放射能濃度法の適用性検討.....	12
3.5 理論計算法の適用性検討.....	15
4. まとめ.....	16
謝 辞.....	17
参考文献.....	18

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Procedure .....	2
2.1 Outline of procedure .....	2
2.2 Procedure of evaluation methods to determine radioactivity concentration .....	3
2.3 Review of evaluation data .....	7
3. Study on evaluation methods to determine radioactivity concentration .....	8
3.1 Confirmation of correlations of radioactivity concentration .....	8
3.2 Adaptability of evaluation methods to determine radioactivity concentration .....	8
3.3 Scaling factor method .....	10
3.4 Mean activity concentration method .....	12
3.5 Theoretical method .....	15
4. Conclusion .....	16
Acknowledgments .....	17
References .....	18

## 図表リスト

表 2.1	JPDR における系統分類の考え方	19
表 3.1	相関傾向の確認結果	20
表 3.2	グループ分類の必要性の確認結果	20
表 3.3	放射化廃棄物の核種組成比 $R_a$ 及び汚染廃棄物の核種組成比 $R_c$	21
表 3.4	平均放射能濃度と基準線量相当濃度試算値に対する裕度（トレンチ処分）	22
表 3.5	平均放射能濃度と基準線量相当濃度試算値に対する裕度（ピット処分）	23
表 3.6	理論計算による Ni-59 の Ni-63 に対する核種組成比	24
表 4.1	JPDR 保管廃棄物に対する放射能濃度評価方法のまとめ	24
図 2.1	放射能濃度評価方法検討フロー	25
図 2.2	H-3 の放射エネルギーと分析用試料重量の関係	26
図 2.3	Eu-152 の放射エネルギーと分析用試料重量の関係	26
図 2.4	Eu-154 の放射エネルギーと分析用試料重量の関係	27
図 2.5	Ho-166m の放射エネルギーと分析用試料重量の関係	27
図 3.1	Ni-63 と Co-60 の放射能濃度	28
図 3.2	Nb-94 と Co-60 の放射能濃度	29
図 3.3	Sr-90 と Cs-137 の放射能濃度	30
図 3.4	Tc-99 と Co-60 の放射能濃度	31
図 3.5	Tc-99 と Cs-137 の放射能濃度	32
図 3.6	Eu-152 と Co-60 の放射能濃度	33
図 3.7	H-3 と Co-60 の放射能濃度	34
図 3.8	H-3 と Cs-137 の放射能濃度	35
図 3.9	C-14 と Co-60 の放射能濃度	36
図 3.10	C-14 と Cs-137 の放射能濃度	37
図 3.11	Cl-36 と Co-60 の放射能濃度	38
図 3.12	Mo-93 と Co-60 の放射能濃度	39
図 3.13	Eu-154 と Co-60 の放射能濃度	40
図 3.14	Ho-166m と Co-60 の放射能濃度	41
図 3.15	全 $\alpha$ と Cs-137 の放射能濃度	42
図 3.16	Ag-108m と Co-60 の放射能濃度	43
図 3.17	Ni-63 及び Co-60 並びに Ni-63 と Co-60 との核種組成比の正規性の確認	44
図 3.18	Ni-63 及び Co-60 並びに Ni-63 と Co-60 との核種組成比の対数正規性の確認	44
図 3.19	Nb-94 及び Co-60 並びに Nb-94 と Co-60 との核種組成比の正規性の確認	45
図 3.20	Nb-94 及び Co-60 並びに Nb-94 と Co-60 との核種組成比の対数正規性の確認	45
図 3.21	汚染金属廃棄物の分別状況及び分析用試料採取状況	46

This is a blank page.



## 1. はじめに

廃棄物埋設事業者は、放射性廃棄物の埋設処分にあたり処分対象の廃棄体一体ごとに、法令で定められる技術上の基準に適合していることについて、規制当局による確認（以下「廃棄体確認」という。）を受けなければならないことが核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第51条の6第2項に規定されている。廃棄体の技術上の基準には廃棄体性能及び放射性物質の濃度（以下「放射能濃度」という。）に係る項目があり、廃棄体確認における放射能濃度に係る項目は、埋設処分対象の廃棄体に含まれる放射性物質の種類ごとの放射能濃度が埋設事業許可申請書に記載された最大放射能濃度を超えないこととされている。

原子力発電所の操業に伴って発生する均質・均一固化体または充填固化体（以下「発電所廃棄体」という。）は、廃棄体の外部から非破壊測定を行う非破壊外部測定法、スケーリングファクタ法（以下「SF法」という。）または平均放射能濃度法のような統計的手法に基づく放射能濃度決定方法（以下「SF法等」という。）、または生成機構が同一であるとみなせる同位体の組成比率から放射能濃度を決定する理論計算法により、埋設処分対象の廃棄体一体ごとに放射能濃度が決定され、最大放射能濃度を超えないことが確認（以下「廃棄体の放射能濃度確認」という。）されている<sup>1)</sup>。

日本原子力研究開発機構（以下「原子力機構」という。）の研究施設から発生する放射性廃棄物（以下「研究施設等廃棄物」という。）についても、将来的に埋設処分の実施が予定されており、動力試験炉 JPDR 施設の解体に伴って発生した放射性廃棄物（以下「JPDR 保管廃棄物」という。）のうち、200 リットルドラム缶に収納された金属廃棄物約 7,200 本を対象とした SF 法等の適用性について検討を進めてきた<sup>2)</sup>。

本検討では、前報での検討<sup>2)</sup>に引き続き、JPDR 保管廃棄物のうち、これまでに分別処理された金属廃棄物約 2,250 本から採取された分析用試料に対し、新たに放射化学分析を実施した 9 核種（Cl-36、Mo-93、Nb-94、Tc-99、Ag-108m、Eu-152、Eu-154、Ho-166m、全  $\alpha$ ）を加えた 16 核種（H-3、C-14、Cl-36、Co-60、Ni-59、Ni-63、Sr-90、Mo-93、Nb-94、Tc-99、Ag-108m、Cs-137、Eu-152、Eu-154、Ho-166m、全  $\alpha$ ）の放射能濃度データ<sup>3,4,5,6)</sup>に基づき、放射能濃度評価方法の適用性について検討を行った。

## 2. 検討手順

### 2.1 検討手順について

発電所廃棄体の放射能濃度評価<sup>7,8)</sup>では、埋設処分対象とする廃棄体に含まれる放射性核種ごとに放射能濃度決定法が適用されており、廃棄体一体ごとの放射能濃度が決定されている。現在、発電所廃棄体に適用されている放射能濃度決定方法は、廃棄体外部から直接放射能を測定する非破壊外部測定法、あらかじめ算出したスクーリングファクタ（以下「SF」という。）に、非破壊外部測定法によって得られる放射性核種（以下「Key 核種」という。）の放射能濃度を掛け合わせて間接的に廃棄体の放射能濃度を決定する SF 法、放射化学分析により取得した放射能濃度データに対する平均値を廃棄体の放射能濃度とする平均放射能濃度法、評価対象核種と生成機構が同一であるとみなせる同位体の組成比率が普遍的に一定である場合に理論計算により放射能濃度を決定する理論計算法である<sup>1)</sup>。JPDR は沸騰水型原子炉 (BWR) であることから、発電所廃棄体の放射能濃度評価手法を参考に SF 法等の適用性について検討を進めてきている。

原子力機構では研究施設等廃棄物の埋設処分において安全評価上重要とされる放射性核種（以下「重要核種」という。）の予備的評価を行っており<sup>9)</sup>、その中で JPDR 保管廃棄物のトレンチ処分またはピット処分における当面の重要核種として 17 核種 (H-3、C-14、Cl-36、Ca-41、Co-60、Ni-59、Ni-63、Sr-90、Mo-93、Nb-94、Tc-99、Ag-108m、Cs-137、Eu-152、Eu-154、Ho-166m、全  $\alpha$ ) が選定されており、これらの重要核種を評価対象とした放射能濃度評価方法について検討を進めている。なお、Ca-41 はコンクリート中の Ca-40 の放射化により生成する放射性核種であり、本検討の対象としない。

これまでに 7 核種 (H-3、C-14、Co-60、Ni-59、Ni-63、Sr-90、Cs-137) の放射能濃度データ<sup>3)</sup>に基づき SF 法等の適用性について検討を行った結果<sup>2)</sup>、Ni-63 については同じ腐食生成物（以下「CP 核種」という。）である Co-60 と相関関係が成立し、SF 法のように放射能濃度の比（以下「核種組成比」という。）を用いて放射能濃度を評価する方法を適用できる可能性が示唆された。また、H-3、C-14 については平均放射能濃度法を適用できる可能性が示唆された。Sr-90 についてはデータ数が少ないものの、同じ核分裂生成物（以下「FP 核種」という。）である Cs-137 との相関傾向が見られたことから、引き続き放射能濃度データの蓄積を進め、再度放射能濃度評価方法の検討を行うこととした。

本検討では、新たに取得した 9 核種 (Cl-36、Mo-93、Nb-94、Tc-99、Ag-108m、Eu-152、Eu-154、Ho-166m、全  $\alpha$ ) の放射能濃度データ<sup>4,5,6)</sup>を加えた 16 核種 (H-3、C-14、Cl-36、Co-60、Ni-59、Ni-63、Sr-90、Mo-93、Nb-94、Tc-99、Ag-108m、Cs-137、Eu-152、Eu-154、Ho-166m、全  $\alpha$ ) の放射能濃度データに基づき、引き続き JPDR 保管廃棄物のうち金属廃棄物を対象とした SF 法等の適用性検討を行う。図 2.1 に SF 法等の適用性検討のフローを示す。

検討手順として、すでに検討を進めていた7核種（H-3、C-14、Co-60、Ni-59、Ni-63、Sr-90、Cs-137）については、新たに取得した放射能濃度データを追加してSF法等の適用性検討を行うこととしたが<sup>2)</sup>、放射化学分析を実施した結果、Key核種となるCs-137については有意な放射能が検出されない場合が多く放射能濃度データの蓄積が進まなかった<sup>5,6)</sup>。

新たに放射化学分析を実施した9核種（Cl-36、Mo-93、Nb-94、Tc-99、Ag-108m、Eu-152、Eu-154、Ho-166m、全 $\alpha$ ）についても、取得した放射能濃度データ<sup>4,5,6)</sup>に基づきこれまでの検討と同様にSF法等の適用性検討を行う。すなわち、有意な放射能濃度データを取得したNb-94、Tc-99、Ag-108m、Eu-152については、これまでの検討で得られた知見<sup>2)</sup>から、SF法等の適用性検討を行うこととする。一方、Cl-36、Mo-93、Eu-154、Ho-166m、全 $\alpha$ については、放射化学分析を実施した結果、有意な放射能が検出されなかった<sup>4,5,6)</sup>ため、検出限界値データに対する平均放射能濃度法適用の検討を行う。Ni-59については、発電所廃棄体の放射能濃度確認に適用されているNi-63との理論計算法適用の検討を行う。

## 2.2 放射能濃度評価方法の適用手順について<sup>7,8)</sup>

### 2.2.1 SF法の適用手順について

SF法は、評価対象核種の生成機構、放射性廃棄物への移行挙動等の観点からKey核種を組み合わせ、評価対象核種とKey核種との放射能濃度の間に相関関係が成立する場合に適用することができる。

これまでに取得した放射能濃度データ<sup>3,4,5,6)</sup>に基づき、Ni-63、Nb-94、Tc-99、Ag-108m、Eu-152については同じCP核種であるCo-60をSr-90については同じFP核種であるCs-137をKey核種とし、以下に示す手順に従いSF法の適用性について確認する。

#### a) 相関関係の成立性の確認

有意な放射能濃度データに基づき、相関図から評価対象核種とKey核種との放射能濃度に相関傾向が見られた場合、さらにt検定を行い相関関係が成立するかどうか判定する。ここでt検定は、評価対象核種とKey核種との放射能濃度に相関関係が成立しないという仮説を危険率1%で検定するものである。すなわち、式(1)に示す $t_0$ 値がt分布表の $t(n-2, 0.01)$ に対して $t_0 \geq t(n-2, 0.01)$ となる場合に、評価対象核種とKey核種との放射能濃度に相関関係が成立しないとする仮説が棄却され、相関関係が成立すると判定する。

$$t_0 = \frac{|r|\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \dots\dots\dots (1)$$

r : 相関係数

n : データ数

b) グループ分類の確認

相関関係が成立する評価対象核種については、評価対象核種と Key 核種との核種組成比に基づいて発生系統ごとのグループ及び汚染形態ごとのグループに対して、複数グループの母集団の差の有意性を検定する分散分析検定 (F 検定) を行い、グループ分類の要否を判定する。F 検定において、グループ間に有意な差があると判定された場合グループ分類は必要、あるとは言えないと判定された場合グループ分類は不要となる。グループ分類が不要であることが確認された場合は、発生系統ごと及び汚染形態ごとにグループ分類せず、共通的に SF を設定する。JPDR における系統分類の考え方を表 2.1 に示す。

c) SF の算出及び SF 法の適用

評価対象核種の放射能濃度は、式 (2) に示すように、式 (3) または式 (4) によって算出した SF に廃棄体外部から非破壊によって測定した Key 核種の放射能濃度を掛け合わせることで算出する。

$$A_{DTM} = SF \times A_{KN} \dots\dots\dots (2)$$

$A_{DTM}$  : 評価対象核種の放射能濃度 (Bq/t)  
 SF : スケーリングファクタ  
 $A_{KN}$  : Key 核種の放射能濃度 (Bq/t)

式 (2) に示す SF の算出には、評価対象核種と Key 核種との核種組成比のデータが対数正規分布に従うことが確認された場合は式 (3) を用いた幾何平均値、正規分布に従うことが確認された場合は式 (4) を用いた算術平均値を用いる。なお、発電所廃棄体の放射能濃度確認では算術平均値が SF として設定されている。これは、算術平均値は幾何平均値と等しいか大きくなる性質があるため放射能濃度評価上保守的な評価になることからと考えられる。

$$SF = \sqrt[n]{y_1/x_1 \times y_2/x_2 \times \dots \times y_n/x_n} \dots\dots\dots (3)$$

$x_i$  : Key 核種の放射能濃度データ (i=1,2,...,n) (Bq/g)  
 $y_i$  : 評価対象核種の放射能濃度データ (i=1,2,...,n) (Bq/g)  
 n : データ数

$$SF = \sum_{i=1}^n (y_i/x_i) \dots\dots\dots (4)$$

$x_i$  : Key 核種の放射能濃度データ (i=1,2,...,n) (Bq/g)  
 $y_i$  : 評価対象核種の放射能濃度データ (i=1,2,...,n) (Bq/g)  
 n : データ数

d) 放射化廃棄物の放射能濃度評価の検討について

本検討における分析用試料採取及び放射化学分析は、JPDR 保管廃棄物のうち 200 リットルドラム缶に収納され表面が放射性核種によって汚染された金属廃棄物を対象として行われたが、実際の放射化学分析において、検出された放射能が配管・弁等の母材の表面に付着した放射性核種によるものだけではなく、母材自体の放射化によると考えられる分析用試料が確認された<sup>2)</sup>。

この理由として、系統配管・弁等の放射化廃棄物で汚染廃棄物と同等の放射能レベルのものは、汚染廃棄物と区別することができないため、汚染廃棄物とともに 200 リットルドラム缶に収納されたと考えられた。廃棄体の放射能濃度確認において廃棄体外部から非破壊で Co-60 を測定する際に、汚染廃棄物に由来する放射能か放射化廃棄物に由来する放射能か区別して定量することは不可能である。このため、生成機構が放射化である評価対象核種に対して Co-60 を Key 核種とする SF 法を適用できる見込みがある場合には、汚染廃棄物と放射化廃棄物が廃棄体の中で混在していることを考慮し、以下の検討を行う。

評価対象核種ごとに、核種生成崩壊計算コード ORIGEN を用いた放射化計算によって算出した放射化廃棄物の核種組成比と、放射化学分析によって取得した放射能濃度データに基づき算出した汚染廃棄物の核種組成比を比較し、放射化の影響を評価する。すなわち、式 (5) 及び式 (6) に示すように ORIGEN の計算結果から算出した放射化廃棄物の評価対象核種と Co-60 との核種組成比  $R_a$  と、放射化学分析の結果から得られた汚染廃棄物の評価対象核種と Co-60 との核種組成比  $R_c$  の比  $R_a/R_c$  を比較する。式 (5) に示すように  $R_a/R_c$  が 1 より大きくなる場合には、放射能濃度評価上保守的となる放射化計算により算出した核種組成比  $R_a$  を用いて廃棄体の放射能濃度を評価する。一方、式 (6) に示すように  $R_a/R_c$  が 1 より小さくなる場合には汚染の影響が大きいと判断し、放射能濃度評価上保守的となる汚染廃棄物の核種組成比  $R_c$  を用いて廃棄体の放射能濃度を評価する。なお、汚染廃棄物の核種組成比  $R_c$  については、放射化学分析によって取得した放射能濃度データに基づき式 (3) または式 (4) により算出する。

$$R_a/R_c > 1 \dots\dots\dots (5)$$

$$R_a/R_c \leq 1 \dots\dots\dots (6)$$

$R_a$  : 放射化廃棄物の核種組成比

$R_c$  : 汚染廃棄物の核種組成比

## 2.2.2 平均放射能濃度法の適用手順について

平均放射能濃度法は、生成機構、放射性廃棄物への移行挙動等の観点から組み合わせる Key 核種が存在せず、評価対象核種の放射能濃度データが一定範囲に分布する場合に適用することができる。平均放射能濃度法では、取得した評価対象核種の放射能濃度データの平均放射能濃度を当該廃棄体の放射能濃度とするため、廃棄体個々の放射能濃度を決定できない。このため、評価対象核種の平均放射能濃度が埋設事業許可申請書に記載された最大放射能濃度に対して適切な裕度を有している場合に適用できるとされている。

H-3 や均質・均一固化体の C-14 に対しては、放射性廃棄物への移行挙動の観点から組み合わせる Key 核種が存在しないとされ、これまで発電所廃棄体の放射能濃度確認においても平均放射能濃度法が適用されている<sup>1)</sup>。また、東海発電所の充填固化体における Nb-94 及び Tc-99 に対しては、もともと生成量が少ないと考えられ有意な放射能が検出できなかったことから、検出限界値データに対する平均値、または有意な放射能濃度データと検出限界値に対する平均値を平均放射能濃度としている<sup>10)</sup>。以下に示す手順に従い平均放射能濃度法の適用性について確認する。

### a) 平均放射能濃度の算出

平均放射能濃度は、式 (7) に示す一般的な算術平均を用い、評価対象核種の放射能濃度データに基づき算出する。

$$C_{av} = \sum_{i=1}^n y_i / n \dots\dots\dots (7)$$

$C_{av}$  : 平均放射能濃度 (Bq/g)

