

Cs の抽出クロマトグラフィー分離に関する試験(2)

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2005年2月

財団法人 産業創造研究所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

電話:029-282-1122(代表)
ファックス:029-282-7980
電子メール:jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

©核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2005

Csの抽出クロマトグラフィー分離に関する試験(2)

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

星 陽崇*、張 安運*、内田 裕美*、倉岡悦周*

要 旨

本件は、CalixR14を用いる液-液抽出法について抽出クロマトグラフィー法への適用性を調べることを目的として行った。CalixR14を含浸させたCalixR14吸着材およびCalixR14とTBPを含浸させたCalixR14-TBP吸着材を合成し、吸着特性を調べた。液-液抽出および含浸吸着材を用いた吸着試験の結果から、CalixR14抽出剤自体にはCsを抽出する性能が乏しいことが判明した。

一方、CalixR14-TBP吸着材は高濃度硝酸中からCsを吸着可能であり、硝酸濃度が2-6 Mの範囲では分配係数が $10 \text{ cm}^3/\text{g}$ を超えた。Rbに対しては弱い吸着性を示したが、Na、K、SrおよびLaは全く吸着されず、これらの元素とCsの分離係数は100を超えた。また、含浸吸着材からのTBPおよびCalixR14抽出剤の漏洩は微量であることが確認された。

CalixR14-TBP吸着材を充填したカラムを用い、硝酸濃度を4 Mに調整した模擬廃液からの分離試験を実施した。Na、K、SrおよびLaはカラムに吸着されなかったが、CsおよびRbはカラムに吸着され分離された。カラムに純水を送液することで吸着されたCsおよびRbは溶離され、ほぼ定量的に回収された。

本報告書は、財団法人産業創造研究所が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

機構担当課室：東海事業所 環境保全・研究開発センター 先進リサイクル研究開発部 先進再処理技術開発グループ

* (財)産業創造研究所

Study of Cs Recovery by Extraction Chromatography (2)
(Document Prepared by Other Organization, Based on the Contract)

Harutaka Hoshi*, Anyun Zhang*, Hiromi Uchida* and Etsushu Kuraoka*

Abstract

In order to apply CalixR14 extractant to extraction chromatography for Cs separation, basic characteristics of CalixR14 adsorbent were studied. CalixR14 impregnated resin and CalixR14 + TBP impregnated resin were prepared. CalixR14 extractant showed no adsorption for Cs by liquid-liquid extraction and CalixR14 impregnated resin also showed no adsorption for Cs. Therefore, it is concluded that CalixR14 itself has no affinity for Cs.

On the other hand, Cs was adsorbed onto CalixR14-TBP impregnated resin from a concentrated nitric acid solution. The distribution coefficients of Cs were more than $10 \text{ cm}^3/\text{g}$ from 2 to 6 M nitric acid. While Rb showed weak adsorption, Na, K, Sr and La showed no adsorption and separation factor was over 100. A slight amount of CalixR14 and TBP was leaked from impregnated resin into the aqueous phase.

Separation from simulated liquid waste was carried out by using a column packed with CalixR14-TBP adsorbent. Na, K, Sr and La were not adsorbed onto the column, however, Cs and Rb were adsorbed onto the column. Cs and Rb were eluted from the column by water. Cs and Rb were quantitatively recovered.

This work was performed by Institute of Research and Innovation (IRI) under the contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC).

JNC Liaison: Recycle Process Technology Group, Advanced Fuel Recycle Technology Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works.

*Institute of Research and Innovation.

目 次

1. はじめに.....	1
1.1. 研究目的.....	1
1.2. 研究内容.....	1
2. Cs 吸着材の合成.....	2
3. 分配係数の測定.....	4
3.1. 実験方法.....	4
3.1.1. 液-液抽出法.....	4
3.1.2. 時間依存性.....	4
3.1.3. 硝酸濃度依存性.....	5
3.2. 結果と考察.....	6
3.2.1. 予備的検討.....	6
3.2.2. 時間依存性.....	8
3.2.3. 硝酸濃度依存性.....	10
4. 模擬廃液を用いた分離試験.....	12
4.1. 実験方法.....	12
4.2. 結果と考察.....	12
5. おわりに.....	14
参考文献.....	14

表 目 次

表 2.1	調製した含浸吸着材.....	2
表 3.1	Cs との分離係数.....	9
表 4.1	カラム分離試験溶液.....	12
表 4.2	カラム試験の回収率.....	13

図 目 次

図 2.1	1,3-[(2,4-diethyl-heptylethoxy)oxy]-2,4-crown-6-calix[4]arene.....	3
図 2.2	CalixR14/SiO ₂ -P の外観.....	3
図 3.1	液-液抽出による Cs の分配比.....	6
図 3.2	CalixR14 吸着材による Cs の吸着の時間依存性.....	7
図 3.3	分配係数の時間依存性.....	8
図 3.4	CalixR14-TBP 吸着材からの抽出剤の溶出.....	9
図 3.5	分配係数の硝酸濃度依存性.....	10
図 3.6	Cs との分離係数.....	11
図 3.7	CalixR14-TBP 吸着材からの抽出剤の溶出.....	11
図 4.1	カラム分離試験結果.....	13

1. はじめに

1.1. 研究目的

実用化戦略調査研究において、環境負荷を抑制するための研究項目としてセシウム(Cs)の分離回収技術について検討している。Csはアルカリ金属であり、一般的に錯体を形成しにくい。仏国原子力庁(CEA)で開発された方法^{1,2}では、環状化合物を用いた溶媒抽出法によりこれらを回収する。この方法は主抽出剤にカリックスアレン誘導体である 1,3-[(2,4-diethyl-heptylethoxy)oxy]-2,4-crown-6-calix[4]arene (以下、CalixR14 という。)を用いている。

抽出クロマトグラフィー法は、希薄な溶液を対象とする場合に、溶媒抽出法に比べて設備や廃液の最小化の観点で有利であると考えられる。本試験は、CalixR14 を用いる液-液抽出法について抽出クロマトグラフィー法への適用性を調べることを目的として行った。

1.2. 研究内容

ポリマー被覆した多孔質担体 (以下、SiO₂-P という。) に抽出剤(CalixR14)を含浸した吸着材に関する試験を行った。試験に用いる SiO₂-P 担体および Cs 吸着材は合成した。

