

アスファルト固化体等の浸出試験

Leaching Test of Bituminaized Waste and Waste Solidified by Epoxy Resin

芳中 一行 高野 祐吾* 木村 之彦* 菅谷 篤志 鬼澤 寿和

Kazuyuki YOSHINAKA, Yugo TAKANO*, Yukihiro KIMURA*
Atsushi SUGAYA and Toshikazu ONIZAWA

東海研究開発センター
核燃料サイクル工学研究所
再処理技術開発センター
環境保全部

Waste Management Department
Tokai Reprocessing Technology Development Center
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Tokai Research and Development Center

October 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは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。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 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
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5901, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

アスファルト固化体等の浸出試験

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター 核燃料サイクル工学研究所

再処理技術開発センター 環境保全部

芳中 一行、高野 祐吾*、木村 之彦*、菅谷 篤志、鬼澤 寿和

(2008年7月24日 受理)

東海再処理施設で発生した約30,000本のアスファルト固化体及び約1,800本プラスチック固化体は貯蔵施設にて保管されており、現在、処分に向けた検討が行われているところである。これらの固化体を処分した際には、地下水との接触により固化体から放射性核種・化学種が放出されると考えられている。

本報告書は、固化体処分時の固化体からの放射性核種や化学種の浸出挙動の調査を行うため、平成15年度から平成18年度にかけて実施した、アスファルト固化体及びプラスチック固化体の浸出試験の結果をまとめて報告するものである。

本試験において、以下の貴重な知見、データが得られた。

- (1) アスファルト固化体の浸出試験においては、 γ 線エネルギーが低いことから検出困難であったI-129についてピークを検出し、アスファルト固化体からのI-129の浸出挙動に係るデータを初めて取得することができた。検出されたピーク面積からI-129の放射エネルギーを評価したところ、約50日間の浸出期間で供試体に含まれるI-129の約40～100%に相当する量が浸出していることが分かった。また、供試体形状や浸出液の温度などを変えて、異なる条件下で浸出試験を実施し、処分時の評価において考慮すべき硝酸イオン等の化学種の浸出挙動に係るデータを取得した。
- (2) プラスチック固化体の浸出試験においては、TBP等の化学種及び放射性核種に着目した浸出試験を実施し、TBP等の浸出挙動に係るデータを取得することができた。浸出が確認されたTBPの量は、供試体中に含まれるTBPの約1%であった。また、アスファルト固化体同様、I-129の浸出挙動に係るデータを取得することができ、約90日間の浸出期間で供試体に含まれる量の約60～100%に相当する量のI-129が浸出することを確認した。

**Leaching Test of Bituminized Waste
and Waste Solidified by Epoxy Resin**

Kazuyuki YOSHINAKA, Yugo TAKANO*, Yukihiko KIMURA*, Atsushi SUGAYA and
Toshikazu ONIZAWA

Waste Management Department
Tokai Reprocessing Technology Development Center
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories, Tokai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 24, 2008)

About 30,000 bituminized waste drums and about 1800 drums of waste solidified by epoxy resin, generated from Tokai Reprocessing Plant, were stored in storage facilities. And study for disposal of these waste is performed. It was considered that radioactive nuclides and chemical components were released from these waste by contact of underground water, when disposed there waste. This paper is reported that result of leaching tests for these waste, done from 2003 to 2006. We've get precious knowledge and data, as follows.

(1) In leaching tests for bituminized waste, it has detected iodine-129 peak, considered difficult too low energy gamma to detect. We've get data and knowledge of iodine-129 behavior first. Leached radioactivity for 50 days calculated by peak area was equal for about 40% and 100% of including radioactivity in bituminized waste sample. And we've get data of behavior of nitric acid ion and so on, important to study for disposal, in various condition of sample shape or leaching liquid temperature.

(2) In leaching test for waste solidified by epoxy resin, we've get data of behavior of TBP, radionuclides and so on, important to study for disposal. Leached TBP was equal about 1% of including of sample. And we've get data of iodine-129 behavior, too. It was confirmed that leached iodine-129 was equal for about 60% and 100% of including sample, for 90 days.

Keywords: Leaching Test, Bitumen, TRU Waste, Reprocessing

* Nuclear Technology & Engineering Cooperation

目 次

1. はじめに	1
2. 各固化体の製造工程及び固化体評価試験設備の概要.....	3
2.1 アスファルト固化体製造工程の概要	3
2.2 プラスチック固化体製造工程の概要.....	4
2.3 固化体評価試験設備の概要.....	5
3. アスファルト固化体の浸出試験	6
3.1 アスファルト固化体の浸出試験の概要.....	6
3.2 試験方法	6
3.3 試料調製	7
3.4 試験結果	8
4. プラスチック固化体の浸出試験	10
4.1 プラスチック固化体の浸出試験の概要.....	10
4.2 試験方法	10
4.3 試料調製	10
4.4 試験結果	11
5. 考察.....	12
5.1 アスファルト固化体の浸出試験結果について.....	12
5.2 プラスチック固化体の浸出試験結果について.....	18
6. 結論.....	20
7. おわりに.....	21
参考文献.....	22
付録 1 アスファルト固化処理時のヨウ素の挙動に係るコールド試験の概要（1986年実施）と アスファルト固化処理運転の条件の比較評価.....	117
付録 2 γ核種分析における検出効率の誤差の評価.....	124
付録 3 過去の浸出試験結果の再考察.....	127

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Solidification Process of each Waste and Leaching test Equipment.....	3
2.1 Outline of Bituminization Process	3
2.2 Outline of Waste Solidified by Epoxy Resin	4
2.3 Outline of Leaching test Equipment.....	5
3. Leaching test of Bituminaized Waste	6
3.1 Outline of Leaching test of Bituminaized Waste	6
3.2 Leaching test Method	6
3.3 Sample Treatment	7
3.4 Result.....	8
4. Leaching test of Waste Solidified by Epoxy Resin	10
4.1 Outline of Leaching test of Waste Solidified by Epoxy Resin	10
4.2 Leaching test Method	10
4.3 Sample Treatment	10
4.4 Result	11
5. Discussion.....	12
5.1 Leaching test Result of Bituminaized Waste	12
5.2 Leaching test Result of Waste Solidified by Epoxy Resin	18
6. Conclusion	20
7. Afterword.....	21
References	22
Appendix 1 Evaluation of bituminization condition comparison with cold test, "Analysis of Iodine Behavior at Bituminization Process(1986)"	117
Appendix 2 Evaluation of an Error of Activity caused by Efficiency of Detector at γ Spectrum Analysis	124
Appendix 3 Re-evaluation of previous leaching test data.....	127

表リスト

表 2.1	標準的なアスファルト固化体の仕様-----	23
表 2.2	標準的なプラスチック固化体（エポキシ固化体）の仕様-----	23
表 2.3	分析装置の仕様-----	24
表 3.1	アスファルト固化体の浸出試験における分析項目一覧-----	25
表 3.2	アスファルト固化体の浸出試験の試験条件-----	26
表 3.3.1	アスファルト固化体の浸出試験における供試体形状及び寸法等の概要-----	27
表 3.3.2	アスファルト固化体の浸出試験における各供試体形状及び寸法等（その1）--	28
表 3.3.3	アスファルト固化体の浸出試験における各供試体形状及び寸法等（その2）--	29
表 3.4	アスファルト固化体(MA)の浸出試験1の試験結果（その1～その5）-----	30
表 3.5	アスファルト固化体(LA)の浸出試験2の試験結果（その1～その4）-----	34
表 3.6	アスファルト固化体の浸出試験3(硝酸の浸出促進)の試験結果-----	38
表 4.1	プラスチック固化体の浸出試験における分析項目一覧-----	39
表 4.2	プラスチック固化体の浸出試験の試験条件-----	40
表 4.3	プラスチック固化体の浸出試験における供試体形状及び寸法-----	41
表 4.4	プラスチック固化体の浸出試験の試験結果（その1～その3）-----	43
表 5.1	アスファルト固化体における硝酸イオンの拡散係数-----	45
表 5.2	プラスチック固化体におけるI-129の拡散係数-----	45

図リスト

図 2.1	アスファルト固化体製造工程の概要-----	46
図 2.2	エクストルーダの概要-----	47
図 2.3	プラスチック固化体製造工程の概要（廃溶媒の分離処理～プラスチック固化体製造） -----	48
図 2.4	アスファルト固化体サンプリング装置の概要-----	49
図 2.5	プラスチック固化体サンプリング装置の概要-----	50
図 3.1	アスファルト固化体の浸出試験における固化体試料の調製方法-----	51
図 3.2	アスファルト固化体（MA）の浸出試験1の試験結果（化学種）-----	52
図 3.3	アスファルト固化体（MA）の浸出試験1の試験結果（放射能）-----	53
図 3.4	アスファルト固化体（MA）の浸出試験1の試験結果（アスファルト分解成分）	54
図 3.5	アスファルト固化体（LA）の浸出試験2の試験結果（化学種）-----	55
図 3.6	アスファルト固化体（LA）の浸出試験2の試験結果（放射能）-----	56
図 3.7	アスファルト固化体（LA）の浸出試験2の試験結果（アスファルト分解成分）	57
図 3.8	アスファルト固化体（LA）の浸出試験3の試験結果-----	58
図 4.1	プラスチック固化体の浸出試験における固化体試料の調製方法-----	59
図 4.2	プラスチック固化体の浸出試験の試験結果（TBP/DBP）-----	60
図 4.3	プラスチック固化体の浸出試験の試験結果（放射能）-----	61

図 4.4	プラスチック固化体の浸出試験の試験結果（その他）	62
図 5.1	アスファルト固化体（MA）の浸出試験 1 における拡散依存性の評価	63
図 5.2	アスファルト固化体（LA）の浸出試験 2 における拡散依存性の評価	64
図 5.3	(1)～(14) アスファルト固化体の浸出試験 1 における γ スペクトルデータ	65
図 5.4	I-129 検出下限値と Cs-137 濃度の関係	79
図 5.5	アスファルト固化体（LA）の浸出試験 2 における I-129/Cs-137 の挙動	80
図 5.6	(1)～(14) アスファルト固化体の浸出試験 2 における γ スペクトルデータ	81
図 5.7	アスファルト固化体（MA）の浸出試験 1 における I-129 の挙動	95
図 5.8	アスファルト分解生成物の浸出に係る拡散依存性の評価（MA）	96
図 5.9	アスファルト分解生成物の浸出に係る拡散依存性の評価（LA）	97
図 5.10	アスファルト固化体の浸出試験 3 における硝酸イオン浸出に係る 拡散依存性の評価	98
図 5.11	拡散係数と浸出試験温度の関係（アスファルト固化体）	99
図 5.12	プラスチック固化体からの TBP/DBP の浸出挙動の拡散依存性の評価	100
図 5.13	プラスチック固化体からの I-129 の浸出挙動の拡散依存性の評価	101
図 5.14	プラスチック固化体からの Cs-137 の浸出挙動の拡散依存性の評価	102
図 5.15	プラスチック固化体からの Mg の浸出挙動の拡散依存性の評価	103
図 5.16	浸出液中の DBP 量と TBP 量の関係（プラスチック固化体）	104

写真リスト

写真 3.1	アスファルト固化体試料採取の状況（LA）	105
写真 3.2	アスファルト固化体（MA）の浸出試験 1 の試験終了後の外観写真	107
写真 3.3	アスファルト固化体(LA)の浸出試験 2 の試験終了後の外観写真	109
写真 3.4	アスファルト固化体(LA)の浸出試験 3 の試験終了後の外観写真	111
写真 4.1	プラスチック固化体試料取扱いの状況	113
写真 4.2	プラスチック固化体の浸出試験の試験終了後の外観写真	115

1. はじめに

アスファルト固化処理施設の火災爆発事故が起きる前（平成 9 年 3 月）までは、東海再処理施設で発生した低放射性濃縮廃液は、アスファルト固化処理が行われていた。製造した約 3 万本のアスファルト固化体は、現在もアスファルト固化体貯蔵施設(AS1)及び第二アスファルト固化体貯蔵施設(AS2)に貯蔵保管されている。

アスファルト固化処理対象となる廃液には、リン酸トリブチル（TBP）溶液の洗浄に用いられた炭酸ナトリウム溶液を含む廃液を廃棄物処理場の蒸発缶にて濃縮した比較的放射能濃度の高い MA 濃縮廃液と、床ドレン水等の廃液を第三低放射性廃液蒸発処理施設の蒸発缶で蒸発濃縮した LA 濃縮廃液があり、MA 濃縮廃液を主成分とする廃液をアスファルト固化処理したものを MA アスファルト固化体、LA 濃縮廃液を主成分とする廃液をアスファルト固化処理したものを LA アスファルト固化体と呼んでいる。

現在、これらのアスファルト固化体について処分に向けた検討が進められているところであり、これまでの検討では、固化体中に含まれる放射性ヨウ素や TRU 核種などの濃度に応じて MA アスファルト固化体は地層処分が有力、LA アスファルト固化体は余裕深度処分が有力と考えられている¹⁾。

また、東海再処理施設から発生する廃溶媒の処理に伴って、プラスチック固化体が発生し、これまでに約 1,800 本の固化体が製造されている。プラスチック固化体はエポキシ樹脂により固化したものとポリ塩化ビニル（PVC）により固化したものの 2 種類があるが、その大部分の約 1,700 本は前者の固化体である。製造された固化体はアスファルト固化体と同様に AS1 及び AS2 に貯蔵保管されている。

これらのプラスチック固化体は 100ℓ ドラム缶に固型化されているが、これまでの検討では、モルタル充填等の必要な処置を施した後、コンクリートピット処分又は余裕深度処分とする方向で検討されている。

一方、AS2 内には、貯蔵中の固化体の性状の変化を調べる目的で固化体評価試験設備が設置されている。平成 14 年度までは、この固化体評価試験設備を使用して、アスファルト固化体やプラスチック固化体の貯蔵中の物性変化や固化体の均質性などの評価を行ってきた。これにより、針入度（アスファルト固化体のみ）や硬度（プラスチック固化体のみ）といった、それぞれの固化体の基本的な物性に関するデータ、示差熱分析－熱重量分析などの熱的特性に関する分析データ、 γ 核種分析データ、固化体の浸出試験のデータ等、さまざまなデータを取得している。

これまでのアスファルト固化体に係る評価試験の結果からは、約 15 年間の貯蔵期間中において、固化体に顕著な物性の変化は認められていない。また、浸出試験においては、アスファルト固化体製造時に施された Cs-137 の不溶化処理の効果が確認されているが、1 回の試験に長期間要することから、6 本の固化体の試験を実施するに留まっており、固化体の処分を検討する上で評価上重要となる I-129 等についてはデータが取得されていない^{2) 3)}。

同様にプラスチック固化体においても貯蔵期間中に顕著な物性変化は認められていない。ま

た、プラスチック固化体の浸出試験については、1本の固化体の試験を実施するに留まっており、アスファルト固化体と同様、処分を検討する上で評価上重要となる I-129 等に関するデータが取得されていないほか、固化体中の TBP 等の化学種の浸出挙動に関しては調査が行われていない^{2) 3)}。

本報告書は、平成 15 年度から平成 18 年度にかけてアスファルト固化体及びプラスチック固化体の化学種及び放射性核種の浸出挙動に対するデータの拡充を図るために実施された、それぞれの固化体の浸出試験の試験結果をまとめて報告するものである。

2. 各固化体の製造工程及び固化体評価試験設備の概要

2.1 アスファルト固化体製造工程の概要

処理対象廃液の受入れから廃液の前処理工程を含めて、アスファルト固化体が製造されるまでの一連の流れを図 2.1 に示し、以下にその概要を述べる。

2.1.1 廃液受入れ

アスファルト固化処理の対象となる廃液には、リン酸トリブチル (TBP) 溶液の洗浄に用いられた炭酸ナトリウム溶液を含む廃液を廃棄物処理場の蒸発缶にて濃縮した比較的放射能濃度の高い MA 濃縮廃液と、床ドレン水等の廃液を第三低放射性廃液蒸発処理施設の蒸発缶で蒸発濃縮した LA 濃縮廃液がある。

MA 濃縮廃液には、アルカリ性の濃縮廃液と酸性の濃縮廃液がある。酸性廃液をアスファルト固化処理施設に受け入れる場合には、あらかじめ水酸化ナトリウムを添加するか、又はアルカリ性廃液を受け入れるなどの処置を行い、廃液の混合による放射性ヨウ素の放出を抑制するため常に廃液受入貯槽内がアルカリ性に維持する。

LA 濃縮廃液には、第三低放射性廃液蒸発処理施設の蒸発缶で蒸発濃縮された LA 濃縮廃液のほか、化学スラッジも処理対象に含まれる。

また、アスファルト固化処理施設に受け入れた MA 濃縮廃液、LA 濃縮廃液には、廃溶媒処理に伴って発生するリン酸二水素ナトリウムを主成分とするリン酸廃液が混合される場合がある。

2.1.2 前処理工程

反応槽における前処理の方法は、廃液中に含まれる主要な放射性核種の不溶化処理として最適化を図るべく、アスファルト固化処理運転が開始された当初から、さまざまな改良が行われており、製造された時期や廃液の種類 (MA 濃縮廃液/LA 濃縮廃液) に応じて添加される試薬の種類や添加の方法が異なる。

例えば、初期の LA 廃液には硝酸添加による pH 調整のみが施されたこともあるし、不溶化処理技術が確立された後の MA 濃縮廃液の処理においては、水酸化バリウム (Ba(OH)_2)、硝酸 (HNO_3)、フェロシアン化カリウム ($\text{K}_4\text{Fe(CN)}_6$)、硫酸ニッケル (NiSO_4)、亜硫酸ナトリウム (Na_2SO_3)、硝酸銀 (AgNO_3) が添加されている⁴⁾。

各試薬の添加の目的は以下の通りである。

- ① Ba(OH)_2 の添加は、廃液中の炭酸イオンとの反応で炭酸バリウム (BaCO_3) を沈殿させることで廃液中の Sr-90 を共沈させ、固化体から溶出しにくくする。なお、運転初期の頃は合わせて Na_2SO_4 を添加し BaSO_4 の沈殿を生成し同様に共沈させていた。
- ② HNO_3 の添加は、アスファルト固化体から塩分が溶出した場合の影響を小さくするために、pH を中性に近い状態とする。このとき、放射性ヨウ素の揮発を抑えるために弱アルカリ性 (pH8~9) としている。
- ③ $\text{K}_4\text{Fe(CN)}_6$ 及び NiSO_4 の添加は、両者の反応によって $\text{Ni}_2[\text{Fe(CN)}_6]$ を沈殿させるこ

とで、廃液中の Cs-137 を共沈させ、固化体から溶出しにくくする。

- ④ AgNO_3 はアスファルト固化処理の際に揮発による I-129 の大気中への放出を抑えるとともに、 Ag I を沈殿させ固化体から I-129 を溶出しにくくする。廃液中の I-129 は IO_3^- の形態で存在するものがあるため、合わせてヨウ素の還元剤として Na_2SO_3 を添加する。

2.1.3 アスファルト固化体製造工程

アスファルト固化体はエクストルーダと呼ばれる脱水混合機で処理対象の廃液とアスファルトを練り混ぜることにより製造される。エクストルーダの概要を図 2.2 に示す。

アスファルト固化体の製造時に、固化体に混練される塩分とアスファルト分の比 (S/B 比) が 40/60~50/50 となるように運転が行われてきた。

また、エクストルーダへの廃液供給速度は一時間あたり 2000 を基本として処理されてきたが、減容比向上等に係る技術開発のため、廃液供給速度を若干変更して運転し、製造された固化体もある。標準的なアスファルト固化体の仕様を表 2.1 に示す。

2.2 プラスチック固化体製造工程の概要

プラスチック固化は、廃溶媒から分離したリン酸トリブチル (TBP) を主成分とする廃液を処理対象としている。この廃溶媒の分離処理からプラスチック固化体製造までの一連の流れを図 2.3 に示し、以下にその概要を述べる。

2.2.1 廃溶媒からの TBP の分離工程

再処理工場で使用済み燃料の分離処理に用いた使用済みの廃溶媒は、TBP 約 30vol%、ドデカン約 70vol% から成る。TBP とドデカンの分離は、リン酸抽出法と呼ばれる方法により分離される。廃溶媒に高濃度のリン酸を添加すると TBP はリン酸と付加体を生成し、ドデカンとの比重差から 2 相に分離する。このうち、下相の TBP のリン酸付加体を回収した後、純水を加えると生成していた付加体が分解され、TBP とリン酸廃液に分離される。このようにして、廃溶媒中から TBP が回収される。合わせて発生したリン酸廃液は、アスファルト固化処理施設が運転していた間は、アスファルト固化処理の対象としていた。

なお、分離回収したドデカンは、シリカゲル等の吸着剤を通過させることにより、放射性物質を含む不純物を除去した後、再処理工場でも再使用している。

2.2.2 処理対象廃液

廃溶媒から分離回収された TBP には、不純物としてドデカンが 10% から 20% 程度含まれているほか、I-129 や TRU 核種等の長半減期核種が含まれている。

2.2.3 プラスチック固化体製造工程

プラスチック固化体製造工程にはエポキシ固化と PVC 固化の 2 つの方法があるが、これまで製造された約 1,800 本のプラスチック固化体のうちのほとんどはエポキシ固化体である。

固化体製造は、いずれもインドラムミキシング方式で行われる。

エポキシ固化においては、廃溶媒から分離した TBP を定量槽に送液、定量した後、1000ドラム缶内に送り、ここに固型化剤（エポキシ樹脂の主剤及び硬化剤）を混合して固化体とする。この際、安定な状態で固化体とするため、エポキシ樹脂のほかに TBP を吸収しやすいタルク（ $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ を主成分とする粉体）を添加している。

PVC 固化においては、PVC の固型化剤及び TBP をドラムに充てん混合した後、誘導加熱により約 80℃に加熱して固化体とする。

標準的なプラスチック固化体の仕様を表 2.2 に示す。

2.3 固化体評価試験設備の概要

AS2 に設置されている固化体評価試験設備には、アスファルト固化体ドラム缶やプラスチック固化体ドラム缶から、固化体の試料を採取するためのサンプリング装置や、それぞれの固化体の物性、含有する放射能等の分析を行う装置等がある。以下にその概要を述べる。

2.3.1 アスファルト固化体サンプリング装置

アスファルト固化体サンプリング装置の概要を図 2.4 に示す。このアスファルト固化体サンプリング装置を用いた試料採取は、以下の流れで行う。

まず、蓋開閉装置でアスファルト固化体ドラムの蓋を取り外し、高圧による押し切り方式でコアサンプル採取用の治具（アスファルトコアサンブラ）を固化体ドラム内に挿入していく。このアスファルトコアサンブラを再度上昇させた際に、円柱状の固化体が採取される。

固化体試料を収納したコアサンブラを横置きにした後、アスファルトコアサンブラの下側から押し出し棒を挿入することで固化体試料を抜き出し、さらにワイヤーソーで切断することで直径約 4.5cm、高さ 1.0cm の試料を得る。

2.3.2 プラスチック固化体サンプリング装置

プラスチック固化体サンプリング装置の概要を図 2.5 に示す。このプラスチック固化体サンプリング装置を用いた試料採取は、以下の流れで行う。

まず、プラスチック固化体サンプリング装置に予めドラム缶の蓋を取り外した状態でセットし、円筒状の先端に鋸刃を有する治具（プラスチックコアサンブラ）を回転させながら下降させ、引き上げることで円柱状の固化体が採取される。

その後、電動鋸で加工し、直径約 5.0cm、高さ 1.0cm の試料を得る。

2.3.3 各種分析装置

分析装置には、液体シンチレーション分析装置やγ核種分析装置などがあり、本試験における供試体及び浸出液の各種分析には表 2.3 に示す各種分析装置を用いた。

3.アスファルト固化体の浸出試験

3.1 アスファルト固化体の浸出試験の概要

アスファルト固化体からの浸出挙動を調査するため、これまでに6本のアスファルト固化体の浸出試験を実施し浸出に係る種々のデータを取得してきた。しかしながら、処分時の安全評価上重要なI-129等の放射性核種や硝酸イオン等の化学種の挙動を明らかにするまでには至っていない。

そこで、まず、アスファルト固化体の浸出試験1として、アスファルト固化体(MA固化体)から浸出する長半減期の放射性核種や固化体中に含まれる硝酸等の化学成分について、平成14年度頃に導入した新しい分析装置を用いて定量分析することとした。また、これと同時に処分場のバリア性能に影響を与えると考えられるもので、アスファルト成分が分解して発生する可能性がある有機酸(ギ酸、酢酸、シュウ酸)の挙動についても合わせてデータを採取することとした。

次に、アスファルト固化体の浸出試験2として、LA固化体について浸出試験を実施し、MA固化体と同様、処分における浸出モデルの検討に必要なデータを採取することとした。また、合わせて、平成6年から平成7年にかけて実施したLA固化体の浸出試験において確認された、浸出液のpHが酸性を呈する事象³⁾の再現性を調査するとともに、浸出液中にTBP、DBPが検出されるかどうかについても確認することとした。

さらに、アスファルト固化体の浸出試験3として、処分施設の機能や放射性核種の挙動に影響を及ぼす可能性のある硝酸成分を加速的に浸出させて、アスファルト固化体から取り除くことができるかどうかの可能性を調査するため、固化体形状や浸出試験の温度などを変化させて、硝酸イオン等の化学成分の浸出挙動を調査することとした。

各試験における調査項目(分析項目等)を表3.1に示す。

3.2 試験方法

固化体の浸出試験の標準的な方法には、IAEA法やMCC法があるが、想定される処分場の環境、採取可能な固化体サンプルの量などから、本試験においては、以下の方法で浸出試験を行うこととした。

浸出試験の手順については、試験に供するアスファルト固化体ドラムから十分な量のサンプルを採取することが可能であることから、浸出液の入れ替えを要するIAEA法ではなく、浸出液の入れ替えを要せず、浸出した各成分濃度を高くすることが可能なMCC1P法に準拠した手順とした⁵⁾。ただし、各試験の浸出条件については、調査目的や予想される浸出成分の濃度等に応じて以下の通りの設定とした。各浸出試験の試験条件を表3.2に示す。

(1)アスファルト固化体の浸出試験1における試験条件

アスファルト固化体の浸出試験1ではMA固化体の処分方法として有力と考えられている地層処分の環境を想定し、浸出液の温度を50℃に維持した状態で浸出試験を行うこととした。

浸出液には、評価の基本となる純水とアルカリ環境を模擬した水酸化カルシウムを主成分とする溶液(pH12.5)の2種類を用いることとした。

さらに、これまでに実施してきた試験において、浸出成分の評価が行えていないことから、固化体試料の大きさをこれまでの試料より大きいサイズとし、MCC1P法で定める固化体の表面積と浸出液の比の値が確保できる大きさ（1cm×2cm×3cm）とした。

(2)アスファルト固化体の浸出試験 2 における試験条件

アスファルト固化体の浸出試験 2 では LA 固化体の処分方法として有力と考えられている余裕深度処分の環境と MCC1P 法での標準的な条件を考慮し、浸出液の温度を 40℃に維持した状態で浸出試験を行うこととした。

浸出液には、アスファルト固化体の浸出試験 1 と同様、評価の基本となる純水とアルカリ環境を模擬した水酸化カルシウム（pH12.5）の 2 種類を用いることとした。

固化体試料の大きさについては MA 固化体とほぼ同程度の大きさのものとしたが、試料成型方法が容易な半円柱形の形状とした。

(3)アスファルト固化体の浸出試験 3 における試験条件

アスファルト固化体の浸出試験 3 は、アスファルト固化体から硝酸イオンの浸出を促進するための条件をサーベイするために複数の条件下での試験を実施した。アスファルト固化体試料には 3 種類の大きさ（1cm,1.5cm,2cm）の立方体形状のものを用意し、浸出液の温度は 70℃の条件下での試験を実施した。これらの試験については、いずれも浸出液には純水を用いた。

3.3 試料調製

3.3.1 供試体の選定

(1)アスファルト固化体の浸出試験 1 の供試体

アスファルト固化体の浸出試験 1 においては MA 固化体からの浸出挙動の調査を行うため、約 17,000 本ある MA 固化体のうち、固化体製造時に I-129 に対して不溶化処理が施されている固化体でかつ、I-129 含有量が比較的高いと思われる固化体を選定した。

(2)アスファルト固化体の浸出試験 2 の供試体

アスファルト固化体の浸出試験 2 においては、LA 固化体からの浸出挙動の調査を行うこととした。アスファルト固化体製造時の不溶化処理が浸出挙動に及ぼす効果について評価するため、アスファルト固化体の浸出試験 1（MA 固化体が対象）と異なり、約 13,000 本ある LA 固化体の中から I-129 に対して不溶化処理が施されていない固化体を選定した。

(3)アスファルト固化体の浸出試験 3 の供試体

アスファルト固化体の浸出試験 3 においては、固化体の形状をひとつのパラメータとして硝酸イオンの浸出を加速することができるかの調査を主な目的としているが、他の試験結果との比較を考慮して、アスファルト固化体の浸出試験 2 に供した固化体と同じ固化体から採取した試料を用いて試験を行うこととした。

3.3.2 試料調製の方法

各浸出試験に供した固化体試料の調製方法を図 3.1 に示す。

各試験に供した固化体試料は、まず、固化体評価試験設備のサンプリング装置を用いて、固化体ドラム缶から採取した約 4.5cm φ × 約 1.0cm のコア試料をグローブボックス内で成型し、各浸出試験用の容器に収納した。試料採取の状況を写真 3.1 に示す。

グローブボックスにおける試料の成型は、加熱を施さずにサンプル押し切り装置で切断し、各試験に合わせた試料の形状とした。各試験の供試体のデータを表 3.3 に示す。

3.4 試験結果

3.4.1 アスファルト固化体の浸出試験 1

アスファルト固化体の浸出試験 1 の試験結果を表 3.4 及び図 3.2～図 3.4 に、浸出試験後の供試体の外観写真を写真 3.2 に示す。

放射性核種の浸出挙動について特筆すべきは、供試体の γ 核種分析において検出されなかった I-129 が浸出液の同分析において検出されたことであり、浸出期間が 3 日程度の試料においても固化体中に含まれる量のほぼ全量に相当する量が浸出した。また、浸出期間が 28 日を超えると浸出液中の濃度が減少する傾向が確認された。一方、Cs-137 については、従来の浸出試験の結果と同様に浸出が抑制されており、154 日間の浸出期間においても、数%程度の浸出のみに留まっている。C-14 については、Cs-137 と同様、浸出が抑制されており、154 日間の浸出期間においても供試体中に含まれる量の約 10%程度の浸出に留まっている。また、浸出液中の TRU 核種は全て検出下限値未満であった。ただし、TRU 核種については検出下限値が高かったため、これらが浸出していないとはいえない。

固化体中に含まれる化学種の浸出挙動について、硝酸イオン、亜硝酸イオン、硫酸イオン、リン酸イオンの各陰イオン及び、ナトリウムイオンについては、浸出期間が 3 日程度の試料において、ほぼ全量浸出する結果となった。

アスファルトが分解して発生する可能性がある有機酸（ギ酸、酢酸）の浸出液中の濃度は、浸出期間が長くなるにつれて徐々に増加し、ギ酸においては最大約 10ppm、酢酸で最大約 5ppm の浸出を確認した。また、いずれの成分も浸出液にアルカリ溶液（pH12.5）を用いた試験において若干多めに浸出していた。なお、シュウ酸については、これらの成分と同様にイオンクロマト分析を試みたが共存する亜硝酸の影響により定量できなかった。

3.4.2 アスファルト固化体の浸出試験 2

アスファルト固化体の浸出試験 2 の試験結果を表 3.5 及び図 3.5～図 3.7 に、浸出試験後の供試体の外観写真を写真 3.3 に示す。

放射性核種については、供試体である LA 固化体及び浸出液の γ 核種分析において、I-129 が検出された。その浸出はゆるやかで、浸出期間が 56 日目まで徐々に増加する傾向が認められ、浸出期間中に供試体中に含まれる量の約 50%に相当する量が浸出しているのが確認された。また、Cs-137 については、I-129 と類似する浸出挙動を示した。C-14 についても測定を試みたが、いずれの試料からも検出されなかった。

固化体中に含まれる化学種の浸出挙動について、硝酸イオンやナトリウムイオン等の各イオンについても放射性核種と同様、徐々に浸出量が増加する傾向にあり、浸出期間中に供試体中に含まれる量のほとんどが浸出しているのが確認された。

アスファルトの分解成分である有機酸（ギ酸，酢酸）の浸出液中の濃度は、浸出期間が長くなるにつれて徐々に増加し、56日目の試料において最大の濃度が確認され、ギ酸で約150ppm、酢酸で約6ppmであった。MA固化体を用いた浸出試験1で確認された、浸出液の液種による差異は認められなかった。

また、いずれの浸出液においてもpHは11付近で安定しており、過去の浸出試験で見られた酸性へ変化する事象は再現しなかった。TBP及びDBPについては、いずれの浸出液からも検出されなかった。

3.4.3 アスファルト固化体の浸出試験3

アスファルト固化体の浸出試験3の試験結果を表3.6及び図3.8に、浸出試験後の供試体の外観写真を写真3.4に示す。

供試体が小さいほど、早い段階で硝酸イオンの浸出比 C_t/C_0 が100%に近づく傾向が確認され、□1.0cmの供試体では浸出期間が3日間で浸出比が約84%、□1.5cmの供試体では10日間で浸出比が約93%、□2.0cmの供試体では28日目で浸出比が約100%に達し、それ以降は浸出比の増加は見られなかった。

4.プラスチック固化体の浸出試験

4.1 プラスチック固化体の浸出試験の概要

これまでプラスチック固化体の評価試験において、実際に1000ドラムに固型化されたプラスチック固化体から試料を採取し浸出試験を行った例はない。プラスチック固化体からの浸出挙動を評価する上で唯一のデータは、平成8年から9年にかけて実施した浸出試験のデータである。このときには、硬化反応前の液状の状態のTBPを採取し、固化剤と共にステンレス容器内に流し込んで供試体を作製し、IAEA法により浸出挙動に関するデータを採取している。しかしながら、処分時の安全評価上重要な核種であるI-129等の放射性核種やTBP等の処分場のバリア性能に影響を及ぼす化学種に関するデータを取得しておらず、これらの挙動を明らかにするまでには至っていない。

そこで、ドラム缶に固型化されたプラスチック固化体から試料を採取し、その浸出試験を実施してI-129等の放射性核種やTBP、その劣化物であるDBP（リン酸ジブチル）などの浸出挙動に係るデータを取得することとした。

本試験における調査項目（分析項目等）を表4.1に示す。

4.2 試験方法

浸出試験の方法には、アスファルト固化体の浸出試験と同様、浸出液の入れ替えを要するIAEA法ではなく、浸出液の入れ替えを要せず浸出した各成分濃度を高くすることが可能なMCC1P法に準拠した手順とした。ただし、本試験の浸出条件のうち、浸出液中の分析において検出しやすくするため、供試体はアスファルト固化体の浸出試験1と同じ大きさ（1.0cm×2.0cm×3.0cmの直方体）とした。本浸出試験の試験条件を表4.2に示す。

4.3 試料調製

4.3.1 供試体の選定

前回実施した試験が固型化直後のプラスチック固化体の挙動を示すものと考え、本試験においては、エポキシ固化運転が開始された比較的初期の昭和62年に製造されたエポキシ固化体を供試体とすることにした。

4.3.2 試料調製の方法

本浸出試験に供したプラスチック固化体試料の調製方法を図4.1に示す。試料採取の状況を写真4.1に示す

まず、固化体評価試験設備のプラスチック固化体サンプリング装置を用いて、固化体ドラム缶から約5.0cmφ×約1.0cmの試料を採取し、その試料をグローブボックス内においてサンプル押し切り装置を用いて切断、成型し、浸出試験の供試体とした。

供試体に係るデータを表4.3に示す。

4.4 試験結果

プラスチック固化体の浸出試験の試験結果を表 4.4 及び図 4.2～図 4.4 に、浸出試験後の供試体の外観写真を写真 4.2 に示す。

154 日間の浸出期間において、供試体に含まれる 60%～100%の I-129 が浸出していることが確認された。また、I-129 の浸出量は、純水に浸すよりもアルカリ性(pH12.5)の条件下の方が大きい傾向にあった。Cs-137 については、供試体の分析において検出下限値未満であったが、浸出液の分析では有意値となり、固化体から浸出していることが確認された。Am-241 等の TRU 核種については、いずれの供試体、浸出液においても検出下限値未満であった。ただし、TRU 核種については検出下限値が高かったため、これらが浸出していないとはいきれない。

注目した化学種である TBP の浸出液中の濃度は、試験期間が長くなるほど大きくなっていったが、154 日間の浸出期間においても固化体中に含まれる量の約 1 %程度の量が検出されたのみで、最大の濃度でも約 220ppm であった。一方、TBP の分解により生成する DBP については、浸出液(pH12.5)では TBP の 10 倍以上の濃度で検出されたが、浸出液（純水）においては TBP と同程度に留まった。

また、プラスチック固化体製造時に加える添加剤の成分であるマグネシウムについて、浸出液の分析を試みたところ、浸出液（純水）中に僅かながら浸出しているのが確認された。浸出液中の濃度は、約 10ppm で、プラスチック固化体中に含まれる量の約 0.5%に相当する量であった。

5. 考察

5.1 アスファルト固化体の浸出試験結果について

3つのアスファルト固化体の浸出試験の結果を基に、処分上の評価に有用な「各化学種及び放射性核種の各成分の浸出挙動」及びリコンディショニングを検討する場合に重要な化学種である「硝酸イオン浸出挙動に与える浸出条件の影響」について考察した。

5.1.1 浸出挙動における拡散依存性の評価

アスファルト固化体からの各成分の浸出挙動は、塩の溶解及び拡散現象によって説明されるが、そのほとんどは拡散現象に支配されるといわれている。

拡散現象（フィックの法則）に従う場合は、以下の式に示すように、浸出比 C_t/C_0 が浸出期間の $1/2$ 乗に比例して増加する^{6),7)}。

$$(C_t/C_0) \times (V/S) = 2 \times (D \times t / \pi)^{1/2}$$

ここで、 V は供試体体積、 S は供試体表面積、 D は拡散係数である。

拡散現象に対する依存性を評価するため、各試験の結果を基に横軸に浸出期間の2分の1乗 (\sqrt{d}) をとり、アスファルト固化体の浸出試験1及び浸出試験2による化学種及び放射性核種の結果をプロットしてみた（図5.1～図5.2）。

(1) 化学種の浸出挙動

MA 固化体及び LA 固化体の固化体中の主要な塩の成分である硝酸イオン、ナトリウムイオン、リン酸イオン、硫酸イオンについては、浸出試験の初期において、直線的に増加し、遅いものでも約28日目にはほぼ100%浸出している。このように、これらのイオンは、浸出初期に拡散現象に支配されて、早い段階で全量を浸出するに至っているものと考えられる。

この中で、硫酸イオンについては、硫酸バリウムなど浸出しにくい形態で固化体中に含まれていることも予想されたが、他の陰イオンと同様、易溶性の挙動を示した。

また、アスファルト固化体には、固化処理対象の廃液中に存在した炭酸イオンが含まれると考えられるが、イオンクロマトによる測定では、試料調整段階での空気中の炭酸ガスの吸い込みによる誤差を生じるため、測定対象とはしなかった。C-14の測定結果からすれば、硝酸イオンやナトリウムイオン等の他のイオンとは異なり、Cs-137の浸出挙動に類似した結果となっていることから、固化体製造時にSr-90の不溶化処理により、廃液中の炭酸イオンが固化体中から浸出しにくい炭酸バリウム塩として沈殿し、浸出が抑制された結果であると理解できる。

(2) 放射性核種の浸出挙動

浸出試験に供した LA 固化体は、不溶化処理技術が確立される前のもので、各種不溶化試薬の添加を行っていない。したがって、固化体中には不溶化試薬の添加により生成する不溶化塩は存在しないはずである。

一方、浸出試験に供した MA 固化体は、不溶化技術が確立された後に製造された固化体で、固化体製造時の前処理段階において、以下の各種不溶化試薬が添加されており、不溶化塩が存

在すると考えられる。

- ① 水酸化バリウム（炭酸バリウムを生成、共沈により Sr-90 を不溶化）
- ② フェロシアン化カリウム、硫酸ニッケル（フェロシアン化ニッケルを生成、共沈により Cs-137 を不溶化）
- ③ 硝酸銀、亜硫酸ナトリウム（ヨウ素酸イオンを還元し、ヨウ化銀として沈殿）

上記の不溶化処理の状況を踏まえた上で、放射性核種の浸出挙動について検討した。

図 5.1 及び図 5.2 から、MA 固化体中の I-129 は浸出期間の初期の段階でほとんど浸出しているように、LA 固化体中の I-129 は拡散現象に支配されて浸出が進んでいるように思われる。まず、MA 固化体からの浸出挙動について考えてみる。今回の試験において、数多くのサンプルから I-129 の γ 線のピーク（39.6keV）が、初めて確認された。このピークは、LA 固化体の供試体及び浸出液、並びに MA 固化体の浸出液のほとんど全てのサンプルから検出されたが、MA 固化体の供試体（浸漬前）においては検出されなかった（このため、図中の MA 固化体の C_0 は、処理対象廃液の分析値（分析精度は±10%以内）より計算したものを使用している）。

ここで、I-129 の濃度が最も高いと考えられる MA 固化体の供試体において I-129 が検出されていないにも係らず、浸出液から検出されていることが奇異に感じられる。検出されたサンプルの γ スペクトルデータ（図 5.3 (1) ～図 5.3 (14)）を確認したところ、分析結果が有意となっているものについては、確かに 39.6keV 付近にピークがあった。

これまで実施してきた固化体評価試験や浸出試験において、I-129 は検出されなかったのは、Cs-137 が高濃度で存在するために Cs-137 のコンプトン散乱の影響と娘核種（不溶化試薬としても添加）の Ba の特性 X 線（約 32～38keV）の影響であると考えてきた。

そこで本試験を実施する前まで使用していた旧検出器（東芝製 IGC2020S:純ゲルマニウム半導体検出器）と、今回使用した検出器（キャンベラ製 BE3820:高純度ゲルマニウム半導体検出器）の検出下限値を比較するため、サンプル中に含まれる Cs-137 の測定値に対する I-129 の検出下限値の関係を確認してみた。その結果を図 5.4 に示す。この図から、以下のことがいえる。

- ① 従来使用してきた検出器に比べ、本試験で使用した検出器が高性能であったことから、I-129 の検出下限値が大幅に下がり本試験において I-129 が検出されたと考えられる。
- ② 本試験で使用した検出器においては、予想した通り、Cs-137 の放射エネルギーが小さいほど、I-129 の検出下限値が小さくなっており、両者の間には強い相関がある。
- ③ 今回の試験において、LA 固化体については、供試体、浸出液ともに検出下限値の数倍程度のピークとなっているが、MA 固化体の浸出液においては、検出下限値の 1 桁以上高い放射能が検出されている。

さらに、浸出液のサンプルは個別の容器に封入されており、試料の取扱いにおけるクロスコンタミの可能性も考えられない。

これらのことから、浸出液中から I-129 が検出されたことはまぎれもない事実であり、I

I-129 が固化体から浸出してきたことに間違いはないと考えられる。また、供試体において検出されなかった I-129 が浸出液のみから確認されたことは、供試体においては Cs-137 の濃度が高いために I-129 の検出下限値が高く検出されなかったものが、浸出液においては Cs-137 が不溶化処理の効果で固化体中に残留し、I-129 の検出下限値が下がった結果、I-129 が検出されたと理解することができる。

なお、従来用いていた検出器では、今回の固化体を測定したとしても、I-129 が検出できる放射能レベルではなかったことが分かる。

残る疑問は、Cs-137 と同様に不溶化したはずの I-129 が、何故、固化体から浸出したのかということである。

アスファルト固化処理運転初期の頃、ヨウ素の挙動を調べるために、アスファルト固化処理前の前処理方法やエクストルーダでの脱水混合の状態を模擬して、ビーカースケールでのコールド試験を実施したことがある。その結果からは、前処理段階では硝酸銀及び亜硫酸ナトリウムの添加により Ag I として沈殿し、固化処理中のヨウ素の揮発は抑制されるものの、アスファルト固化処理後の固化体から Ag I として沈殿したはずのヨウ素の約 40%が I⁻イオンとして再検出されており、脱水混合中に Na I に転化する可能性があることを示す結果が得られている。(付録-1)

実際のアスファルト固化体製造時のエクストルーダ内における、塩分相互間又は塩分とスクリーシャフトの接触は、ビーカースケールで確認した以上に激しいものであることが予想されることから、Ag I として沈殿した I-129 の Na I への転化がコールド試験で確認した以上に起こることも考えられる。当然、転化反応が生じていたとすると、これらのイオンが易溶性の塩の形態で固化体中に存在することになり、本試験で MA 固化体からほぼ全量の I-129 が浸出した挙動を理解することができる。Ag I から Na I への転化反応が熱力学的に可能かどうか評価しておくべきであろう。

次に、LA 固化体からの浸出挙動について考える。試験 2 における γ スペクトルデータを図 5.6 (1) ～図 5.6 (14) に示す。アスファルト固化体の浸出試験 2 に供した LA 固化体は、Cs-137, I-129 の不溶化処理を行っていないため、他の化学種と同様に浸出している挙動が認められるが、これらの浸出比が 182 日経過後においても 100%に達していない。

試験後の供試体の γ 核種分析の結果から供試体中に残存する割合を浸出した割合 (Ct/Co) と合わせてグラフにプロット (図 5.5) してみたところ、浸出試験前の固化体中に含まれた量から、浸出した量を差し引いた残量に相当する Cs-137, I-129 が、浸出試験後の供試体から検出され、これらが固化体中に残留する結果を示した。そこで、Cs-137, I-129 の一部が固化体中に残留した理由について考察した。

供試体における Cs-137 の放射エネルギーの分析結果は、処理対象廃液の受入貯槽における分析データから求めた放射エネルギーと大きく異なる(廃液分析値から計算される値の約 50 倍)ため、LA 固化体製造のキャンペーンに移行する前に処理した MA 廃液中の Cs-137 が残存していた可能性

が高い。MA 廃液の処理キャンペーンにおいては Cs-137 に対する不溶化処理が行われており、その一部が LA 固化体中に移行したとすれば、本試験における Cs-137 の浸出が約 50%に留まっていることについても理解できる。

一方、I-129 については、供試体を直接 γ 核種分析で測定した結果と処理対象廃液中濃度から計算により求めた推定値がほぼ一致している。また、本試験に供した固化体を製造した 1986 年当時は LA 廃液、MA 廃液いずれの前処理工程においても I-129 の不溶化処理は行っておらず、固化体からの I-129 の浸出を抑制する別の機構が作用しているものと考えられる。

ヨウ素の挙動調査のために実施したピーカースケールのコールド試験において、BaCO₃ とリン酸イオンの共存下で pH 調整（硝酸添加）を実施した際に Ba の沈殿形態の変化と共に I⁻ の不溶化が生じることや、K₄Fe(CN)₆ の添加により IO₃⁻ が不溶化されることが確認されている（付録-1）。

試験に供した LA 固化体の前処理においては pH 調整のための硝酸を添加したのみであるが、その直前のキャンペーンでの MA 固化体製造時に Cs-137 及び Sr-90 の不溶化処理のために Ba(OH)₂、K₄Fe(CN)₆ 及び NiSO₄ の添加を実施しており（Na₂SO₃ 及び AgNO₃ の添加は行っていない）、この処理によって沈殿した BaCO₃ 成分が槽内に残存したとすれば、処理対象廃液中にはリン酸イオンを多く含んでいたことから、同様の反応が起きていることが考えられる。すなわち、pH 調整時に I⁻ が沈殿を生じて不溶化した可能性が高い。

これらの結果からは、一部浸出が抑制されるとしても、ヨウ素の不溶化処理（AgNO₃ 等の添加）の有無にかかわらず約 40%～100%の I-129 が浸出しており、処分時の安全評価においては、接触する地下水の液温が 40℃以上の環境下では不溶化処理の有無にかかわらず、100 日程度の短期間で固化体中に含まれる I-129 の大半が浸出すると考えておくべきである。

また、MA 固化体の浸出試験において、浸出期間が 28 日間を過ぎると、I-129 の浸出比が見かけ上、低下しているように思われるが、これは一旦浸出した I-129 が浸出液中の他の成分と反応し、沈殿した可能性が考えられ、その傾向は、pH12.5 の浸出液において顕著である（図 5.7）。

なお、固化体の γ 核種分析において、固化体の試料形状を半円柱形としたことで検出器の効率に影響し、ピーク面積から放射能に換算する際に誤差を生じる可能性があるため、形状の違いによる検出器のエネルギー効率の変化を確認した。その結果、形状の違いによる誤差は 10～20%程度であった（付録-2）。図 5.5 に示したように、浸出試験前の供試体の分析結果と試験後の供試体及び浸出液の分析結果から求めた放射能の収支がほぼ一致しており、評価上の問題はないと考える。ピーク面積から放射能への換算においては、I-129 の γ 線エネルギーが 39.6keV と低いため、多項式（4 次式）による近似により求めた効率を使用した。

(3) アスファルト分解生成物の浸出挙動

1996 年にアスファルト固化処理に使用していたアスファルトと同仕様のアスファルトに放射線照射を行った後、90℃の浸出液に浸して、アスファルトの分解成分である有機酸（ギ酸、

酢酸)の浸出量を調査した報告がある⁸⁾。この報告では、ギ酸と酢酸がほぼ同程度の濃度で検出されており、その濃度は浸出期間が長くなるにつれて直線的に増加し、約180日間の浸出期間で50ppm程度浸出したとされている。

図3.4及び図3.7に示すとおり、今回の試験においては、MA固化体においては前述の報告と同様に、浸出期間が長くなるにつれて直線的に増加する傾向にあるが、約150日間の浸出でも約10ppmに留まっている。LA固化体については、ギ酸が文献に記載されている値より多く浸出している。また、浸出期間初期にほとんど浸出し、以後停滞しているように見える。

これらのアスファルト分解生成物の挙動を調べるため、他の化学種、放射性核種と同様、浸出期間の平方根 \sqrt{d} を横軸にとり、拡散現象への依存の程度を確認してみることにした。図5.8及び図5.9にその結果を示す。ここで、LA固化体の浸出試験の結果については、増加傾向の認められる56日目までのデータをプロットしている。

図5.8から、MA固化体からのギ酸、酢酸の浸出については、明らかに \sqrt{d} とは線形の関係にはない。一方、図5.9を見ると、LA固化体からのギ酸、酢酸の浸出については、浸出期間の平方根 \sqrt{d} と線形の関係にあること及び、試験前に供試体中に含まれていた量が浸出した以降は増加が認められていないことから、浸出期間中に分解反応は進行しておらず、拡散現象に依存している可能性が高いと考えられる。また、LA固化体の浸出試験の結果において、浸出初期のデータから前述の報告にある50ppmを大きく上回っているが、その原因としては、固化体が貯蔵されていた環境において、貯蔵期間が長期に渡ることにより周辺の固化体からの放射線に長く曝されていたことや、固化体製造時に当該キャンペーンで頻繁に行っていたパークロールエチレンによるエクストルーダ洗浄操作の影響などの可能性が考えられる。

また、両固化体の浸出挙動の違いには浸出液の温度が影響している可能性もあり、本試験の結果のみから、両固化体の挙動の違いの原因を結論付けることはできない。しかしながら、MA固化体は拡散現象に支配される場合の浸出挙動と異なり、浸出期間が長くなるにつれて、直線的にギ酸、酢酸の浸出量が増加する傾向にあることから、分解反応が継続的に進行している可能性が高いと考えられる。

一方、前述の報告には、化学的な劣化の場合にギ酸、酢酸の生成が多く、放射線による劣化の場合はシュウ酸の生成量が多かったことが報告されているが、今回の試験においては、シュウ酸の定量が行えなかったことから、これらの傾向についても比較評価を行うことはできない。今後、シュウ酸の分析定量が可能となれば、その傾向を確認できると考えられる。

5.1.2 浸出条件の硝酸イオン浸出挙動に与える影響の評価

試料の形状の違いによって、どの程度硝酸イオンの浸出を促進することができたかを評価するため、アスファルト固化体の浸出試験3における浸出初期の直線性が認められる期間のデータを基にして、拡散係数を求める。横軸に浸出期間の2分の1乗(\sqrt{d})に、直線性が認められる期間の C_t/C_0 をプロットしたものを図5.10に、拡散係数を求めた結果を表5.1に示す。

この図から、アスファルト固化体を小さく加工することで、硝酸イオンの浸出をある程度促進することができると考えられる。ただし、 $\square 1.0\text{cm}$ とした試料においては、 $\square 1.5\text{cm}$ 、 $\square 2.0\text{cm}$ の供試体の試験結果から求めた拡散係数に比べてやや低い値となっている。これは、比較的早

い段階で塩分の浸出が進行することで、各供試体に変形し、表面積が変化することによって、計算で求めた拡散係数の値にばらつきを生じているためであると考えられる。

また、温度との相関を調べるため、アスファルト固化体の浸出試験 1、2 の結果と合わせて、拡散係数と温度の関係をアレニウスプロット（図 5.11）してみた。ややばらつきがあるが、この図から活性化エネルギーを求めると約 55kJ/mol になる。

5.1.3 試験後のアスファルト固化体の外観観察

写真 3.2 及び写真 3.3 をみると、アスファルト固化体の浸出試験 1 及び浸出試験 2 においては、いずれの供試体についても、浸出期間中に大きく変形はしていない。

一方、写真 3.4 に示すように、浸出試験 3 においては、浸出期間 73 日間で原型を留めない程度に変形が認められている。浸出試験 1 においても供試体中の塩分を構成する化学種は早期に浸出比 100%に達しているにも係らず、供試体に大きな変形はないことから、浸出試験 3 における供試体の変形は、浸出液の温度（70℃）がアスファルト成分の軟化点（85℃）付近であることに起因しているものと考えられる。

pH12.5 溶液に浸した固化体の表面には、白い結晶が認められた。これを水に溶かしてイオンクロマト分析（定性分析）したところ、全体の約 5wt%の成分は特定できなかったものの、ナトリウム、硝酸のほか、カルシウムや炭酸の成分が検出された。白い結晶は、外観観察のために試料を乾燥していた際に、これらの成分が塩を形成し析出したものと考えられる。