$y_i$  : 評価対象核種の放射能濃度データ ( $i=1,2,\dots,n$ ) (Bq/g)

$n$  : データ数

### b) 最大放射能濃度に対する裕度の確認

ここで、最大放射能濃度に対する裕度を平均放射能濃度の最大放射能濃度に対する比として定義する。発電所廃棄体の放射能濃度確認<sup>1)</sup>において平均放射能濃度法が適用されている放射性核種の裕度について確認すると、最も厳しい結果となるのは福島第一原子力発電所 1~2 号機から発生するセメント固化体の C-14 であり  $1.8 \times 10^1$  であった。このため本検討においても 1 桁程度の裕度がある場合には平均放射能濃度法を適用することとする。

一方、研究施設等廃棄物の埋設処分場については、現在立地基準及び立地手順の策定が検討されているところであるため、本検討では旧原子力安全委員会の報告書<sup>11)</sup>において試算されたトレンチ処分における基準線量である  $10\mu\text{Sv/y}$  に相当する濃度に対し、どの程度の裕度が見込まれるか評価する。今後、研究施設等廃棄物の埋設処分場の立地場所が選定され、研

究施設等廃棄物の廃棄物埋設事業許可申請の安全審査を経て、埋設処分可能な放射性核種の種類及びその最大放射能濃度が許可されるので、最大放射能濃度に対する裕度を改めて評価し、平均放射能濃度法が適用できる可能性について確認する必要がある。

### 2.2.3 理論計算法の適用手順について

理論計算法は、評価対象核種と生成機構が同一であるとみなせる同位体が存在し、その組成比率が普遍的に一定である場合に適用できるとされている。Ni-59 は原子炉構成材料に使用されているステンレス鋼、インコネル等の中に存在する安定同位元素 Ni-58 の熱中性子捕獲によって生成し、その生成機構及び廃棄物への移行挙動は Ni-63 と同一である。このため式 (8) に示すように Ni-63 の放射能濃度から Ni-59 の放射能濃度が決定されており、Ni-59 の放射能濃度については、式 (8) を用いて算出する。

$$\frac{A_{Ni-59}}{A_{Ni-63}} = \frac{N_{Ni-58} \times \sigma_{Ni-58} \times (\ln 2/T_{Ni-59})}{N_{Ni-62} \times \sigma_{Ni-62} \times (\ln 2/T_{Ni-63})} \dots\dots\dots (8)$$

- A : 放射能濃度 (Bq/g)
- N : 天然存在比 (%)
- σ : 熱中性子断面積 (barn)
- T : 半減期 (年)

### 2.3 放射能濃度データの精査について

これまでに取得した放射能濃度データ<sup>3,4,5,6)</sup>を確認したところ、特定の試料において H-3 や Eu-152、Eu-154、Ho-166m 等の放射能濃度データの中で、他の放射能濃度よりも 1~2 桁程度高い結果となるデータが見られた。このため、当該放射能濃度データの分析用試料の種類や重量について確認したところ、これらの放射能濃度データはプラスチック片の試料 (試料 No.NY-924-232-1) 及び他の分析用試料よりも肉薄である試料 (試料 No.NY-923-1950-1) の分析結果であることが確認された。図 2.2 から図 2.5 に示すように、これらの分析用試料の重量データは他の分析用試料の重量の分布よりも有意に乖離しており、同一の母集団とはみなせないと考えられる。また、測定される放射能が一定であるのに対し、これらの分析用試料の重量が平均値に比べ 2 桁程度軽量であることから相対的に放射能濃度が高い結果となった。以上の結果から、これらの分析用試料が JPDR 保管廃棄物を代表しているとはみなせないと判断し、本検討において当該分析用試料の放射能濃度データは除外する。

### 3. 放射能濃度評価方法の検討

#### 3.1 相関関係の確認

これまでの検討で得られた知見<sup>2)</sup>から、有意な放射能濃度データを取得している Ni-63、Nb-94、Tc-99、Ag-108m、Eu-152 については同じ CP 核種である Co-60 の放射能濃度との関係を、Sr-90 については同じ FP 核種である Cs-137 の放射能濃度との関係を確認した。H-3、C-14 については、Co-60 及び Cs-137 の放射能濃度との関係を確認した。有意な放射能濃度データを取得できなかった Cl-36、Mo-93、Eu-154、Ho-166m については Co-60、全  $\alpha$  については Cs-137 の放射能濃度に対して検出限界値データを相関図にプロットした。なお、表 2.1 に示す JPDR の系統分類について、図中では原子炉系統は原子炉系、タービン/ダンプコンデンサ系統はタービン系統、廃棄物処理系統は廃液系または廃ガス系、建家換気系統は換気系と略記した。また、旧原子力安全委員会の報告書<sup>11)</sup>で試算されたトレンチ処分における基準線量である  $10\mu\text{Sv/y}$  に相当する濃度を図示した。

この結果、Ni-63、Nb-94 については、図 3.1、図 3.2 に示すように有意な放射能濃度データに対して相関図から Co-60 の放射能濃度との相関傾向が見られた。Sr-90、Tc-99、Eu-152 については、図 3.3 から図 3.6 に示すように有意な放射能濃度データに対して相関図から Co-60 または Cs-137 の放射能濃度との相関傾向は見られなかったが、一定範囲に放射能濃度データが分布することが確認された。H-3、C-14、については、図 3.7 から図 3.10 に示すように有意な放射能濃度データに対して相関図から Co-60 または Cs-137 の放射能濃度に依存せず放射能濃度データが一定範囲に分布することが確認された。Cl-36、Mo-93、Eu-154、Ho-166m、全  $\alpha$  についてはいずれも有意な放射能濃度データを取得できなかったため、検出限界値データと Co-60 または Cs-137 の放射能濃度との関係を図 3.11 から図 3.15 に示す。

Ag-108m については、図 3.16 に示すように有意な放射能濃度データに対して相関図から Co-60 の放射能濃度との相関傾向は見られなかった。このことから、Ag-108m については平均放射能濃度法の適用が考えられたが、比較的測定が容易なエネルギーの  $\gamma$  線を放出する核種であることから、廃棄体外部から非破壊測定が可能と考えられる。このため Co-60 及び Cs-137 と同様に非破壊外部測定法を適用することとし、SF 法等の適用性検討の対象からは除外する。

表 3.1 に相関傾向の確認結果を示す。

#### 3.2 放射能濃度評価方法適用の検討

Ni-63 及び Nb-94 については、図 3.1 及び図 3.2 より有意な放射能濃度データに対して Co-60 の放射能濃度との相関傾向が見られたため SF 法の適用性検討を行う。

Sr-90 については、放射化学分析を実施した結果、Sr-90 及び Cs-137 について有意な放射能濃度が検出されない場合が多く<sup>3,4,5,6)</sup>、図 3.3 より Sr-90 の有意な放射能濃度データに対し Cs-137 の放



射能濃度との相関傾向が見られなかった。この理由の一つとして、本検討で放射能濃度評価の対象とした JPDR 保管廃棄物はもともと放射能レベルが低く、かつ、生成機構が核分裂生成である放射性核種による汚染の度合いが小さく、Sr-90、Cs-137 について有意な放射能が検出される割合が低かったため Sr-90 及び Cs-137 が検出限界以下となる結果が多かったことが挙げられる。また、JPDR 施設の解体において一次冷却系統配管の解体前除染試験や解体後の機器除染試験が行われ<sup>12)</sup>、除染の影響によって放射性廃棄物への移行挙動が変動した可能性があるが、JPDR はすでに解体されており除染前の放射能濃度データは取得していないことから、本検討において除染の影響による放射性核種ごとの核種組成比の変動について評価することはできなかった。本来、平均放射能濃度法は「生成機構、放射性廃棄物への移行挙動等の観点から組み合わせる Key 核種が存在せず、評価対象核種の放射能濃度データが一定範囲に分布する場合に適用することができる」とされている<sup>7)</sup>。しかし、本検討の対象とした汚染金属廃棄物はもともと放射能レベルが低く、Sr-90、Cs-137 について有意な放射能が検出される割合が低かったこと、取得した Sr-90 の有意な放射能濃度データについては、Cs-137 の放射能濃度に依存せず一定範囲に分布することが確認されたことを考慮し、Sr-90 に対しては取得した放射能濃度データに基づいて平均放射能濃度法の適用性検討を行う。

Tc-99 については、図 3.4 より有意な放射能濃度データに対して廃液系の核種組成比が原子炉系やタービン系の核種組成比よりも高く Co-60 の放射能濃度との相関傾向が見られなかった。この理由の一つとして、廃棄物処理系統では原子炉系統またはタービン/ダンプコンデンサ系統から発生した放射性廃液を収集していたため、各系統の核種組成が混在している可能性があることが挙げられる。また、JPDR 施設の解体において行われた除染の影響によって放射性廃棄物への移行挙動が変動した可能性があることが考えられたが、本検討において除染の影響による放射性核種ごとの核種組成比の変動について評価することはできなかった。Tc-99 については、発電所廃棄物の放射能濃度評価手法において原子炉構成材料中の Mo-98 の熱中性子捕獲による生成が支配的であるとされている<sup>8)</sup> 一方で、U 及び Pu の核分裂反応によって生成される可能性もある。このため、FP 核種である Cs-137 の放射能濃度との関係についても確認した。この結果、図 3.5 に示すように Cs-137 の放射能濃度にも依存せず放射能濃度データが一定範囲に分布することが確認された。従って、Tc-99 の有意な放射能濃度データが Co-60 または Cs-137 の放射能濃度に依存せず一定範囲に分布することを考慮し、Tc-99 に対しては取得した放射能濃度データに基づいて平均放射能濃度法の適用性検討を行う。

H-3、C-14 については、図 3.7 から図 3.10 より Co-60 または Cs-137 の放射能濃度に依存せず放射能濃度データが一定範囲に分布することが確認されたため、平均放射能濃度法の適用性検討を行う。

Eu-152 について、取得した有意な放射能濃度データは、放射能の検出率を向上させるために放射化学分析において化学分離を行った上で測定した結果であり<sup>5)</sup>、化学分離を行わないで測

定した他の分析用試料における検出限界値データの値の方が高い結果となった。Eu-152 については、既存の報告書<sup>9)</sup>における放射化・燃焼計算結果においても生成比率が低い放射性核種であり放射能の検出率は低い。発電所廃棄体の放射能濃度確認においても、もともと生成量が少ないと考えられ有意な放射能が検出できなかった放射性核種に対し、検出限界値データに対する平均値、または有意な放射能濃度データと検出限界値に対する平均値を平均放射能濃度とする平均放射能濃度法を適用している<sup>10)</sup>。従って、Eu-152 に対しては有意な放射能濃度データと検出限界値データに対する平均値による平均放射能濃度法の適用性検討を行う。

Cl-36、Mo-93、Eu-154、Ho-166m、全 $\alpha$ については、Eu-152 と同様に、既存の報告書<sup>9)</sup>における放射化・燃焼計算結果においても生成比率が低い放射性核種であるため、放射能の検出率は低く、いずれも放射化学分析において有意な放射能濃度データを取得できなかった<sup>4,5,6)</sup>。このため、これらの評価対象核種に対しては検出限界値データの平均値による平均放射能濃度法の適用性検討を行う。

### 3.3 SF 法の適用性検討

#### 3.3.1 放射能濃度データの分布の確認

SF 法の適用が考えられる Ni-63、Nb-94 及び Co-60 の有意な放射能濃度データに基づき、個々の放射能濃度データの分布、並びに Ni-63 及び Nb-94 と Co-60 との核種組成比の分布に対する正規性または対数正規性の確認を行った。すなわち、これまでに取得した放射能濃度データに基づき、正規確率紙及び対数正規確率紙によるプロットから正規性または対数正規性を確認した。正規確率紙及び対数正規確率紙によるプロットの結果を図 3.17 から図 3.20 に示す。

この結果、図 3.17 及び図 3.18 に示すように、Ni-63 及び Co-60 の放射能濃度データ、並びに Ni-63 と Co-60 との核種組成比いずれも対数正規確率紙のプロットが線形性を示しており、対数正規分布であることが確認された。また、有意な放射能濃度データが少数ではあったが、Nb-94 についても図 3.19 及び図 3.20 に示すように対数正規確率紙のプロットが線形性を示しており、対数正規分布であることが確認された。なお、図中において核種組成比は Ni-63/Co-60 または Nb-94/Co-60 と示した。このことに基づき、Ni-63、Nb-94 及び Co-60 の放射能濃度データが対数正規分布に従うこととして以下の検討を進めていく。

#### 3.3.2 相関関係の成立性の確認

Ni-63、Nb-94 の有意な放射能濃度データに対して図 3.1 及び図 3.2 より Co-60 との相関傾向が見られたこと、前項に示すように対数正規分布を示すことが確認されたことから、有意な放射能濃度データに対して危険率 1%において t 検定を実施した。この結果、評価対象核種と Key 核種との放射能濃度に相関関係が成立しないという仮説が危険率 1%で棄却され Ni-63 について放射能濃度データ全体に対して Co-60 と相関関係が成立すると判定した。

一方、Nb-94 について t 検定を実施したところ、評価対象核種と Key 核種との放射能濃度に相関関係が成立しないという仮説が危険率 1%で棄却されなかったことから相関関係は成立しないと判定した。この理由として、Nb-94 については取得した有意な放射能濃度データが 5 点であったため、統計的手法を用いるためにはデータ数が不足していることが考えられた。しかし、Nb-94 が Co-60 や Ni-63 と同じ CP 核種であること、Co-60 や Ni-63 と同様に不揮発性/不溶解性を示すため移行挙動も同様と考えられること、取得した放射能濃度データが 5 点であったものの相関係数が 0.73 と比較的高いことから、Nb-94 についても Ni-63 と同様に Co-60 との SF 法を適用する。表 3.1 に t 検定の判定結果を示す。

### 3.3.3 グループ分類の確認

Ni-63 については、放射能濃度データが比較的蓄積されているので、これまでに取得した有意な放射能濃度データに基づき、危険率 1%において F 検定を実施した。この結果、発生系統ごと及び汚染形態ごとのいずれのグループ分類も不要と判定されたため、現時点で取得している放射能濃度データから発生系統及び汚染形態を分類せずに共通的に SF を設定できると考えられる。一方、Nb-94 については、放射化学分析を実施した結果、有意な Nb-94 が検出されない場合が多く、有意な放射能濃度データの蓄積が進まなかったため F 検定は実施しなかった。表 3.2 にグループ分類の必要性について示す。

### 3.3.4 放射化廃棄物の影響の確認

本検討の対象である JPDR 保管廃棄物のうち 200 リットルドラム缶に収納された系統配管・弁等の金属廃棄物は、汚染廃棄物と放射化廃棄物とが混在して収納されている可能性がある。廃棄体の放射能濃度確認において廃棄体外部から非破壊で Co-60 を測定する際に、汚染廃棄物に由来する放射能か放射化廃棄物に由来する放射能か区別して定量することは不可能である。そこで、生成機構が放射化であり Co-60 を Key 核種とする SF 法の適用を検討している Ni-63 及び Nb-94 に対して、2.3 項に示したように放射化計算によって算出した放射化廃棄物の核種組成比  $R_a$  と、放射化学分析によって取得した放射能濃度データに基づき算出した汚染廃棄物の核種組成比  $R_c$  を比較し、放射化の影響を評価した。

放射化廃棄物の核種組成比  $R_a$  については、既存の報告書<sup>9)</sup>において、JPDR の炉内構造物のうちトレンチ処分及びピット処分対象となる炉内構造物を区分し、当該放射性廃棄物に対し計算コード ORIGEN-2 を用いて放射化計算を行っており、この放射化計算結果を用いた。汚染廃棄物の核種組成比  $R_c$  については、これまでに取得した有意な放射能濃度データに基づき 2.2.1 項の式 (3) により算出した。表 3.3 に放射化廃棄物の核種組成比  $R_a$  及び汚染廃棄物の核種組成比  $R_c$  並びにこれらの核種組成比の比  $R_a/R_c$  を比較した結果を示す。

この結果、Ni-63 については、トレンチ処分及びピット処分対象となる放射化廃棄物の核種組成比  $R_a$  と汚染廃棄物の核種組成比  $R_c$  の比  $R_a/R_c$  がいずれも 1 より小さいことが確認された。このことから汚染の影響が大きいと判断し、放射化学分析によって取得した放射能濃度データ<sup>3,4,5)</sup>に基づき算出した汚染廃棄物の核種組成比  $R_c$  を SF とする。汚染廃棄物の核種組成比  $R_c$  を SF として用いて放射能濃度を評価することは、放射化計算による放射化廃棄物の核種組成比  $R_a$  を用いるよりも放射能濃度評価上保守的な評価となる。

一方、Nb-94 についてもトレンチ処分及びピット処分対象となる放射化廃棄物の核種組成比  $R_a$  と汚染廃棄物の核種組成比  $R_c$  の比  $R_a/R_c$  がいずれも 1 より小さいことが確認された。このことから、Ni-63 と同様に放射能濃度評価上保守的な評価となる汚染廃棄物の核種組成比  $R_c$  を SF とする。

なお、表 3.3 において、放射化計算によるトレンチ処分対象の放射化廃棄物の核種組成比  $R_a$  とピット処分対象の放射化廃棄物の核種組成比  $R_a$  の傾向が Ni-63 と Nb-94 とで異なる理由は、埋設処分対象となる放射化廃棄物の材料が異なるため、放射化計算に用いた元素組成が異なることによる。

### 3.4 平均放射能濃度法の適用性検討

本検討における分析用試料の採取対象は、JPDR 保管廃棄物のうち 200 リットルドラム缶に収納され、これまでに分別処理作業によって処理不適物を分別除去された汚染金属廃棄物であり、その本数は約 2,250 本であった。図 3.21 にこれまでの汚染金属廃棄物の分別処理の状況及び分析用試料の採取状況を示すが、分析用試料は分別処理を行った汚染金属廃棄物から網羅的に採取されていることが確認された。また、分析用試料は、発生系統を網羅的かつ 200 リットルドラム缶に収納された汚染金属廃棄物の中でも汚染のレベルが高い放射性廃棄物から採取されたものである<sup>2)</sup>。従って、これらの分析用試料を分析し取得した放射能濃度データは、汚染金属廃棄物全体約 7,200 本を代表し、かつ当該放射能濃度データに基づく放射能濃度評価は保守的な結果となる。なお、図 3.21 中において 200 リットルドラム缶に収納された汚染金属廃棄物を保管体と表記しその本数を示した。また、分析用試料は分別した汚染金属廃棄物から採取しており、図中の凡例における分別した保管体及び試料採取した保管体の合計がこれまで分別された汚染金属廃棄物約 2,250 本となる。

