

照射後試験施設から発生した廃棄物に対する 放射能濃度評価方法の検討

Study on the Evaluation Methodology of the Radioactivity Concentration in Low-level
Radioactive Wastes Generated from Post Irradiation Examination Facility

水飼 秋菜 原賀 智子 石森 健一郎 亀尾 裕

Akina MITSUKAI, Tomoko HARAGA, Ken-ichiro ISHIMORI and Yutaka KAMEO

原子力科学研究部門

原子力科学研究所

バックエンド技術部

Department of Decommissioning and Waste Management

Nuclear Science Research Institute

Sector of Nuclear Science Research

November 2019

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 (<https://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, 2019

照射後試験施設から発生した廃棄物に対する放射能濃度評価方法の検討

日本原子力研究開発機構
原子力科学研究部門 原子力科学研究所 バックエンド技術部

水飼 秋菜、原賀 智子、石森 健一郎、亀尾 裕

(2019年7月26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研究施設等廃棄物は、将来的に浅地中に埋設処分する予定であり、埋設処分を開始するまでに、廃棄体の放射能濃度を評価する方法を構築する必要がある。原子力科学研究所バックエンド技術部では、照射後試験施設であるホットラボから発生した廃棄物をモデルに、放射性核種（H-3、C-14、Cl-36、Co-60、Ni-63、Sr-90、Mo-93、Nb-94、Tc-99、Ag-108m、Sn-126、I-129、Cs-137、Eu-152、Eu-154、U-233+234、U-238、Pu-238、Pu-239+240、Pu-241、Am-241、Am-243、Cm-244）を対象とした放射化学分析に基づく放射能濃度評価方法の検討を行った。検討の結果、Sr-90、I-129、Eu-154、U-233+234、Pu-238、Pu-239+240、Am-241、Cm-244 に対してスケーリングファクタ法が適用できる見込みが得られ、H-3、C-14、Cl-36、Ni-63、Mo-93、Nb-94、Tc-99、Ag-108m、Sn-126、Eu-152、U-238、Pu-241 及び Am-243 に対して平均放射能濃度法が適用できる見込みが得られた。また、Ni-63、Tc-99、Eu-152 及び U-238 は追加データが得られれば、スケーリングファクタ法が適用できる可能性がある。

Study on the Evaluation Methodology of the Radioactivity Concentration in Low-level
Radioactive Wastes Generated from Post Irradiation Examination Facility

Akina MITSUKAI, Tomoko HARAGA, Ken-ichiro ISHIMORI and Yutaka KAMEO

Department of Decommissioning and Waste Management
Nuclear Science Research Institute
Sector of Nuclear Science Research
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 26, 2019)

In the future, radioactive waste which generated from nuclear research facilities in Japan Atomic Energy Agency are planning to be buried for the near surface disposal. It is necessary to establish the method to evaluate the radioactivity concentrations of the radioactive wastes.

In this work, we studied the evaluation method of radioactivity concentration based on radiochemical analysis data (H-3, C-14, Cl-36, Co-60, Ni-63, Sr-90, Mo-93, Nb-94, Tc-99, Ag-108m, Sn-126, I-129, Cs-137, Eu-152, Eu-154, U-233+234, U-238, Pu-238, Pu-239+240, Pu-241, Am-241, Am-243, Cm-244) which was generated from research facility Hot Laboratory.

As a result of examining the application of the scaling factor method, the correlation with Key-nuclide in some nuclides which are Sr-90, I-129, Eu-154, U-233+234, Pu-238, Pu-239+240, Am-241, Cm-244 confirmed by the correlation coefficient and t-test. In the present radiochemical analysis data, the mean activity concentration method can be applied to all nuclides which could not be applied to the scaling factor method H-3, C-14, Cl-36, Ni-63, Mo-93, Nb-94, Tc-99, Ag-108m, Sn-126, Eu-152, U-238, Pu-241 and Am-243. Ni-63, Tc-99, Eu-152 and U-238 could be applied to the scaling factor method with getting several additional data, this study will be continued to review for the practical evaluation method.

Keywords: Low-level Radioactive Wastes, Near-surface Trench and Pit Disposal Facilities, Scaling Factor Method, Post Irradiation Examination Facility, Hot Laboratory

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.....	2
2.2.1	SF法の適用手順について.....	2
2.2.2	平均放射能濃度法の適用手順について.....	5
3	放射能濃度評価方法の検討.....	6
3.1	SF法の適用性の検討.....	6
3.1.1	放射性核種の生成機構及び移行挙動.....	6
3.1.2	相関関係の確認.....	8
3.1.3	スケーリングファクタの設定.....	9
3.2	平均放射能濃度法の適用性の検討.....	10
3.2.1	平均放射能濃度の算出.....	10
3.2.2	平均放射能濃度の裕度の確認.....	10
3.2.3	平均放射能濃度法の適用性と考察.....	11
3.3	今後の検討事項.....	11
4	まとめ.....	12
	謝 辞.....	13
	参考文献.....	13

Contents

1	Introduction	1
2	Procedure	2
2.1	Outline of procedure	2
2.2	Procedure of evaluation methods to determine radioactivity concentrations	2
2.2.1	Procedure of scaling factor method	2
2.2.2	Procedure of applying facility common scaling factor	5
3	Study on evaluation method to determine radioactivity concentration	6
3.1	Study on scaling factor method	6
3.1.1	Generation mechanism and transition behavior of radionuclide	6
3.1.2	Confirm correlation	8
3.1.3	Setup of scaling factor	9
3.2	Study on mean activity concentration method	10
3.2.1	Calculation of mean activity concentration method	10
3.2.2	Confirmation of margin against mean activity concentration	10
3.2.3	Consideration for applicability of mean activity concentration method	11
3.3	Future considerations	11
4	Conclusion	12
	Acknowledgments	13
	References	13

図表リスト

表 2.1	分析核種と予備選定した重要核種の一覧	14
表 3.1	相関係数の算出結果	15
表 3.2	t 検定による相関係数の有意性確認結果	16
表 3.3	スケーリングファクタの算出結果	16
表 3.4	平均放射能濃度の算出結果	17
表 4.1	放射能濃度評価法のまとめ	18
図 3.1	相関関係の確認に必要なデータ数と相関係数の関係	19
図 3.2-1	Sr-90/Cs-137 放射能濃度比の頻度分布	20
図 3.2-2	I-129/Cs-137 放射能濃度比の頻度分布	20
図 3.2-3	Eu-154/Cs-137 放射能濃度比の頻度分布	21
図 3.2-4	U-233+234/Cs-137 放射能濃度比の頻度分布	21
図 3.2-5	Pu-238/Cs-137 放射能濃度比の頻度分布	22
図 3.2-6	Pu-239+240/Cs-137 放射能濃度比の頻度分布	22
図 3.2-7	Am-241/Cs-137 放射能濃度比の頻度分布	23
図 3.2-8	Cm-244/Cs-137 放射能濃度比の頻度分布	23
図 3.3-1	Sr-90/Cs-137 放射能濃度比データ正規確率紙	24
図 3.3-2	I-129/Cs-137 放射能濃度比データ正規確率紙	24
図 3.3-3	Eu-154/Cs-137 放射能濃度比データ正規確率紙	25
図 3.3-4	U-233+234/Cs-137 放射能濃度比データ正規確率紙	25
図 3.3-5	Pu-238/Cs-137 放射能濃度比データ正規確率紙	26
図 3.3-6	Pu-239+240/Cs-137 放射能濃度比データ正規確率紙	26
図 3.3-7	Am-241/Cs-137 放射能濃度比データ正規確率紙	27
図 3.3-8	Cm-244/Cs-137 放射能濃度比データ正規確率紙	27
図 3.4-1	Sr-90/Cs-137 放射能濃度比データ対数正規確率紙	28
図 3.4-2	I-129/Cs-137 放射能濃度比データ対数正規確率紙	28
図 3.4-3	Eu-154/Cs-137 放射能濃度比データ対数正規確率紙	29
図 3.4-4	U-233+234/Cs-137 放射能濃度比データ対数正規確率紙	29
図 3.4-5	Pu-238/Cs-137 放射能濃度比データ対数正規確率紙	30
図 3.4-6	Pu-239+240/Cs-137 放射能濃度比データ対数正規確率紙	30
図 3.4-7	Am-241/Cs-137 放射能濃度比データ対数正規確率紙	31
図 3.4-8	Cm-244/Cs-137 放射能濃度比データ対数正規確率紙	31

図 3.5-1	Sr-90/Cs-137 放射能濃度相関図と SF 値	32
図 3.5-2	I-129/Cs-137 放射能濃度相関図と SF 値	32
図 3.5-3	Eu-154/Cs-137 放射能濃度相関図と SF 値	33
図 3.5-4	U-233+234/Cs-137 放射能濃度相関図と SF 値	33
図 3.5-5	Pu-238/Cs-137 放射能濃度相関図と SF 値	34
図 3.5-6	Pu-239+240/Cs-137 放射能濃度相関図と SF 値	34
図 3.5-7	Am-241/Cs-137 放射能濃度相関図と SF 値	35
図 3.5-8	Cm-244/Cs-137 放射能濃度相関図と SF 値	35
図 3.6-1	H-3/Co-60 放射能濃度相関図	36
図 3.6-2	C-14/Co-60 放射能濃度相関図	36
図 3.6-3	Cl-36/Co-60 放射能濃度相関図	37
図 3.6-4	Ni-63/Co-60 放射能濃度相関図	37
図 3.6-5	Mo-93/Co-60 放射能濃度相関図	38
図 3.6-6	Nb-94/Co-60 放射能濃度相関図	38
図 3.6-7	Tc-99/Co-60 放射能濃度相関図	39
図 3.6-8	Ag-108m/Co-60 放射能濃度相関図	39
図 3.6-9	Sn-126/Co-60 放射能濃度相関図	40
図 3.6-10	Eu-152/Co-60 放射能濃度相関図	40
図 3.6-11	U-238/Co-60 放射能濃度相関図	41
図 3.6-12	Pu-241/Co-60 放射能濃度相関図	41
図 3.6-13	Am-243/Co-60 放射能濃度相関図	42
図 3.7-1	H-3/Cs-137 放射能濃度相関図	42
図 3.7-2	C-14/Cs-137 放射能濃度相関図	43
図 3.7-3	Cl-36/Cs-137 放射能濃度相関図	43
図 3.7-4	Ni-63/Cs-137 放射能濃度相関図	44
図 3.7-5	Mo-93/Cs-137 放射能濃度相関図	44
図 3.7-6	Nb-94/Cs-137 放射能濃度相関図	45
図 3.7-7	Tc-99/Cs-137 放射能濃度相関図	45
図 3.7-8	Ag-108m/Cs-137 放射能濃度相関図	46
図 3.7-9	Sn-126/Cs-137 放射能濃度相関図	46
図 3.7-10	Eu-152/Cs-137 放射能濃度相関図	47
図 3.7-11	U-238/Cs-137 放射能濃度相関図	47
図 3.7-12	Pu-241/Cs-137 放射能濃度相関図	48
図 3.7-13	Am-243/Cs-137 放射能濃度相関図	48

図 3.8-1	Mo-93/Co-60 放射能濃度相関図 (ピット想定)	49
図 3.8-2	Tc-99/Co-60 放射能濃度相関図 (ピット想定)	49
図 3.8-3	Sn-126/Co-60 放射能濃度相関図 (ピット想定)	50
図 3.8-5	Am-243/Co-60 放射能濃度相関図 (ピット想定)	50
図 3.9-1	Mo-93/Cs-137 放射能濃度相関図 (ピット想定)	51
図 3.9-2	Tc-99/Cs-137 放射能濃度相関図 (ピット想定)	51
図 3.9-3	Sn-126/Cs-137 放射能濃度相関図 (ピット想定)	52
図 3.9-4	Am-243/Cs-137 放射能濃度相関図 (ピット想定)	52

This is a blank page.

1. はじめに

「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和 32 年法律第 166 号）」においては、廃棄物埋設事業者は埋設対象となる放射性廃棄物が法令に定める基準を満たしていることについて、原子力規制委員会による確認を受けなければならないと定められている。埋設対象となる放射性廃棄物の技術的な基準は「核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則（昭和 63 年総理府令第 1 号）」（以下「第二種埋設規則」という。）で定められており、放射能濃度に係る項目では、放射性物質の種類ごとに埋設事業許可申請書等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。

埋設処分を先行して実施している原子力発電所では、操業に伴って発生する均質・均一固化体あるいは充填固化体の放射能濃度について、廃棄体一体ごとに非破壊外部測定法、スケーリングファクタ法または平均放射能濃度法のような統計的手法に基づいた放射能濃度評価法によって評価している¹⁾。

日本原子力研究開発機構（以下「原子力機構」という。）では、研究施設等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。）を将来的に埋設処分することを予定しており、原子力発電所で採用されている放射能濃度評価法の適用性を確認しておく必要がある。これまでに原子力科学研究所で発生したアスファルト固化体及び動力試験炉 JPDR 施設の解体に伴って発生した放射性廃棄物のうち金属廃棄物を対象としたスケーリングファクタ法（以下「SF 法」という。）等の適用性についての検討^{2,3,4)} や、JRR-2 及び JRR-3 の金属廃棄物をモデルとした放射能濃度評価法の検討を行ってきた⁵⁾。

これまでに検討を実施した原子炉施設 JPDR、JRR-2、JRR-3 において、主な汚染源は原子炉燃料、材料及び冷却材中の元素の放射化によって生成した放射性核種あるいは原子炉燃料の核分裂生成物が系統流体の流動によって固体廃棄物の表面へと付着した表面汚染によるものであった。一方で、照射後試験施設であるホットラボでは照射済試料に対する照射後試験が実施されていたため、汚染源となる原子炉燃料の核分裂生成物または放射化した材料に由来する放射性核種が付着した表面汚染がほとんどだと考えられる。そのためホットラボから採取した廃棄物試料中では、H-3、Cl-36 等、原子炉材料及び冷却水由来の放射性核種の寄与が相対的に低く、原子炉燃料の核分裂生成物による汚染の寄与が高いと推測される。

本報告書では、新たに照射後試験施設であるホットラボから採取した廃棄物を対象に放射能濃度評価法の適用性について検討した。その結果を報告する。

2. 検討手順

2.1 検討手順について

原子力発電所から発生した廃棄物（以下、「発電所廃棄体」という）に対する放射能濃度評価^{6),7)}では、廃棄体の外部から直接放射能濃度を測定する非破壊外部測定法、予め算出したスケーリングファクタと非破壊外部測定法によって得られる放射能濃度を掛け合わせて算出する SF 法、事前の放射化学分析により取得した放射能データに対する平均値を利用する平均放射能濃度法、そして放射化計算等の理論計算に基づいて放射能濃度を決定する理論計算法の 4 つが適用されている¹⁾。

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。）の予備の評価を行っており⁷⁾、その中でホットラボ廃棄物における重要核種はピット処分で 20 核種（C-14、Cl-36、Ni-59、Ni-63、Sr-90、Nb-94、Mo-93、Tc-99、Sn-126、Cs-137、U-233、U-234、U-238、Pu-238、Pu-239、Pu-240、Pu-241、Am-241、Am-243、Cm-244）、トレンチ処分で 12 核種（H-3、C-14、Co-60、Ni-63、Sr-90、Nb-94、Cs-137、Eu-154、U-234、Pu-238、Pu-239、Pu-241）に「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」⁹⁾（以下、「濃度上限値報告書」という。）で選定されている I-129 を加え、更に Ni-63 との生成比の理論計算により評価が可能な Ni-59 を除いた 23 核種が選定されている。これら重要核種から分析が可能な核種を選定し、比較的容易に分析が可能である Ag-108m と Eu-152 を加えた 25 核種（H-3、C-14、Cl-36、Co-60、Ni-63、Sr-90、Mo-93、Nb-94、Tc-99、Ag-108m、Sn-126、I-129、Cs-137、Eu-152、Eu-154、U-233、U-234、U-238、Pu-238、Pu-239、Pu-240、Pu-241、Am-241、Am-243、Cm-244）を対象とした放射化学分析を行い、得られた放射能データを元に放射能濃度評価法の検討を行った。ただし、スペクトル上分離が困難な U-233 と U-234 及び Pu-239 と Pu-240 に関しては、U-233+234、Pu-239+240 として評価した。表 2.1 に選定した分析核種と重要核種の一覧を示す。

2.2 放射能濃度評価方法の適用手順について

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などを加味した Key 核種と評価対象核種とを組み合わせ、それらの放射能濃度の間に相関関係が成立する場合に適用される。放射化学分析で取得した放射能データに基づいて以下の手順で SF 法への適用性を確認した。

a) 相関関係成立の確認

有意な放射能濃度データに基づいて、相関係数の算出、算出した相関係数の無相関検定による確認、放射能濃度相関図の確認を行った⁸⁾。相関係数とは 2 つの確率変数間にある線形な関係の強弱を測る指数で、-1 以上 1 以下の実数となる。相関係数が正の場合には正の相関が、負の場合には負の相関があるという。求めた相関係数が統計的に有意であるかを統計的仮説検定

により確認した後、相関係数の値により、評価対象核種の放射能濃度データと Key 核種の放射能濃度データの間どの程度の相関があるか判断した。

相関関係の目安の例を以下に示す。

- +0.7 から+1.0 または-0.7 から-1.0 強い相関がある
- +0.4 から+0.7 または-0.4 から-0.7 中程度の相関がある
- +0.2 から+0.4 または-0.2 から-0.4 弱い相関がある
- +0.0 から+0.2 または-0.0 から-0.2 ほとんど相関がない（または無相関）

相関係数は、式（1）で算出する。

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum(y_i - \bar{y})^2}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、r：相関係数

x_i ：難測定核種の放射能濃度の対数値

\bar{x} ：難測定核種の放射能濃度の対数値の算術平均値

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

y_i ：Key 核種の放射能濃度の対数値

\bar{y} ：Key 核種の放射能濃度の対数値の算術平均値

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

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帰無仮説を立てて検定するものである。危険率 1%で検定する場合、式（2）に示す t_0 値が t 分布表の $t(n-2, 1\%)$ に対して $t_0 \geq t(n-2, 1\%)$ となるときに評価対象核種と 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、対立仮説が採用されるため相関関係が成立すると判定される。

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

r：相関係数

n：データ数

b) スケーリングファクタの算出及び SF 法の適用

評価対象核種の放射能濃度は、算出したスケーリングファクタと非破壊外部測定法によって測定した Key 核種の放射能濃度を掛け合わせることで算出する。このとき、評価対象核種と Key 核種の核種組成比データが対数正規分布に従う場合は幾何平均値、正規分布に従う場合は算術平均値を使用する。

$$A_{DTM} = SF \times A_{KN} \dots\dots\dots (3)$$

A_{DTM} : 評価対象核種の放射能濃度 (Bq/g)

SF : スケーリングファクタ

A_{KN} : Key 核種の放射能濃度 (Bq/g)

式 (3) に示すスケーリングファクタの算出には、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を確認した場合は式 (4) を用いた幾何平均値、正規分布に従うことを確認した場合は式 (5) を用いた算術平均値を用いる。なお、発電所廃棄体のスケーリングファクタの算出では、核種組成比のデータが対数正規分布であるが算術平均値を用いている⁵⁾。これは、算術平均値は幾何平均値と等しいまたは大きくなる性質があることから、放射能濃度評価上保守的な評価になるためと考えられる。

$$SF = \sqrt[n]{y_1/x_1 \times y_2/x_2 \times \dots \times y_n/x_n} \dots\dots\dots (4)$$

SF : スケーリングファクタ

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

$$SF = \sum_{i=1}^n (y_i/x_i) / n \dots\dots\dots (5)$$

SF : スケーリングファクタ

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

2.2.2 平均放射能濃度法の適用手順について

一般的に、平均放射能濃度法は 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応することができる。しかしながら、最新の知見⁹⁾によると Key 核種が存在していても、SF 法が成立しない場合に適用することがある。

平均放射能濃度の算出方法を式 (6) に示す。平均放射能濃度法では、予め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対象となる廃棄体の放射能濃度とするため、個々の廃棄体に対する放射能濃度は決定されない。それゆえ、評価対象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¹⁰⁾。本検討の平均放射能濃度は評価対象核種の放射能濃度データに基づき、算術平均値として算出した。

$$C_{av} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \dots\dots\dots (6)$$

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

a) 平均放射能濃度の裕度の確認

平均放射能濃度は埋設処分場に埋設できる最大放射能濃度と比較して適切な裕度を有することを確認して、適用性を判断する。しかしながら、研究埋設施設等の埋設処分場の最大放射能濃度は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許可されることから、まだ決定していない。このため、本検討では旧原子力安全委員会が、低レベル放射性廃棄物処分の放射能濃度上限値に関する報告書⁹⁾で試算したトレンチ処分における基準線量となる $10 \mu\text{Sv/y}$ に相当する濃度 (以下「基準線量相当濃度」という。) に対して、どの程度の裕度が見込まれるかを評価する。平均放射能濃度の裕度は、基準線量相当濃度を核種ごとの平均放射能濃度で除して算出した。

実際の埋設処分場では、受け入れた全廃棄物の放射能濃度が基準線量相当濃度に基づく総放射エネルギーを超えないように管理する必要がある。トレンチ処分における最大放射能濃度は、基準線量相当濃度の最大値見込み係数として 10 を乗じた値とされている¹⁰⁾。それゆえ、裕度が 1 以上となる場合に、平均放射能濃度法の適用が見込まれる。今後、埋設処分場が選定され、処分可能な放射性核種及びその最大放射能濃度が決定された場合には、改めて裕度を評価する必要がある。

3. 放射能濃度評価方法の検討

3.1 SF法の適用性の検討

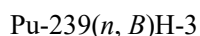
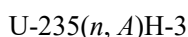
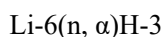
3.1.1 放射性核種の生成機構及び移行挙動

ホットラボでは、遮蔽セル内において照射済み試料を対象とした照射後試験が実施されていた。ホットラボから発生する廃棄物は主に、遮蔽セル内に設置された照射後試験装置、照射済燃料・材料及びセル内の除染作業で発生する放射性廃棄物であり、汚染源は原子炉燃料または放射化材料に由来する放射性核種である。照射後試験で取り扱われた照射済燃料・材料の種類は様々であるが、基本的には汚染源となる放射性核種が付着した表面汚染廃棄物であると考えられる。すなわち、放射性核種はおおむね照射済燃料・材料の組成を保ったまま廃棄物に移行すると考えられる。

本検討では、放射能濃度データを取得した 23 核種（H-3、C-14、Cl-36、Co-60、Ni-63、Sr-90、Mo-93、Nb-94、Tc-99、Ag-108m、Sn-126、I-129、Eu-152、Eu-154、Cs-137、U-233+234、U-238、Pu-238、Pu-239+240、Pu-241、Am-241、Am-243、Cm-244）を評価対象とした。ホットラボ内での生成機構及び放射性廃棄物への移行挙動に着目し、H-3、C-14、Cl-36、CP核種、FP核種及び α 線放出核種（以下「 α 核種」という。）に大別することとした。これらの放射性核種の生成機構¹¹⁾及び移行挙動について以下にまとめる。

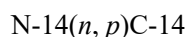
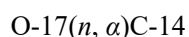
(1) H-3

H-3の主要な生成機構は原子炉燃料であるUの三体核分裂あるいは原子炉構成材料中のLi-6の熱中性子捕獲であり、以下の核反応によって生成する。H-3はトリチウム水として水と同様の挙動を示すと考えられ、同様の移行挙動を示す他の重要核種は存在しない。



(2) C-14

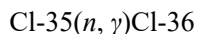
C-14の主要な生成機構は原子炉燃料、原子炉材料中のN-14、O-17の熱中性子捕獲である。以下にC-14の生成反応を示す。



C-14はハル、エンドピース、炉内構造物、原子炉内で放射化された金属中に存在し、放出されるC-14の大半は有機物であるとされている¹²⁾。本検討では、照射後試験に伴って固体廃棄物の表面に付着した表面汚染によるものとした。

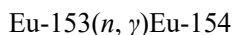
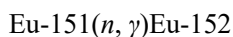
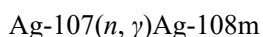
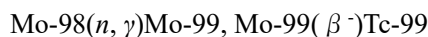
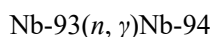
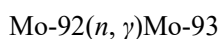
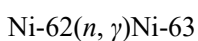
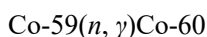
(3) Cl-36

Cl-36 の主要な生成機構は原子炉冷却材料中の不純物として存在する Cl-35 の放射化である。Cl-36 は生成時点において Co-60 との存在比率はほぼ一定であるが、Cl は揮発性、溶解性を示す。そのため、他の CP 核種とは異なった移行挙動を示す。



(4) CP 核種 (Co-60、Ni-63、Mo-93、Nb-94、Tc-99、Ag-108m、Eu-152、Eu-154)