5.2 プラスチック固化体の浸出試験結果について

プラスチック固化体の浸出試験結果を基に、処分上の評価に有用な「各化学種及び放射性核種の各成分の浸出挙動」について考察した。

5.2.1 浸出挙動における拡散依存性の評価

アスファルト固化体の浸出挙動の評価と同様、拡散現象に対する依存性を評価するため、各試験の結果を基に横軸に浸出期間の 2 分の 1 乗 (\sqrt{d}) をとり、プラスチック固化体の浸出試験の結果をプロットしてみた (図 5.12～図 5.15)。これらの図を基に化学種及び放射性核種等の浸出挙動について考察した。

(1) TBP/DBP の浸出挙動

DBP は TBP の分解によって生成し、生成する DBP 分子の数は元の TBP 分子の数に等しい。そこで、拡散現象への依存性を調べるために、図 5.12 においては浸出液から検出された TBP と DBP の合計量をプロットした。この図から、純水に浸したのものについては浸出期間の平方根 \sqrt{d} に対して、TBP/DBP の浸出量が直線的に増加する傾向にあり、浸出挙動は拡散現象に支配されていると考えられるが、pH12.5 の液に浸した場合には、両者は単純な比例関係とはなっていない。pH12.5 の場合は、浸出期間が長くなるにつれて傾きが大きくなっており、TBP の分解反応が影響している可能性が考えられる。浸出液から検出された TBP の量と DBP の量の関係を調べてみたところ (図 5.16)、浸出液中の DBP は浸出液中の TBP の量の対数と強い相関が認められ、pH12.5 の液に浸した場合は、純水に浸した場合に比べ、TBP の分解によって生成した DBP の割合がはるかに大きくなっている。

(2) 放射性核種の浸出挙動

廃溶媒中のヨウ素はさまざまな形態で存在する⁹⁾と考えられていることから、I-129 の浸出挙動は複雑化することも予想されたが、図 5.13 から分かるように本試験においては I-129 の浸出挙動が比較的単純に拡散現象に依存して浸出している様子が確認できる。良好な直線性の認められる 56 日目までのデータを基に拡散係数を求めた結果を表 5.2 に示す。

Cs-137 については、供試体からは検出されなかったが、一部の浸出液から検出された。図 5.14 では、浸出期間が長い試料においても検出されない場合もあり、増減を繰り返しているように見える。浸出した Cs-137 が沈殿している可能性もあるが、複雑な挙動を示しており、本試験結果のみからは評価を行うことはできない。この挙動を解明するためには、Cs-137 の収支や浸出液中の塩の組成などを詳細に調査する必要がある。

(3) その他の成分の浸出挙動

図 5.15 をみると、プラスチック固化体製造時に加える添加剤の成分であるマグネシウムについても、浸出期間の平方根と単純な比例関係とはなっておらず、浸出期間が長くなるにつれて傾きが大きくなっている。TBP/DBP と同様、供試体中の添加剤 ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) の分解反応が浸出挙動に影響を及ぼしている可能性が考えられる。その影響は 56 日目以降のデータにおいて顕著である。

アルカリ性の浸出液（pH12.5）中には Mg は検出されていないが、浸出液中の成分と反応し沈殿を生じている可能性も考えられるため、浸出していないとは言い切れない。

5.2.2 試験後の外観観察

写真 4.2 をみると、何れの固化体についても変形等は生じていないと考えられる。アルカリ水に浸した供試体は、徐々に変色している様子がうかがえるが、154 日間の浸出期間においては、TBP 等の主要な化学種、マトリックス成分である Mg 及び放射性核種の浸出挙動は大きな変化はなく、ここで認められる外観の変化の浸出挙動への影響は小さいと考えられる。

6. 結論

アスファルト固化体及びプラスチック固化体（エポキシ固化体）の浸出試験を行い、以下の知見を得ることができた。

- (1) アスファルト固化体から初めて I-129 が浸出していることを確認した。その割合は、I-129 の不溶化処理が施されている MA 固化体ではほぼ 100%、I-129 の不溶化処理が施されていない LA 固化体で約 40%に相当する量であった。これは、I-129 の不溶化処理の有無だけではなく、廃液調製時の試薬の影響やアスファルト固化体製造条件等が I-129 の浸出挙動に大きく影響を及ぼすことを意味している。現存のアスファルト固化体について、I-129 浸出挙動の背景にあると思われる廃液の pH 調整時の沈殿物の残留状況やエクストルーダ内での塩の形態の転化 ($\text{Ag I} \Rightarrow \text{Na I}$) の程度を証明することは困難であり、今後もアスファルト固化体が製造されないことを考えると新たに固化体製造時のデータを取得することも難しい。今回の浸出試験の結果からすれば、I-129 の浸出挙動は、硝酸イオンやナトリウム等の他の易溶性の化学種と同等とみなすべきと考えられる。
- (2) アスファルト固化体からアスファルトの分解成分であるギ酸及び酢酸が浸出することを確認した。MA 固化体の浸出試験においては、これらの成分の浸出量は、浸出期間が長くなるにつれて直線的に増加する傾向が確認された。一方、LA 固化体については酢酸の浸出量が 56 日目まで拡散現象に依存して増加する傾向が確認されたが、それ以降の増加傾向は確認されなかった。本試験においては、放射線劣化が原因で生成するといわれるシュウ酸については、定量ができなかったことから、挙動の解明には至らなかった。
- (3) 本試験の結果から、アスファルト固化体（LA 固化体）からの硝酸イオンの浸出のメカニズムは拡散が支配的であると考えられる。浸出液の温度が 70°C の条件下において、その拡散係数は約 $6 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{d}$ ($7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) であった。
- (4) プラスチック固化体からの I-129 の浸出は、約 150 日間の浸出期間において、純水に浸した場合は、供試体に含まれる量の約 60%が、pH が 12.5 の液に浸した場合にはほぼ全量が浸出したことを確認した。プラスチック固化体からの I-129 の浸出のメカニズムは拡散が支配的であると考えられる。本試験の結果から、浸出液（pH12.5）の温度が 50°C の条件下において、その拡散係数は約 $1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{d}$ ($1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) であった。
- (5) プラスチック固化体中の TBP やその分解生成物である DBP、プラスチック固化体製造時に添加する添加剤の Mg 成分が浸出液中から検出された。いずれも 154 日間の浸出期間で、供試体に含まれる量の 1%程度であった。

7. おわりに

本試験においては、2本のアスファルト固化体、1本のプラスチック固化体の浸出試験を実施し、アスファルト固化体及びプラスチック固化体の処分時の評価に有用なデータを得ることができた。特に、今回の試験において初めて確認されたアスファルト固化体からの放射性ヨウ素の浸出挙動は、従来の想定を覆すものであり、貴重なデータである。

本試験の結果から、アスファルト固化体を高温の純水に浸すことにより、処分施設の機能や放射性核種の挙動に影響を及ぼす可能性がある硝酸イオンを加速的に浸出させて取り除ける可能性があることが分かったが、その場合においても放射性ヨウ素の挙動について配慮する必要がある。

一方で、純水等に浸すことでCs-137とI-129が分離できる可能性があり、これまでの固化体評価試験において困難であった、固化体中のI-129量の分析技術の開発に大きな手がかりを与える結果が得られた。

アスファルト固化体は、約30,000本存在し、アスファルト固化処理技術の開発を行いつつ固化体が製造されてきたことから、処理対象廃液の性状、前処理条件、運転条件等が異なる固化体が多数存在し、本試験の結果のみでアスファルト固化体すべての浸出挙動を説明することはできない。このため、再現性の確認を含めて、今後も引き続き、処分に資するデータを採取していくことが必要である。また、過去の試験において、浸出試験に供した固化体の膨潤が確認された例もあり、処分時の評価に影響を及ぼす可能性があることから、今後、メカニズムの解明を含めて調査していく必要がある。

近い将来、運転が開始される低放射性廃棄物処理技術開発施設においても、アスファルト固化処理施設で行っていたヨウ素の不溶化処理技術を応用していることから、廃液処理工程での放射性ヨウ素の挙動や、同施設で製造される固化体中の放射性ヨウ素の挙動についても調査を行っていく必要があるだろう。本報告書がこれらの検討に活用されることを期待する。

参考文献

- 1) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構“TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－” JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005)
- 2) 藤田秀人ほか：“アスファルト固化体,プラスチック固化体の健全性確認試験” PNC TN8410 92-234(1992)
- 3) 古川登ほか：“アスファルト固化体の浸漬試験 (試験報告)” JNC TN8430 99-007(1999)
- 4) 古川登ほか：“廃棄体の確認に向けたアスファルト固化体の製作履歴調査結果” JNC TN8440 2001-024(2001)
- 5) 石黒勝彦ほか：“放射性廃棄物固化体の標準浸出試験法” PNC TN842 84-01(1984)
- 6) 秋元利之ほか：“ビチューメン放射性廃棄物固化体の耐浸出性 (文献調査)” JAERI-Review 99-002 (1999)
- 7) 大貫敏彦ほか：“低レベル放射性廃棄物陸地処分の総合安全評価に関する部分モデルの開発 (I) 放射性核種浸出予測コード” JAERI-M 86-095 (1986)
- 8) 加川昭夫ほか：“アスファルトから浸出する可溶性有機成分に関する評価試験 (4) (大気雰囲気アスファルト浸出試験及び放射線照射試験での可溶性有機成分の調査研究)” PNC TN8410 96-256(1996)
- 9) 桜井勉ほか：“再処理プロセス中のヨウ素の挙動” JAERI-Review 97-002 (1997)

表2.1 標準的なアスファルト固化体の仕様

塩／アスファルト混合比 (wt%)	40～50／60～50	
使用アスファルト	昭和シェル(株)製 ADコンパウンド 組成: 飽和分 22.8wt% 芳香族分 34.8wt% レジン分 15.8wt% アスファルテン分 26.8wt% 物性値: 軟化点 85±5°C (JIS K 2707) 針入度 40±5 (JIS K 2707) 引火点 >260°C (COC法) 伸度 >3 (JIS K 2707) 比重 1.025±0.025 (JIS K 2707)	
塩組成 (処理対象廃液中の濃度)	NaNO ₃	200～300 g/ℓ
	NaNO ₂	0～50 g/ℓ
	Na ₂ CO ₃	40～80g/ℓ
	NaH ₂ PO ₄	0～50 g/ℓ

表2.2 標準的なプラスチック固化体の仕様

TBP／固化剤 (vol%)	40～60／60～40	
エポキシ固化体 使用樹脂	エポキシ樹脂:	三井石油化学工業(株)製 EPOMIC R140 引火点 380°C, 粘度 13000CPS
	硬化剤:	三井石油化学工業(株)製 EPOMIC R140 引火点 155°C, 粘度 5500CPS
	添加剤:	タルク(86wt%:浅田製粉製) JA-13R 塩ビ樹脂(14wt%:日本ゼノン製) #400X110A
固化体組成	TBP:	55～65ℓ
	エポキシ樹脂:	19～20ℓ
	硬化剤:	6～7ℓ
	添加剤:	30～32kg
PVC固化体 使用樹脂	PVC樹脂:	日本ゼノン製 #43B
	吸湿剤:	酸化カルシウム 近江化学工業(株)製
	弾性ポリマー:	ノーソレックス 仏国 Cdf Chimie社製
固化体組成	TBP:	40～60ℓ
	PVC樹脂:	40～60ℓ
	吸湿剤:	5～7ℓ
	弾性ポリマー:	1～2kg

表 2.3 分析装置の仕様

	装置仕様	備考
γ 核種分析	<p>Ge 検出器：BE3820(Canberra)</p> <ul style="list-style-type: none"> 分解能 (Co60)：1.72Kev 相対効率 (Co60)：26.6% <p>MCA：DSA2000(Canberra)</p> <p>解析ソフト</p> <ul style="list-style-type: none"> γ 線分析ソフト：S501C(Canberra) スペクトロスコープソフト Genie2000；S502C(Canberra) LabS0CSソフト：S574C(Canberra) 	<p>測定時間：各試料ごとに設定</p> <ul style="list-style-type: none"> ASP 供試体 (浸漬前後)：1000～3600 秒 ASP 浸出液：1000～3600 秒 PLS 供試体 (浸漬前後)：2000 秒 PLS 浸出液：86400 秒 <p>測定対象：浸出液 (100ml) を専用の容器に分取したもの</p>
β 核種分析	<p>LS6500 シンチレーションシステム (Beckman)</p> <ul style="list-style-type: none"> 効率：H3 ≥ 60% C14 ≥ 95% <p>但し、ワイド・オープン・ソウインド・ウインド内で測定したもの</p>	<p>測定時間：600 秒</p> <p>前処理：水酸化バリウム添加 (沈殿生成) 後、硝酸を添加し炭酸ガスを回収 液体シンチレータ：ピコフロー液</p>
α 核種分析	<p>α スペクトロメータ：7401 (Canberra)</p> <ul style="list-style-type: none"> 分解能：1.68Kev <p>α 線用 PIPS 検出器：PD450-17-100AM (Canberra)</p> <p>MCA：ASA100(Canberra)</p> <p>解析ソフト</p> <ul style="list-style-type: none"> α 線分析ソフト：S509C(Canberra) スペクトロスコープソフト Genie2000；S502C(Canberra) 	<p>測定時間：3600 秒</p> <p>測定対象：浸出液をホットプレートにて蒸発乾固したもの</p>
イオンクロマト分析	<p>本体：DX500 (Dionex)</p> <p>解析ソフト：PeakNet ワークステーション (Dionex)</p> <p>使用カラム等</p> <ol style="list-style-type: none"> 陰イオン及びハロゲン化物イオン <ul style="list-style-type: none"> 溶離液：炭酸ナトリウム 3.5mmol/L + 炭酸水素ナトリウム 1.0mmol/L 分離カラム：AS14 陽イオン <ul style="list-style-type: none"> 溶離液：メタンスルホン酸 10mmol/L 分離カラム：CS12 炭酸イオン <ul style="list-style-type: none"> 溶離液：オクタンスルホン酸 1mmol/L 再生液：水酸化テトラブチルアンモニウム 5.0mmol/L 分離カラム：ICE-AS1 	<p>測定対象：浸出液 (5ml) を分取したもの</p>

表 3.1 アスファルト固化体の浸出試験における分析項目一覧

調査対象	試験 1	試験 2	試験 3	分析手法	検出下限
放射性核種	I-129 Cs-137	I-129 Cs-137	/	γスペクトル分析	各試料測定におけるバックグラウンドの計数率から算出
	C-14	C-14		液体シンチレーション分析	標準分析作業法の値 C-14:<3.7Bq/ml
	Pu			αスペクトル分析	各試料測定におけるバックグラウンドの計数率から算出
陰イオン	NO ₂ ⁻ NO ₃ ⁻ PO ₄ ³⁻ SO ₄ ²⁻	NO ₂ ⁻ NO ₃ ⁻ PO ₄ ³⁻ SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	イオンクロマト分析	NO ₂ ⁻ :<1ppm NO ₃ ⁻ :<1ppm PO ₄ ³⁻ :<1ppm SO ₄ ²⁻ :<1ppm
	Na ⁺	Na ⁺		イオンクロマト分析	Na ⁺ :<1ppm
TBP, DBP		TBP, DBP	/	赤外分光分析(FT-IR) (分析所にて分析)	TBP, DBP:<20ppm
	有機酸	ギ酸 酢酸 シユウ酸		イオンクロマト分析	ギ酸:<1ppm 酢酸:<1ppm シユウ酸:<1ppm

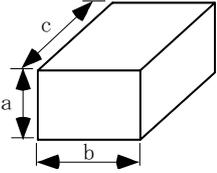
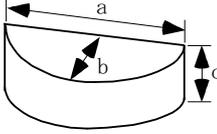
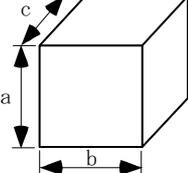
表 3.2 アスファルト固化体の浸出試験の試験条件

項目	MCC-1P 法条件	試験 1	試験 2	試験 3
浸出液	高度純水、珪酸水、塩水、(処分場から採取可能な場合は処分場の水を用いる場合もある。)	・純水 (導電率 $\leq 0.1 \mu\text{S/cm}$) ・水酸化カルシウム溶液 (pH12.5)	・純水 (導電率 $\leq 0.1 \mu\text{S/cm}$) ・水酸化カルシウム溶液 (pH12.5)	純水 (導電率 $\leq 0.1 \mu\text{S/cm}$)
浸出温度	40, 70, 90°C	50°C	40°C	70°C
浸出容器	PFA テフロン製容器	専用容器 (SUS304 製)	同左	同左
試料形状	—	1×2×3cm の直方体 (表面積: 約 22 cm ²)	φ 4.5cm×1cmH の円柱を 2 等分したもの (半円柱形) (表面積: 約 27.5cm ²)	① 2×2×2cm の立方体 (表面積: 約 24cm ²) ② 1.5×1.5×1.5cm の立方体 (表面積: 約 14cm ²) ③ 1×1×1cm の立方体 (表面積: 約 6cm ²)
浸出液量*	60ml	約 220ml	約 275ml	① 約 240ml ② 約 140ml ③ 約 60ml
浸出期間	浸出開始から 3, 7, 14, 28, 56, 91, 182 日目	浸出開始から 3, 7, 14, 28, 56, 91, 154 日目	浸出開始から 3, 7, 14, 28, 56, 91, 182 日目	浸出開始から 1, 3, 7, 10, 14, 28, 56 日目
特記事項				浸出液を上記浸出期間毎に約 1ml ずつ採取した。また、浸出液採取後、液量が一定となるように純水を補充した。

* 各供試体の表面積に応じて次式を満足するように設定

SA/V=0.0100±0.0005mm⁻¹ (SA:供試体表面積 [mm²], V:浸出液量 [mm³])

表 3.3.1 アスファルト固化体の浸出試験における供試体形状及び寸法等の概要

試験No.		試験 1	試験 2	試験 3			
供試体							
供試体成型方法		ホーリングでφ4.5cmにコア抜き→ 1.0cmピッチでワイヤー切断→ 下記の形状に押切切断	ホーリングでφ4.5cmにコア抜き→ 1.0cmピッチでワイヤー切断→ 下記の形状に押切切断	ホーリングでφ4.5cmにコア抜き→ 1.0cmピッチでワイヤー切断→ 下記の形状に押切切断			
供試体形状		1.0×2.0×3.0cmの直方体 	φ4.5cm×1.0cmHの円柱を2等分 (半円柱形) 	①2.0×2.0×2.0cmの立方体 ②1.5×1.5×1.5cmの立方体 ③1.0×1.0×1.0cmの立方体 			
平均寸法 (cm)		a : 0.99 b : 2.00 c : 3.20	a : 4.52 b : 2.27 c : 1.04	①□2.0cm a:2.05 b:2.07 c:2.05	②□1.5cm a:1.56 b:1.56 c:1.56	③□1.0cm a:1.04 b:1.04 c:1.04	
表面積 (cm ²)		23.29	26.52	25.34	14.66	6.48	
体積 (cm ³)		6.43	8.36	8.68	3.82	1.12	
平均重量 (g)		9.67	10.94	10.57	4.62	1.36	
密度 (g/cm ³)		1.50	1.31	1.22	1.21	1.21	
固化体製造に関するデータ	ドラムNo.	95-26395	86-07889				
	固化年月日	1995/02/10	1986/08/28				
	キャンペーン (ハッチ)	95-M42-1 (18ハッチ)	86-LAW3-3 (4ハッチ)				
	固化体重量 (kg)	265.1	247.7				
	塩重量 (kg)	108.5	87.3				
	前処理において添加された試薬	Ba(OH) ₂ , HNO ₃ , K ₄ Fe(CN) ₆ , NiSO ₄ , Na ₂ SO ₃ , AgNO ₃	HNO ₃				
	アスファルト重量 (kg)	156.6	160.4				
	塩/アスファルト比	45/55	42/58				
	固化体 1g 中に含まれる量 (推定) ※1	I-129	1.2×10 ² (Bq/g)	5.5×10 ¹ (Bq/g)			
		Cs-137	1.1×10 ⁵ (Bq/g)	2.0×10 ¹ (Bq/g)			
C-14		2.6×10 ³ (Bq/g)	—				
Pu		1.6×10 ⁻³ (mg/g)	—				
PO ₄ ³⁻		5.3×10 ⁻³ (g/g)	1.4×10 ⁻² (g/g)				
備考		前キャンペーンの処理廃液 (MA-17) の分析値は、I-129:<37 (Bq/ml)、Cs-137:1.1×10 ⁵ (Bq/ml) (Cs濃度は、処理対象 LA 廃液の約 10 ⁴ 倍に相当)					

※ 1: 次式による廃液中濃度からの推定値。なお、廃液中塩濃度には試薬添加前の値を用いた。

固化体 1g 中に含まれる量 = [塩重量 (ドラム) / 廃液中塩濃度 × 各成分の廃液中濃度] / ドラム内容物重量 (ピュアアスファルト充填前)

表 3.3.2 アスファルト固化体の浸出試験における各供試体形状及び寸法等 (その1)

試験No.	供試体No.	種類	温度	浸出 期間	寸法(cm)			表面積 (cm ²)	体積 (cm ³)	重量 (g)	比表面積 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)	浸出液量 (mL)
					a	b	c						
試験 1	1	純水 (0.1μS/cm以下)	50℃	3	1.00	2.00	3.30	23.80	6.60	9.12	2.61	1.38	238
	5			0.90	2.00	3.00	21.00	5.40	7.86	2.67	1.45	210	
	3			1.00	2.10	3.20	24.04	6.72	10.17	2.36	1.51	240	
	9			1.00	2.00	3.20	23.20	6.40	9.31	2.49	1.45	232	
	11			1.00	2.00	3.40	24.40	6.80	10.17	2.40	1.50	244	
	7			1.00	2.00	3.30	23.80	6.60	9.24	2.58	1.40	238	
	13			1.00	1.90	3.10	21.78	5.89	8.66	2.51	1.47	218	
	2			1.00	2.00	3.00	22.00	6.00	9.71	2.26	1.62	220	
	6			1.00	2.20	3.30	25.52	7.26	10.59	2.41	1.46	255	
	4			1.00	2.20	3.30	25.52	7.26	9.76	2.62	1.34	255	
	10			1.00	2.20	3.00	23.60	6.60	10.50	2.25	1.59	236	
	12	1.00		2.00	3.00	22.00	6.00	9.12	2.41	1.52	220		
	8	1.00		2.00	3.30	23.80	6.60	11.58	2.05	1.76	238		
	14	1.00		2.00	3.00	22.00	6.00	8.56	2.57	1.43	220		
試験 2	1	純水 (0.1μS/cm以下)	40℃	3	4.50	2.35	1.21	31.04	10.22	13.48	2.30	1.32	310
	3			4.49	2.15	1.00	26.36	7.50	9.87	2.67	1.32	264	
	5			4.55	2.23	1.02	27.53	8.02	10.58	2.60	1.32	275	
	7			4.54	2.33	0.97	28.04	8.06	10.36	2.71	1.29	280	
	9			4.53	2.27	1.12	29.12	9.01	11.63	2.50	1.29	291	
	11			4.54	2.25	0.98	27.28	7.79	10.23	2.67	1.31	273	
	13			4.53	2.27	0.99	27.61	7.96	10.48	2.63	1.32	276	
	2			4.47	2.20	1.21	29.29	9.35	12.35	2.37	1.32	293	
	4			4.51	2.41	1.02	29.48	8.84	11.49	2.57	1.30	295	
	6			4.53	2.11	1.00	25.96	7.32	9.68	2.68	1.32	260	
	8			4.50	2.20	0.93	26.12	7.19	9.69	2.70	1.35	261	
	10	4.51		2.30	1.10	29.20	8.99	11.72	2.49	1.30	292		
	12	4.54		2.30	1.00	28.06	8.18	10.66	2.63	1.30	281		
	14	4.56		2.32	1.01	28.42	8.35	10.84	2.62	1.30	284		
		水酸化カルシウム溶液 (pH=12.5)											

表 3.3.3.3 アスファルト固化体の浸出試験における各供試体形状及び寸法等 (その2)

試験No.	供試体No.	種類	温度	形状	寸法 (cm)			表面積 (cm ²)	体積 (cm ³)	重量 (g)	比表面積 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)	浸出液量 (ml)
					a	b	c						
試験 3	1	純水 (0.1 μS/cm 以下)	70°C	□2.0cm	2.04	2.06	2.05	25.21	8.61	10.49	2.40	1.22	252
	2				2.02	2.09	2.08	25.54	8.78	10.68	2.39	1.22	255
	3				2.07	2.07	2.05	25.54	8.78	10.65	2.40	1.21	255
	4			1.57	1.58	1.58	14.92	3.92	4.73	3.15	1.21	149	
	5			1.55	1.55	1.55	14.42	3.72	4.50	3.20	1.21	144	
	6			1.57	1.56	1.56	14.66	3.82	4.62	3.17	1.21	147	
	7			1.04	1.04	1.04	6.49	1.12	1.37	4.74	1.22	65	
	8			1.03	1.04	1.03	6.41	1.10	1.34	4.78	1.21	64	
	9			1.04	1.04	1.05	6.53	1.14	1.37	4.77	1.21	65	

表3.4 アスファルト固化体(MA)の浸出試験1の試験結果(その1:γ核種)

分析項目	浸出条件		核種	試験前供試体				浸出液(100mLあたり)				試験後供試体				Z/C ₀	Ct/C ₀		
	浸出液種類	浸出期間 (d)		重量 (g)	測定値C ₀ (Bq)	統計誤差 (Bq)	検出下限値 (Bq)	浸出液量 (mL)	測定値 (Bq)	統計誤差 (Bq)	検出下限値 (Bq)	浸出液中総 量Ct(Bq)	測定値 Z(Bq)	統計誤差 (Bq)	検出下限値 (Bq)				
																		温度(°C)	浸出液
γ核種分析	純水	50	I-129	9.12	1.09E+03	※1	1.86E+03	238	4.18E+02	5.00E+01	2.29E+01	9.95E+02	ND	※2	1.84E+03	0.9090	-		
				10.17	9.43E+02	※1	1.76E+03	210	4.09E+02	5.04E+01	4.29E+01	4.29E+01	8.59E+02	ND	※2	1.87E+03	0.9113	-	
				7.86	1.22E+03	※1	1.99E+03	240.4	4.45E+02	5.55E+01	5.61E+01	1.07E+03	1.07E+03	ND	※2	1.93E+03	0.8777	-	
				9.24	1.12E+03	※1	1.89E+03	232	5.31E+02	6.37E+01	4.31E+01	4.31E+01	1.23E+03	ND	※2	1.87E+03	1.1028	-	
				9.31	1.22E+03	※1	1.98E+03	244	5.29E+02	6.37E+01	4.72E+01	1.29E+03	1.29E+03	ND	※2	1.87E+03	1.0548	-	
				10.17	1.11E+03	※1	1.87E+03	238	4.71E+02	5.74E+01	4.48E+01	1.12E+03	1.12E+03	ND	※2	1.87E+03	1.0115	-	
				8.66	1.04E+03	※1	1.81E+03	217.8	2.91E+02	5.14E+01	1.21E+02	6.33E+02	6.33E+02	ND	※2	1.87E+03	0.6089	-	
				9.71	1.17E+03	※1	1.94E+03	220	2.03E+02	2.70E+01	4.00E+01	4.48E+02	4.48E+02	ND	※2	1.90E+03	0.3840	-	
				9.76	1.27E+03	※1	2.01E+03	255.2	3.71E+02	4.74E+01	5.88E+01	9.46E+02	9.46E+02	ND	※2	1.87E+03	0.7440	-	
				10.59	1.17E+03	※1	1.94E+03	255.2	4.30E+02	5.38E+01	5.57E+01	1.10E+03	1.10E+03	ND	※2	1.87E+03	0.9367	-	
				11.58	1.26E+03	※1	2.01E+03	236	3.77E+02	4.98E+01	7.44E+01	8.90E+02	8.90E+02	ND	※2	1.87E+03	0.7066	-	
				10.50	1.09E+03	※1	1.88E+03	220	3.80E+02	5.04E+01	7.61E+01	8.38E+02	8.38E+02	ND	※2	1.87E+03	0.7639	-	
				9.12	1.39E+03	※1	2.12E+03	238	1.32E+02	3.14E+01	8.92E+01	3.14E+02	3.14E+02	ND	※2	1.87E+03	0.2263	-	
				8.56	1.03E+03	※1	1.86E+03	220	ND	※2	5.43E+01	1.77E+02	-	-	ND	※2	1.87E+03	-	-
				9.12	4.77E+05		1.45E+04	238	6.26E+02	1.94E+01	5.36E+00	1.49E+03	1.49E+03	4.75E+05	4.75E+05	1.45E+04	8.84E+02	0.0031	0.9959
10.17	4.24E+05		1.29E+04	210	1.22E+03	3.79E+01	9.28E+00	2.57E+03	2.57E+03	4.22E+05	4.22E+05	1.29E+04	7.66E+02	0.0061	0.9965				
7.86	5.39E+05		1.64E+04	240.4	2.13E+03	6.55E+01	1.18E+01	5.12E+03	5.12E+03	5.28E+05	5.28E+05	1.61E+04	9.16E+02	0.0095	0.9790				
9.24	4.82E+05		1.47E+04	232	2.32E+03	7.13E+01	1.16E+01	5.39E+03	5.39E+03	4.65E+05	4.65E+05	1.42E+04	8.25E+02	0.0112	0.9646				
9.31	5.34E+05		1.63E+04	244	2.82E+03	8.63E+01	1.42E+01	6.87E+03	6.87E+03	5.19E+05	5.19E+05	1.58E+04	8.76E+02	0.0129	0.9720				
10.17	4.86E+05		1.48E+04	238	2.60E+03	7.98E+01	1.34E+01	6.19E+03	6.19E+03	4.81E+05	4.81E+05	1.46E+04	8.72E+02	0.0127	0.9895				
8.66	4.53E+05		1.38E+04	217.8	3.16E+03	9.84E+01	2.64E+01	6.88E+03	6.88E+03	6.34E+05	6.34E+05	1.93E+04	3.88E+02	0.0152	1.4005				
9.71	5.10E+05		1.55E+04	220	2.61E+03	7.99E+01	8.44E+00	5.75E+03	5.75E+03	4.98E+05	4.98E+05	1.52E+04	8.69E+02	0.0113	0.9765				
9.76	5.47E+05		1.67E+04	255.2	2.80E+03	8.58E+01	1.26E+01	7.14E+03	7.14E+03	5.44E+05	5.44E+05	1.66E+04	9.46E+02	0.0130	0.9945				
10.59	5.17E+05		1.57E+04	255.2	2.09E+03	6.42E+01	1.27E+01	5.33E+03	5.33E+03	4.95E+05	4.95E+05	1.51E+04	8.60E+02	0.0103	0.9566				
11.58	5.53E+05		1.68E+04	236	8.22E+03	2.51E+02	2.02E+01	1.94E+04	1.94E+04	5.34E+05	5.34E+05	1.63E+04	9.55E+02	0.0351	0.9671				
10.50	4.84E+05		1.47E+04	220	8.71E+03	2.65E+02	2.06E+01	1.92E+04	1.92E+04	4.60E+05	4.60E+05	1.40E+04	8.34E+02	0.0396	0.9507				
9.12	6.05E+05		1.84E+04	238	6.81E+03	2.08E+02	1.92E+01	1.62E+04	1.62E+04	5.84E+05	5.84E+05	1.78E+04	1.02E+03	0.0268	0.9649				
8.56	4.74E+05		1.44E+04	220	8.02E+03	2.46E+02	3.70E+01	1.77E+04	1.77E+04	6.13E+05	6.13E+05	1.87E+04	3.94E+02	0.0372	1.2833				

※1 試験前供試体分析値が検出下限値未満であるため、浸出液分析値より推定。

※2 検出下限値未満

表3.4 アスファルト固化体(MA)の浸出試験1の試験結果(その2: β 核種)

分析項目	浸出条件			測定データ				Ct/C ₀	
	浸出液		浸出期間 (d)	供試体 推定値 ^{※1} (Bq)	浸出液量 (ml)	浸出液			
	種類	温度(°C)				測定値 (Bq/ml)	検出下限値 (Bq/ml)		浸出量 Ct(Bq)
β 核種分析 (C-14)	純水	50	3	2.40E+04	238	N.D ^{※2}	3.70E+00	—	—
			7	2.07E+04	210	3.93	3.70E+00	8.26E+02	0.0400
			14	2.67E+04	240.4	4.16	3.70E+00	1.00E+03	0.0374
			28	2.45E+04	232	5.28	3.70E+00	1.23E+03	0.0501
			56	2.68E+04	244	6.00	3.70E+00	1.47E+03	0.0548
			91	2.43E+04	238	9.88	3.70E+00	2.35E+03	0.0968
	154	2.28E+04	217.8	12.51	3.70E+00	2.72E+03	0.1196		
	pH=12.5	50	3	2.55E+04	220	N.D ^{※2}	3.70E+00	—	—
			7	2.79E+04	255.2	N.D ^{※2}	3.70E+00	—	—
			14	2.57E+04	255.2	N.D ^{※2}	3.70E+00	—	—
			28	2.76E+04	236	N.D ^{※2}	3.70E+00	—	—
			56	2.40E+04	220	N.D ^{※2}	3.70E+00	—	—
			91	3.05E+04	238	N.D ^{※2}	3.70E+00	—	—
			154	2.25E+04	220	N.D ^{※2}	3.70E+00	—	—

※1 廃液分析値からの推定

※2 検出下限値未満

表3.4 アスファルト固化体(MA)の浸出試験1の試験結果(その3: α 核種)

分析項目	浸出条件			測定データ				Ct/C ₀ ^{※3}	
	浸出液		浸出期間 (d)	供試体 推定値 ^{※1} (Bq)	浸出液量 (ml)	浸出液			
	種類	温度(°C)				測定値 (Bq/ml)	検出下限値 (Bq/ml)		浸出量 ^{※3} Ct(Bq)
α 核種分析 (Pu-238)	純水	50	3	2.26E+03	238	N.D ^{※2}	4.16E+00	9.90E+02	0.4381
			7	1.95E+03	210	N.D ^{※2}	4.16E+00	8.74E+02	0.4486
			14	2.52E+03	240.4	N.D ^{※2}	5.25E+00	1.26E+03	0.5008
			28	2.31E+03	232	N.D ^{※2}	4.16E+00	9.65E+02	0.4183
			56	2.52E+03	244	N.D ^{※2}	4.16E+00	1.02E+03	0.4026
			91	2.29E+03	238	N.D ^{※2}	5.25E+00	1.25E+03	0.5456
	154	2.15E+03	217.8	N.D ^{※2}	1.53E+00	3.33E+02	0.1552		
	pH=12.5	50	3	2.41E+03	220	N.D ^{※2}	4.16E+00	9.15E+02	0.3801
			7	2.63E+03	255.2	N.D ^{※2}	6.08E+00	1.55E+03	0.5908
			14	2.42E+03	255.2	N.D ^{※2}	1.53E+00	3.90E+02	0.1614
			28	2.60E+03	236	N.D ^{※2}	2.33E+00	5.50E+02	0.2113
			56	2.26E+03	220	N.D ^{※2}	6.08E+00	1.34E+03	0.5917
			91	2.87E+03	238	N.D ^{※2}	1.53E+00	3.64E+02	0.1268
			154	2.12E+03	220	N.D ^{※2}	4.16E+00	9.15E+02	0.4313

※1 廃液分析値からの推定

※2 検出下限値未満

※3 全て検出下限値未満のため、検出下限値の α 核種が浸出していると仮定した場合の値

表3.4 アスファルト固化体(MA)の浸出試験1の試験結果(その4:化学種)

分析項目	浸出条件			化学種	測定データ					Ct/C ₀			
	浸出液		浸出期間 (d)		供試体中量 C ₀ (g) ^{※1}	浸出液量 (mL)	浸出液						
	種類	温度(°C)					測定値 (ppm)	検出下限値 (ppm)	浸出量 Ct(g)				
陰イオン	純水	50	NO ₂ ⁻	3	1.39E-01	238	344.3	1	8.19E-02	0.5890			
				7	1.20E-01	210	453.5	1	9.52E-02	0.7944			
				14	1.55E-01	240.4	562.9	1	1.35E-01	0.8722			
				28	1.42E-01	232	514.6	1	1.19E-01	0.8405			
				56	1.55E-01	244	548.7	1	1.34E-01	0.8625			
				91	1.41E-01	238	597.1	1	1.42E-01	1.0080			
				154	1.32E-01	217.8	518.7	1	1.13E-01	0.8548			
				pH=12.5	50	NO ₂ ⁻	3	1.48E-01	220	398.1	1	8.76E-02	0.5908
							7	1.62E-01	255.2	487.1	1	1.24E-01	0.7689
							14	1.49E-01	255.2	521.9	1	1.33E-01	0.8944
							28	1.60E-01	236	585.7	1	1.38E-01	0.8628
							56	1.39E-01	220	592.8	1	1.30E-01	0.9372
							91	1.77E-01	238	593.3	1	1.41E-01	0.7989
							154	1.31E-01	220	514.4	1	1.13E-01	0.8663
	純水	50	NO ₃ ⁻	3	2.93E+00	238	5733.9	1	1.36E+00	0.4655			
				7	2.53E+00	210	8426.9	1	1.77E+00	0.7006			
				14	3.27E+00	240.4	11136.0	1	2.68E+00	0.8189			
				28	2.99E+00	232	9378.1	1	2.18E+00	0.7269			
				56	3.27E+00	244	10770.6	1	2.63E+00	0.8035			
				91	2.97E+00	238	10105.7	1	2.41E+00	0.8097			
				154	2.78E+00	217.8	10416.9	1	2.27E+00	0.8147			
				pH=12.5	50	NO ₃ ⁻	3	3.12E+00	220	6083.8	1	1.34E+00	0.4285
							7	3.41E+00	255.2	7897.9	1	2.02E+00	0.5917
							14	3.14E+00	255.2	9600.2	1	2.45E+00	0.7807
							28	3.38E+00	236	11505.3	1	2.72E+00	0.8044
							56	2.93E+00	220	11925.6	1	2.62E+00	0.8948
							91	3.72E+00	238	11628.9	1	2.77E+00	0.7431
							154	2.75E+00	220	10626.9	1	2.34E+00	0.8493
	純水	50	PO ₄ ³⁻	3	3.09E-02	238	68.4	1	1.63E-02	0.5265			
				7	2.66E-02	210	92.7	1	1.95E-02	0.7307			
				14	3.45E-02	240.4	145.0	1	3.49E-02	1.0110			
				28	3.16E-02	232	127.2	1	2.95E-02	0.9348			
				56	3.45E-02	244	132.4	1	3.23E-02	0.9365			
				91	3.13E-02	238	179.3	1	4.27E-02	1.3620			
				154	2.94E-02	217.8	126.1	1	2.75E-02	0.9351			
				pH=12.5	50	PO ₄ ³⁻	3	3.29E-02	220	N.D. ^{※2}	1	-	-
							7	3.59E-02	255.2	N.D. ^{※2}	1	-	-
							14	3.31E-02	255.2	N.D. ^{※2}	1	-	-
							28	3.56E-02	236	N.D. ^{※2}	1	-	-
							56	3.09E-02	220	N.D. ^{※2}	1	-	-
							91	3.93E-02	238	N.D. ^{※2}	1	-	-
							154	2.90E-02	220	N.D. ^{※2}	1	-	-
純水	50	SO ₄ ²⁻	3	5.29E-02	238	122.4	1	2.91E-02	0.5504				
			7	4.56E-02	210	158.4	1	3.33E-02	0.7294				
			14	5.90E-02	240.4	207.0	1	4.98E-02	0.8432				
			28	5.40E-02	232	286.3	1	6.64E-02	1.2293				
			56	5.90E-02	244	202.5	1	4.94E-02	0.8368				
			91	5.36E-02	238	262.7	1	6.25E-02	1.1659				
			154	5.03E-02	217.8	204.8	1	4.46E-02	0.8873				
			pH=12.5	50	SO ₄ ²⁻	3	5.64E-02	220	125.9	1	2.77E-02	0.4912	
						7	6.15E-02	255.2	142.5	1	3.64E-02	0.5913	
						14	5.67E-02	255.2	169.1	1	4.32E-02	0.7618	
						28	6.09E-02	236	226.0	1	5.33E-02	0.8752	
						56	5.29E-02	220	203.1	1	4.47E-02	0.8441	
						91	6.72E-02	238	233.7	1	5.56E-02	0.8272	
						154	4.97E-02	220	186.4	1	4.10E-02	0.8252	
陽イオン	純水	50	Na ⁺	3	1.07E+00	238	3358.0	1	7.99E-01	0.7496			
				7	9.19E-01	210	4075.0	1	8.56E-01	0.9315			
				14	1.19E+00	240.4	5116.0	1	1.23E+00	1.0345			
				28	1.09E+00	232	5035.0	1	1.17E+00	1.0732			
				56	1.19E+00	244	3370.0	1	8.22E-01	0.6913			
				91	1.08E+00	238	4539.0	1	1.08E+00	1.0000			
				154	1.01E+00	217.8	4567.0	1	9.95E-01	0.9822			
	pH=12.5			50	Na ⁺	3	1.14E+00	220	3226.0	1	7.10E-01	0.6248	
						7	1.24E+00	255.2	4089.0	1	1.04E+00	0.8423	
						14	1.14E+00	255.2	4663.0	1	1.19E+00	1.0427	
						28	1.23E+00	236	5273.0	1	1.24E+00	1.0137	
						56	1.07E+00	220	5264.0	1	1.16E+00	1.0860	
						91	1.35E+00	238	5347.0	1	1.27E+00	0.9395	
						154	1.00E+00	220	4595.0	1	1.01E+00	1.0098	

※1 同一ドラムから採取した固化体コアサンプルの分析値からの推定

※2 検出下限値未満

表3.4 アスファルト固化体(MA)の浸出試験1の試験結果(その5:有機酸)

分析項目	浸出条件			測定データ					
	浸出液		浸出期間 (d)	種類	浸出液				
	種類	温度(°C)			測定値 (ppm)	検出下限値 (ppm)			
有機酸	純水	50	ギ酸	3	1.870	1			
				7	2.381	1			
				14	2.892	1			
				28	2.639	1			
				56	3.491	1			
				91	5.747	1			
				154	6.762	1			
				pH=12.5	50	ギ酸	3	1.917	1
							7	2.355	1
							14	2.790	1
							28	3.222	1
							56	4.346	1
	91	8.476	1						
	純水	50	酢酸	3	1.386	1			
				7	1.445	1			
				14	1.941	1			
				28	1.815	1			
				56	2.161	1			
				91	3.249	1			
				154	3.766	1			
				pH=12.5	50	酢酸	3	1.151	1
							7	1.573	1
							14	1.796	1
							28	1.877	1
56							2.244	1	
91	4.928	1							
154	4.539	1							

表3.5 アスファルト固化体(LA)の浸出試験2の試験結果(その1:γ核種)

分析項目	浸出条件		核種	試験前供試体				浸出液量				浸出液(100mLあたり)				浸出液中				Z/C ₀	Ct/C ₀
	浸出液種類	温度(°C)		浸出期間(d)	重量(g)	測定値C ₀ (Bq)	統計誤差(Bq)	検出下限値(Bq)	浸出液量(mL)	測定値(Bq)	統計誤差(Bq)	検出下限値(Bq)	総量Ct(Bq)	浸出液中総量Ct(Bq)	測定値Z(Bq)	統計誤差(Bq)	検出下限値(Bq)	Z/C ₀			
																			種類		
γ核種分析	純水	40	I-129	3	13.48	5.34E+02	6.52E+01	4.40E+01	310.4	1.62E+01	2.66E+00	8.49E+00	5.01E+01	5.07E+02	6.58E+01	8.10E+01	0.0939	0.9497			
				7	9.87	4.23E+02	5.20E+01	3.83E+01	263.6	2.72E+01	4.08E+00	1.14E+01	7.16E+01	3.47E+02	4.65E+01	6.66E+01	0.1691	0.8199			
				14	10.58	4.48E+02	5.44E+01	4.08E+01	275.3	4.62E+01	6.21E+00	1.16E+01	1.27E+02	3.34E+02	4.52E+01	6.74E+01	0.2872	0.7537			
				28	10.36	4.64E+02	5.67E+01	3.95E+01	280.4	4.07E+01	6.73E+00	2.72E+01	1.14E+02	2.46E+02	3.38E+01	5.23E+01	0.2464	0.5306			
				56	11.63	4.70E+02	5.76E+01	4.07E+01	291.2	6.96E+01	1.21E+01	2.80E+01	2.80E+01	2.62E+02	3.60E+01	5.58E+01	0.4309	0.5581			
				91	10.23	4.27E+02	5.24E+01	3.80E+01	272.8	5.39E+01	1.06E+01	2.70E+01	1.47E+02	1.88E+02	2.72E+01	4.81E+01	0.3442	0.4404			
				182	10.48	4.38E+02	5.37E+01	3.93E+01	276.1	6.79E+01	1.19E+01	2.78E+01	1.87E+02	2.07E+02	2.97E+01	5.20E+01	0.4279	0.4737			
				3	12.35	4.94E+02	6.04E+01	4.22E+01	292.9	2.27E+01	3.47E+00	1.02E+01	2.27E+01	1.02E+01	6.65E+01	4.74E+02	6.18E+01	0.1347	0.9614		
				7	11.49	4.32E+02	6.02E+01	4.22E+01	294.8	3.32E+01	4.72E+00	1.14E+01	1.42E+02	1.42E+02	9.80E+01	4.31E+02	5.62E+01	0.2269	0.9975		
				14	9.68	4.61E+02	5.65E+01	4.09E+01	259.6	5.82E+01	7.69E+00	1.37E+01	1.51E+02	1.57E+02	2.99E+01	7.57E+01	0.3281	0.3412			
				28	9.69	4.00E+02	4.92E+01	3.80E+01	261.2	5.46E+01	1.05E+01	2.65E+01	1.42E+02	1.89E+02	2.43E+01	2.87E+01	0.3562	0.4726			
				56	11.72	5.06E+02	6.18E+01	4.19E+01	292	5.60E+01	1.09E+01	2.75E+01	1.64E+02	1.96E+02	2.90E+01	5.43E+01	0.3235	0.3883			
				91	10.66	4.79E+02	5.85E+01	3.94E+01	280.6	5.76E+01	1.10E+01	2.75E+01	1.62E+02	1.76E+02	2.62E+01	4.94E+01	0.3373	0.3667			
				182	10.84	4.82E+02	5.89E+01	4.02E+01	284.2	6.64E+01	1.18E+01	2.77E+01	1.89E+02	1.67E+02	2.60E+01	5.34E+01	0.3917	0.3473			
				3	13.48	1.20E+04	3.65E+02	5.20E+00	310.4	3.42E+02	1.10E+01	1.67E+00	1.06E+03	1.09E+04	3.32E+02	1.21E+01	0.0885	0.9064			
				7	9.87	9.28E+03	2.83E+01	4.55E+00	263.6	6.07E+02	1.90E+01	2.19E+00	1.60E+03	7.14E+03	2.18E+02	1.08E+01	0.1725	0.7694			
				14	10.58	1.08E+04	3.13E+02	4.63E+00	275.3	7.12E+02	2.22E+01	1.94E+00	1.96E+03	7.49E+03	2.89E+02	9.86E+00	0.1906	0.7287			
				28	10.36	9.90E+03	3.01E+02	4.55E+00	280.4	1.49E+03	4.59E+01	3.12E+00	4.18E+03	4.44E+03	1.36E+02	6.24E+00	0.4224	0.4487			
56	11.63	1.04E+04	3.18E+02	4.76E+00	291.2	1.64E+03	5.06E+01	4.05E+00	4.79E+03	5.11E+03	1.56E+02	9.29E+00	0.4581	0.4893							
91	10.23	9.22E+03	2.81E+02	4.58E+00	272.8	1.51E+03	4.63E+01	4.39E+00	4.11E+03	3.76E+03	1.15E+02	5.87E+00	0.4457	0.4080							
182	10.48	9.64E+03	2.93E+02	4.43E+00	276.1	1.61E+03	4.95E+01	4.18E+00	4.45E+03	4.61E+03	1.41E+02	7.34E+00	0.4614	0.4784							
3	12.35	1.12E+04	3.41E+02	5.04E+00	292.9	4.66E+02	1.47E+01	1.77E+00	1.37E+03	1.02E+04	3.10E+02	1.11E+01	0.1217	0.9064							
7	11.49	1.12E+04	3.42E+02	5.14E+00	294.8	6.48E+02	2.03E+01	1.74E+00	1.91E+03	8.50E+03	2.59E+02	1.05E+01	0.1700	0.7563							
14	9.68	1.05E+04	3.20E+02	4.17E+00	259.6	9.75E+02	3.02E+01	2.28E+00	2.53E+03	9.80E+03	2.99E+02	1.16E+01	0.2409	0.9329							
28	9.69	9.08E+03	2.75E+02	4.23E+00	261.2	1.46E+03	4.51E+01	4.12E+00	3.82E+03	4.47E+03	4.02E+02	3.89E+01	0.4226	0.4943							
56	11.72	1.11E+04	3.37E+02	4.85E+00	292	1.59E+03	4.88E+01	4.55E+00	4.63E+03	4.61E+03	1.41E+02	7.53E+00	0.4167	0.4167							
91	10.66	1.01E+04	3.06E+02	4.74E+00	280.6	1.53E+03	4.70E+01	3.61E+00	4.29E+03	3.91E+03	1.20E+02	6.17E+00	0.4261	0.3887							
182	10.84	1.04E+04	3.18E+02	4.66E+00	284.2	1.70E+03	5.23E+01	4.06E+00	4.84E+03	4.70E+03	1.44E+02	7.99E+00	0.4629	0.4500							

表3.5 アスファルト固化体(LA)の浸出試験2の試験結果(その2:β核種)

分析項目	浸出条件			測定データ				Ct/C ₀	
	浸出液		浸出期間	供試体 推定値 (Bq)	浸出液量 (mℓ)	浸出液			
	種類	温度				測定値 (Bq/mℓ)	検出下限値 (Bq/mℓ)		浸出量 Ct(Bq)
β核種分析 (C-14)	純水	40	3	N.D ^{※1}	310.4	N.D ^{※1}	3.70E+00	—	—
			7	N.D ^{※1}	263.6	N.D ^{※1}	3.70E+00	—	—
			14	N.D ^{※1}	275.3	N.D ^{※1}	3.70E+00	—	—
			28	N.D ^{※1}	280.4	N.D ^{※1}	3.70E+00	—	—
			56	N.D ^{※1}	291.2	N.D ^{※1}	3.70E+00	—	—
			91	N.D ^{※1}	272.8	N.D ^{※1}	3.70E+00	—	—
	pH=12.5		182	N.D ^{※1}	276.1	N.D ^{※1}	3.70E+00	—	—
			3	N.D ^{※1}	292.9	N.D ^{※1}	3.70E+00	—	—
			7	N.D ^{※1}	294.8	N.D ^{※1}	3.70E+00	—	—
			14	N.D ^{※1}	259.6	N.D ^{※1}	3.70E+00	—	—
			28	N.D ^{※1}	261.2	N.D ^{※1}	3.70E+00	—	—
			56	N.D ^{※1}	292	N.D ^{※1}	3.70E+00	—	—
			91	N.D ^{※1}	280.6	N.D ^{※1}	3.70E+00	—	—
			182	N.D ^{※1}	284.2	N.D ^{※1}	3.70E+00	—	—

※1 検出下限値未満。なお、供試体の推定値は、同一ドラムから採取した固化体コアサンプルの分析結果が検出下限値未満。

表3.5 アスファルト固化体(LA)の浸出試験2の試験結果(その3:化学種)