H-3、C-14 については、これまでに比較的多く放射能濃度データの蓄積が進んでいることから、これまでに取得した有意な放射能濃度データに対する平均値を平均放射能濃度とする。ここで、H-3 の放射能濃度は廃棄物の含水率に依存することから、発電所廃棄体の放射能濃度確認においては含水率の高い廃棄物の放射能濃度データに基づく保守的な平均放射能濃度法を適用している<sup>7,8)</sup>。本検討は含水率が低い金属廃棄物の放射能濃度データに基づく評価であるが、放射能濃度評価の対象を汚染金属廃棄物に限定していること、分別処理作業において放射性廃

棄物は作業マニュアルに従い材質等を考慮した仕分け後にドラム缶に収納されており<sup>13)</sup>、金属以外の放射性廃棄物が適切に除去されていることから、H-3 に対し汚染金属廃棄物の放射能濃度データに基づく平均放射能濃度法を適用することは妥当である。

Sr-90、Tc-99 については、200 リットルドラム缶に収納された汚染金属廃棄物の中でも汚染のレベルが高い放射性廃棄物の放射化学分析の結果であったにも関わらず有意な放射能が検出されない場合が多かった。3.2 項で検討を行ったように、JPDR 保管廃棄物全体で考察してもこれらの放射性核種による汚染の度合いが小さく、取得した放射能濃度データについては Co-60 または Cs-137 の放射能濃度に依存せず一定範囲に分布していることを考慮し、Sr-90、Tc-99 に対しては、取得した有意な放射能濃度データに基づいて平均放射能濃度法を適用する。

Cl-36、Mo-93、Eu-152、Eu-154、Ho-166m、全  $\alpha$  については、既存の報告書<sup>9)</sup>における放射化・燃焼計算結果においても生成比率が低い放射性核種であり、Eu-152 を除き放射化学分析においても有意な放射能が検出されなかった。Eu-152 については、取得した有意な放射能濃度データは、検出率を向上させるために放射化学分析において化学分離を行った上で放射能を測定した結果であり<sup>5)</sup>、化学分離を行わないで測定した他の分析用試料における検出限界値データの値の方が高い結果となっている。発電所廃棄体の放射能濃度確認において、もともと生成量が少ないと考えられ有意な放射能が検出できなかった放射性核種に対し、検出限界値データに対する平均値、または有意な放射能濃度データと検出限界値に対する平均値を平均放射能濃度とする平均放射能濃度法を適用している<sup>10)</sup> ことから、これらの評価対象核種に対しても平均放射能濃度法を適用する。

### 3.4.1 平均放射能濃度の算出

H-3、C-14、Sr-90、Tc-99 については取得した有意な放射能濃度データに基づき、2.2.2 項の式(7)により平均放射能濃度を算出した。Cl-36、Mo-93、Eu-152、Eu-154、Ho-166m、全  $\alpha$  については、検出限界値データに対する平均値、または有意な放射能濃度データと検出限界値に対する平均値を 2.2.2 項の式(7)により算出し平均放射能濃度とした。表 3.4 に算出した平均放射能濃度を示す。

本検討における分析用試料及び放射化学分析によって取得した放射能濃度データは、JPDR 保管廃棄物の汚染金属廃棄物全体約 7,200 本を代表するものであり、本検討において算出した平均放射能濃度は汚染金属廃棄物全体に適用できると考えられる。ただし、発電所廃棄体の放射能濃度確認において、算出した平均放射能濃度が継続的に適用できることを確認しているように<sup>7,8)</sup>、これまでに分別されていない JPDR 保管廃棄物の汚染金属廃棄物約 5,000 本に対しても、分別処理作業に合わせて確認分析を実施し、算出した平均放射能濃度が継続的に使用できることについて確認する必要がある。

### 3.4.2 最大放射能濃度に対する裕度の確認

2.2.2 項に示したように、研究施設等廃棄物の埋設処分可能な放射性核種の種類及びその最大放射能濃度は、埋設処分場の立地場所が選定され廃棄物埋設事業許可申請の安全審査を経て許可される。このため本検討では、2.2.2 項に示したように旧原子力安全委員会の報告書<sup>11)</sup>で試算されたトレンチ処分における基準線量である  $10\mu\text{Sv/y}$  に相当する濃度（以下「基準線量相当濃度試算値」という。）に対して、前項で算出した平均放射能濃度がどの程度の裕度が見込まれるか評価した。

この結果、表 3.4 に示すように平均放射能濃度法の適用性検討を行うこととした H-3、C-14、Cl-36、Sr-90、Mo-93、Tc-99、Eu-152、Eu-154、Ho-166m、全  $\alpha$  について、平均放射能濃度がトレンチ処分における基準線量相当濃度試算値を上回る評価対象核種はなかった。基準線量相当濃度試算値に対する平均放射能濃度の裕度について、もっとも裕度のない Sr-90 で  $1.0 \times 10^1$  という結果であった。なお、旧原子力安全委員会の報告書<sup>11)</sup>において、トレンチ処分及びピット処分における放射能濃度上限値の推奨値が「埋設による最終的な処分が可能な低レベル放射性廃棄物の範囲を処分の方法別に明確化することを意図して定められるものであり、埋設事業の許可申請を行うことができる低レベル放射性廃棄物中の放射性核種濃度の最大値」として示されているが、この値は基準線量相当濃度を対数的に丸めた値に最大値見込係数として 10 ないし 100 を乗じた値とされている。ここで、トレンチ処分における Sr-90 の放射能濃度上限値の推奨値は  $1.0 \times 10^1$  (Bq/g) とされており<sup>11)</sup>、この値に対する裕度は  $2.4 \times 10^2$  という結果であった。

また、取得した放射能濃度データのうち最大となる放射能濃度と基準線量相当濃度試算値との裕度について確認したところ、Sr-90 について、平均放射能濃度はトレンチ処分における基準線量相当濃度試算値を超えなかったものの、この放射能濃度がトレンチ処分における基準線量相当濃度試算値を超えることが確認された。ただし、この放射能濃度は検出限界値であり、真の値はこの値を下回ると考えられることから、今後平均放射能濃度を確定するまでに検出限界値の改善をはかる必要がある。一方、Cl-36、Mo-93、Eu-152、Eu-154、Ho-166m、全  $\alpha$  のように、検出限界値データに対する平均値、または有意な放射能濃度データと検出限界値に対する平均値を平均放射能濃度とする場合、保守的に放射能濃度を評価することになるため、埋設処分場に受け入れることができる廃棄体の総放射エネルギーを逼迫させることになる。このため、これらの評価対象核種についても今後より検出限界値を改善し、適切に平均放射能濃度を確定する必要があると考えられる。

なお、廃棄物埋設事業許可申請の安全審査の中で、埋設処分可能な放射性核種の種類及びその最大放射能濃度が決定されるので、いずれの評価対象核種についても最大放射能濃度に対する裕度については改めて評価し、平均放射能濃度を確定する必要がある。また、本検討において平均放射能濃度法を適用する評価対象核種については、今後の JPDR 保管廃棄物の分別処理作業に合わせて確認分析を実施し、この結果も含め平均放射能濃度を確定する必要がある。

参考として、ピット処分における基準線量相当濃度試算値との裕度についても確認を行なった結果、平均放射能濃度法の適用性検討を行うこととした H-3、C-14、Cl-36、Sr-90、Mo-93、Tc-99、Eu-152、Eu-154、Ho-166m、全  $\alpha$  について、ピット処分の基準線量相当濃度試算値に対し十分に裕度があることが確認された。表 3.5 にピット処分について結果を示す。

### 3.5 理論計算法の適用性検討

理論計算法は、評価対象核種と生成機構が同一であるとみなせる同位体が存在し、その組成比率が普遍的に一定である場合に適用できるとされている。Ni-59 は原子炉構成材料に使用されているステンレス鋼、インコネル等の中に存在する安定同位元素 Ni-58 の熱中性子捕獲によって生成し、その生成機構及び廃棄物への移行挙動は Ni-63 と同一である。このため、Ni-59 については、2.2.3 項の式 (8) に示した理論計算により Ni-59 と Ni-63 との核種組成比を算出した。

$$\begin{aligned} \frac{A_{Ni-59}}{A_{Ni-63}} &= \frac{N_{Ni-58} \times \sigma_{Ni-58} \times (\ln 2 / T_{Ni-59})}{N_{Ni-62} \times \sigma_{Ni-62} \times (\ln 2 / T_{Ni-63})} \\ &= \frac{6.8 \times 10^1 \times 4.6 \times \left( \frac{\ln 2}{7.5 \times 10^4} \right)}{3.7 \times 1.4 \times 10^1 \times \left( \frac{\ln 2}{1.0 \times 10^2} \right)} \\ &= 8.0 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

A : 放射能濃度 (Bq/g)

N : 天然存在比 (%)

$\sigma$  : 熱中性子断面積 (barn)

T : 半減期 (年)

表 3.6 に計算に用いたパラメータ<sup>14)</sup>として Ni-58 と Ni-62 の天然存在比 N 及び熱中性子断面積  $\sigma$  並びに Ni-59 と Ni-63 の半減期 T について示す。

#### 4. まとめ

本検討においては、研究施設等廃棄物の埋設処分に向けた取り組みの一環として、原子炉施設から発生した放射性廃棄物に対する放射能濃度評価方法の構築に向け、JPDR 保管廃棄物のうち汚染金属廃棄物を対象とした SF 法等の適用性検討を行った。

すでに検討を進めていた H-3、C-14、Ni-63、Sr-90 については、新たに取得した放射能濃度データを追加して SF 法等の適用性検討を行った。この結果、Ni-63 について相関図及び t 検定により Co-60 との相関関係が成立することが確認されたため、Co-60 を Key 核種とする SF 法を適用する。H-3、C-14、Sr-90 については、有意な放射能濃度データが Co-60 または Cs-137 の放射能濃度に依存せず一定範囲に分布することが確認されたため、平均放射能濃度法を適用することとする。また、新たに放射化学分析を実施し放射能濃度データを取得した Cl-36、Mo-93、Nb-94、Tc-99、Eu-152、Eu-154、Ho-166m、全  $\alpha$  について、これまでの検討で得られた知見から SF 法等の適用性検討を行った。この結果、Nb-94 について有意な放射能濃度データが少数ではあったが、相関図から相関傾向が見られたこと、Co-60 や Ni-63 と同じ CP 核種で不揮発性/不溶解性を示すため移行挙動も同様と考えられること等から Ni-63 と同様に Co-60 との SF 法を適用する。Cl-36、Mo-93、Tc-99、Eu-152、Eu-154、Ho-166m、全  $\alpha$  については、放射化・燃焼計算結果においても生成比率が低い放射性核種であり、放射化学分析においても有意な放射能の検出が困難であった。このため検出限界値データに対する平均値を用いる平均放射能濃度法を適用する。

Ni-59 については、評価対象核種と生成機構が同一であるとみなせる同位体である Ni-63 が存在し、その組成比率は普遍的に一定であるため、理論計算法を適用する。Co-60、Cs-137 及び Ag-108m は比較的測定が容易なエネルギーの  $\gamma$  線を放出する核種であることから、廃棄体外部から非破壊測定が可能と考えられるため、非破壊外部測定法を適用する。

本検討における分析用試料及び放射化学分析によって取得した放射能濃度データは、JPDR 保管廃棄物の汚染金属廃棄物全体約 7,200 本を代表するものであり、表 4.1 に示す放射能濃度評価方法は汚染金属廃棄物全体約 7,200 本に適用できると考えられる。ただし、これまでに分別されていない汚染金属廃棄物の分別処理作業に合わせて確認分析を実施し、本検討において算出した SF や平均放射能濃度の継続使用について確認する必要がある。また、廃棄体の放射能濃度確認に向け、放射化学分析における検出限界値の改善、検出限界値データに基づき算出された平均放射能濃度の取り扱い並びに Co-60、Cs-137 及び Ag-108m に対する非破壊外部測定法の適用性について検討を行う必要がある。

本検討で得られた放射能濃度評価方法適用の考え方や適用手順、放射能濃度データの取り扱い等の知見は、原子力機構の他の試験研究炉の放射能濃度評価にも適用できる。また、今後は原子炉施設以外の研究施設から発生する放射性廃棄物に対する放射能濃度評価方法の検討を行っていく。



## 謝 辞

本報告書を執筆するにあたり、JPDR 保管廃棄物から分析用試料を採取していただいたバックエンド技術部高減容処理技術課の石原 圭輔氏、分析を実施していただいたバックエンド技術部放射性廃棄物管理技術課の星 亜紀子氏、渡辺 幸一氏、田中 究氏、安田 麻里氏、島田 亜佐子氏、大森 弘幸氏、根橋 宏治氏に感謝いたします。また、本報告書をまとめるにあたり、大変貴重なご意見をいただいた廃棄物対策・埋設事業統括部の高橋 邦明次長に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 原子力規制庁, 廃棄物確認に関する運用要領 (平成 26 年 3 月), 2014.
- 2) 辻 智之, 亀尾 裕, 坂井 章浩他, JPDR 保管廃棄物に対する放射能濃度評価方法の検討 (1), JAEA-Technology 2012-045, 2013, 37p.
- 3) 星 亜紀子, 辻 智之, 田中 究他, JPDR 保管廃棄物試料に対する放射化学分析, JAEA-Data/Code 2011-011, 2011, 31p.
- 4) 田中 究, 安田 麻里, 渡辺 幸一他, JPDR 保管廃棄物試料に対する放射化学分析 (2), JAEA-Data/Code 2013-008, 2013, 16p.
- 5) 安田 麻里, 田中 究, 渡辺 幸一他, JPDR 保管廃棄物試料に対する放射化学分析 (3), JAEA-Data/Code 2014-011, 2014, 59p.
- 6) 大森 弘幸, 根橋 宏治, 島田 亜佐子他, JPDR 保管廃棄物試料に対する放射化学分析 (4), JAEA-Data/Code 2014-029, 2015, 31p.
- 7) 原子力安全基盤機構 規格基準部, 平成 10 年度以降に発生する充填固化体に対するスケーリングファクタ等の継続使用について, JNES-SS-0403, 2005.
- 8) 日本原子力学会, 日本原子力学会標準 ピット処分及びトレンチ処分対象廃棄物の放射能濃度決定に関する基本手順 : 2011, AESJ-SC-F022 : 2011, 2012.
- 9) 坂井 章浩, 天澤 弘也, 仲田 久和他, 研究施設等廃棄物の埋設処分における安全評価上重要核種の選定(その 3) -RI・研究所等廃棄物に係る主要放射性廃棄物の発生施設毎の重要核種の予備評価-, JAEA-Technology 2010-021, 2010, 152p.
- 10) 原子力安全基盤機構 規格基準部, 日本原子力発電(株)東海発電所の充填固化体に係る廃棄物確認方法について, JNES-SS-0613, 2006.
- 11) 原子力安全委員会, 低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について (平成 19 年 5 月 21 日), 2007.
- 12) 日本原子力研究所 バックエンド技術部, 原子炉解体技術開発成果報告書 -JPDR の解体と技術開発-, JAERI-Tech 97-001, 1997, 87p.
- 13) 東海研究開発センター原子力科学研究所バックエンド技術部, バックエンド技術部年報 (2010 年度), JAEA-Review 2013-029, 2013, 105p.
- 14) 村上 悠紀雄, 團野 皓文, 小林 昌敏, 放射線データブック, 地人書館, 1982.

表 2.1 JPDR における系統分類の考え方<sup>2)</sup>

系統分類	考えられる汚染源	系統分類の考え方
原子炉系統	原子炉冷却水	核種の発生源であり、核種組成を決定する基本条件である。
タービン /ダンプコンデンサ 系統	主蒸気/復水	原子炉水から主蒸気への移行時に、揮発性核種/不揮発性核種の違いによって核種組成の変動を生じる可能性がある。
廃棄物処理系統	廃液	各系統から発生した放射性廃液（床排水、機器ドレン排水等）を収集していた。特に濃縮・蒸発等、核種組成の変動に影響を及ぼす操作は行われなかったが、各系統の核種組成が混在している可能性がある。
	廃ガス	タービン/ダンプコンデンサ系統から発生した非凝縮性ガスからヨウ素等の放射性核種を除去していたため、核種組成の変動を生じる可能性がある。
建家換気系統	ダスト	原子炉格納容器、タービン/ダンプコンデンサ建家、廃棄物処理建家等、各建家の給排気を行っていた。プレフィルタ、高性能フィルタを通して最後にスタックから大気中に気体廃棄物（ダスト）を放出していた。

表 3.1 相関傾向の確認結果

核種*1		データ数 (検出数/分析数)	相関図*2	t 検定*3	相関係数
Ni-63	Co-60	29/31	○	○	0.95
Nb-94		5/65	○	×	0.73
Ag-108m*4		12/65	×	—	—
Eu-152		4/65	×	—	—
Sr-90	Cs-137	8/36	×	—	—
H-3	Co-60	37/56	×	—	—
C-14		24/56	×	—	—
Tc-99	Cs-137	9/20	×	—	—

- \*1 取得した有意な放射能濃度データに基づく相関傾向の確認結果。Cl-36、Mo-93、Eu-154、Ho-166m、全 $\alpha$ については、いずれも有意な放射能が検出されず放射能濃度データが得られなかった。
- \*2 相関図から、○：相関傾向が見られた、×：相関傾向が見られなかった。
- \*3 取得した有意な放射能濃度データに基づく t 検定による判定結果。○：相関関係が成立、×：相関関係が不成立、—：未実施。
- \*4 Ag-108m については、比較的測定が容易なエネルギーの $\gamma$ 線を放出する核種であることから、Co-60 及び Cs-137 と同様に非破壊外部測定法を適用する。

表 3.2 グループ分類の必要性の確認結果

核種	分類*1	データ数*2	分類数	分散比 $F_s$	F 値	判定*3	備考
Ni-63	発生系統	28	3	2.2	5.6	分類不要	
	汚染形態	28	2	0.4	7.7	分類不要	
Nb-94	発生系統	5	2	—	—	—	有意データが少数のため F 検定は未実施
	汚染形態	5	1	—	—	—	

- \*1 発生系統は表 2.1 に示す系統分類の考え方に基づく。ただし、廃棄物処理系統のうち廃ガス処理系統及び建家換気系統はいずれも有意なデータが取得できなかったため、これらの系統を除いて評価を実施。汚染形態は、直接汚染、間接汚染に分類。
- \*2 Ni-63 及び Nb-94 と Co-60 との放射能濃度データに基づき F 検定を実施したため、いずれの核種も検出されたデータ数。
- \*3 取得した有意な放射能濃度データに基づき危険率 1%において F 検定を実施した結果、分散比  $F_s$  が F 値に対して  $F_s < F$  となるため、グループ分類間に有意な差があるとは言えないことから分類不要と判定。