CP 核種の主要な生成機構は原子炉材料中の安定同位体の放射化である。以下に代表的な CP 核種の生成反応を示す。



これらの CP 核種は不揮発性、不溶解性を示し、原子炉の運転条件下において系統流体の流動とともに固体廃棄物の表面に付着する。このため、CP 核種は Co-60 を Key 核種として検討した。

(5) FP 核種 (Sr-90、Tc-99、Sn-126、I-129、Cs-137、Eu-154)

FP 核種の主要な生成機構は原子炉燃料である U 及び Pu の核分裂反応である。これらの放射性核種は原子炉の運転条件下において不揮発性、不溶解性を示し、系統流体の流動とともに固体廃棄物の表面に付着する。FP 核種は Cs-137 を Key 核種として検討することとした。

なお、Tc-99 及び Eu-154 については原子炉構成材料中の不純物の放射化が支配的であるが、U 及び Pu の核分裂反応でも生成されることから FP 核種としても検討することとした。

(6) α 線放出核種 (U-233+234、U-238、Pu-238、Pu-239+240、Pu-241、Am-241、Am-243、Cm-244)

α 線放出核種の主な生成機構は原子炉燃料である U 及び Pu、原子炉構造材中に含まれる微量な U 元素の熱中性子捕獲及びその壊変等である。これら α 線放出核種は原子炉の運転条件下において不揮発性、不溶解性を示し、FP 各種同様、系統流体の流動とともに固体廃棄物の表面に付着する。原子炉燃料に由来する α 線放出核種は、同じ生成起源である Cs-137 を Key 核種として検討した。

3.1.2 相関関係の確認

放射性核種の生成機構、移行挙動及びこれまでの検討で得られた知見^{2,3,4)}から、 Cl-36 、 Ni-63 、 Nb-94 、 Tc-99 、 Ag-108m 、 Eu-152 及び Eu-154 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について、 Sr-90 、 Tc-99 、 Sn-126 、 I-129 、 Eu-154 、 U-233+234 、 U-238 、 Pu-238 、 Pu-239+240 、 Pu-241 、 Am-241 、 Am-243 、及び Cm-244 については同様の由来を持つ Cs-137 について、有意な放射能濃度データに基づき、相関係数の確認、t 検定による確認、放射能濃度相関図の確認を行った。

(1) Co-60 との関係について

相関関係の算出が可能な有意な放射能データが3点以上得られた放射性核種は Ni-63 、 Tc-99 、 Eu-152 、 Eu-154 であった。これらの放射性核種について相関関係の確認を行った。

a) 相関係数による確認

相関係数の算出と確認結果を表 3.1 に、概要を以下に示す。

- ・ Ni-63 は Co-60 と強い相関がある。
- ・ Tc-99 及び Eu-152 は Co-60 と弱い相関がある。
- ・ Eu-154 は Co-60 と相関がない。

b) 無相関検定 (t 検定) による相関係数の有意性の確認

t 検定による確認の結果を表 3.2 に、概要を以下に示す。

・ いずれの核種も Co-60 との相関関係が成立しない。 Ni-63 は Co-60 と相関係数 0.79 で強い相関があるにもかかわらず、サンプル数が 8 と小さいため、t 検定による確認では相関があると判断できず、帰無仮説を棄却できなかった。

c) 放射能濃度相関図の確認

放射能濃度相関図による確認の結果、 Ni-63 は Co-60 との相関傾向が見られた。

(2) Cs-137 との関係について

相関係数の算出が可能な有意な放射能データが3点以上得られた放射性核種は Sr-90 、 Tc-99 、 I-129 、 Eu-154 、 U-233+234 、 U-238 、 Pu-238 、 Pu-239+240 、 Pu-241 、 Am-241 及び Cm-244 であった。これらの放射性核種について相関関係の確認を行った。

a) 相関係数の確認

相関係数の算出と確認結果を表 3.1 に、概要を以下に示す。

- ・ U-238 及び Pu-241 は Cs-137 と弱い相関性がある。
- ・ Sr-90 、 Tc-99 、 I-129 、 Eu-154 、 U-233+234 、 Pu-238 、 Pu-239+240 、 Am-241 及び Cm-244 は Cs-137 と強い相関性がある。

b) t 検定による確認

t 検定による確認の結果を表 3.2 に、概要を以下に示す。

- ・ Tc-99、U-238 及び Pu-241 は Cs-137 との相関関係が成立しない。
- ・ Sr-90、I-129、Eu-154、U-233+234、Pu-238、Pu-239+240、Am-241 及び Cm-244 は Cs-137 との相関関係が成立した。

c)放射能濃度相関図の確認

放射能濃度相関図による確認の結果を以下に示す。

- ・ Sr-90、Tc-99、I-129、Eu-154、U-233+234、U-238、Pu-238、Pu-239+240、Am-241 及び Cm-244 は Cs-137 との相関傾向が見られた。
- ・ Tc-99 は検出されたデータ数が少ないが、Cs-137 との相関傾向が見られた。
- ・ Pu-241 は Cs-137 との相関関係が見られなかった。

Ni-63 は Co-60 との相関関係が見られるものの、t 検定では相関が得られなかった。また、Tc-99、U-238 と Cs-137 も放射能濃度相関図では相関が見られるものの、t 検定では相関が得られなかった。この原因を確認するため、相関関係の確認に必要なデータ数と相関係数を算出した。その結果を図 3.1 に示す。Pu-241 は Cs-137 との相関が見られなかった。これは他の核種に比べて Pu-241 の放射能濃度の広がりが少ないためだと考えられる。図 3.1 の相関関係の確認に必要なデータ数から確認すると Ni-63、Tc-99、U-238 は 6～16 点の追加のデータが得られれば、t 検定で相関が得られる可能性がある。

3.1.3 スケーリングファクタの設定

スケーリングファクタの設定は、Key 核種と相関関係が成立した Sr-90、I-129、Eu-154、U-233+234、Pu-238、Pu-239+240、Am-241 及び Cm-244 を対象にデータの分布形態の確認を行い、データの分布形態に合わせて設定した。放射能濃度ごとの割合によってデータの分布形態を確認し、結果を図 3.2-1～図 3.2-8 に示す。またデータの分布形態が正規分布である場合は算術平均、対数正規分布である場合は幾何平均でスケーリングファクタを算出することとした。また、発電所廃棄体の放射能濃度評価では、データの分布形態によらず保守的な算術平均でスケーリングファクタを算出していることから、参考値として算術平均でもスケーリングファクタを算出した。

(1) データの分布形態の確認

データの分布形態の確認は評価対象核種と Key 核種の放射能濃度比のデータを正規確率紙及び対数正規確率紙にプロットすることで行った。正規確率紙を図 3.3-1～図 3.3-8 に、対数正規確率紙を図 3.4-1～図 3.4-8 に示す。

確認の結果、正規確率紙にプロットしたデータは直線的に並ばず、対数正規確率紙にプロットしたデータが直線的に並んだことから、放射能濃度データは対数正規分布であると推定される。

(2) スケーリングファクタの算出

スケーリングファクタの算出は、データの分布形態が対数正規分布であることから幾何平均を用いた。参考値として標準偏差と算術平均のスケーリングファクタも同様に算出し、結果を表 3.3 に示した。また、Key 核種と評価対象核種との相関図とスケーリングファクタ値を図 3.5-1～図 3.5-8 に示す。

3.2 平均放射能濃度法の適用性の検討

平均放射能濃度法の適用性は、3.1 節で t 検定で相関が確認できなかった H-3、C-14、Cl-36、Ni-63、Mo-93、Nb-94、Tc-99、Ag-108m、Sn-126、Eu-152、U-238、Pu-241 及び Am-243 を対象に検討した。これらの放射性核種の中には、本来 Key 核種の存在する放射性核種が含まれている。しかしながら、今後の SF 法成立を目指した試料採取を継続する判断の指標とするため、適用性を検討した。なお、本検討に用いた放射化学分析用の試料は、金属廃棄物の中でも比較的汚染のレベルが高い放射性廃棄物から採取したものである。そのため、取得した放射能濃度データは本検討における評価対象核種の放射能濃度分布を保守的に代表するものであると考えられる。

3.2.1 平均放射能濃度の算出

対象とした H-3、C-14、Cl-36、Ni-63、Mo-93、Nb-94、Tc-99、Ag-108m、Sn-126、Eu-152、U-238、Pu-241 及び Am-243 の放射能濃度データについて平成 31 年 3 月 31 日時点の値に減衰補正し、2.2.2 項の式を用いて平均放射能濃度を算出した。表 3.4 に算出した平均放射能濃度を示す。算出した平均放射能濃度は、基本的には本検討において放射化学分析用の試料に限定されるものである。一方、平均放射能濃度法は保管廃棄物の金属廃棄物全体に適用する必要があることから継続して確認分析を実施していく必要がある。

3.2.2 平均放射能濃度の裕度の確認

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決定される。このため本検討では、基準線量相当濃度に対する平均放射能濃度の裕度が 1 以上となることを確認した。表 3.4 に確認した裕度を示す。

Key 核種である Co-60 と Cs-137 の放射能濃度を指標 (X 軸) とした放射能濃度分布図を作成した。ここで、放射能濃度分布図の放射能濃度データは平成 31 年 3 月 31 日現在に減衰補正したものをを用いた。図 3.6-1～図 3.6-13 に Co-60 の放射能濃度を指標とした放射能濃度分布図を、図 3.7-1～図 3.7-13 に Cs-137 の放射能濃度を指標とした放射能濃度分布図を示す。今回はトレンチ処分想定 of 基準線量相当濃度を利用し平均放射能濃度の裕度を確認したが、Tc-99、Mo-93、Sn-126 及び Am-243 は本来、ピット処分想定 of 重要核種である。表 3.4 にピット処分想定 of 基準

線量相当濃度で確認した裕度を示す。図 3.8-1～図 3.8-4 に Co-60 放射能濃度指標としたピット処分想定放射能濃度散布図を、図 3.9-1～図 3.9-4 に Cs-137 の放射能濃度を指標としたピット処分想定放射能濃度散布図を示す。

3.2.3 平均放射能濃度法の適用性と考察

表 3.4 に示した平均放射能濃度の裕度を確認した結果、算術平均を用いた平均放射能濃度の裕度はいずれの核種でも 1 以上となり、平均放射能濃度法が適用できる見込みが得られた。

3.3 今後の検討事項

本検討において、放射能濃度評価方法の基幹となるスケーリングファクタ法と平均放射能濃度法の適用性をそれぞれの方法別に検討してきたが、実際の放射能濃度評価方法への適用にあたっては、第二種埋設規則の放射能濃度に係る項目の要求事項を満足することについて、多数の分析データが必要となる。今後は、廃棄体確認における放射能濃度の算出を模擬したシミュレーションを試行するなど、放射化学分析以外のアプローチについても検討する必要がある。

また今回、Cl-36、Mo-93、Ag-108m、Sn-126 及び Am-243 については検出下限値以上の測定データが得られなかった。今後も放射能濃度データの拡充を図ると共に、検出されない対象核種に対する放射能濃度評価についても検討する必要がある。

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、照射後試験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、ホットラボの保管廃棄物のうち金属廃棄物を対象とした SF 法と平均放射能濃度法の適用性の検討を行った。SF 法と平均放射能濃度法の適用性を取りまとめた結果を表 4.1 に示す。

SF 法の適用性の検討の結果、Sr-90、I-129、Eu-154、U233+234、Pu-238、Pu-239+240、Am-241 及び Cm-244 は Key 核種との相関関係が成立し、SF 法が適用できる見込みが得られた。

現在得られている相関係数から相関関係の確認に必要なデータ点数を算出した結果、Ni-63、Tc-99、Eu-152、U-238 は追加の測定データが得られれば SF 法が適用できる可能性がある。

Cl-36、Mo-93、Ag-108m、Sn-126、Am-243 は、検出下限値以上の測定データが得られず相関関係の確認に多数の追加データが必要となる。このため、SF 法の適用には、引き続き試料採取及び放射化学分析を行う必要がある。

Key 核種との相関が成立しなかった核種を対象に平均放射能濃度法の適用性を検討し、H-3、C-14、Cl-36、Ni-63、Mo-93、Nb-94、Tc-99、Ag-108m、Sn-126、Eu-152、U-238、Pu-241、Am-243 の平均放射能濃度の裕度を評価したところ、平均放射能濃度法が適用できる見込みが得られた。

本検討で算出した平均放射能濃度は、基本的に放射化学分析用の試料に限定されるものであり、今後更に、保管廃棄物中の金属廃棄物全体に適用できる平均放射能濃度を検討していく必要がある。また、研究施設等廃棄物の埋設処分場の最大放射能濃度が決定された後に、最大放射能濃度に対する裕度を改めて評価し、平均放射能濃度の適用性を再度確認する必要がある。

平均放射能濃度法の適用性が確認された核種には、Ni-63、Tc-99、Eu-152 及び U-238 のように Key 核種とある程度の相関があり、多数の追加データを必要とするものの SF 法が適用しうる放射性核種を含んでいることから、他の方法も含め合理的な放射能濃度評価方法を選択する必要がある。

Tc-99、Mo-93、Sn-126、Am-243 はピット処分が想定されている核種であり、放射化汚染が含まれる試料の検出限界値が高く、過度に保守的な平均放射能濃度であると考えられる。本検討では参考値扱いとした。

謝 辞

本報告書を執筆するにあたり、ホットラボ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、金澤 真吾氏に感謝の意を表す。また、本報告書をまとめるにあたり、貴重なご意見をいただいた敦賀廃止措置実証部門新型転換炉原型炉ふげん安全・品質保証部安全管理課の林 宏一氏に感謝の意を表す。

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, 研究施設等から発生する均質・均一固化体に対する放射能濃度評価方法の検討, JAEA-Technology 2011-028, 2011, 66p.
- 3) 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.
- 4) 辻 智之, 坂井 章浩, 出雲 沙理他, JPDR 保管廃棄物に対する放射能濃度評価方法の検討(2), JAEA-Technology 2015-009, 2015, 46p.
- 5) 林 宏一, 出雲 沙理, 仲田 久和他, JRR-2 及び JRR-3 保管廃棄物に対する放射能濃度評価方法の検討, JAEA-Technology 2018-001, 2018, 66p.
- 6) 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, 193p.
- 7) 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発生施設毎の重要核種の予備評価-, JAEA-Technology 2010-021, 2010, 152p.
- 8) 前川 功一, 河合 研一, 得津 康義, 経済・経営系のためのよくわかる統計学, 朝倉書店, 2014, 168p.
- 9) 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.
- 10) (公財) 原子力安全技術センター, 平成 8 年度放射性廃棄物処理処分対策調査研究 調査報告書 雑固体廃棄物の確認方法に関する調査研究 (資料編), 1997.
- 11) 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, 429p.
- 12) 千田 太詩, 杉山 大輔, 透過型拡散実験によるセメント硬化体中における有機炭素の拡散挙動検討, 電力中央研究所報告, L05012, 2006, 16p.

表 2.1 分析核種と予備選定した重要核種の一覧

No	放射性核種	分析核種	予備選定された重要核種				備考
			トレンチ処分		ピット処分		
			FP核種等	放射化核種	FP核種等	放射化核種	
1	H-3	○	○	○			
2	C-14	○		○		○	
3	Cl-36	○				○	
4	Co-60	○		○			
5	Ni-59					○	Ni-63との生成比の理論計算により評価が可能
6	Ni-63	○		○		○	
7	Sr-90	○	○		○		
8	Nb-94	○		○		○	
9	Mo-93	○				○	
10	Tc-99	○			○		
11	Ag-108m	○					比較的分析が容易な核種である
12	Sn-126	○			○		
13	I-129	○					濃度上限値報告書で選定されている
14	Cs-137	○	○		○		
15	Eu-152	○					比較的分析が容易な核種である
16	Eu-154	○	○				
17	U-233	○			○		スペクトルの分離が困難である
18	U-234	○	○		○		
19	U-238	○			○		
20	Pu-238	○	○		○		
21	Pu-239	○	○		○		スペクトルの分離が困難である
22	Pu-240	○			○		
23	Pu-241	○	○		○		
24	Am-241	○			○		
25	Am-243	○			○		
26	Cm-244	○			○		

表 3.1 相関係数の算出結果

放射性核種		データ数	相関関係	
		(検出数/分析数)		
Ni-63	Co-60	8/15	0.79	強い相関がある
Tc-99		4/15	-0.36	弱い相関がある
Eu-152		5/15	0.35	弱い相関がある
Eu-154		10/15	0.09	ほとんど相関がない
Sr-90	Cs-137	15/15	0.94	強い相関がある
Tc-99		4/15	0.94	強い相関がある
I-129		10/15	0.92	強い相関がある
Eu-154		13/15	0.89	強い相関がある
U-233+234		15/15	0.70	強い相関がある
U-238		12/15	0.62	中程度の相関がある
Pu-238		15/15	0.86	強い相関がある
Pu-239+240		15/15	0.93	強い相関がある
Pu-241		5/5	-0.31	弱い相関がある※
Am-241		15/15	0.85	強い相関がある
Cm-244		14/15	0.75	強い相関がある

※負の相関である。

*1 検出数は評価対象核種と Key 核種が共に有意なデータ数を示す。

*2 データ数が 4 点以上の分析結果を示す。

表 3.2 t 検定による相関係数の有意性確認結果

放射性核種		t ₀ 値	t値	Key核種との相関関係
			(t(n-2,1%))	
Ni-63	Co-60	3.12	3.71	成立しない
Tc-99		-0.39	63.66	成立しない
Eu-152		0.65	5.84	成立しない
Eu-154		0.32	3.36	成立しない
Sr-90	Cs-137	9.69	3.01	成立する
Tc-99		3.76	9.92	成立しない
I-129		6.62	3.36	成立する
Eu-154		6.38	3.11	成立する
U-233+234		3.56	3.01	成立する
U-238		2.48	3.17	成立しない
Pu-238		6.07	3.01	成立する
Pu-239+240		8.80	3.01	成立する
Pu-241		-0.56	5.84	成立しない
Am-241		5.82	3.01	成立する
Cm-244	3.92	3.05	成立する	

*1 危険率を 1%と設定し、判定基準は $t_0 \geq t(n-2,1\%)$ であれば帰無仮説が棄却され、相関関係を有すると判断した。

表 3.3 スケーリングファクタの算出結果

放射性核種		分布形態	算出方法	算出結果	標準偏差	参考値	参考値
						算術平均	標準偏差
Sr-90	Cs-137	対数正規分布	幾何平均	3.72E-01	3.46E-01	5.21E-01	3.78E-01
I-129		対数正規分布	幾何平均	5.83E-07	1.99E-06	1.33E-06	6.41E-07
Eu-154		対数正規分布	幾何平均	6.72E-03	1.24E-02	1.25E-02	1.38E-02
U-233+234		対数正規分布	幾何平均	4.85E-05	1.01E-03	3.27E-04	1.05E-03
Pu-238		対数正規分布	幾何平均	2.66E-02	3.09E-02	4.26E-02	3.51E-02
Pu-239+240		対数正規分布	幾何平均	8.00E-03	1.32E-02	1.20E-02	1.38E-02
Am-241		対数正規分布	幾何平均	2.38E-02	5.13E-02	4.32E-02	5.51E-02
Cm-244		対数正規分布	幾何平均	1.04E-02	3.21E-02	2.80E-02	3.69E-02

* 試料発生日時点の値を示す。

表 3.4 平均放射能濃度の算出結果

放射性核種	データ数	基準線量相当濃度 (Bq/g)	基準線量相当濃度 (Bq/t)	平均放射能濃度 (Bq/g)	平均放射能濃度の裕度	参考値	
	(検出数/分析数)					幾何平均 (Bq/g)	平均放射能濃度の裕度
トレンチ想定							
H-3	3/15	5.30E+02	5.30E+08	3.71E-02	14274.46	1.28E-02	41292.95
C-14	3/15	2.20E+01	2.20E+07	9.97E-03	2206.50	7.05E-03	3120.22
Cl-36	0/15	1.40E+00	1.40E+06	3.21E-03	435.49	2.32E-03	603.93
Ni-63	8/15	1.60E+03	1.60E+09	1.50E+00	1067.87	3.14E-01	5091.69
Mo-93	0/5	1.10E+01	1.10E+07	3.20E-02	343.40	2.78E-02	395.72
Nb-94	2/15	1.70E+00	1.70E+06	1.16E-02	145.98	8.08E-03	210.43
Tc-99	4/15	1.10E+00	1.10E+06	5.09E-01	2.16	7.62E-03	144.31
Ag-108m	0/15	1.70E+00	1.70E+06	1.39E-02	122.41	9.14E-03	186.05
Sn-126	0/5	1.30E+00	1.30E+06	3.73E-01	3.48	2.94E-01	4.43
Eu-152	5/15	3.20E+01	3.20E+07	5.78E+00	5.54	1.26E-01	254.07
U-238	12/15	1.70E+00	1.70E+06	8.72E-03	194.96	6.96E-04	2442.08
Pu-241	5/5	7.20E+02	7.20E+08	1.85E+01	38.95	1.15E+01	62.54
Am-243	0/5	8.30E+00	8.30E+06	2.75E-01	30.14	1.01E-01	82.56
ピット想定							
Mo-93	0/5	2.60E+02	2.60E+08	3.20E-02	8116.73	2.78E-02	9353.37
Tc-99	4/15	2.40E+01	2.40E+07	5.09E-01	47.12	7.62E-03	3148.52
Sn-126	0/5	3.10E+02	3.10E+08	3.73E-01	829.99	2.94E-01	1056.20
Am-243	0/5	7.90E+02	7.90E+08	2.75E-01	2869.01	1.01E-01	7858.53

* 有意な検出値に加えて検出限界値を含む放射能濃度データを平成 31 年 3 月 31 日時点の値に減衰補正してから算出した算術平均値を示す。

* 平均放射能濃度の裕度は、基準線量相当濃度／平均放射能濃度を示す。

表 4.1 放射能濃度評価法のまとめ

放射性核種	有効点数	評価方法	適応性	備考
H-3	3	平均放射能濃度法	○	
C-14	3	平均放射能濃度法	○	
Cl-36	0	平均放射能濃度法	×	検討には追加データが必要
Co-60	12	非破壊外部測定法	○	本検討対象外
Ni-63	12	平均放射能濃度法	○	
		SF法	△	検討には追加データが10点必要
Sr-90	15	SF法	○	
Nb-94	2	平均放射能濃度法	○	
Mo-93	0	平均放射能濃度法	×	検討には追加データが必要
Tc-99	4	平均放射能濃度法	○	
		SF法	△	検討には追加データが6点必要
Ag-108m	0		×	検討には追加データが多数必要
Sn-126	0		×	検討には追加データが多数必要
I-129	10	SF法	○	
Cs-137	15	非破壊外部測定法	○	本検討対象外
Eu-152	5	平均放射能濃度法	○	
		SF法	×	検討には追加データが多数必要
Eu-154	13	SF法	○	
U-233	15	SF法	○	
U-234				
U-238	12	SF法	△	検討には追加データが16点必要
		平均放射能濃度法	○	
Pu-238	15	SF法	○	
Pu-239	15	SF法	○	
Pu-240				
Pu-241	5	平均放射能濃度法	○	
		SF法	×	検討には追加データが多数必要
Am-241	15	SF法	○	
Am-243	0	平均放射能濃度法	○	
		SF法	×	検討には追加データが多数必要
Cm-244	14	SF法	○	