分析項目	浸出条件			対象	測定データ				Ct/C ₀		
	浸出液		浸出期間 (d)		供試体中量 C ₀ (g) ^{※1}	浸出液量 (ml)	浸出液				
	種類	温度(°C)					測定値 (ppm)	検出下限値 (ppm)		浸出量 Ct(g)	
陰イオン	純水	40	3	1.02E-02	310.4	N.D. ^{※2}	1	-	-		
			7	7.50E-03	263.6	N.D. ^{※2}	1	-	-		
			14	8.04E-03	275.3	N.D. ^{※2}	1	-	-		
			28	7.87E-03	280.4	N.D. ^{※2}	1	-	-		
			56	8.84E-03	291.2	N.D. ^{※2}	1	-	-		
			91	7.77E-03	272.8	N.D. ^{※2}	1	-	-		
			182	7.96E-03	276.1	N.D. ^{※2}	1	-	-		
			pH=12.5	40	3	9.38E-03	292.9	N.D. ^{※2}	1	-	-
					7	8.73E-03	294.8	N.D. ^{※2}	1	-	-
					14	7.36E-03	259.6	N.D. ^{※2}	1	-	-
					28	7.36E-03	261.2	N.D. ^{※2}	1	-	-
					56	8.91E-03	292	N.D. ^{※2}	1	-	-
	182	8.10E-03			280.6	N.D. ^{※2}	1	-	-		
	純水	40	3	3.95E+00	310.4	1367.9	1	4.25E-01	0.108		
			7	2.89E+00	263.6	1909.5	1	5.03E-01	0.174		
			14	3.10E+00	275.3	2460.5	1	6.77E-01	0.218		
			28	3.03E+00	280.4	6464.2	1	1.81E+00	0.597		
			56	3.41E+00	291.2	8491.8	1	2.47E+00	0.726		
			91	3.00E+00	272.8	9066.4	1	2.47E+00	0.825		
			182	3.07E+00	276.1	9266.3	1	2.56E+00	0.833		
			pH=12.5	40	3	3.62E+00	292.9	2344	1	6.87E-01	0.190
					7	3.36E+00	294.8	3097.1	1	9.13E-01	0.271
					14	2.84E+00	259.6	5155.7	1	1.34E+00	0.472
					28	2.84E+00	261.2	6103.2	1	1.59E+00	0.562
					56	3.43E+00	292	9413.1	1	2.75E+00	0.800
	182	3.12E+00			280.6	9544.3	1	2.68E+00	0.858		
	純水	40	3	3.17E+00	284.2	9738.9	1	2.77E+00	0.872		
			7	9.42E-02	310.4	129.8	1	4.03E-02	0.428		
			14	6.90E-02	263.6	201.81	1	5.32E-02	0.771		
			28	7.39E-02	275.3	185.1	1	5.10E-02	0.689		
			56	7.24E-02	280.4	244.3	1	6.85E-02	0.946		
			91	8.12E-02	291.2	272.4	1	7.93E-02	0.977		
			182	7.15E-02	272.8	270.8	1	7.39E-02	1.033		
			pH=12.5	40	3	7.32E-02	276.1	269.3	1	7.44E-02	1.015
					7	8.63E-02	292.9	N.D. ^{※2}	1	-	-
					14	8.03E-02	294.8	N.D. ^{※2}	1	-	-
28					6.77E-02	259.6	N.D. ^{※2}	1	-	-	
56					6.77E-02	261.2	N.D. ^{※2}	1	-	-	
182	8.19E-02	292			N.D. ^{※2}	1	-	-			
純水	40	3	7.45E-02	280.6	N.D. ^{※2}	1	-	-			
		7	7.57E-02	284.2	N.D. ^{※2}	1	-	-			
		14	N.D. ^{※2}	310.4	N.D. ^{※2}	1	-	-			
		28	N.D. ^{※2}	263.6	N.D. ^{※2}	1	-	-			
		56	N.D. ^{※2}	275.3	N.D. ^{※2}	1	-	-			
		91	N.D. ^{※2}	280.4	N.D. ^{※2}	1	-	-			
		182	N.D. ^{※2}	291.2	N.D. ^{※2}	1	-	-			
		pH=12.5	40	3	N.D. ^{※2}	292.9	N.D. ^{※2}	1	-	-	
				7	N.D. ^{※2}	294.8	N.D. ^{※2}	1	-	-	
				14	N.D. ^{※2}	259.6	N.D. ^{※2}	1	-	-	
				28	N.D. ^{※2}	261.2	N.D. ^{※2}	1	-	-	
				56	N.D. ^{※2}	292	N.D. ^{※2}	1	-	-	
182	N.D. ^{※2}			280.6	N.D. ^{※2}	1	-	-			
純水	40	3	N.D. ^{※2}	284.2	N.D. ^{※2}	1	-	-			
		7	N.D. ^{※2}	310.4	N.D. ^{※2}	1	-	-			
		14	N.D. ^{※2}	263.6	N.D. ^{※2}	1	-	-			
		28	N.D. ^{※2}	275.3	N.D. ^{※2}	1	-	-			
		56	N.D. ^{※2}	280.4	N.D. ^{※2}	1	-	-			
		91	N.D. ^{※2}	291.2	N.D. ^{※2}	1	-	-			
		182	N.D. ^{※2}	272.8	N.D. ^{※2}	1	-	-			
		pH=12.5	40	3	N.D. ^{※2}	276.1	N.D. ^{※2}	1	-	-	
				7	N.D. ^{※2}	292.9	N.D. ^{※2}	1	-	-	
				14	N.D. ^{※2}	294.8	N.D. ^{※2}	1	-	-	
				28	N.D. ^{※2}	259.6	N.D. ^{※2}	1	-	-	
				56	N.D. ^{※2}	261.2	N.D. ^{※2}	1	-	-	
182	N.D. ^{※2}			292	N.D. ^{※2}	1	-	-			
陽イオン	純水	40	3	1.57E+00	310.4	945.9	1	2.94E-01	0.187		
			7	1.15E+00	263.6	1191.6	1	3.14E-01	0.274		
			14	1.23E+00	275.3	1226.5	1	3.38E-01	0.274		
			28	1.20E+00	280.4	3477.8	1	9.75E-01	0.809		
			56	1.35E+00	291.2	4730.8	1	1.38E+00	1.019		
			91	1.19E+00	272.8	4269.3	1	1.16E+00	0.979		
	pH=12.5	40	182	1.22E+00	276.1	4397.3	1	1.21E+00	0.996		
			3	1.44E+00	292.9	1271.4	1	3.72E-01	0.259		
			7	1.34E+00	294.8	1528.4	1	4.51E-01	0.337		
			14	1.13E+00	259.6	2534.7	1	6.58E-01	0.584		
			28	1.13E+00	261.2	4138.8	1	1.08E+00	0.960		
			56	1.36E+00	292	4899.7	1	1.43E+00	1.049		
純水	40	91	1.24E+00	280.6	4477.8	1	1.26E+00	1.014			
		182	1.26E+00	284.2	4484.7	1	1.27E+00	1.011			

※1 同一ドラムから採取した固化体コアサンプルの分析値からの推定

※2 検出下限値未満

表3.5 アスファルト固化体(LA)の浸出試験2の試験結果(その4:有機酸)

分析項目	浸出条件			対象	測定データ					Ct/C ₀
	浸出液		浸出期間		供試体中量 C ₀ (g) ^{※1}	浸出液量 (ml)	浸出液			
	種類	温度					測定値 (ppm)	検出下限値 (ppm)	浸出量 Ct(g)	
有機酸	純水	40	ギ酸	3	5.02E-02	310.4	31.525	1	9.79E-03	0.195
				7	3.67E-02	263.6	53.515	1	1.41E-02	0.384
				14	3.94E-02	275.3	63.881	1	1.76E-02	0.446
				28	3.86E-02	280.4	120.128	1	3.37E-02	0.873
				56	4.33E-02	291.2	146.101	1	4.25E-02	0.983
				91	3.81E-02	272.8	126.807	1	3.46E-02	0.908
				182	3.90E-02	276.1	135.676	1	3.75E-02	0.960
				3	4.60E-02	292.9	42.456	1	1.24E-02	0.271
				7	4.28E-02	294.8	60.471	1	1.78E-02	0.417
				14	3.60E-02	259.6	91.288	1	2.37E-02	0.657
				28	3.61E-02	261.2	125.465	1	3.28E-02	0.909
				56	4.36E-02	292	148.194	1	4.33E-02	0.991
	91	3.97E-02	280.6	138.502	1	3.89E-02	0.980			
	182	4.03E-02	284.2	134.366	1	3.82E-02	0.947			
	純水	40	酢酸	3	2.14E-03	310.4	2.179	1	6.76E-04	0.317
				7	1.56E-03	263.6	2.811	1	7.41E-04	0.474
				14	1.68E-03	275.3	3.307	1	9.10E-04	0.543
				28	1.64E-03	280.4	5.191	1	1.46E-03	0.886
				56	1.84E-03	291.2	6.892	1	2.01E-03	1.089
				91	1.62E-03	272.8	5.511	1	1.50E-03	0.927
				182	1.66E-03	276.1	5.957	1	1.64E-03	0.990
				3	1.96E-03	292.9	2.675	1	7.84E-04	0.400
				7	1.82E-03	294.8	3.211	1	9.47E-04	0.520
				14	1.53E-03	259.6	4.261	1	1.11E-03	0.721
28				1.54E-03	261.2	5.371	1	1.40E-03	0.914	
56				1.86E-03	292	6.26	1	1.83E-03	0.984	
91	1.69E-03	280.6	6.036	1	1.69E-03	1.003				
182	1.72E-03	284.2	5.957	1	1.69E-03	0.986				

※1 同一ドラムから採取した固化体コアサンプルの分析値からの推定

表3.6 アスファルト固化体の浸出試験3(硝酸の浸出促進)の試験結果

分析項目	浸出条件			対象	測定データ							Ct/C ₀
	浸出液		浸出期間 (d)		供試体 形状	供試体重 量(g)	供試体中量 C ₀ (g) ^{※1}	浸出液量 (ml)	浸出液			
	種類	温度(°C)							測定値 (ppm)	検出下限値 (ppm)	浸出量 Ct(g)	
陰イオン	純水	70	NO ₃ ⁻	□2.0cm	10.49	3.41E+00	252	1675.37	1	4.22E-01	0.1239	
					3	10.49	3.41E+00	252	4395.20	1	1.11E+00	0.3250
					7	10.49	3.41E+00	252	10246.40	1	2.58E+00	0.7576
					10	10.49	3.41E+00	252	11657.60	1	2.94E+00	0.8619
					14	10.49	3.41E+00	252	13105.30	1	3.30E+00	0.9690
					28	10.49	3.41E+00	252	14424.90	1	3.64E+00	1.0665
					56	10.49	3.41E+00	252	12802.90	1	3.23E+00	0.9466
					1	10.68	3.47E+00	255	1960.94	1	5.00E-01	0.1441
					3	10.68	3.47E+00	255	5561.85	1	1.42E+00	0.4087
					7	10.68	3.47E+00	255	10221.90	1	2.61E+00	0.7512
					10	10.68	3.47E+00	255	12284.80	1	3.13E+00	0.9028
					14	10.68	3.47E+00	255	13605.80	1	3.47E+00	0.9998
					28	10.68	3.47E+00	255	15028.20	1	3.83E+00	1.1044
					56	10.68	3.47E+00	255	14385.80	1	3.67E+00	1.0572
					1	10.65	3.46E+00	255	1637.95	1	4.18E-01	0.1207
					3	10.65	3.46E+00	255	5948.15	1	1.52E+00	0.4383
					7	10.65	3.46E+00	255	11094.00	1	2.83E+00	0.8176
					10	10.65	3.46E+00	255	13281.20	1	3.39E+00	0.9787
					14	10.65	3.46E+00	255	13544.60	1	3.45E+00	0.9981
					28	10.65	3.46E+00	255	14091.40	1	3.59E+00	1.0384
					56	10.65	3.46E+00	255	14312.20	1	3.65E+00	1.0547
					1	4.73	1.54E+00	149	3524.40	1	5.25E-01	0.3417
					3	4.73	1.54E+00	149	7130.85	1	1.06E+00	0.6914
					7	4.73	1.54E+00	149	9998.50	1	1.49E+00	0.9694
					10	4.73	1.54E+00	149	9977.90	1	1.49E+00	0.9674
					14	4.73	1.54E+00	149	9568.50	1	1.43E+00	0.9277
					28	4.73	1.54E+00	149	9600.40	1	1.43E+00	0.9308
					56	4.73	1.54E+00	149	9330.00	1	1.39E+00	0.9046
				1	4.50	1.46E+00	144	2485.55	1	3.58E-01	0.2448	
				3	4.50	1.46E+00	144	6148.55	1	8.85E-01	0.6056	
				7	4.50	1.46E+00	144	9038.80	1	1.30E+00	0.8902	
				10	4.50	1.46E+00	144	9391.90	1	1.35E+00	0.9250	
				14	4.50	1.46E+00	144	8969.30	1	1.29E+00	0.8834	
				28	4.50	1.46E+00	144	9077.50	1	1.31E+00	0.8940	
				56	4.50	1.46E+00	144	8821.40	1	1.27E+00	0.8688	
				1	4.62	1.50E+00	147	2762.35	1	4.06E-01	0.2705	
				3	4.62	1.50E+00	147	7053.95	1	1.04E+00	0.6908	
				7	4.62	1.50E+00	147	9104.60	1	1.34E+00	0.8916	
				10	4.62	1.50E+00	147	9010.30	1	1.32E+00	0.8824	
				14	4.62	1.50E+00	147	9240.00	1	1.36E+00	0.9049	
				28	4.62	1.50E+00	147	8830.90	1	1.30E+00	0.8648	
				56	4.62	1.50E+00	147	7923.10	1	1.16E+00	0.7759	
				1	1.37	4.45E-01	65	3178.30	1	2.07E-01	0.4641	
				3	1.37	4.45E-01	65	5811.20	1	3.78E-01	0.8486	
				7	1.37	4.45E-01	65	6093.20	1	3.96E-01	0.8898	
				10	1.37	4.45E-01	65	6048.80	1	3.93E-01	0.8833	
				14	1.37	4.45E-01	65	5892.40	1	3.83E-01	0.8604	
				28	1.37	4.45E-01	65	4709.60	1	3.06E-01	0.6877	
				56	1.37	4.45E-01	65	4118.50	1	2.68E-01	0.6014	
				1	1.34	4.35E-01	64	3137.90	1	2.01E-01	0.4613	
				3	1.34	4.35E-01	64	5560.60	1	3.56E-01	0.8174	
				7	1.34	4.35E-01	64	5540.00	1	3.55E-01	0.8144	
				10	1.34	4.35E-01	64	5570.40	1	3.57E-01	0.8188	
				14	1.34	4.35E-01	64	5140.40	1	3.29E-01	0.7556	
				28	1.34	4.35E-01	64	5392.80	1	3.45E-01	0.7927	
				56	1.34	4.35E-01	64	5421.10	1	3.47E-01	0.7969	
1	1.37	4.45E-01	65	3767.40	1	2.45E-01	0.5501					
3	1.37	4.45E-01	65	5787.20	1	3.76E-01	0.8451					
7	1.37	4.45E-01	65	5591.20	1	3.63E-01	0.8165					
10	1.37	4.45E-01	65	5715.60	1	3.72E-01	0.8346					
14	1.37	4.45E-01	65	4776.00	1	3.10E-01	0.6974					
28	1.37	4.45E-01	65	4543.60	1	2.95E-01	0.6635					
56	1.37	4.45E-01	65	4695.60	1	3.05E-01	0.6857					

※1 同一ドラムから採取した固化体コアサンプルの分析値から推定

表 4.1 プラスチック固化体の浸出試験における分析項目一覧

調査対象		P1s 浸出試験	分析手法	検出下限
放射性核種	γ 核種	I-129 Cs-137	γ スペクトル分析	各試料測定におけるバックグラウンドの計数率から算出
	陰イオン	PO_4^{3-}	イオンクロマト分析	PO_4^{3-} : <1ppm
化学種	陽イオン	Mg^{2+}	イオンクロマト分析	Mg^{2+} : <1ppm
	TBP, DBP	TBP, DBP	赤外分光分析 (FT-IR) (分析所にて分析)	TBP, DBP: <20ppm

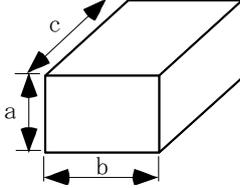
表 4.2 プラスチック固化体の浸出試験の試験条件

項目	MCC-1P 法条件	試験条件
浸出液	純水、珪酸水、塩水、 (処分場から採取可能な場合は処分場の水を用いる場合もある。)	・純水 (導電率 $\leq 0.1 \mu\text{S}/\text{cm}$) ・水酸化カルシウム溶液 (pH12.5)
浸出温度	40, 70, 90°C	50°C
浸出容器	PFA テフロン製容器	専用容器 (SUS304 製)
試料形状	—	1×2×3cm の直方体 (表面積 : 約 22 cm ²)
浸出液量*	60ml	約 220ml

* 各供試体の表面積に応じて次式を満足するように設定

$$SA/V=0.0100 \pm 0.0005\text{mm}^{-1} \quad (SA : \text{供試体表面積} [\text{mm}^2], V : \text{浸出液量} [\text{mm}^3])$$

表 4.3 プラスチック固化体の浸出試験における供試体形状及び寸法等 (1/2)

供試体	試験No.	試験	
供試体成型方法		ボアリングでφ5.0cmにコア抜き→1.0cmピッチにて電動鋸で切断→ 下記の形状に押切切断	
供試体形状		1.0×2.0×3.0cmの直方体 	
平均寸法 (cm)		a : 0.99 b : 2.04 c : 3.01	
表面積 (cm ²)		22.22	
体積 (cm ³)		6.06	
平均重量 (g)		7.60	
密度 (g/cm ³)		1.26	
固化体データ	ドラムNo.	87-0122	
	固化年月日	1987/06/30	
	固化体重量 (kg)	101	
	添加剤重量 (kg)	25.2	
	処理量 (ℓ)	58.5	
	固化体中の TBP 成分 (wt%)	52	
	添加剤中の Mg 含有率 (wt%)	19	
	固化体 1g 中に 含まれる量 (推定) ※1	I-129	4.92×10 ¹ (Bq/g)
		Cs-137	-
TBP		4.5×10 ⁻¹ (g/g)	
Mg		4.7×10 ⁻² (g/g)	
備考			

※ 1 : 次式による廃液中濃度からの推定値

固化体 1g 中に含まれる I-129 量 = TBP 処理量 × TBP 中の I-129 分析値 / ドラム内容物の重量

固化体 1g 中に含まれる TBP 量 = 処理量 × TBP (比重) × 含有率 (処理対象 TBP 中の不純物を除く TBP 含有率) / ドラム内容物の重量

固化体 1g 中に含まれる Mg 量 = 添加剤重量 × Mg 含有率 (添加剤中の Mg 含有率 (wt%)) / ドラム内容物の重量

表 4.3 プラスチック固化体の浸出試験における供試体形状及び寸法等 (2/2)

供試体 No.	種類	温度	浸出 期間	寸法(mm)			表面積 (cm ²)	体積 (cm ³)	重量 (g)	比表面積 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)	浸出液量 (ml)		
				a	b	c								
1	純水 (0.1μS/cm以下)	50°C	3	10.0	20.0	30.0	22.00	6.00	7.87	2.80	1.31	220		
3			10.5	22.0	30.0	24.12	6.93	7.85	3.07	1.13	241			
5			10.0	20.0	30.0	22.00	6.00	7.81	2.82	1.30	220			
7			10.0	21.0	30.0	22.80	6.30	7.38	3.09	1.17	228			
9			10.0	20.0	30.0	22.00	6.00	7.68	2.87	1.28	220			
11			9.0	21.0	31.0	22.38	5.86	7.72	2.90	1.32	224			
13			11.0	20.0	30.0	23.00	6.60	8.84	2.60	1.34	230			
2			水酸化カルシウム溶液 (pH=12.5)	50°C	3	10.0	20.0	30.0	22.00	6.00	7.44	2.96	1.24	220
4					10.0	20.0	30.0	22.00	6.00	7.58	2.90	1.26	220	
6					9.0	20.0	30.0	21.00	5.40	6.35	3.31	1.18	210	
8					9.0	20.0	30.0	21.00	5.40	6.69	3.14	1.24	210	
10					10.0	21.0	30.0	22.80	6.30	7.45	3.06	1.18	228	
12					10.0	20.0	30.0	22.00	6.00	7.84	2.81	1.31	220	
14	10.0	20.0			30.0	22.00	6.00	7.85	2.80	1.31	220			

表4.4 プラスチック固化体の浸出試験の試験結果(その1:γ核種)

分析項目	浸出条件		核種	試験前供試体				浸出液(100mLあたり)				試験後供試体				Ci/Co	Z/Co
	浸出液種類	温度		重量(g)	測定値C ₀ (Bq)	統計誤差(Bq)	検出下限値(Bq)	浸出液量(ml)	測定値(Bq)	統計誤差(Bq)	検出下限値(Bq)	測定値Z(Bq)	統計誤差(Bq)	検出下限値(Bq)			
															浸出期間		
γ核種分析	純水	50	3	7.8673	1.04E+02	1.26E+01	4.46E+00	220.0	5.88E+00	7.31E-01	6.15E-01	9.16E+01	1.10E+01	4.02E+00	0.1239	0.8776	
			7	7.4434	1.03E+02	1.24E+01	4.32E+00	241.2	9.06E+00	1.11E+00	7.63E-01	8.74E+01	1.05E+01	4.16E+00	0.2116	0.8464	
			14	7.8489	1.12E+02	1.34E+01	4.41E+00	220.0	1.33E+01	1.60E+00	7.93E-01	7.94E+01	9.58E+00	3.88E+00	0.2599	0.7072	
			28	7.5813	1.08E+02	1.29E+01	3.88E+00	228.0	1.70E+01	2.65E+01	7.58E-01	6.63E+01	7.95E+00	3.62E+00	0.3588	0.6154	
			56	7.8143	9.83E+01	1.18E+01	4.63E+00	220.0	2.24E+01	2.77E+00	8.21E-01	6.32E+01	7.58E+00	3.14E+00	0.5241	0.6429	
			91	6.3508	1.02E+02	1.22E+01	4.82E+00	223.8	2.69E+01	3.19E+00	8.63E-01	6.03E+01	7.34E+00	3.54E+00	0.5915	0.5929	
			154	7.3823	1.05E+02	1.27E+01	4.40E+00	230.0	3.16E+01	3.76E+00	8.46E-01	4.68E+01	5.73E+00	2.05E+00	0.6894	0.4435	
			3	6.8899	1.06E+02	1.27E+01	4.42E+00	220.0	1.26E+01	1.52E+00	8.46E-01	7.48E+01	9.03E+00	4.02E+00	0.2622	0.7052	
			7	7.6773	1.12E+02	1.34E+01	4.64E+00	220.0	1.66E+01	1.99E+00	9.52E-01	7.34E+01	8.84E+00	3.37E+00	0.3254	0.6562	
			14	7.4471	1.01E+02	1.21E+01	3.83E+00	210.0	2.47E+01	2.93E+00	8.94E-01	5.36E+01	6.50E+00	2.77E+00	0.5124	0.5296	
			28	7.72	1.00E+02	1.20E+01	4.02E+00	210.0	3.44E+01	4.04E+01	9.95E-01	4.03E+01	4.91E+00	2.46E+00	0.7205	0.4021	
			56	7.8408	1.16E+02	1.39E+01	4.29E+00	228.0	4.52E+01	5.30E+00	1.27E+00	2.80E+01	3.49E+00	2.23E+00	0.8841	0.2404	
			91	8.839	1.16E+02	1.38E+01	4.41E+00	220.0	5.18E+01	6.13E+00	1.41E+00	2.29E+01	2.93E-01	2.31E+00	0.9854	0.1983	
			154	7.8455	1.10E+02	1.31E+01	4.06E+00	220.0	5.34E+01	6.35E+00	1.07E+00	1.55E+01	2.04E+00	1.50E+00	1.0730	0.1415	
			3	7.8673	ND ^{※1}	5.11E-01	4.65E-02	1.24E-01	ND ^{※1}	4.47E-01	4.65E-02	1.24E-01	ND ^{※1}	4.17E-01	4.17E-01		
	7	7.4434	ND ^{※1}	3.49E-01	6.72E-02	1.59E-01	ND ^{※1}	9.80E-01	6.72E-02	1.59E-01	ND ^{※1}	3.99E-01	3.99E-01				
	14	7.8489	ND ^{※1}	3.80E-01	ND ^{※1}	1.34E-01	ND ^{※1}	ND ^{※1}	ND ^{※1}	1.34E-01	ND ^{※1}	3.27E-01	3.27E-01				
	28	7.5813	ND ^{※1}	2.89E-01	ND ^{※1}	1.60E-01	ND ^{※1}	ND ^{※1}	ND ^{※1}	1.60E-01	ND ^{※1}	4.51E-01	4.51E-01				
	56	7.8143	ND ^{※1}	2.61E-01	ND ^{※1}	1.58E-01	ND ^{※1}	ND ^{※1}	ND ^{※1}	1.58E-01	ND ^{※1}	3.02E-01	3.02E-01				
	91	6.3508	ND ^{※1}	3.60E-01	ND ^{※1}	1.23E-01	ND ^{※1}	ND ^{※1}	ND ^{※1}	1.23E-01	ND ^{※1}	5.11E-01	5.11E-01				
	154	7.3823	ND ^{※1}	3.49E-01	ND ^{※1}	1.27E-01	ND ^{※1}	4.52E-01	4.74E-02	1.27E-01	ND ^{※1}	4.08E-01	4.08E-01				
	3	6.8899	ND ^{※1}	3.89E-01	ND ^{※1}	1.91E-01	ND ^{※1}	4.34E-01	6.35E-02	1.91E-01	ND ^{※1}	2.45E-01	2.45E-01				
	7	7.6773	ND ^{※1}	3.49E-01	ND ^{※1}	1.50E-01	ND ^{※1}	9.81E-01	6.59E-02	1.50E-01	ND ^{※1}	3.70E-01	3.70E-01				
14	7.4471	ND ^{※1}	3.80E-01	ND ^{※1}	1.52E-01	ND ^{※1}	7.53E-01	6.04E-02	1.52E-01	ND ^{※1}	3.60E-01	3.60E-01					
28	7.72	ND ^{※1}	4.08E-01	ND ^{※1}	1.23E-01	ND ^{※1}	5.39E-01	4.86E-02	1.23E-01	ND ^{※1}	3.60E-01	3.60E-01					
56	7.8408	ND ^{※1}	3.49E-01	ND ^{※1}	2.87E-01	ND ^{※1}	1.86E+01	5.94E-01	2.87E-01	ND ^{※1}	5.18E-01	5.18E-01					
91	8.839	ND ^{※1}	3.70E-01	ND ^{※1}	5.07E-01	ND ^{※1}	7.55E+00	1.17E-01	5.07E-01	ND ^{※1}	3.89E-01	3.89E-01					
154	7.8455	ND ^{※1}	4.17E-01	6.95E-02	1.52E-01	ND ^{※1}	1.13E+00	6.95E-02	1.52E-01	ND ^{※1}	3.49E-01	3.49E-01					

※1 検出下限値未満

表4.4 プラスチック固化体の浸出試験の試験結果(その2:TBP/DBP)

分析項目	浸出条件			対象	測定データ					Ct/C ₀
	浸出液		浸出期間 (d)		供試体中量 C ₀ (g) ^{※1}	浸出液量 (mL)	浸出液			
	種類	温度(°C)					測定値 (ppm)	検出下限値 (ppm)	浸出量 Ct(g)	
TBP, DBP	純水	50	3	TBP	3.57E+00	220	92	20	2.02E-02	0.006
			7		3.38E+00	220	94	20	2.07E-02	0.006
			14		3.56E+00	241.2	103	20	2.48E-02	0.007
			28		3.44E+00	220	106	20	2.33E-02	0.007
			56		3.55E+00	220	131	20	2.88E-02	0.008
			91		2.88E+00	210	137	20	2.88E-02	0.010
			154		3.35E+00	228	223	20	5.08E-02	0.015
			3		3.04E+00	210	21	20	4.41E-03	0.001
			7		3.48E+00	220	22	20	4.84E-03	0.001
			14		3.38E+00	228	24	20	5.47E-03	0.002
			28		3.50E+00	223.8	30	20	6.71E-03	0.002
			56		3.56E+00	220	43	20	9.46E-03	0.003
			91		4.01E+00	230	56	20	1.29E-02	0.003
			154		3.56E+00	220	171	20	3.76E-02	0.011
			3			220	N.D. ^{※2}	20	-	-
	7		220	N.D. ^{※2}	20	-	-			
	14	純水	50	DBP		241.2	25	20	6.03E-03	-
	28				220	42	20	9.24E-03	-	
	56				220	84	20	1.85E-02	-	
	91				210	145	20	3.05E-02	-	
	154				228	260	20	5.93E-02	-	
	3				210	67	20	1.41E-02	-	
	7	pH=12.5	50	DBP		220	126	20	2.77E-02	-
	14				228	214	20	4.88E-02	-	
28	223.8				401	20	8.97E-02	-		
56	220				753	20	1.66E-01	-		
91	230				1120	20	2.58E-01	-		
154	220				1852	20	4.07E-01	-		

※1 供試体中のTBP量は、固化体に含まれるTBP量と各供試体の重量から算出

※2 検出下限値未達

表4.4 プラスチック固化体の浸出試験の試験結果(その3:その他)

分析項目	浸出条件			化学種	測定データ					Ct/C ₀	
	浸出液		浸出期間 (d)		供試体重量 (g)	供試体中量 C ₀ (g) ^{※1}	浸出液量 (mL)	浸出液			
	種類	温度(°C)						測定値 (ppm)	検出下限値 (ppm)		浸出量 Ct(g)
陰イオン	純水	50	PO ₄ ³⁻	3	7.87		220	N.D. ^{※2}	1	-	-
				7	7.44		220	1.284	1	2.82E-04	-
				14	7.85		241.2	2.433	1	5.87E-04	-
				28	7.58		220	3.089	1	6.80E-04	-
				56	7.81		220	N.D. ^{※2}	1	-	-
				91	6.35		210	N.D. ^{※2}	1	-	-
				154	7.38		228	N.D. ^{※2}	1	-	-
				3	6.69		210	N.D. ^{※2}	1	-	-
				7	7.68		220	N.D. ^{※2}	1	-	-
				14	7.45		228	N.D. ^{※2}	1	-	-
				28	7.72		223.8	N.D. ^{※2}	1	-	-
				56	7.84		220	N.D. ^{※2}	1	-	-
				91	8.84		230	N.D. ^{※2}	1	-	-
				154	7.85		220	N.D. ^{※2}	1	-	-
				陽イオン	純水	50	Mg ⁺	3	7.87	3.73E-01	220
7	7.44	3.53E-01	220					1	1	2.20E-04	0.0006
14	7.85	3.72E-01	241.2					1.675	1	4.04E-04	0.0011
28	7.58	3.59E-01	220					2.412	1	5.31E-04	0.0015
56	7.81	3.70E-01	220					3.952	1	8.69E-04	0.0023
91	6.35	3.01E-01	210					5.916	1	1.24E-03	0.0041
154	7.38	3.50E-01	228					9.9	1	2.26E-03	0.0065
3	6.69	3.17E-01	210					N.D. ^{※2}	1	-	-
7	7.68	3.64E-01	220					N.D. ^{※2}	1	-	-
14	7.45	3.53E-01	228					N.D. ^{※2}	1	-	-
28	7.72	3.66E-01	223.8					N.D. ^{※2}	1	-	-
56	7.84	3.72E-01	220					N.D. ^{※2}	1	-	-
91	8.84	4.19E-01	230					N.D. ^{※2}	1	-	-
154	7.85	3.72E-01	220					N.D. ^{※2}	1	-	-

※1 MgのC₀は供試体中のMg含有比(4.74×10⁻²)と各供試体の重量の積により算出

※2 検出下限値未達

表5.1 アスファルト固化体における硝酸イオンの拡散係数

	比表面積 (S/V)	グラフ傾き	拡散係数D (cm ² /d)	備考
□10mm	6.00	0.486	5.15E-03	試験温度70℃
□15mm	4.00	0.351	6.04E-03	試験温度70℃
□20mm	3.00	0.260	5.90E-03	試験温度70℃
10mm×20mm×30mm (試験1)	3.67	0.228	3.04E-03	試験温度50℃
φ45mm×10mm 半円柱形(試験2)	3.23	0.095	6.81E-04	試験温度40℃

※グラフの傾きは、 $(C_t/C_0)/\sqrt{t}$ に相当する。

表5.2 プラスチック固化体における I-129 の拡散係数

	比表面積 (S/V)	グラフ傾き	拡散係数D (cm ² /d)	備考
I-129(純水)	3.67	0.070	2.87E-04	試験温度50℃
I-129(pH=12.5)	3.67	0.127	9.35E-04	試験温度50℃

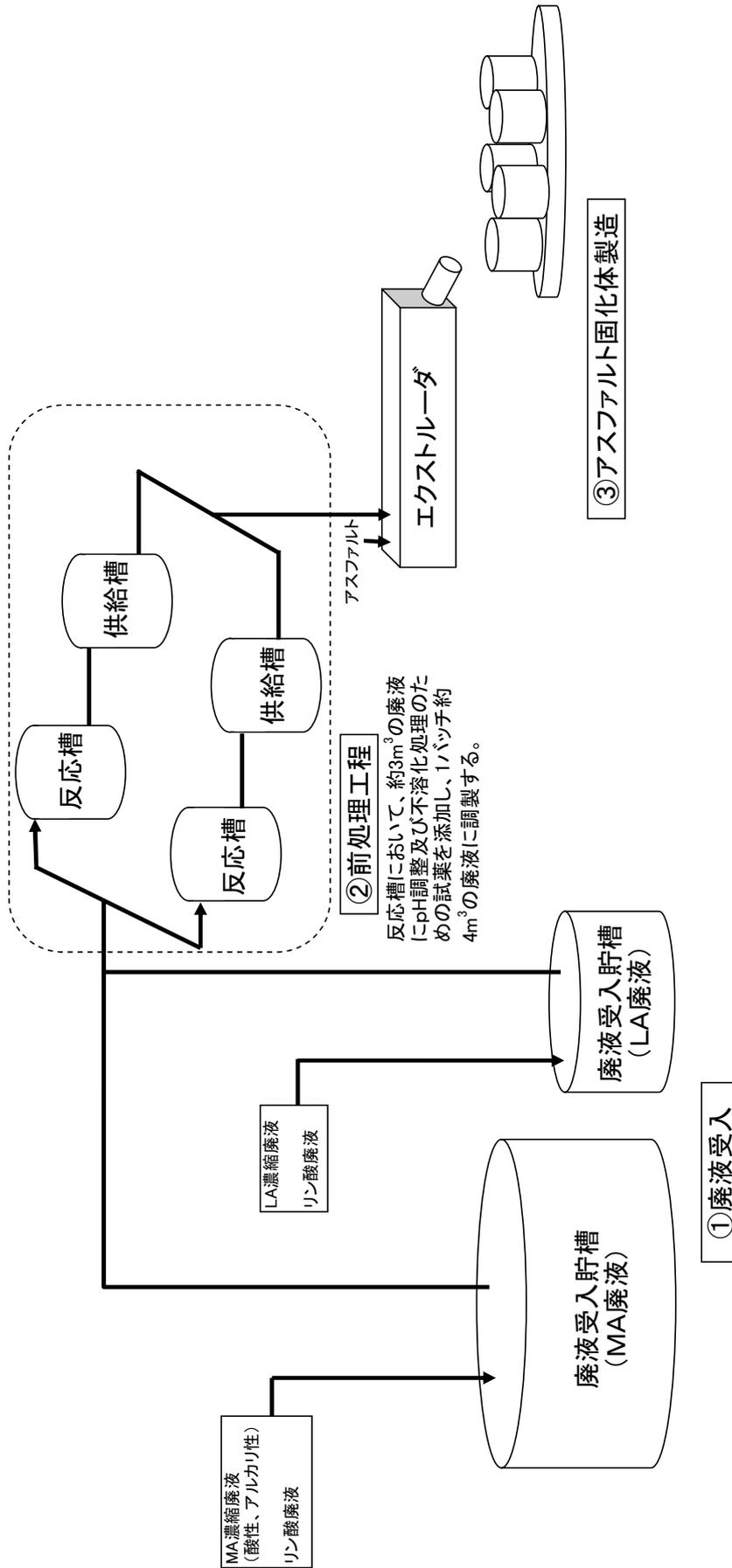


図2.1 アスファルト固化体製造工程の概要

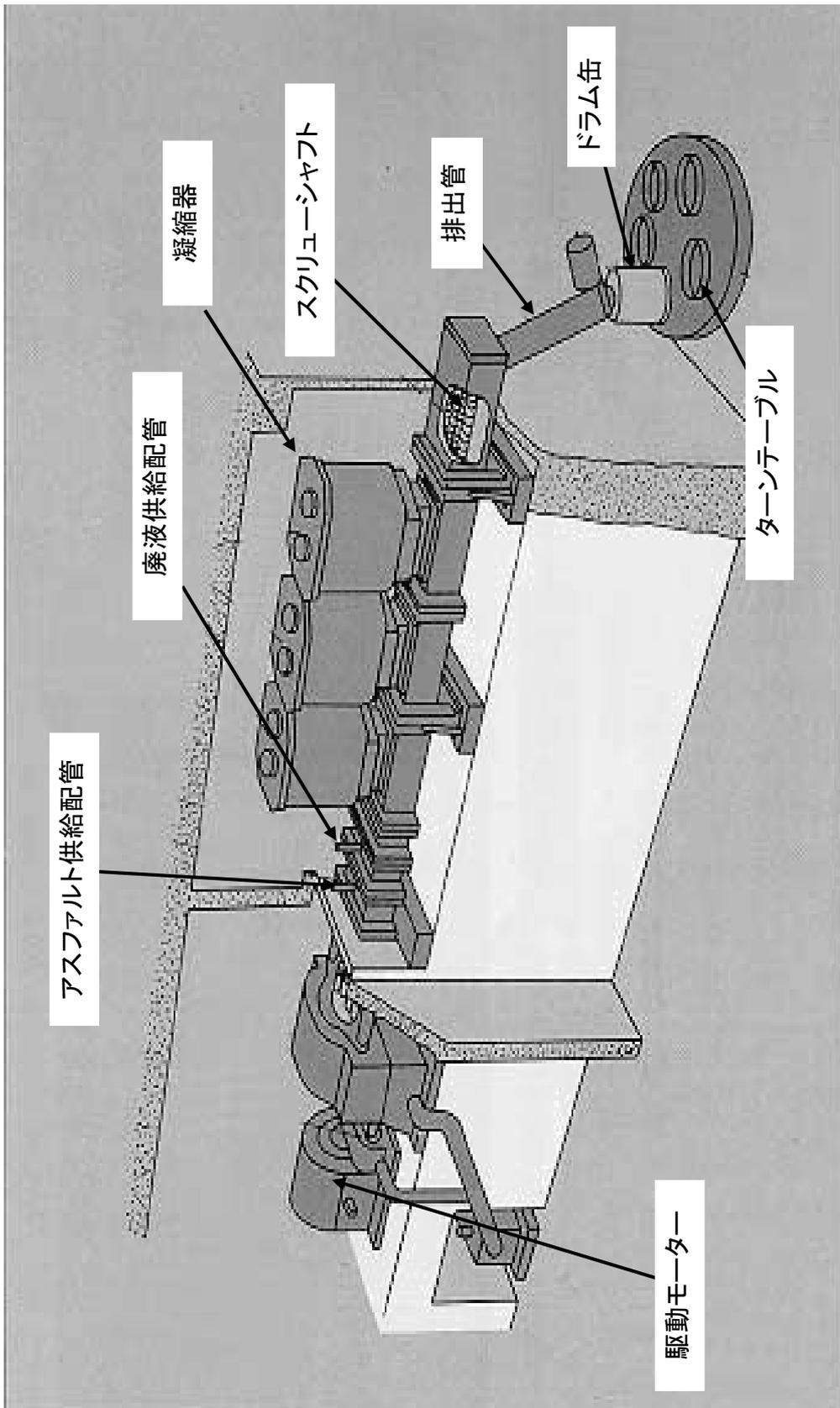


図2.2 エクストルーダーの概要

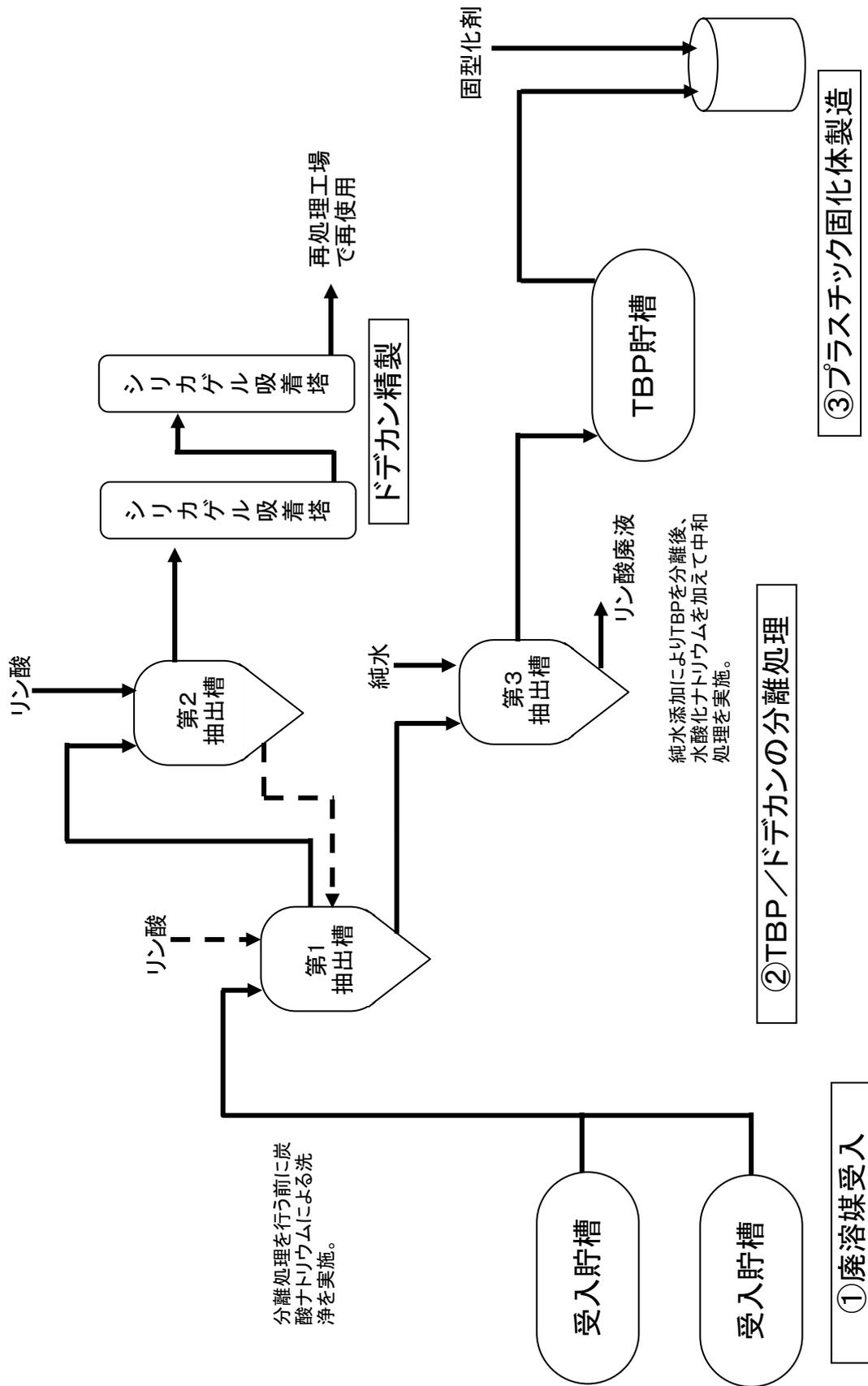


図2.3 プラスチック固化体製造工程の概要 (廃溶媒の分離処理～プラスチック固化体製造)

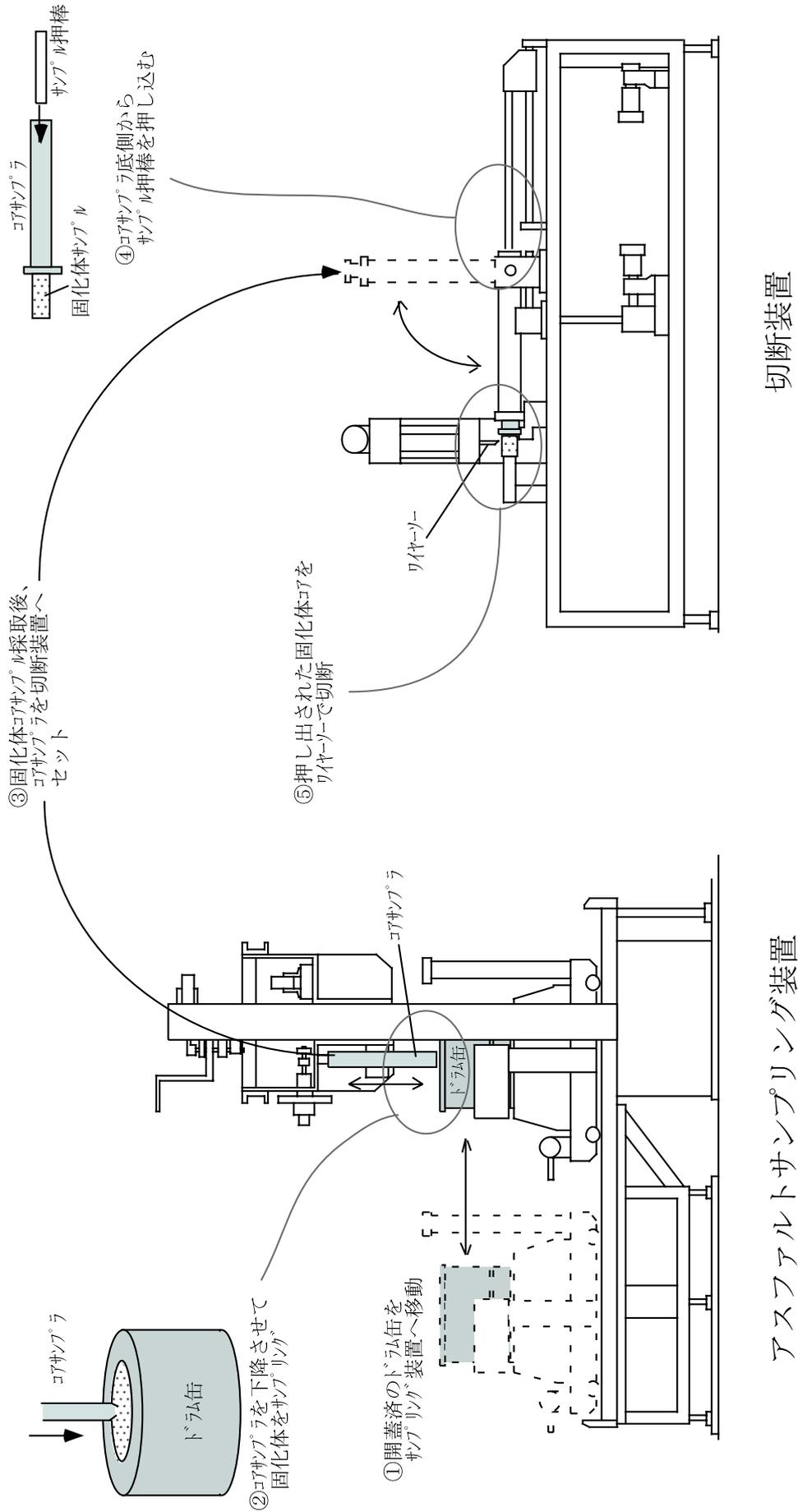


図2.4 アスファルト固化体サンプリング装置の概要

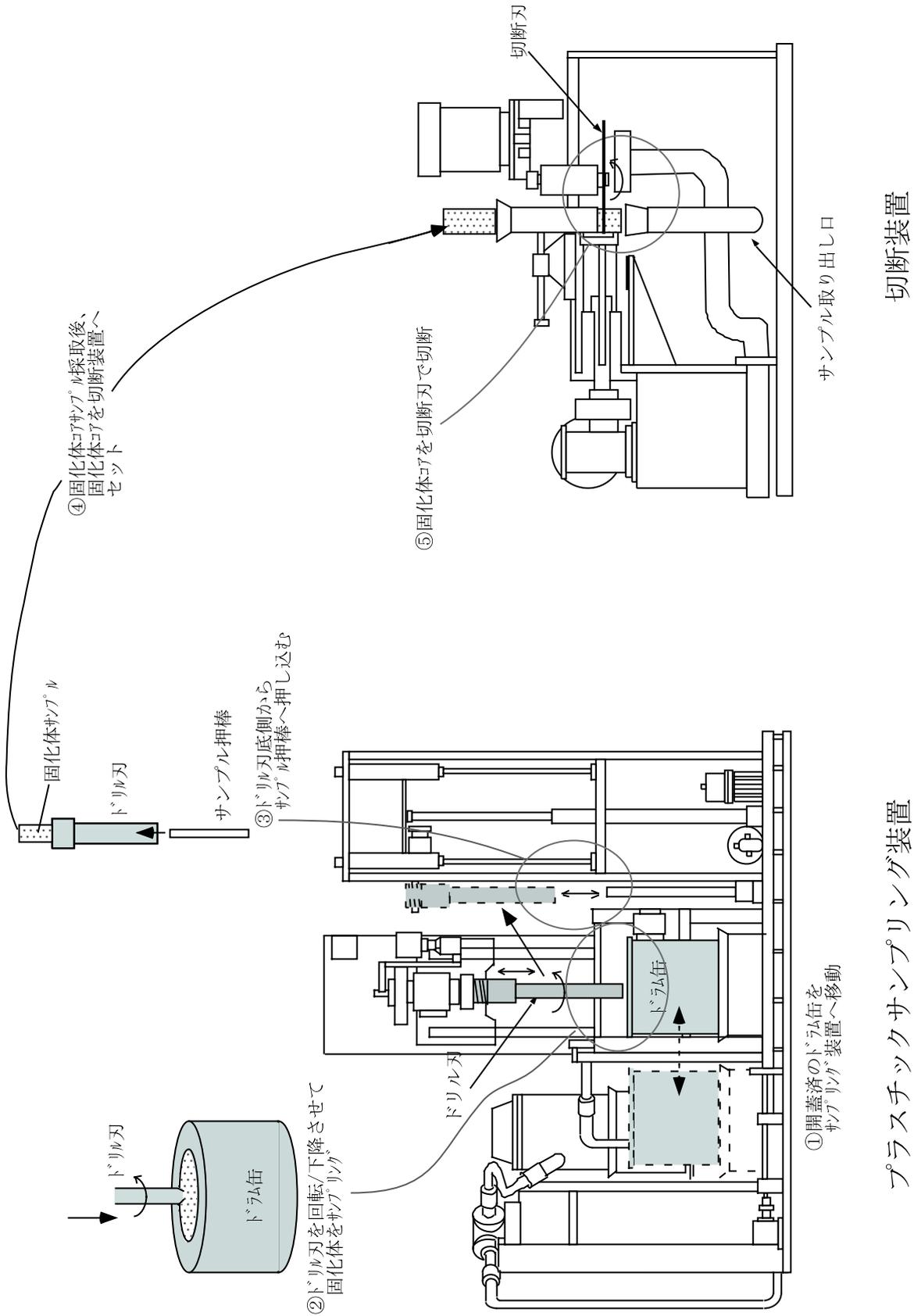


図2.5 プラスチック固化体サンプルプリング装置の概要

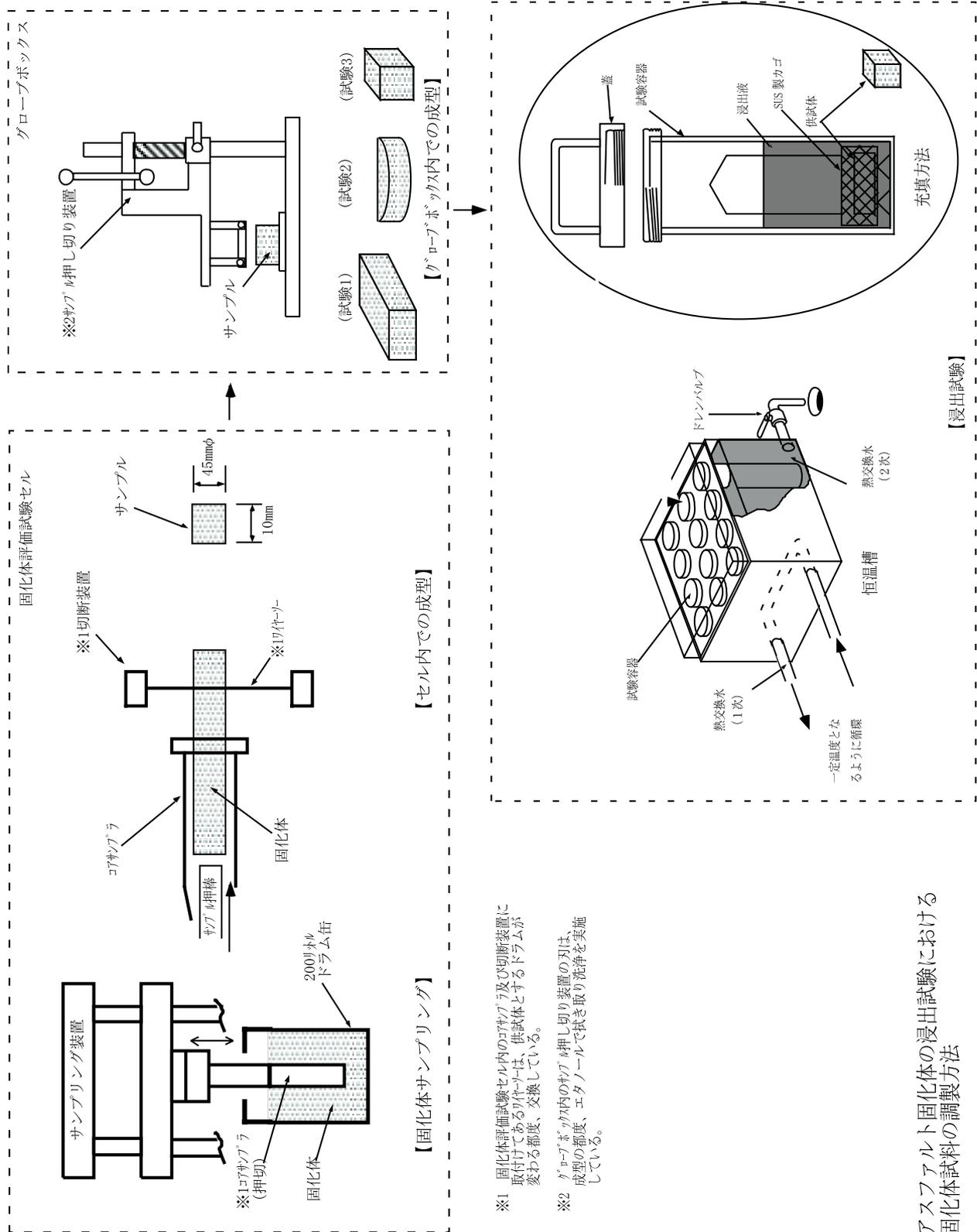


図3.1 アスファルト固体化体の浸出試験における固体化試料の調製方法

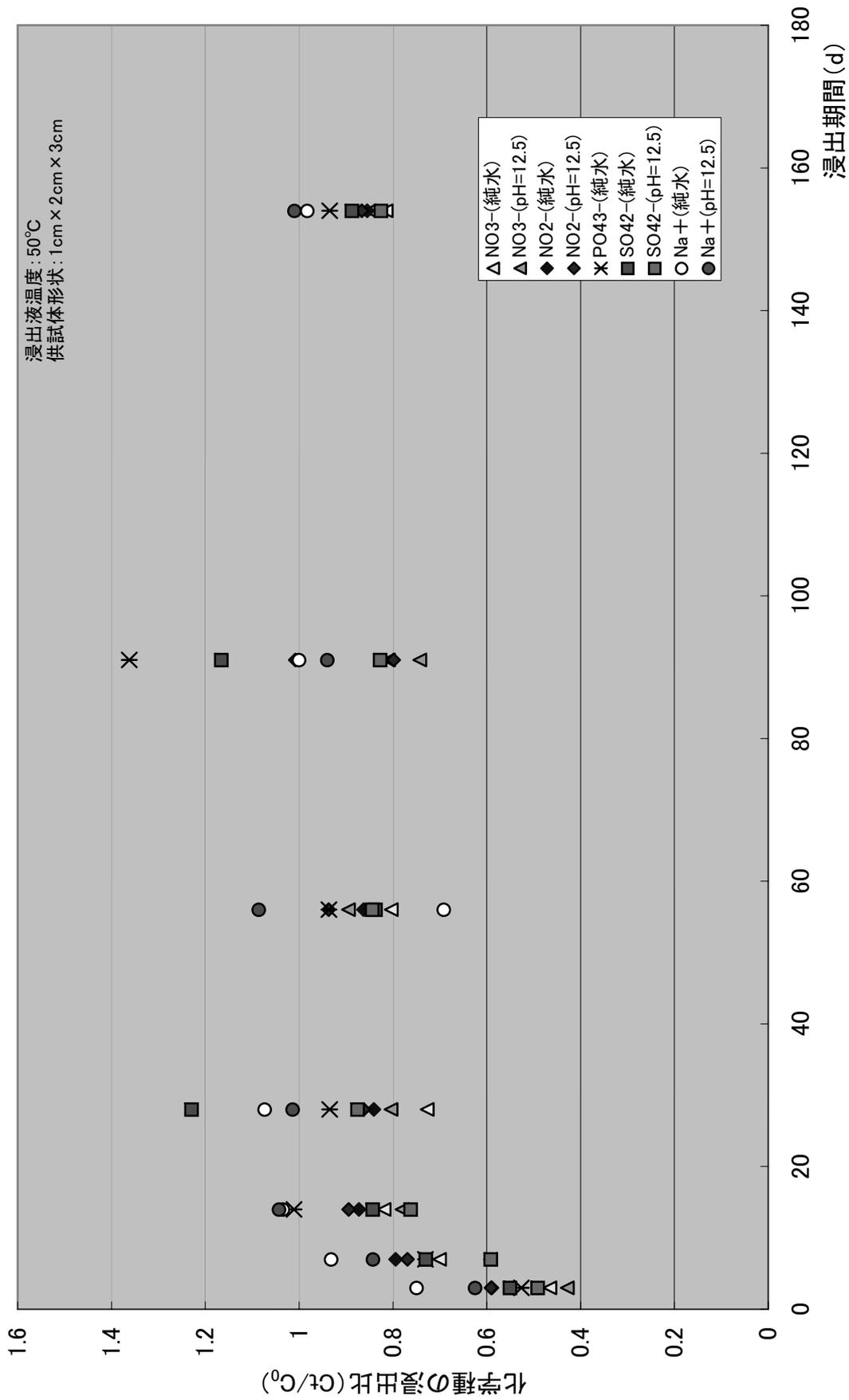


図3.2 アスファルト固化体(MA)の浸出試験1の試験結果(化学種)