表 3.3 放射化廃棄物の核種組成比  $R_a$  及び汚染廃棄物の核種組成比  $R_c$ 

核種	放射化廃棄物の核種組成比 $R_a$ *1		汚染廃棄物の核種組成比 $R_c$ *2	核種組成比の比 $R_a/R_c$	
	トレンチ処分	ピット処分		トレンチ処分	ピット処分
Ni-63	$1.6 \times 10^{-2}$	$6.2 \times 10^{-2}$	$1.5 \times 10^{-1}$	$1.1 \times 10^{-1}$	$4.2 \times 10^{-1}$
Nb-94	$5.6 \times 10^{-6}$	$1.8 \times 10^{-6}$	$6.7 \times 10^{-6}$	$8.4 \times 10^{-1}$	$2.7 \times 10^{-1}$

- \*1 既存の報告書<sup>9)</sup>の表 5.3.7 に示された放射化計算による放射化廃棄物の Co-60 に対する核種組成比。JPDR の運転停止日である昭和 51 年 3 月 18 日にさかのぼって減衰補正した。
- \*2 これまでに取得した有意な放射能濃度データに基づき 2.2.1 項の式 (3) により算出した Co-60 に対する核種組成比。

表 3.4 平均放射能濃度と基準線量相当濃度試算値に対する裕度（トレンチ処分）

核種	データ数 (検出数/分析数)	平均放射能 濃度*1 (Bq/g)	最大放射能 濃度*2 (Bq/g)	トレンチ処分		
				基準線量相当 濃度*3 (Bq/g)	平均放射能 濃度との裕度	最大放射能 濃度との裕度
H-3	37/56	$5.4 \times 10^{-2}$	$6 \times 10^{-1}$	$5.3 \times 10^2$	$9.7 \times 10^3$	$9.1 \times 10^2$
C-14	24/56	$1.1 \times 10^{-1}$	$1.7 \times 10^0$	$2.2 \times 10^1$	$1.9 \times 10^2$	$1.2 \times 10^1$
Cl-36	0/17	$5.6 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^0$	$2.5 \times 10^2$	$1.2 \times 10^2$
Sr-90	8/36	$4.1 \times 10^{-2}$	$7 \times 10^{-1}$	$4.2 \times 10^{-1}$	$1.0 \times 10^1$	$6.9 \times 10^{-1}$
Mo-93	0/16	$1.2 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^1$	$9.5 \times 10^2$	$7.9 \times 10^2$
Tc-99	9/20	$3.5 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{-1}$	$1.1 \times 10^0$	$3.1 \times 10^1$	$1.0 \times 10^1$
Eu-152	4/65	$1.0 \times 10^0$	$5 \times 10^0$	$3.2 \times 10^1$	$3.0 \times 10^1$	$6.5 \times 10^0$
Eu-154	0/65	$1.8 \times 10^0$	$9 \times 10^0$	$1.2 \times 10^2$	$6.5 \times 10^1$	$1.4 \times 10^1$
Ho-166m	0/65	$1.0 \times 10^{-1}$	$5 \times 10^{-1}$	$1.5 \times 10^0$	$1.5 \times 10^1$	$3.5 \times 10^0$
全 $\alpha$	0/56	$6.9 \times 10^{-1}$	$7 \times 10^0$	$2.0 \times 10^1$	$2.9 \times 10^1$	$3.2 \times 10^0$

\*1 取得した放射能濃度データ<sup>3,4,5,6)</sup>の算術平均値。ただし、Eu-152は有意な放射能濃度データ及び検出限界値データに対する平均値、Cl-36、Eu-154、Ho-166m、全 $\alpha$ については検出限界値データに対する平均値。

\*2 取得した放射能濃度データ<sup>3,4,5,6)</sup>のうち最大となる値。ただし、H-3、Cl-36、Sr-90、Mo-93、Eu-152、Eu-154、Ho-166m、全 $\alpha$ については検出限界値が最大値であった。

\*3 原子力安全委員会の報告書<sup>1)</sup>で試算されたトレンチ処分における基準線量相当濃度。ただし、全 $\alpha$ については、U-234、U-238、Pu-239、Pu-240、Am-241のうち、放射能に対する寄与率の大きいPu-239の基準線量相当濃度試算値とする。

表 3.5 平均放射能濃度と基準線量相当濃度試算値に対する裕度（ピット処分）

核種	データ数 (検出数/分析数)	平均放射能 濃度*1 (Bq/g)	最大放射能 濃度*2 (Bq/g)	ピット処分		
				基準線量相当 濃度*3 (Bq/g)	平均放射能 濃度との裕度	最大放射能 濃度との裕度
H-3	37/56	$5.4 \times 10^{-2}$	$6 \times 10^{-1}$	$2.8 \times 10^{10}$	$5.1 \times 10^{11}$	$4.8 \times 10^{10}$
C-14	24/56	$1.1 \times 10^{-1}$	$1.7 \times 10^0$	$2.8 \times 10^3$	$2.4 \times 10^4$	$1.6 \times 10^3$
Cl-36	0/17	$5.6 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-2}$	$3.4 \times 10^1$	$6.1 \times 10^3$	$3.0 \times 10^3$
Sr-90	8/36	$4.1 \times 10^{-2}$	$7 \times 10^{-1}$	$9.0 \times 10^4$	$2.2 \times 10^6$	$1.4 \times 10^5$
Mo-93	0/16	$1.2 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-2}$	$2.6 \times 10^2$	$2.2 \times 10^4$	$1.8 \times 10^4$
Tc-99	9/20	$3.5 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{-1}$	$2.4 \times 10^1$	$6.9 \times 10^2$	$2.1 \times 10^2$
Eu-152	4/65	$1.0 \times 10^0$	$5 \times 10^0$	$2.0 \times 10^7$	$1.9 \times 10^7$	$4.0 \times 10^6$
Eu-154	0/65	$1.8 \times 10^0$	$9 \times 10^0$	$1.6 \times 10^7$	$8.7 \times 10^6$	$1.8 \times 10^6$
Ho-166m	0/65	$1.0 \times 10^{-1}$	$5 \times 10^{-1}$	$6.2 \times 10^2$	$6.1 \times 10^3$	$1.4 \times 10^3$
全 $\alpha$	0/56	$6.9 \times 10^{-1}$	$7 \times 10^0$	$6.3 \times 10^2$	$9.1 \times 10^2$	$1.0 \times 10^2$

\*1 取得した放射能濃度データ<sup>3,4,5,6)</sup>の算術平均値。ただし、Eu-152は有意な放射能濃度データ及び検出限界値データに対する平均値、Cl-36、Eu-154、Ho-166m、全 $\alpha$ については検出限界値データに対する平均値。

\*2 取得した放射能濃度データ<sup>3,4,5,6)</sup>のうち最大となる値。ただし、H-3、Cl-36、Sr-90、Mo-93、Eu-152、Eu-154、Ho-166m、全 $\alpha$ については検出限界値が最大値であった。

\*3 原子力安全委員会の報告書<sup>1)</sup>で試算されたピット処分における基準線量相当濃度。ただし、全 $\alpha$ については、U-234、U-238、Pu-239、Pu-240、Am-241のうち、放射能に対する寄与率の大きいPu-239の基準線量相当濃度試算値とする。

表 3.6 理論計算による Ni-59 の Ni-63 に対する核種組成比

起源元素	計算パラメータ <sup>14)</sup>			核種組成比 (Ni-59/Ni-63)
	天然存在比 N (%)	熱中性子 断面積 $\sigma$ (barn)	半減期 (年)	
Ni-58	$6.8 \times 10^1$	4.6	$7.5 \times 10^4$	$8.0 \times 10^{-3}$
Ni-62	3.7	$1.4 \times 10^1$	$1.0 \times 10^2$	

表 4.1 JPDR 保管廃棄物に対する放射能濃度評価方法のまとめ

評価対象核種	評価方法	評価対象核種	評価方法
H-3	平均放射能濃度法 <sup>*1,3</sup>	Nb-94	スケーリングファクタ法
C-14	平均放射能濃度法 <sup>*1,3</sup>	Tc-99	平均放射能濃度法 <sup>*1,3</sup>
Cl-36	平均放射能濃度法 <sup>*2,3</sup>	Ag-108m	非破壊外部測定法 <sup>*4</sup>
Ni-59	理論計算法	Cs-137	非破壊外部測定法
Co-60	非破壊外部測定法	Eu-152	平均放射能濃度法 <sup>*1,3</sup>
Ni-63	スケーリングファクタ法	Eu-154	平均放射能濃度法 <sup>*2,3</sup>
Sr-90	平均放射能濃度法 <sup>*1,3</sup>	Ho-166m	平均放射能濃度法 <sup>*2,3</sup>
Mo-93	平均放射能濃度法 <sup>*2,3</sup>	全 $\alpha$	平均放射能濃度法 <sup>*2,3</sup>

\*1 H-3、C-14、Sr-90、Tc-99、Eu-152 については、key 核種である Co-60 または Cs-137 の放射能濃度に依存せず放射能濃度データが一定範囲に分布することが確認されたため平均放射能濃度法を適用。

\*2 Cl-36、Mo-93、Eu-154、Ho-166m、全  $\alpha$  は、有意な放射能が検出されなかったため、検出限界値データに対する平均値を用いる平均放射能濃度法を適用。

\*3 今後の JPDR 保管廃棄物の分別処理作業に合わせて確認分析を実施する。

\*4 Ag-108m については、比較的測定が容易なエネルギーの  $\gamma$  線を放出する核種であることから、Co-60 及び Cs-137 と同様に非破壊外部測定法を適用する。



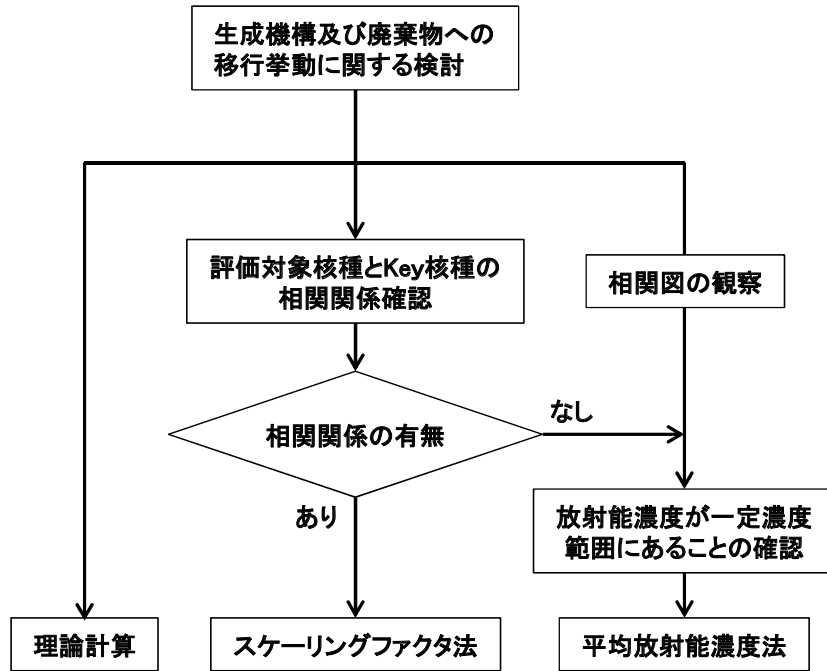


図 2.1 放射能濃度評価方法検討フロー<sup>2)</sup>

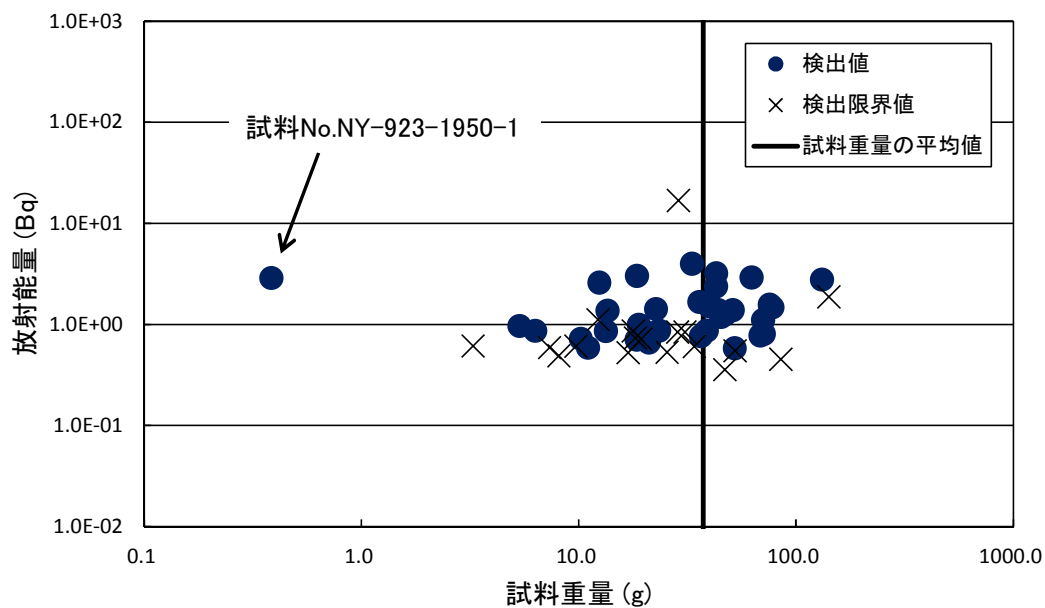


図 2.2 H-3 の放射エネルギーと分析用試料重量の関係  
(試料 No.NY-924-232-1 の分析については未実施。)