(1)Cs 吸着材の合成

CalixR14 を SiO₂-P 担体に含浸担持させた吸着材を合成した。

(2)分配係数の測定

Cs(I)、Na(I)、K(I)、Rb(I)、Sr(II)、La(III)の吸着について、バッチ法により分配係数を求めた。時間依存性及び硝酸濃度依存性のデータを得た。また、典型的な吸着条件における抽出剤の水溶液への漏出割合を求めた。

(3)模擬廃液を用いた分離試験

再処理工場からの高放射性廃液を模擬した溶液を用いて、Cs 吸着材を充填したカラムによる吸着・溶離試験を行い、Cs(I)、Na(I)、K(I)、Rb(I)、Sr(II)、La(III)の溶離曲線を求めた。

2. Cs 吸着材の合成

Cs 抽出剤として、図 2.1 に示す 1,3-[(2,4-diethyl-heptylethoxy)oxy]-2,4-crown-6-calix[4]arene (フランス INNOVATION & CHIMINE FINE 社製; 分子式: $C_{64}H_{94}O_{10}$; 分子量: 1023; 純度 > 97%) を使用した。また、協同効果試薬として tri-n-butyl phosphate (以下、TBP という。) を使用した。抽出剤/希釈剤と SiO_2 -P 担体のスラリーをロータリーエバポレーターにより混合した後、希釈剤を加熱除去する方法により含浸吸着材を調製した。

まず、既報³⁾の方法に従って合成した SiO_2 -P 担体を次の手順によりメタノールで洗浄して前処理を行った。 SiO_2 -P 担体約 20 g を容量 300 mL の共栓付き三角フラスコに入れ、メタノールを 100 mL 加え約 1 時間機械的に振蕩させた後、焼結ガラスフィルターによりメタノールを濾過して除去した。このメタノールによる洗浄操作を 3 回繰り返し行った。この洗浄工程により、 SiO_2 -P 担体に付着している不純物及び未反応モノマーが除去される。その後、60 °C で一晩真空乾燥を行った。

次に、精秤した(1) CalixR14 2.0 g、(2) CalixR14 4.0 g、(3) CalixR14 2.0 g+TBP 2.0 g を各々容量 200 mL のナス型フラスコに入れ、これに各 20 cm³ のジクロロメタンを溶剤として添加した後、ナス型フラスコを約 30 min 回転させて Cs 抽出剤を完全に溶解させた。

続いて溶解した溶液に上記洗浄乾燥後の SiO_2 -P 担体を 4 g 入れ、ナス型フラスコをロータリーエバポレーターに設置し、室温にて約 1 時間回転させた。なお、 SiO_2 -P 担体の比重が比較的大きいため、完全混合をはかるため高速回転させた。次いで、ナス型フラスコを 45~50 °C に調整した恒温オイルバスにセットし、回転させながらジクロロメタンを蒸発除去した。ジクロロメタン (沸点 39.9 °C) は容易に蒸発し、無色透明の液体として水冷トラップに回収される。約 1~2 時間程度でジクロロメタンの蒸発がほぼ完了し、続いてナス型フラスコを真空乾燥機に入れて 45 °C で一晩真空乾燥を行った。調製した含浸吸着材の外観を図 2.2 に示す。ナス型フラスコから取り出した乾燥後の吸着材粒子はほとんど凝集せずに良好に分散しており、これを瑪瑙乳鉢で軽く解体混合し含浸吸着材を得た。本試験で調製した含浸吸着材の抽出剤の含浸量を表 2.1 に示す。

表 2.1 調製した含浸吸着材

略号	SiO_2 -P 担体 1 g 当たりの含浸量, g	
	CalixR14	TBP
0.5CalixR14 吸着材	0.5	—
1.0CalixR14 吸着材	1.0	—
CalixR14-TBP 吸着材	0.5	0.5

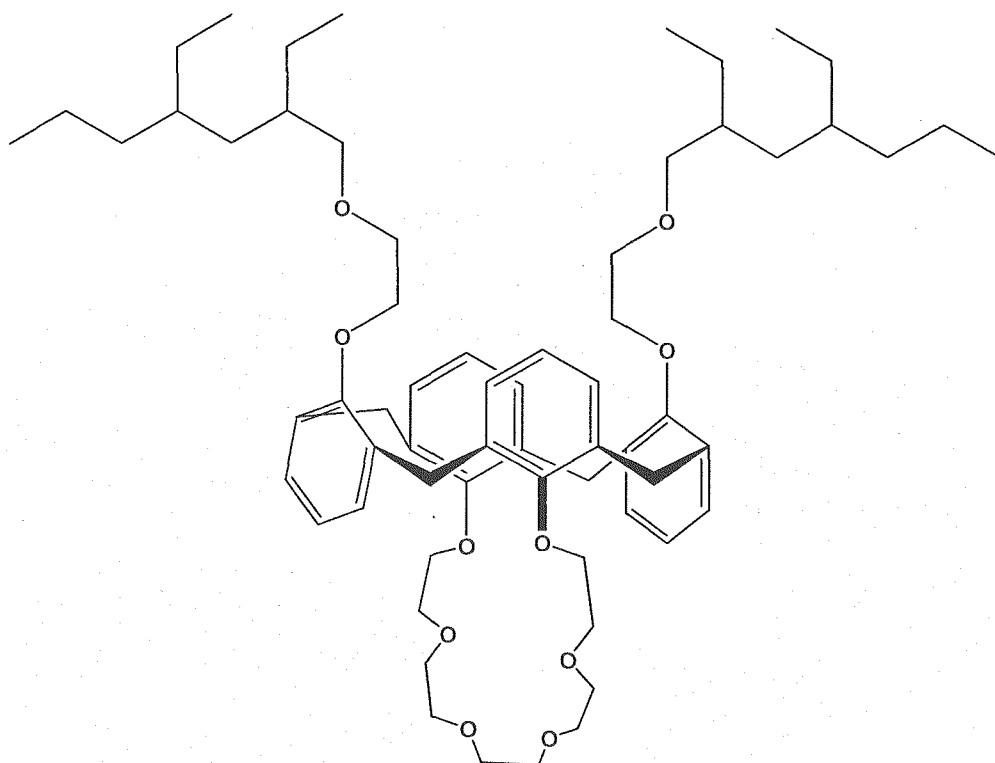


図 2.1 1,3-[(2,4-diethyl-heptylethoxy)oxy]-2,4-crown-6-calix[4]arene
分子式：C₆₄H₉₄O₁₀ 分子量：1023