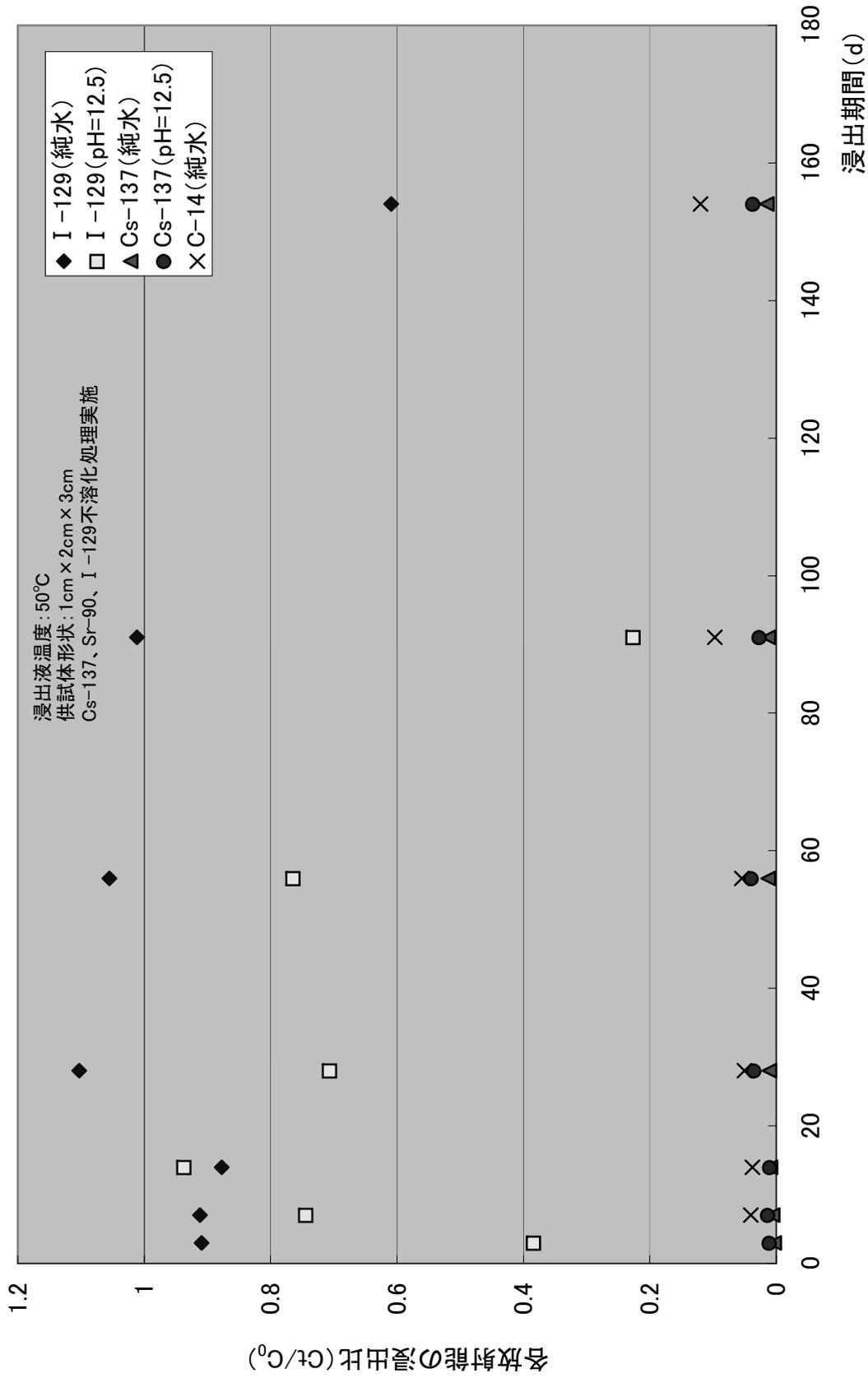


図3.3 アスファルト固化体(MA)の浸出試験1の試験結果(放射能)

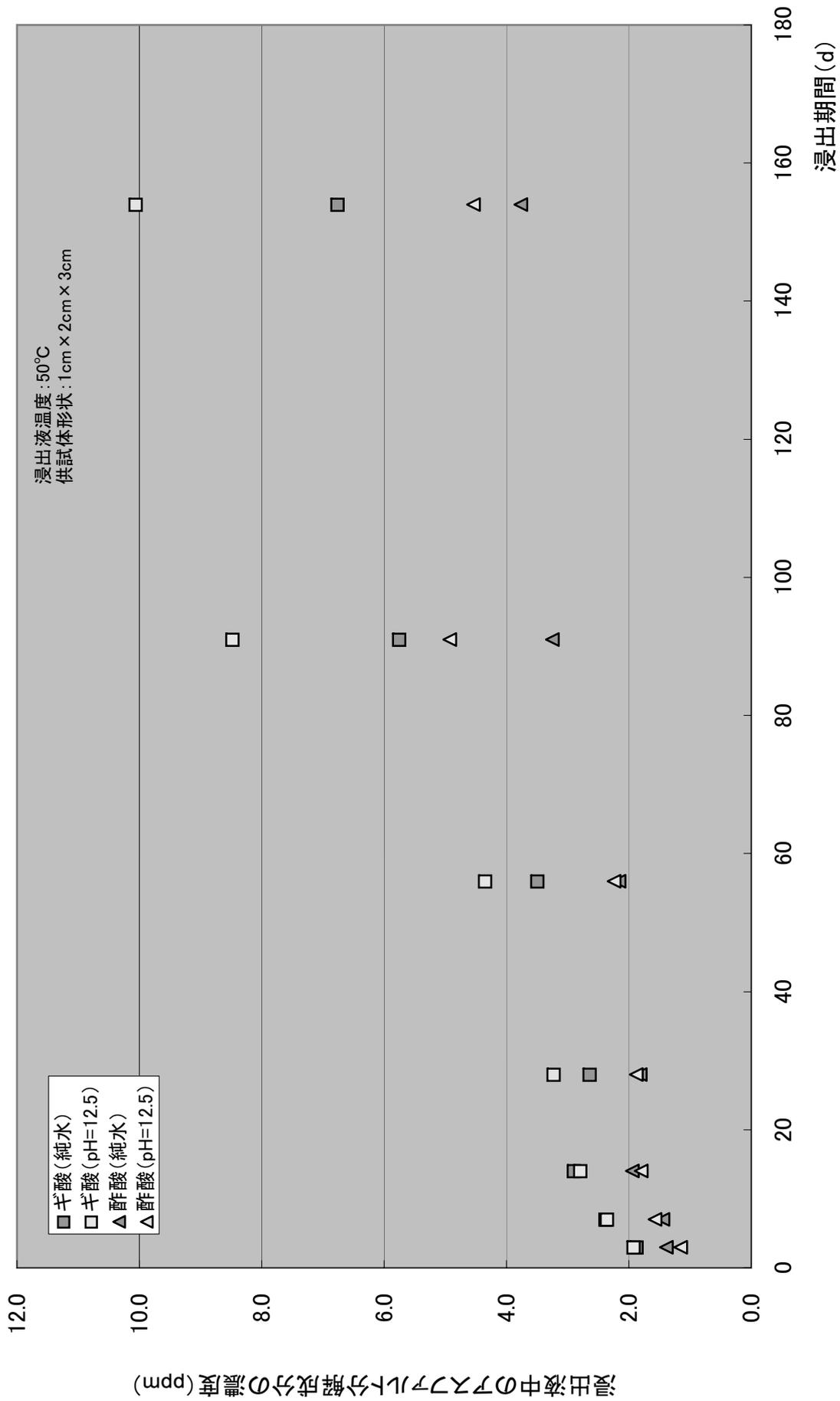


図3.4 アスファルト固化体(MA)の浸出試験1の試験結果(アスファルト分解成分)

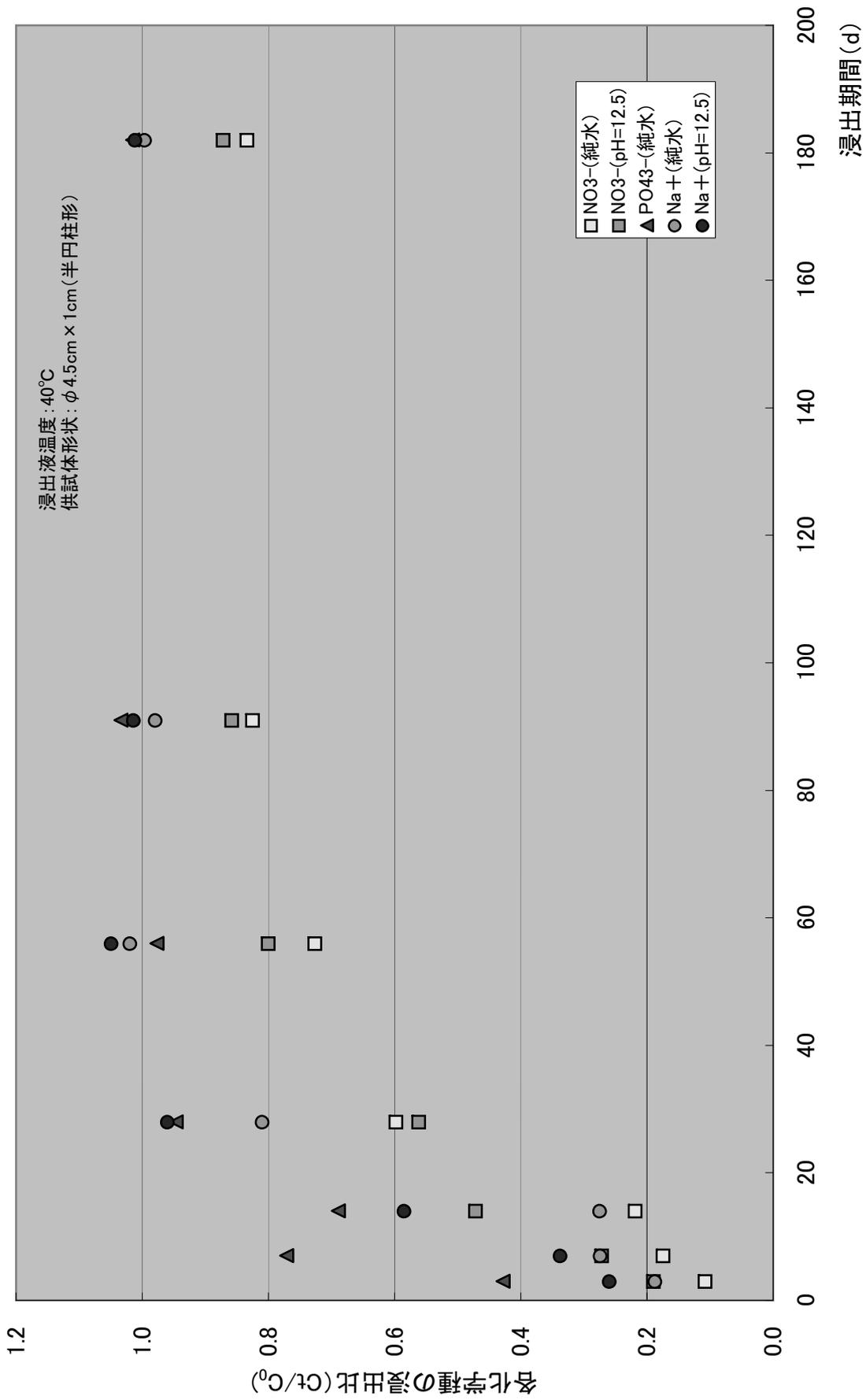


図3.5 アスファルト固化体(LA)の浸出試験2の試験結果(化学種)

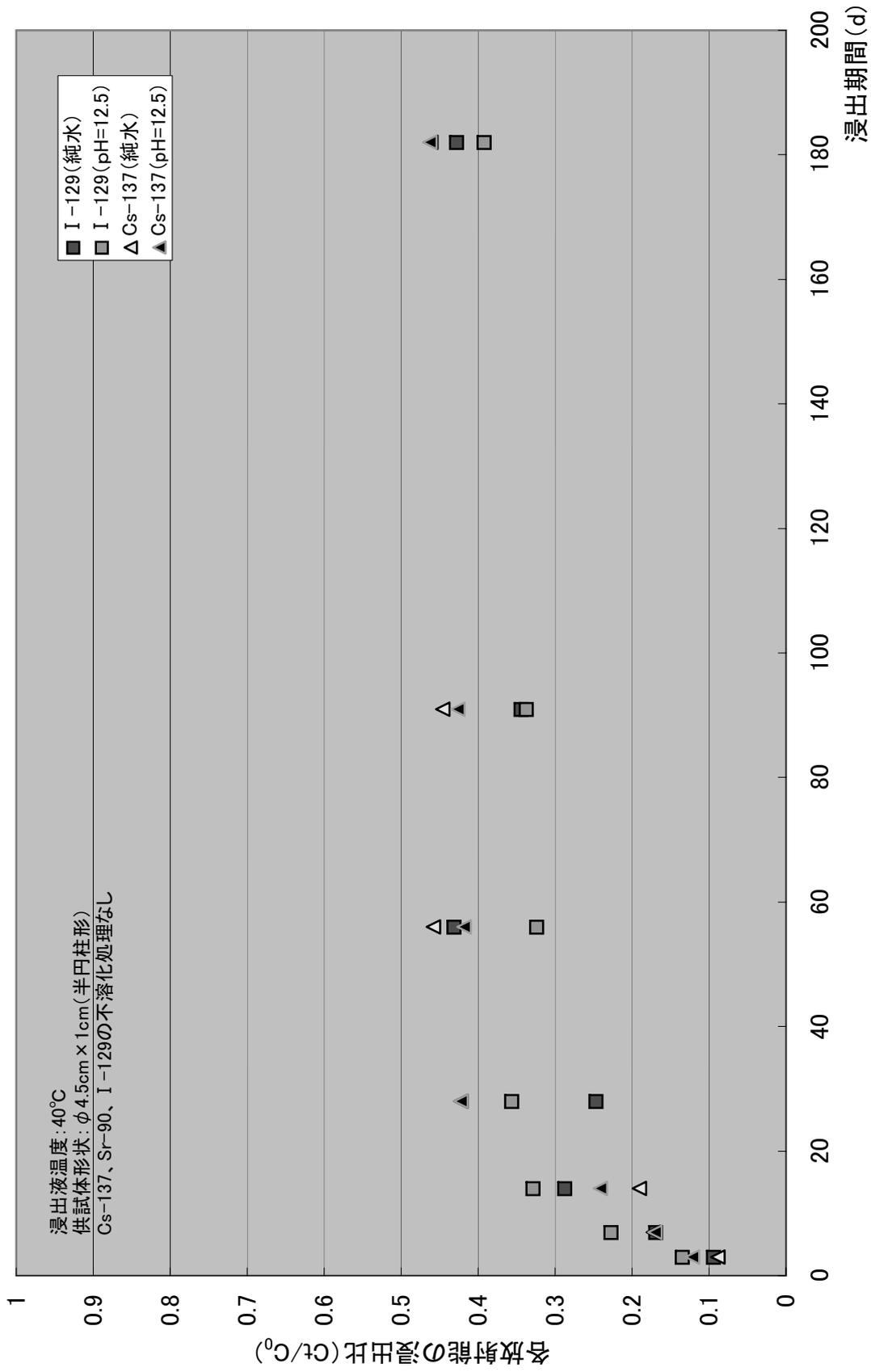


図3.6 アスファルト固化体(LA)の浸出試験2の試験結果(放射能)

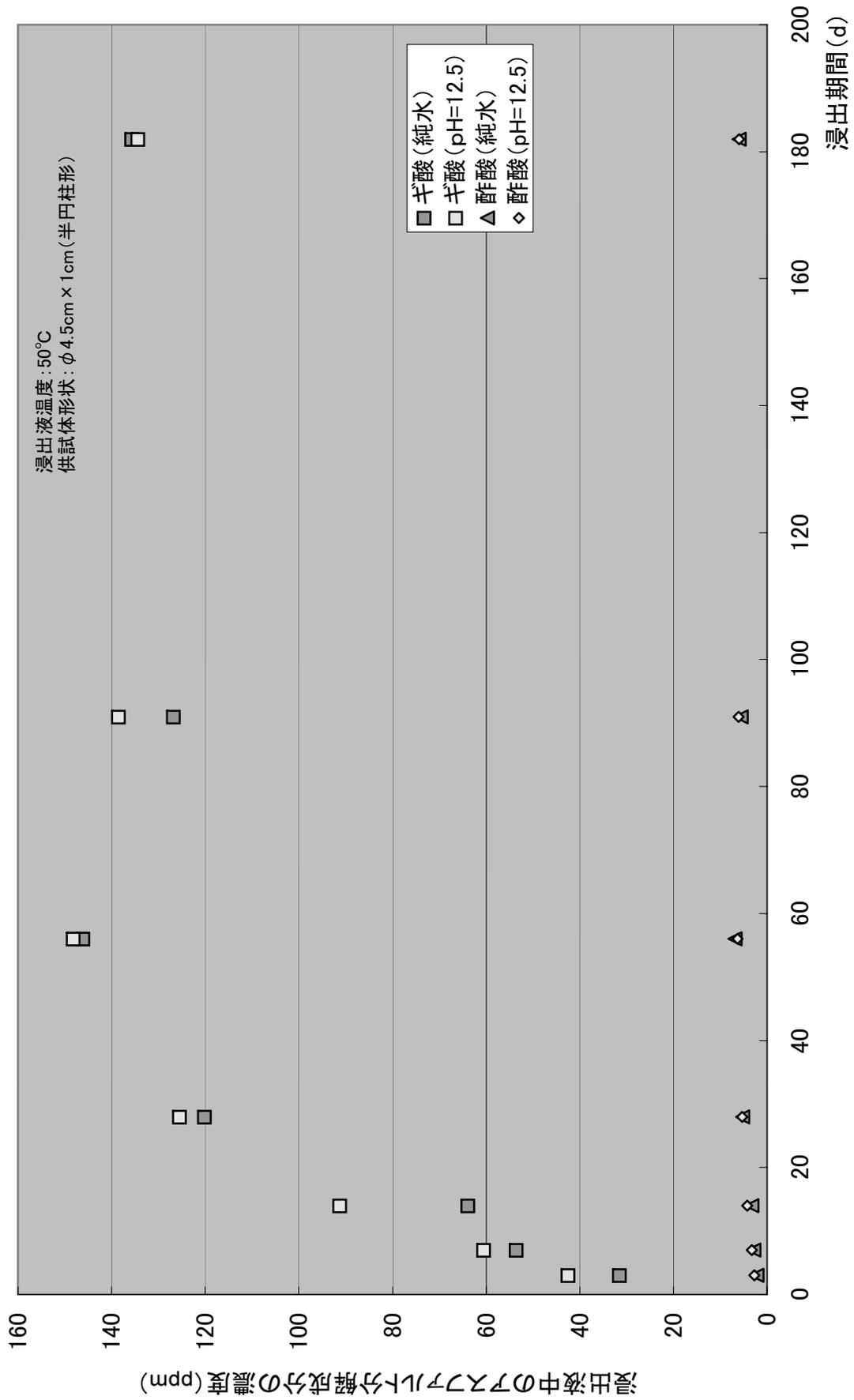


図3.7 アスファルト固化体(LA)の浸出試験2の試験結果(アスファルト分解成分)

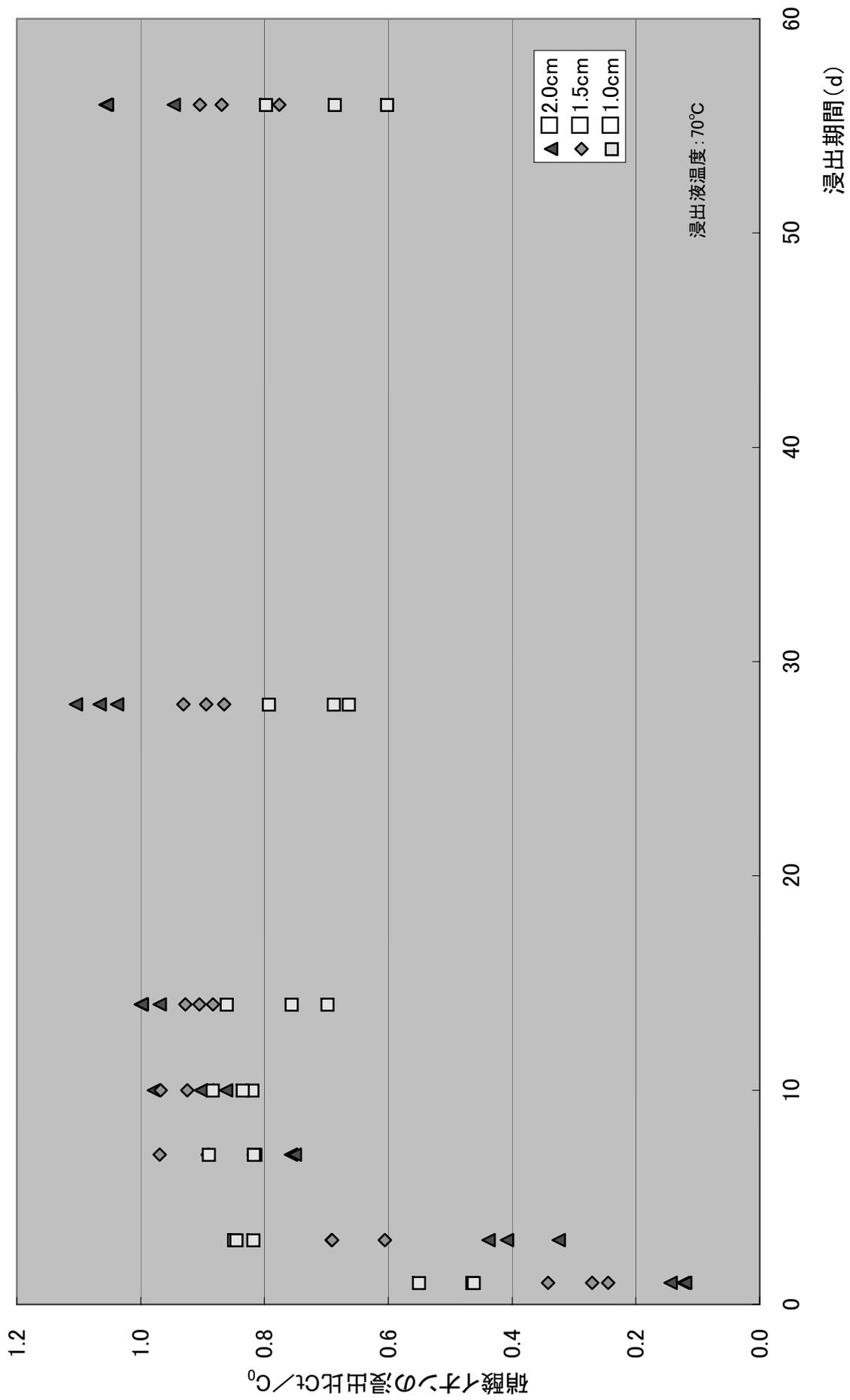
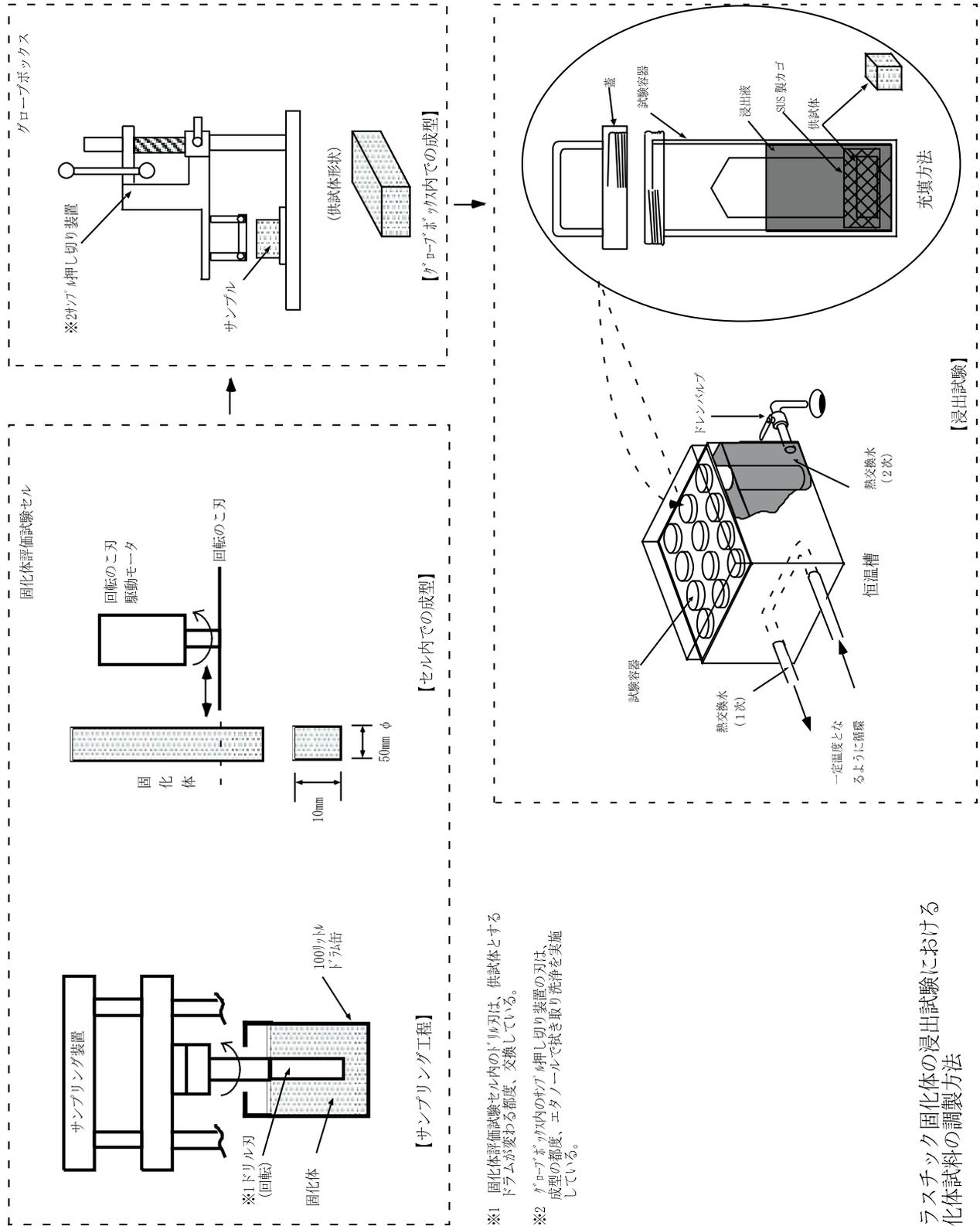


図3.8 アスファルト固化体(LA)の浸出試験3の試験結果



※1 固化体評価試験セル内のドリル刃は、供試体とするドラムが変わる都度、交換している。

※2 グローブボックス内のプラスタル押し切り装置の刃は、成型の都度、エタノールで拭き取り洗浄を実施している。

図4.1 プラスチック固化体の浸出試験における
固化体試料の調製方法

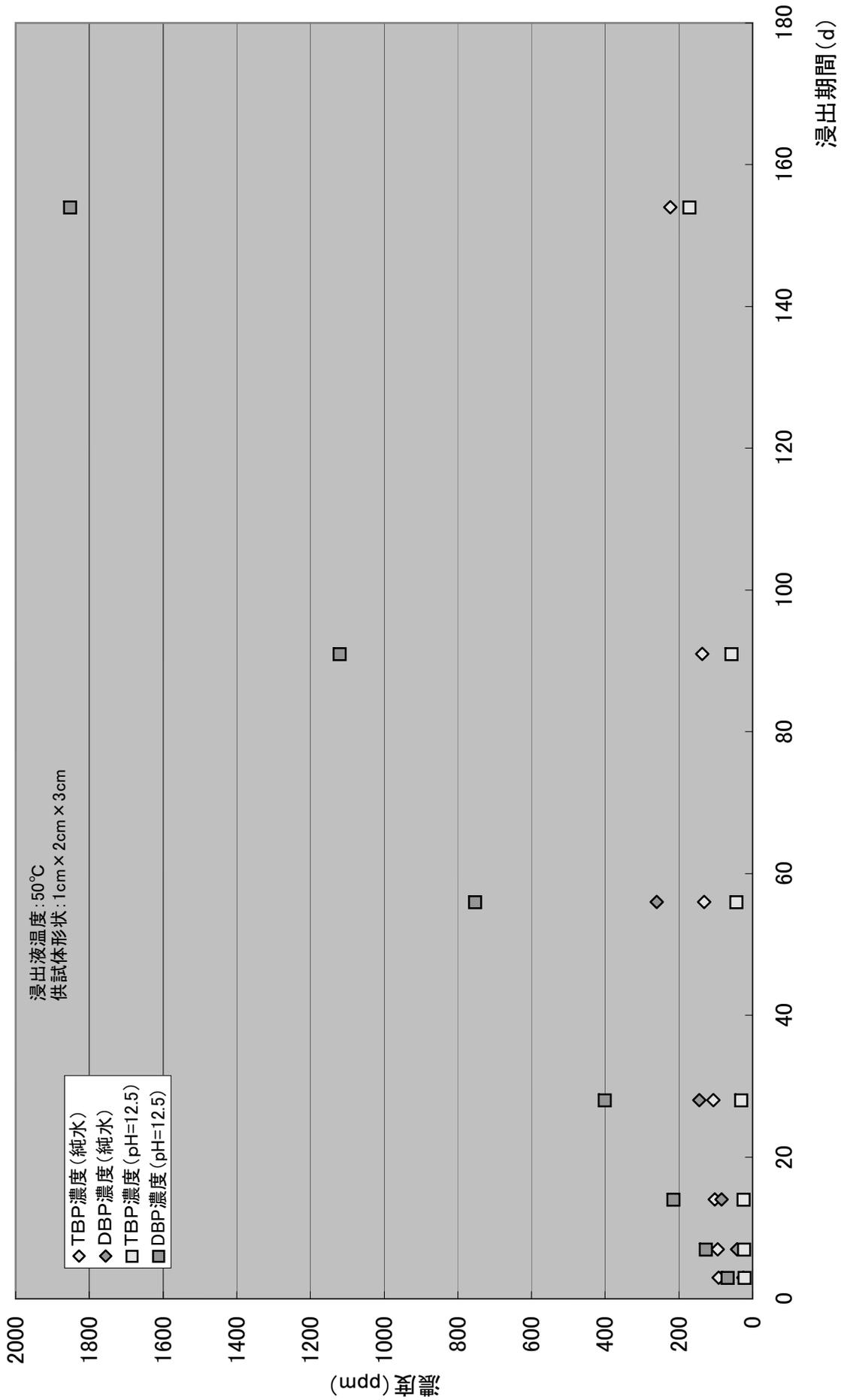


図4.2 プラスチック固化体の浸出試験の結果 (TBP/DBP)

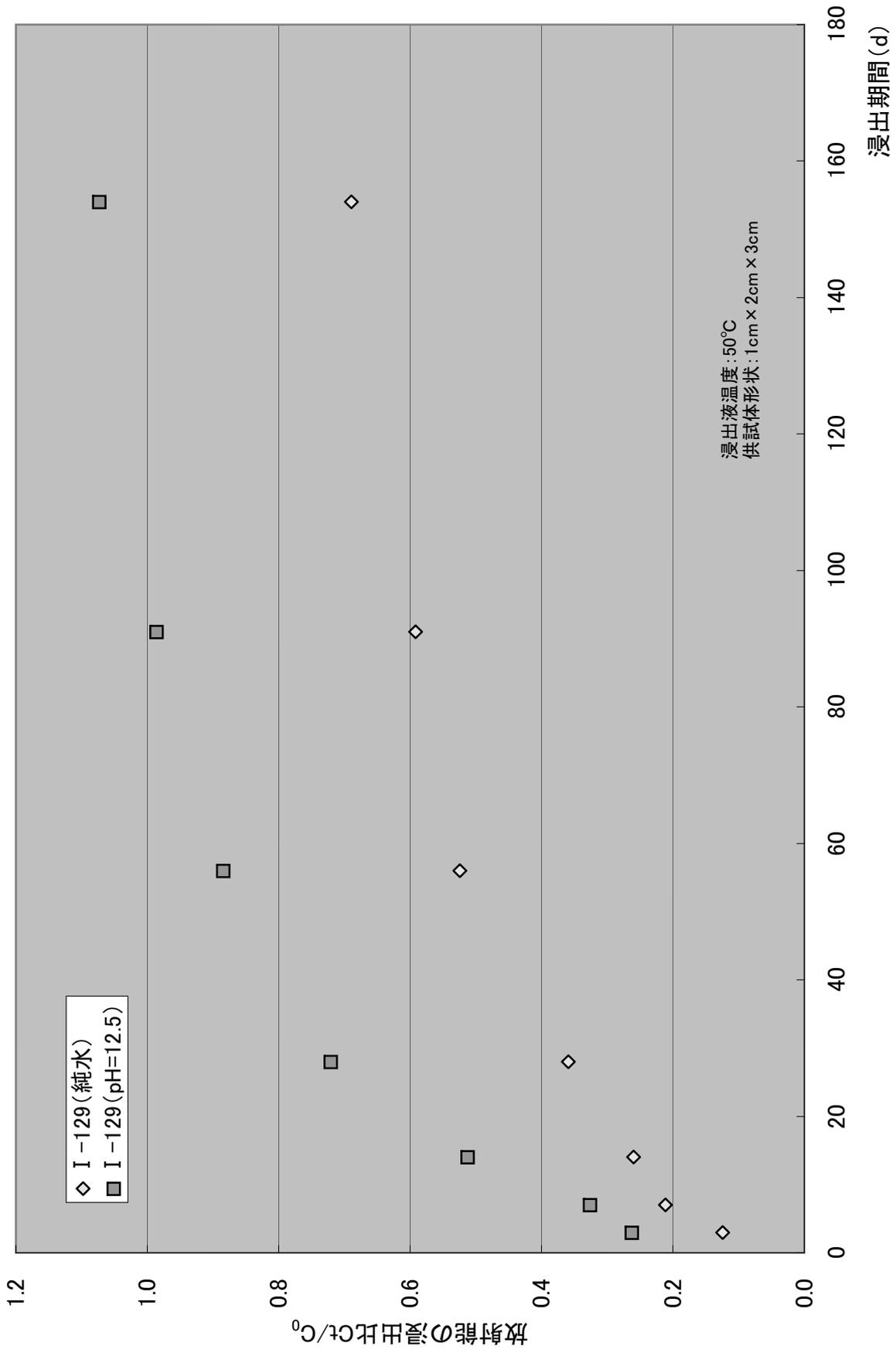


図4.3 プラスチック固化体の浸出試験の試験結果(放射能)

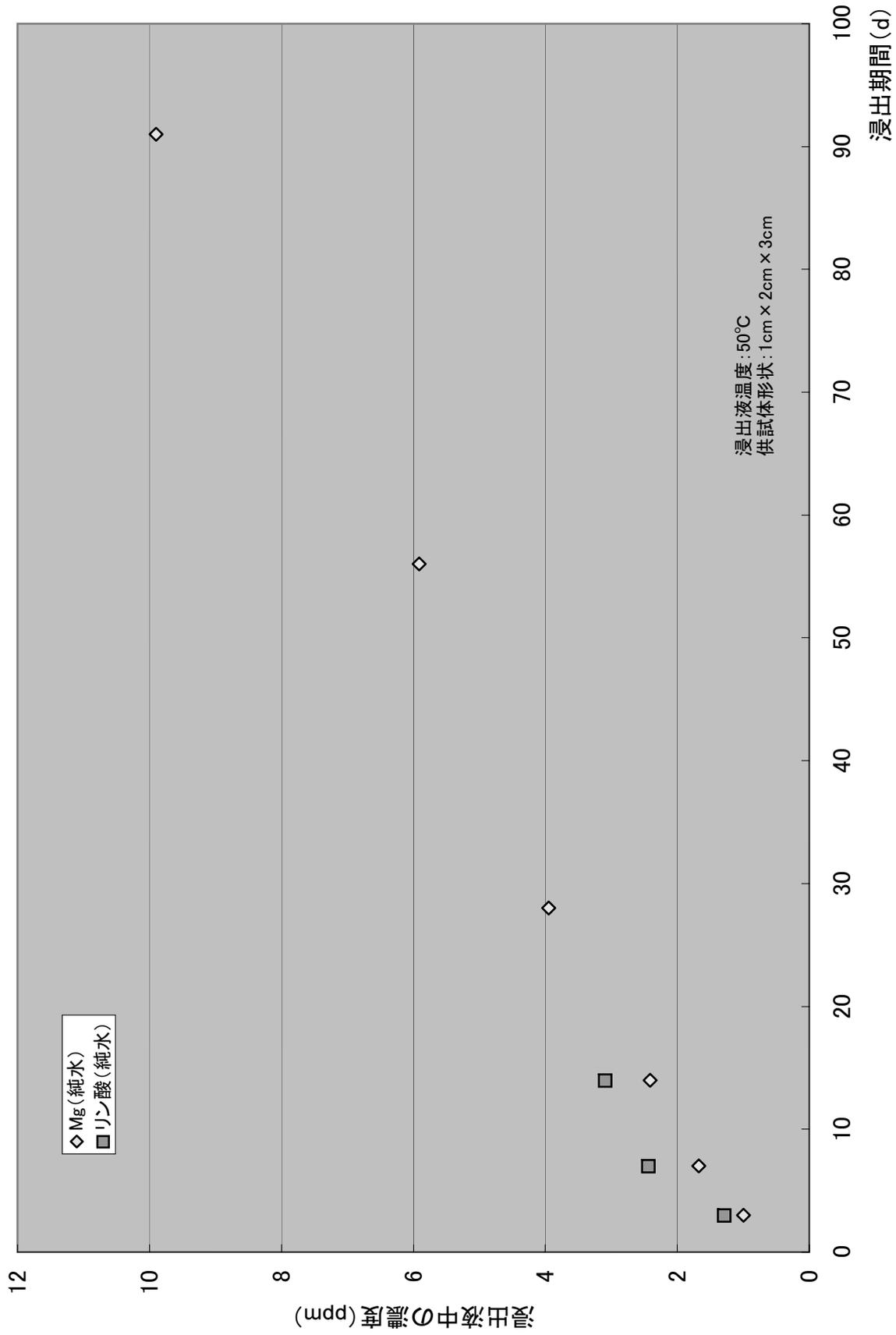


図4.4 プラスチック固化体の浸出試験の試験結果(その他)