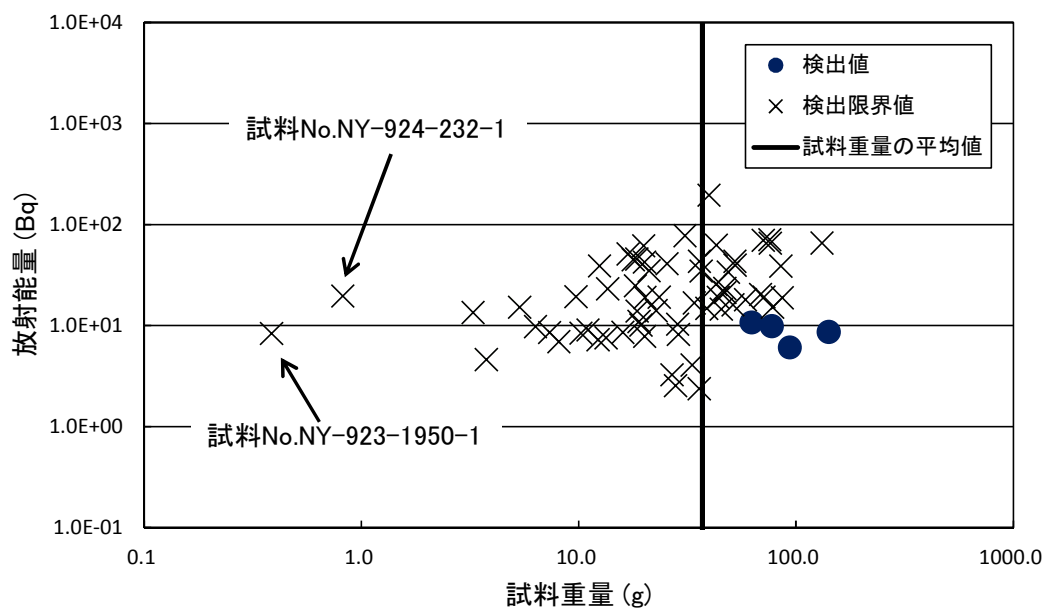


図 2.3 Eu-152 の放射エネルギーと分析用試料重量の関係

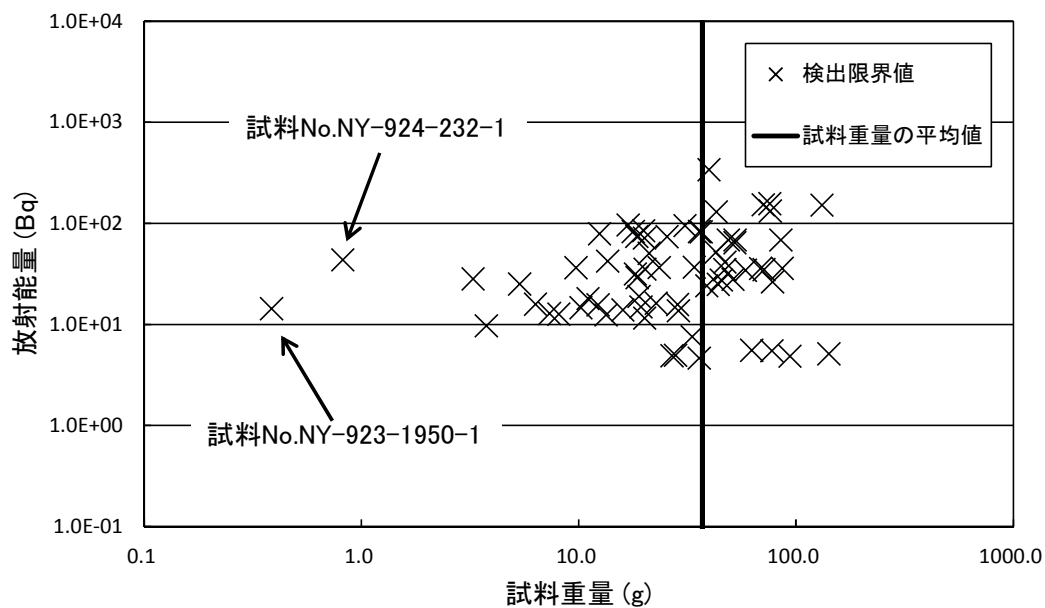


図 2.4 Eu-154 の放射能と分析用試料重量の関係

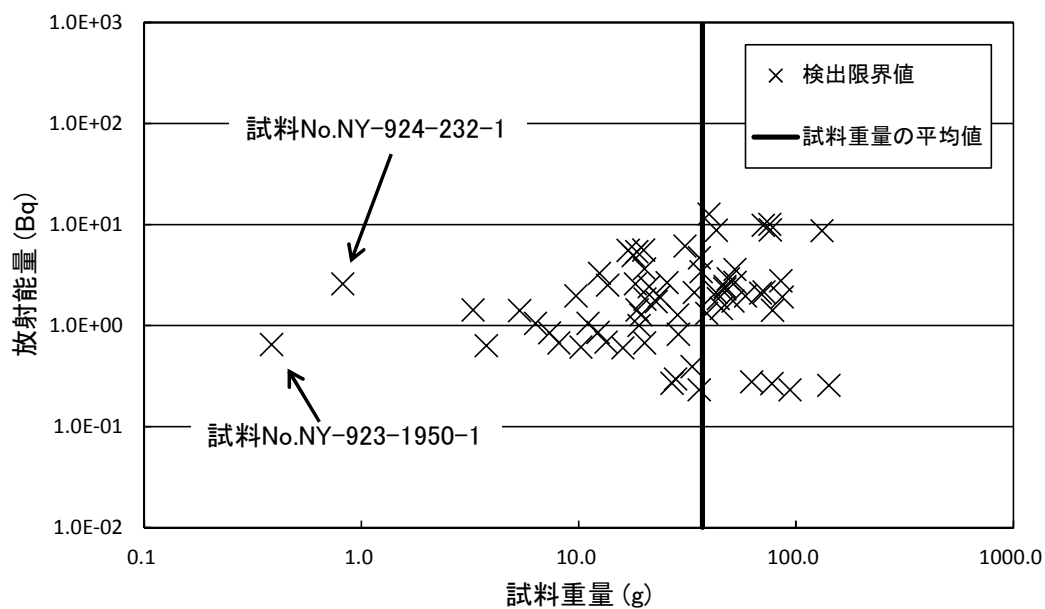


図 2.5 Ho-166m の放射能と分析用試料重量の関係

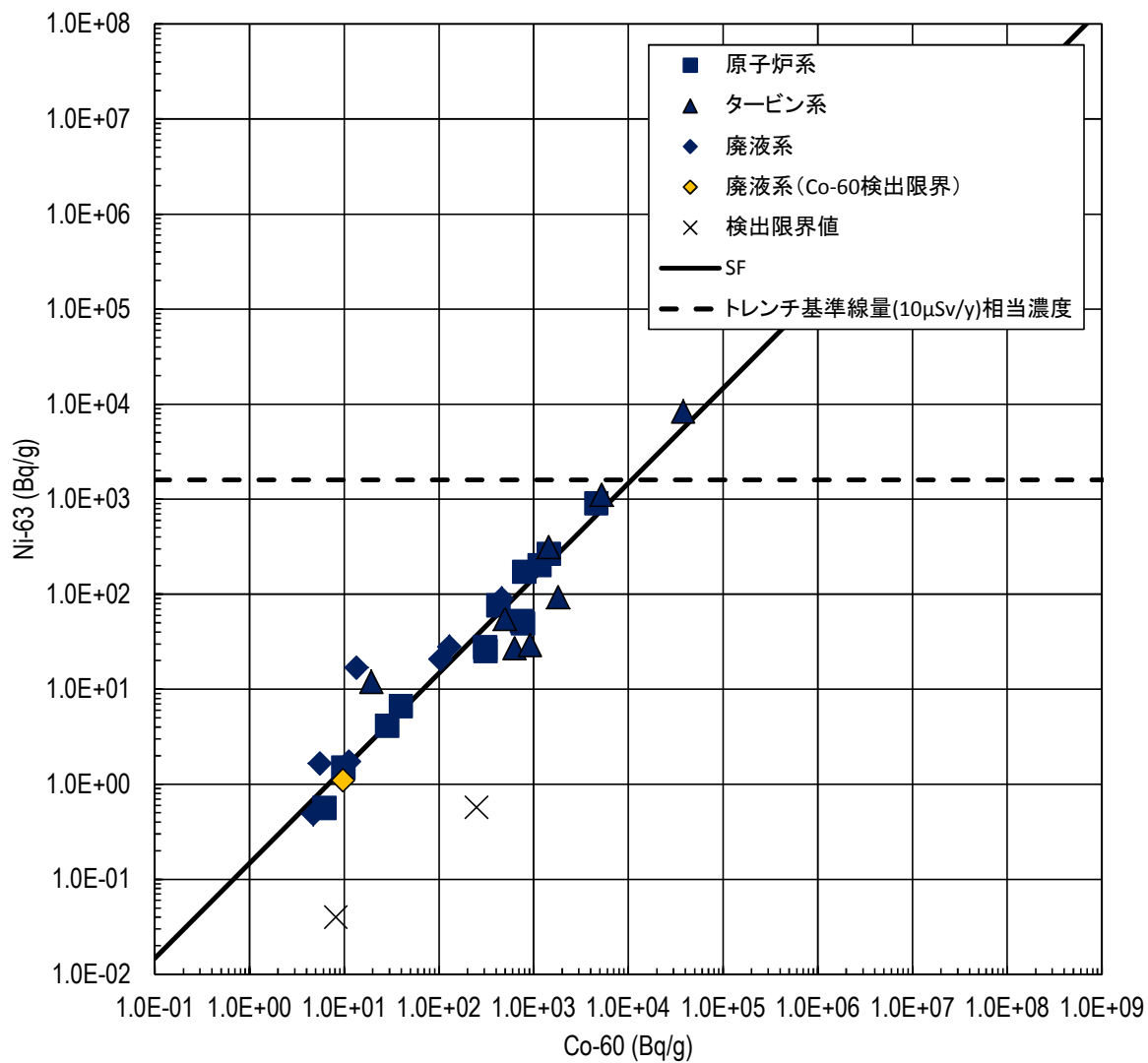


図 3.1 Ni-63 と Co-60 の放射能濃度  
 (図の放射能濃度データは JPDR の運転停止時である  
 1976 年 3 月 18 日に減衰補正している。)

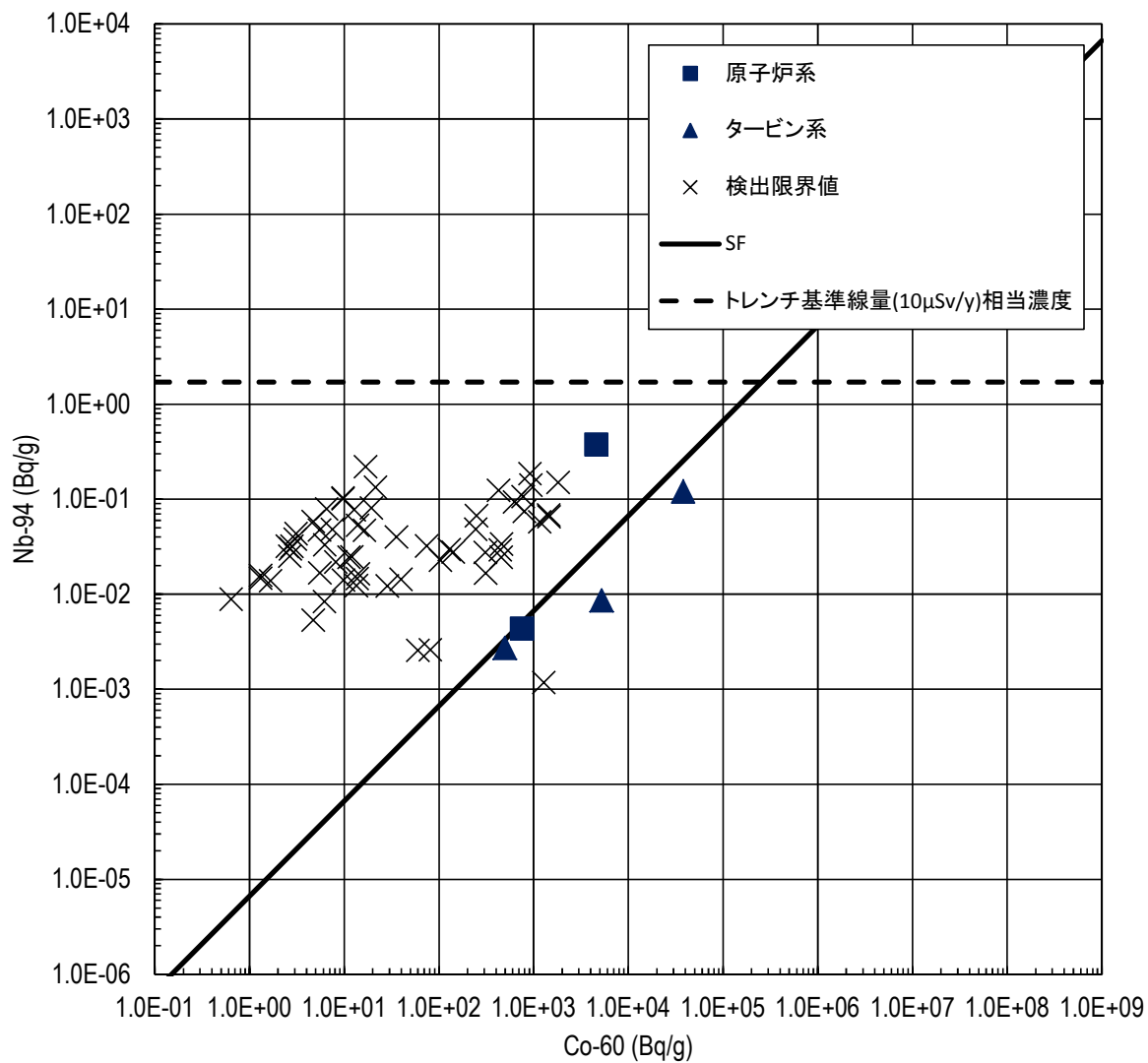


図 3.2 Nb-94 と Co-60 の放射能濃度  
 (図の放射能濃度データは JPDR の運転停止時である  
 1976 年 3 月 18 日に減衰補正している。)

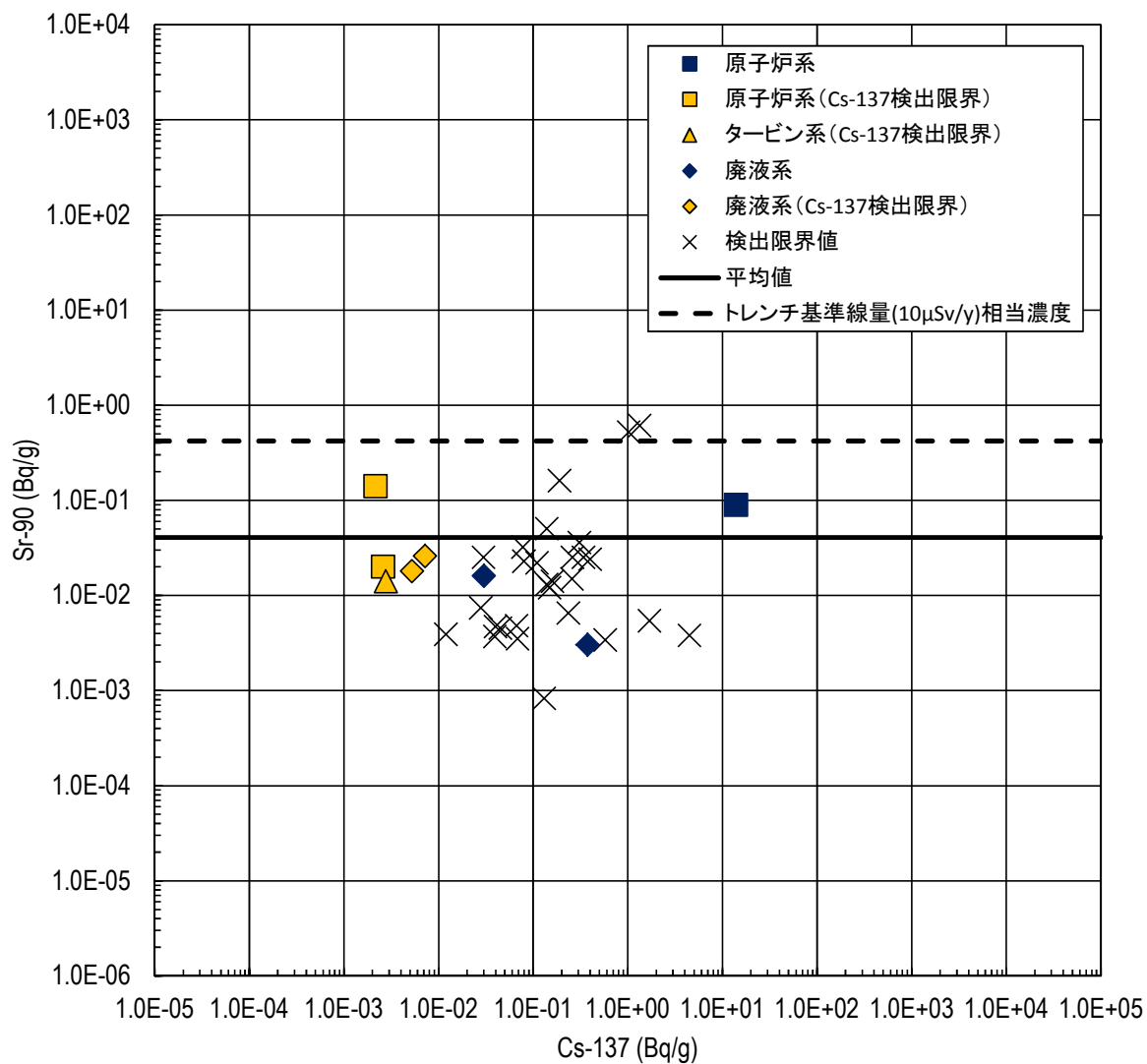


図 3.3 Sr-90 と Cs-137 の放射能濃度

(図の放射能濃度データは JPDR の運転停止時である

1976 年 3 月 18 日に減衰補正している。)

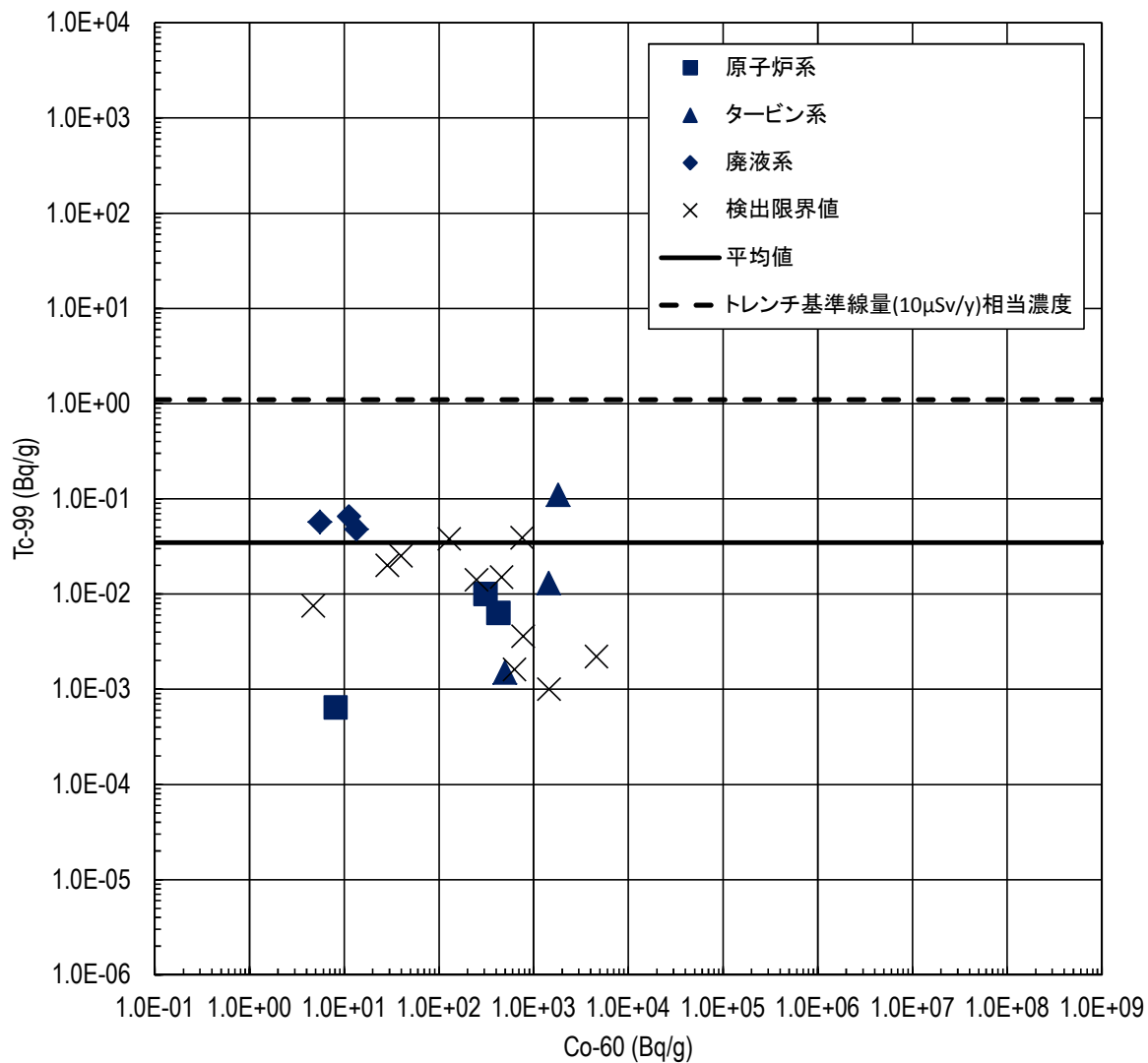


図 3.4 Tc-99 と Co-60 の放射能濃度  
 (図の放射能濃度データは JPDR の運転停止時である  
 1976 年 3 月 18 日に減衰補正している。)

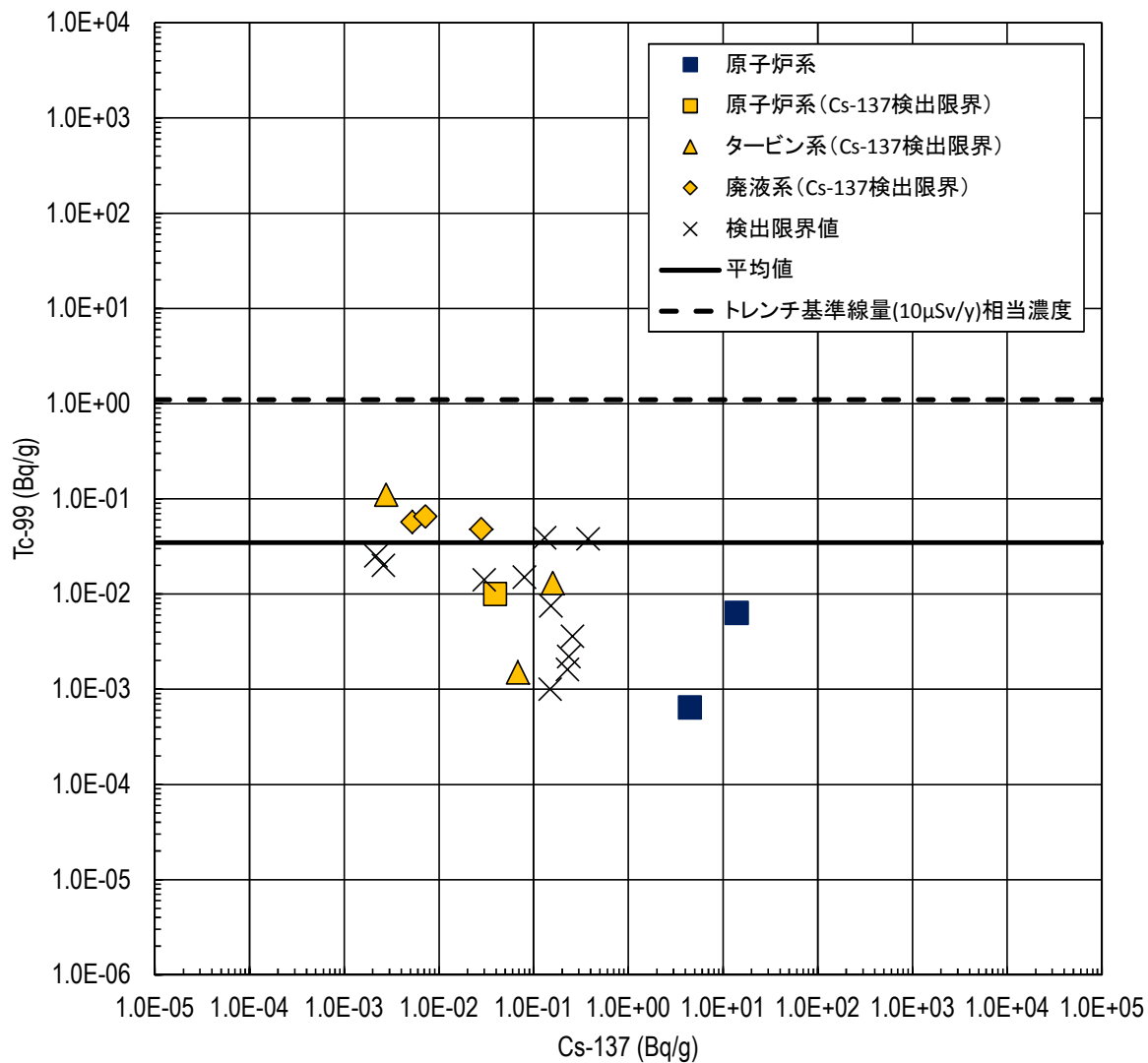


図 3.5 Tc-99 と Cs-137 の放射能濃度  
 (図の放射能濃度データは JPDR の運転停止時である  
 1976 年 3 月 18 日に減衰補正している。)