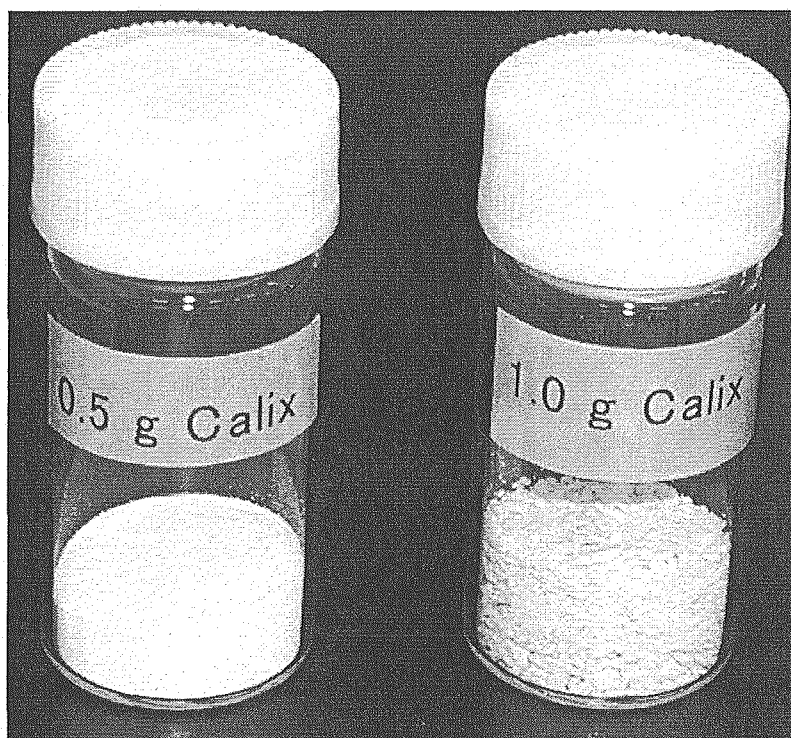


図 2.2 CalixR14/SiO₂-P の外観

3. 分配係数の測定

3.1. 実験方法

3.1.1. 液-液抽出法

液-液抽出法により Cs の分配比を測定した。CalixR14 1.023 g をヘキサンに溶解し、有機相として用いた。ただし、CalixR14 の溶解性が低いことから、ジクロロメタン(5% v/v)を添加し、100 cm³ に定容した。水相は 10 ppm の Cs を含む硝酸もしくは水酸化ナトリウム水溶液を用いた。有機相および水相を各 10 cm³ 分取後、ガラスバイアル瓶に封入し、2 時間恒温振とう槽で振とうした。分相ろ紙を用いて水相を分取し、Cs 濃度を原子吸光(AA-6500; 島津製作所製)あるいは ICP-MS(7500c; Agilent 製)で測定した。ICP-MS を用いた場合、原子番号 Z の金属元素 _ZM の濃度は質量数 A の同位体 ^A_ZM の分析結果より

$$[{}_Z\text{M}] = \frac{[{}_Z^A\text{M}]}{r_A} \quad (1)$$

として算出した。ここで r_A は ^A_ZM の同位体存在比である。分配比(D)は下式より算出した。

$$D = \frac{[\text{Cs}]_{\text{aq},0} - [\text{Cs}]_{\text{aq},\text{eq}}}{[\text{Cs}]_{\text{aq},\text{eq}}} \quad (2)$$

下付の aq は水相を、0 は振とう開始時を、および eq は平衡時を示す。また、水相の pH を pH メーター(AUT-501; 東亜ディーケーケー製)で測定し、pH が 1 未満の場合は濃度既知の NaOH 水溶液による酸塩基滴定でプロトン濃度を測定した。

3.1.2. 時間依存性

Cs(I)、Na(I)、K(I)、Rb(I)、Sr(II)、La(III)の吸着についてバッチ法により分配係数を求めた。上記元素を各 5 mM 含み、硝酸濃度 4 M の試験溶液を調製した。アルカリ金属元素濃度を原子吸光(AA-6500; 島津製作所製)あるいは ICP-MS で、Sr および La の濃度を ICP-AES(SPS-5000; セイコーインスツルメンツ製)で測定した。重量既知のスクリュウキャップ付きガラスバイアル瓶に約 0.25 g の CalixR14 吸着材を分取し、秤量した。更に、上記試験液を 5 cm³ 分取し、25°C に保温した恒温振とう槽で所定時間振とうした。振とう後、使い捨てシリンジおよびフィルターを用いて固-液分離し、金属元素濃度を上記と同様に測定した。金属 M の分配係数(K_d)は下式より算出した。

$$K_d = \frac{C_0 - C_s}{C_s} \times \frac{V}{W} \quad (3)$$

ここで C_0 は M の初期濃度、 C_s は振とう後の水相の M の濃度、 V は水相の体積、および W は乾燥樹脂重量を示す。また、吸着試験後の溶液中のリン濃度を ICP-AES で、全有機炭素濃度を全有機体炭素計(TOC-Vcpn; 島津製作所製)で測定し、以下の方法で抽出剤の溶出率を求めた。液中の TBP 濃度は、測定したリン濃度と TBP 中のリンの重量比から

$$[\text{TBP}] = \frac{[\text{P}]}{0.1137} \quad (4)$$

として算出した。これより液中の TBP 由来の炭素濃度($[\text{C}]_{\text{TBP}}$)を

$$[\text{C}]_{\text{TBP}} = 0.5412 \times [\text{TBP}] \quad (5)$$

として算出した。この結果から、測定した全有機炭素濃度($[\text{TOC}]$)より

$$[\text{CalixR14}] = \frac{[\text{TOC}] - [\text{C}]_{\text{TBP}}}{0.7511} \quad (6)$$

として求めた。

3.1.3. 硝酸濃度依存性

Cs(I)、Na(I)、K(I)、Rb(I)、Sr(II)、La(III)の吸着についてバッチ法により分配係数を求めた。各金属濃度を5 mMに調整した硝酸溶液を調製し、pHをpHメーターで、アルカリ金属元素濃度を原子吸光あるいはICP-MSで、SrおよびLaの濃度をICP-AESで測定した。重量既知のスクリュウキャップ付きガラスバイアル瓶にCalixR14-TBP吸着材を約0.25 g分取し、秤量した。更に、上記硝酸溶液を5 cm³分取し、25°Cに保温した恒温振とう槽で所定時間振とうした。振とう後、使い捨てシリンジおよびフィルターを用いて固-液分離し、pH及び金属元素濃度を上記と同様に測定した。