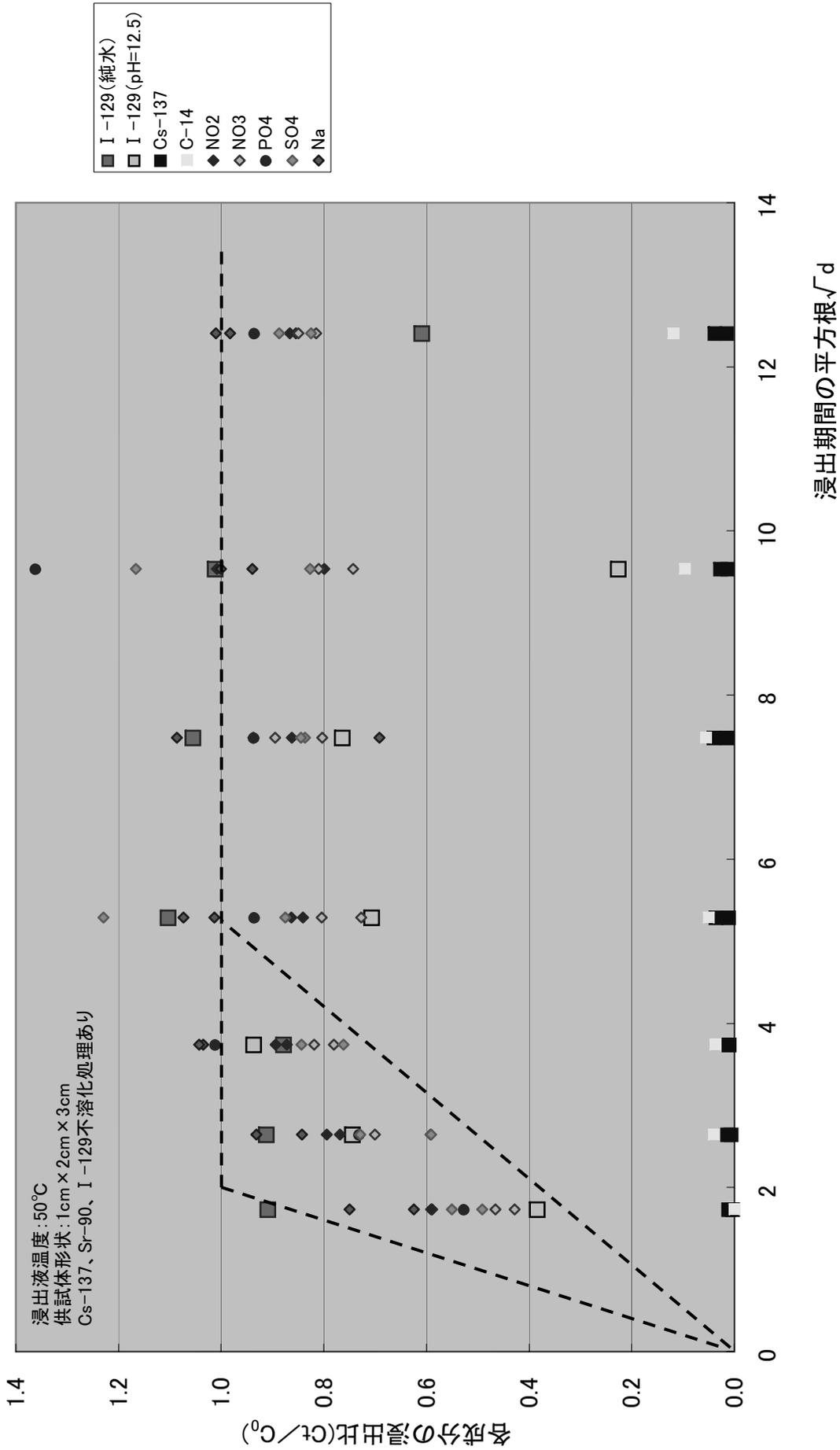


図5.1 アスファルト固化体(MA)の浸出試験1における拡散依存性の評価

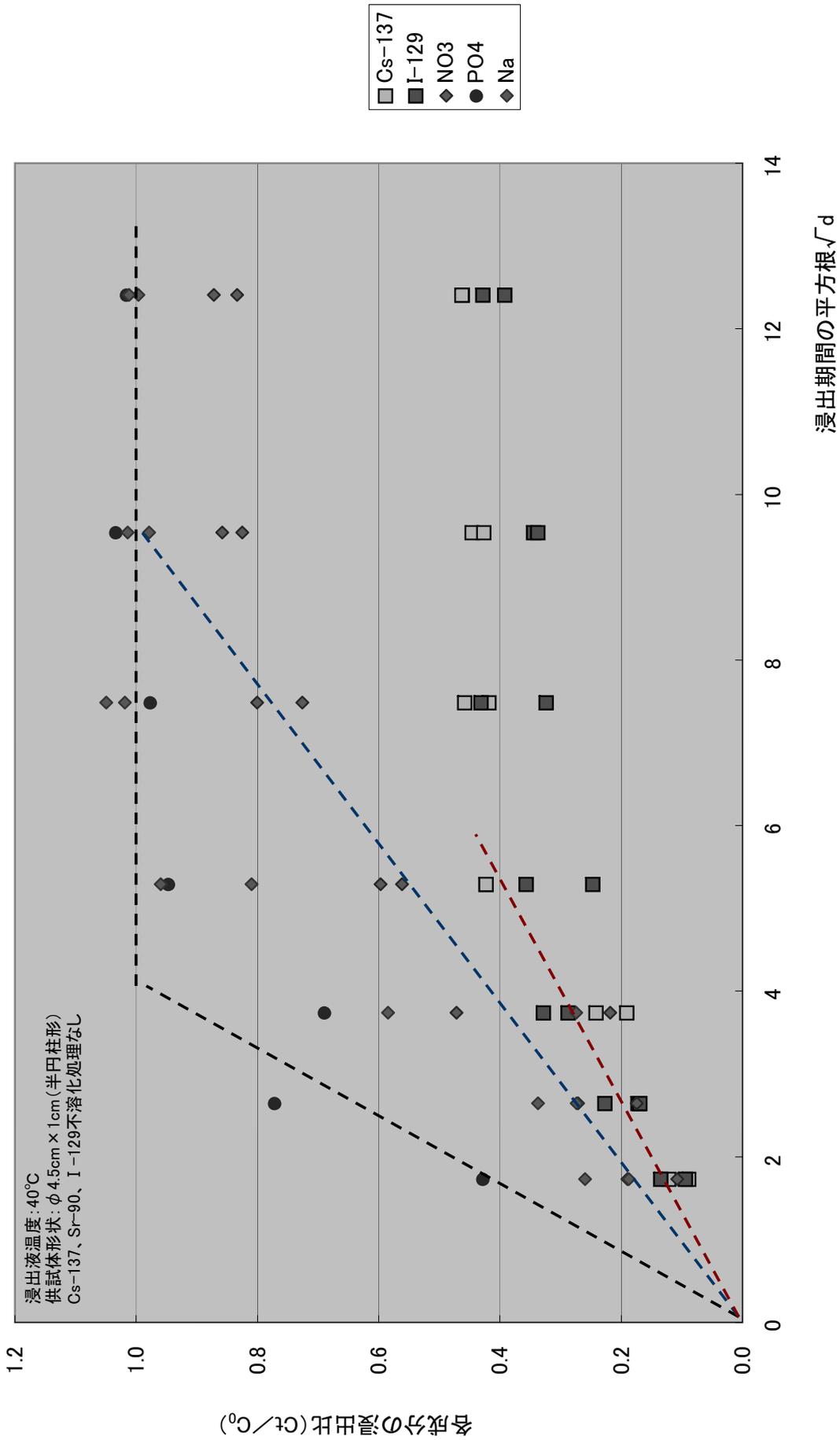


図5.2 アスファルト固化体(LA)の浸出試験2における拡散依存性の評価

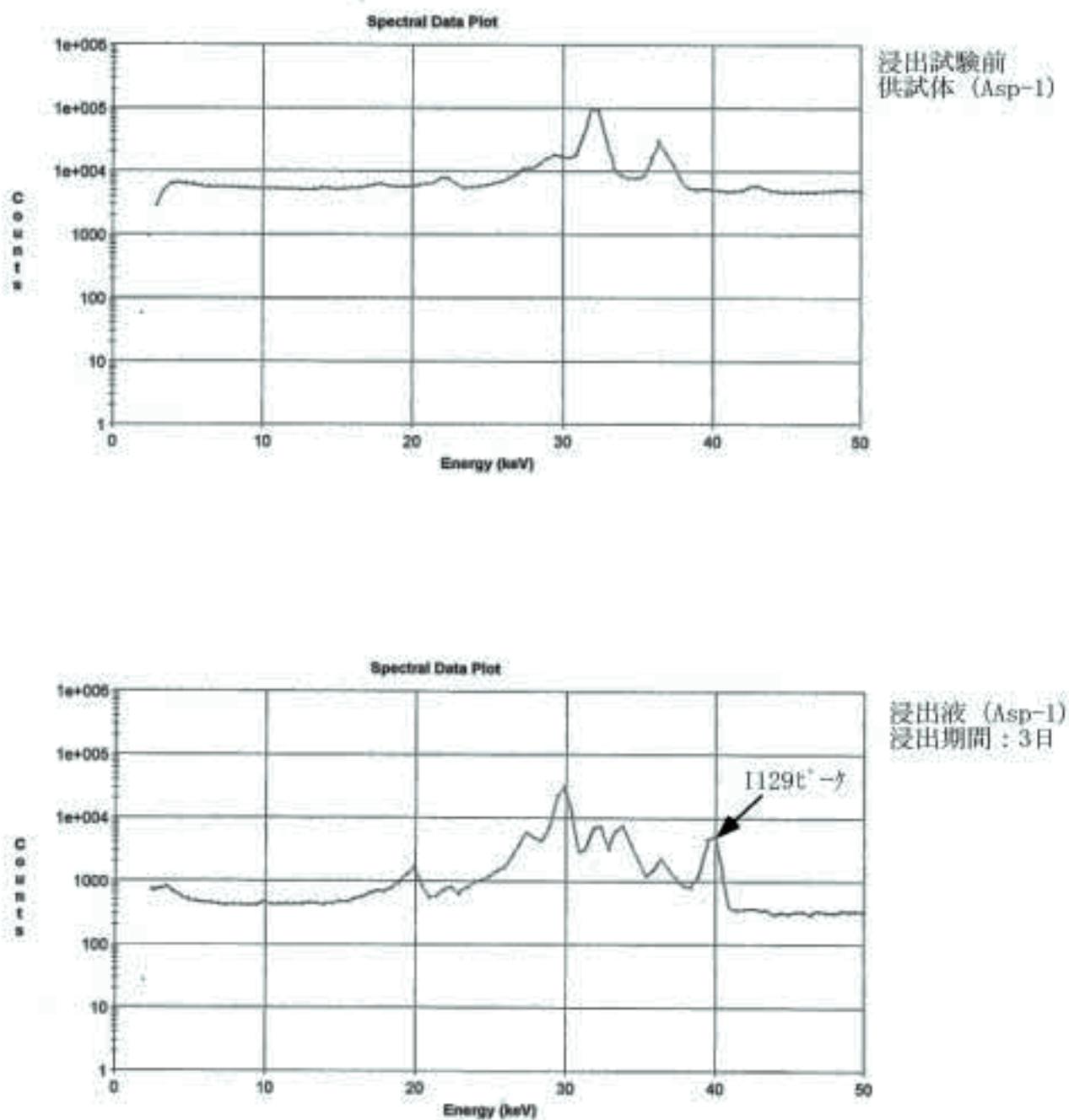


図5.3(1) アスファルト固化体の浸出試験1におけるγスペクトルデータ

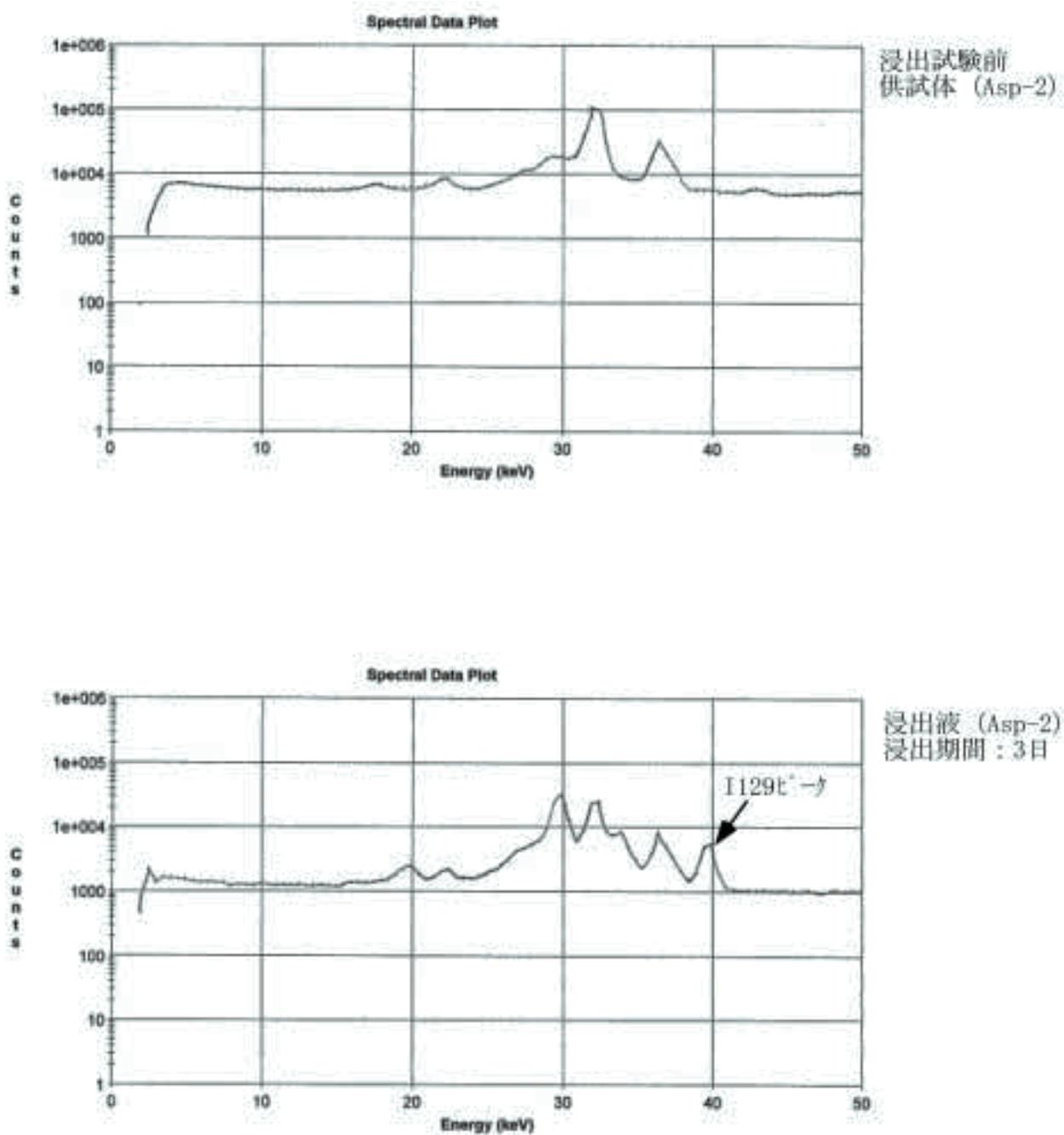


図5.3(2) アスファルト固化体の浸出試験1におけるγスペクトルデータ

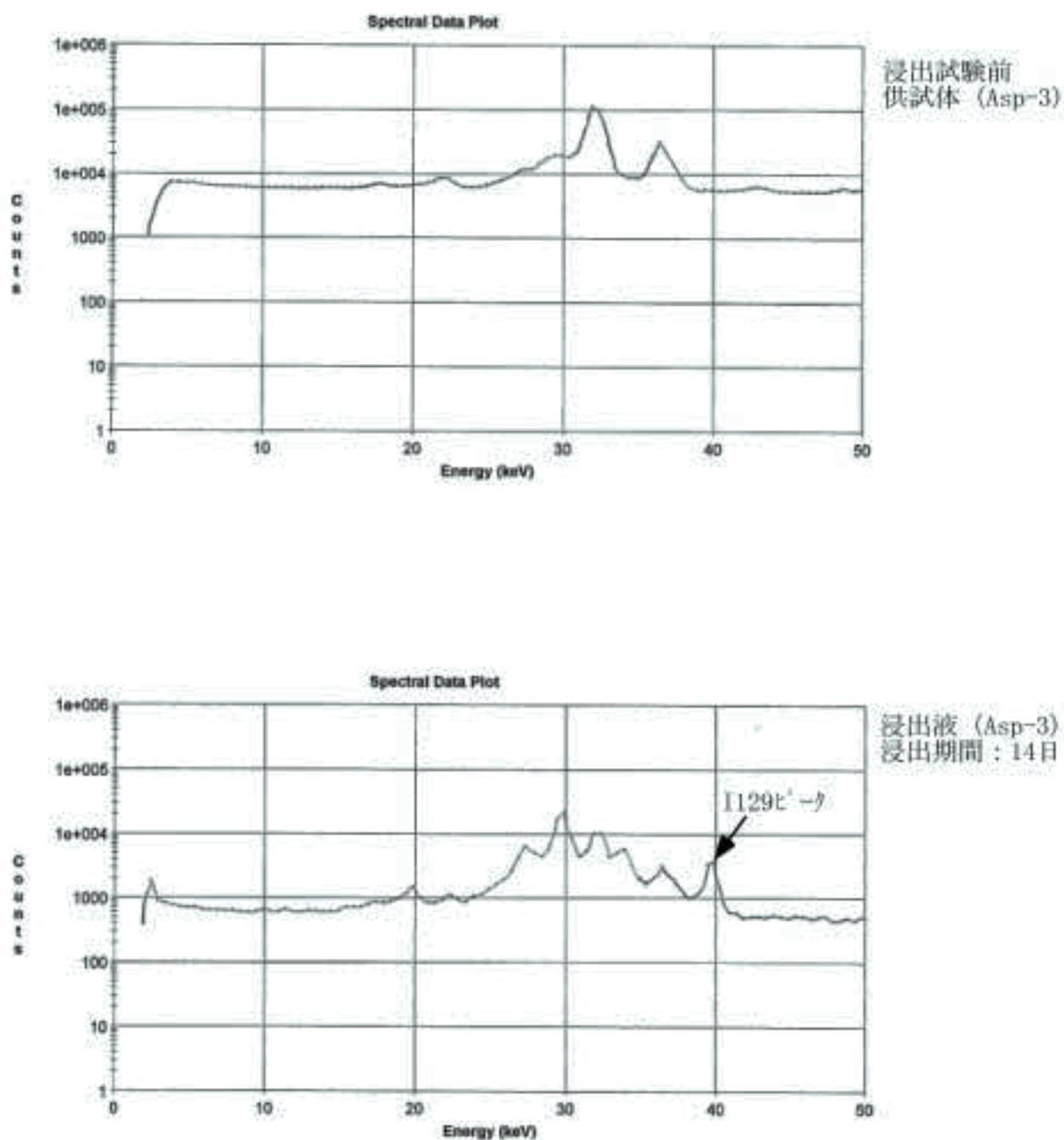


図5.3(3) アスファルト固化体の浸出試験1におけるγスペクトルデータ

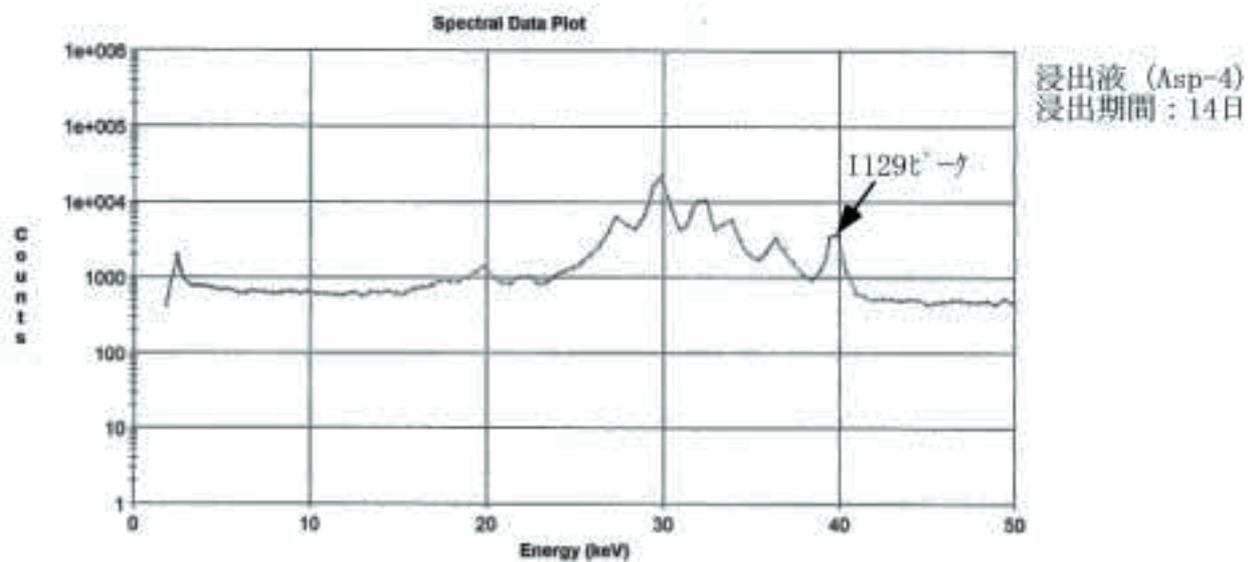
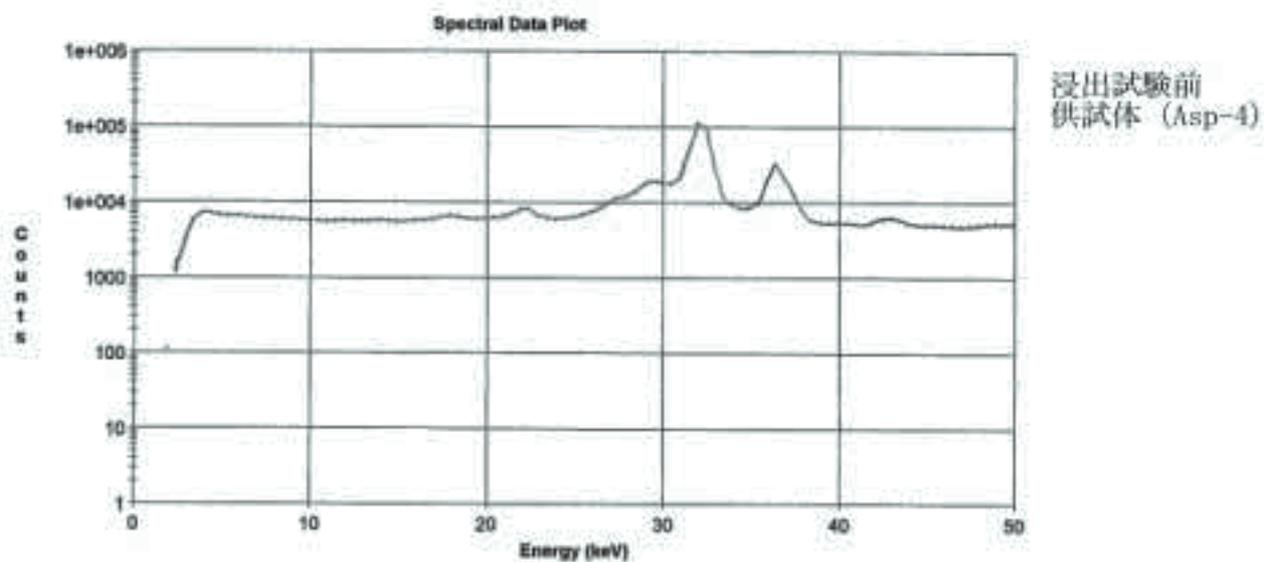


図5.3(4) アスファルト固化体の浸出試験1における γ スペクトルデータ

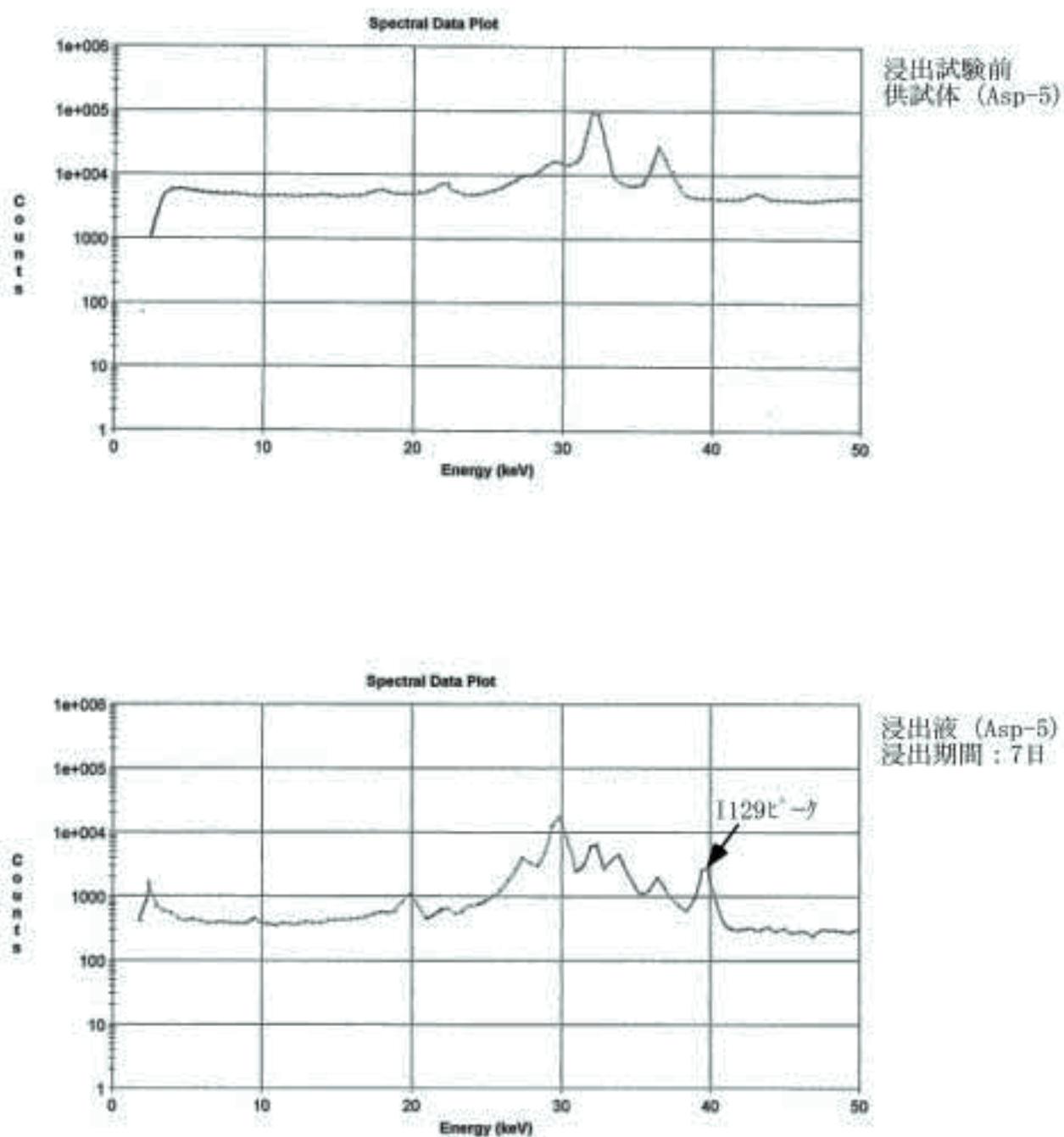


図5.3(5) アスファルト固化体の浸出試験1におけるγスペクトルデータ

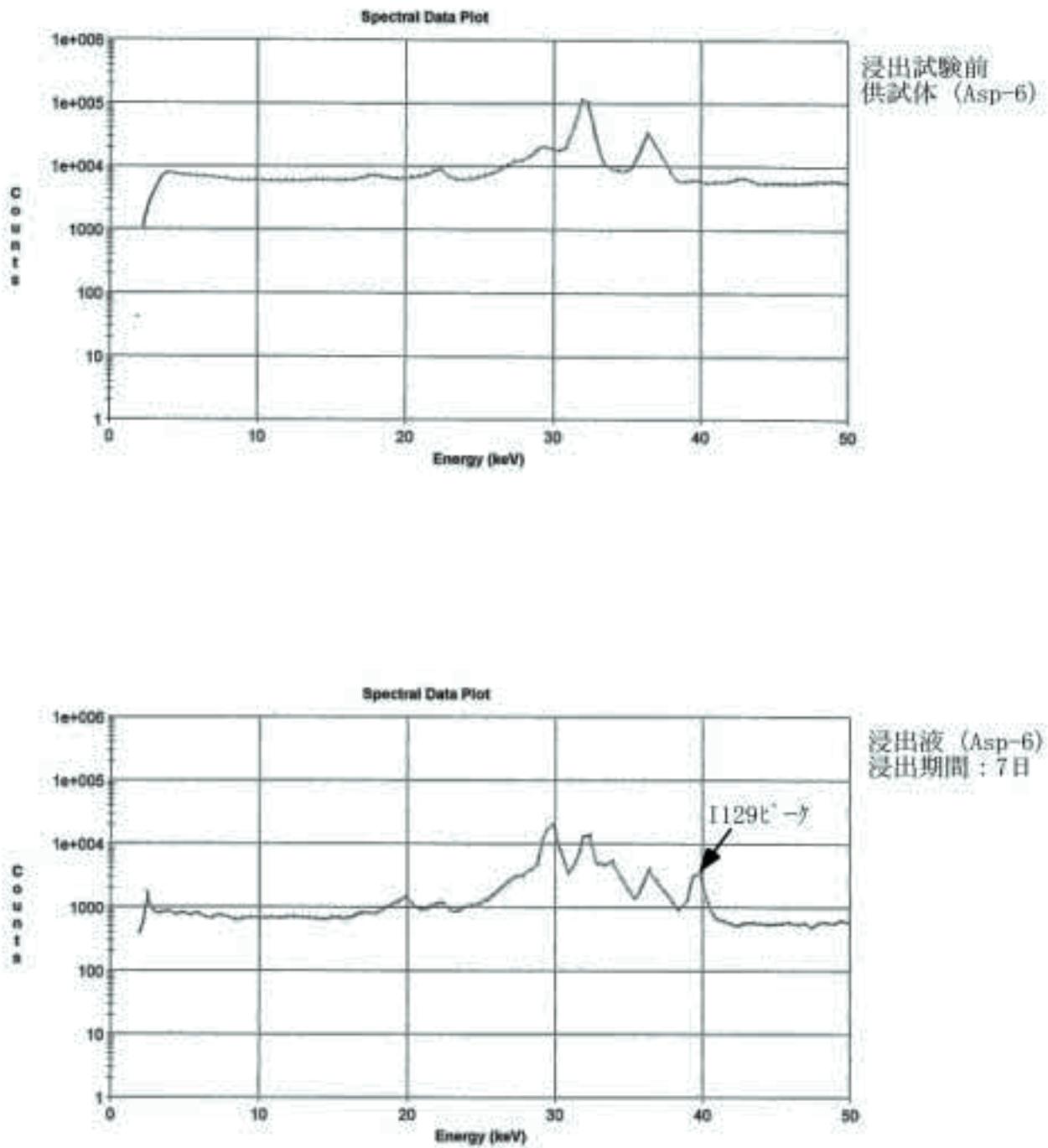


図5.3(6) アスファルト固化体の浸出試験1における γ スペクトルデータ

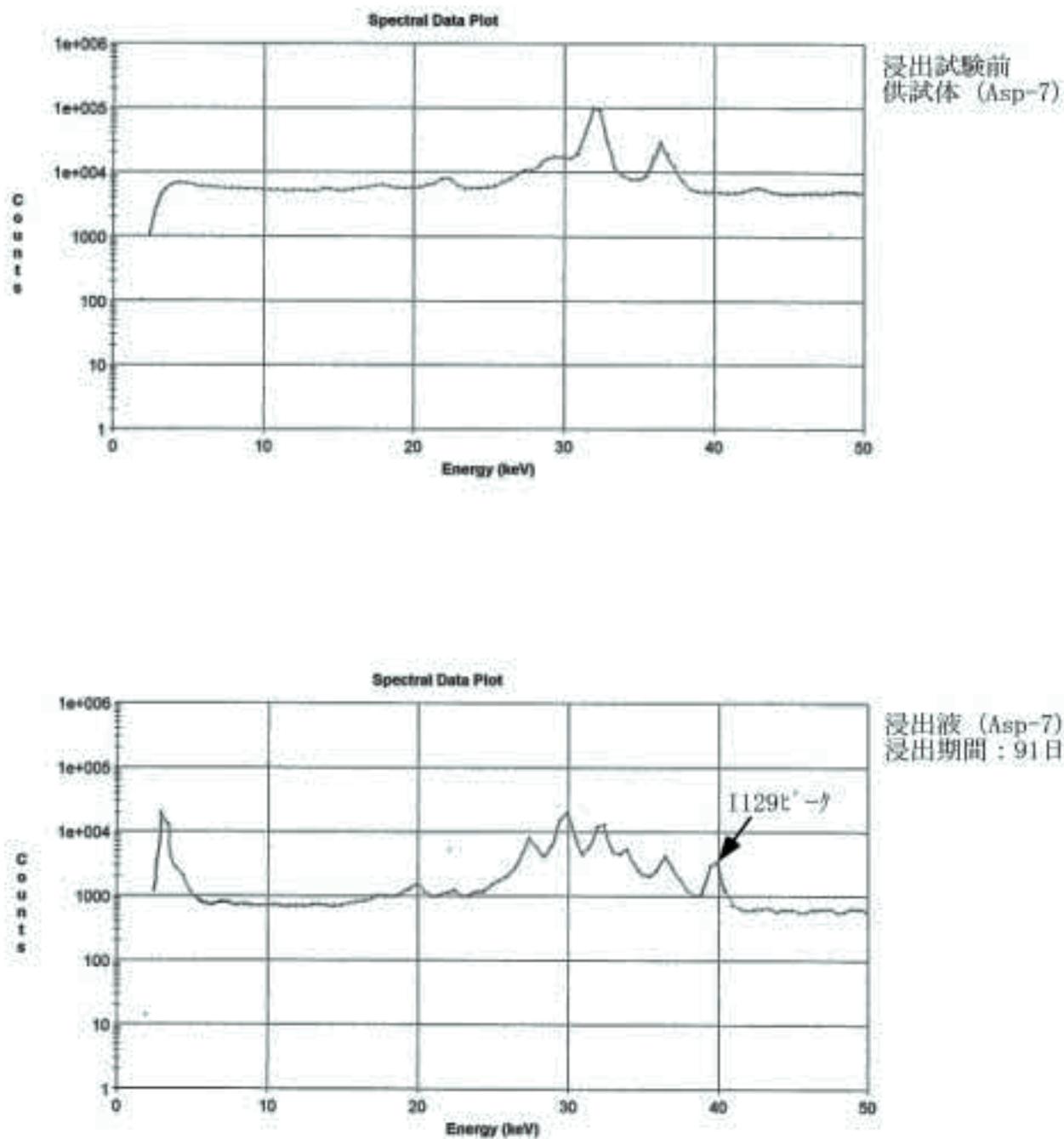


図5.3(7) アスファルト固化体の浸出試験1におけるγスペクトルデータ

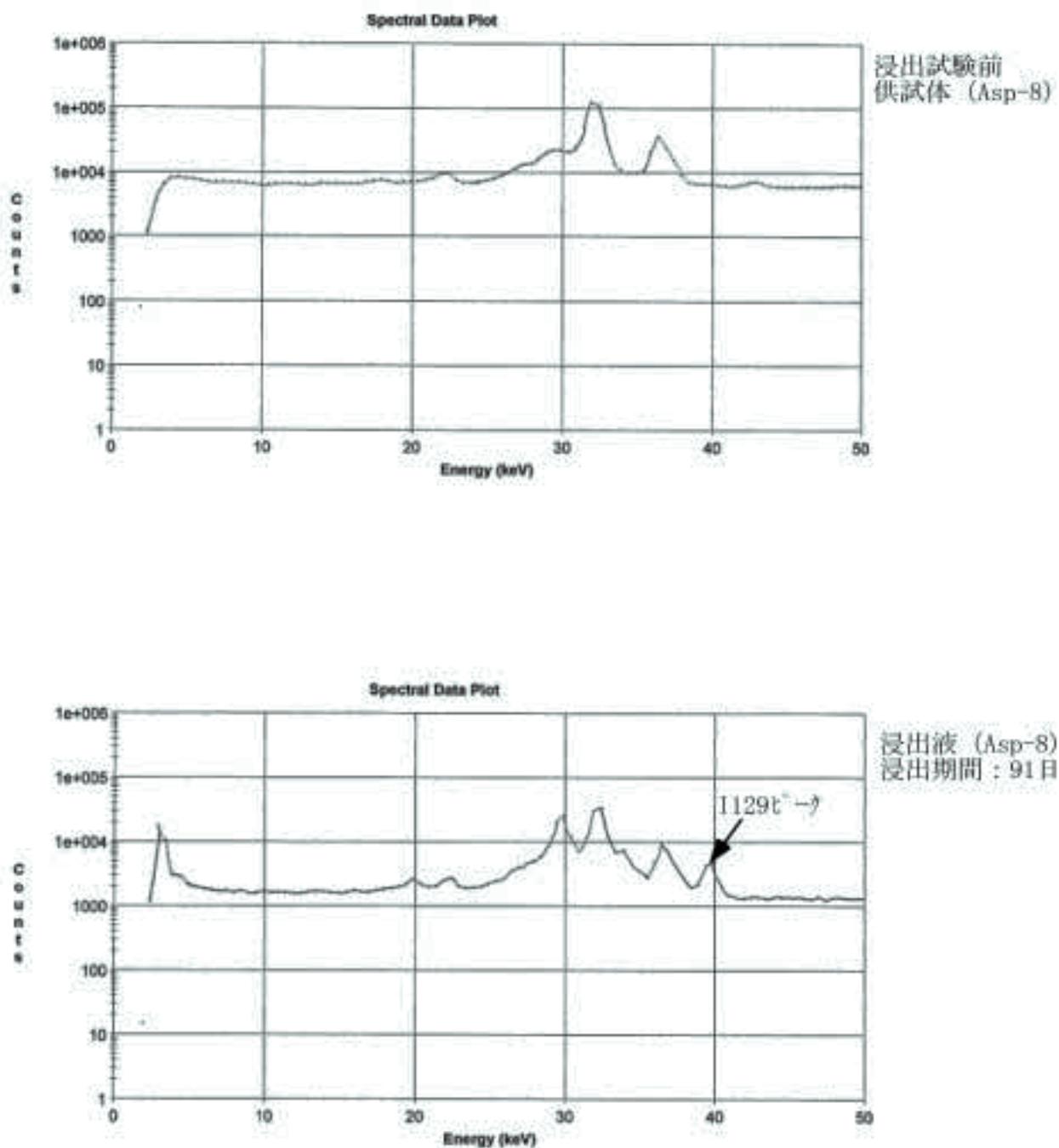


図5.3(8) アスファルト固化体の浸出試験1におけるγスペクトルデータ

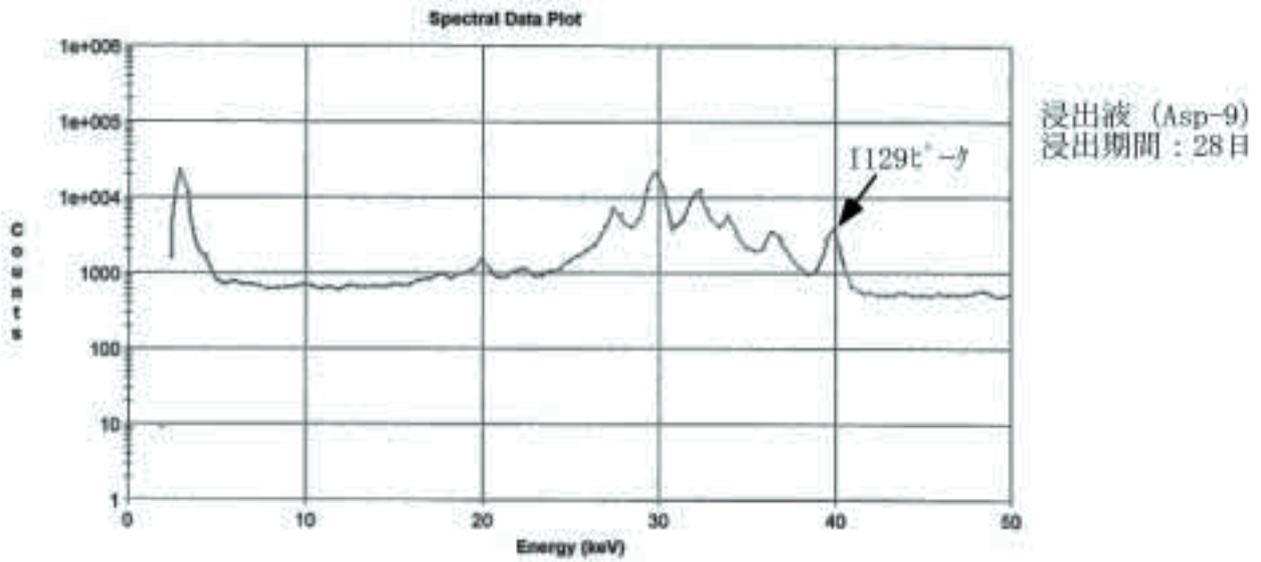
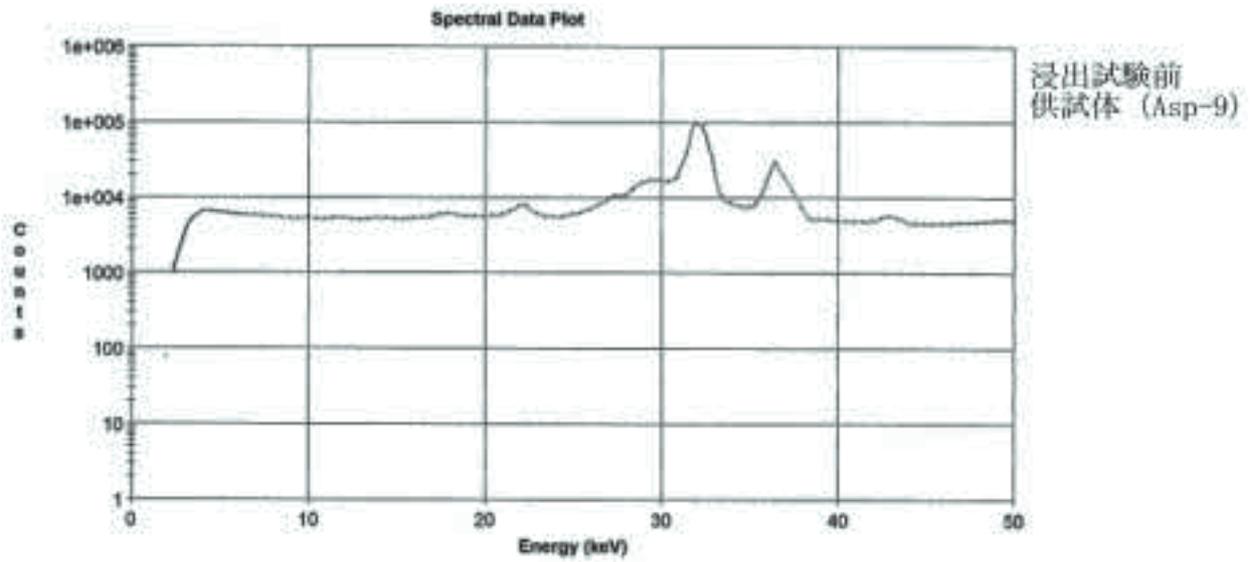


図5.3(9) アスファルト固化体の浸出試験1におけるγスペクトルデータ

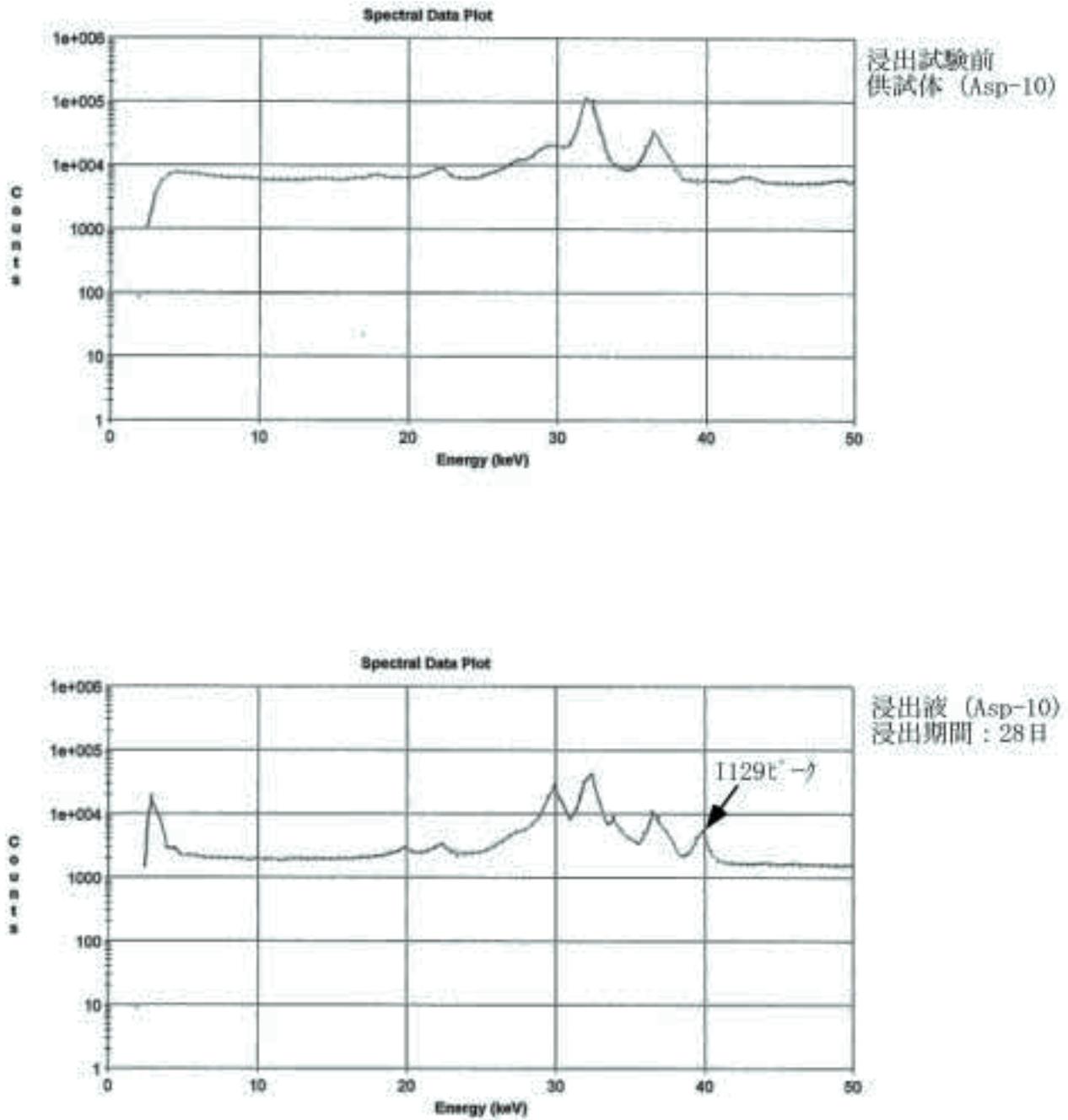


図5.3(10) アスファルト固化体の浸出試験1におけるγスペクトルデータ

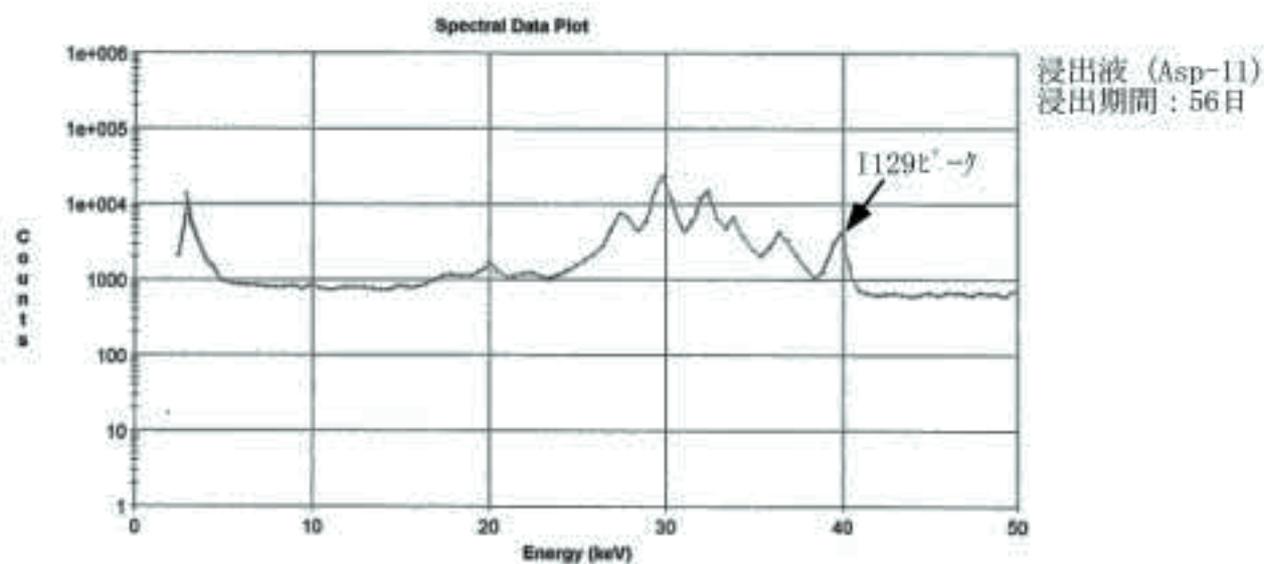
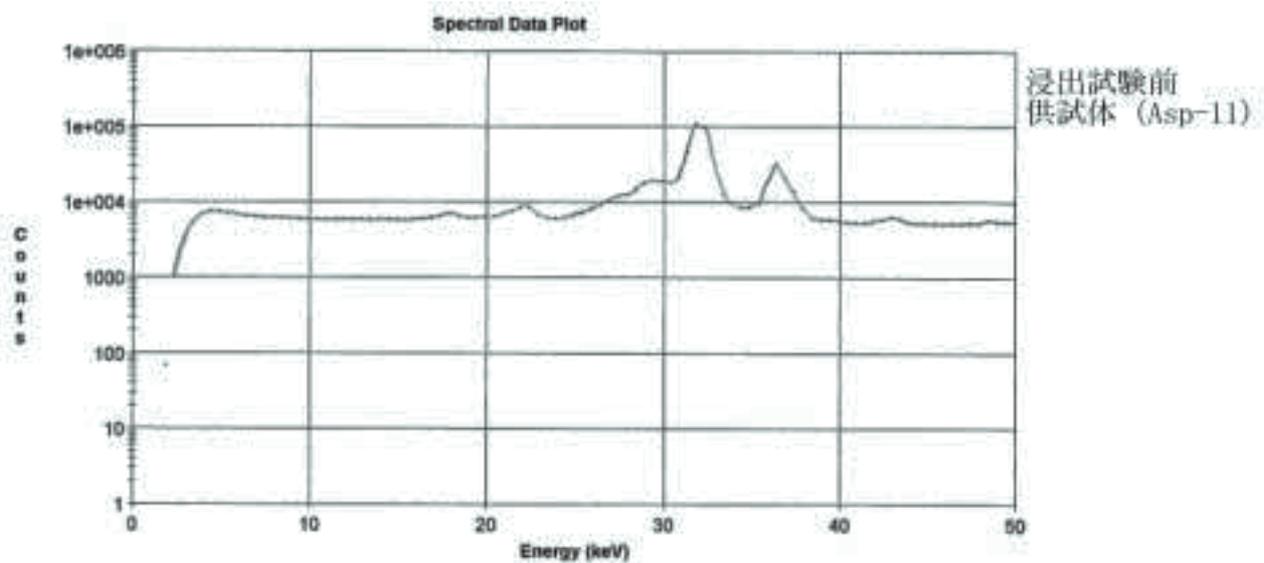


図5.3(11) アスファルト固化体の浸漬試験1におけるγスペクトルデータ

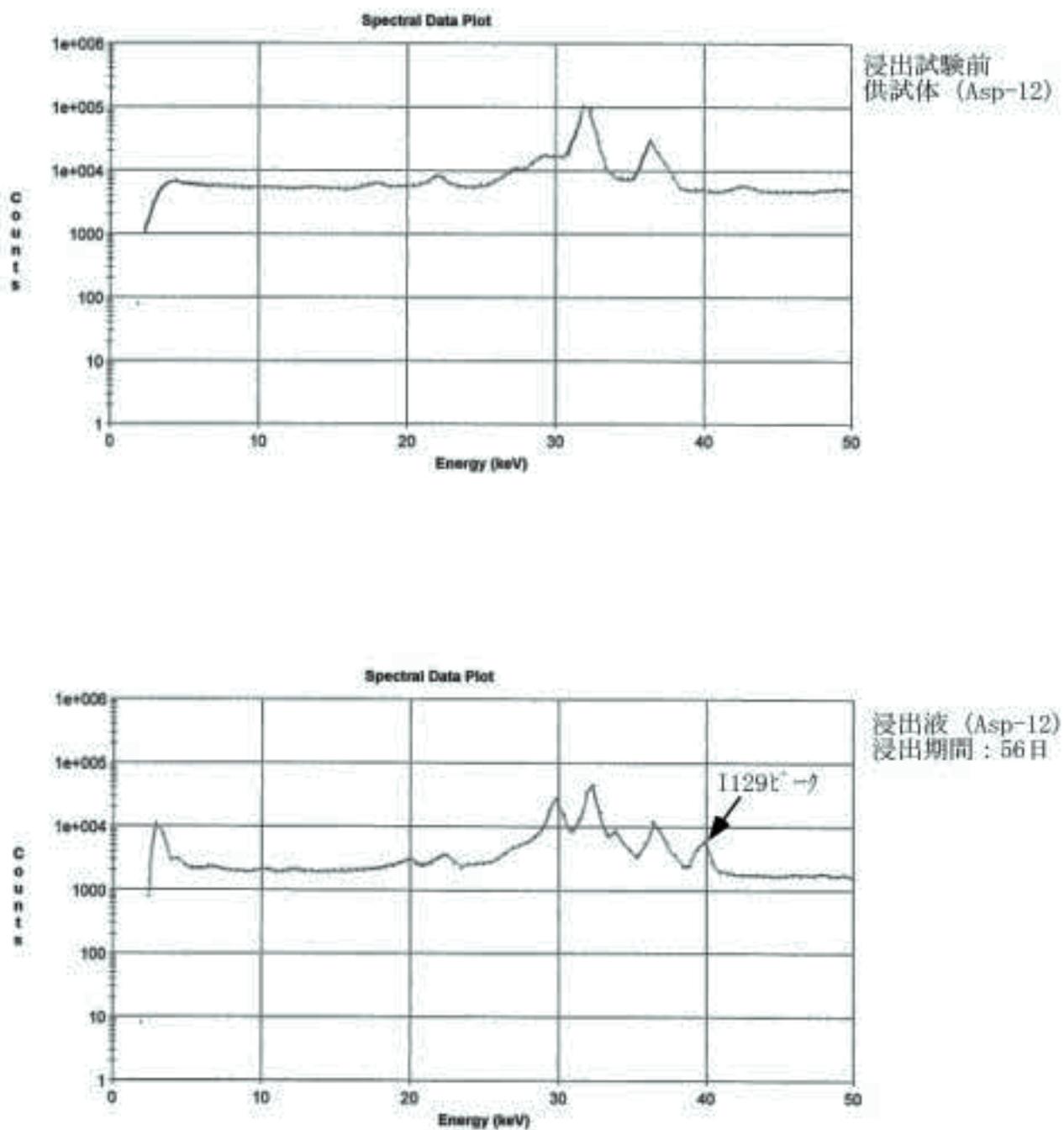


図5.3(12) アスファルト固化体の浸出試験1におけるγスペクトルデータ

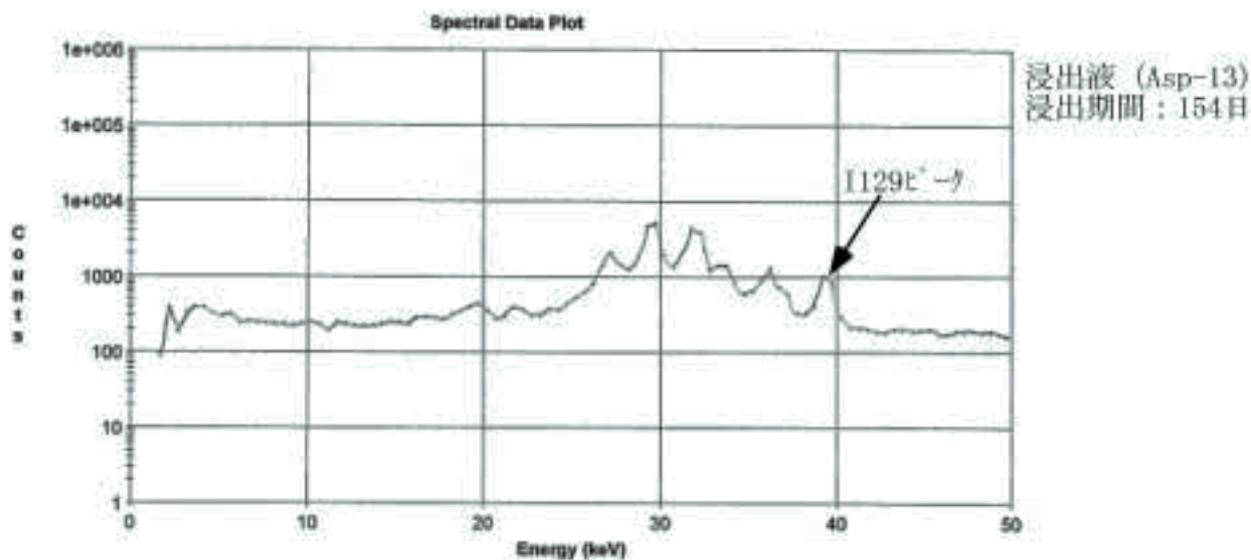
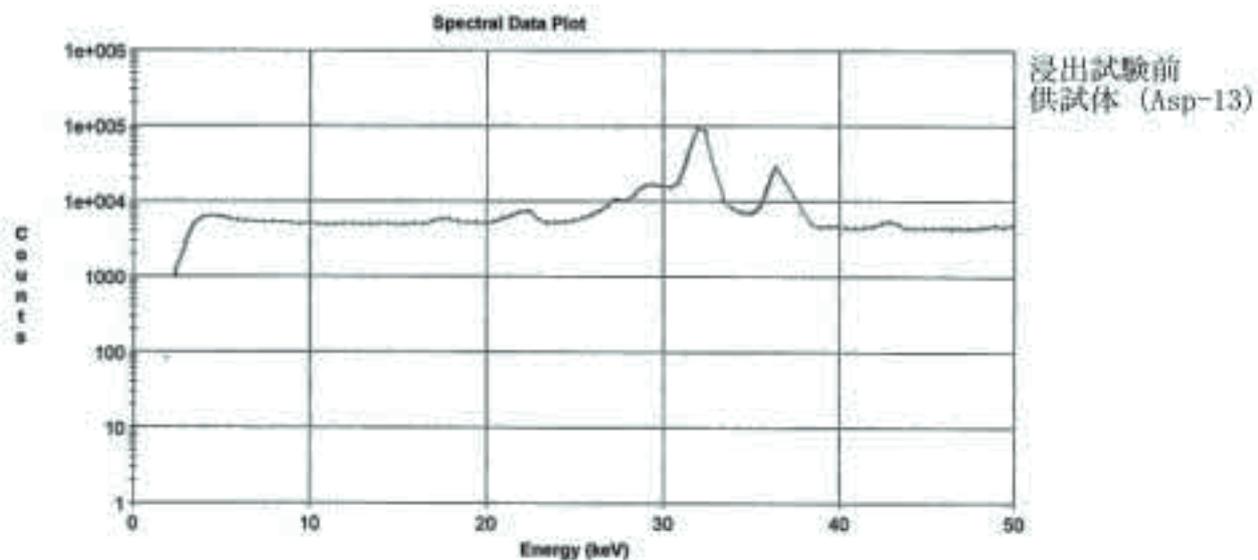