適用できるものを○、適用見込みのものを△、適応できるか判断できないものを×とした。

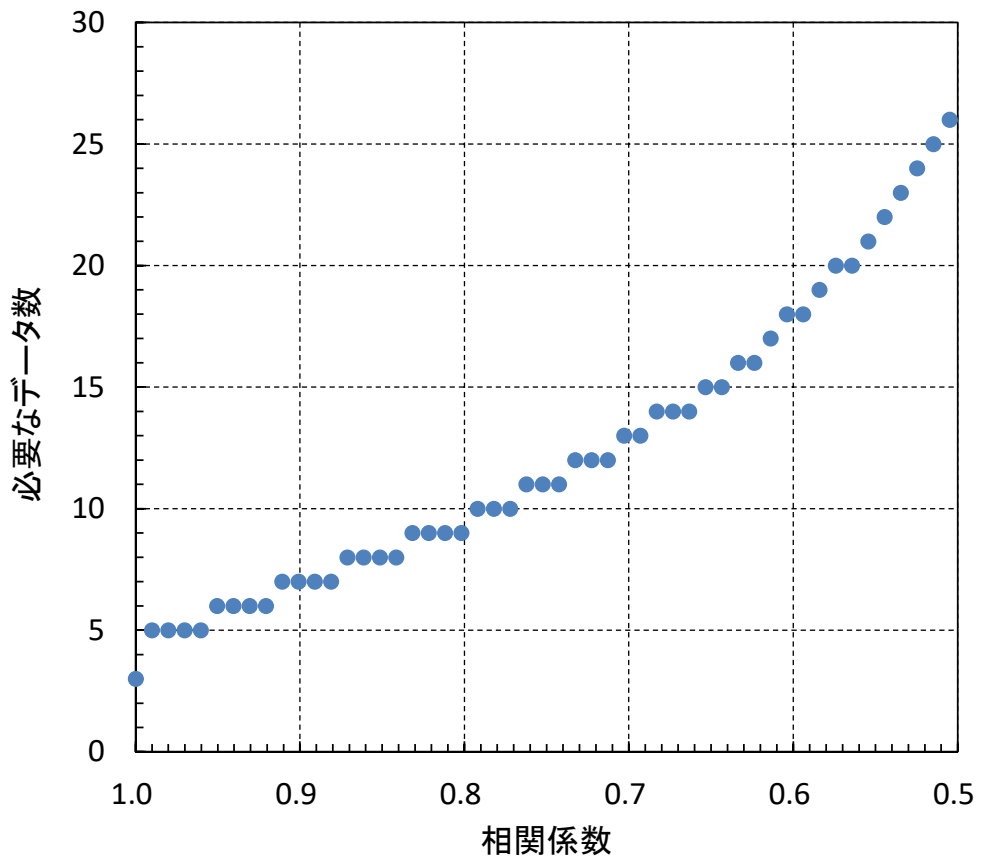


図 3.1 相関関係の確認に必要なデータ数と相関係数の関係

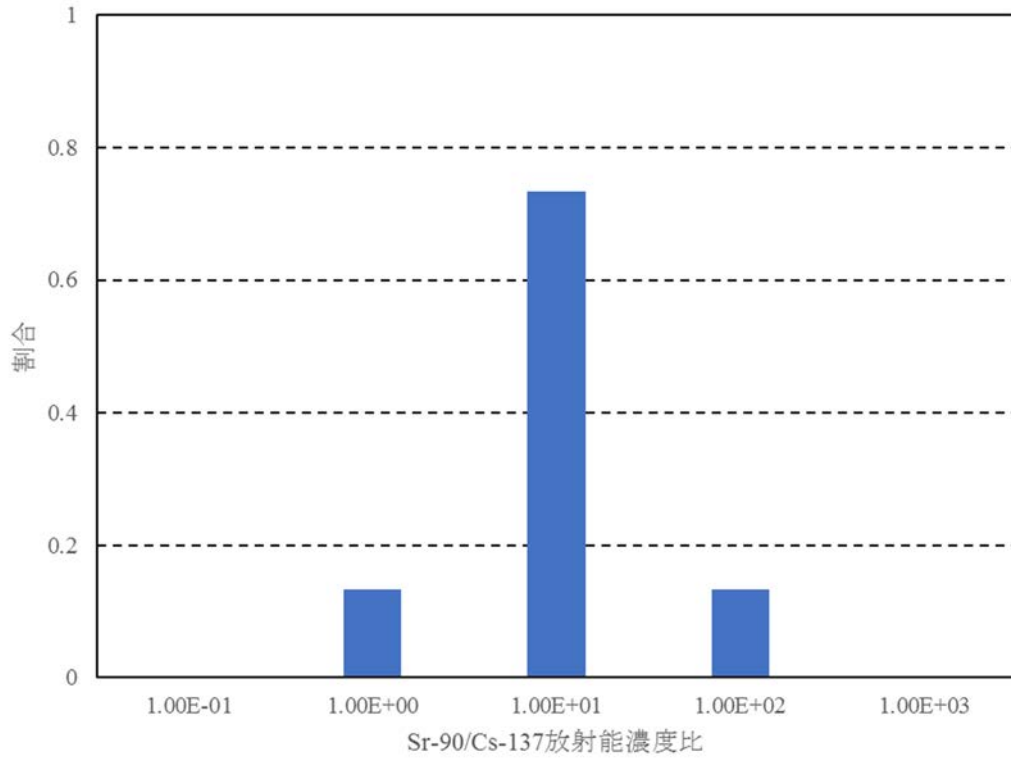


図 3.2-1 Sr-90/Cs-137 放射能濃度比の頻度分布

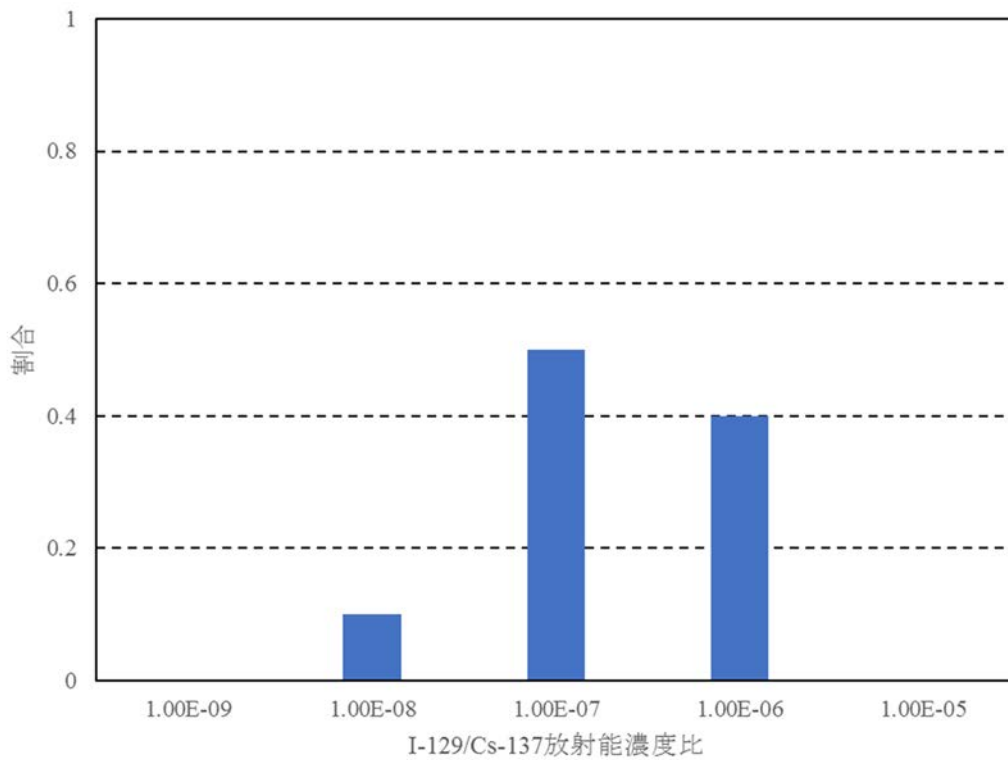


図 3.2-2 I-129/Cs-137 放射能濃度比の頻度分布

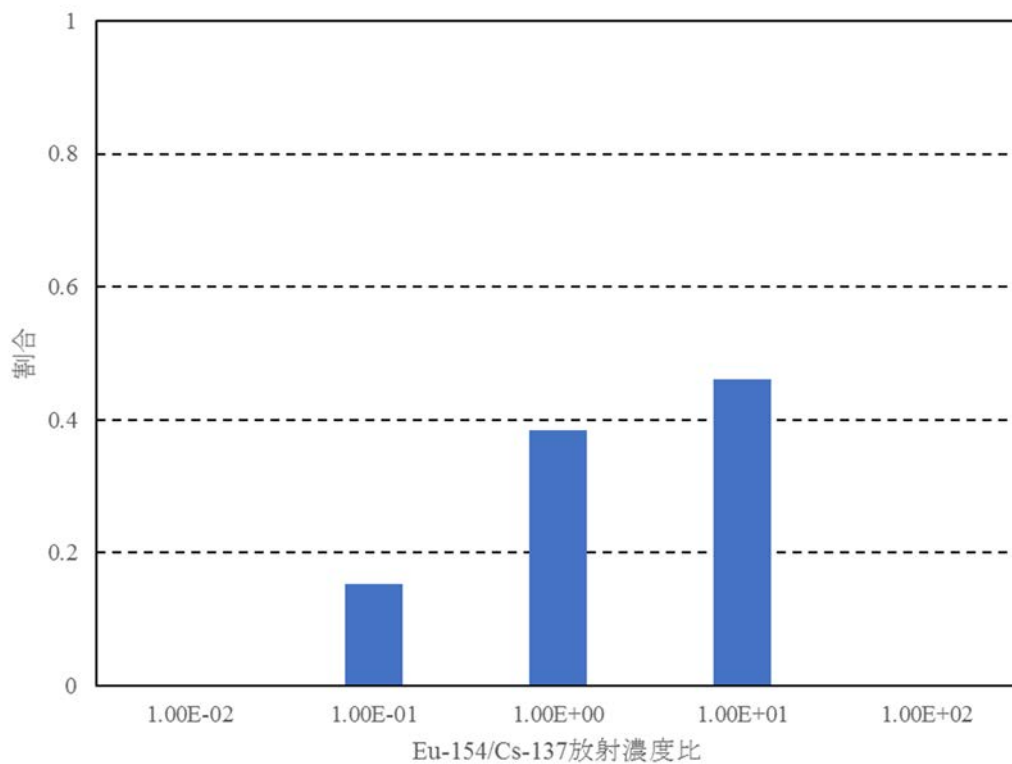


図 3.2-3 Eu-154/Cs-137 放射能濃度比の頻度分布

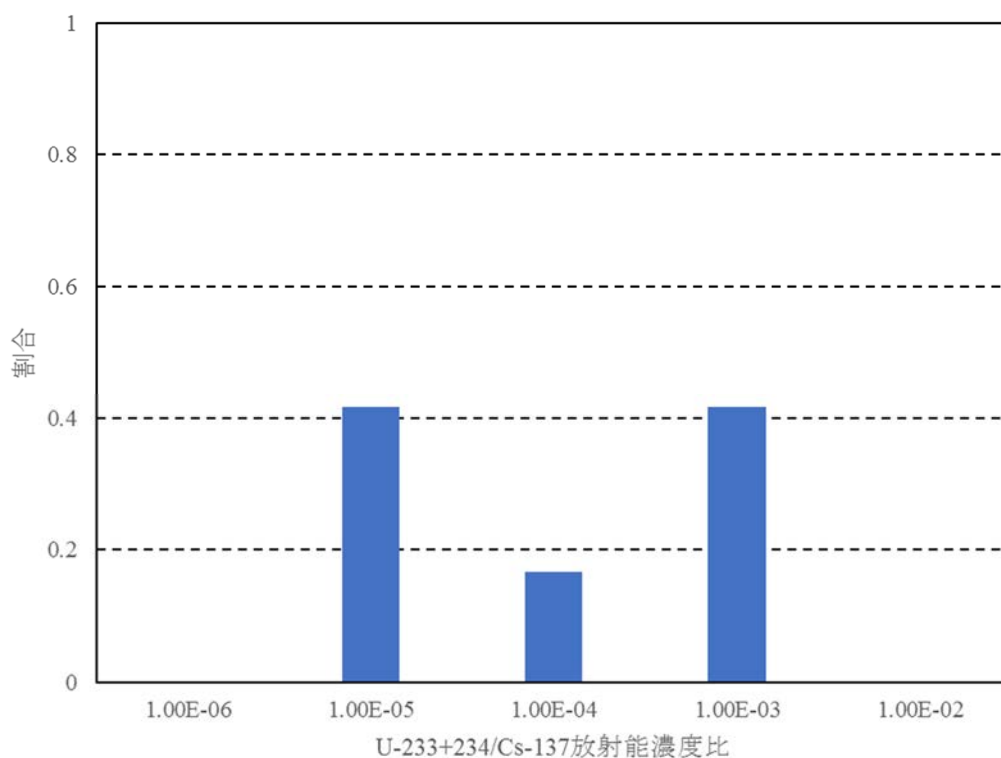


図 3.2-4 U-233+234/Cs-137 放射能濃度比の頻度分布

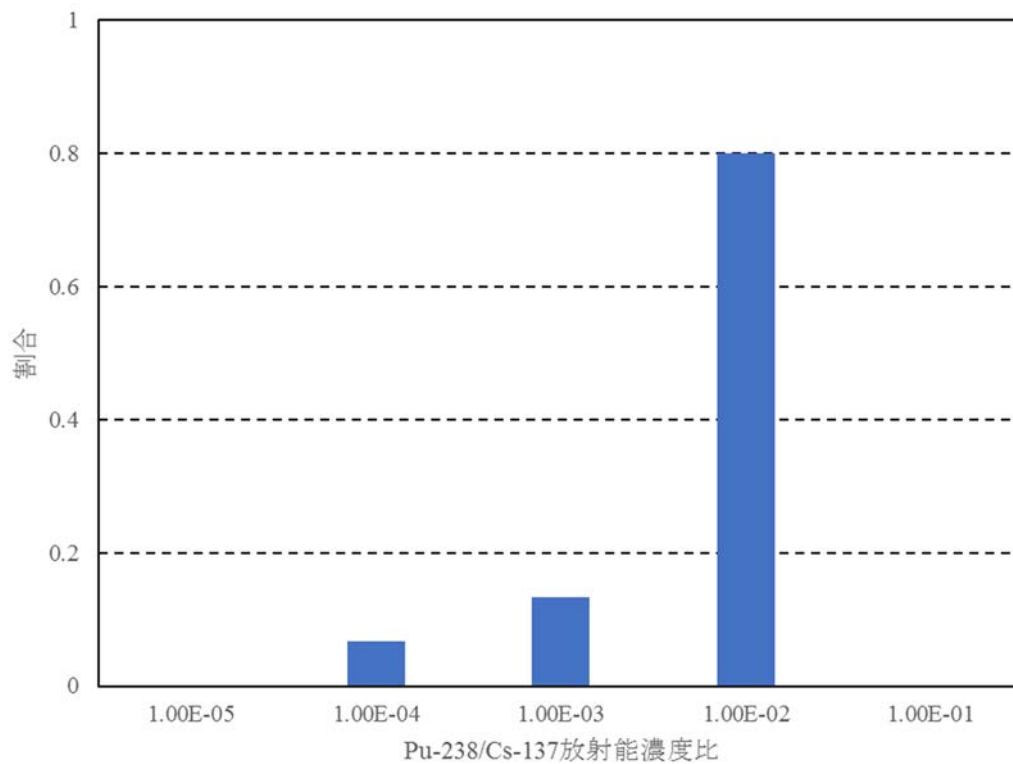


図 3.2-5 Pu-238/Cs-137 放射能濃度比の頻度分布

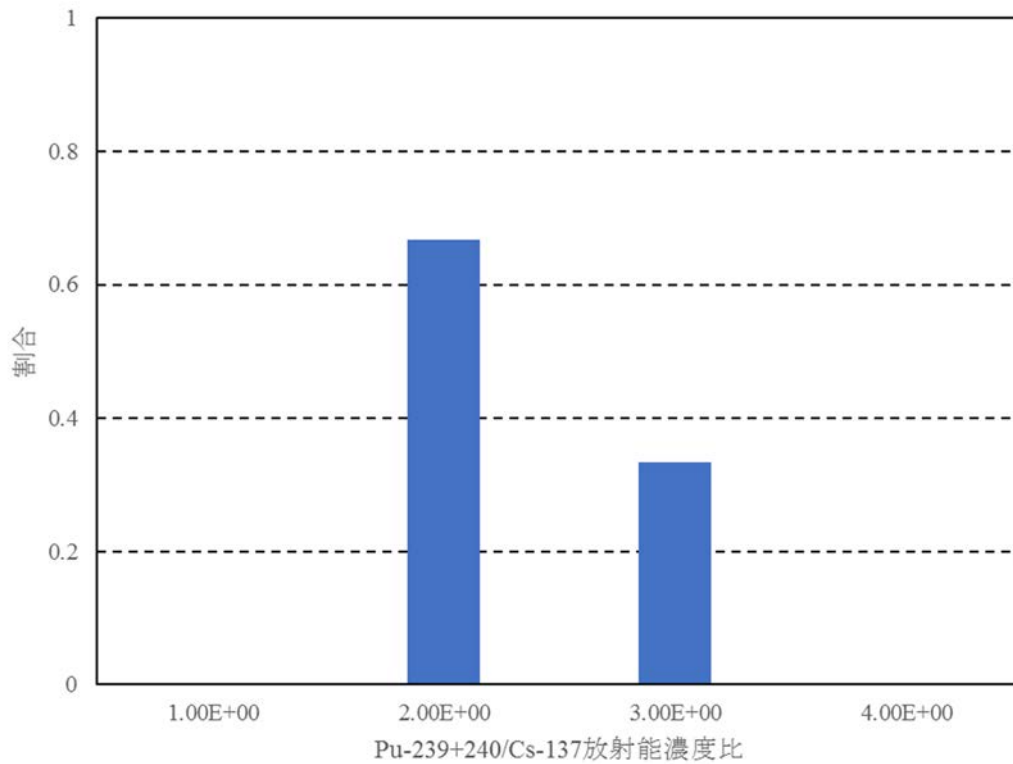


図 3.2-6 Pu-239+240/Cs-137 放射能濃度比の頻度分布

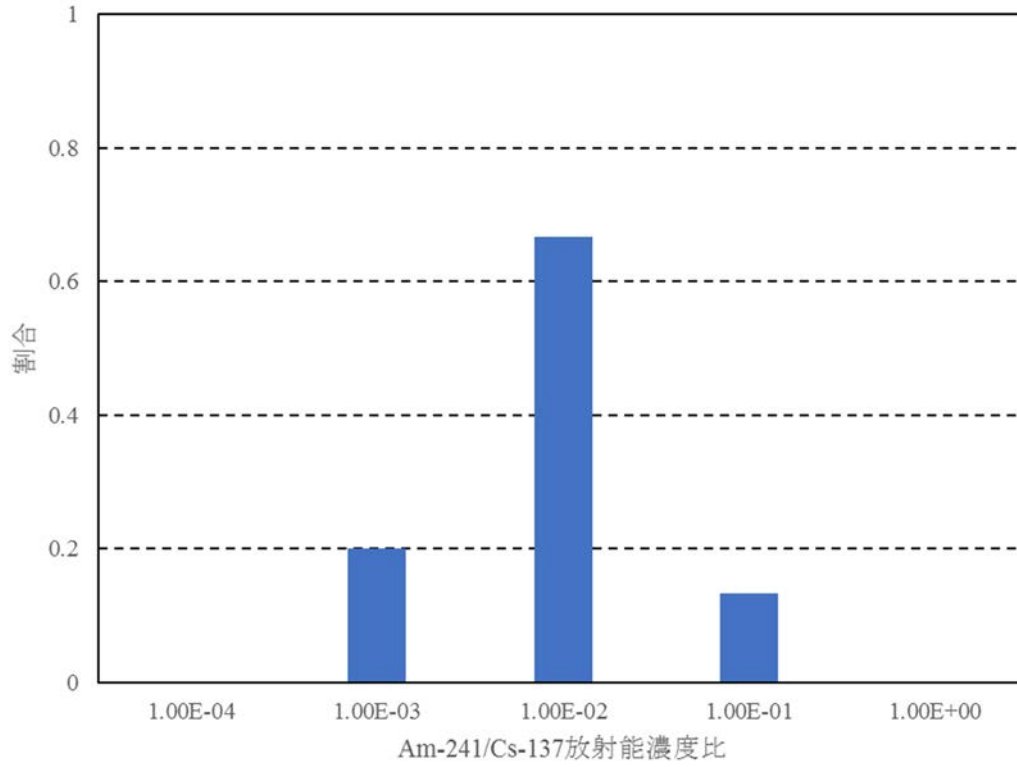