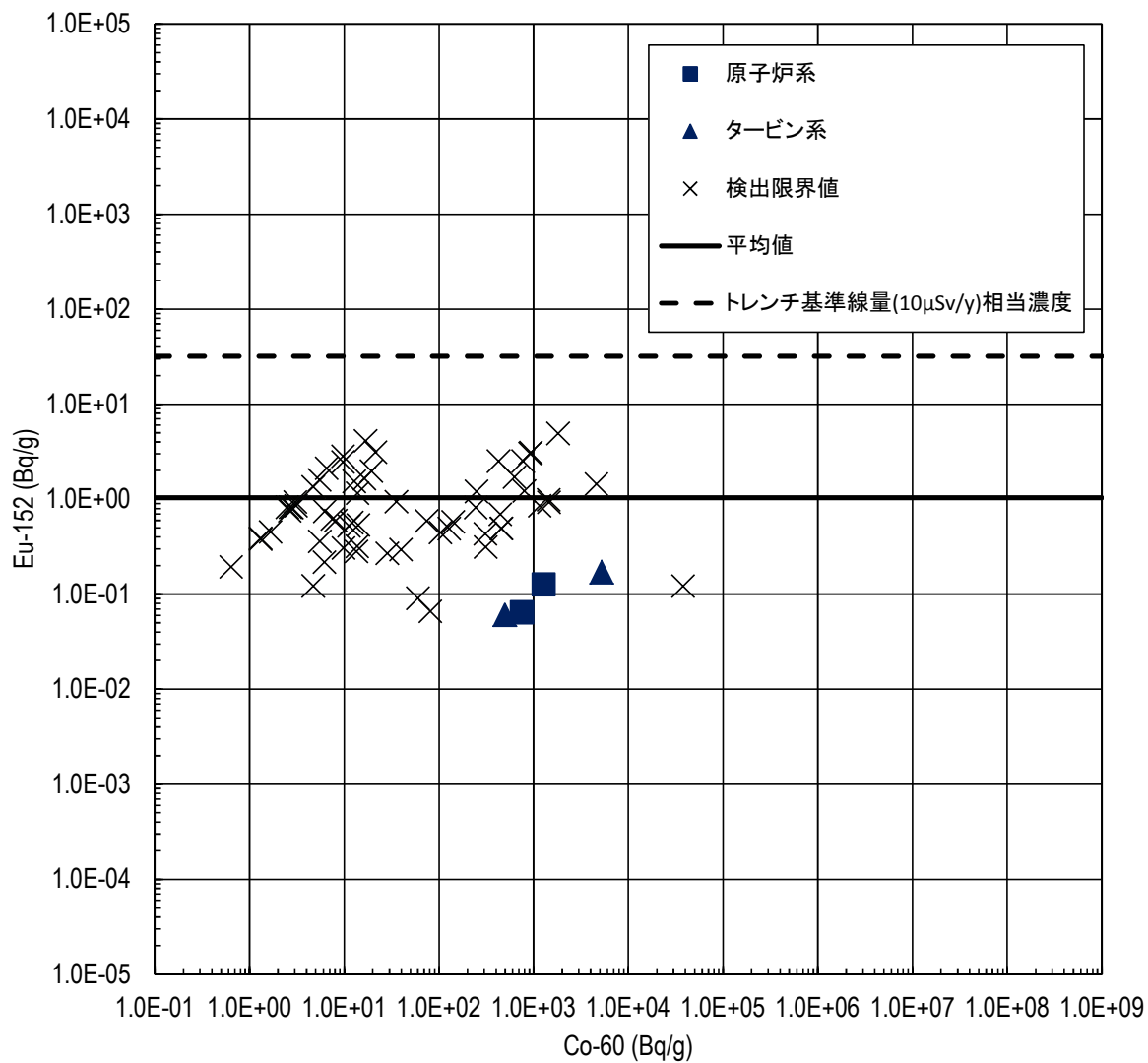


図 3.6 Eu-152 と Co-60 の放射能濃度  
 (図の放射能濃度データは JPDR の運転停止時である  
 1976 年 3 月 18 日に減衰補正している。)

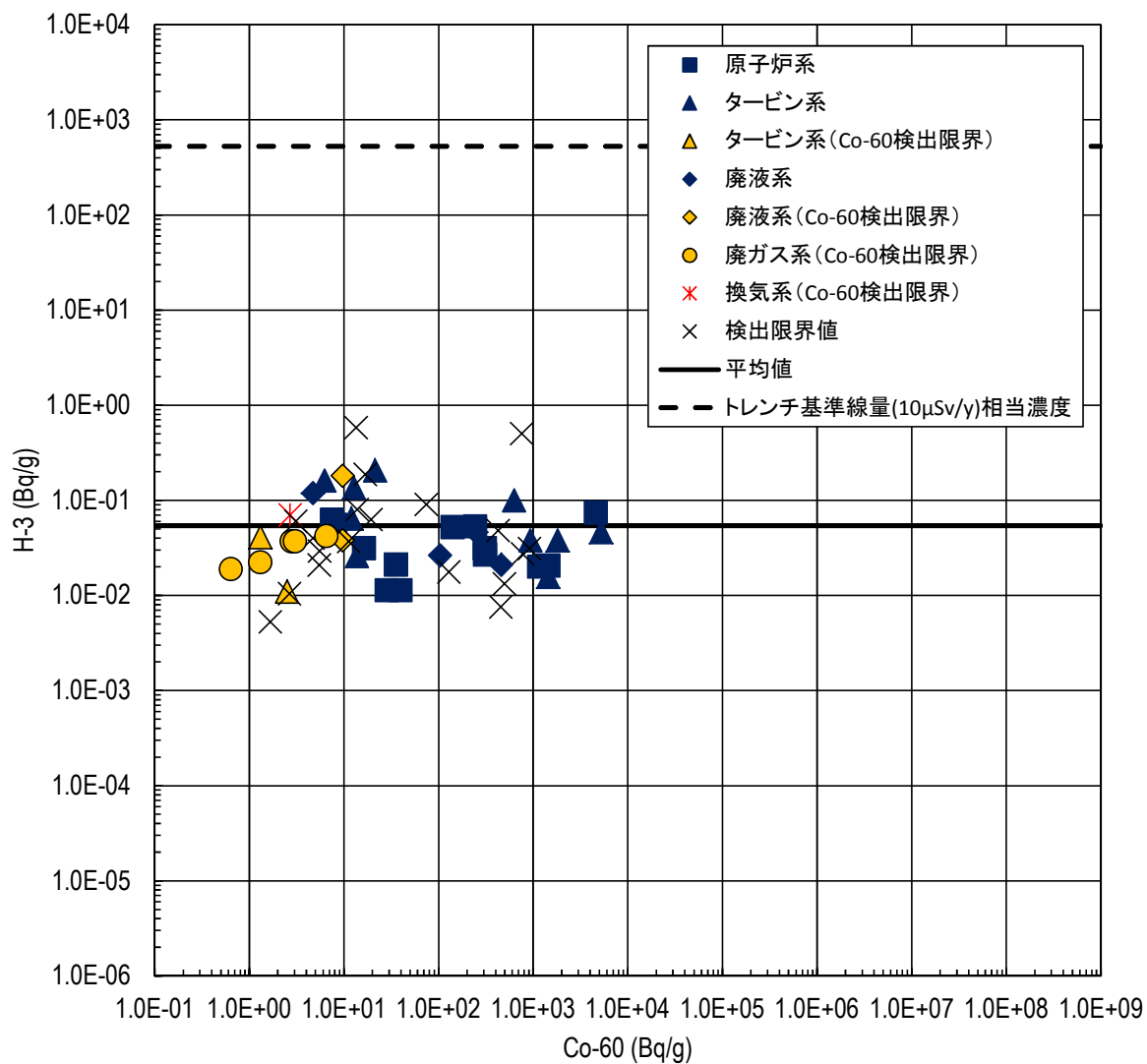


図 3.7 H-3 と Co-60 の放射能濃度

(図の放射能濃度データは JPDR の運転停止時である

1976 年 3 月 18 日に減衰補正している。)

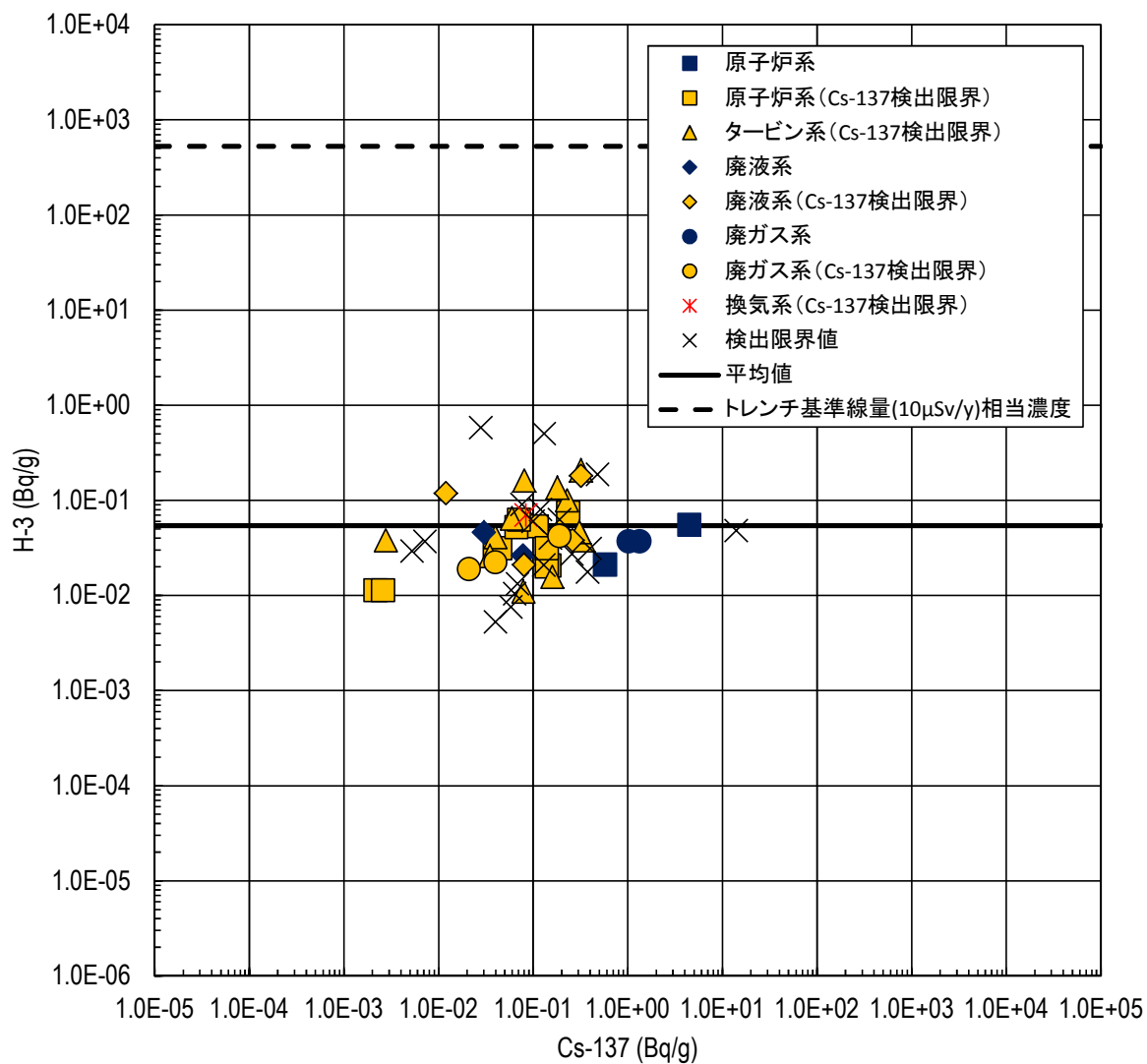


図 3.8 H-3 と Cs-137 の放射能濃度  
 (図の放射能濃度データは JPDR の運転停止時である  
 1976 年 3 月 18 日に減衰補正している。)

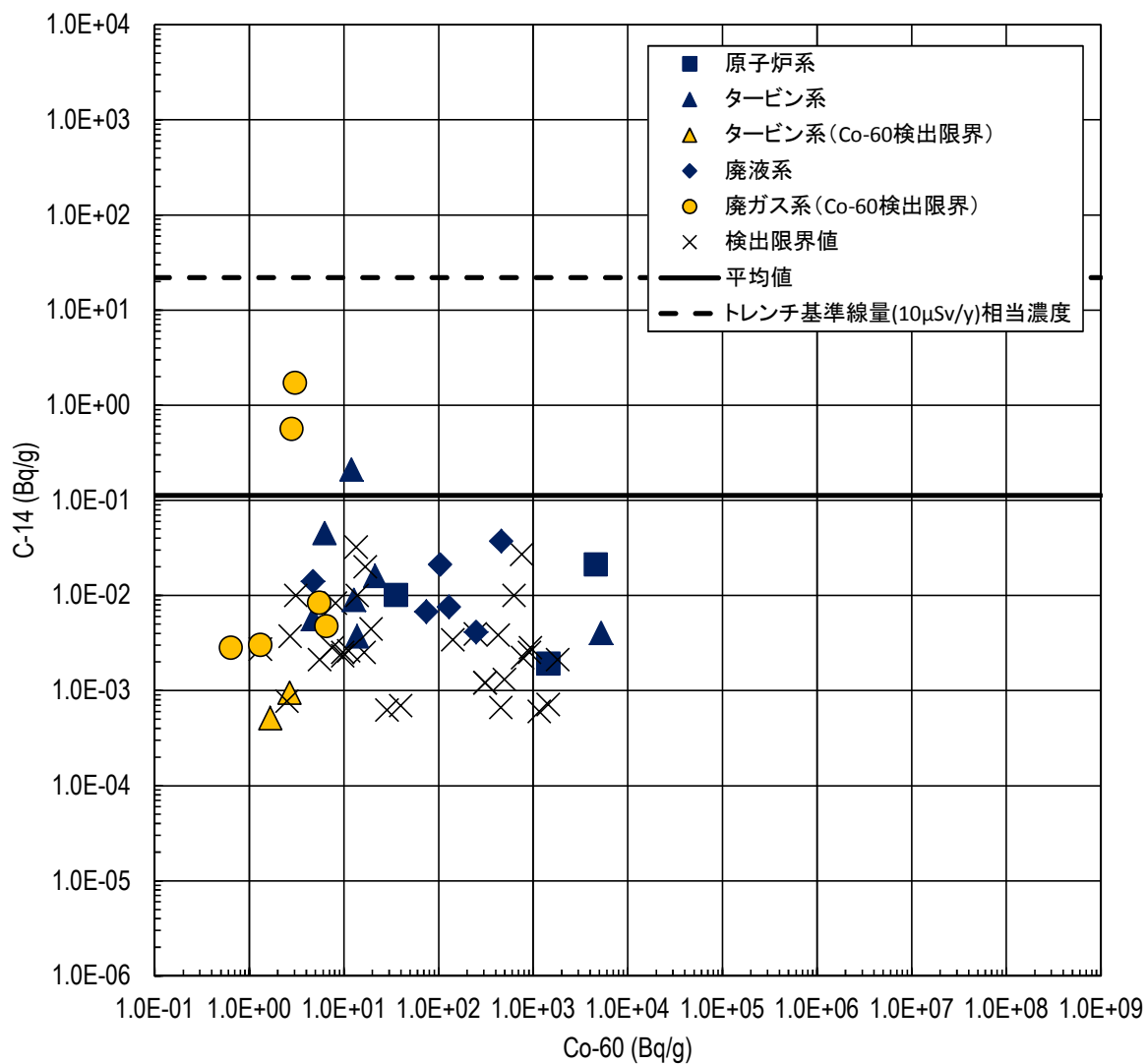


図 3.9 C-14 と Co-60 の放射能濃度  
 (図の放射能濃度データは JPDR の運転停止時である  
 1976 年 3 月 18 日に減衰補正している。)