図5.3(13) アスファルト固化体の浸出試験Iにおけるγスペクトルデータ

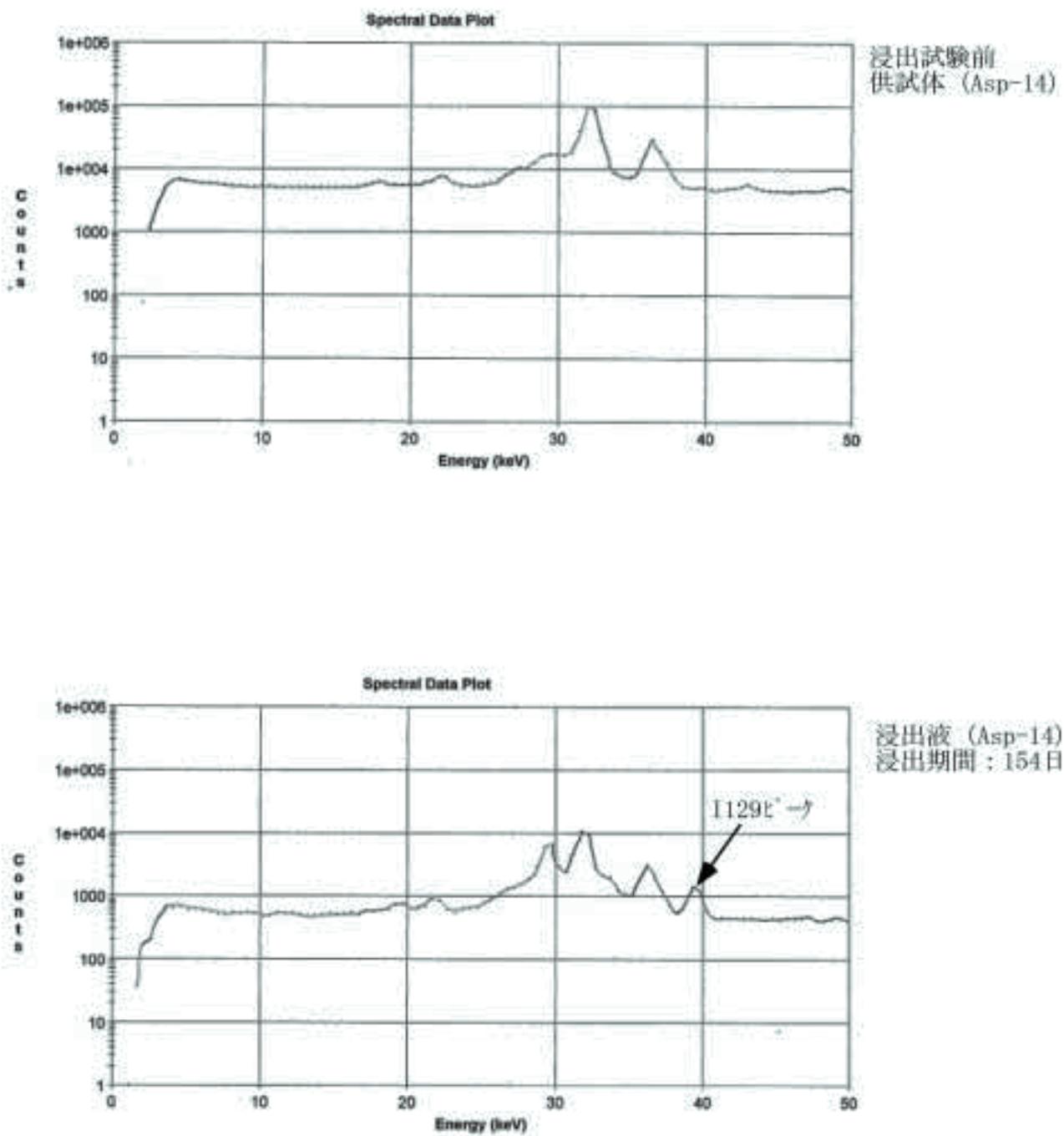


図5.3(14) アスファルト固化体の浸出試験1におけるγスペクトルデータ

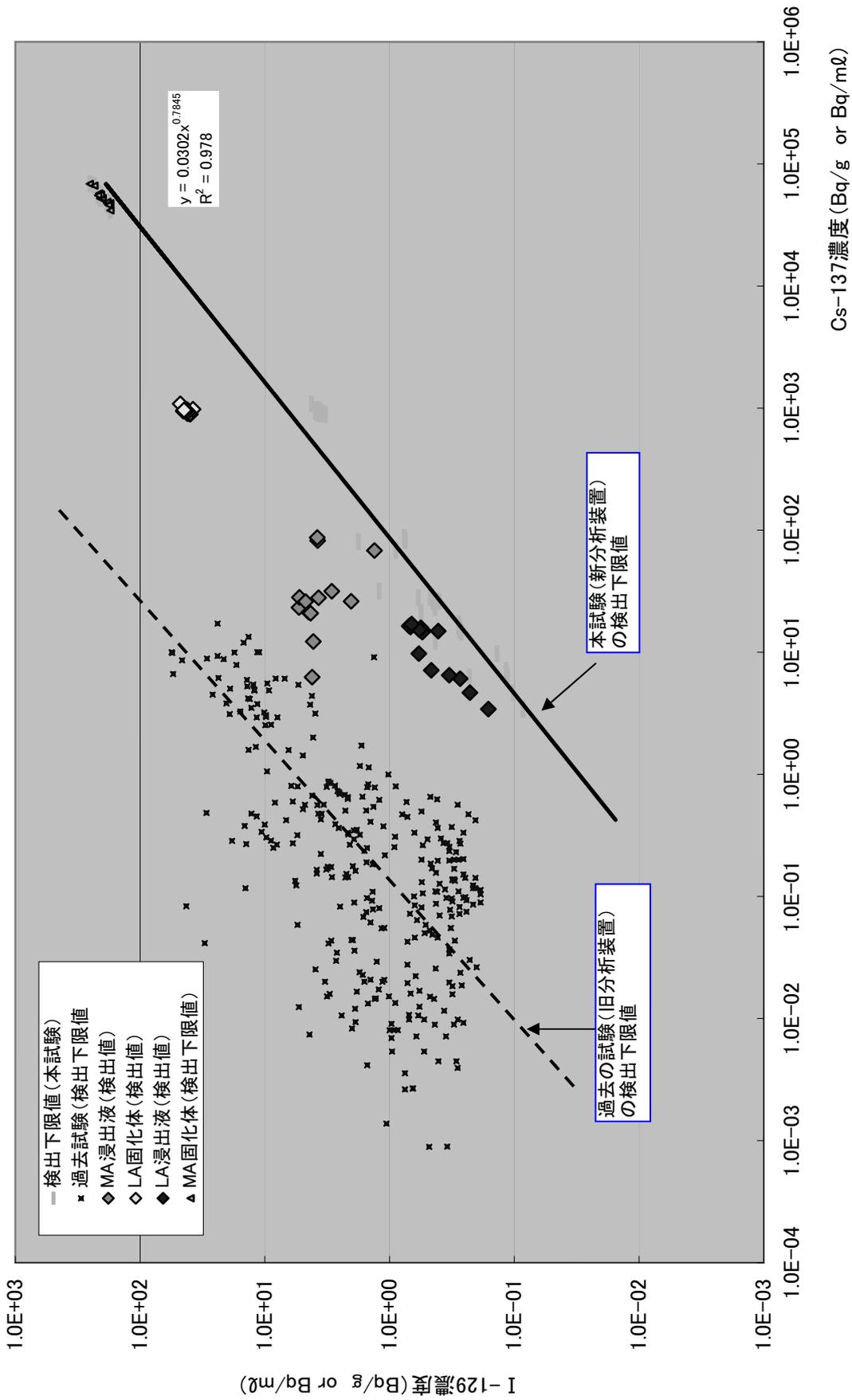


図5.4 I-129検出下限値とCs-137濃度の関係

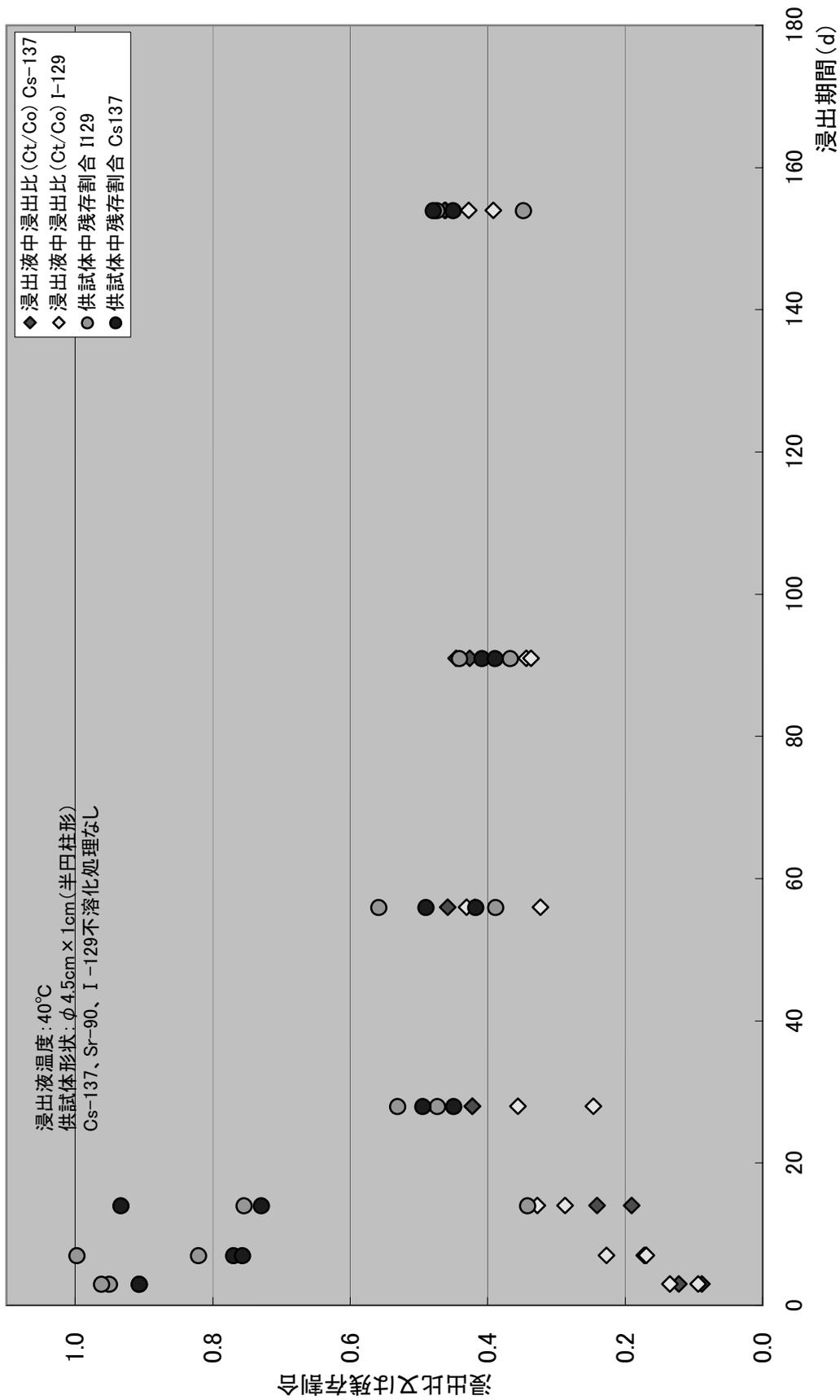


図5.5 アスファルト固化体(LA)の浸出試験2における I-129及びCs-137の挙動

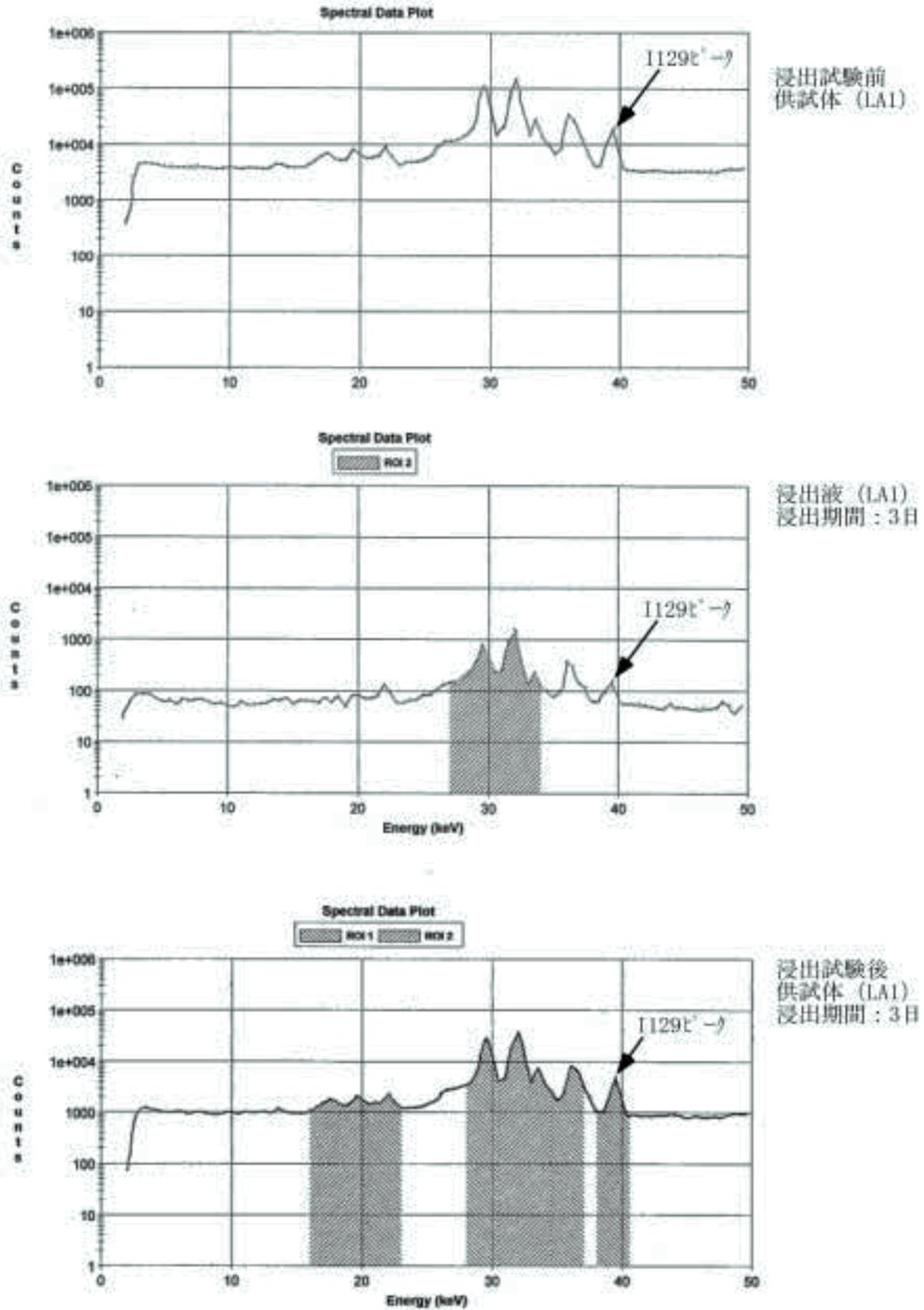


図5.6(1) アスファルト固化体の浸出試験2における γ スペクトルデータ

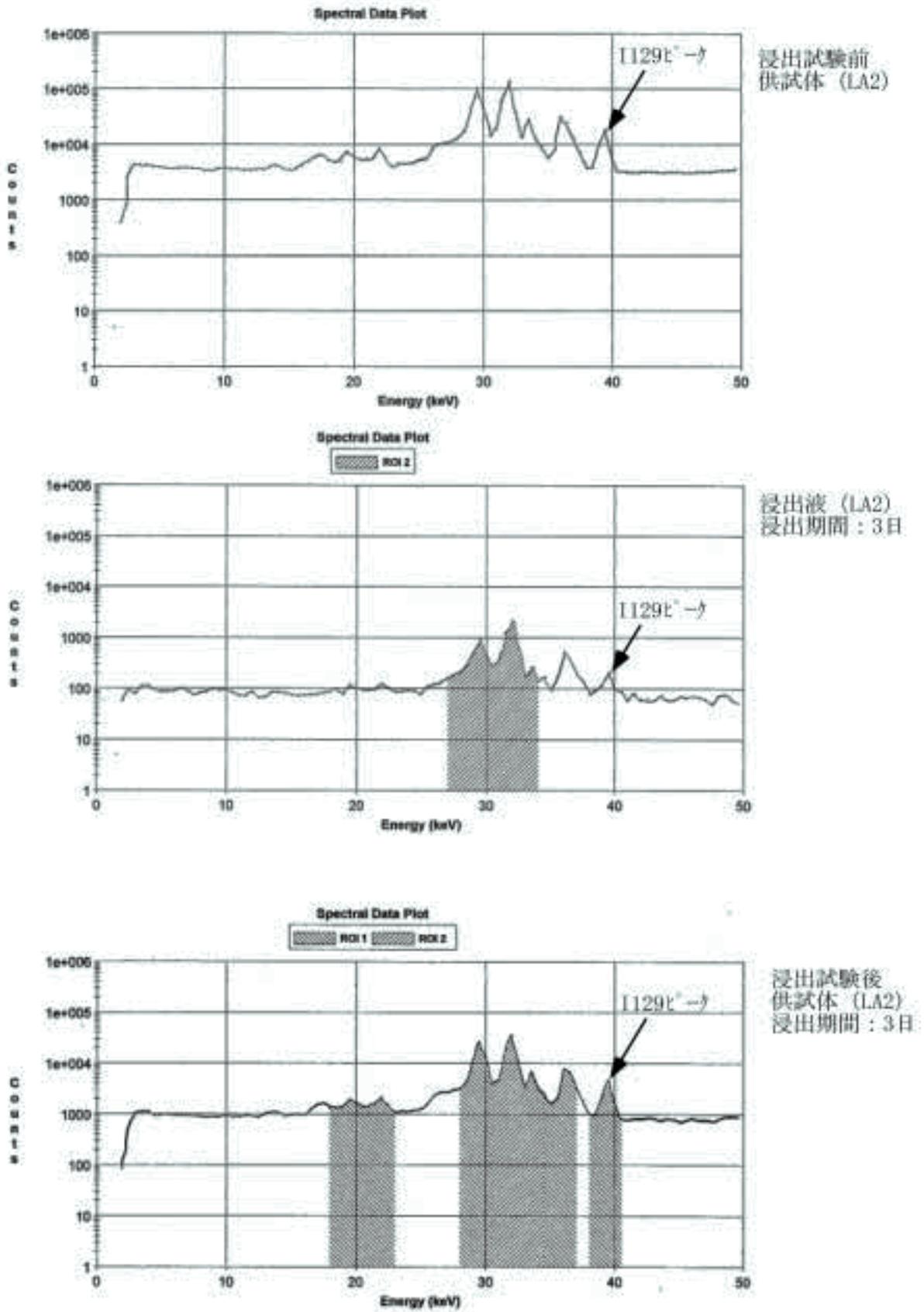


図5.6(2) アスファルト固化体の浸出試験2におけるγスペクトルデータ

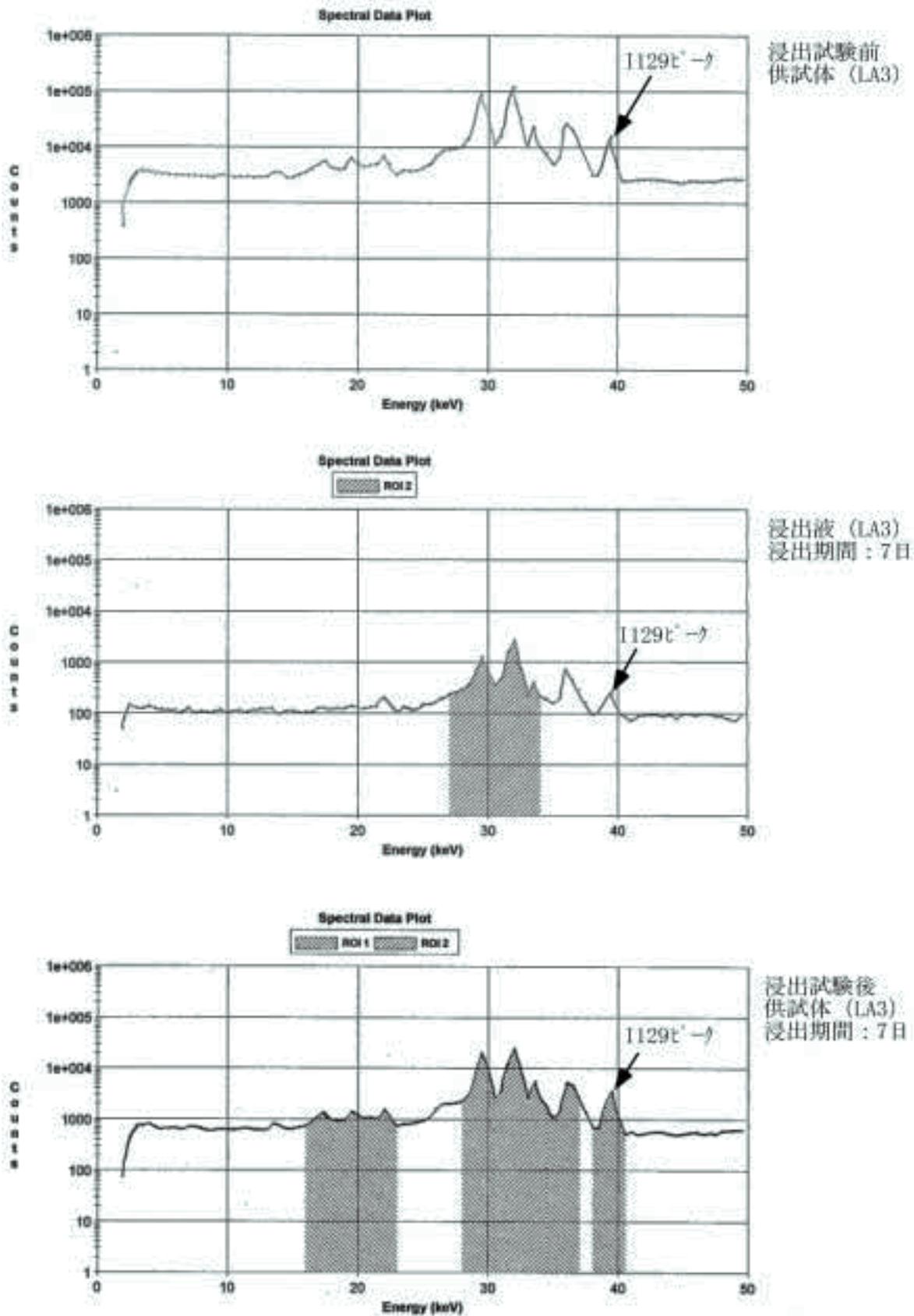


図5.6(3) アスファルト固化体の浸出試験2におけるγスペクトルデータ

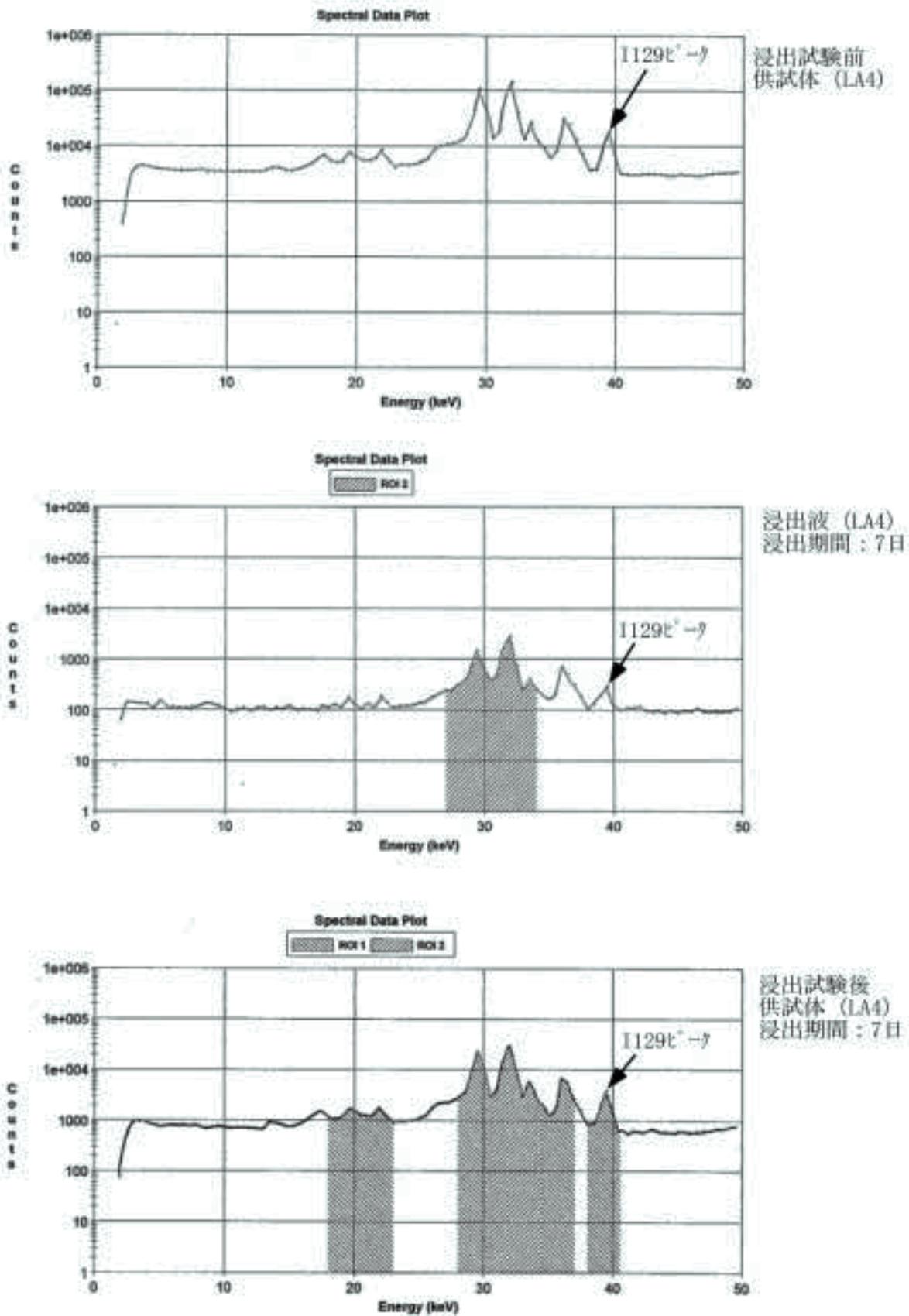


図5.6(4) アスファルト固化体の浸出試験2におけるγスペクトルデータ

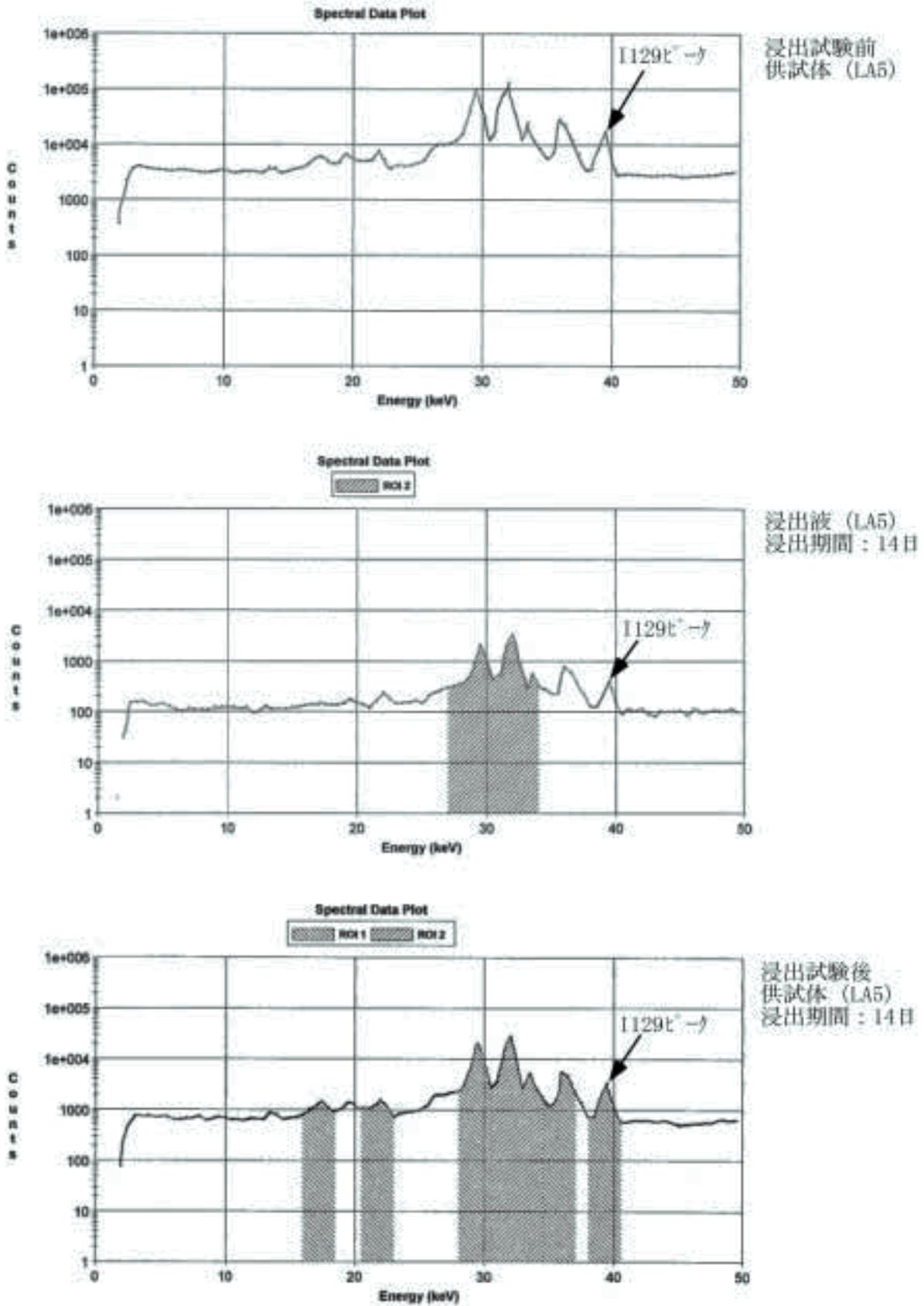


図5.6(5) アスファルト固化体の浸出試験2における γ スペクトルデータ

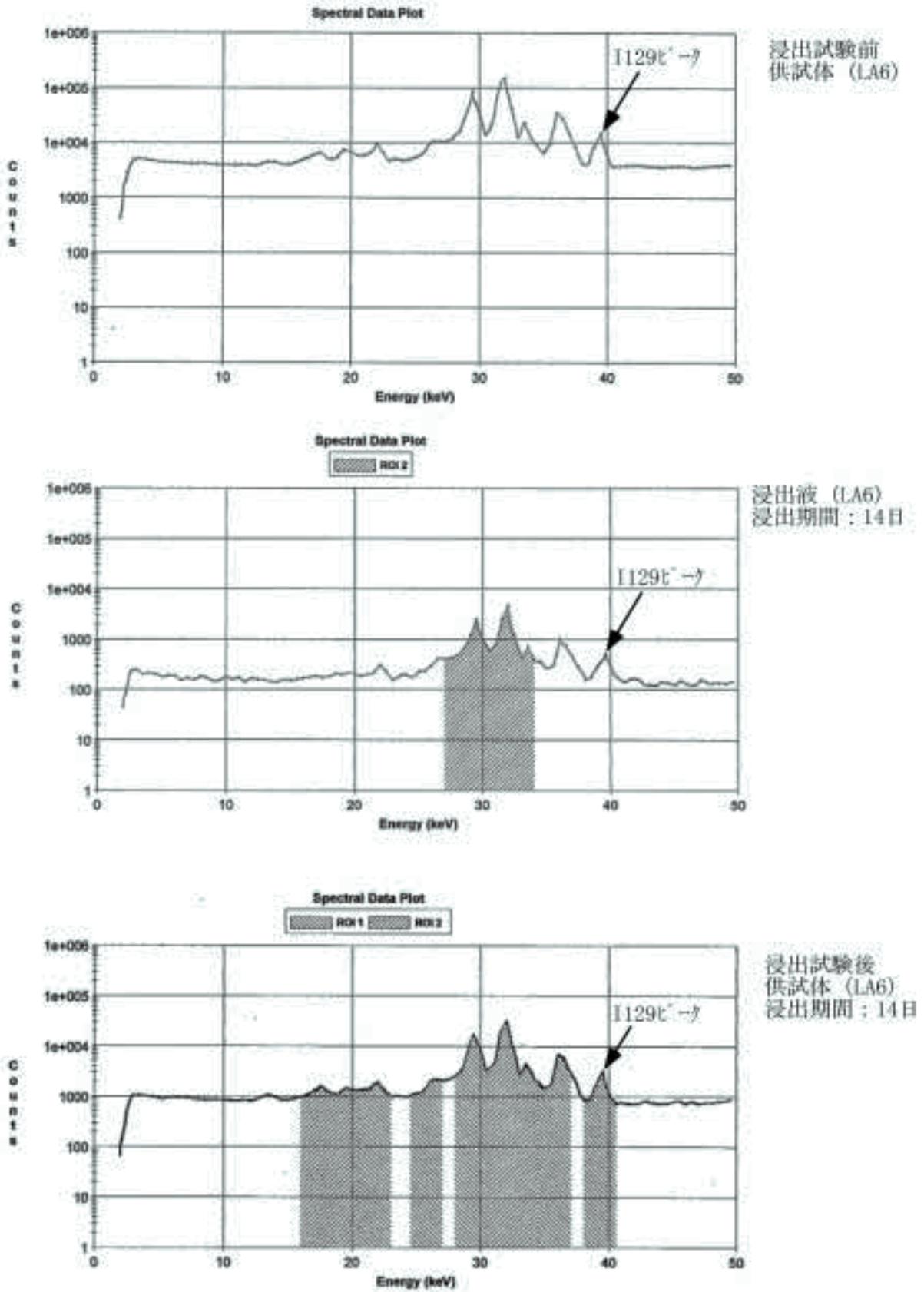


図5.6(6) アスファルト固化体の浸出試験2における γ スペクトルデータ

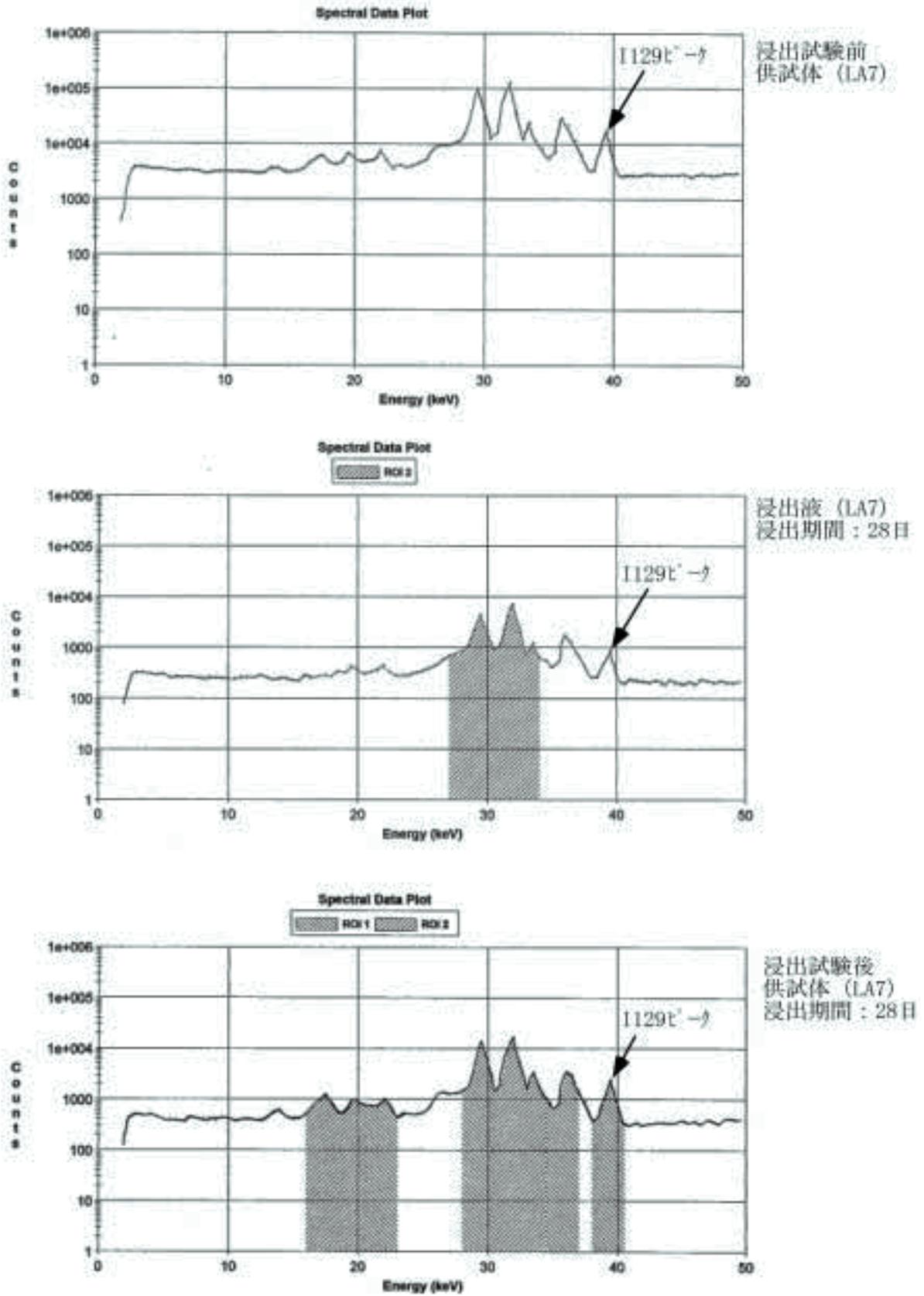


図5.6(7) アスファルト固化体の浸出試験2における γ スペクトルデータ

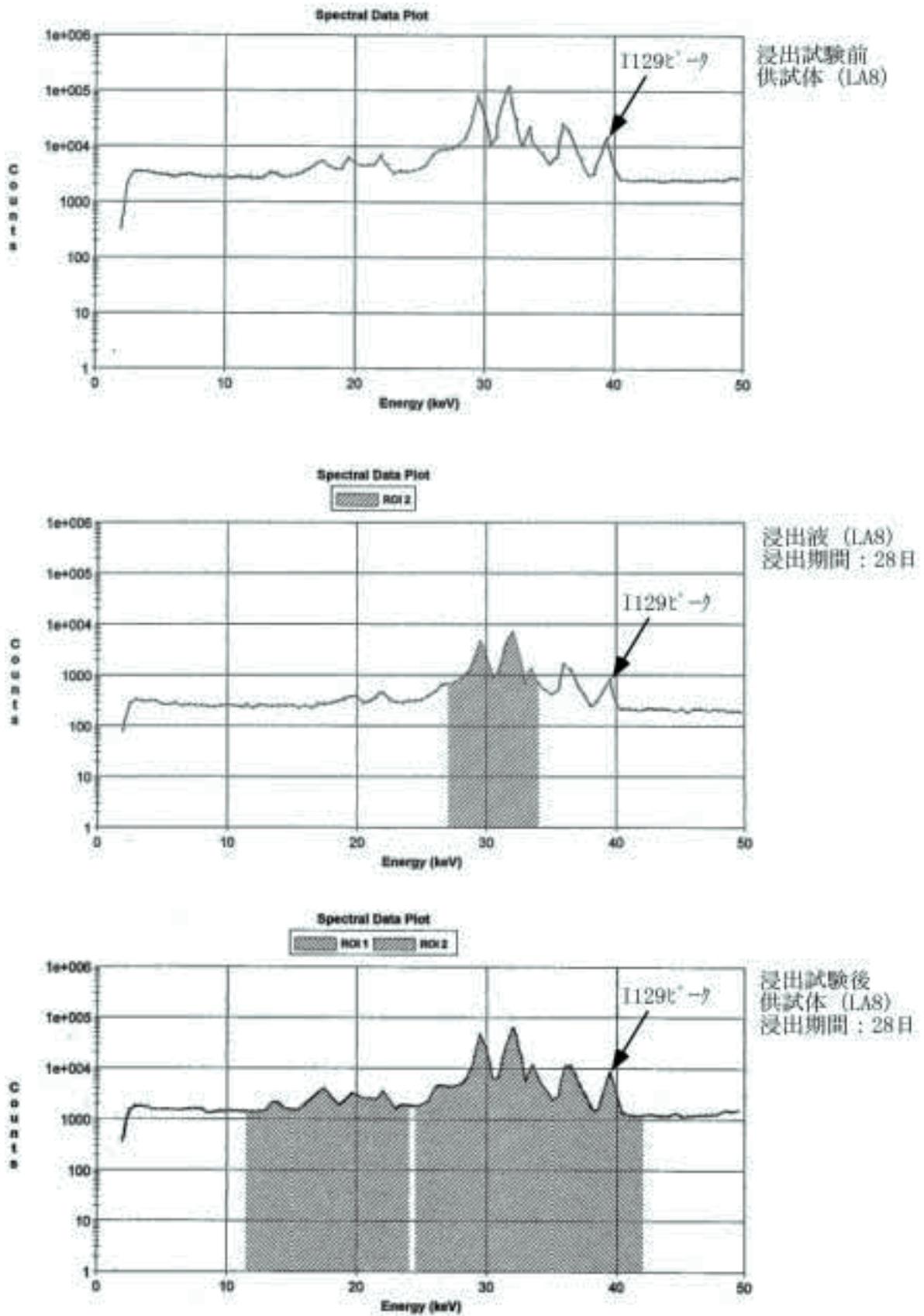


図5.6(8) アスファルト固化体の浸出試験2におけるγスペクトルデータ

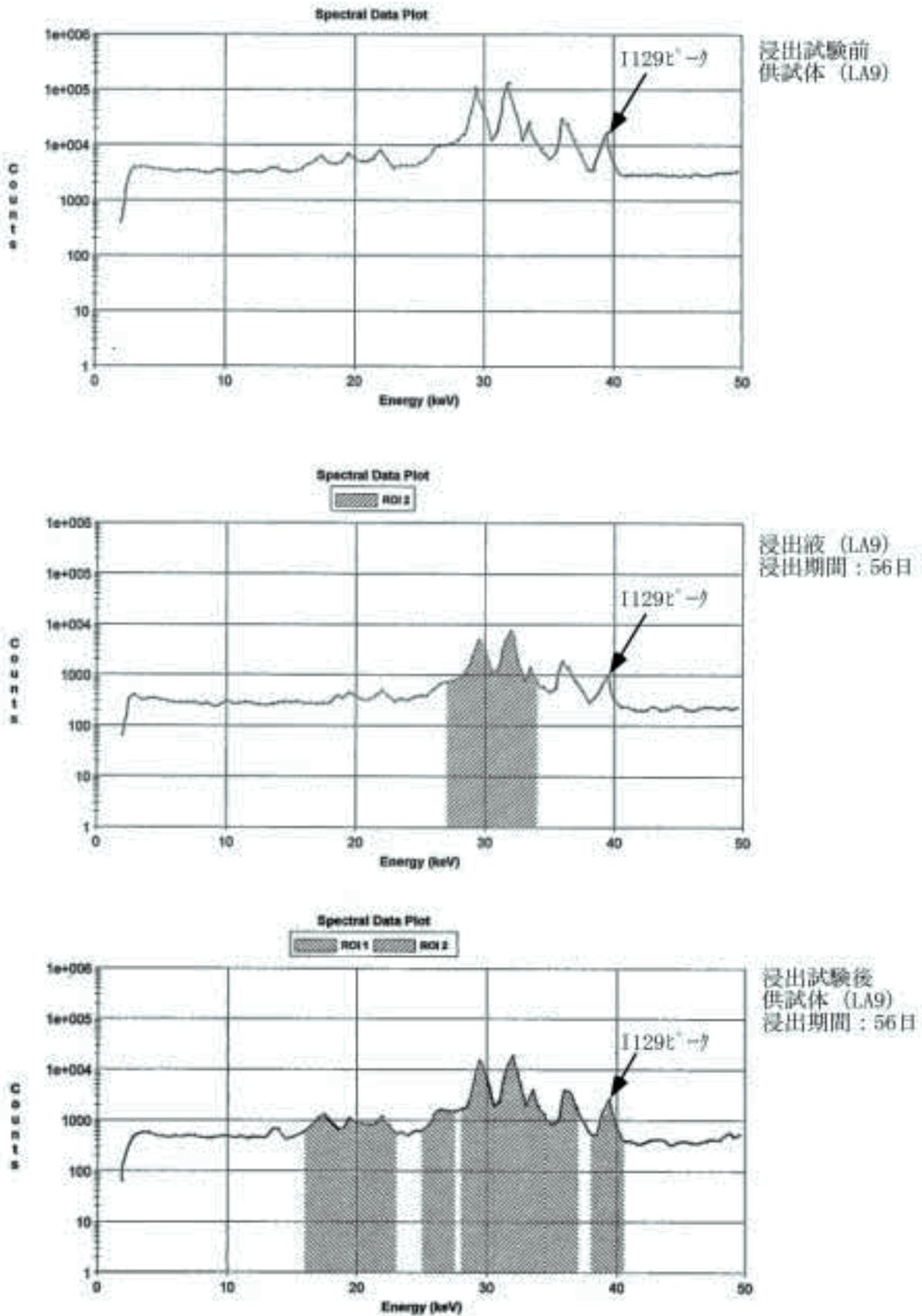


図5.6(9) アスファルト固化体の浸出試験2におけるγスペクトルデータ

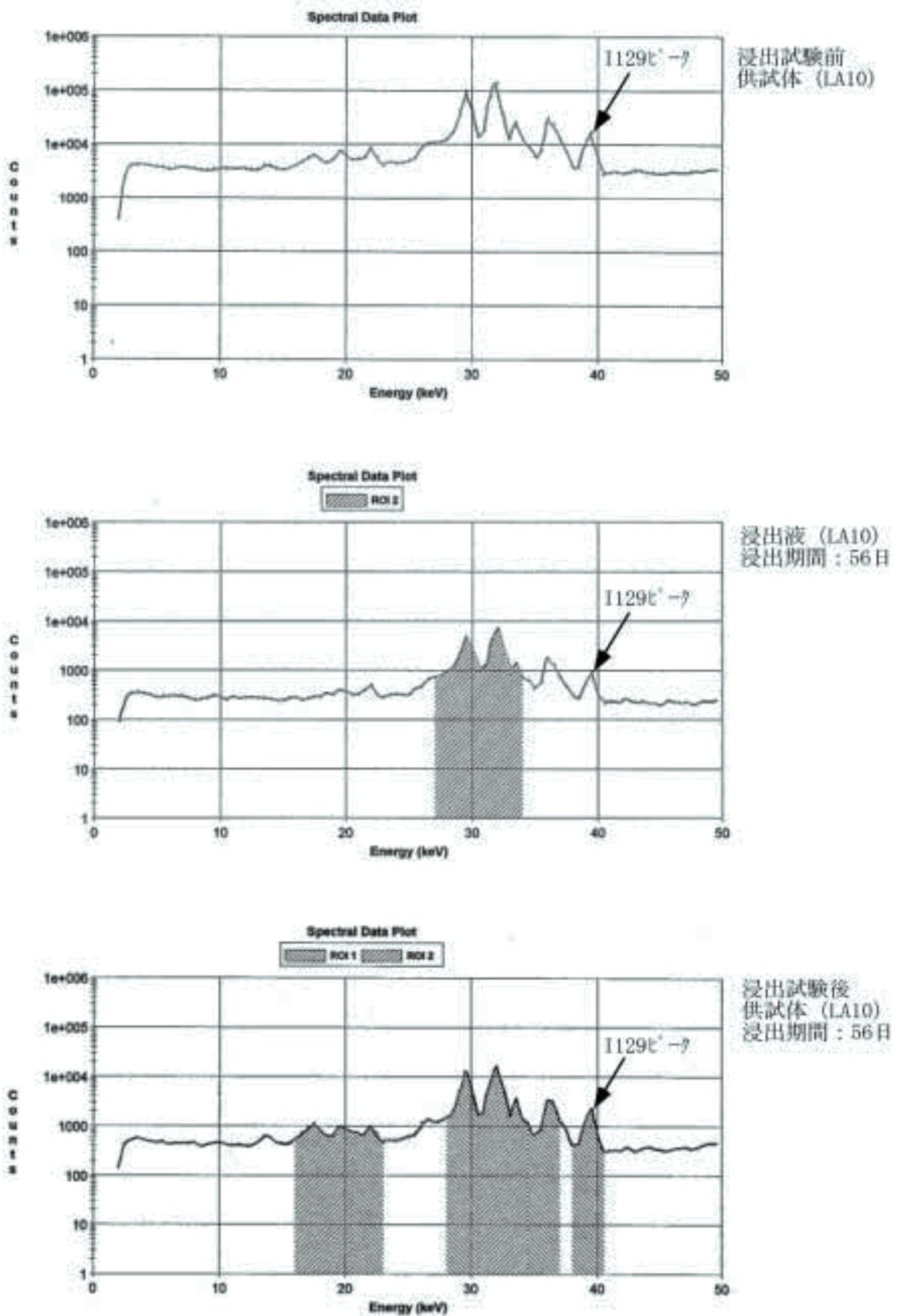


図5.6(10) アスファルト固化体の浸出試験2におけるγスペクトルデータ

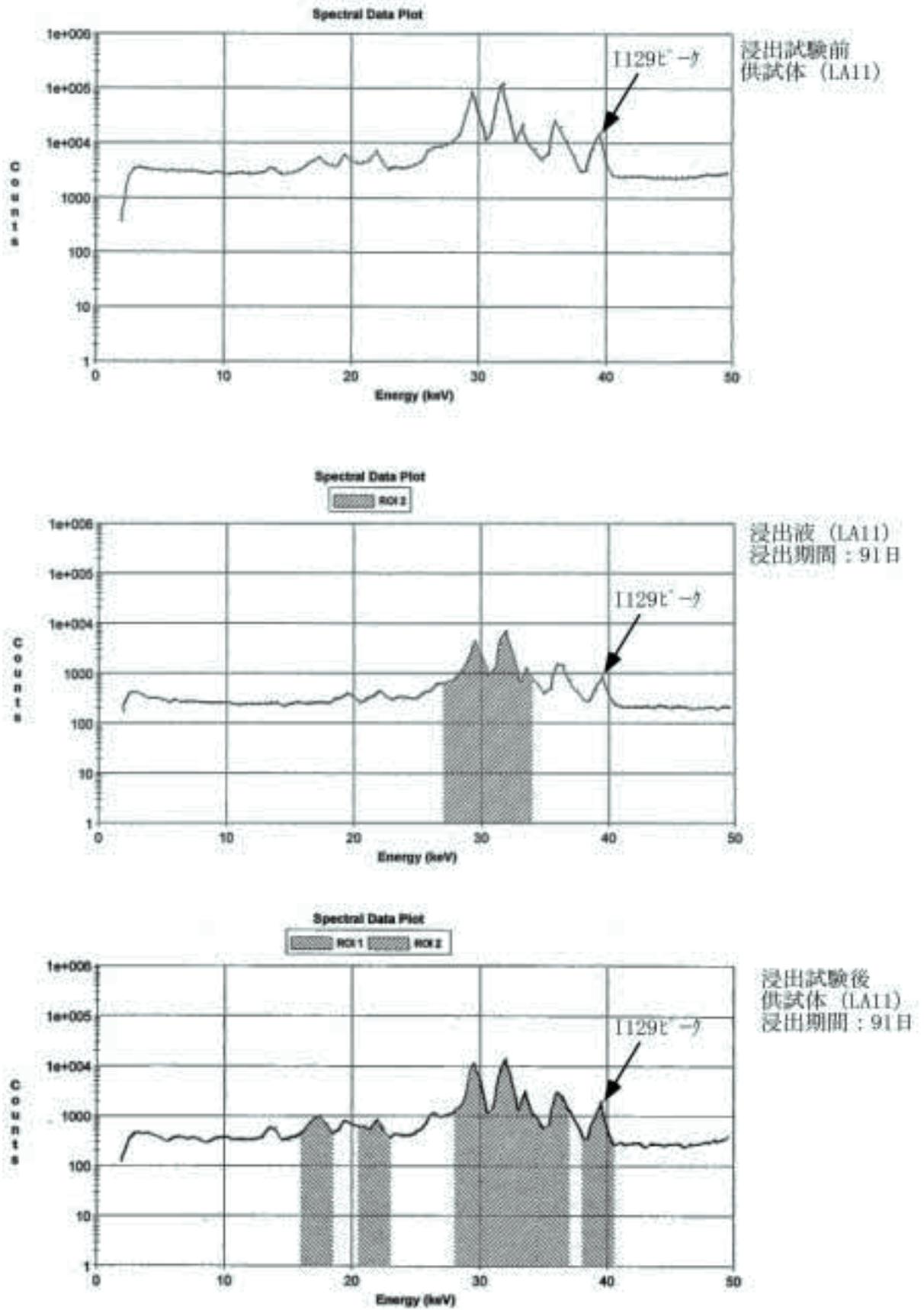


図5.6(11) アスファルト固化体の浸出試験2におけるγスペクトルデータ

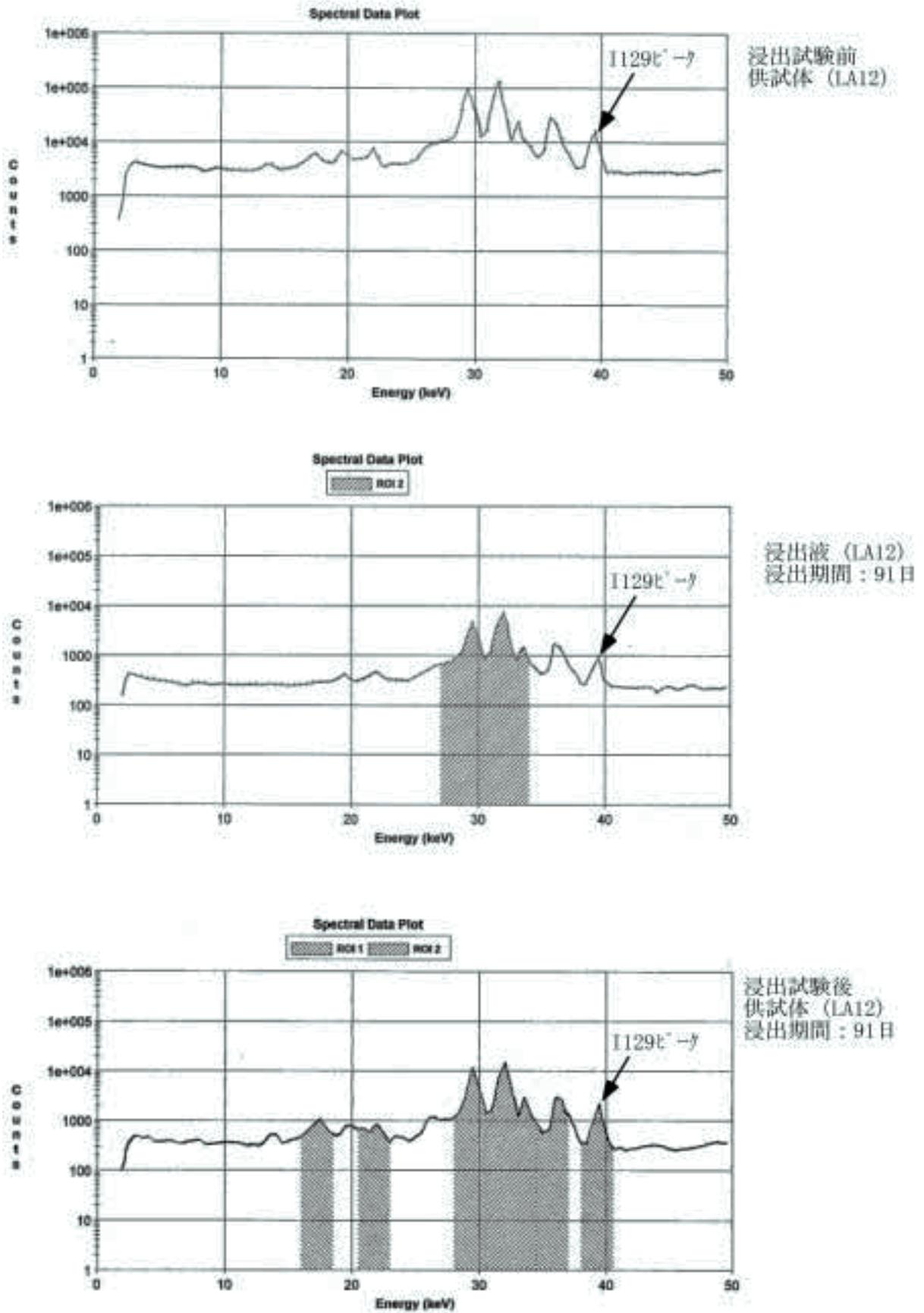


図5.6(12) アスファルト固化体の浸出試験2におけるγスペクトルデータ

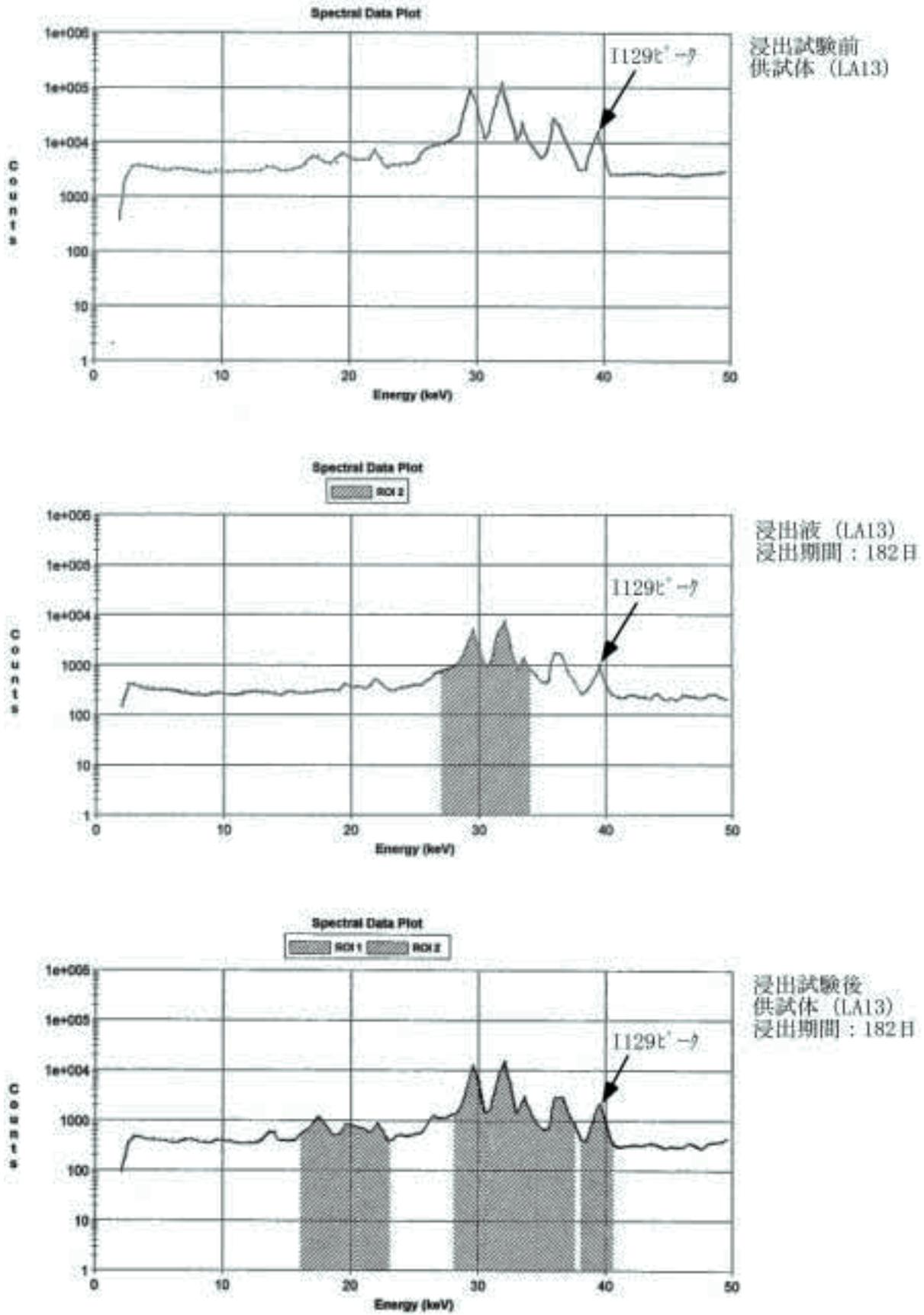


図5.6(13) アスファルト固化体の浸出試験2におけるγスペクトルデータ

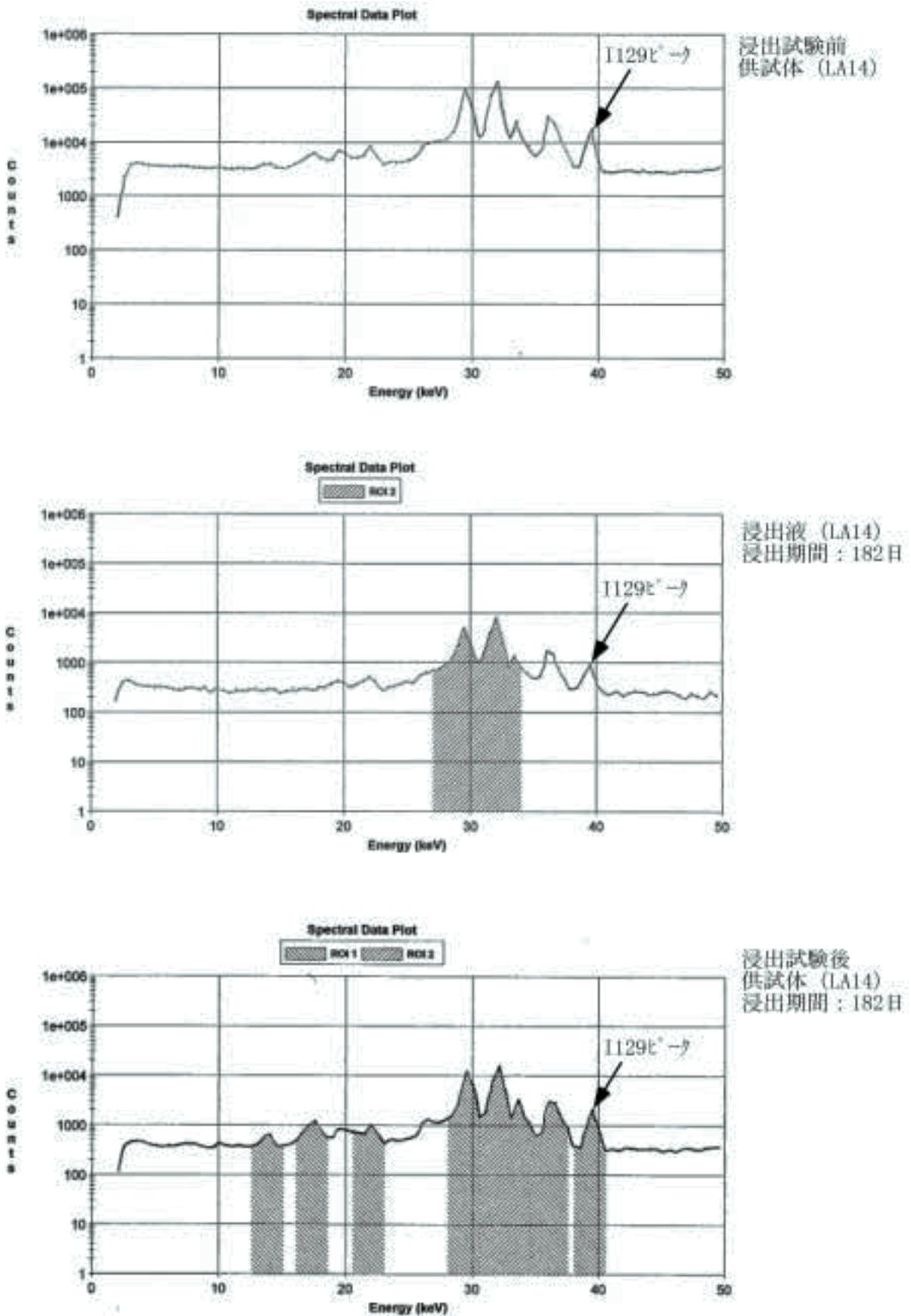


図5.6(14) アスファルト固化体の浸出試験2におけるγスペクトルデータ

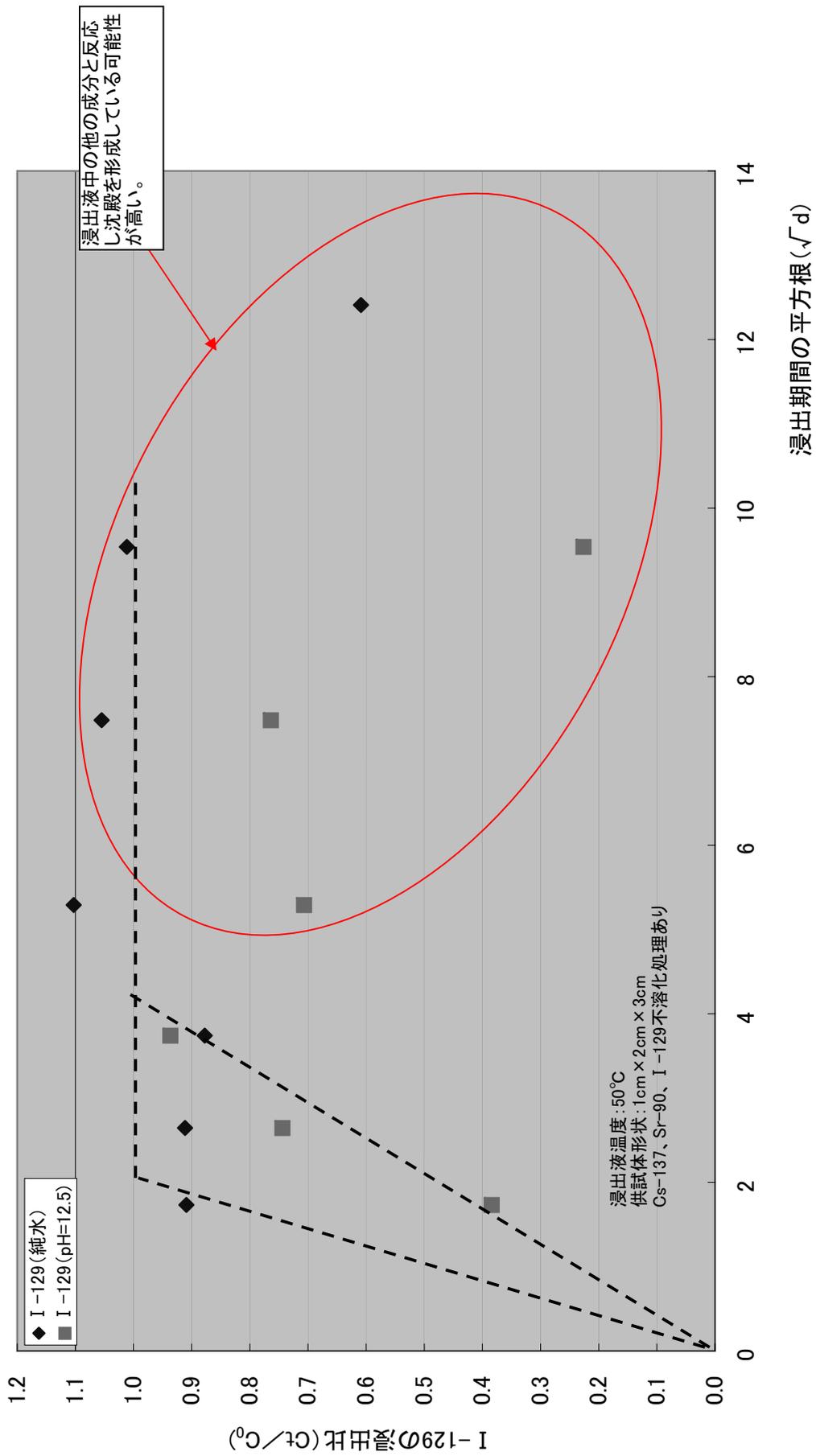