図 3.2-7 Am-241/Cs-137 放射能濃度比の頻度分布

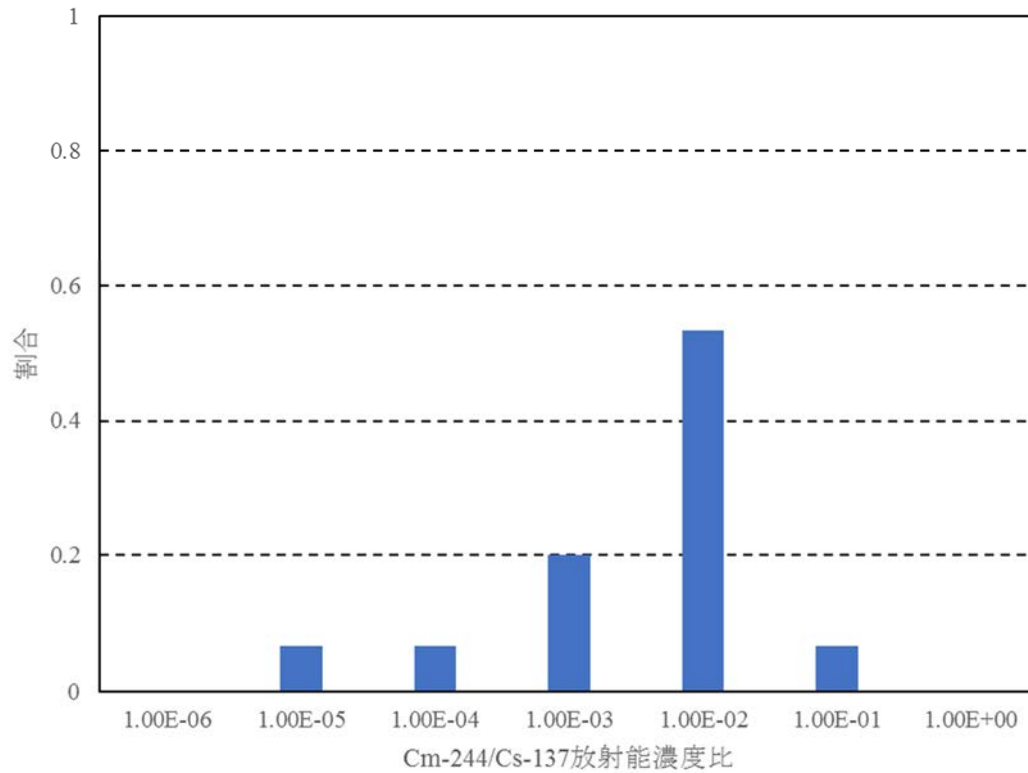


図 3.2-8 Cm-244/Cs-137 放射能濃度比の頻度分布

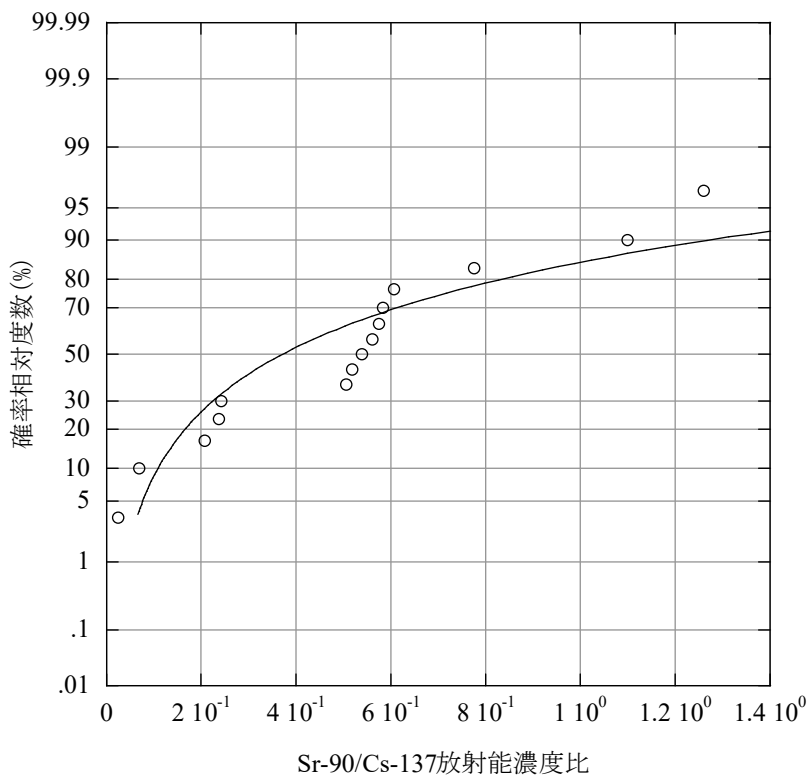


図 3.3-1 Sr-90/Cs-137 放射能濃度比データ正規確率紙

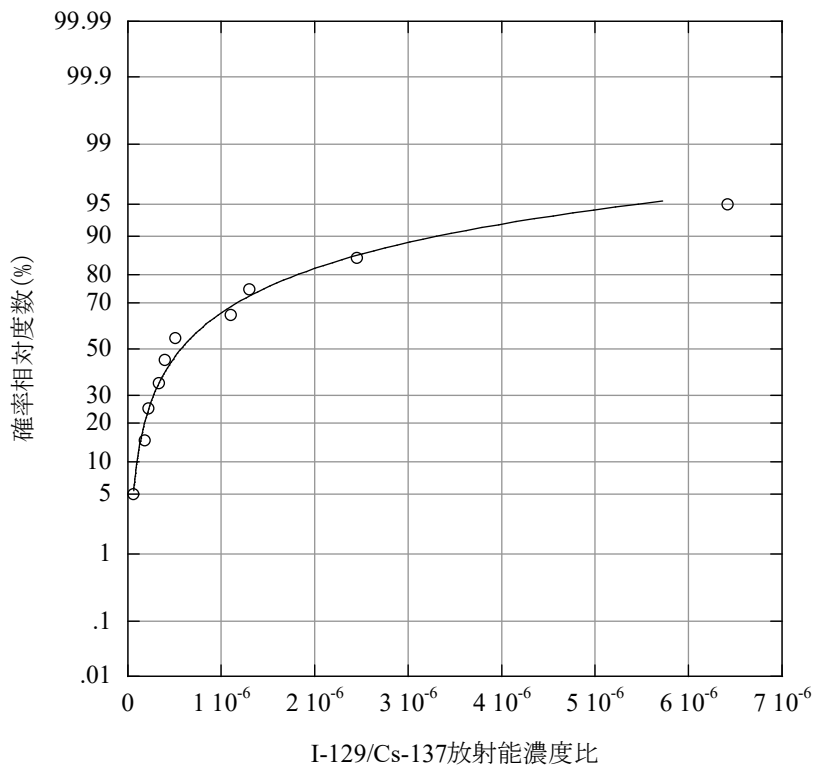


図 3.3-2 I-129/Cs-137 放射能濃度比データ正規確率紙

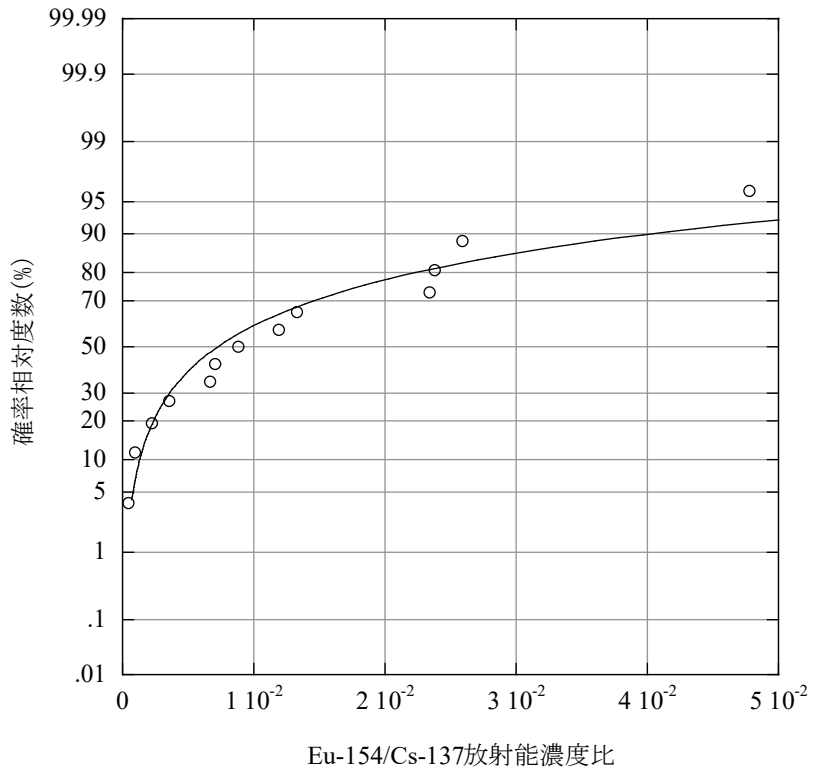


図 3.3-3 Eu-154/Cs-137 放射能濃度比データ正規確率紙

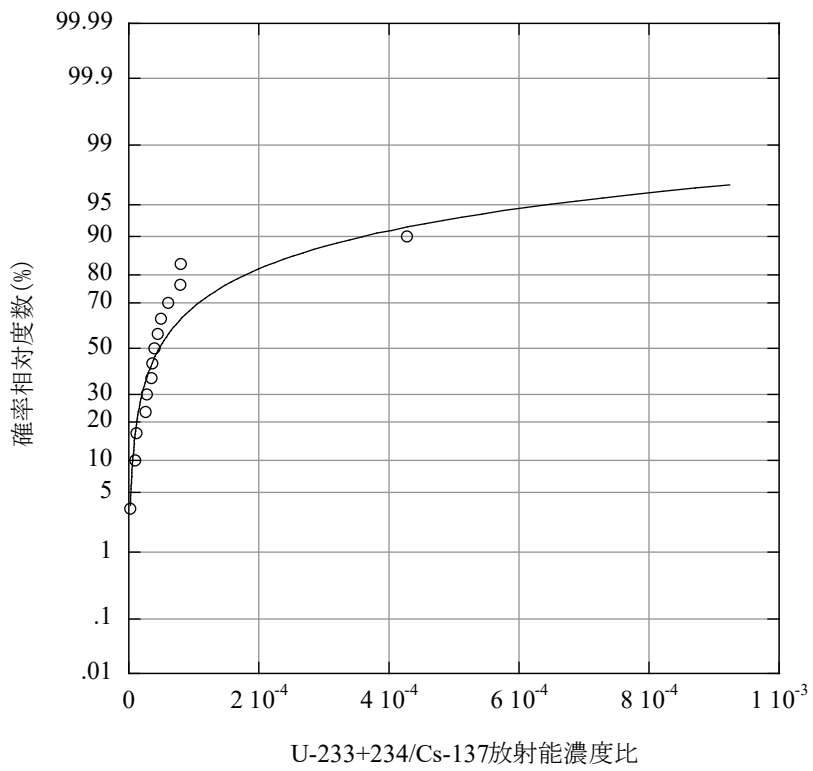


図 3.3-4 U-233+234/Cs-137 放射能濃度比データ正規確率紙

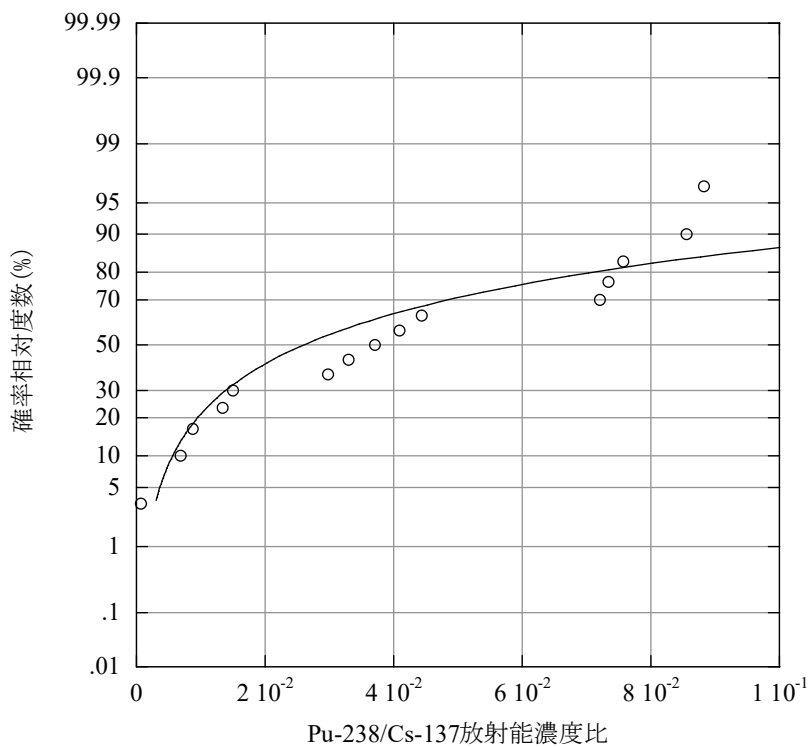


図 3.3-5 Pu-238/Cs-137 放射能濃度比データ正規確率紙

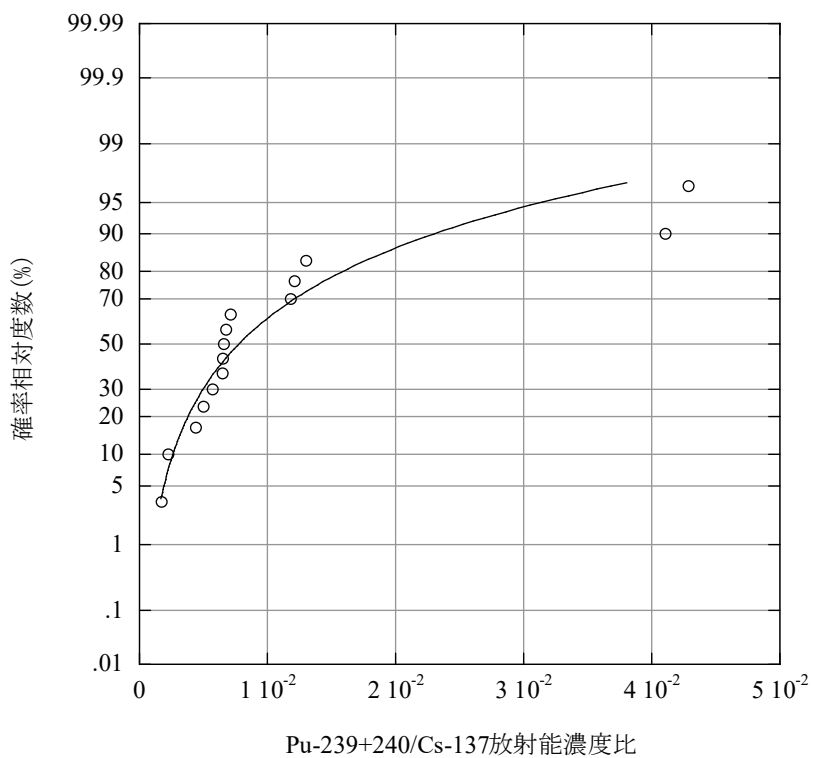
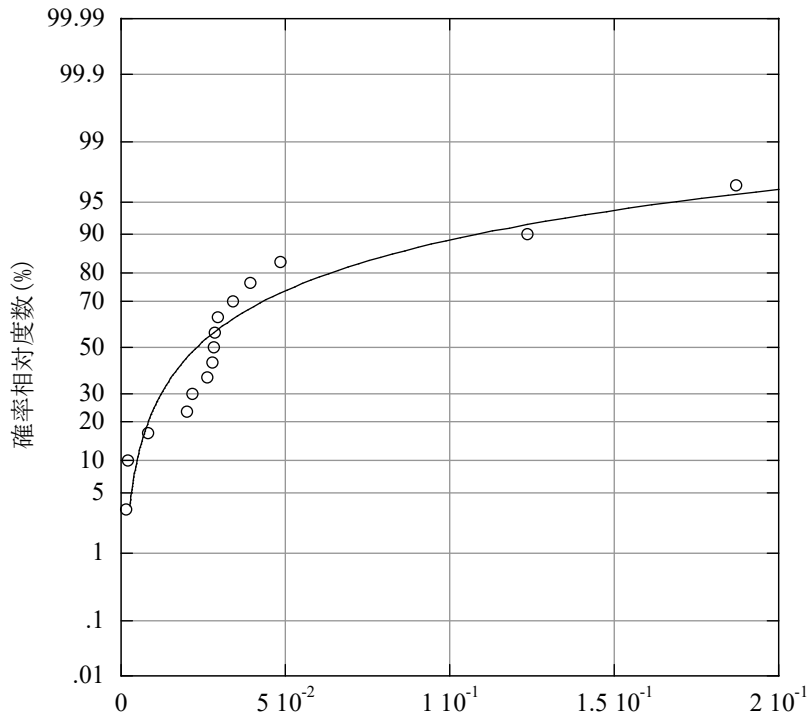
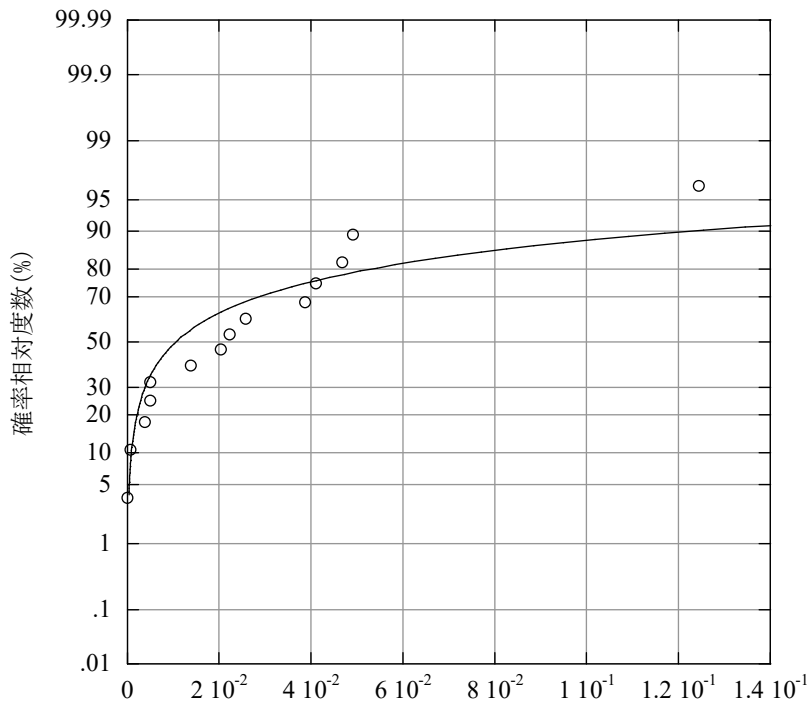