3.2. 結果と考察

3.2.1. 予備検討

液-液抽出における Cs の分配比を図 3.1 に示す。酸性溶液およびアルカリ性溶液中での Cs の分配比は約 0.2 と低く、ほとんど抽出されなかった。また、含浸吸着材を用いた硝酸溶液からの Cs の吸着試験の結果を図 3.2 に示す。0.5CalixR14 吸着材、1.0CalixR14 吸着材共に Cs の分配係数は $10 \text{ cm}^3/\text{g}$ 未満であった。クラウンエーテル等の抽出剤は一般に抽出速度が遅く、平衡に達するまで時間を要するが、本試験では 100 時間振とうしており、吸着平衡には達したものと考えられる。以上の結果より、CalixR14 抽出剤自体は Cs の抽出性能は乏しいことが判明した。

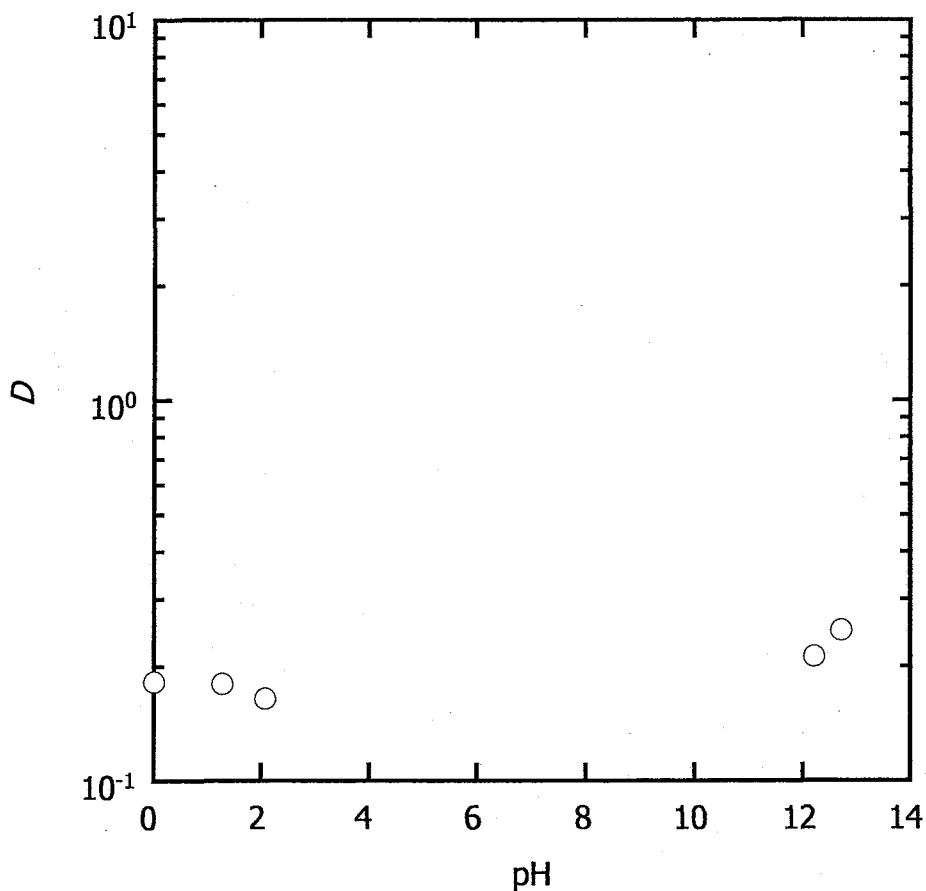


図 3.1 液-液抽出による Cs の分配比

有機相： 0.01 M CalixR14 in ヘキサン (5% v/v ジクロロメタン)

水相： 10 ppm Cs - HNO₃ 又は NaOH 水溶液

温度：25°C

振とう時間：2時間

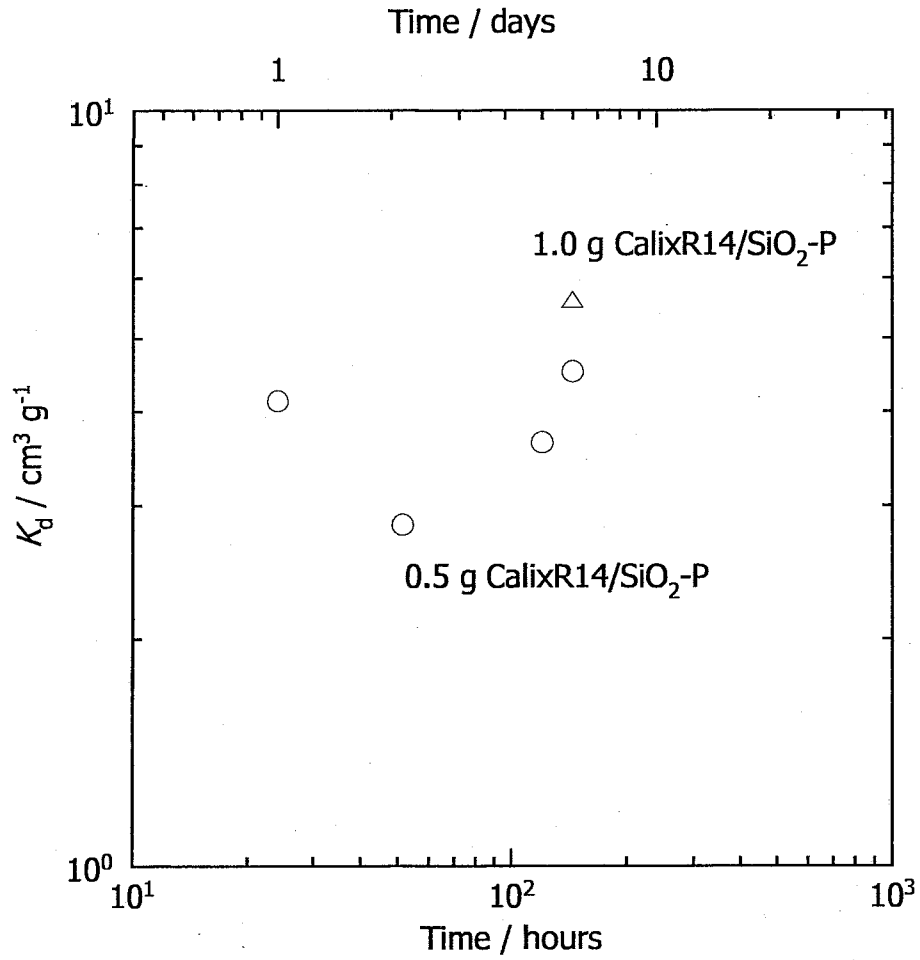


図 3.2 CalixR14 吸着材による Cs の吸着の時間依存性
 吸着材：0.25 g
 水相： 10^{-5} M Cs + 2 M HNO₃ + 0.1 M NaNO₃ 5 cm³
 温度：25°C