図5.7 アスファルト固化体(MA)の浸出試験1におけるI-129の挙動

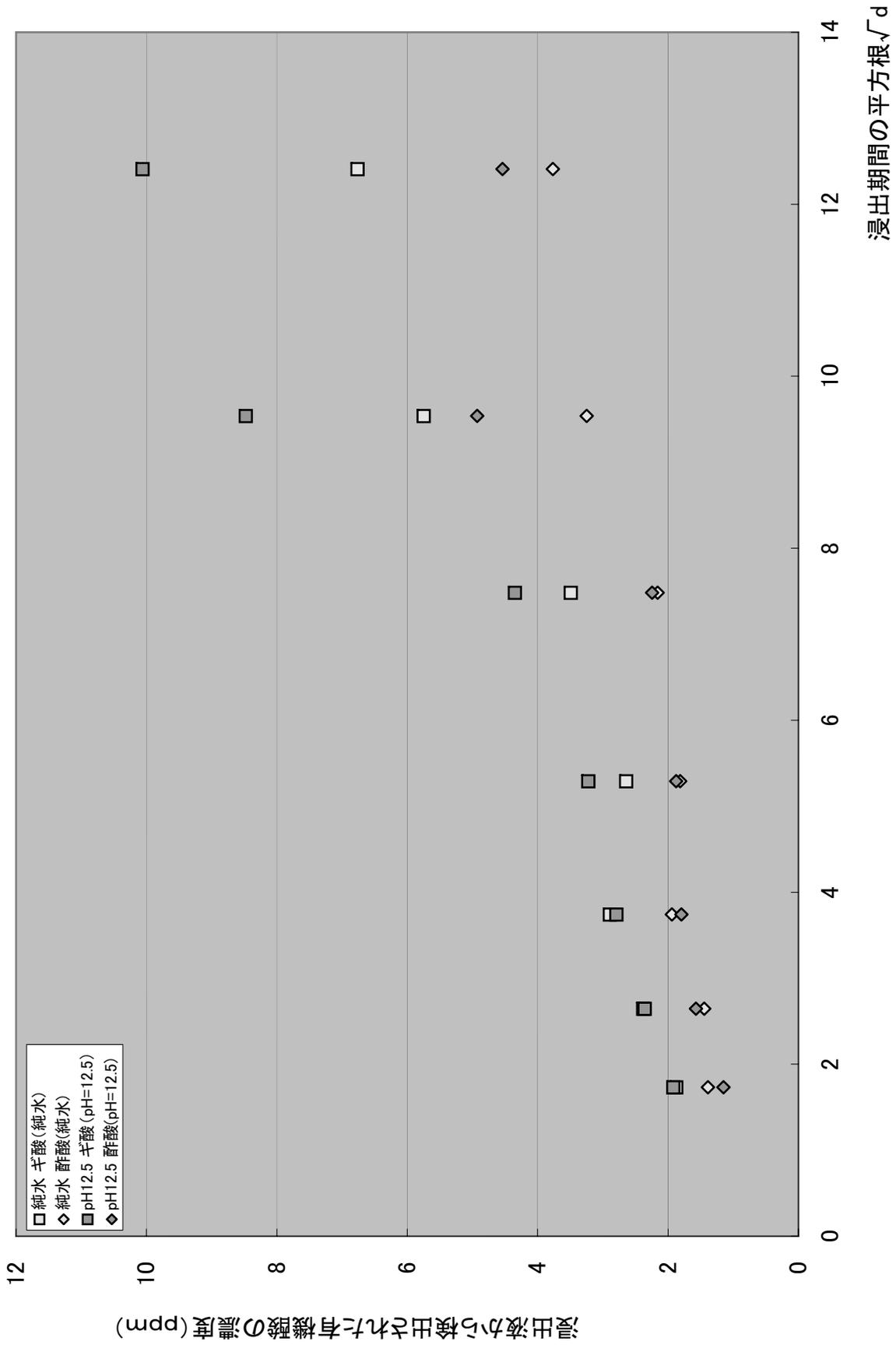


図5.8 アスファルト分解生成物の浸出に係る拡散依存性の評価 (MA)

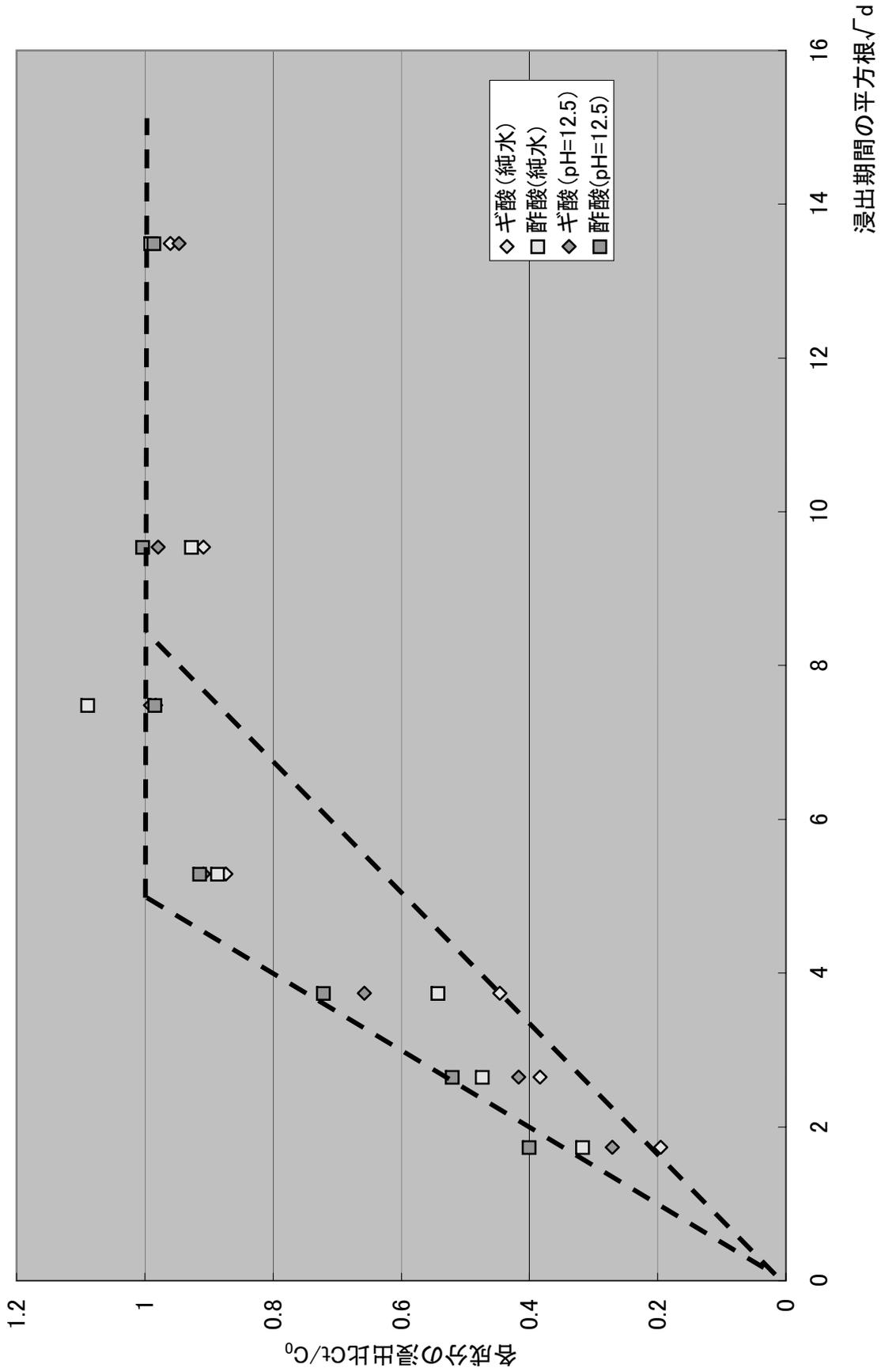


図5.9 アスファルト分解生成物の浸出に係る拡散依存性の評価(LA)

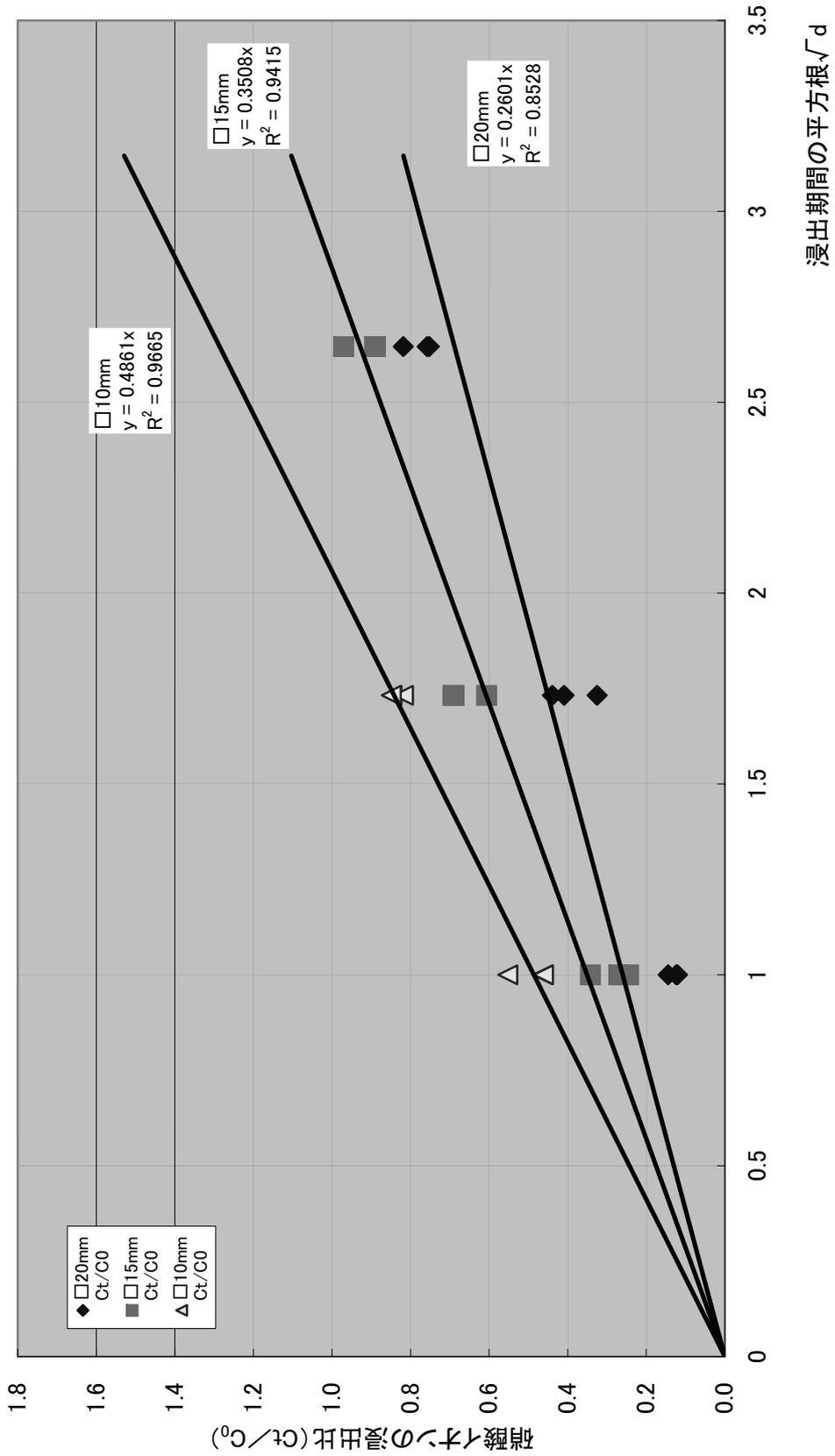


図5.10 アスファルト固化体の浸出試験3における硝酸イオン浸出に係る拡散依存性の評価

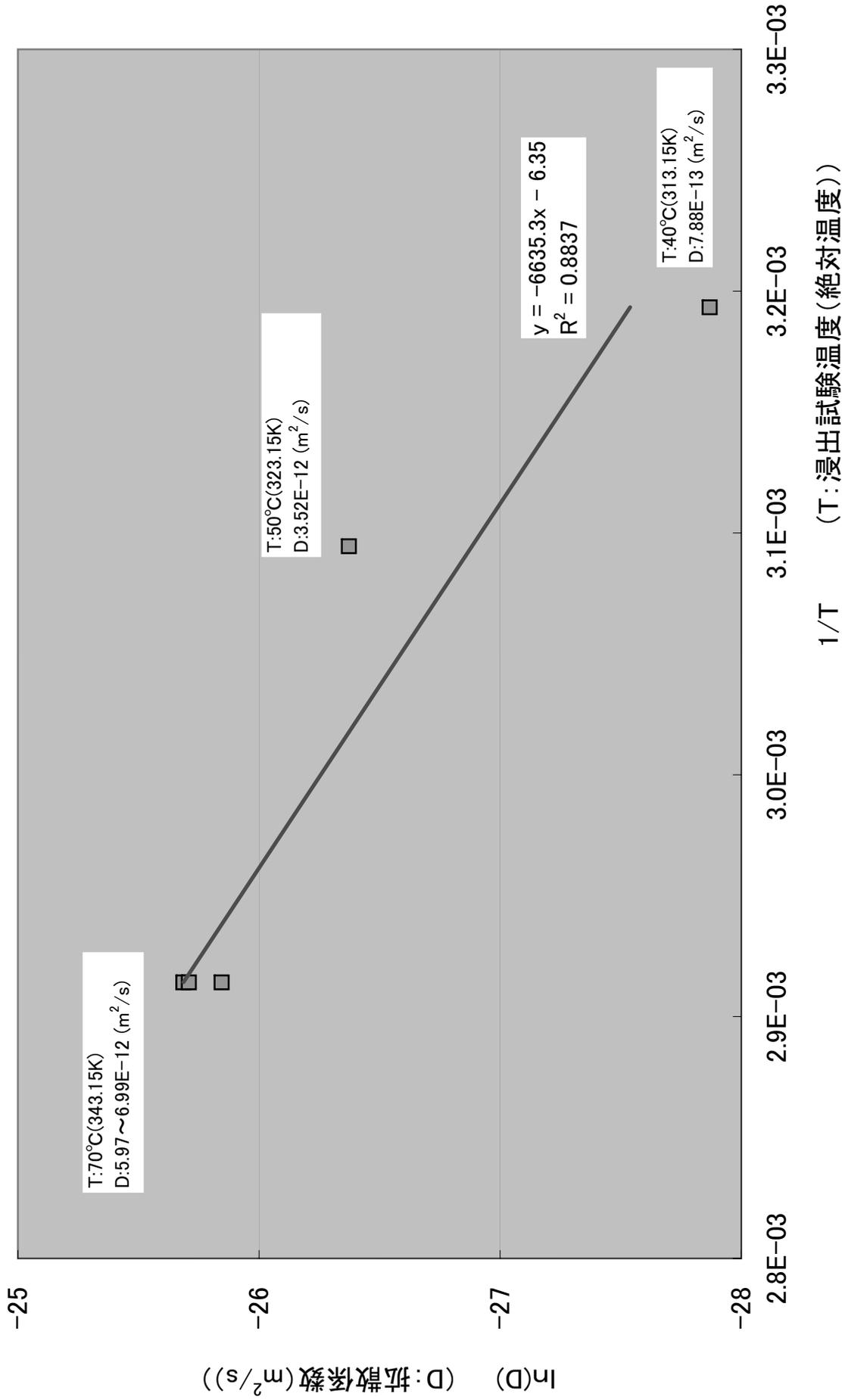


図5. 11 拡散係数と浸出試験温度の関係(アスファルト固化体)

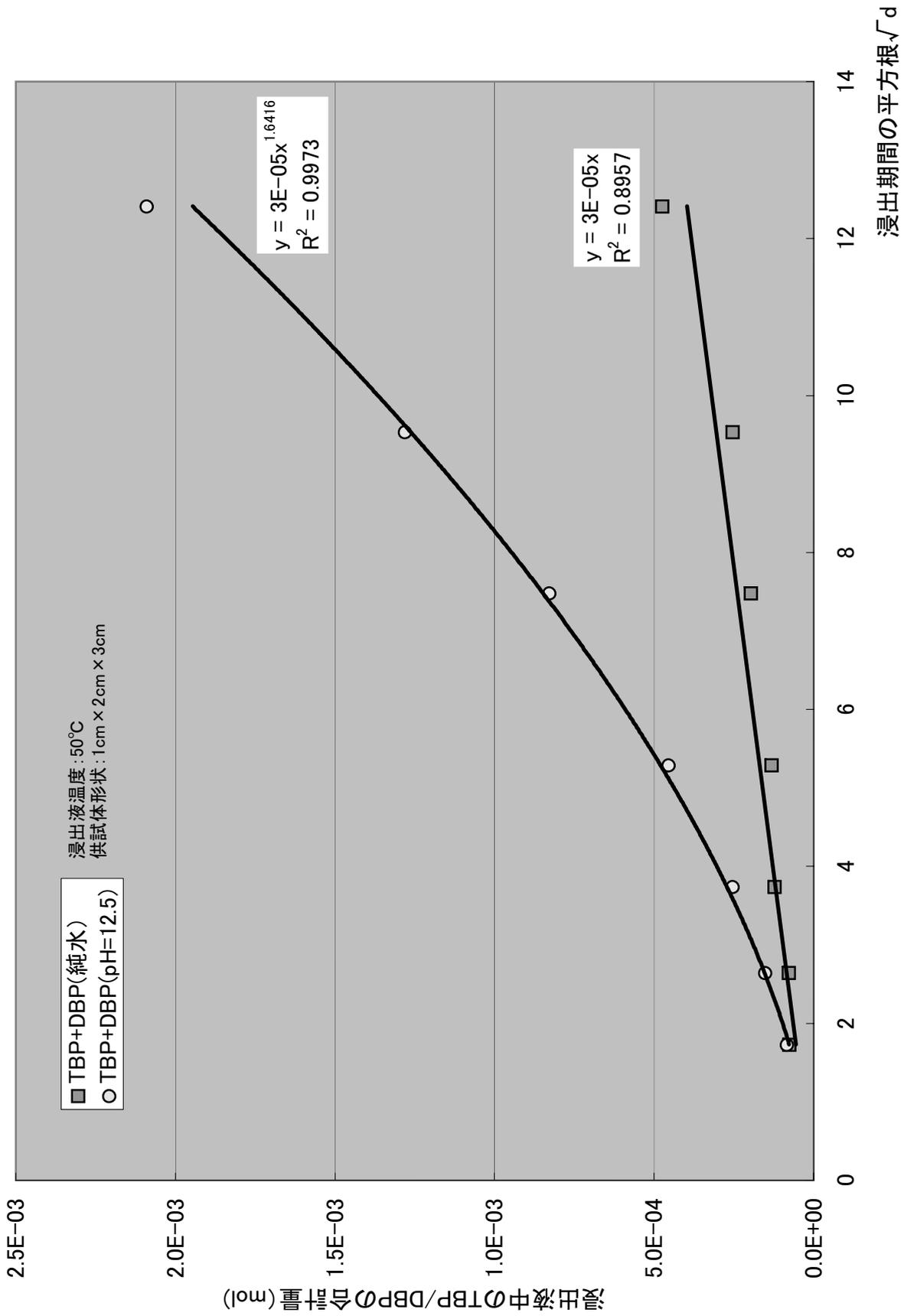


図5.12 プラスチック固化体からのTBP/DBP浸出挙動の拡散依存性の評価

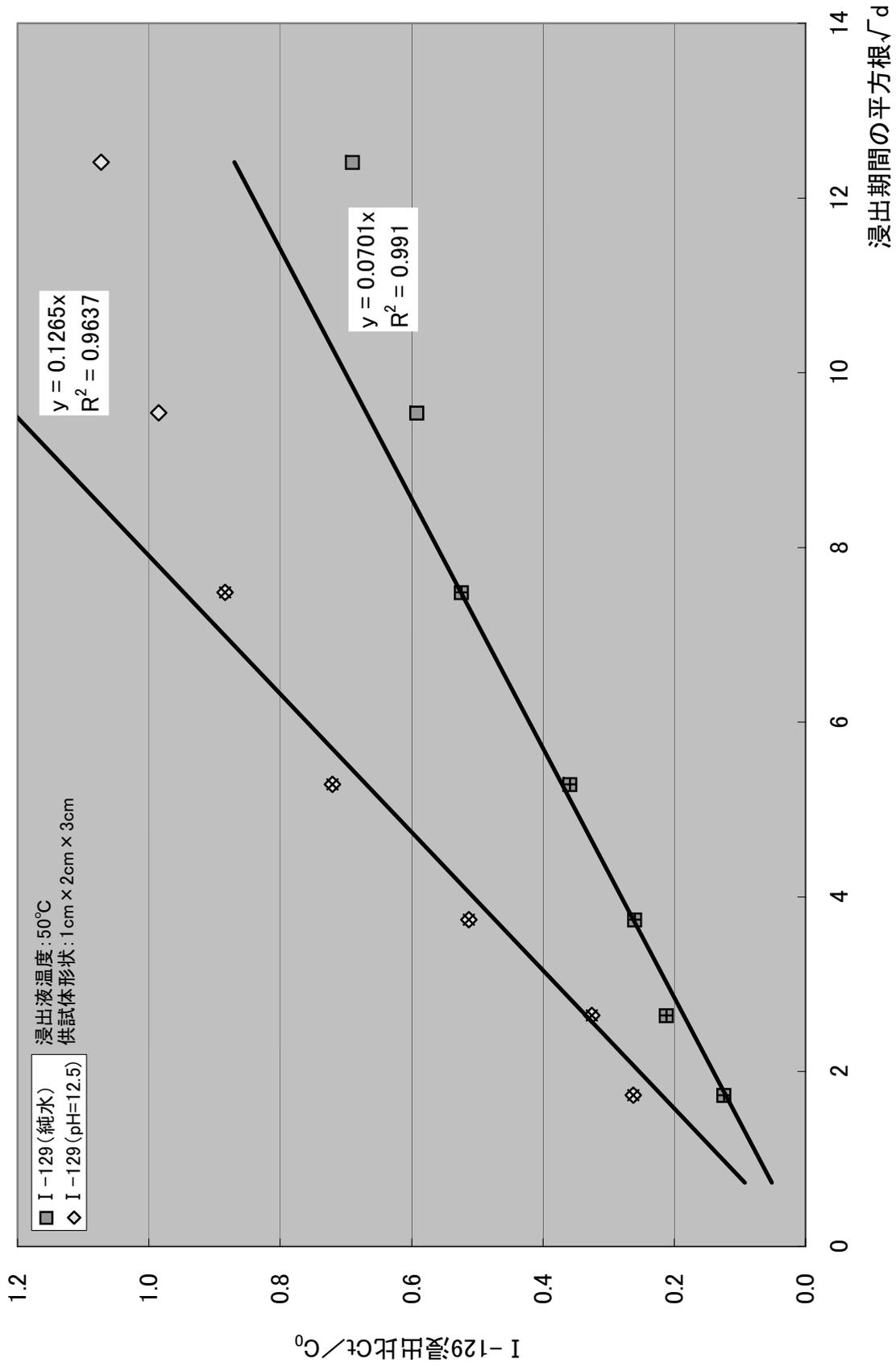


図5.13 プラスチック固化体からの I-129 浸出挙動の拡散依存性の評価

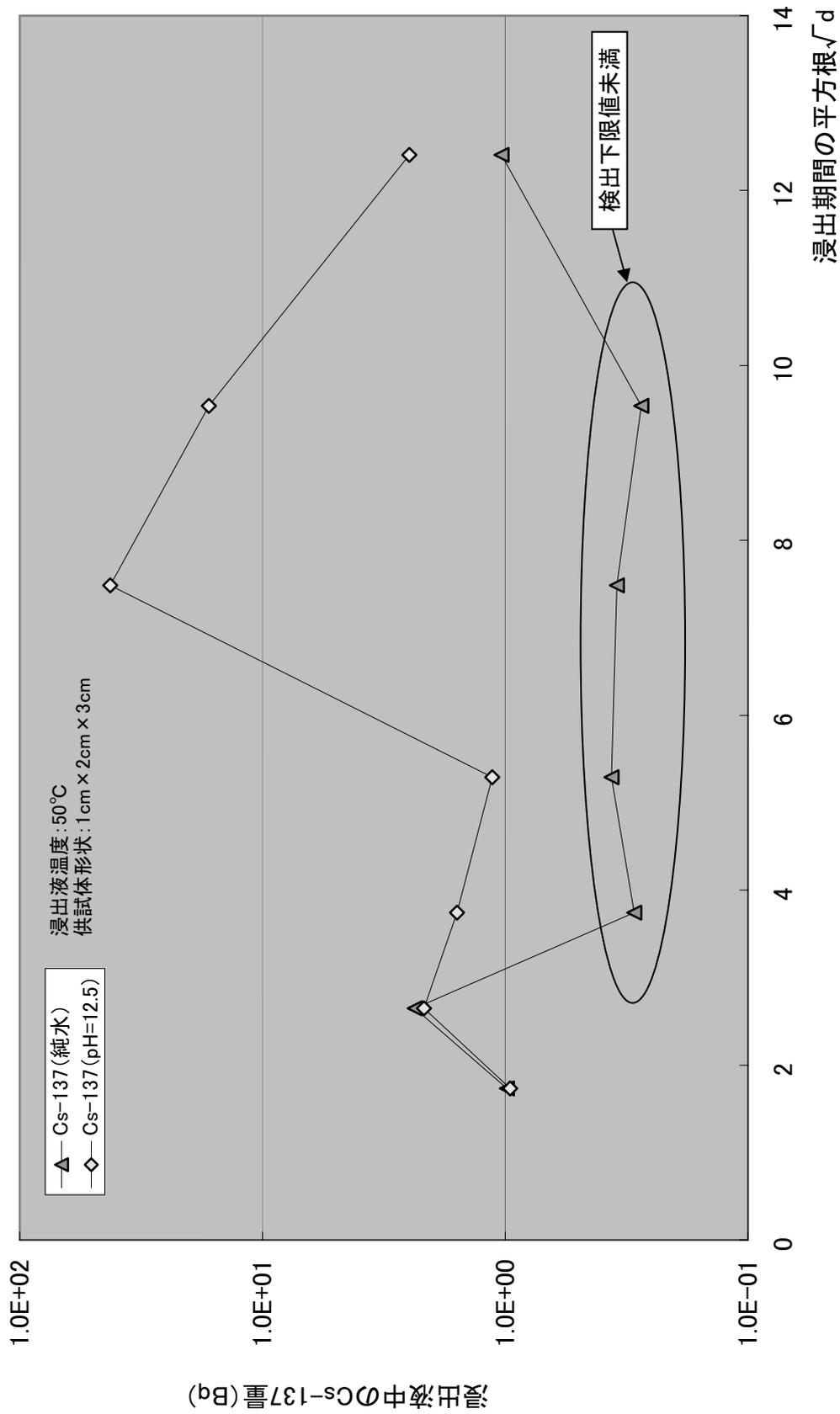


図5.14 プラスチック固化体からのCs-137浸出挙動の拡散依存性の評価

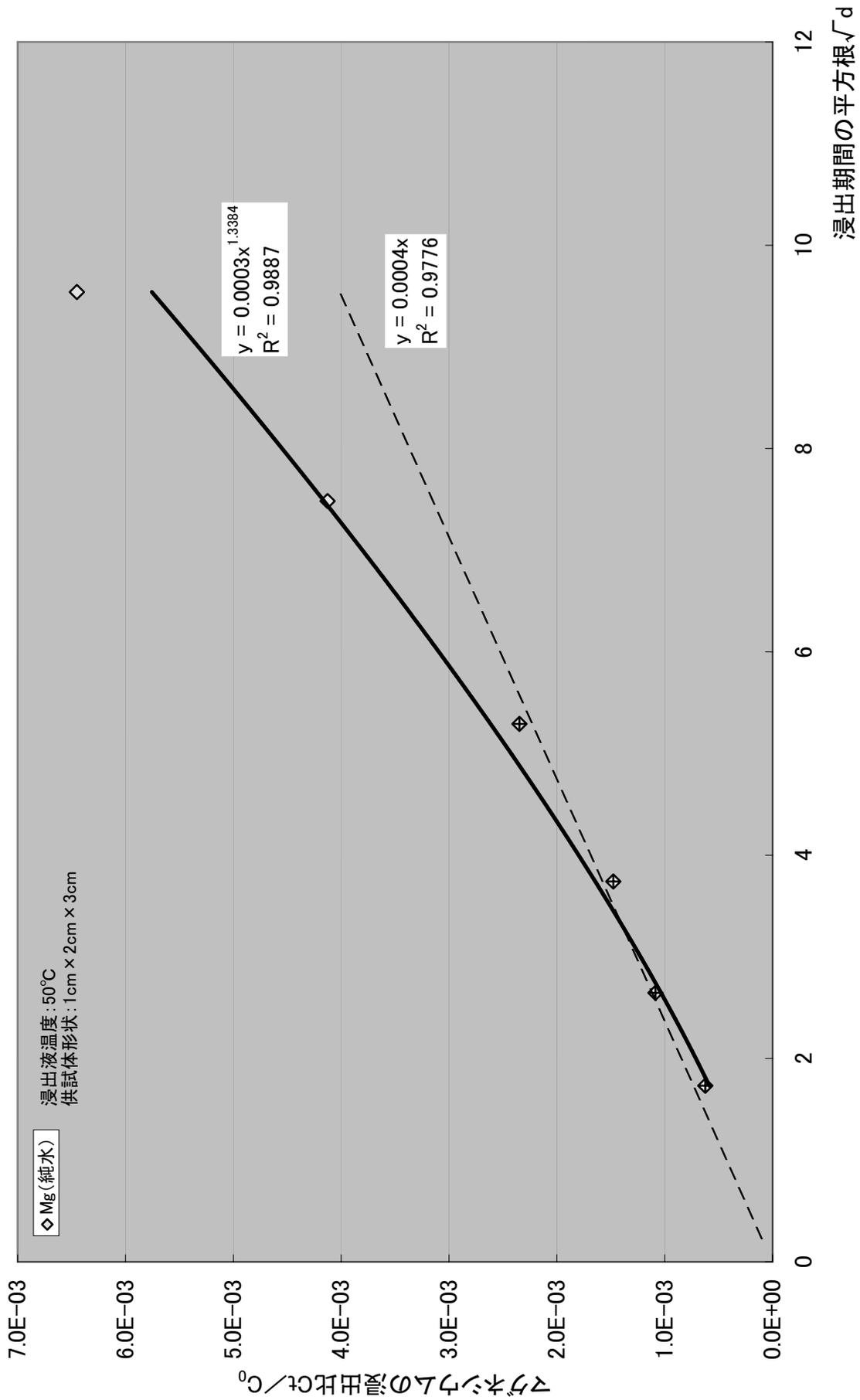


図5.15 プラスチック固化体からのMg浸出挙動の拡散依存性の評価

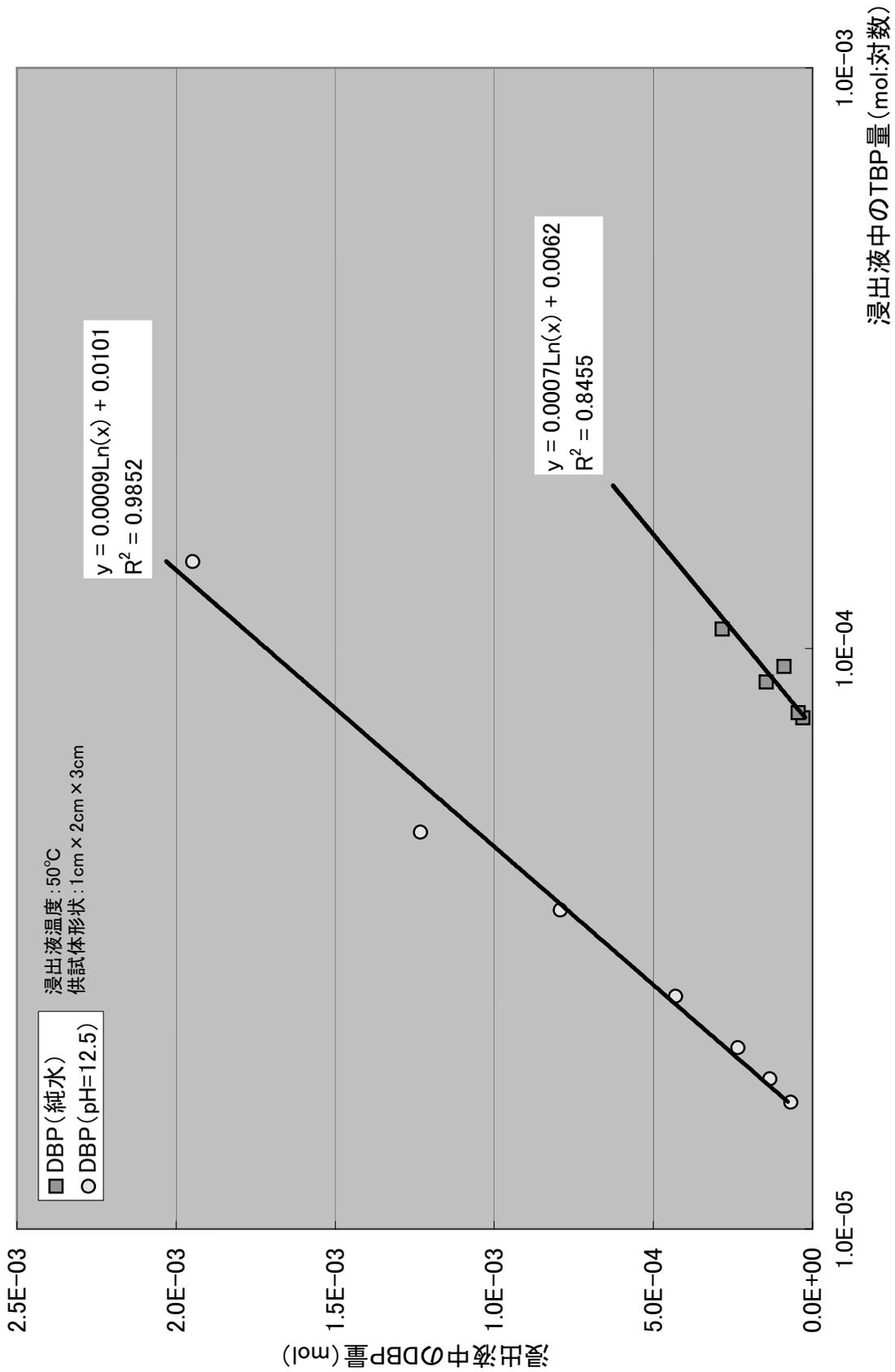
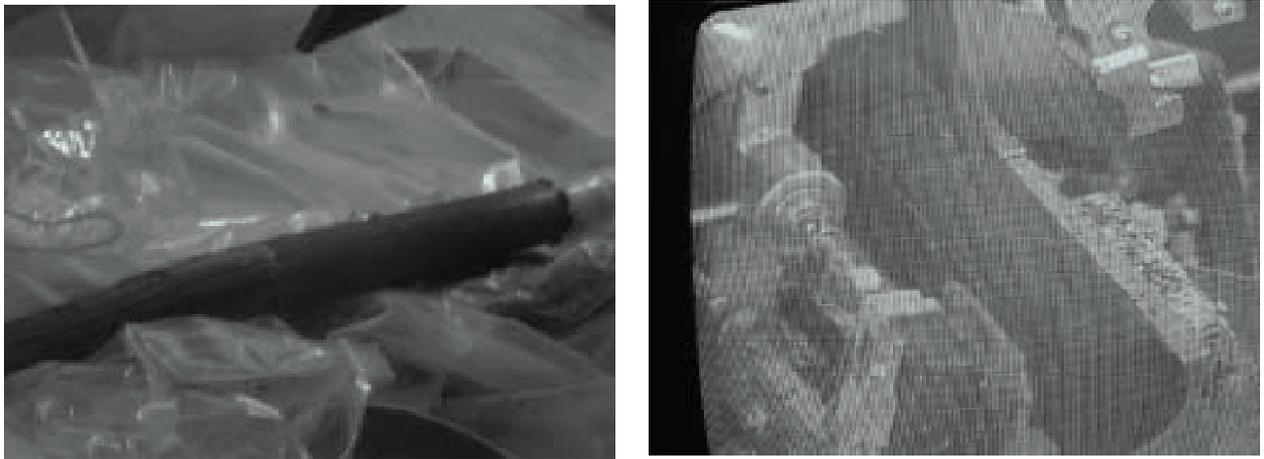


図5.16 浸出液中のDBP量とTBP量の関係(プラスチック固化体)



(A) サンプルング後のドラム缶内面



(B) アスファルト固化体サンプルのセル内での取扱い状況



(C) グローブボックス内で成型した後の供試体

写真3.1 アスファルト固化体試料採取の状況(LA)

This is a blank page.



写真 3.2 アスファルト固化体(MA)の浸出試験1の試験終了後の外観写真

This is a blank page.

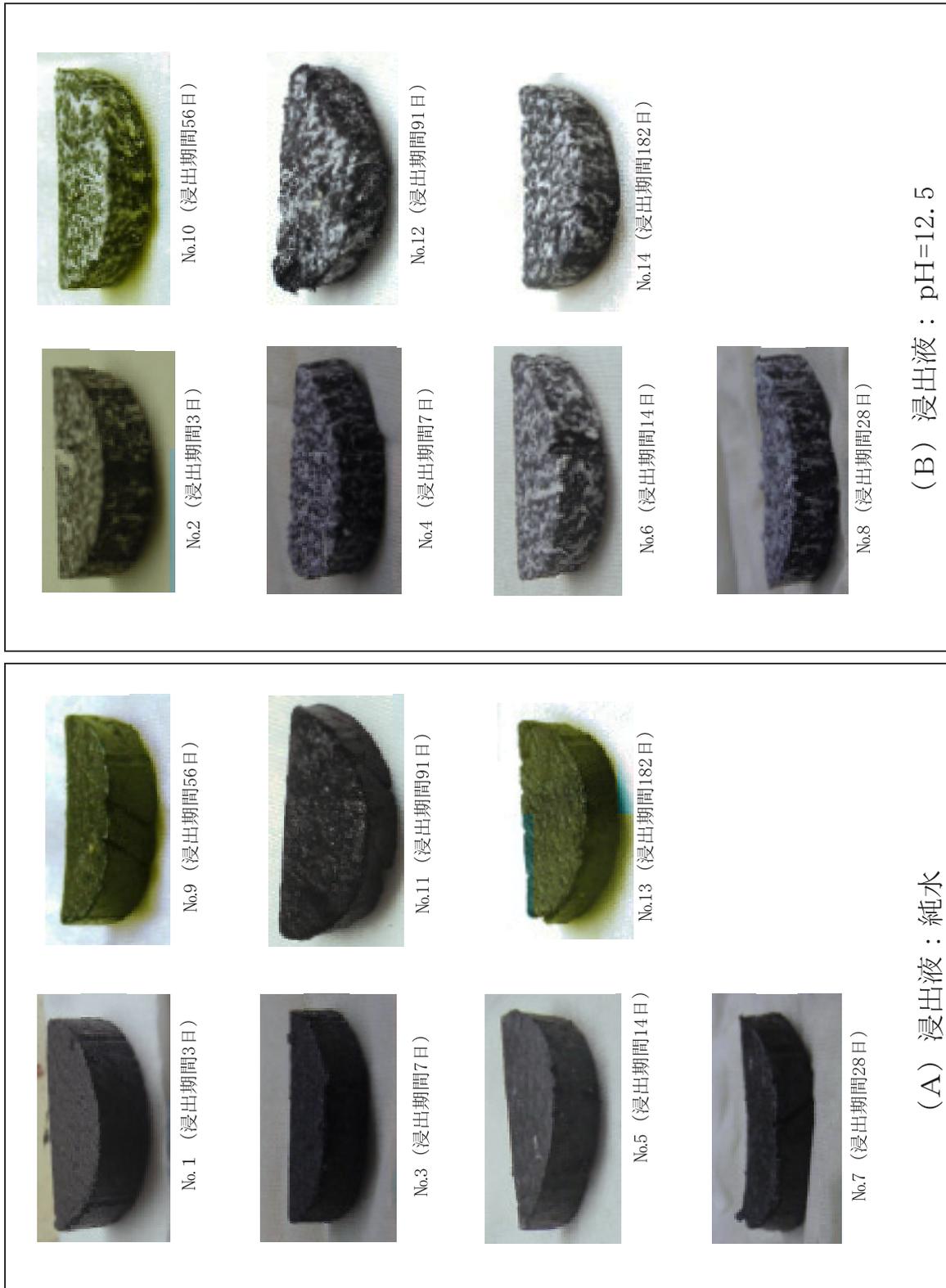


写真3.3 アスファルト固化体(LA)の浸出試験2の試験終了後の外観写真

This is a blank page.



写真3.4 アスファルト固化体(LA)の浸出試験3の試験終了後の外観写真
(左側から□2.0cm、□1.5cm、□1.0cm:浸出期間73日)

This is a blank page.



(A) 浸出試験前のプラスチック固体化



(B) 試験槽(グローブボックス内)



(C) プラスチック試料の取り出し



(D) 浸出液の分取作業

写真4.1 プラスチック固化体試料取扱いの状況

This is a blank page.

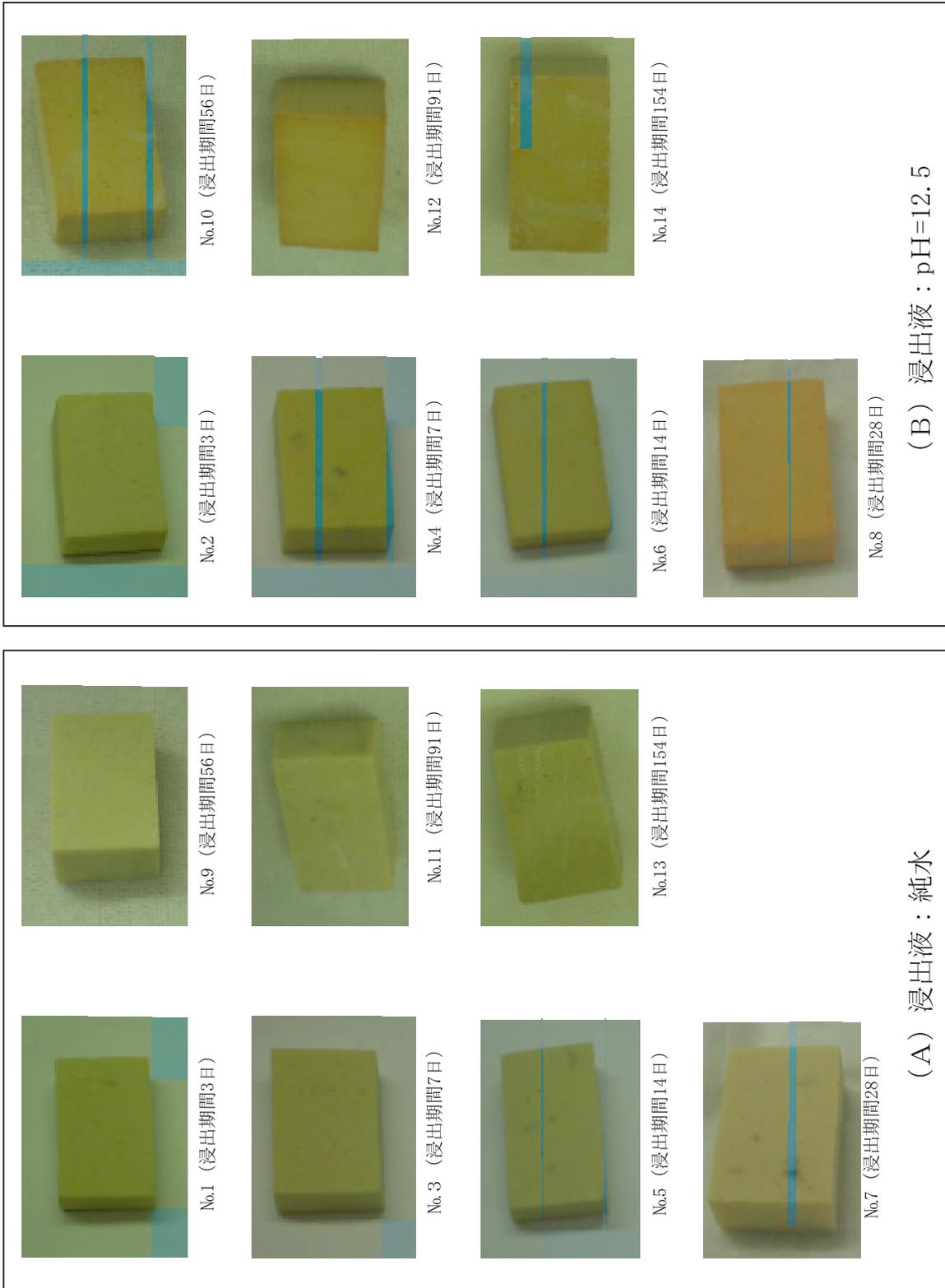


写真4.2 プラスチック固化体の浸出試験の試験終了後の外観写真

This is a blank page.