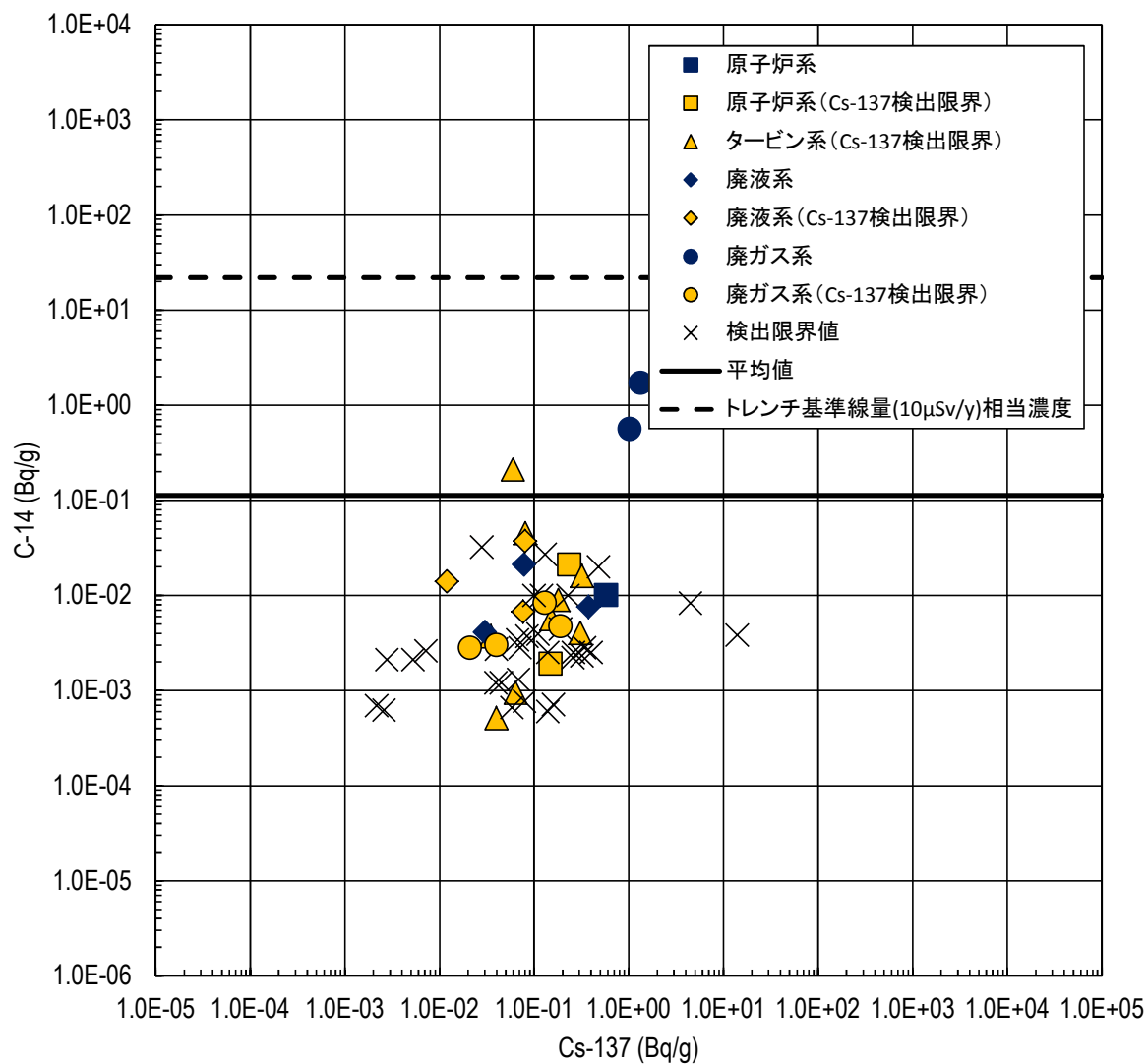


図 3.10 C-14 と Cs-137 の放射能濃度  
 (図の放射能濃度データは JPDR の運転停止時である  
 1976 年 3 月 18 日に減衰補正している。)

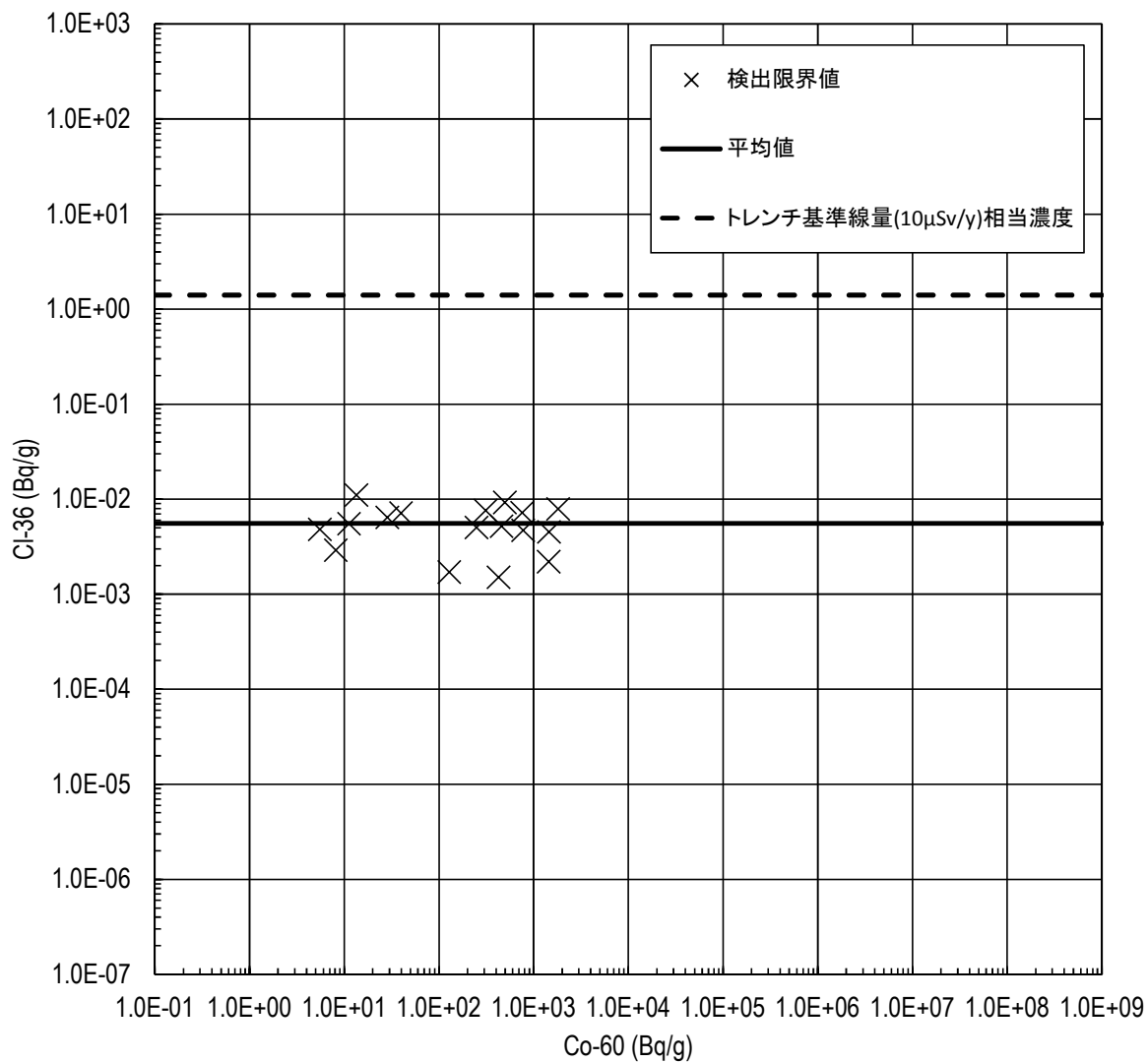


図 3.11 Cl-36 と Co-60 の放射能濃度  
 (図の放射能濃度データは JPDR の運転停止時である  
 1976 年 3 月 18 日に減衰補正している。)

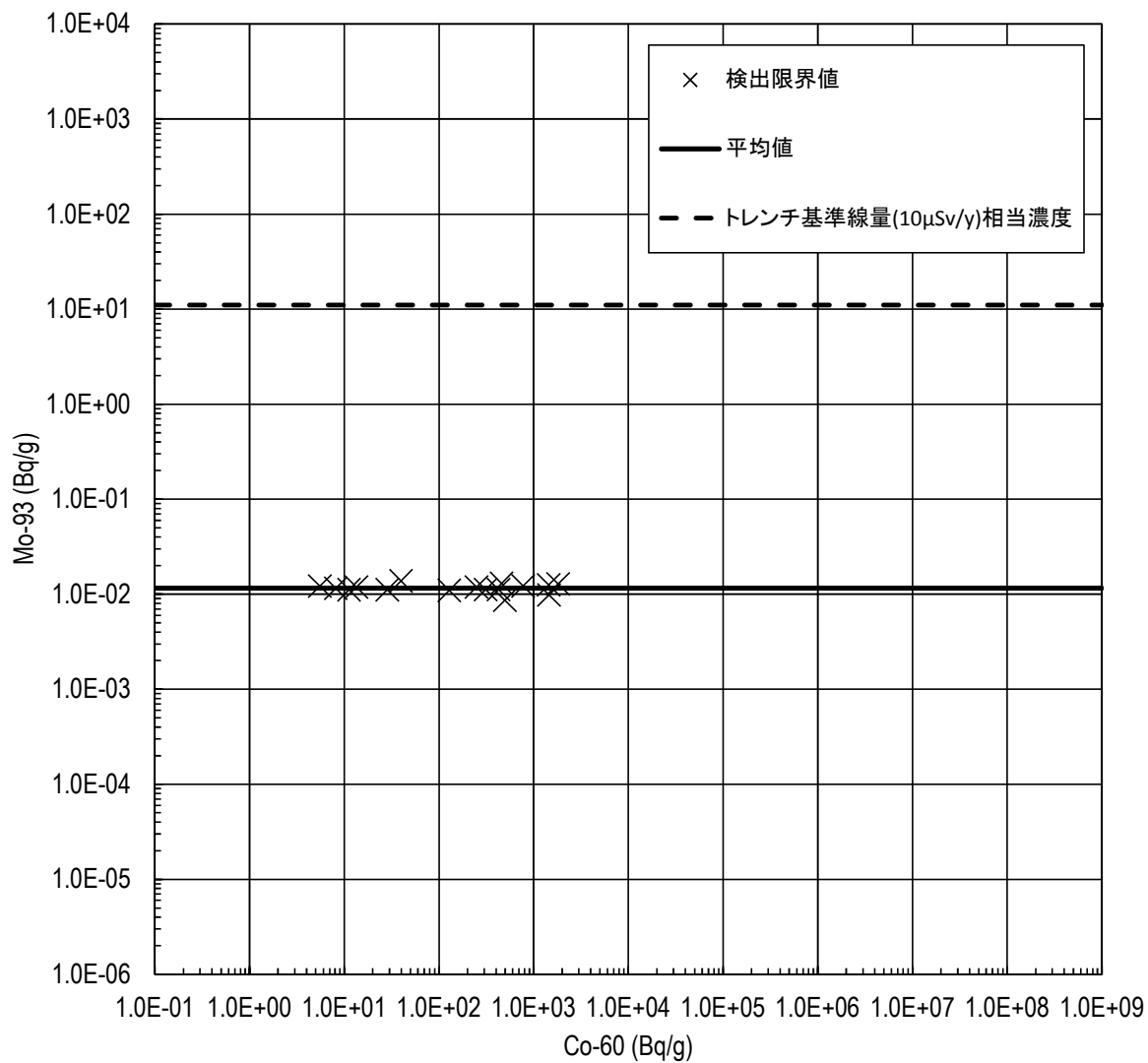


図 3.12 Mo-93 と Co-60 の放射能濃度  
 (図の放射能濃度データは JPDR の運転停止時である  
 1976 年 3 月 18 日に減衰補正している。)

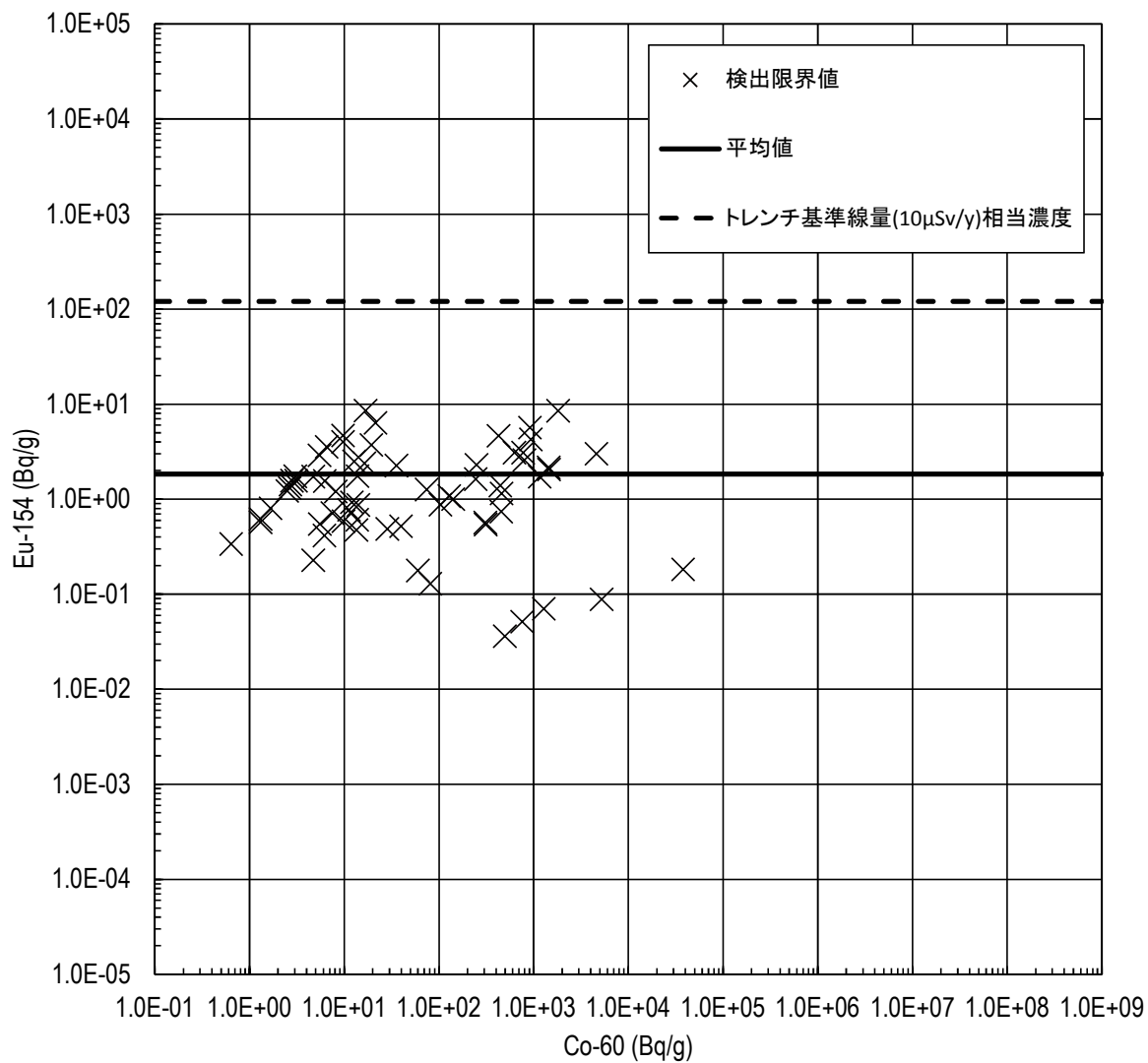


図 3.13 Eu-154 と Co-60 の放射能濃度  
 (図の放射能濃度データは JPDR の運転停止時である  
 1976 年 3 月 18 日に減衰補正している。)



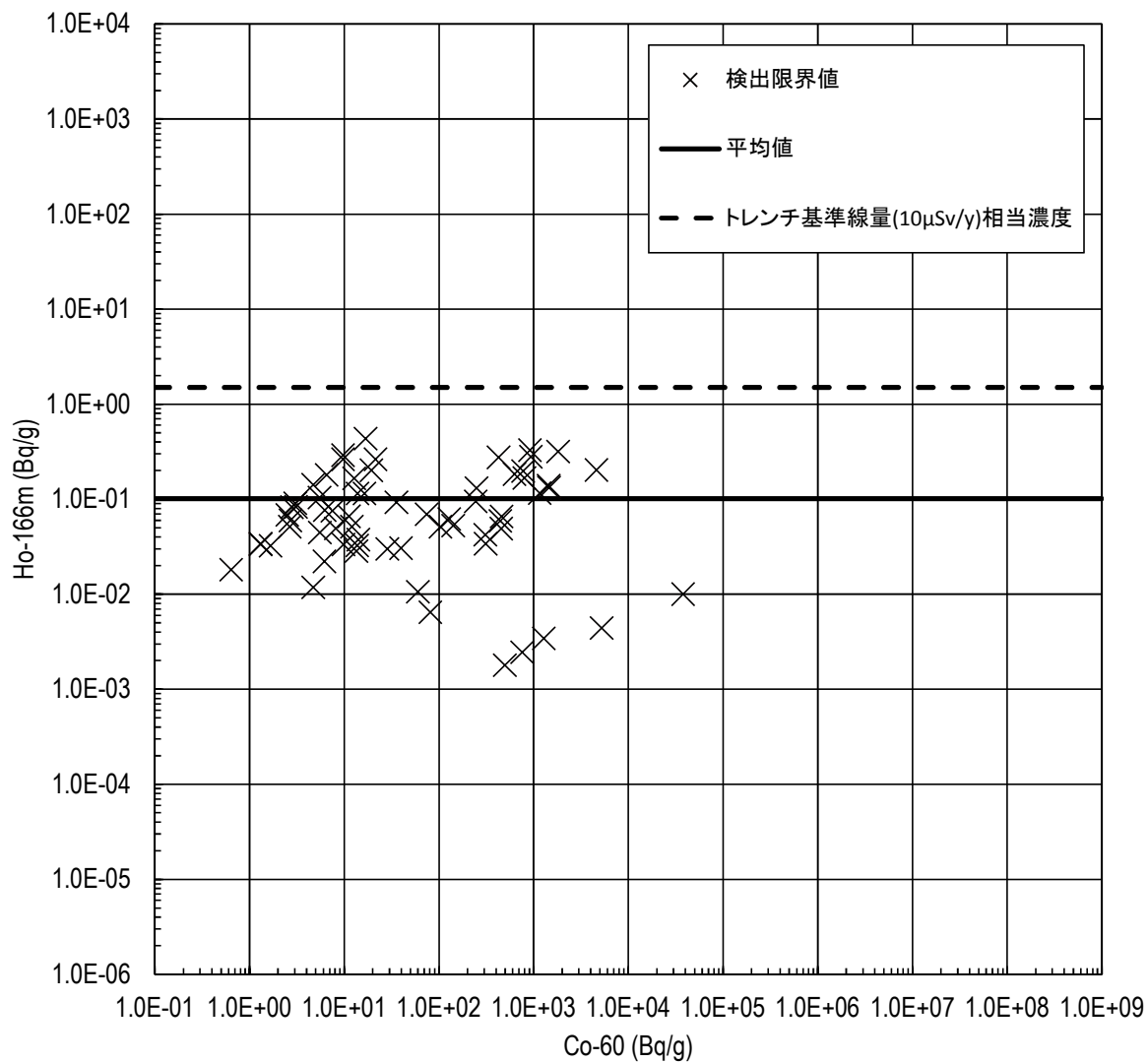


図 3.14 <sup>166m</sup>Ho と <sup>60</sup>Co の放射能濃度  
 (図の放射能濃度データは JPDR の運転停止時である  
 1976 年 3 月 18 日に減衰補正している。)