3.2.2. 時間依存性

上記の試験結果より、CalixR14 吸着材による Cs の吸着は困難であることが判明した。液-液抽出では CalixR14 にモノアミド等を添加することで Cs を吸着可能であることが報告されている^{2,4,6)}。以下では、CalixR14 と TBP を含浸させた CalixR14-TBP 吸着材を使用した。4 M 硝酸溶液からの Na、K、Rb、Sr、Cs および La の吸着挙動を図 3.3 に示す。Cs は約 30 分で吸着平衡に達しており、分配係数は約 45 cm³/g であった。上述の結果から、CalixR14 単独では Cs を吸着せず、TBP も Cs に対して吸着性能がないことから、協同効果抽出によるものと考えられる。Rb も弱い吸着性を示し、分配係数は約 6.3 cm³/g であった。他の元素は吸着性を示さなかった。表 3.1 には分配係数の比として算出した Cs との分離係数を示す。Rb 以外の元素とは 100 を超える分離係数が得られた。

図 3.4 に CalixR14-TBP 吸着材からの各抽出剤の溶出濃度を示す。それぞれ約 30 分で溶解平衡に達している。TBP の 4 M 硝酸への飽和溶解度は約 0.3 g/dm³(1.1 mM)と報告されている⁷⁾が、本試験での平衡時の TBP 濃度は 4.3×10^{-7} M であった。また、CalixR14 は分子量が大きいことから水相への溶解は TBP よりも少なく、 1.4×10^{-7} M であった。