図 3.3-6 Pu-239+240/Cs-137 放射能濃度比データ正規確率紙



Am-241/Cs-137放射能濃度比

図 3.3-7 Am-241/Cs-137 放射能濃度比データ正規確率紙



Cm-244/Cs-137放射能濃度比

図 3.3-8 Cm-244/Cs-137 放射能濃度比データ正規確率紙

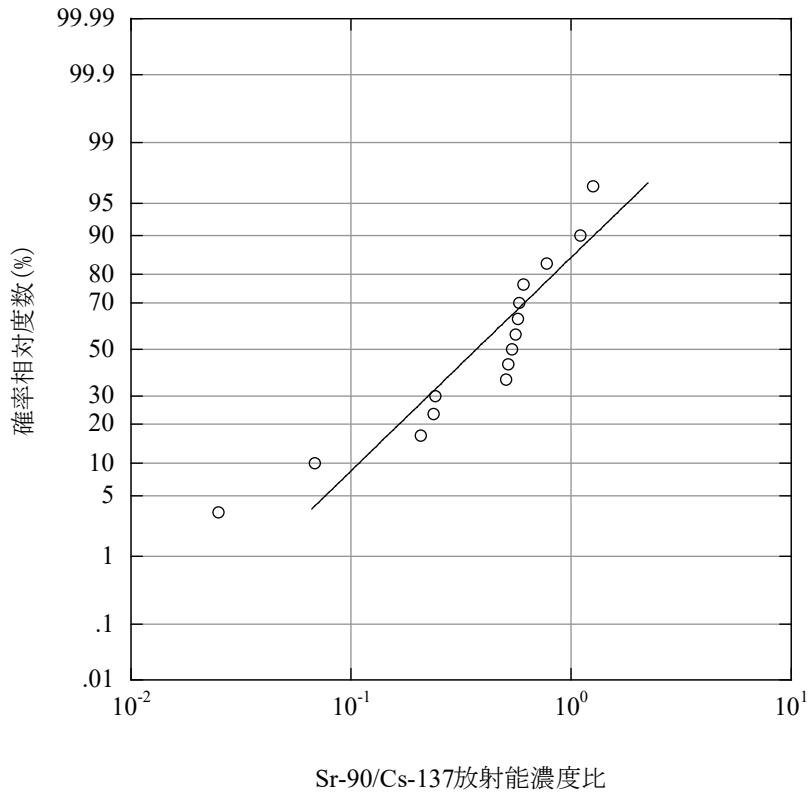


図 3.4-1 Sr-90/Cs-137 放射能濃度比データ対数正規確率紙

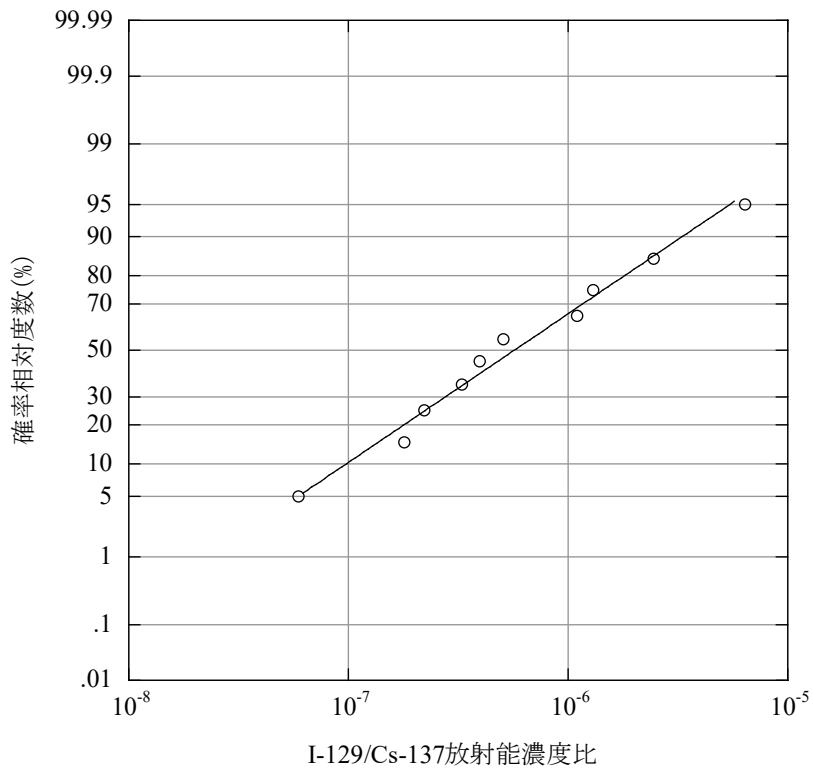


図 3.4-2 I-129/Cs-137 放射能濃度比データ対数正規確率紙

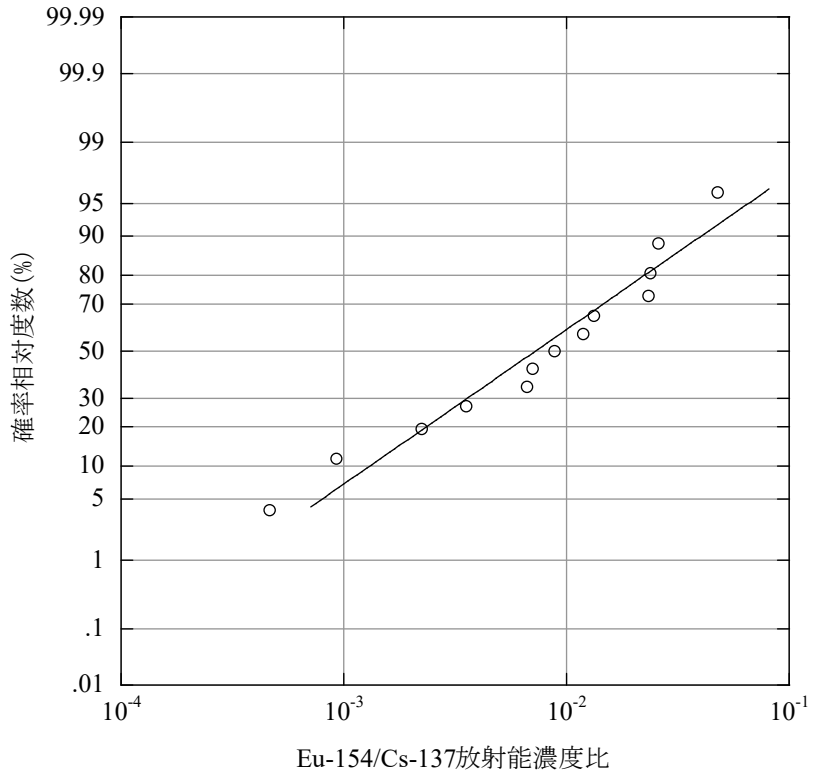


図 3.4-3 Eu-154/Cs-137 放射能濃度比データ対数正規確率紙

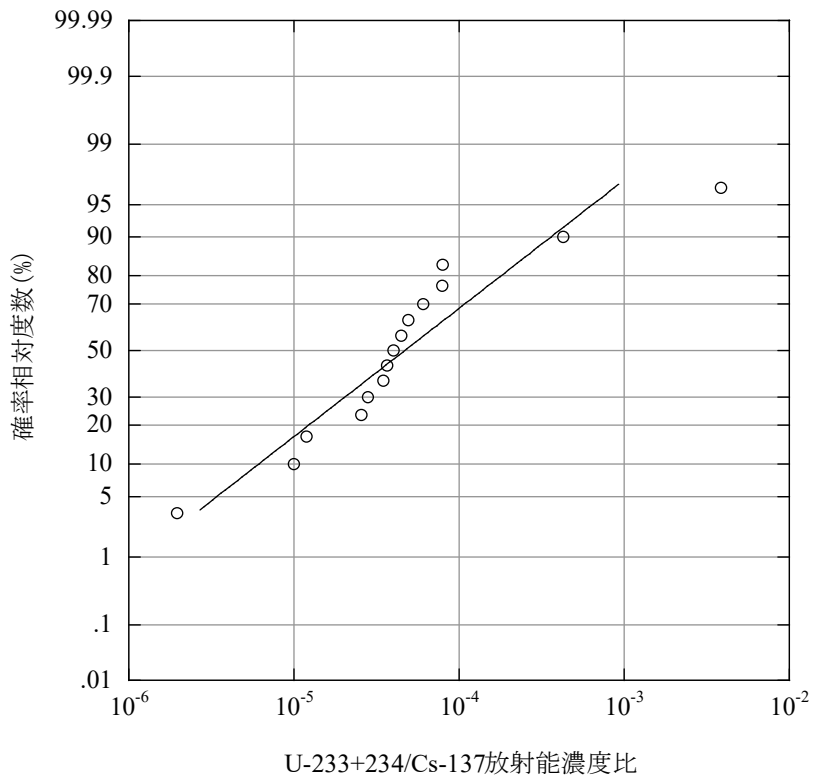


図 3.4-4 U-233+234/Cs-137 放射能濃度比データ対数正規確率紙

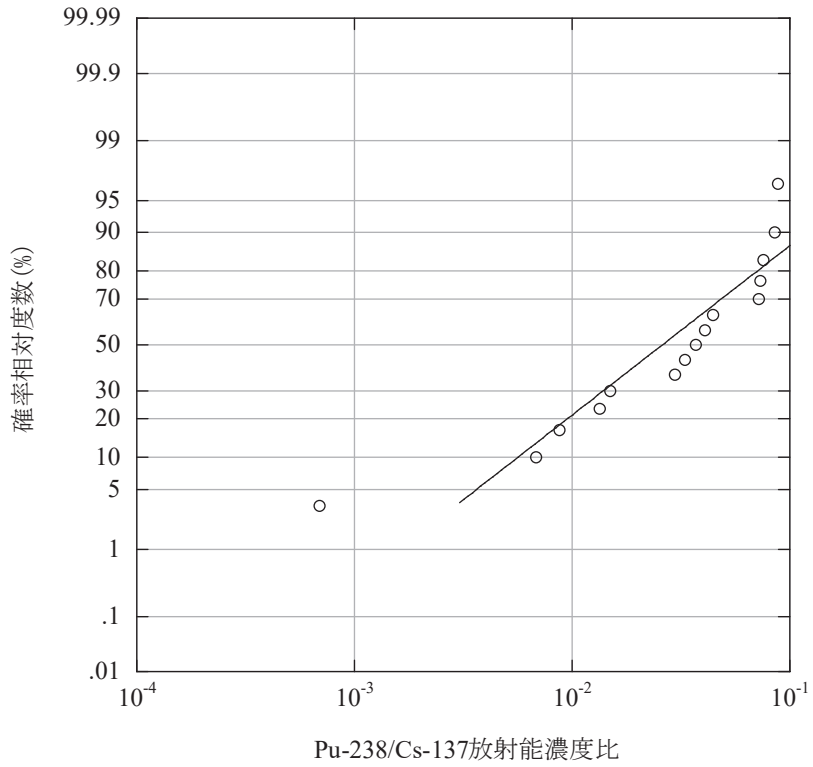


図 3.4-5 Pu-238/Cs-137 放射能濃度比データ対数正規確率紙

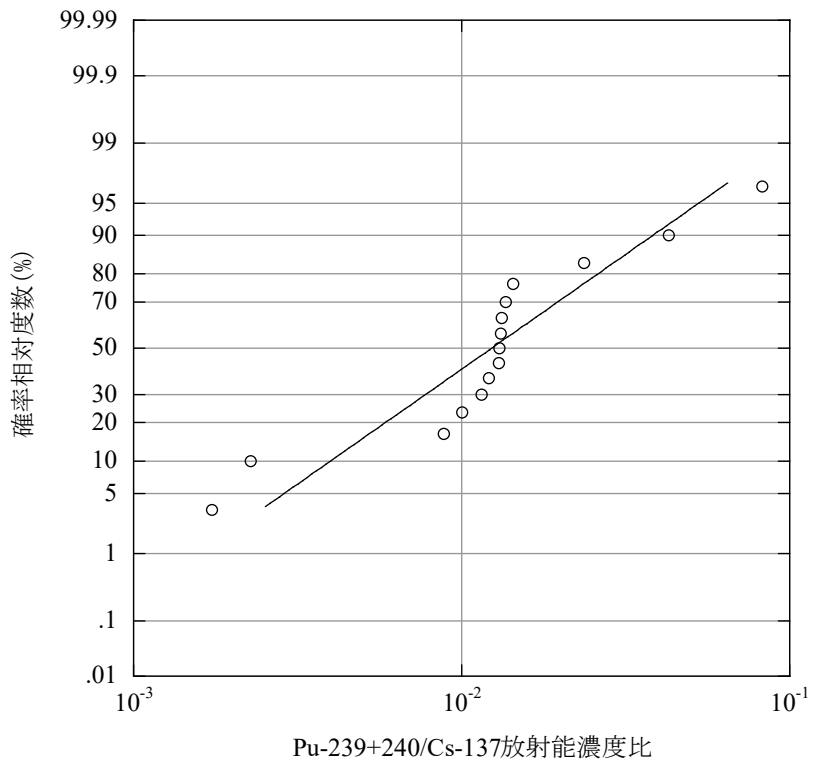


図 3.4-6 Pu-239+240/Cs-137 放射能濃度比データ対数正規確率紙

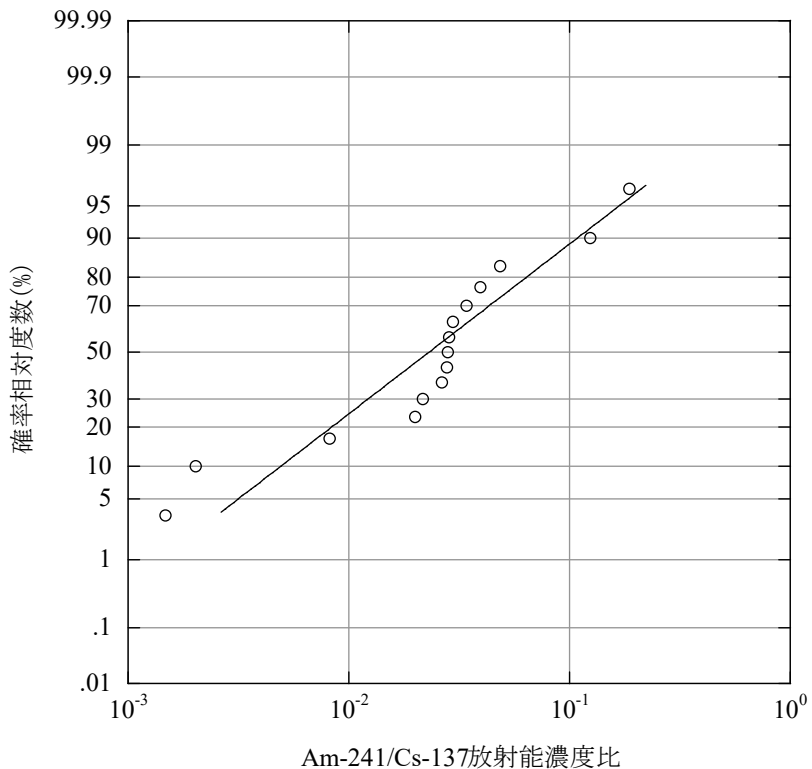


図 3.4-7 Am-241/Cs-137 放射能濃度比データ対数正規確率紙

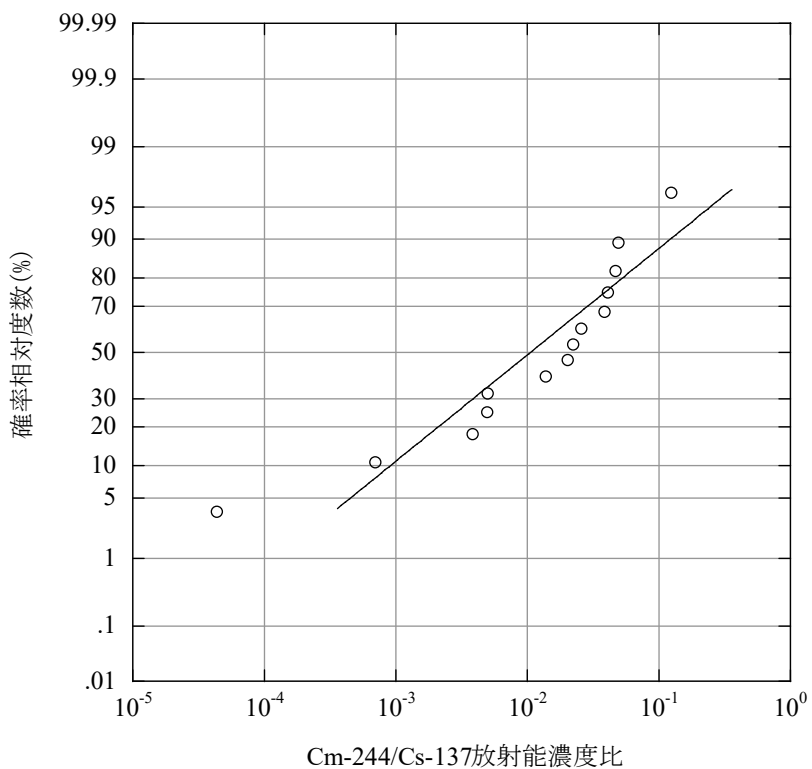


図 3.4-8 Cm-244/Cs-137 放射能濃度比データ対数正規確率紙

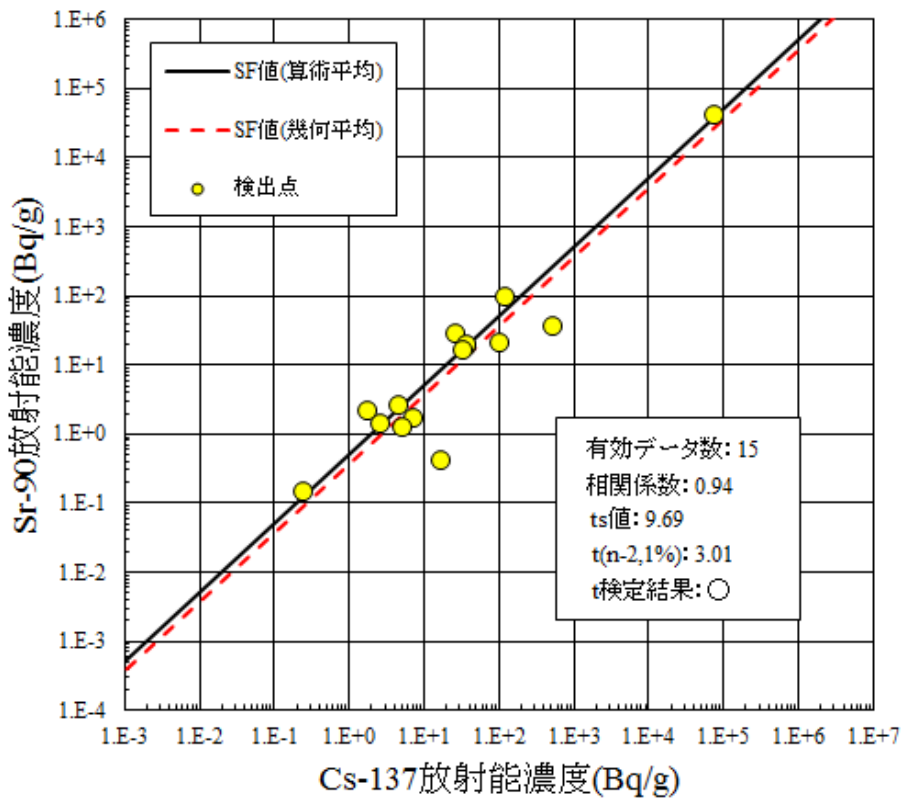


図 3.5-1 Sr-90/Cs-137 放射能濃度相関図と SF 値

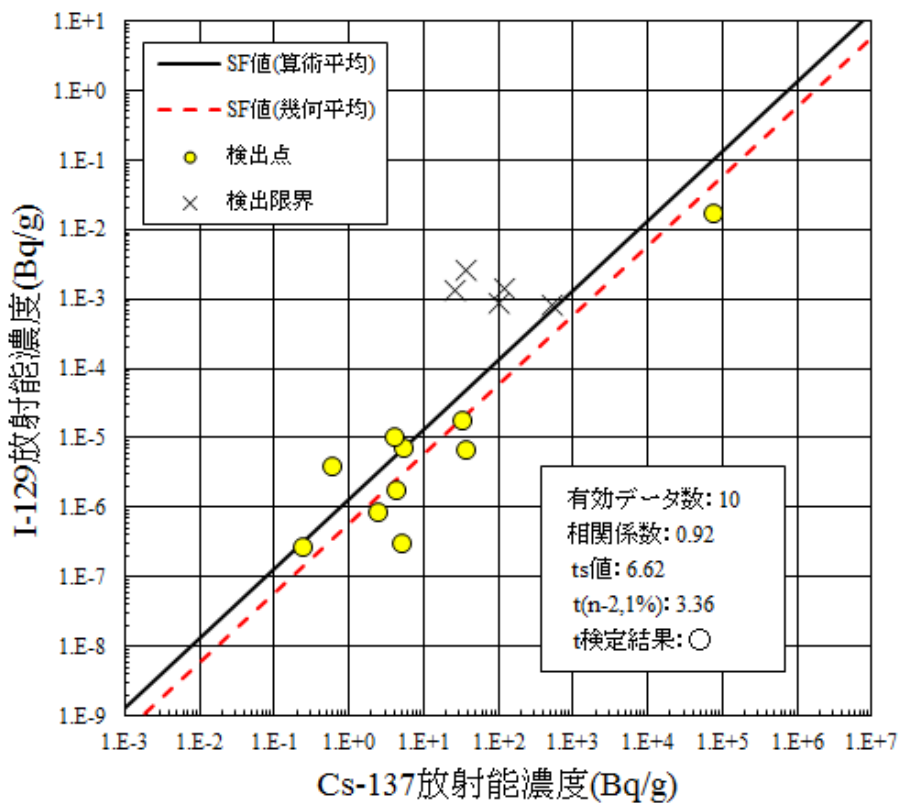


図 3.5-2 I-129/Cs-137 放射能濃度相関図と SF 値

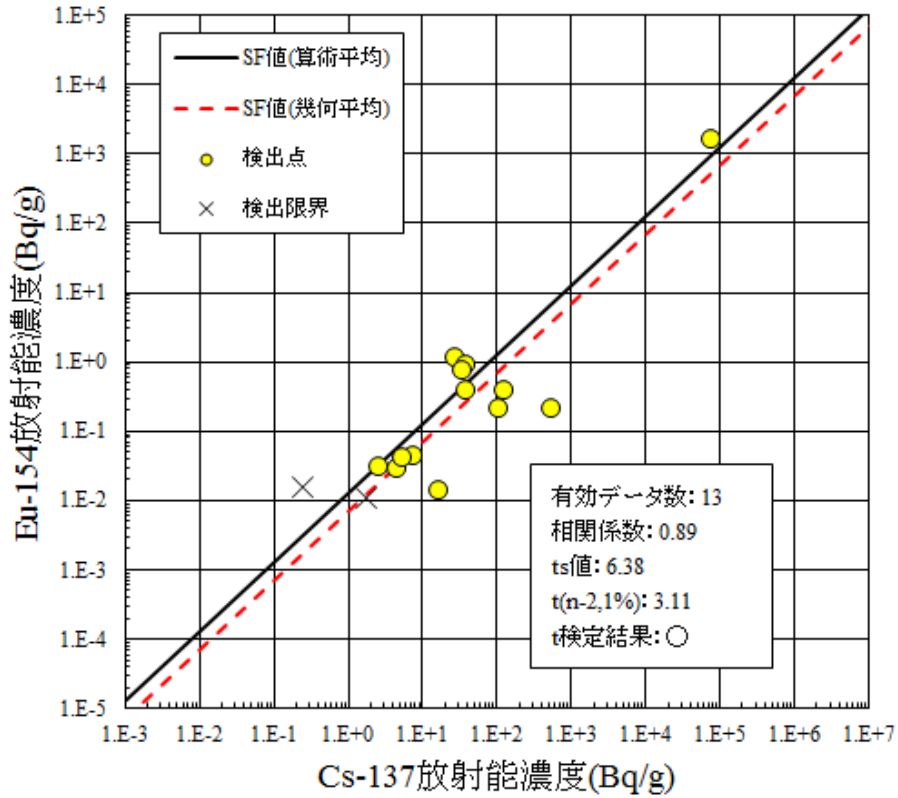


図 3.5-3 Eu-154/Cs-137 放射能濃度相関図と SF 値

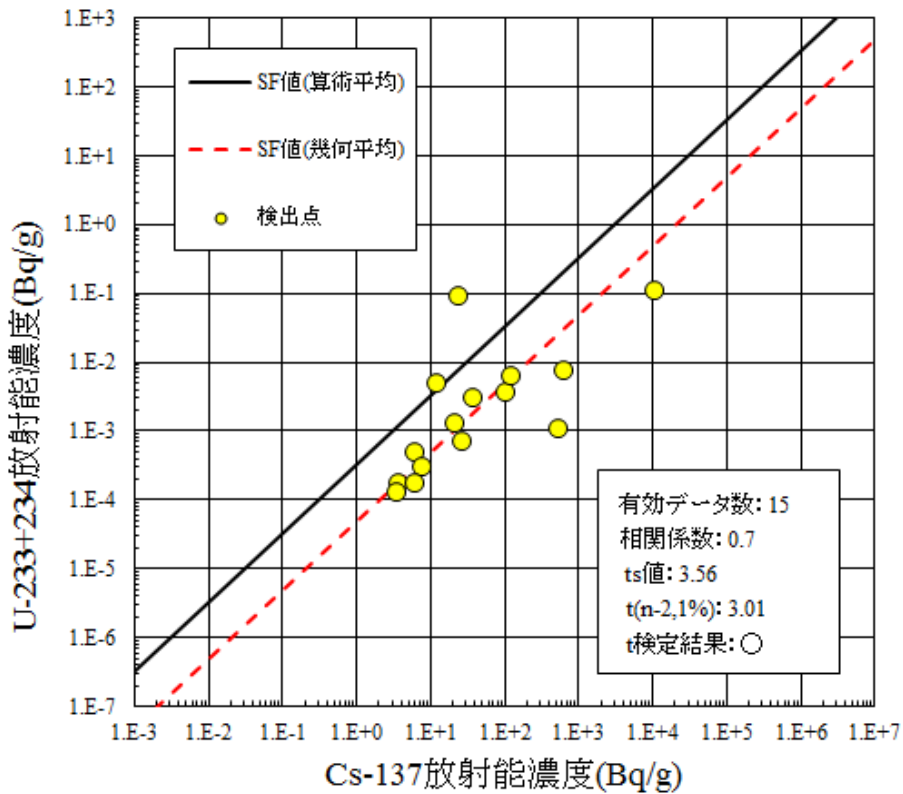