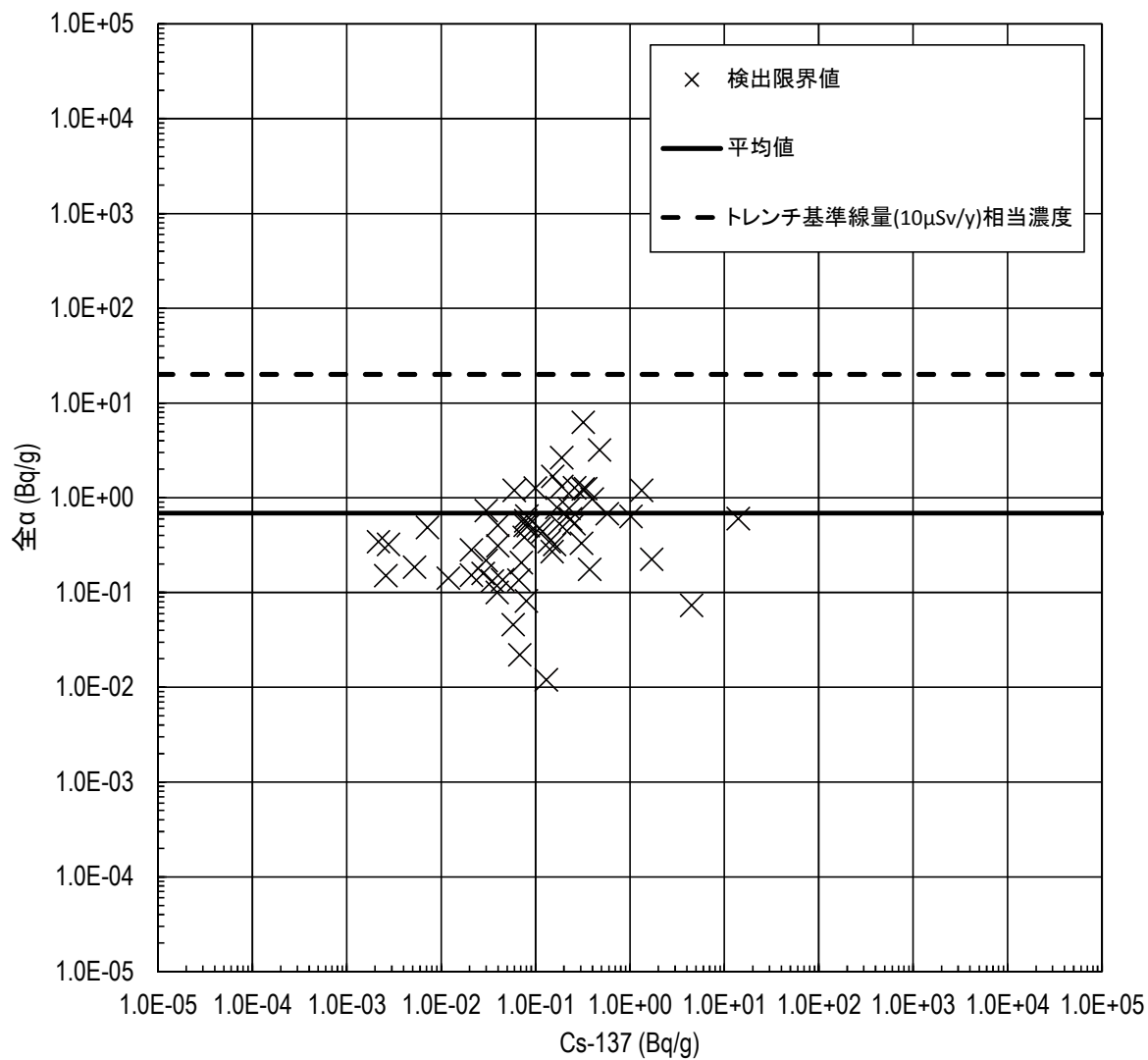


図 3.15 全αとCs-137の放射能濃度  
 (図の放射能濃度データはJPDRの運転停止時である  
 1976年3月18日に減衰補正している。)

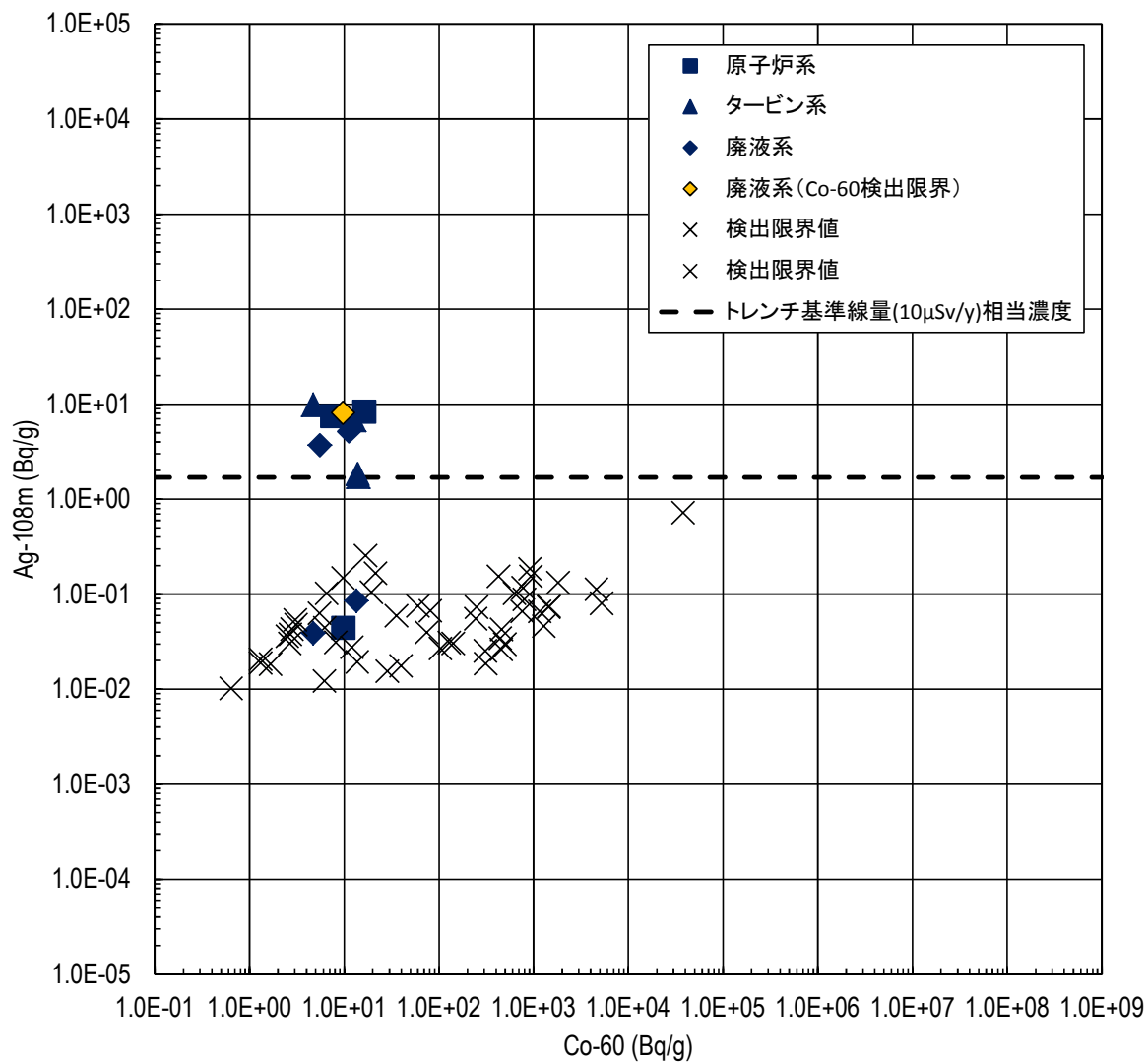


図 3.16 Ag-108m と Co-60 の放射能濃度  
 (図の放射能濃度データは JPDR の運転停止時である  
 1976 年 3 月 18 日に減衰補正している。)

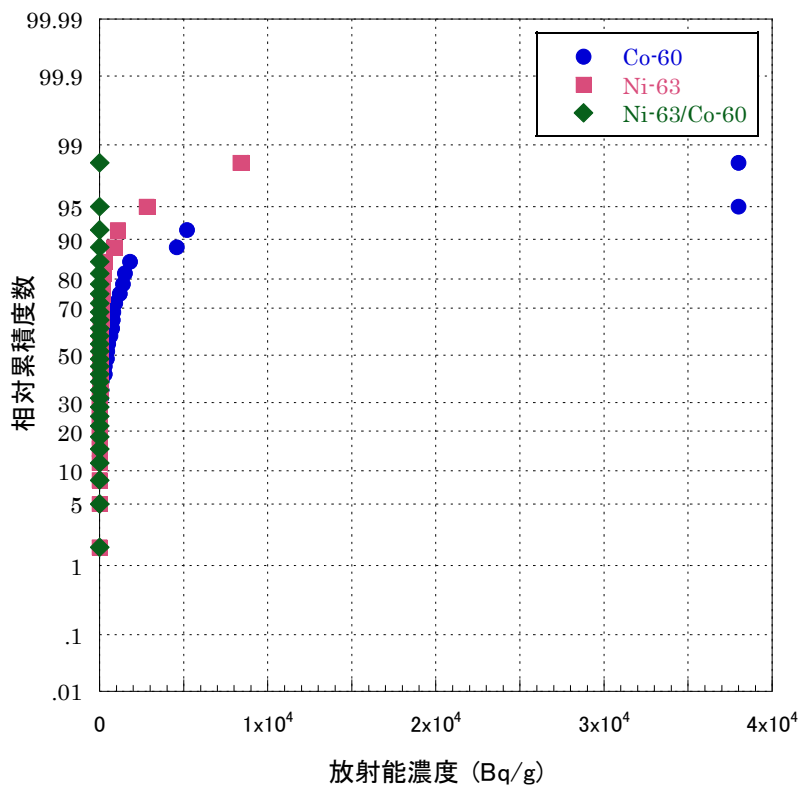


図 3.17 Ni-63 及び Co-60 並びに Ni-63 と Co-60 との核種組成比の正規性の確認

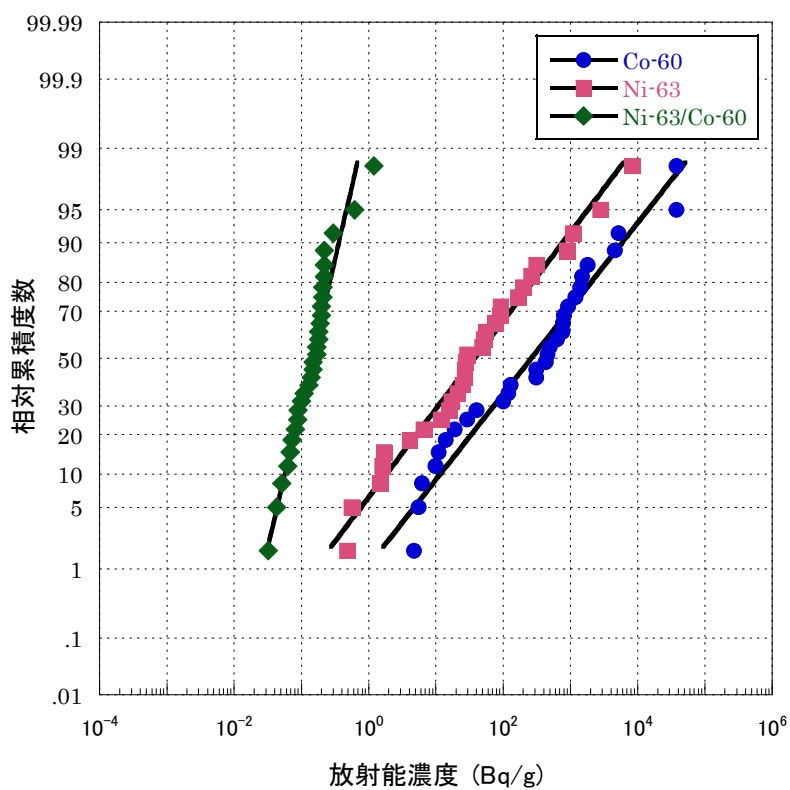


図 3.18 Ni-63 及び Co-60 並びに Ni-63 と Co-60 との核種組成比の対数正規性の確認

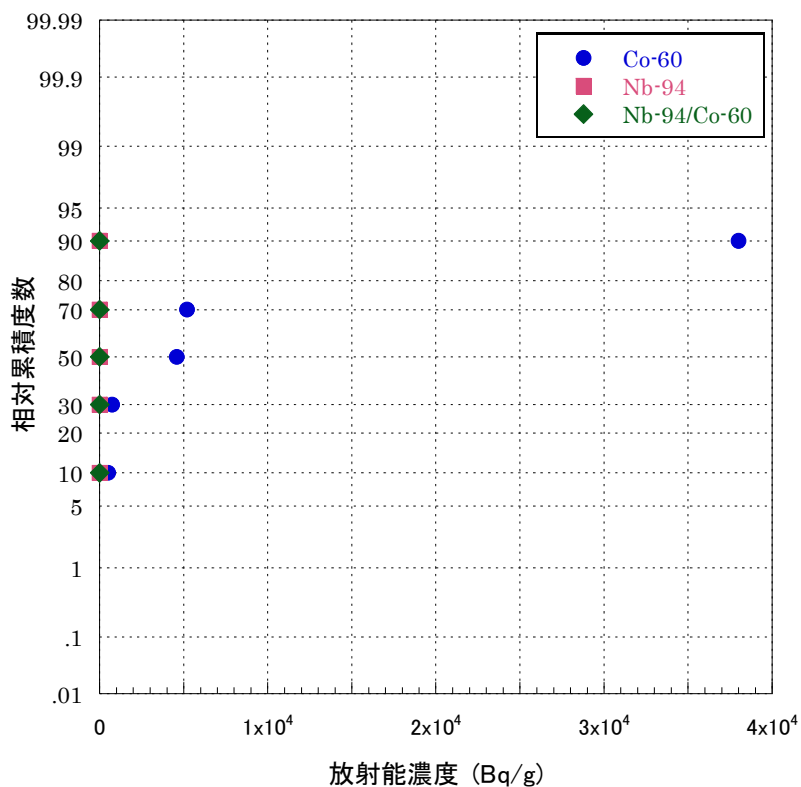


図 3.19 Nb-94 及び Co-60 並びに Nb-94 と Co-60 との核種組成比の正規性の確認

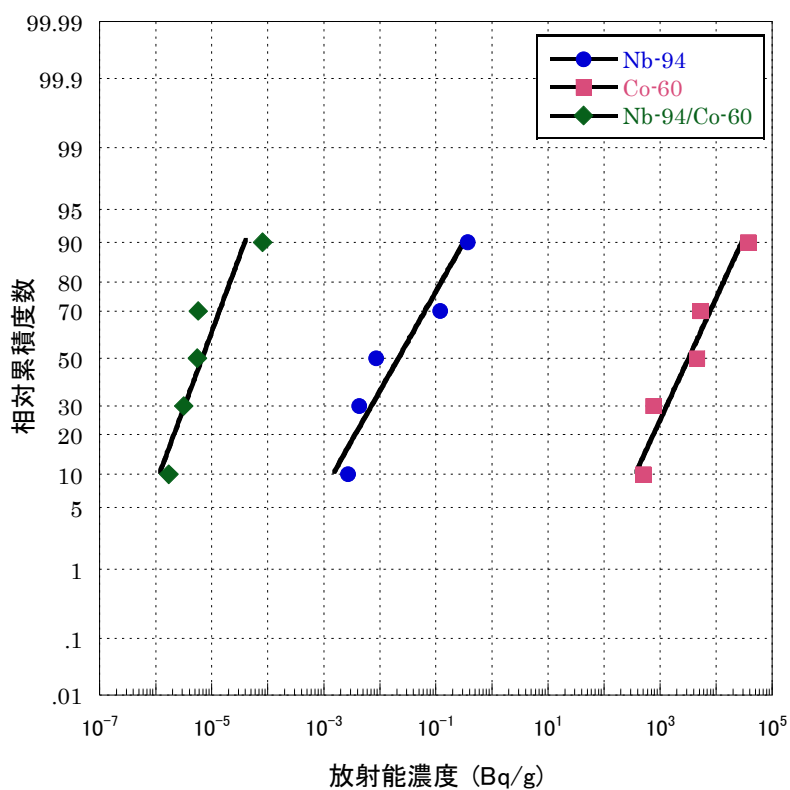


図 3.20 Nb-94 及び Co-60 並びに Nb-94 と Co-60 との核種組成比の対数正規性の確認

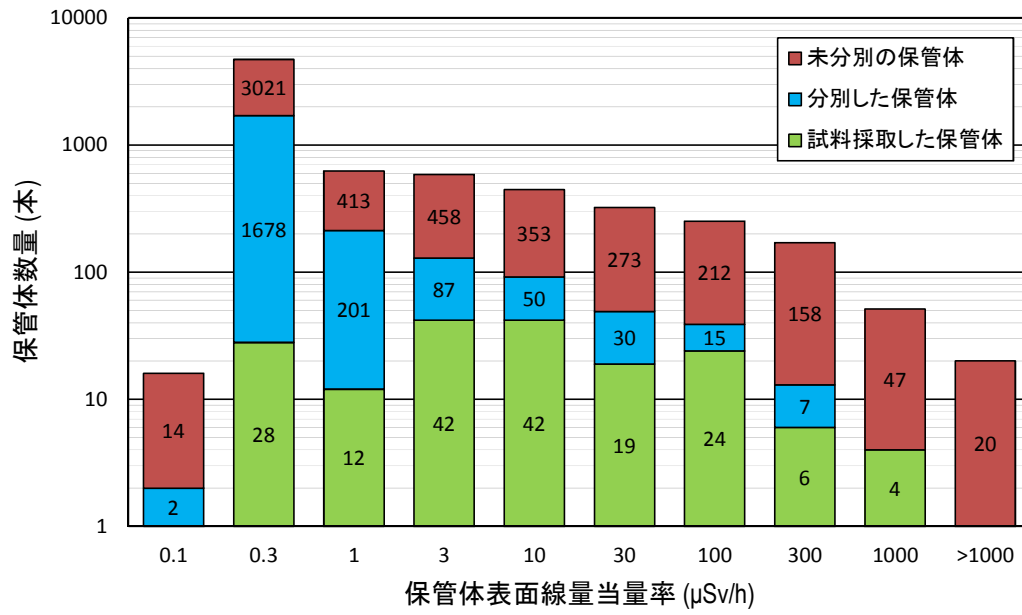


図 3.21 汚染金属廃棄物の分別状況及び分析用試料採取状況