付 録 ー 1

アスファルト固化処理時のヨウ素の挙動に係るコールド試験の概要 (1986年実施) とアスファルト固化処理運転の条件の比較評価

アスファルト固化体の浸出挙動を理解するために、アスファルト固化処理運転初期の頃(1986年)に、外部委託により実施したビーカースケールのコールド試験の結果と本試験に供したアスファルト固化体の製造条件を比較することにした。

1. コールド試験の概要

1.1 試験の目的

アスファルト固化処理施設で実施されていた廃液の前処理工程(pH調整、不溶化処理)、エクストルーダによるアスファルトとの混合工程において、塩、不溶化試薬及びヨウ素がどんな形態を呈しているか、物質収支がどのようになっているのかを調査するため、ビーカースケールの模擬実験を実施して挙動を解析した。

1.2 前処理試験

(1) 模擬廃液の調製と前処理試験の概要

前処理試験においては、まず、処理前の廃液を模擬して、付録表 1.1 に示す模擬廃液を作成した。ここで、I-129 については、 NaI 、 NaIO_3^- を添加することで、 $3.7 \times 10^2 \text{Bq/ml}$ の濃度で含まれている状態を模擬している。

前処理試験においては、アスファルト固化処理前に行う pH 調整及び不溶化処理のための試薬添加状況を模擬して、数種類の処方調合した。

LA 固化体製造時の前処理を模擬して、 HNO_3 、 Na_2SO_3 、 AgNO_3 を添加したものと、MA 固化体製造時の前処理を模擬して、 Ba(OH)_2 、 HNO_3 、 $\text{K}_4\text{Fe(CN)}_6$ 、 NiSO_4 、 Na_2SO_3 、 AgNO_3 を添加したもので、それぞれの挙動を調査した。

(2) 分析項目

分析は、ヨウ素類、溶解塩類、沈殿塩類を対象とした。それぞれ、ヨウ素類の分析は、イオンクロマトグラフィー及び吸光光度法により行い、溶解塩の分析はイオンクロマトグラフィー及び ICP 発光分析により行い、沈殿塩類の分析は X 線回折及び EDX により行った。

(3) 結果の評価

本試験の結果を考察する上で参考とした MA 固化体製造時の前処理試験を模擬した結果を付録表 1.2 及び付録図 1.1 にその結果を示す。

この結果を整理すると以下のことがいえる。

- ① Ba(OH)₂の添加後、硝酸で pH 調整する際に I⁻の不溶化が起こっている。このとき、沈殿物中の BaCO₃は大幅に減少し、代わりに NaBaPO₄が主成分となる。
- ② K₄Fe(CN)₆の添加により、I O₃⁻の不溶化が起こっている。このときの沈殿物の主成分は、NaBaPO₄である。
- ③ NiSO₄の添加により、ヨウ素は再び初期段階の濃度に戻ってしまう。このときの沈殿物の主成分は BaCO₃である。

1.3 エクストルーダ模擬試験

(1) エクストルーダの模擬試験の概要

エクストルーダ内の挙動試験は、以下の方法で実施した。なお、供給する模擬廃液は、付録表 1.3 に示す組成に調製したものを使用した。

まず、付録図 1.2 に示す混合槽 (2ℓ) の中に 530g のアスファルトを入れ、マントルヒータで加熱し、アスファルトの温度を 180°C±5°C に調節する。He ガスで実験装置内を置換した後、アスファルトをかきまぜながら、廃液をゆっくりと滴下する。

廃液の滴下が終了した後も 180°C±5°C の温度に保ち、アスファルト中の水分が完全に蒸発した時点で加熱かきまぜを停止する。

この実験においては、発生したガス、凝縮水及び得られたアスファルト固化体を全量採取し、分析試料とした。

(2) 分析項目

本試験の結果を考察する上で参考としたアスファルト固化体中の塩の分析項目及び方法は以下の通りである。

まず、実験で得られたアスファルト固化体をベンゼンにてソックスレー抽出を 3 日間程度行い、塩及び抽出液 (アスファルト+ベンゼン) に分離し、分析用試料とした。

塩については、X 線回折を行った後、純水にて溶解し、同定された成分についてイオンクロマトで陰イオンの分析を行った。Na I、NaIO₃についてもイオンクロマト分析を行った。抽出液 (アスファルト+ベンゼン成分) については、減圧加熱によりベンゼン成分を揮発させた後、残ったアスファルト成分を燃焼させ吸収液に I を吸収してイオンクロマトグラフにて定量を行った。

(3) 結果の評価

その結果、付録表 1.4 に示す結果が得られた。この結果から、ヨウ素のうちの約 40% が Na I として塩類中から検出されており、Ag I から Na I に転化したとされている。また、追加試験を行い、Ag I として不溶化した後、50°C で長時間放置 (24 時間程度) した場合にも Ag I として沈殿した不溶化物が I⁻あるいは IO₃⁻として検出されたことも報告されている。

2. 試験に供した固化体の製造条件

上記のコールド試験と比較できるようにするため、参考として、浸出試験に供した実固化体の廃液調製の状況を付録表 1.5 に示す。

アスファルト固化体の浸出試験 1 に供した MA 固化体は、最適化が図られた不溶化技術にて不溶化処理を実施した固化体であるが、本試験の結果から I-129 が浸出する結果となった。このエクストルーダ模擬試験で認められたヨウ素の転化の可能性が高いと考える。

アスファルト固化体の浸出試験 2 に供した LA 固化体は、ヨウ素の不溶化処理が行われていないにも係らず、浸出が抑制された結果となった。廃液の前処理としては pH 調整のための硝酸が添加されているのみであるが、当該固化体の前の MA 廃液処理のキャンペーンにおいて、 $\text{Ba}(\text{OH})_2$ が添加されており、MA 固化体の製造バッチ終了時点で、不溶化された塩の一部、特に BaCO_3 が残留していると考えれば、コールド試験と同様の機構で不溶化を生じていることは十分に考えられる。

付録表1.1 模擬廃液(前処理試験)

	廃液中成分	
	(g/l)	mol/l
NaNO ₃	260	3.06E+00
NaNO ₂	20	2.90E-01
Na ₂ CO ₃	50	4.72E-01
Na ₂ HPO ₄	20	1.41E-01
NaOH	50	1.25E+00
Na I	0.04	2.67E-04
Na I O ₃	0.05	2.53E-04

付録表1.2 前処理試験の結果

		①初期	②Ba(OH) ₂ 添加(10.4g/l)	③pH調整	④K ₄ Fe(CN) ₆ 添加(6.8g/l)	⑤NiSO ₄ 添加(5.8g/l)	⑥Na ₂ SO ₃ 添加(4g/l)	⑦AgNO ₃ 添加(0.16g/l)	
液中の濃度分析	NO ₃ ⁻ (g/l)	187	189	320	325	327	286	293	
	NO ₂ ⁻ (g/l)	13.5	13.6	10.5	10.8	10.5	11.8	11.7	
	PO ₄ ³⁻ (g/l)	11	10.4	0	0	0	0	0	
	HPO ₄ ²⁻ (g/l)	2.2	3	11.3	12.8	12.4	12.5	12.2	
	H ₂ PO ₄ ⁻ (g/l)	0	0	1.2	0.8	0.4	0.3	0.2	
	CO ₃ ²⁻ (g/l)	10	9.9	0	0	0.1	0.3	0.2	
	HCO ₃ ⁻ (g/l)	0	0	3.6	3.3	3.4	3.6	3.7	
	H ₂ CO ₃ (g/l)	0	0	0	0	0	0	0	
	SO ₄ ²⁻ (g/l)	—	—	—	—	2	4.6	4.3	
	Na(g/l)	133	134	131	132	132	134	138	
	全 I	(mg/l)	65.2	64.3	56.2	51.7	63.1	59.7	<1
		mol/l換算	5.14E-04	5.07E-04	4.43E-04	4.07E-04	4.97E-04	4.70E-04	—
	I ⁻	(mg/l)	31.5	29.7	17.5	17.7	18	58.6	<1
		mol/l換算	2.48E-04	2.34E-04	1.38E-04	1.39E-04	1.42E-04	4.62E-04	—
	I O ₃ ⁻	(mg/l)	46.5	47.7	53.3	46.9	62.1	1.5	<1
		mol/l換算	2.66E-04	2.73E-04	3.05E-04	2.68E-04	3.55E-04	8.58E-06	—
	液中ヨウ素減少量	mol/l換算	0.00E+00	7.02E-06	7.11E-05	1.06E-04	1.69E-05	4.34E-05	5.14E-04
	Ag(mg/l)	—	—	—	—	—	—	—	<10
	Ba(mg/l)	—	—	—	—	127	127	117	178
	Fe(mg/l)	—	—	—	—	140	<10	<10	<10
K(mg/l)	—	—	—	—	3440	3357	3340	3570	
Ni(mg/l)	—	—	—	—	—	<10	<10	<10	
PH	13.1	13	8.1	8.4	8.7				
硝酸滴下量	—	—	141	—	—				
塩濃度(mg/l)	0.47	0.62	0.73	0.77	0.79				
液量(l)	1	1	1.14	1.14	1.14				
総量(g)			8.2	6	11.5	12.7	10	14.4	
Ba(%)	Iオンクロマト		100	88	89	68	47	77	
P(%)			—	12	11	6	4	3.2	
S(%)			—	—	—	0.6	2.2	3.5	
K(%)			—	—	—	0.7	1.5	0.8	
Fe(%)			—	—	—	10	18	6	
Ni(%)			—	—	—	14	27	8	
BaCO ₃	X線回折分析		+++	—	—	+++	+++	+++	
NaBaPO ₄ (9H ₂ O)				++	++				
NaBaPO ₄				+++	+++				
Ba ₃ (PO ₄) ₂						+			
Ba(NO ₃) ₂				—	—				
NiSO ₄						—	+	+	
FePO ₄						—	+	—	
Fe ₄ [Fe(CN) ₆]						—	—	—	
BaK ₂ SO ₄								—	
BaSO ₄							+	+	
備考			不明ピークあり						

付録表1.3 模擬廃液(エクストルーダ模擬試験)

	廃液中成分		備考
	(g/l)	mol/l	
NaNO ₃	260	3.06E+00	
NaNO ₂	20	2.90E-01	
Na ₂ CO ₃	50	4.72E-01	
Na ₂ HPO ₄	20	1.41E-01	
NaOH	50	1.25E+00	
Na I	0.04	2.67E-04	合計量: 5.2E-04モル
Na I O ₃	0.05	2.53E-04	
Na ₂ SO ₃	4	3.17E-02	
AgNO ₃	0.16	9.42E-04	

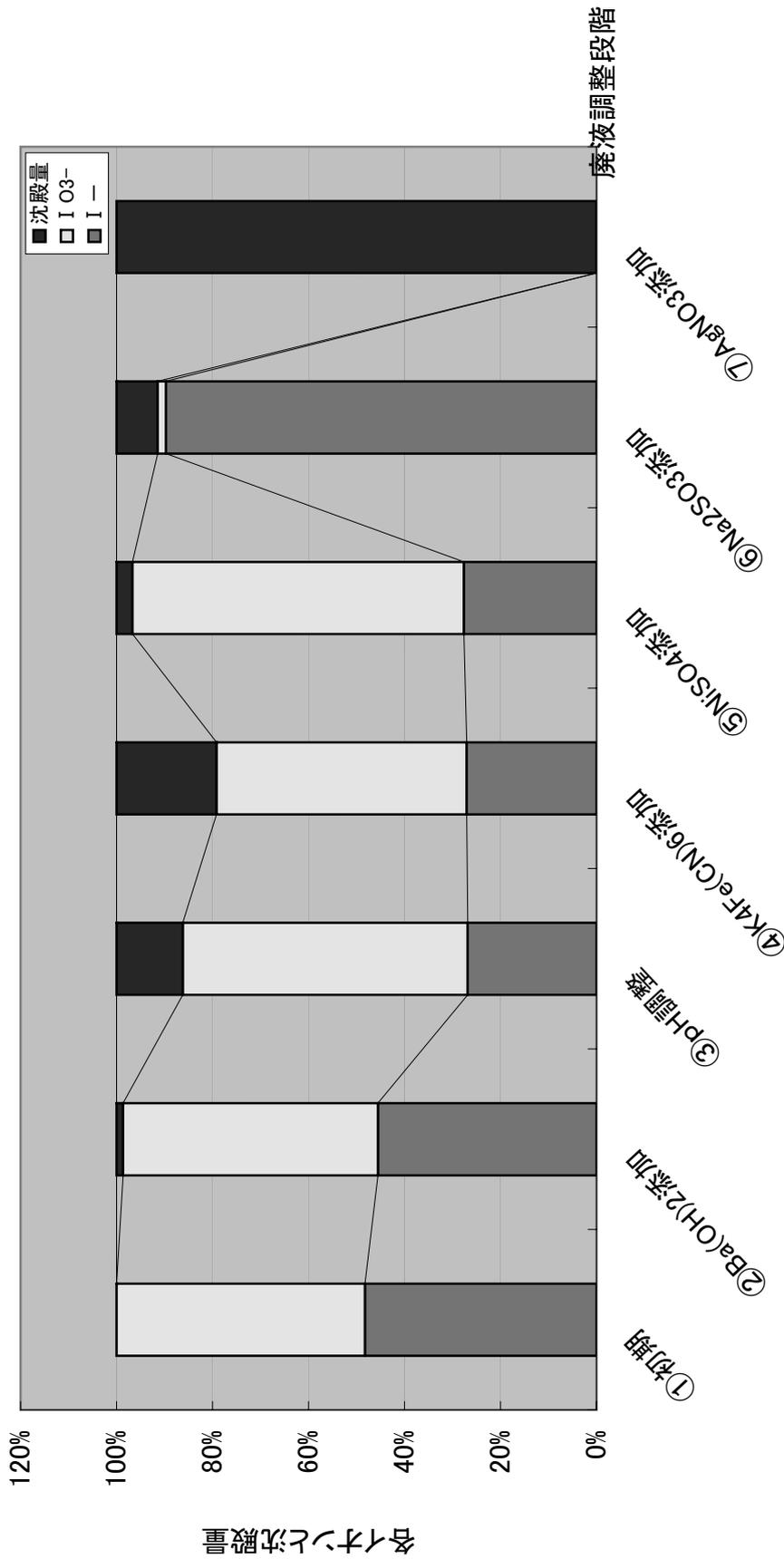
付録表1.4 エクストルーダ模擬試験の結果

	アスファルト固化体中ヨウ素の分析結果		分析方法
	分析結果(g)	モル換算	
I	0.005	3.94E-05	ベンゼンにてソックスレー抽出後の抽出液を減圧加熱しベンゼンを揮発させアスファルトのみとし、アスファルトを燃焼させ吸収液(NaOH+硫酸ヒドラジン)にIを吸収し、イオンクロマトで定量した。
Na I	0.0232	1.55E-04	ベンゼンにてソックスレー抽出後の塩類を純水に溶解しイオンクロマトグラフで検出したヨウ素をNa Iに換算した。
Na I O ₃	<0.0009	—	ベンゼンにてソックスレー抽出後の塩類を純水に溶解し、アスコルビン酸にて還元した後、イオンクロマトグラフでヨウ素を検出しNa Iのヨウ素量を差し引いた。

※固化体中から検出されたヨウ素は、合計 1.94×10^{-4} モルとなり、初期に添加したヨウ素(5.2×10^{-4} モル)の約40%になる。

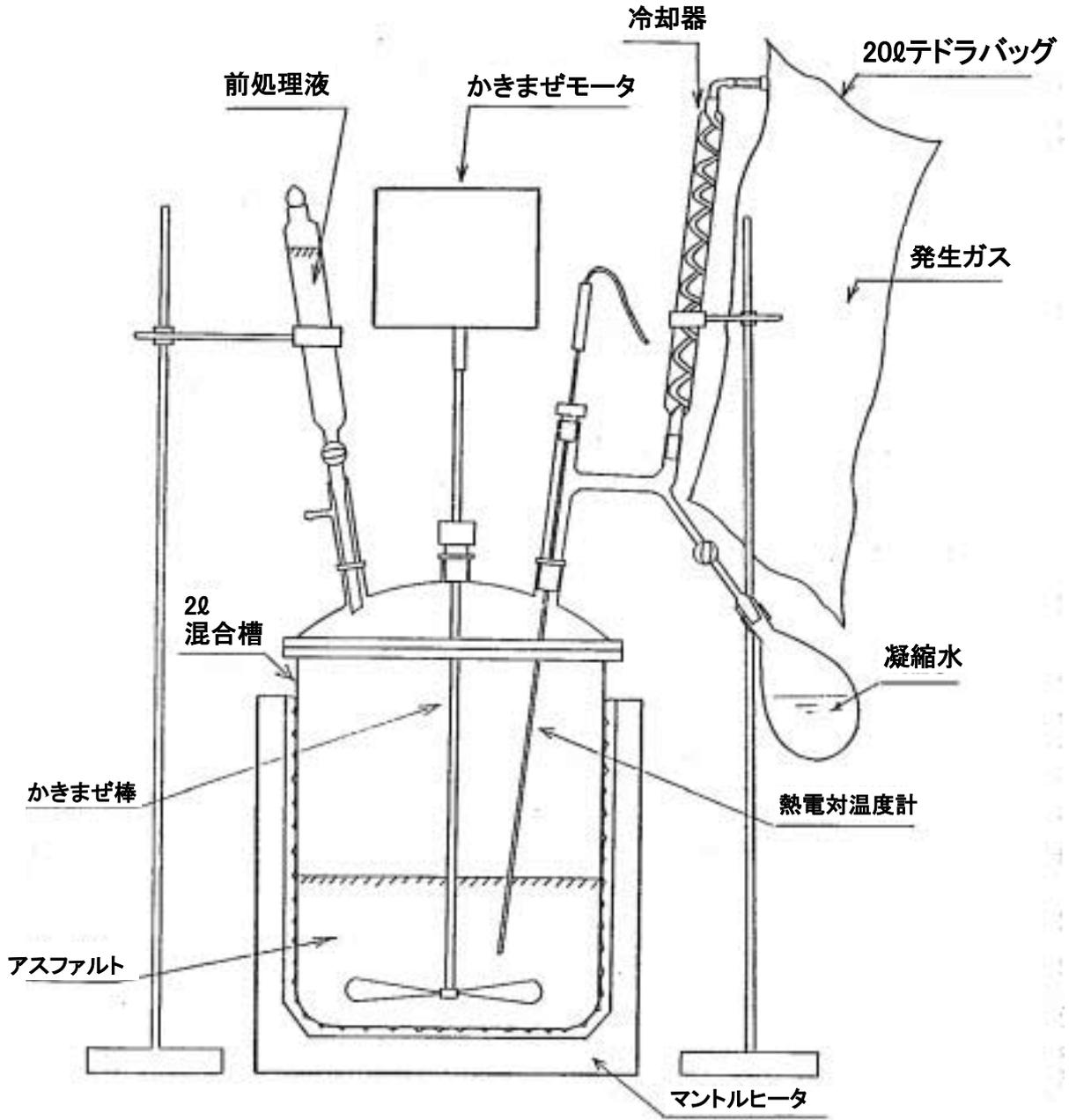
付録表1.5 実固化体(浸出試験の供試体)の廃液調整の状況

	添加試薬	コールド試験	試験1MA 95-26395	試験2LA 86-7889	試験2直前 61-MAW-1st
廃液 (mol/l換算)	Na ₂ CO ₃	4.72E-01	7.50E-01	3.90E-01	3.50E-01
	Na ₂ HPO ₄	1.41E-01	5.05E-02	1.36E-01	
	調整前廃液量 (m ³)		3.42	3.38	
	調整後廃液量 (m ³)		3.93	3.75	
試薬 (mol/l換算)	Na ₂ SO ₄				0.14
	Ba(OH) ₂	0.06	0.05		0.06
	K ₄ Fe(CN) ₆	0.0185	0.0145		0.0185
	NiSO ₄	0.037	0.029		0.037
	Na ₂ SO ₃	0.0317	0.0242		
	AgNO ₃	9.42E-04	3.00E-04		



ヨウ素不溶化前の沈殿塩の主成分は以下の通り。
 ②BaCO₃⇒③NaBaPO₄⇒④NaBaPO₄⇒⑤BaCO₃／NiSO₄

付録図1.1 アスファル固化処理におけるヨウ素挙動解析(廃液調整)



付録図1.2 エクスルーダの模擬実験装置

付 録 - 2

 γ 核種分析における検出効率の誤差の評価

本報告書中で、I - 129 のピーク領域の面積から放射能に換算する際に、外挿により検出効率の計算を行っており、検出効率の近似方法を整理し、誤差について検討することとした。

1. 低エネルギー領域におけるエネルギー効率の近似

今回の試験における γ 核種分析には、検出器に低エネルギー用高純度ゲルマニウム検出器、データ処理部に Genie2000, 検出効率の校正には LabSOCS を用いた。製造元の検出効率校正用のデータとしては、45keV までデータが確認されている。

I - 129 の γ 線のエネルギーは 39.6keV であり、製造元が確認した最低のエネルギー 45keV を極わずかに下回っているが、解析ソフトにより近似計算を行う機能を有していたことから、エネルギーの補正については、近似計算により行うこととした。

近似計算には 5 次式による近似を行う方法もあるが、低エネルギー側で減少傾向をよりよく近似することを考慮し、4 次式を用いた計算を行うこととした。

付録図 2.1 に今回の放射能換算に用いた検出効率曲線（例）を示す。

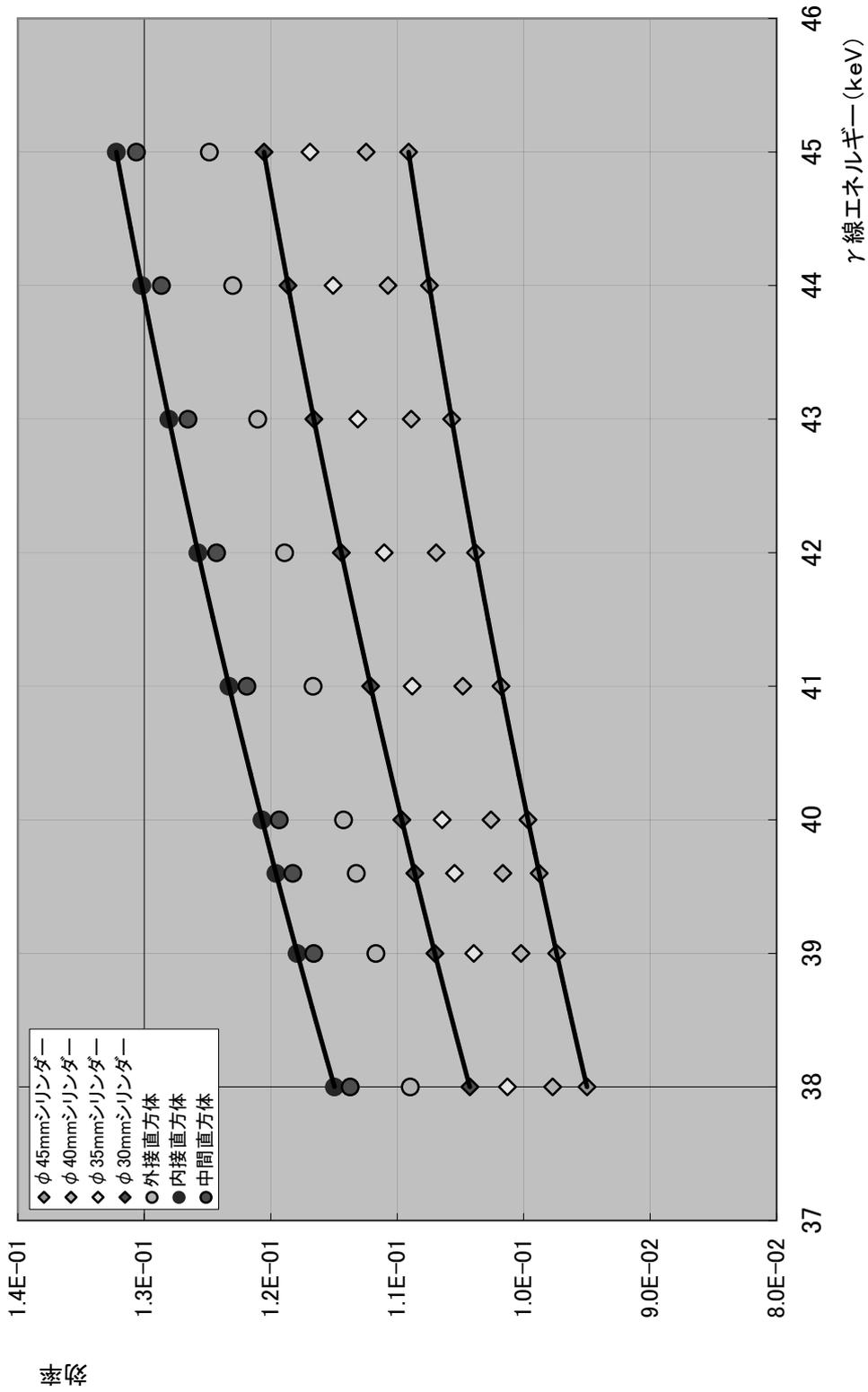
2. 試料の幾何学的形状・寸法の違いによる検出効率の変化

LabSOCS においては、試料の形状に応じて検出効率が計算される。試料の形状については、標準的な試料形状がテンプレートとして登録されており、円柱形試料や直方体形の試料については、テンプレートに合わせて主要な寸法、材料等のデータを入力することで効率が自動計算される。

アスファルト固化体の浸出試験 1 及び浸出試験 3 の供試体並びに浸出液については、直方体又は円柱形状であることから、寸法、材質等のデータを入力することで容易に計算できる。

しかしながら、本試験のうち、アスファルト固化体の浸出試験 2 の供試体は、試料調整の都合から半円柱形の試料としたため、形状が変化した場合の影響について評価することにした。

半円柱形の試料は、円柱形の試料、直方体形の試料の中間的な形状であるため、円柱形状、直方体形状の寸法設定を変化させ、効率の変化を計算してみた。その結果を付録図 2.2 に示す。このデータから、試料形状を変えた場合でもそのことに起因する誤差は 10%~20%程度であることが分かった。今回の評価においては、最も放射能換算した場合に放射エネルギーが大きくなる円柱形（ ϕ 4.5cm）の効率を用いて換算している。



付録図2.2 試料形状による検出効率の変化

付 録 ー 3

過去の浸出試験結果の再考察

1. 硝酸イオンの拡散係数の比較と膨潤に関する再評価について

過去の浸出試験においても硝酸イオンの測定を行った浸出試験のデータがある。

当時は、拡散係数についての評価を行っていないことから、本試験の結果を参考にしつつ、同様の傾向にあるかどうかを確認することにした。

硝酸イオンに関するデータを取得した試験は、過去に 2 回あり、その試験条件及び試験結果を付録表 3.1 に示す。試験結果について、拡散係数を求めるため、横軸に \sqrt{d} をとり、 C_t/C_0 をプロットしてみた（付録図 3.1）。

この図から、40℃にて実施した試験において、浸出期間が 90 日を超えたデータにおいて、極端に C_t/C_0 が上昇している傾向が認められた。この試験の際に、供試体に膨潤が確認されていたことから、これらのデータを無視し、 \sqrt{d} に対して、直線性が認められる期間のデータのみを基に拡散係数を求めることにした（付録図 3.2）。拡散係数を求めた結果を付録表 3.2 に示す。

また、今回の浸出試験でのデータと合わせて、拡散係数と浸出試験の温度との関係をアレニウスプロットしてみた。その結果、報告書本文中にも記載したとおり、浸出液の温度と拡散係数に相関関係が認められ、活性化エネルギーは約 51kJ/mol となった（付録図 3.3）。

また、付録図 3.1 をよくみると、膨潤を生じた前の 56 日目の C_t/C_0 がやや停滞しているようにもみえることから、拡散が一時的に阻害され、塩が結晶水を取り込んで膨張し、その結果として膨潤に至った可能性が考えられる（今回実施した 40～50℃の全面接触の浸出試験においては顕著な膨潤は認められていない）。固化体の膨潤は処分場の設計において考慮すべき事項であるが、膨潤した試料に関するデータが少なく、膨潤の挙動を評価するためには、引き続き固化体の浸出挙動に関するデータを取得していく必要がある。

2. Cs-137 の挙動に係る比較

Cs-137 はアスファルト固化体中に含まれる代表的な核種である。過去のほとんどすべての浸出試験において、Cs-137 の浸出に関するデータが取得されてきたが、さまざまな試験条件で実施されており、固化体の挙動として包括的な評価がなされていない。

そこで、本試験のデータを含めて、Cs-137 の浸出挙動の評価を行うこととした。浸出期間を横軸にして、各試験において測定評価された C_t/C_0 をプロットしてみた（付録図 3.4）。

この図から、Cs-137 の不溶化処理が行われている MA 固化体と、不溶化処理が行われ

ていない LA 固化体においては、明らかに浸出挙動に差異が認められるほか、浸出液の温度による影響も大きいことが分かった。浸出液の温度の影響を評価するため、浸出液の絶対温度の逆数を横軸にとり、各試験の浸出期間内において最大となる浸出比をプロットし、その関係を整理した（付録図 3.5）。Cs-137 の不溶化処理が行われていない LA 固化体の最大浸出比は、不溶化処理が行われた MA 固化体に比べて大きく、いずれの固化体においても、浸出液の温度が高い場合に大きな値となっていることが確認できる。

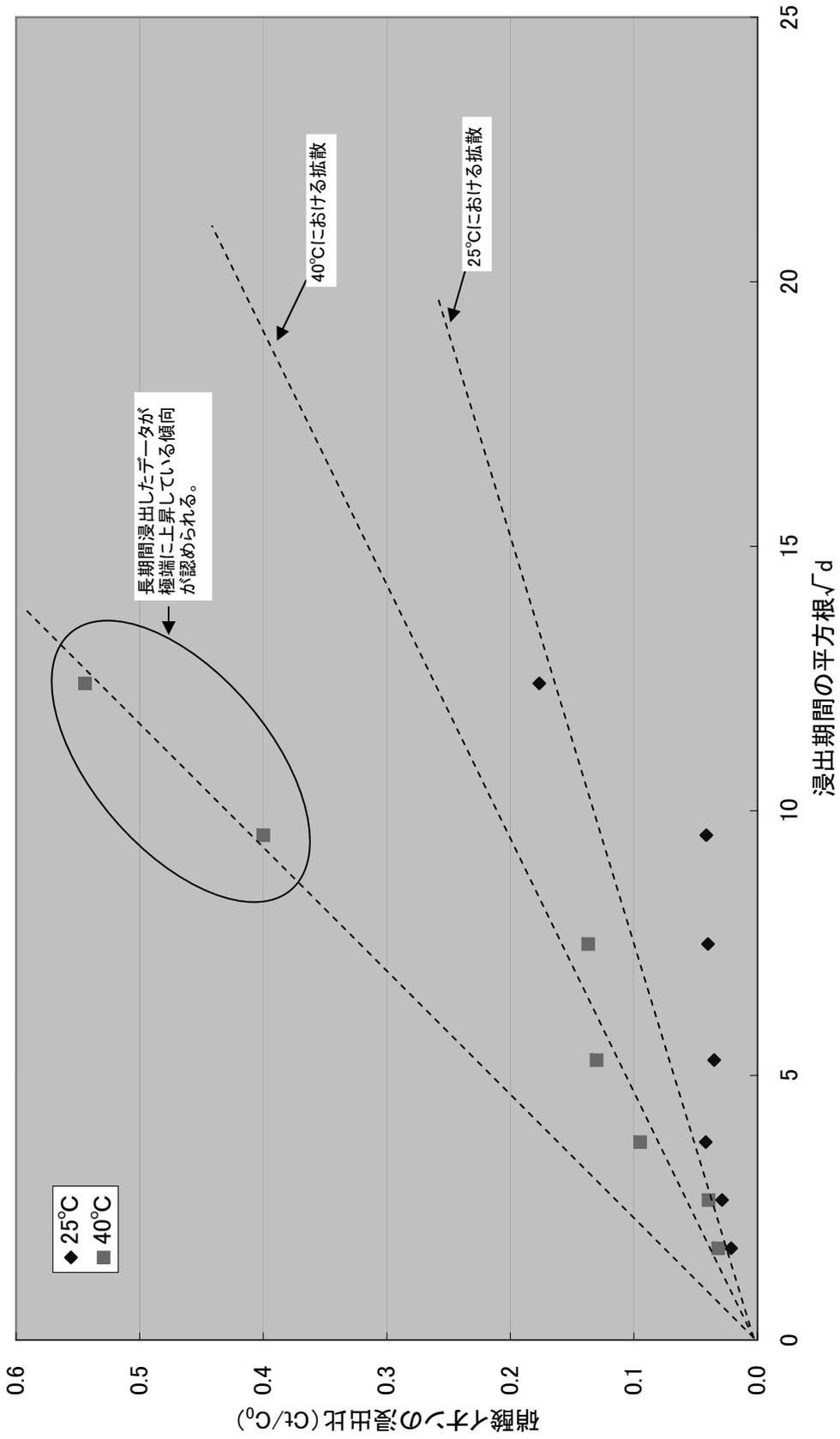
また、Cs-137 の浸出比と浸出期間との関係を両対数グラフにプロットしてみると（付録図 3.7）、浸出期間の初期においては、ほぼ浸出期間の 1/2 乗に比例して浸出比が上昇していることから、この期間は拡散現象に支配されていると考えられる。浸出期間が長くなると、上昇が緩やかになることから、この期間においては拡散現象は支配的ではなく、溶解等の現象に依存していると考えられる。このまま固化体からの浸出がこのまま継続した場合、ほとんどのケースにおいて、Cs-137 が全量放出されるのに 10^7 年程度（ 10^{10} 日以上）の期間が必要になることになる。Cs-137 の半減期は約 30 年であるから、初期に浸出する分を除いては、ほとんど問題とならないと考えられる。

付録表3.1 硝酸イオンの浸出データ(過去の試験)

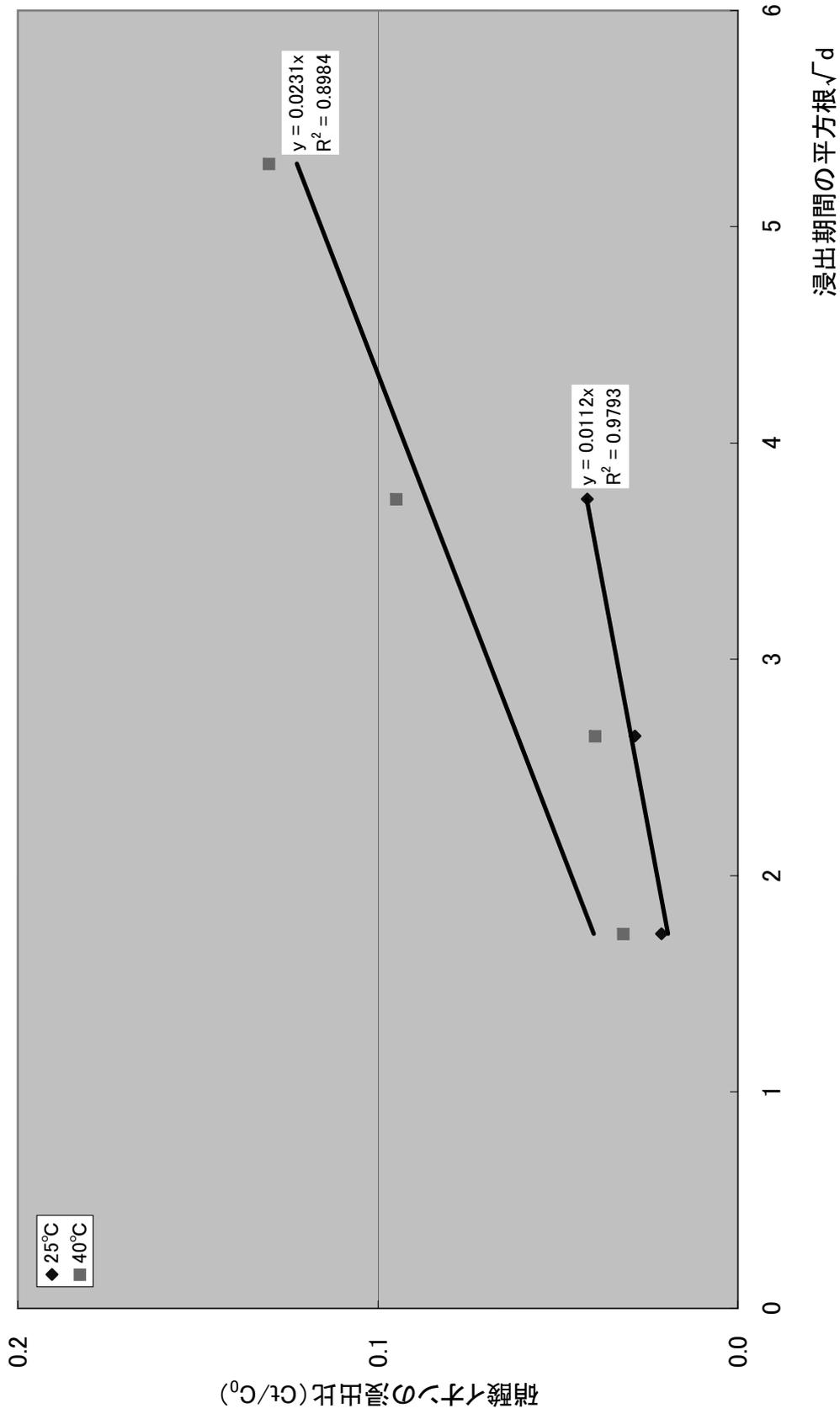
	ドラムNo.	浸出液	浸出液温度		浸出期間(d)	浸出期間の平方根 \sqrt{d}	硝酸イオン浸出比 (C_t/C_0)
			°C	絶対温度K			
試験IV (MA固化体) (MCC法)	93-23809	純水	25	298.15	3	1.732	0.0125
					7	2.646	0.0213
					14	3.742	0.0287
					28	5.292	0.0419
					56	7.483	0.0351
					91	9.539	0.0401
					154	12.410	0.0414
					364	19.079	0.1766
試験VII (MA固化体) (MCC法)	95-27998		40	313.15	3	1.732	0.0317
					7	2.646	0.0396
					14	3.742	0.0948
					28	5.292	0.1301
					56	7.483	0.1369
					91	9.539	0.3998
					154	12.410	0.5442
					364	19.079	1.2378

付録表3.2 硝酸イオンの拡散係数(過去の試験)

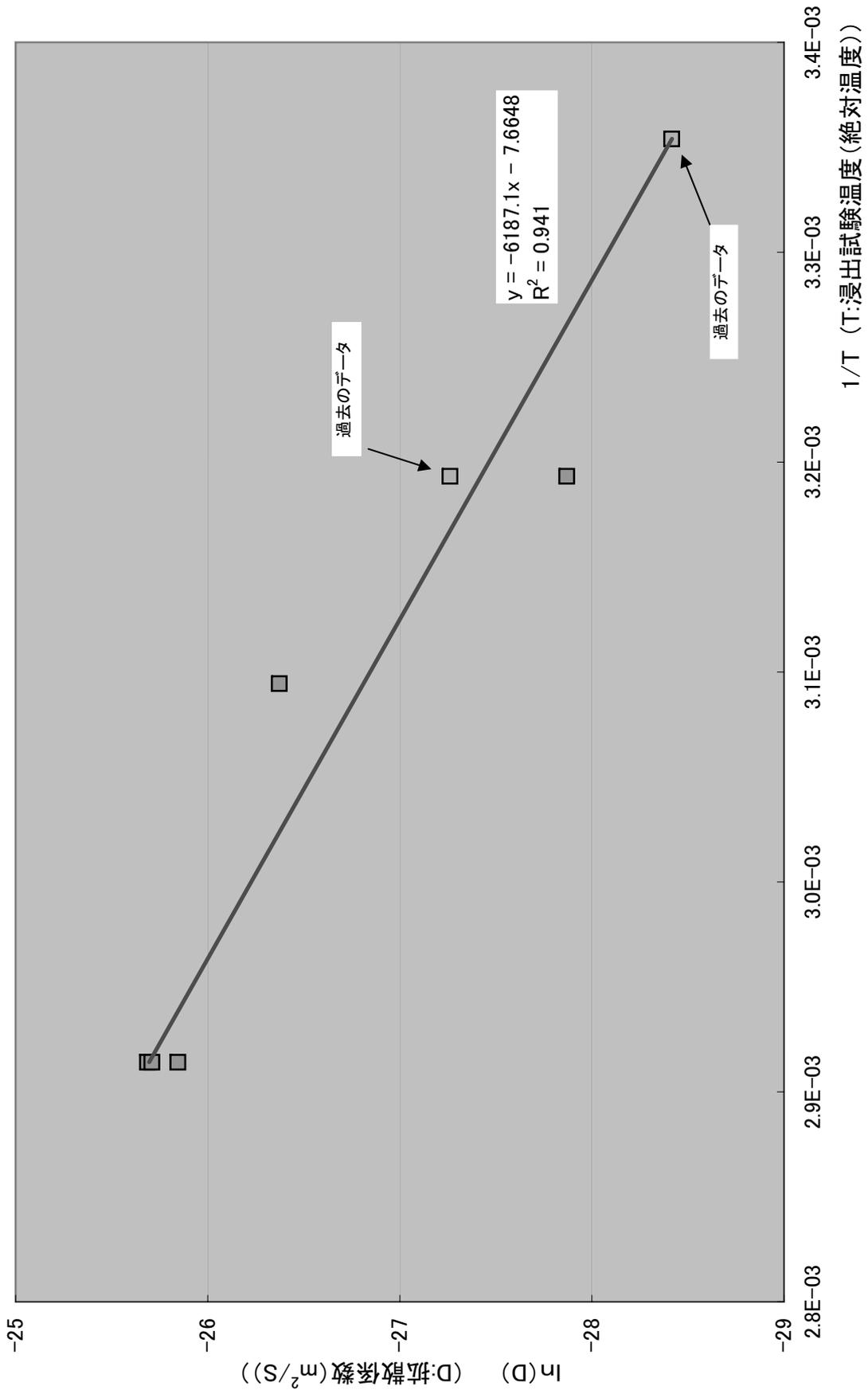
	グラフ傾き	試料体積	試料表面積	拡散係数	備考
試験IV 25°C	0.0112	39.27	19.63	3.94E-04	28日目までのデータから算出した。
試験VII 40°C	0.0231	28.675	16.6	1.25E-03	



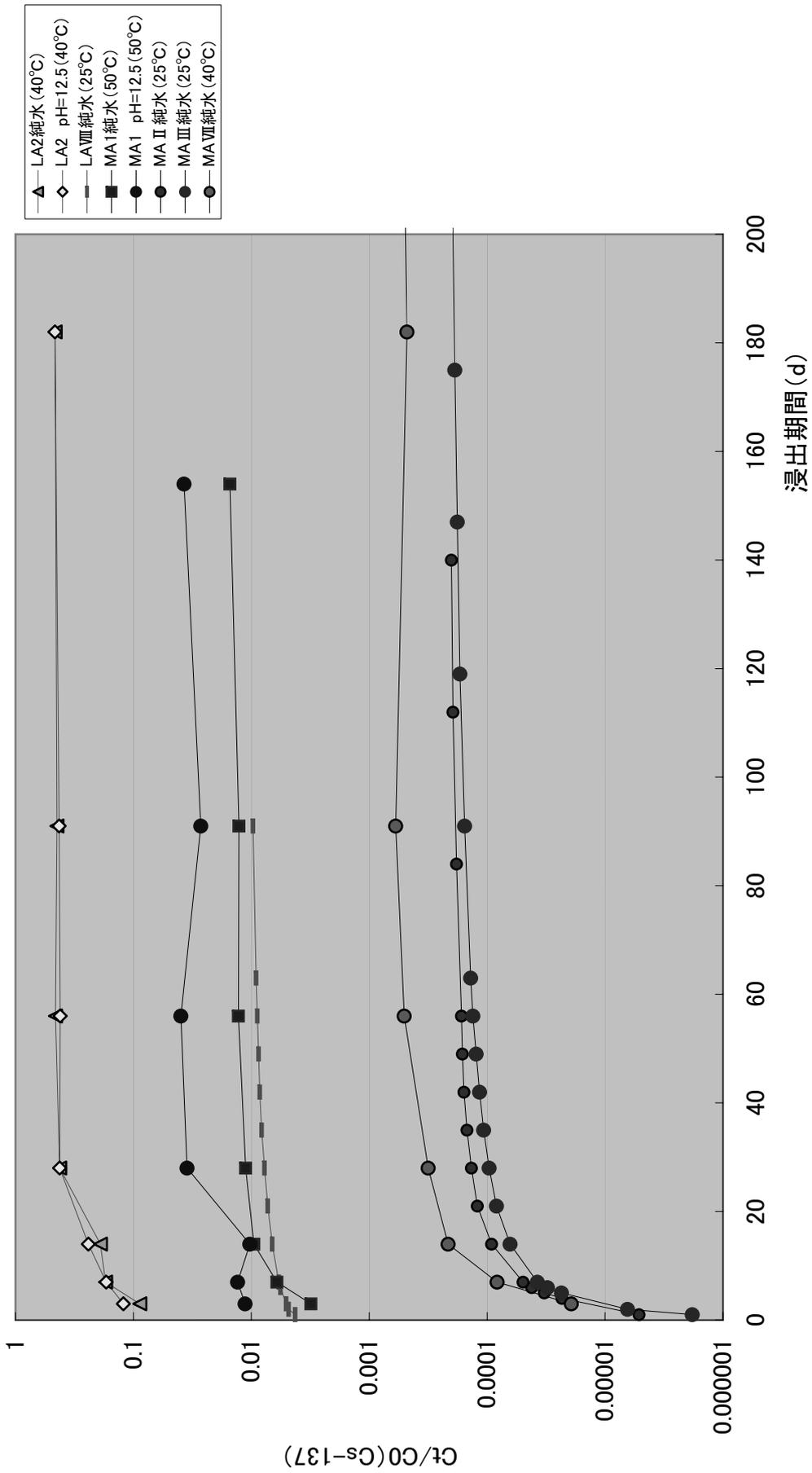
付録図3.1 過去の浸出試験における拡散依存性の評価



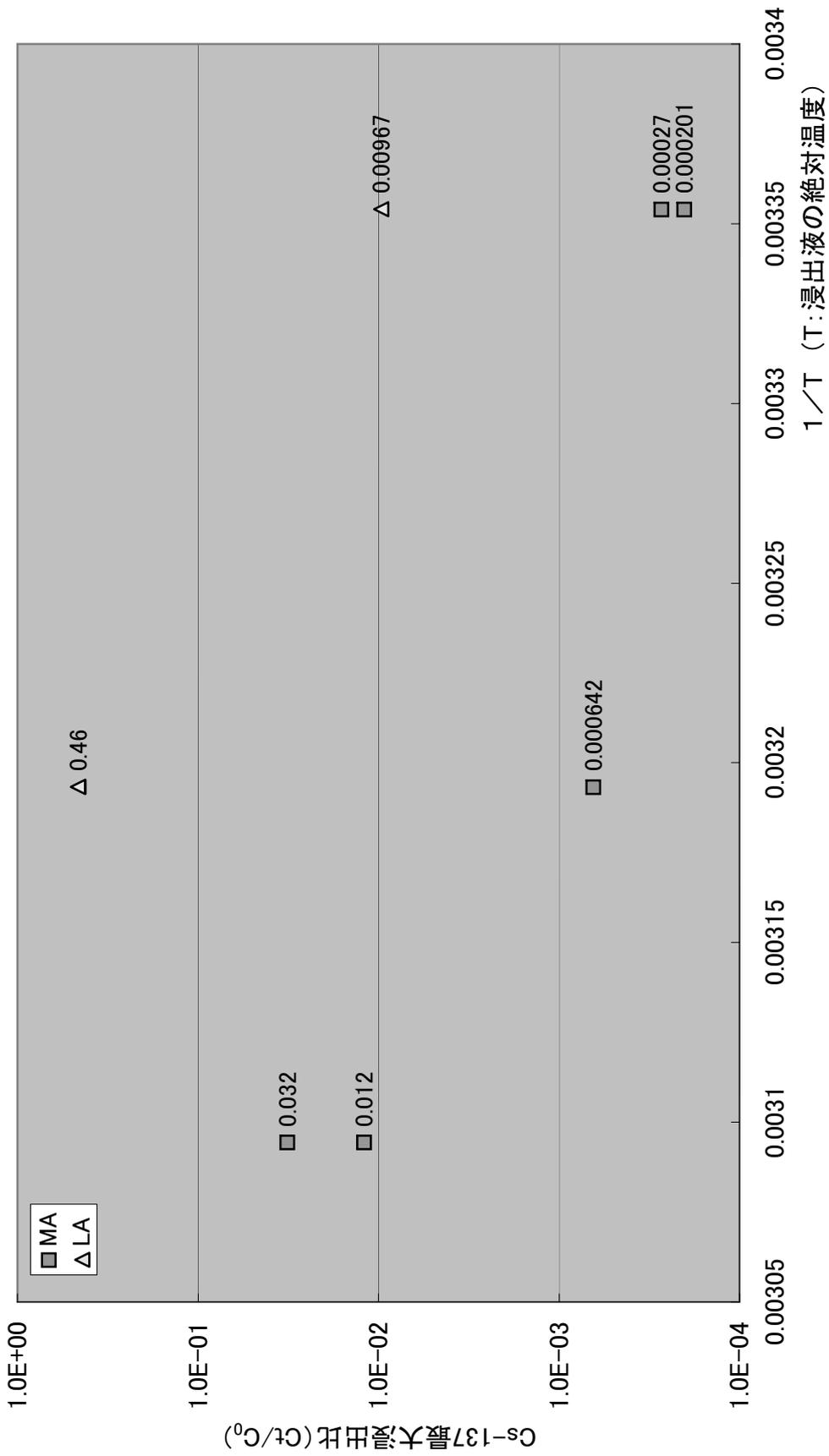
付録図3.2 過去の試験データの拡散係数の評価



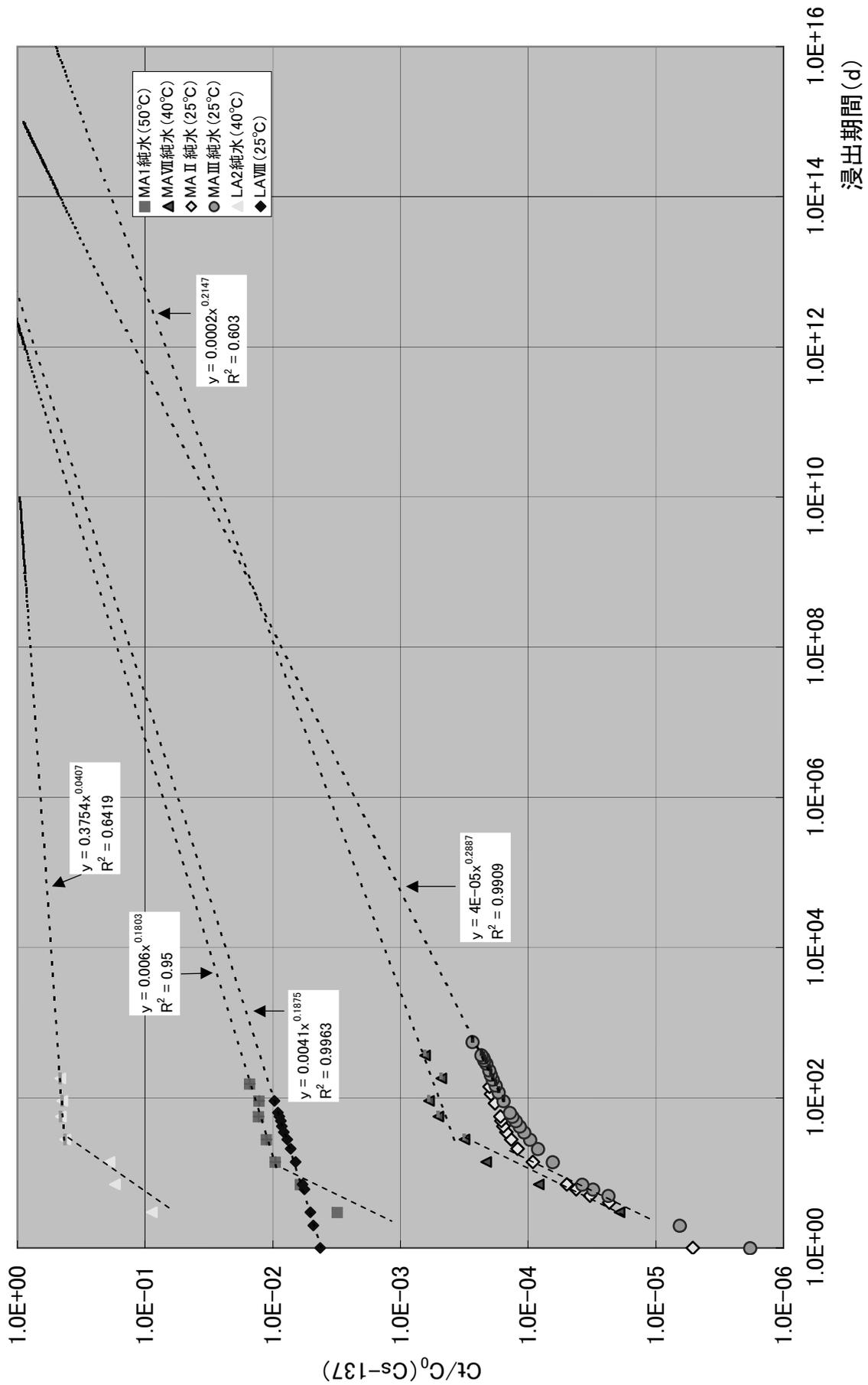
付録図3.3 拡散係数(過去の浸出試験データを含む)と浸出試験温度の関係



付録図3.4 Cs-137浸出データ(過去データ含む)



付録図3.5 Cs-137最大浸出比と温度との関係



付録図3.6 固化体中のCs-137全量が浸出されるまでに要する期間

This is a blank page.

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
物質の量	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 基本単位	
	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	メートル ⁻¹	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (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
(物質の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	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3. 固有の名称とその独自の記号で表される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 ^(a)	rad		m ² ・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ² ・kg ² ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ² ・kg ² ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ² ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ² ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ² ・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 ² ・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
磁束密度	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束	テスラ	T	Wb/m ²	kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光照射度	ルクス	lx	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
(放射性核種の)放射能吸収線量, 質量エネルギー当量	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・m ⁻² ・cd=m ⁻² ・cd
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときにいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 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“1”は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含む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	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	ニュートンメートル	N・m		m ² ・kg ² ・s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m		kg ² ・s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s		m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²		m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²		kg ² ・s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K		m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー (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	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)		m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³		m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m		m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³		m ⁻³ ・s ² ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²		m ⁻² ・s ² ・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m		m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m		m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol		m ² ・kg ² ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)		m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg		kg ⁻¹ ・s ² ・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s		m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr		m ⁴ ・m ⁻² ・kg ² ・s ⁻³ =m ² ・kg ² ・s ⁻³
放射輝度	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 ² ・s ⁻³ =kg ² ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で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 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	海里	1 海里=1852m
ノット	ノット	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600) m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
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=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G ≡ 10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≡ (1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≡ 10 ⁻⁸ Wb
スチル	sb	1 sb = 1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal = 1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
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
X線単位	X unit	1 X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	f	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	
マイクロン	μ	1 μ = 1μm=10 ⁻⁶ m