図 3.5-4 U-233+234/Cs-137 放射能濃度相関図と SF 値

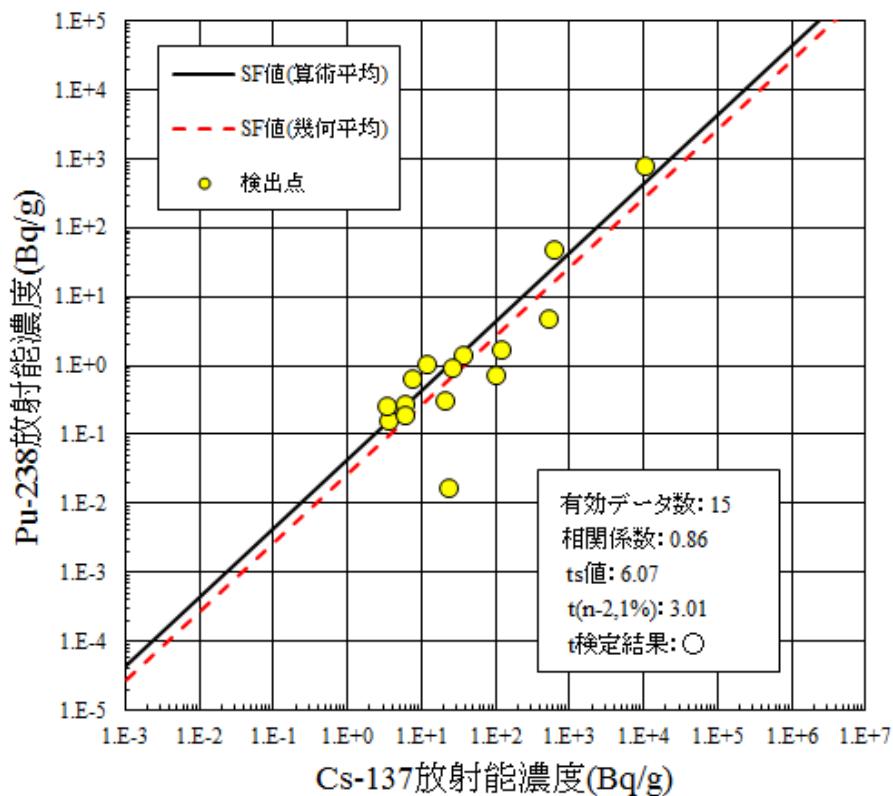


図 3.5-5 Pu-238/Cs-137 放射能濃度相関図と SF 値

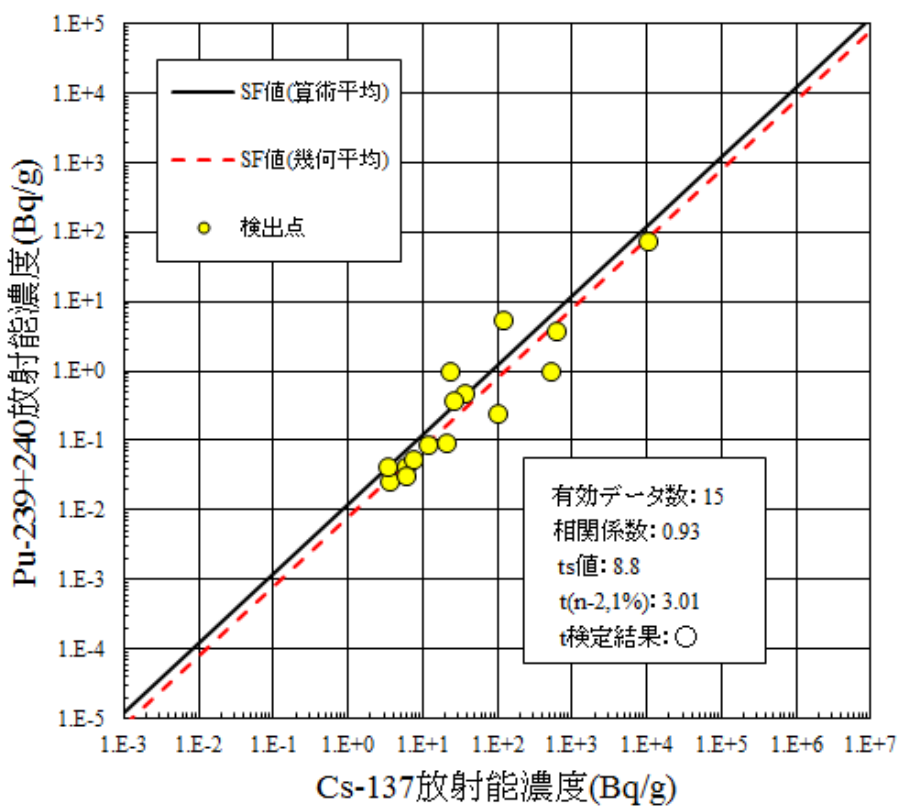


図 3.5-6 Pu-239+240/Cs-137 放射能濃度相関図と SF 値

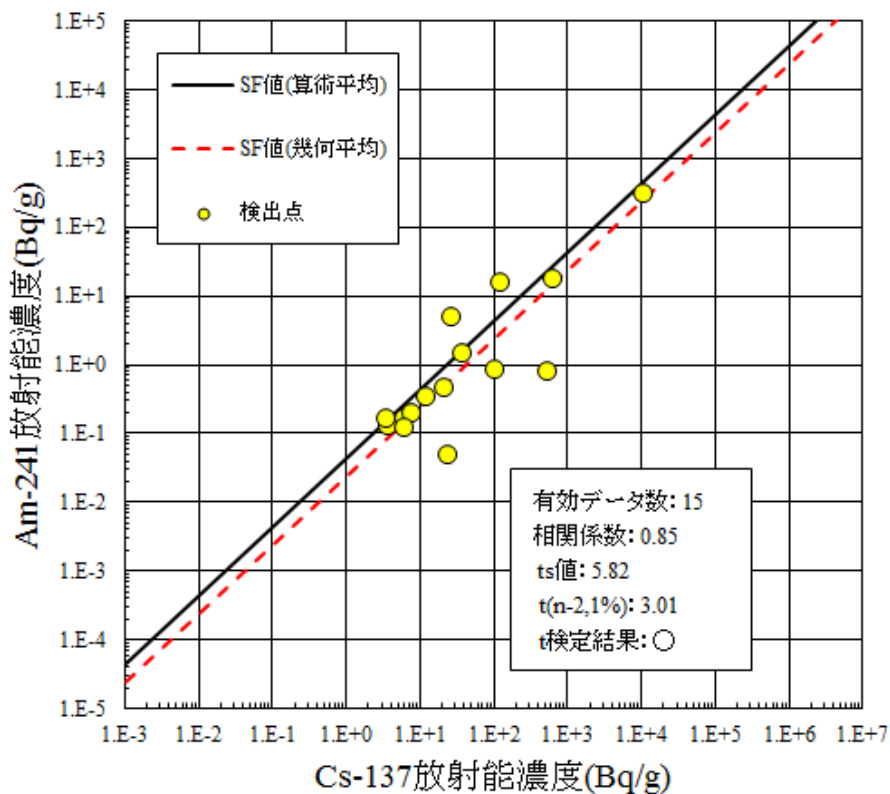


図 3.5-7 Am-241/Cs-137 放射能濃度相関図と SF 値

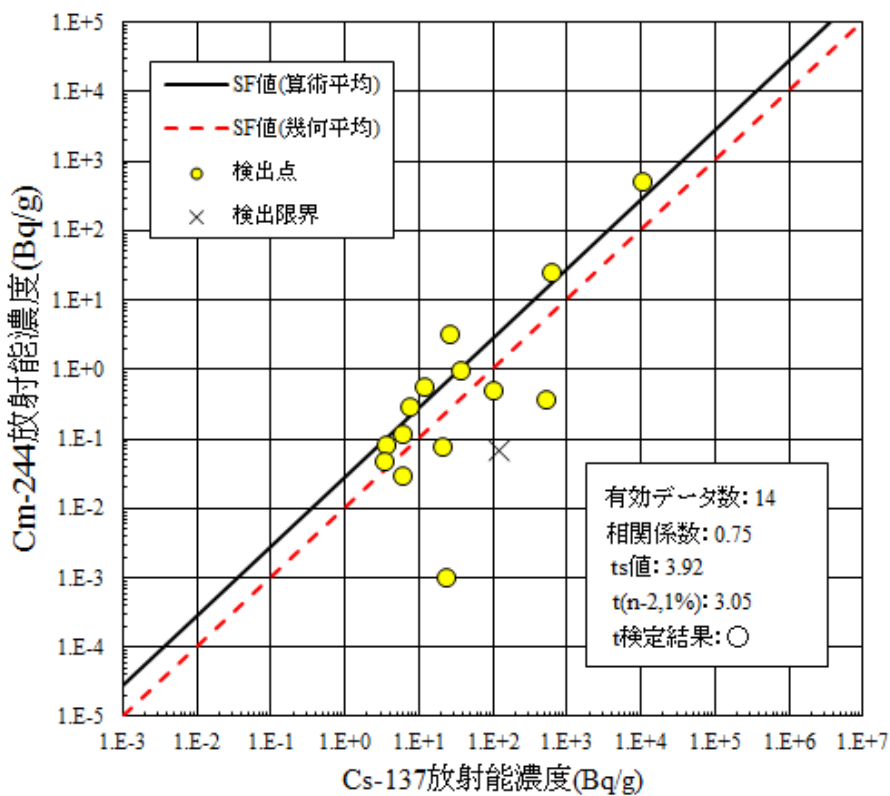


図 3.5-8 Cm-244/Cs-137 放射能濃度相関図と SF 値

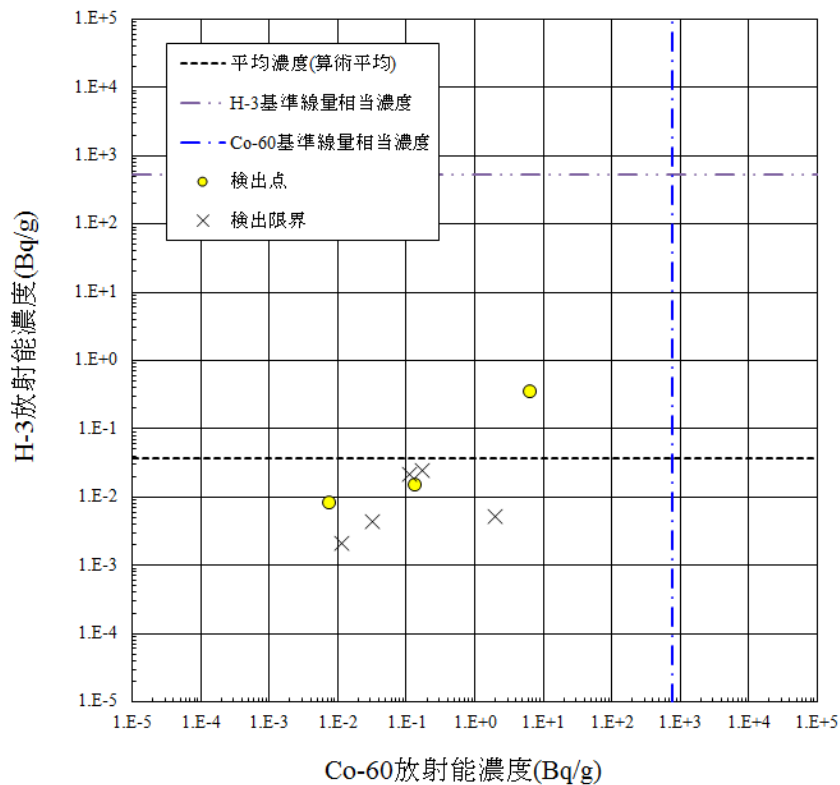


図 3.6-1 H-3/Co-60 放射能濃度相関図

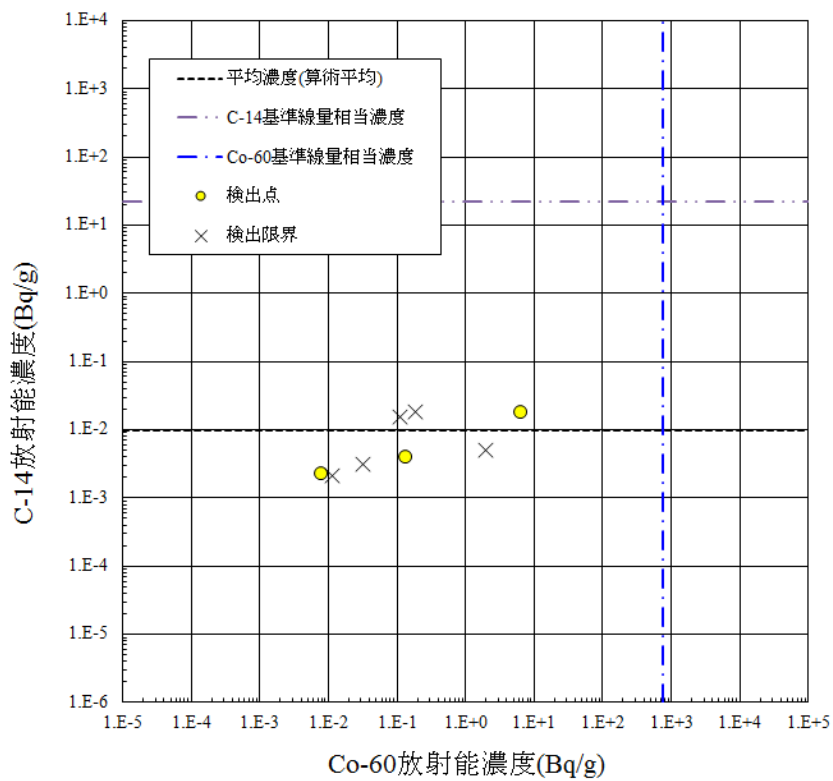


図 3.6-2 C-14/Co-60 放射能濃度相関図

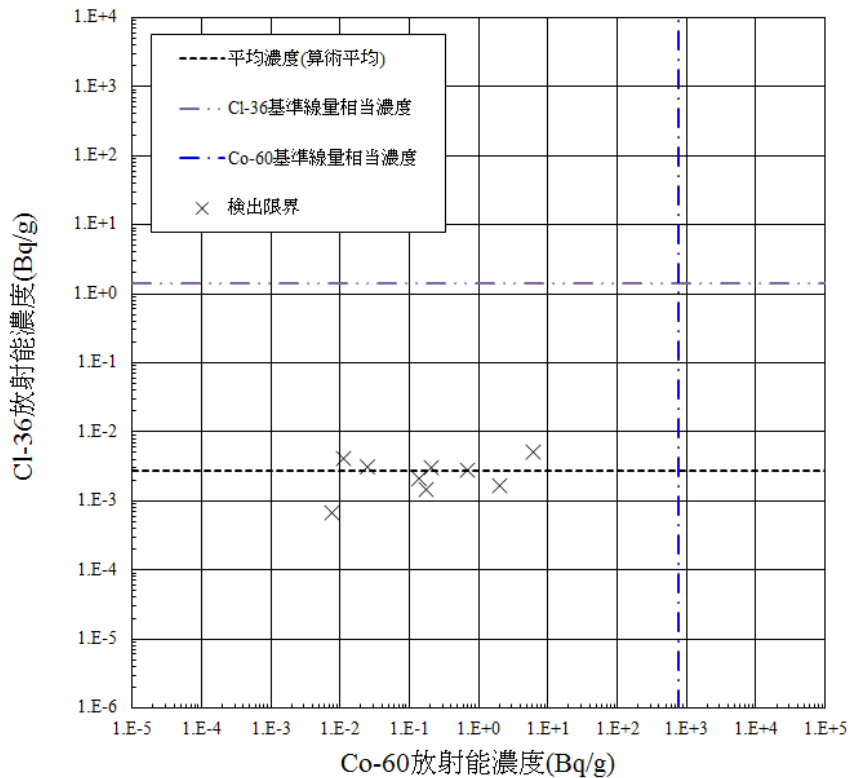


図 3.6-3 Cl-36/Co-60 放射能濃度相関図

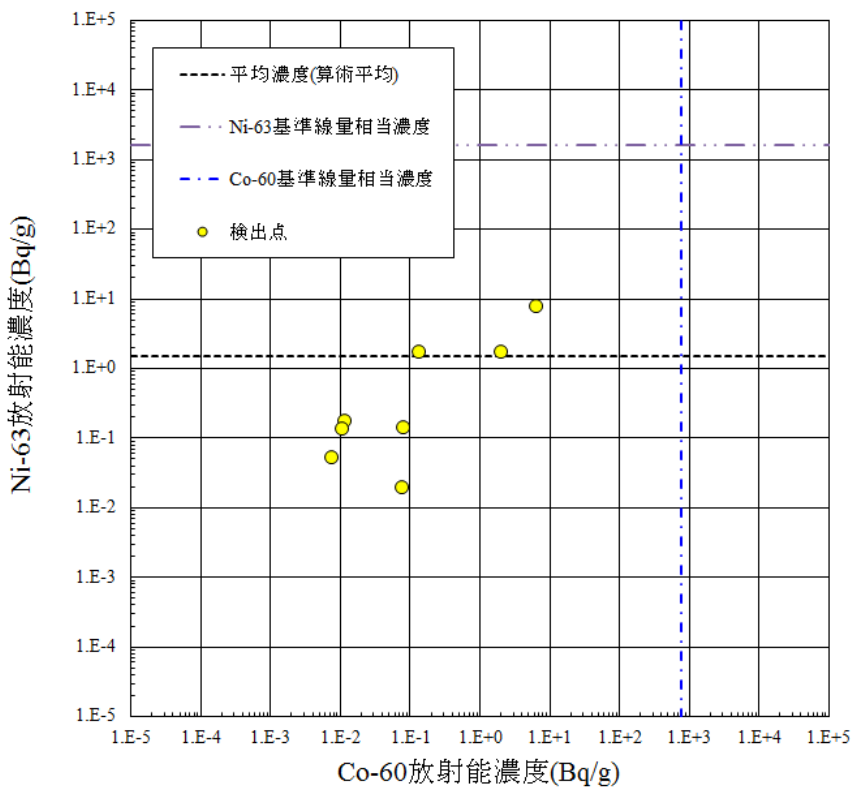


図 3.6-4 Ni-63/Co-60 放射能濃度相関図

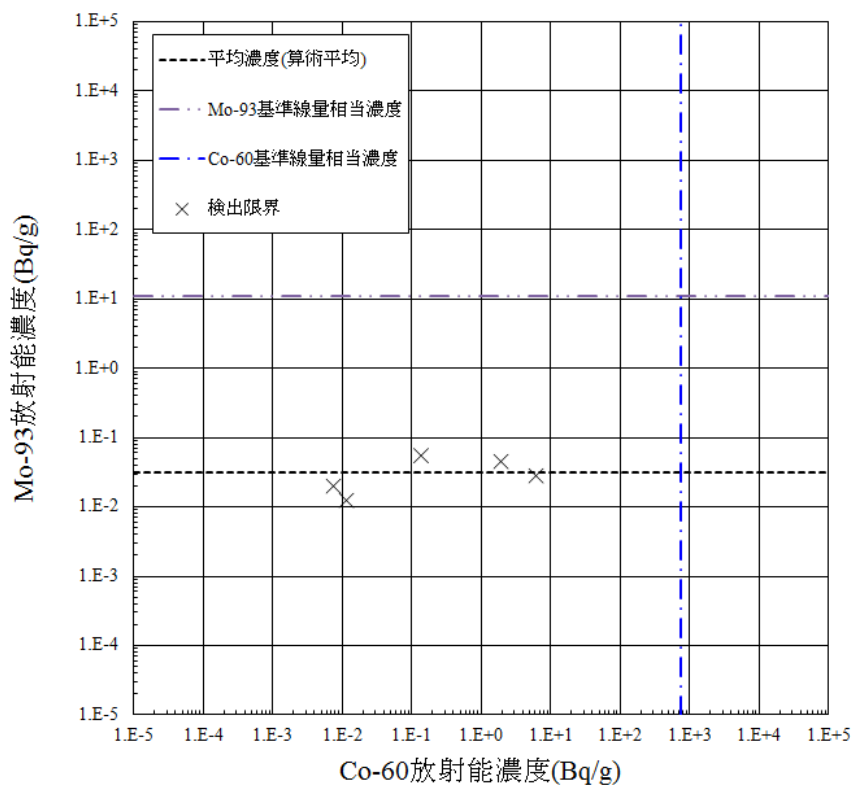


図 3.6-5 Mo-93/Co-60 放射能濃度相関図

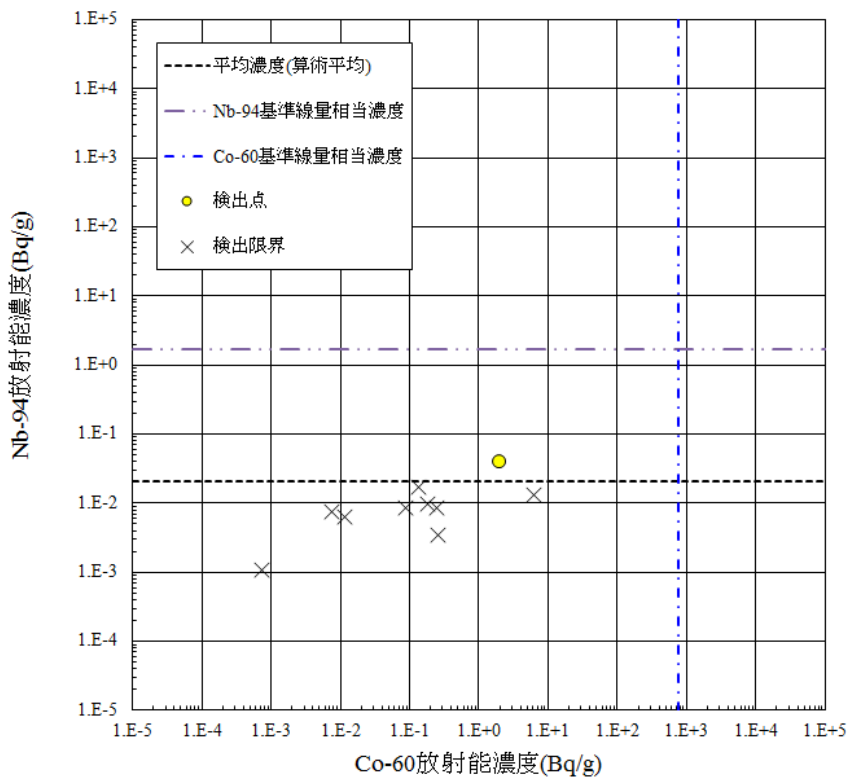


図 3.6-6 Nb-94/Co-60 放射能濃度相関図

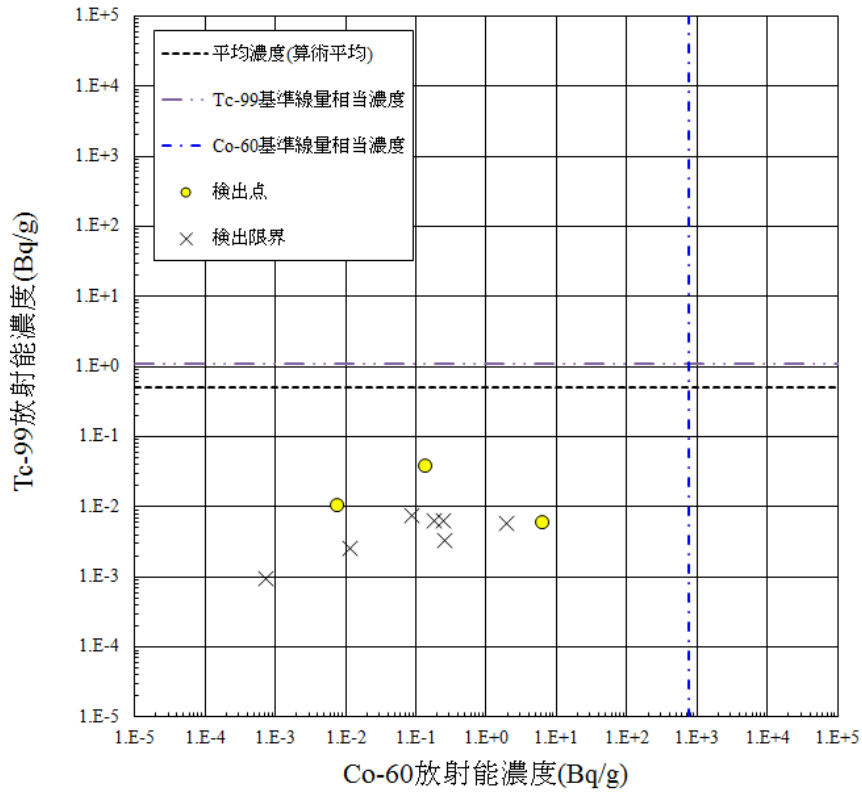


図 3.6-7 Tc-99/Co-60 放射能濃度相関図

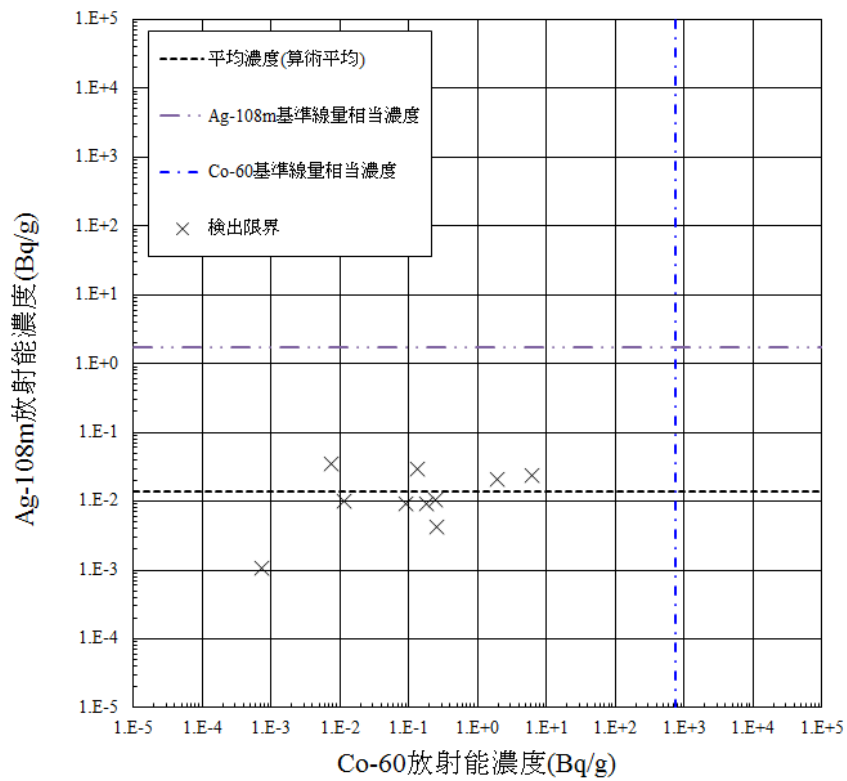


図 3.6-8 Ag-108m/Co-60 放射能濃度相関図

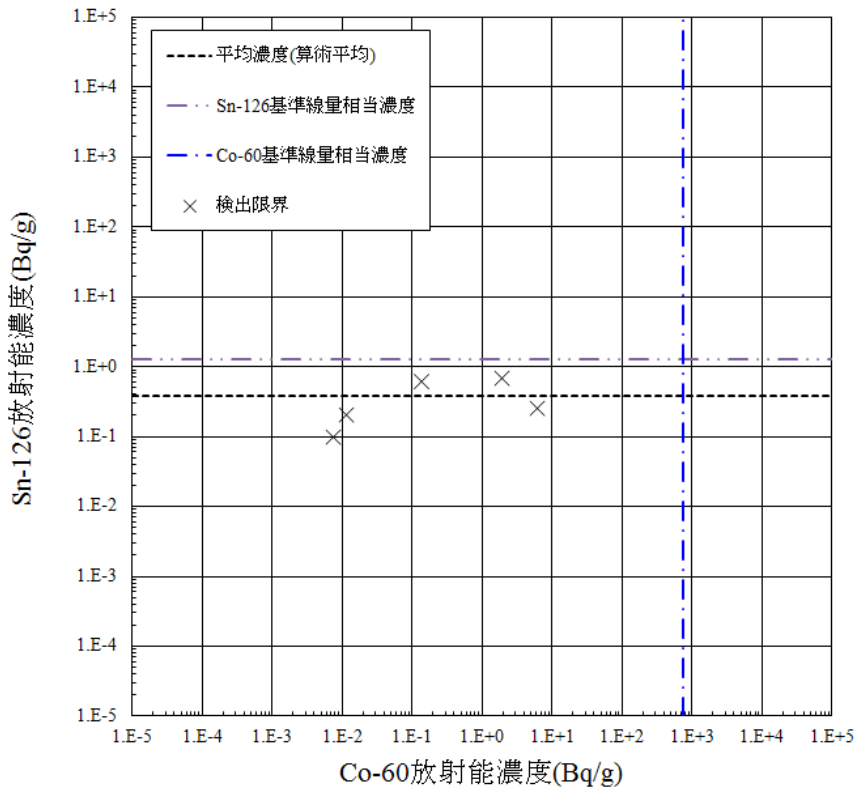


図 3.6-9 Sn-126/Co-60 放射能濃度相関

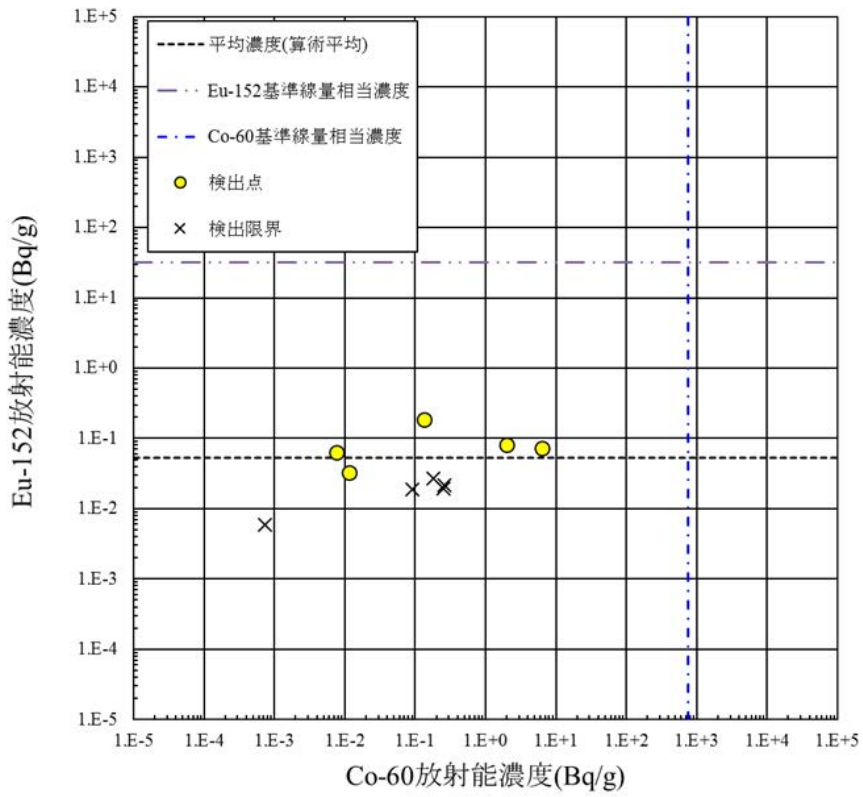


図 3.6-10 Eu-152/Co-60 放射能濃度相関図

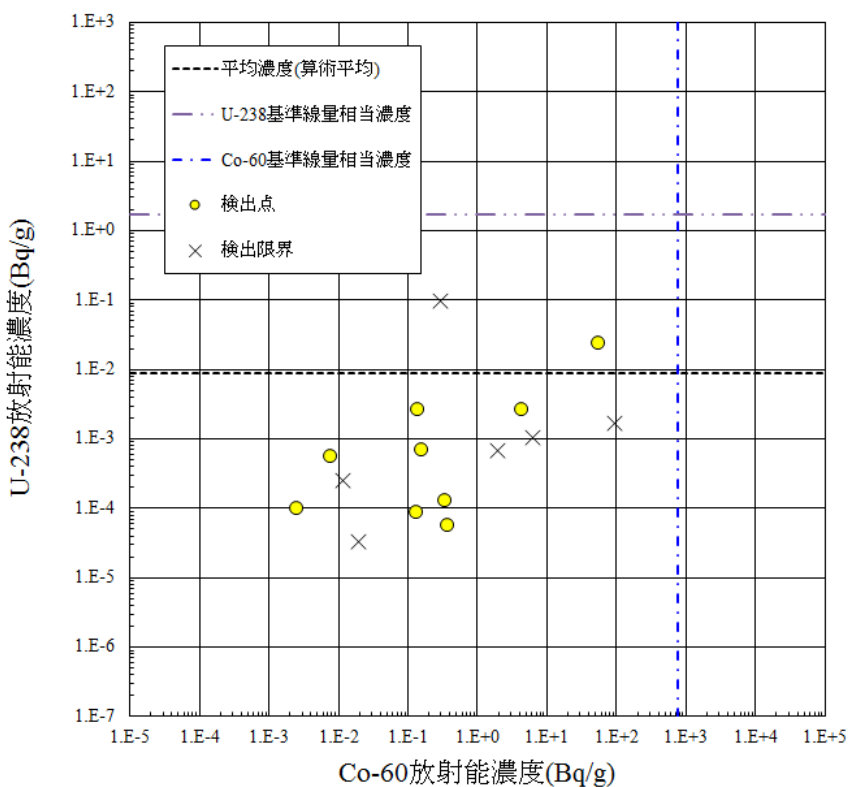