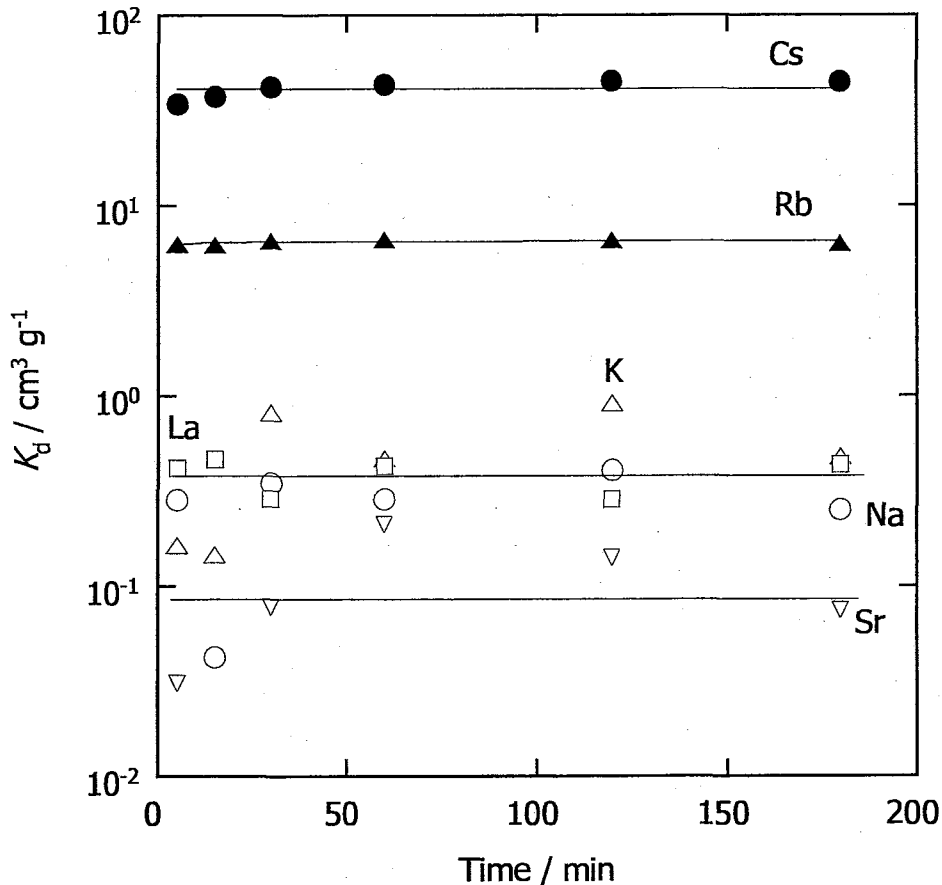


図 3.3 分配係数の時間依存性
 吸着材：CalixR14-TBP, 0.25 g
 水相：4 M HNO₃, 5 cm³
 温度：25°C

表 3.1 Cs との分離係数

元素	Na(I)	K(I)	Rb(I)	Sr(II)	La(III)
分離係数	>200	>100	7.1	>600	>100

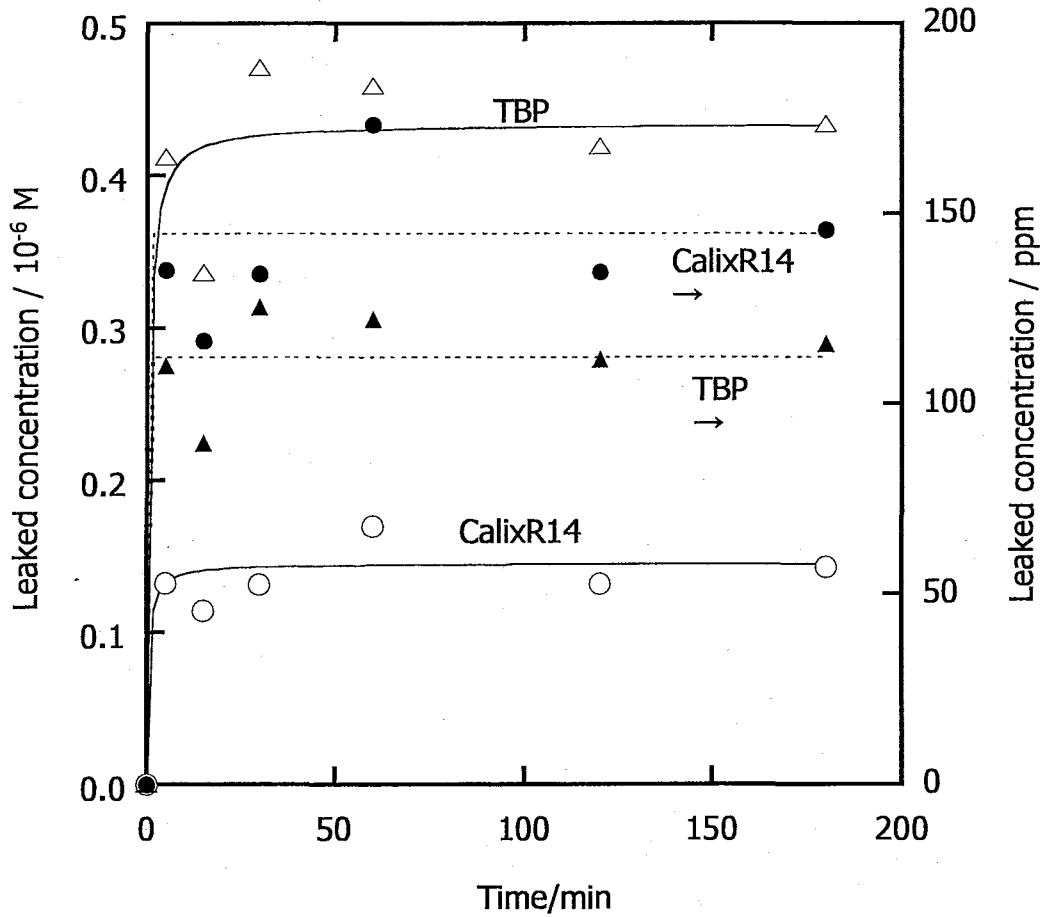


図 3.4 CalixR14-TBP 吸着材からの抽出剤の溶出
 吸着材 : CalixR14-TBP, 0.25 g
 水相 : 4 M HNO₃, 5 cm³
 温度 : 25°C

3.2.3. 硝酸濃度依存性

硝酸濃度を変化させた場合の Na、K、Rb、Sr、Cs および La の吸着挙動を調べた。図 3.5 に分配係数を、図 3.6 に Cs との分離係数を示す。硝酸濃度の増加に伴い Cs の分配係数は増加し、硝酸濃度が 4 M を超えると逆に減少した。これは、高濃度硝酸中では硝酸が抽出されるため、Cs の吸着が抑制されたものと考えられる⁹⁾。K の分配係数は $1 \text{ cm}^3/\text{g}$ 前後と低い値ではあるが、Cs と同様に硝酸濃度の増加と共に分配係数が増加する傾向にあることが認められる。Na、Sr および La については何れの条件においても分配係数が $1 \text{ cm}^3/\text{g}$ 未満であり、CalixR14-TBP 吸着材には吸着されなかった。本試験結果から、アルカリ金属元素の吸着性は $\text{Cs} > \text{Rb} > \text{K} > \text{Na}$ の序列となることが明らかとなった。

CalixR14-TBP 吸着材からの抽出剤の溶出挙動を図 3.7 に示す。CalixR14 および TBP 共に、硝酸濃度の増加に伴い溶出濃度が低下した。重量濃度では、CalixR14 の方が TBP よりも高い値を示したが、これは CalixR14 の方が分子量が大きいためである。モル濃度は CalixR14 の方が小さく、TBP よりも溶解性が低いと考えられる。