図 3.6-11 U-238/Co-60 放射能濃度相関図

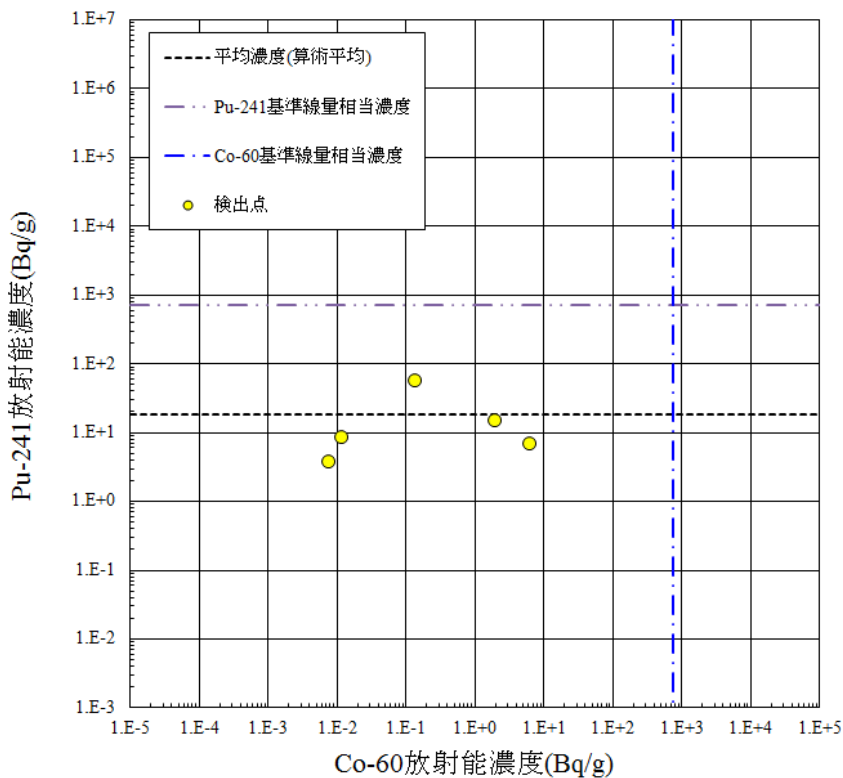


図 3.6-12 Pu-241/Co-60 放射能濃度相関図

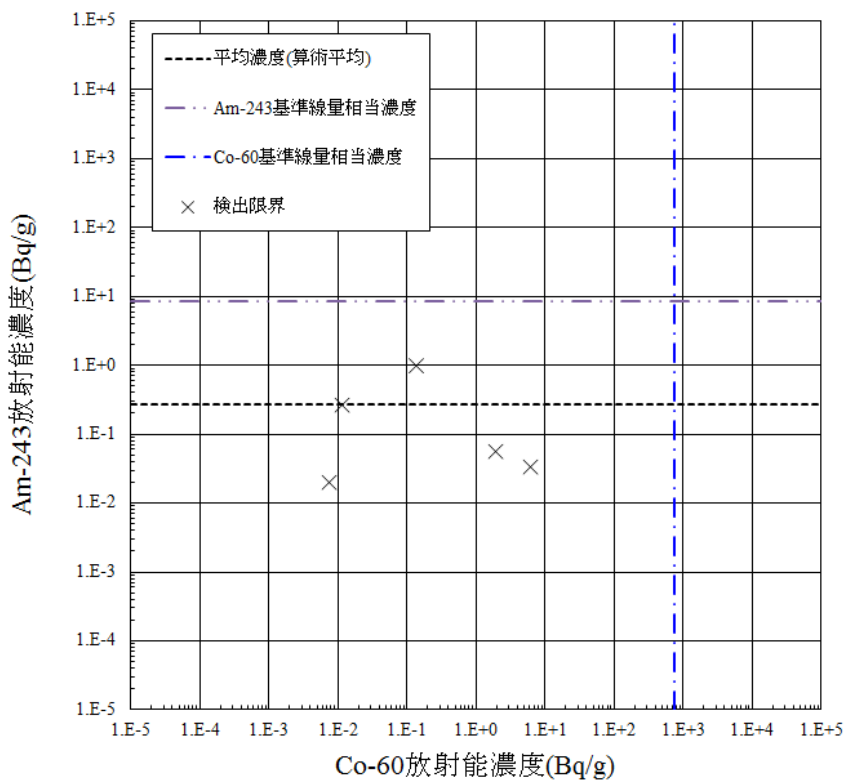


図 3.6-13 Am-243/Co-60 放射能濃度相關図

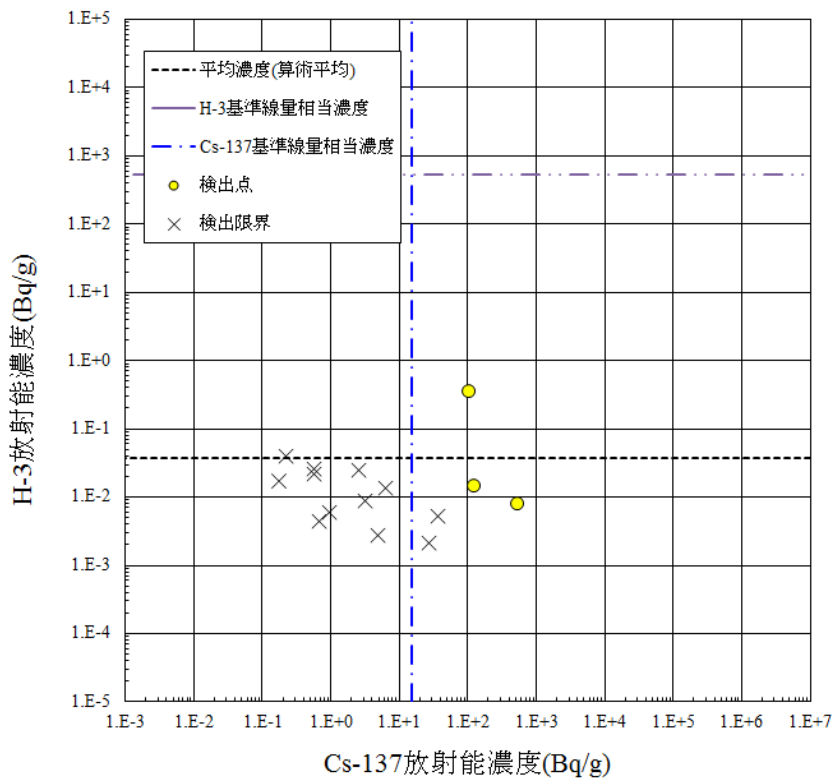


図 3.7-1 H-3/Cs-137 放射能濃度相關図

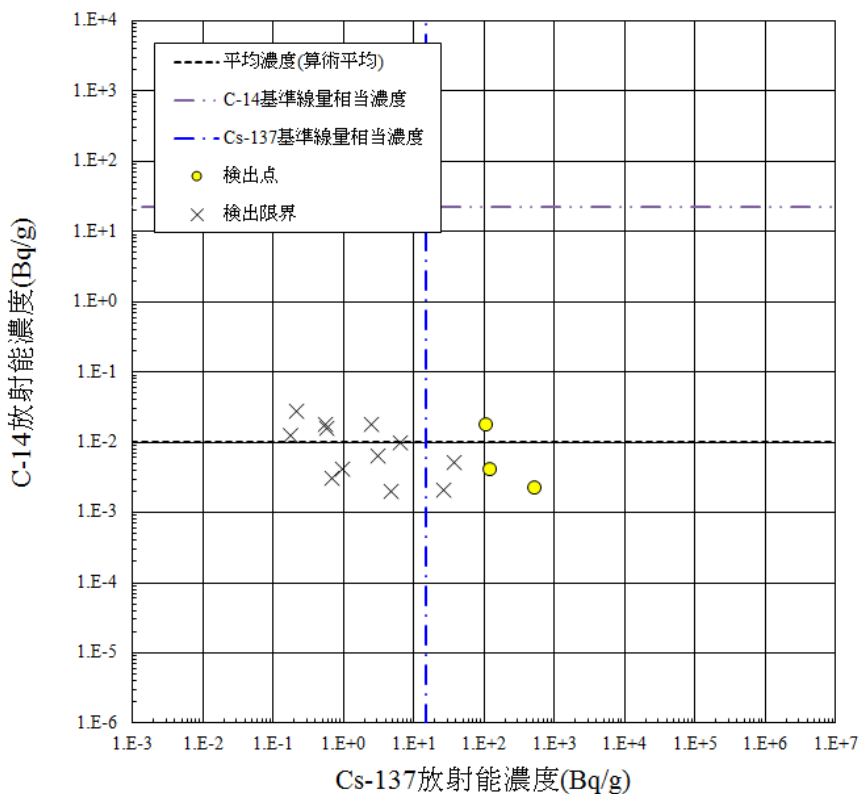


図 3.7-2 C-14/Cs-137 放射能濃度相関図

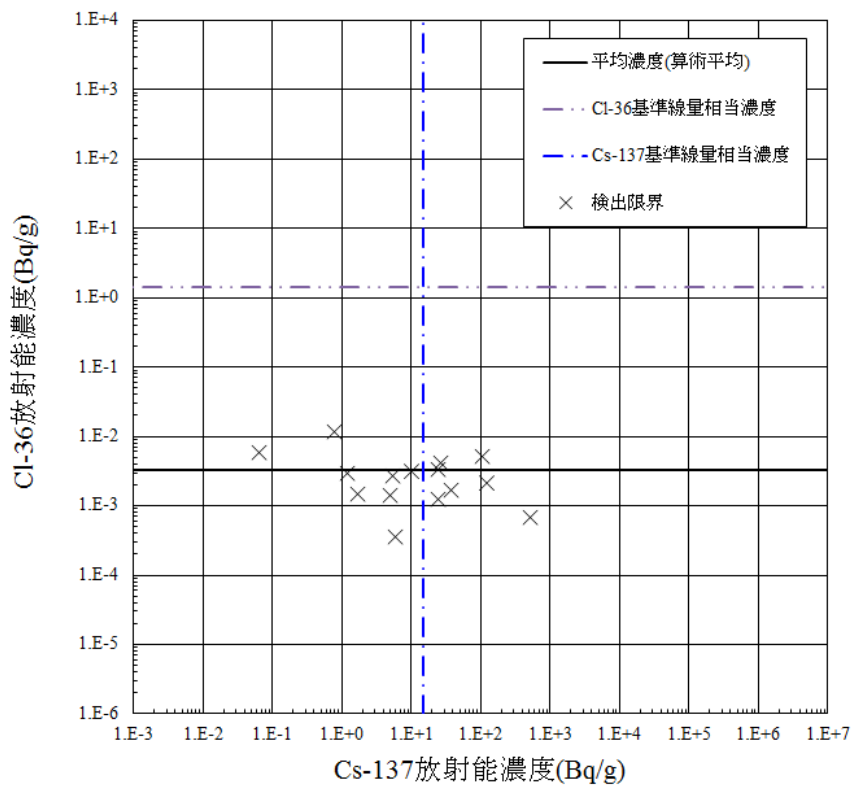


図 3.7-3 Cl-36/Cs-137 放射能濃度相関図

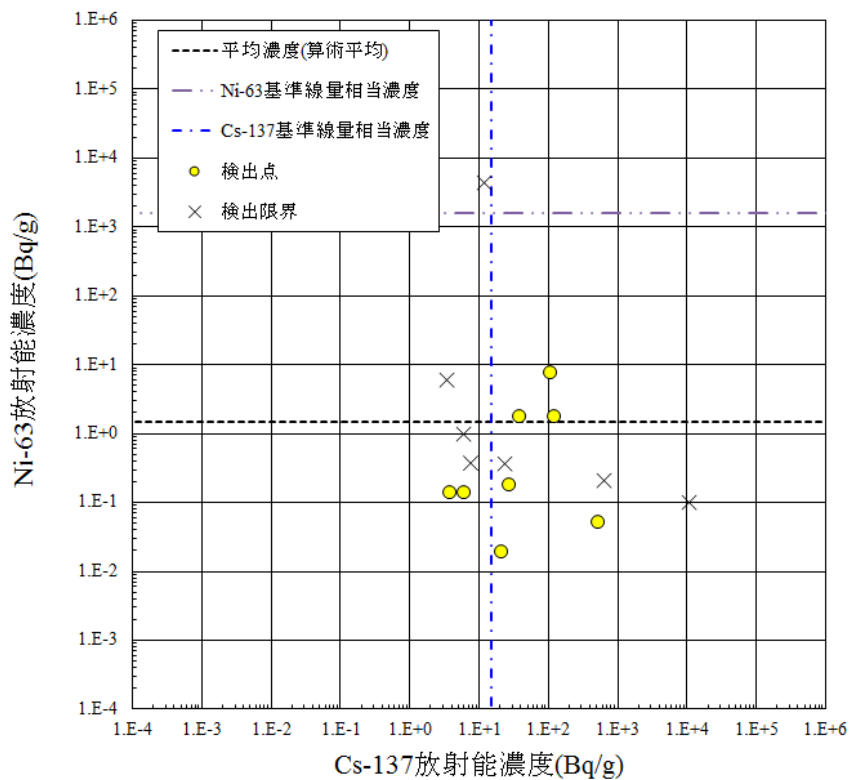


図 3.7-4 Ni-63/Cs-137 放射能濃度相関図

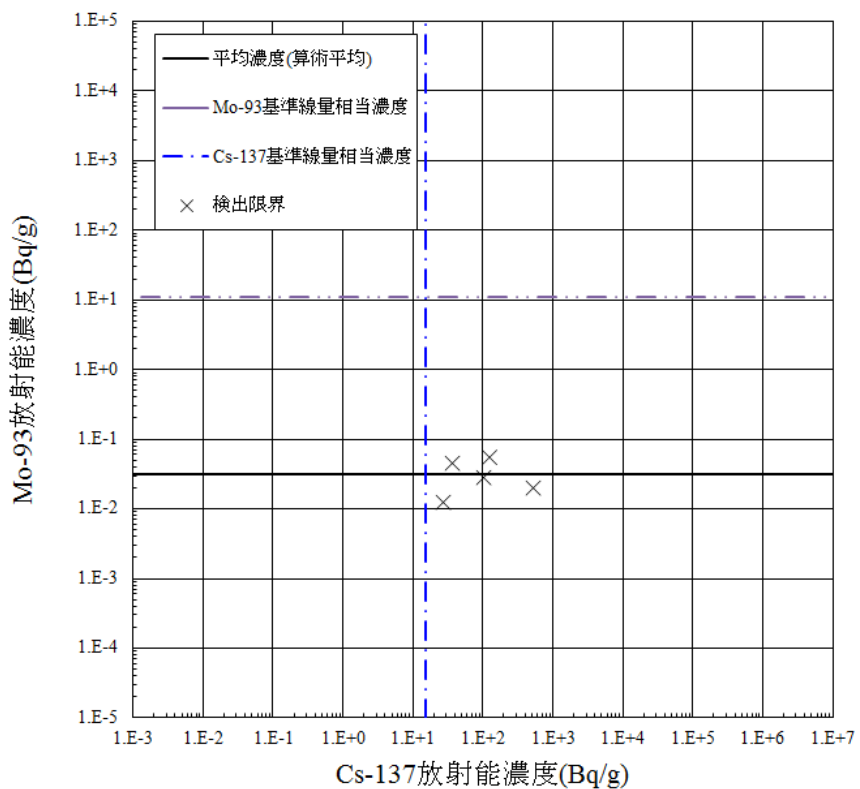


図 3.7-5 Mo-93/Cs-137 放射能濃度相関図

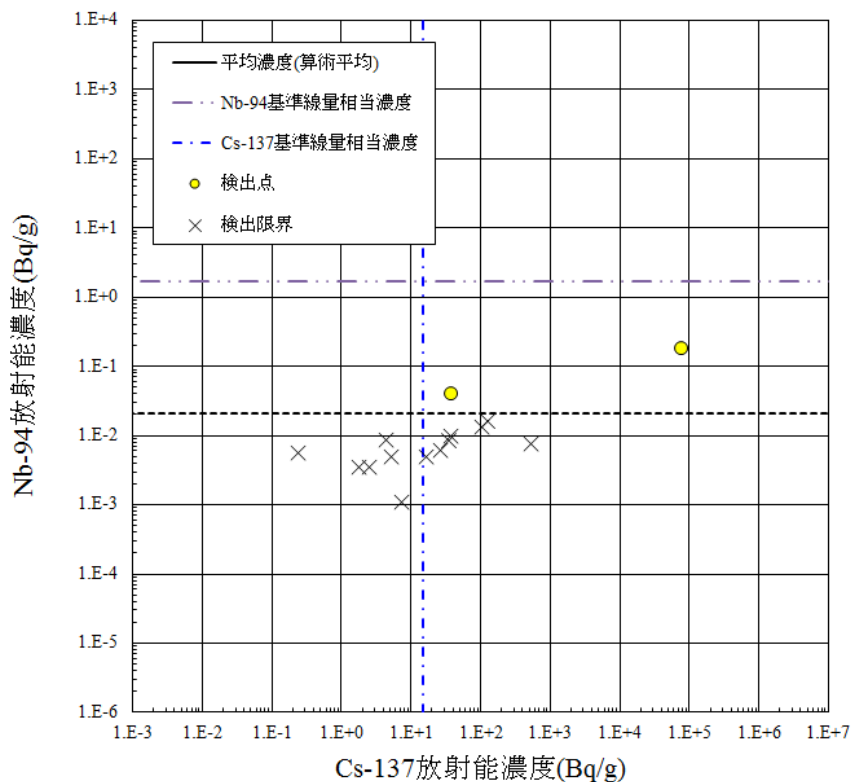


図 3.7-6 Nb-94/Cs-137 放射能濃度相関図

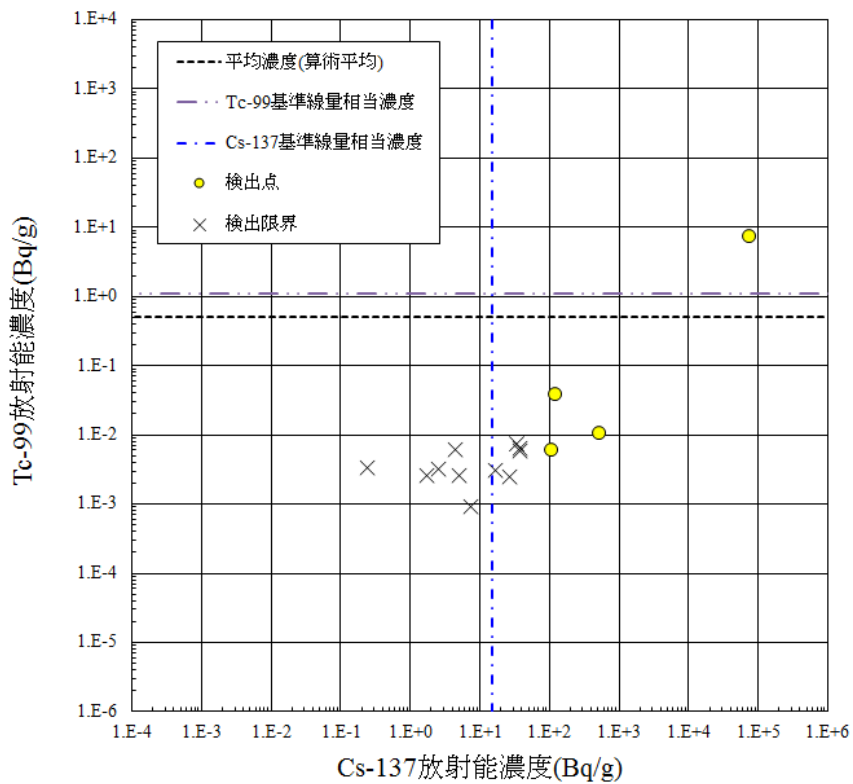


図 3.7-7 Tc-99/Cs-137 放射能濃度相関図

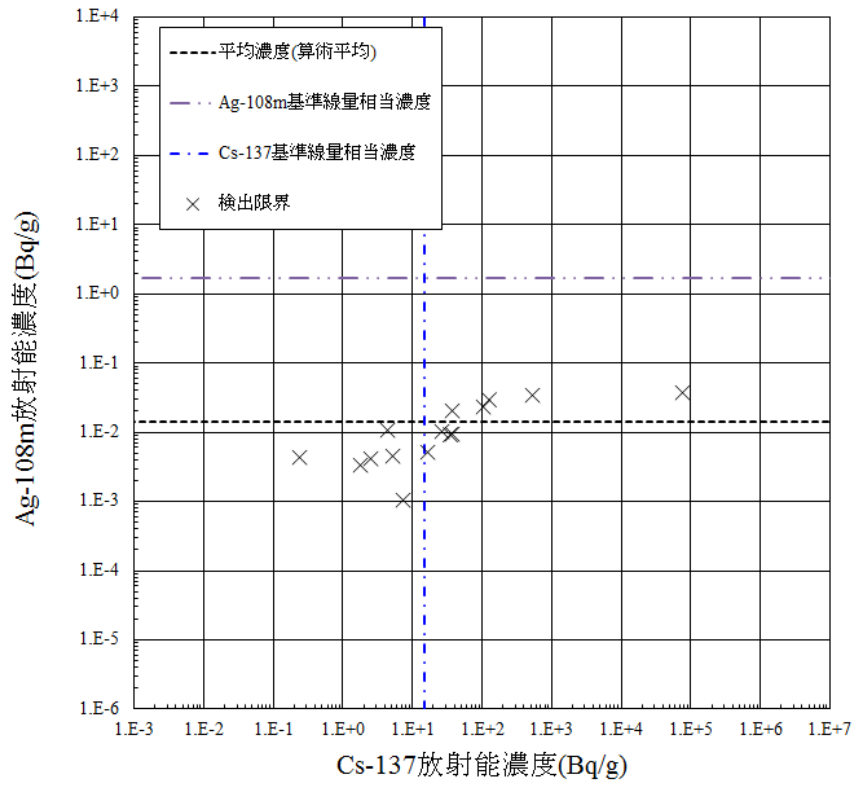


図 3.7-8 Ag-108m/Cs-137 放射能濃度相関図

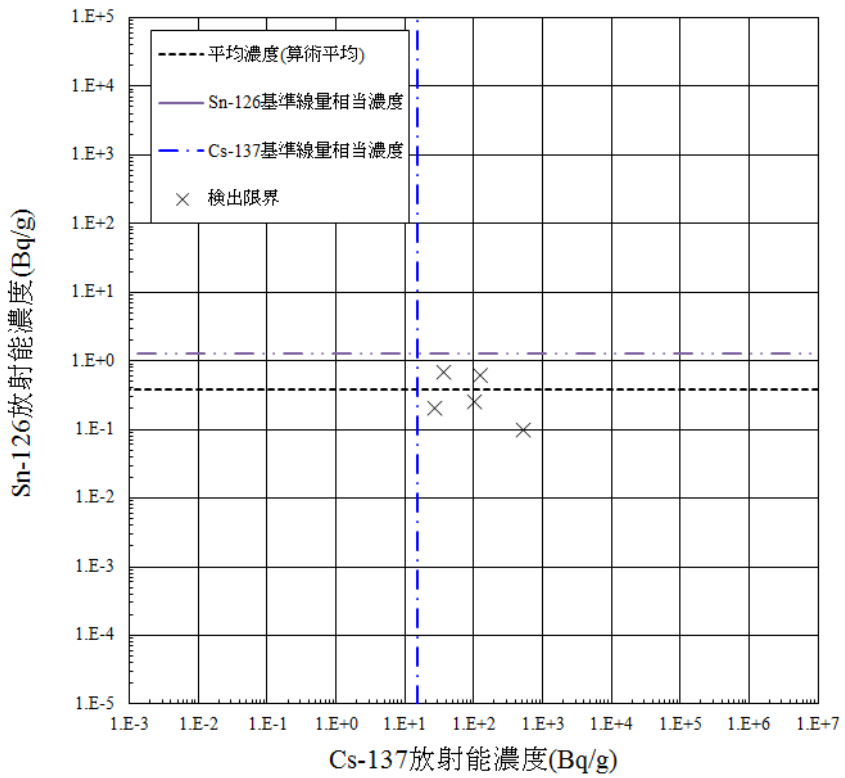


図 3.7-9 Sn-126/Cs-137 放射能濃度相関図

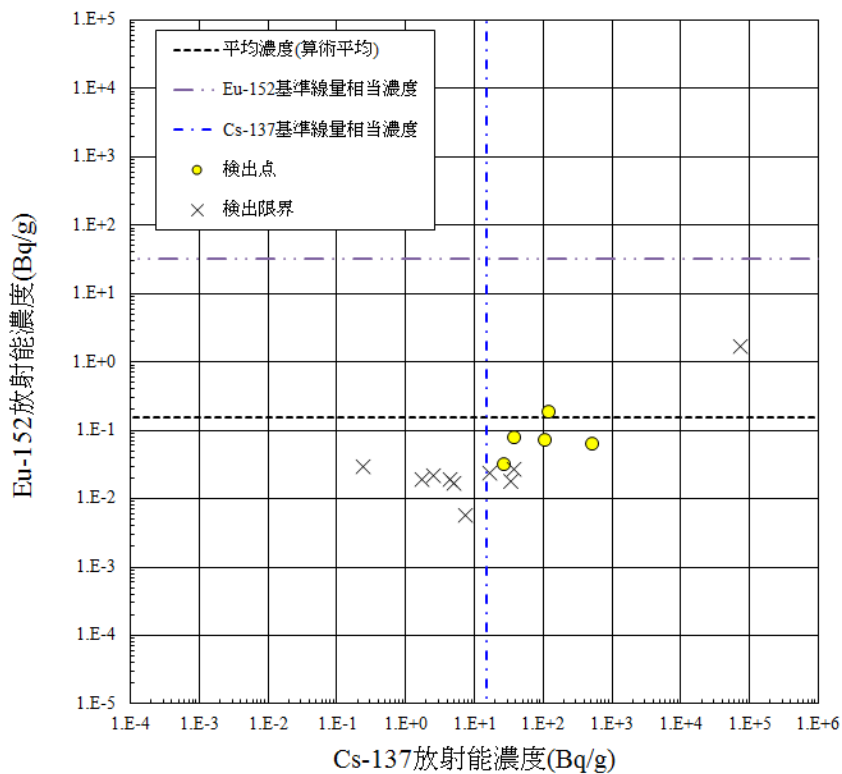


図 3.7-10 Eu-152/Cs-137 放射能濃度相関図

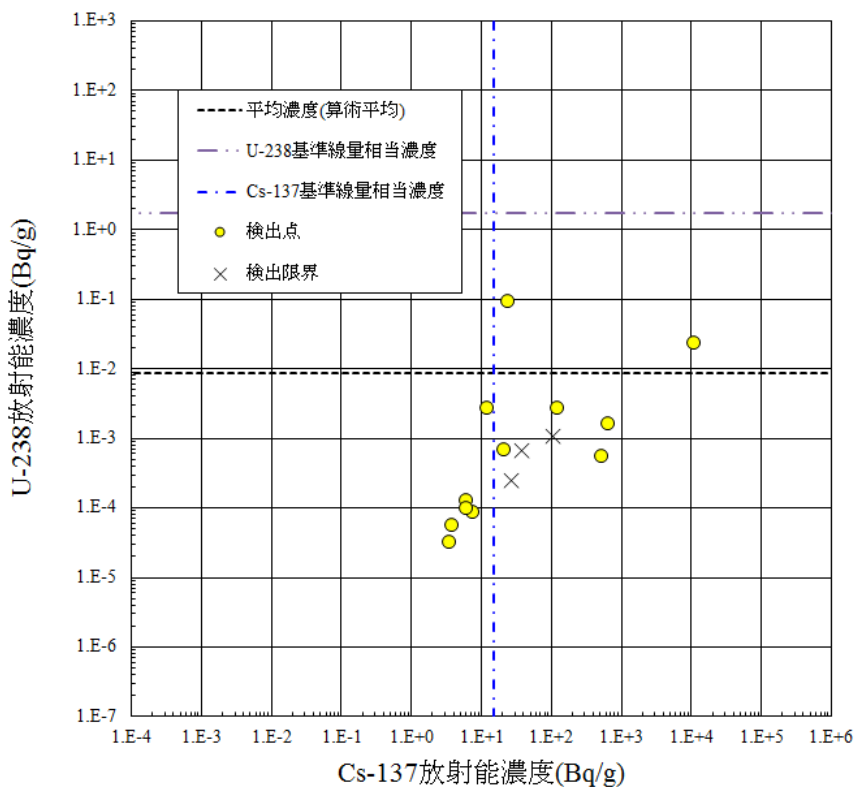


図 3.7-11 U-238/Cs-137 放射能濃度相関図

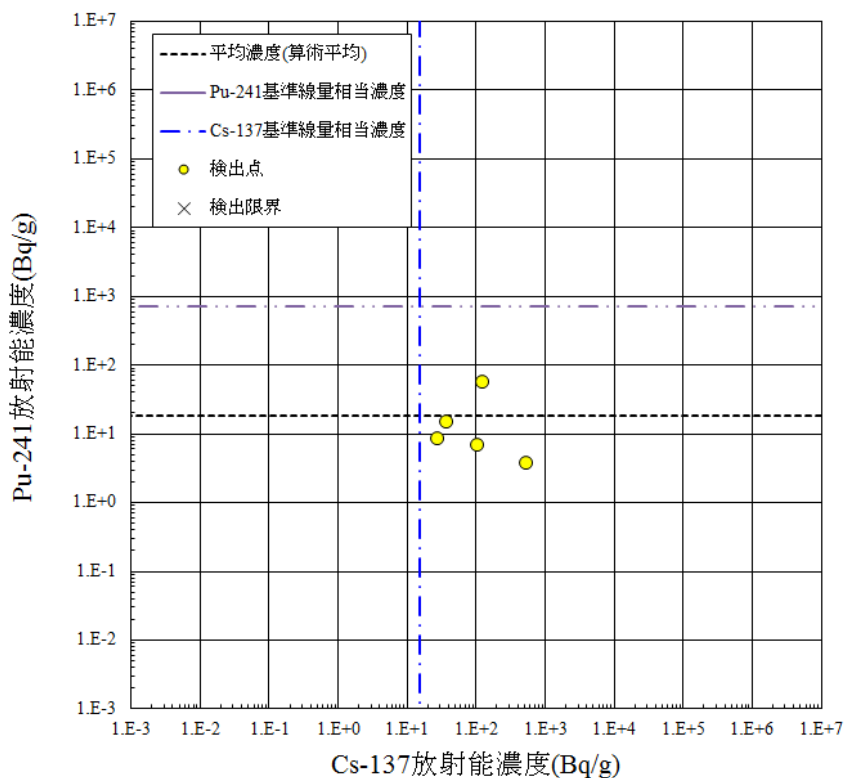


図 3.7-12 Pu-241/Cs-137 放射能濃度相関図

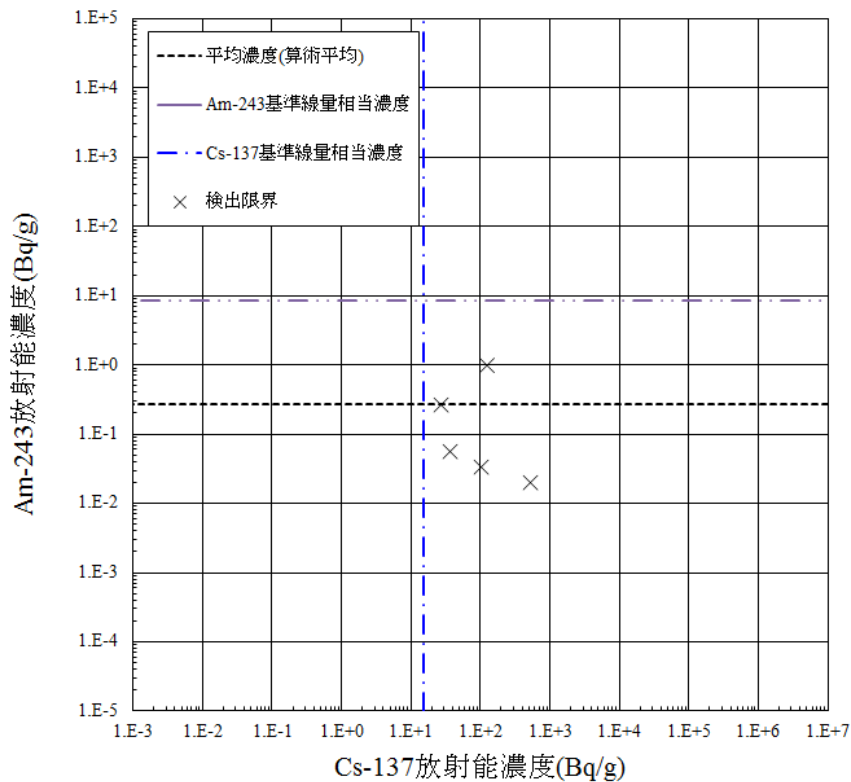


図 3.7-13 Am-243/Cs-137 放射能濃度相関図

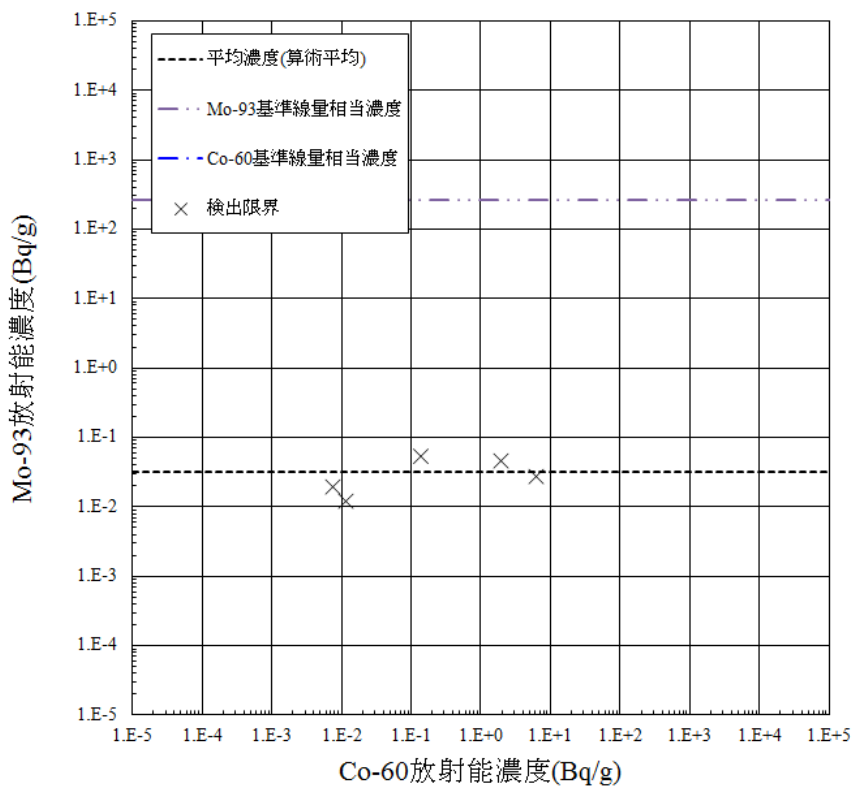


図 3.8-1 Mo-93/Co-60 放射能濃度相関図 (ピット想定)

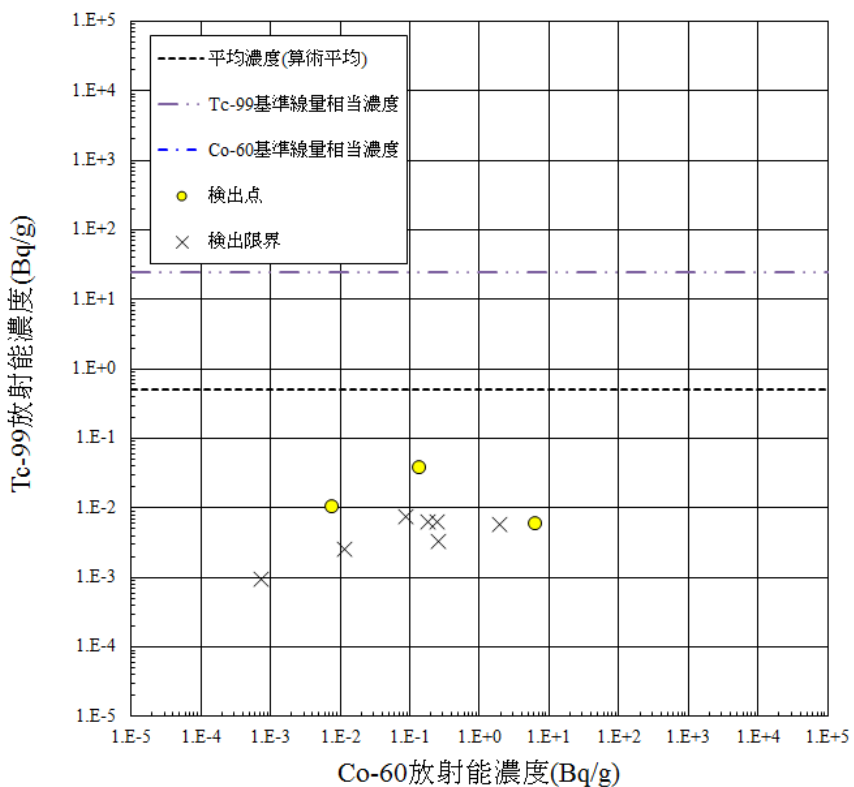


図 3.8-2 Tc-99/Co-60 放射能濃度相関図 (ピット想定)

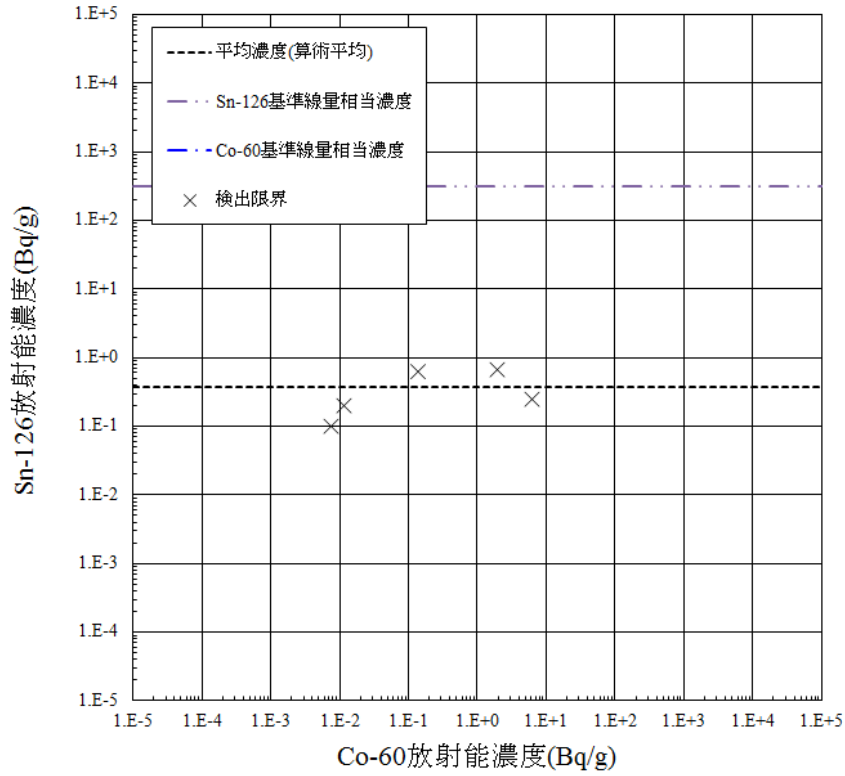


図 3.8-3 Sn-126/Co-60 放射能濃度相関図 (ピット想定)

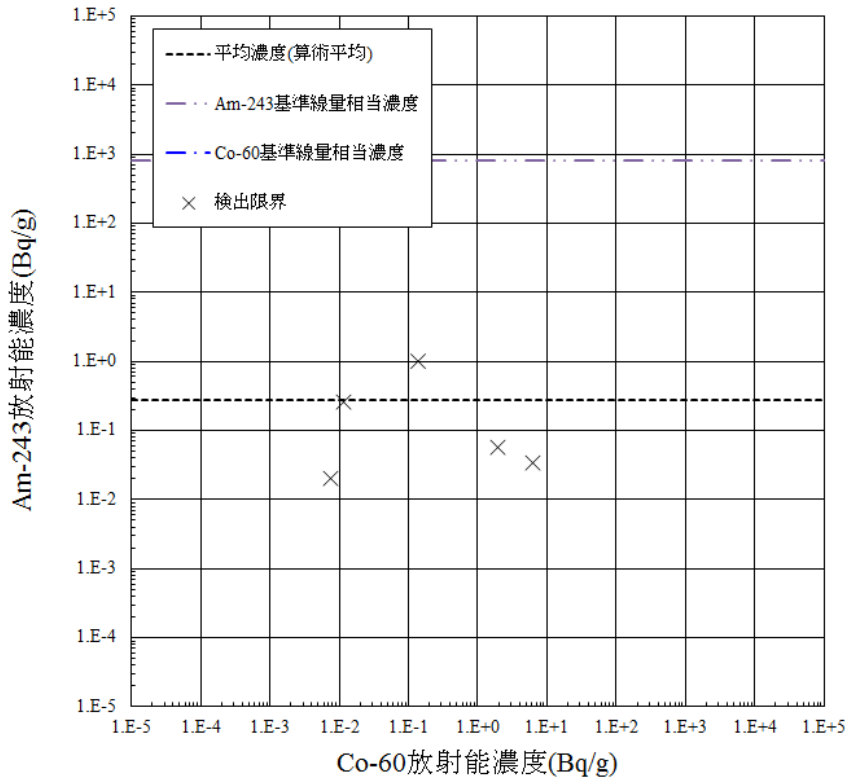


図 3.8-4 Am-243/Co-60 放射能濃度相関図 (ピット想定)

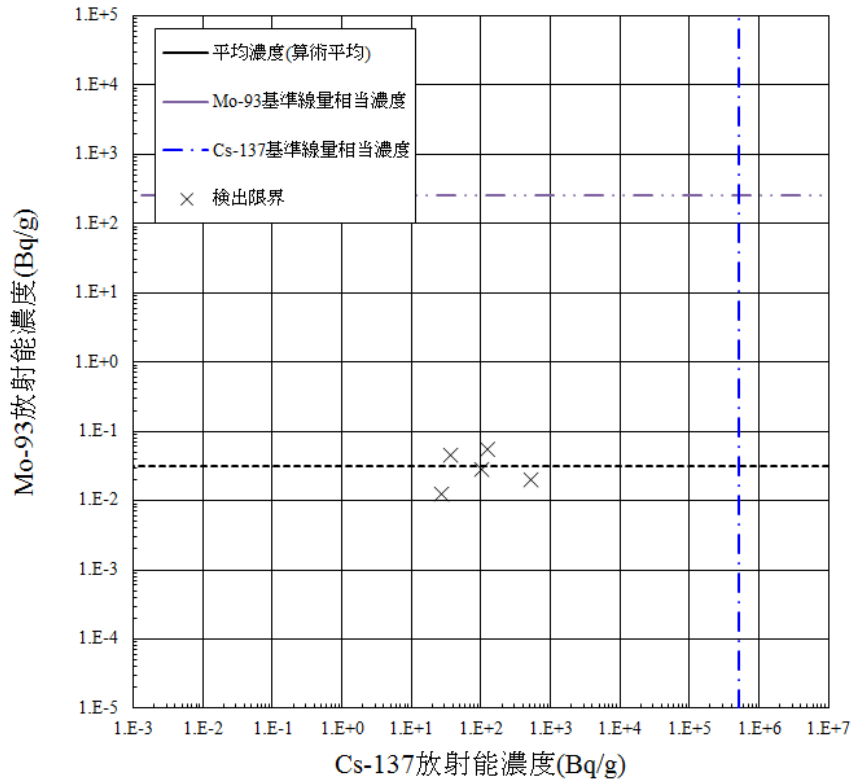


図 3.9-1 Mo-93/Cs-137 放射能濃度相関図 (ピット想定)

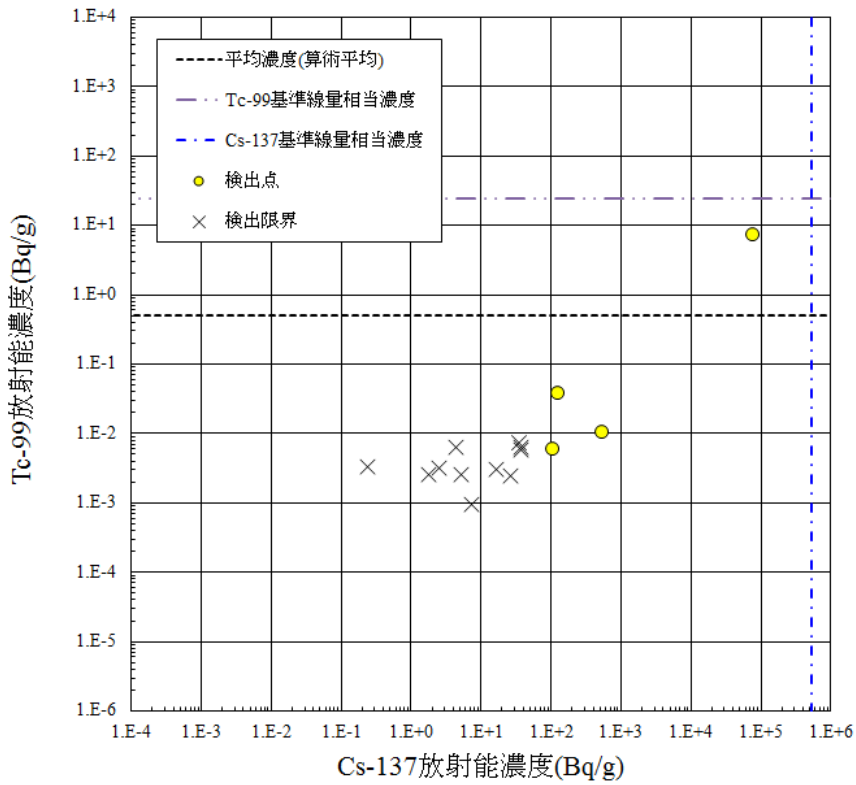


図 3.9-2 Tc-99/Cs-137 放射能濃度相関図 (ピット想定)

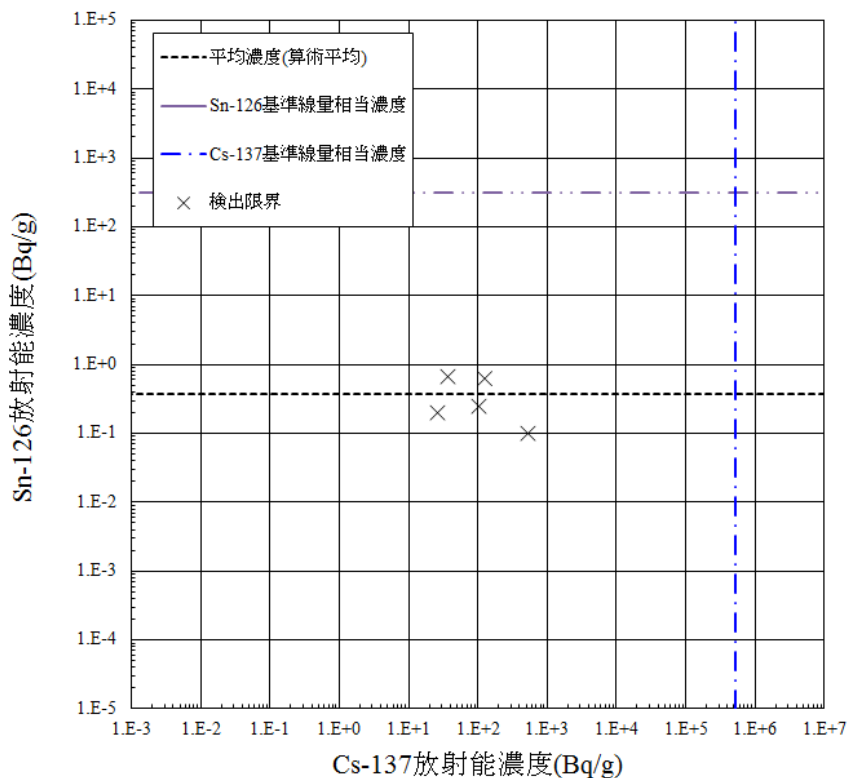


図 3.9-3 Sn-126/ Cs-137 放射能濃度相関図 (ピット想定)

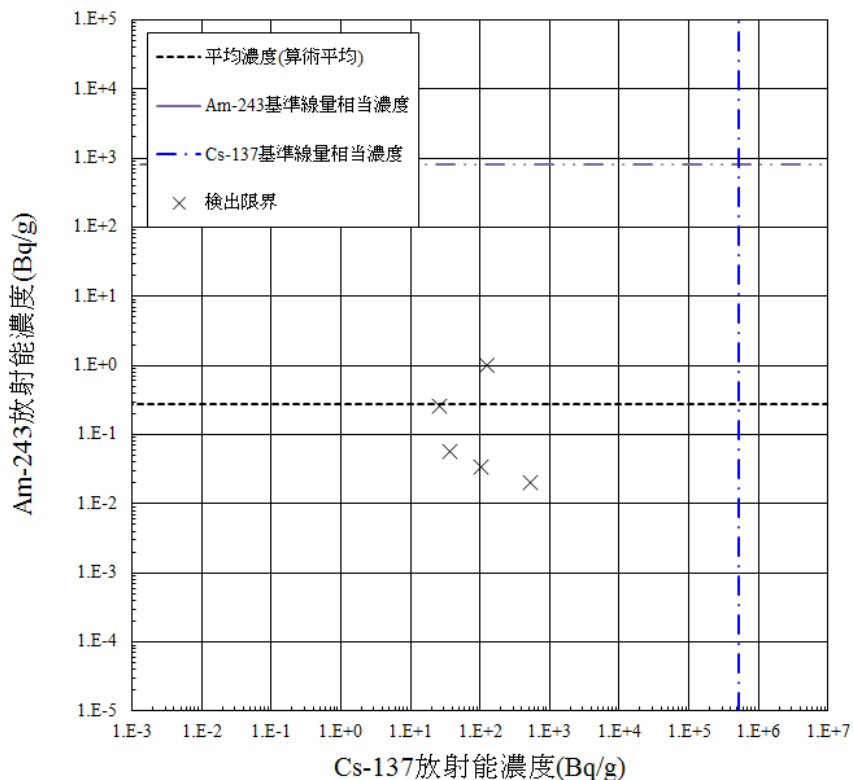


図 3.9-4 Am-243/ Cs-137 放射能濃度相関図 (ピット想定)

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(e)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(e)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面積	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm ²) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的關係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π)A m ⁻¹

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応關係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