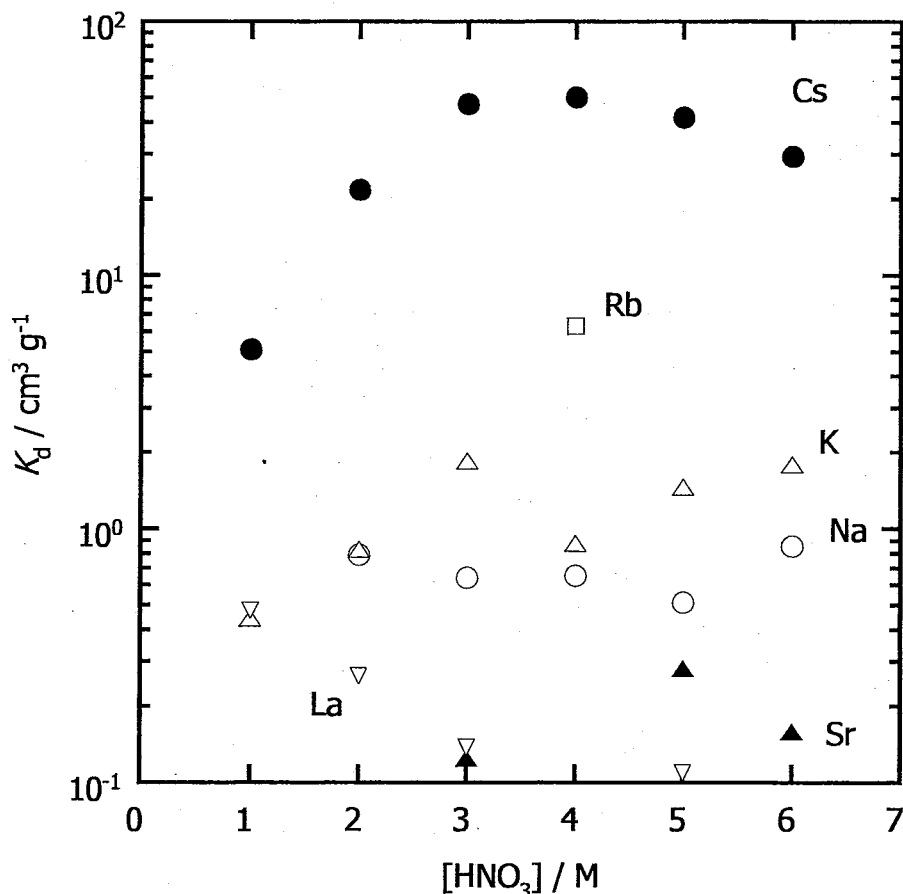


図 3.5 分配係数の硝酸濃度依存性

吸着材：CalixR14-TBP, 0.25 g

水相：HNO₃, 5 cm³

温度：25°C

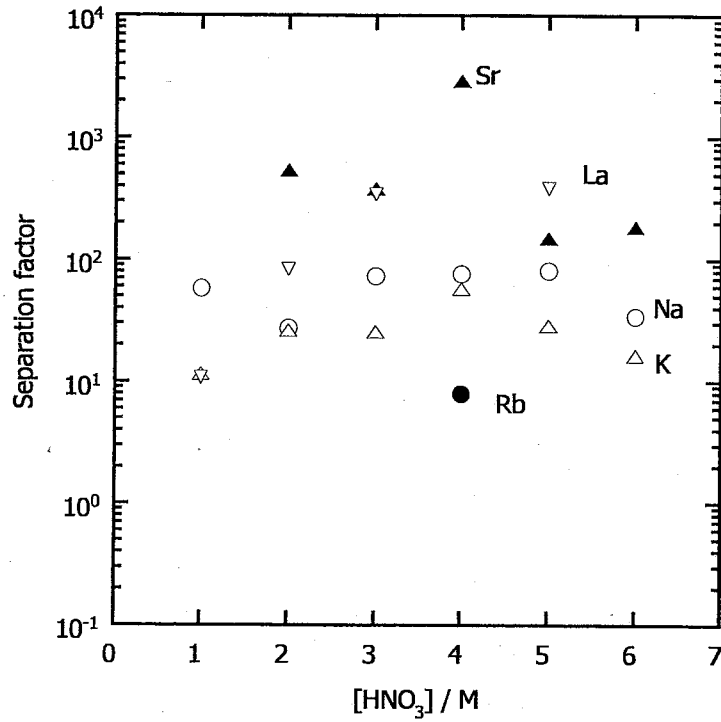


図 3.6 Cs との分離係数

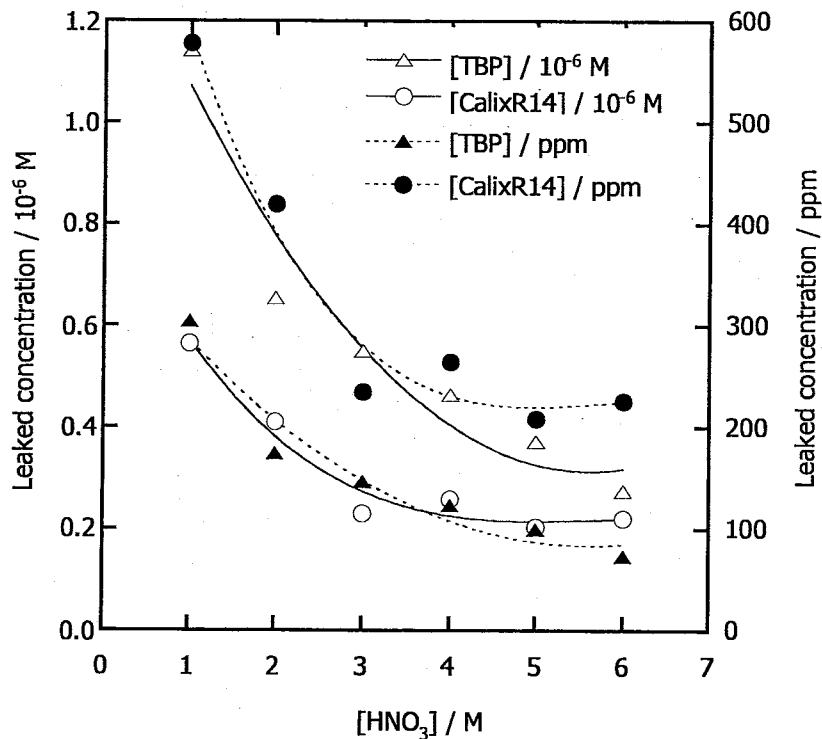


図 3.7 CalixR14-TBP 吸着材からの抽出剤の溶出
 吸着材 : CalixR14-TBP, 0.25 g
 水相 : HNO₃, 5 cm³
 温度 : 25°C

模擬廃液を用いた分離試験

3.3. 実験方法

内径 10 mm、高さ 300 mm のパイレックス製ガラスカラムに CalixR14-TBP 吸着材を充填し(充填高さ 300 mm、ベッドボリューム 23.6 cm³)、分離カラムとして使用した。カラムは予め 4 M 硝酸溶液を十分送液し、コンディショニングを行い、試験中は 25°C に保温した。表 3.2 に示す供給液、洗浄液及び溶離液を流速 1 cm³/min で送液し、流出液を 10 cm³ 毎に分画して採取した。各元素の濃度を原子吸光、ICP-AES あるいは ICP-MS で分析し、pH を測定した。

表 3.2 カラム分離試験溶液

	組成	体積 / cm ³
供給液	[HNO ₃] = 4 M 各 5 mM Cs, Na, K, Rb, Sr, La	20
洗浄液	4 M HNO ₃	60
溶離液	H ₂ O	180

3.4. 結果と考察

前述のバッチ試験の結果を元に模擬高レベル廃液を用いてカラム法による主要な核分裂生成物の分離挙動を調べた。図 3.8 にカラム分離試験の結果を示す。Na、Sr および La はカラムに吸着されず、ほぼ素通りする形で溶出された。K もほぼ同様の位置に溶出されたが、ピーク位置は Na 等に比べやや後方であり、わずかながら吸着性を有することが明らかとなった。一方、Cs および Rb は一旦カラムに吸着され、純水を送液して硝酸濃度を低下させることで溶離回収された。溶出液を分画捕集しているため、Cs と Rb のピーク位置が同一であるが、実際の溶離ピークは Rb が前方に位置すると考えられる。各元素の回収率を表 3.3 に示す。概ね 1 に近い値が得られており、全元素についてほぼ定量的に回収された。

本試験では Cs の溶離液として純水を使用したため、Cs 回収部に Rb の約 58% が混入したが、希硝酸等を用いて段階的に硝酸濃度を下げることで Cs と Rb の分離度を高めることが可能である。

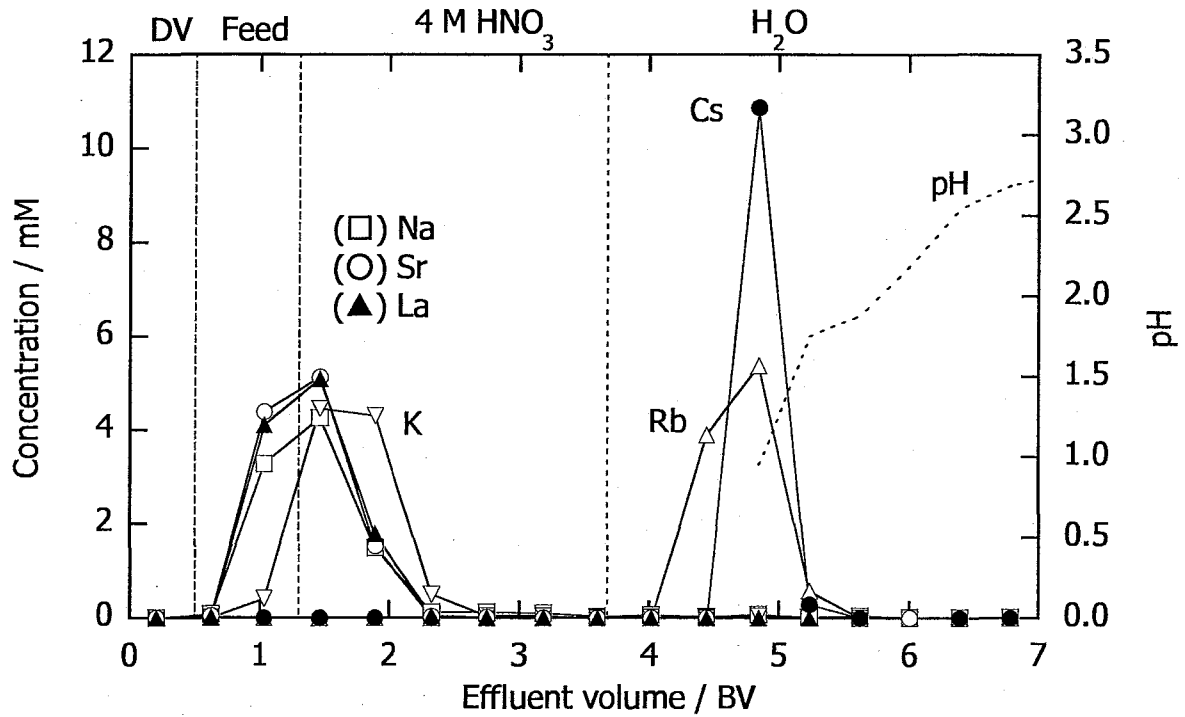


図 3.8 カラム分離試験結果

カラム：φ10 mm×h300 mm, CalixR14-TBP

流速：1 cm³/min

温度：25°C

表 3.3 カラム試験の回収率

元素	Na(I)	K(I)	Rb(I)	Cs(I)	Sr(II)	La(III)
回収率	1.05	1.07	0.99	1.19	1.19	1.19

4. おわりに

本件では、CalixR14 を用いる液-液抽出法について、抽出クロマトグラフィー法への適用性を検討し、以下の結論が得られた。

- 1) CalixR14 を含浸させた CalixR14 吸着材および CalixR14 と TBP を含浸させた CalixR14-TBP 吸着材を合成した。
- 2) 液-液抽出および含浸吸着材を用いた吸着試験の結果から、CalixR14 抽出剤自体には Cs を抽出する性能が乏しいことが判明した。
- 3) CalixR14-TBP 吸着材は高濃度硝酸中から Cs を吸着可能であり、硝酸濃度が 2-6 M の範囲では分配係数が $10 \text{ cm}^3/\text{g}$ を超えた。Rb に対しては弱い吸着性を示したが、Na、K、Sr および La は全く吸着されず、これらの元素と Cs の分離係数は 100 を超えた。
- 4) 含浸吸着材からの TBP および CalixR14 抽出剤の漏洩は微量であることが確認された。
- 5) CalixR14-TBP 吸着材を充填したカラムを用い、硝酸濃度を 4 M に調整した模擬廃液からの分離試験を実施した。Na、K、Sr および La はカラムに吸着されなかったが、Cs および Rb はカラムに吸着され分離された。カラムに純水を送液することで吸着された Cs および Rb は溶離され、ほぼ定量的に回収された。

参考文献

- 1 A. Duhart, et al.: "Selective removal of cesium from model nuclear waste solutions using a solid membrane composed of an unsymmetrical calyx[4]arenebiscrown-6 bonded to an immobilized polysiloxane backbone", J. Membrane Sci., Vol. 185, pp. 145~155 (2001)
- 2 N. Simon, et al.: "CAESIUM EXTRACTION FROM ACIDIC HIGH LEVEL LIQUID WASTES WITH FUNCTIONALIZED CALIXARENES", ATALANTE 2004, Nimes, France, June 21-24, 2004
- 3 Y.-Z. Wei, et al.: "Studies on the Separation of Minor Actinides from High-Level Wastes by Extraction Chromatography Using Novel Silica-Based Extraction Resins", Nucl. Technol., Vol. 132, pp. 413~423 (2000)
- 4 T. G. Levitskaia, et al.: "Selective carrier-mediated cesium transport through polymer inclusion membranes by calyx[4]arene-crown-6 carriers from complex aqueous mixtures", Radiochim. Acta, Vol. 90, pp. 43~52 (2002)
- 5 N. Simon, et al.: "Caesium Extraction by Calixarene Molecules: Some Aspects of Extraction Kinetics", ATALANTE 2004, Nimes, France, June 21-24, 2004
- 6 N. Simon, et al.: "Cs Selective Extraction from High Level Liquid Wastes with Crown Calixarenes: Where are we today?", ATALANTE 2004, Nimes, France, June 21-24, 2004
- 7 日本原子力研究所 燃料サイクル安全工学部: 「再処理プロセス・化学ハンドブック」、JAERI-Review 2001-038, pp. 446 (2001)
- 8 S. V. Nesterov, "Crown ethers in radiochemistry. Advances and prospects", Russ. Chem. Rev., Vol. 69, pp. 769~782 (2000) [Eng. Tranl. of Uspekhi Khimii, Vol. 69, pp. 840~855 (2000)]