

文章编号:0253-9950(2007)01-0001-07

## $^{91}\text{Sr}$ 亚快化分离方法的研究

杨志红, 丁有钱, 张生栋, 郭景儒, 崔安智

中国原子能科学研究院 放射化学研究所, 北京 102413

**摘要:**为了精确测量 $^{91}\text{Sr}$ 的衰变数据,需要分离出放化纯的 $^{91}\text{Sr}$ 样品。以衰变链中的母子体关系为依据,“两步延迟分离法”为基础,对裂变产物中 $^{91}\text{Sr}$ 的快速分离方法进行了研究。分别以聚三氟氯乙烯(Kel-F)粉和大孔树脂(Amberlite XAD-7)作支撑体,制备了2种二环己基-18-冠-6的萃取色层树脂,均能快速、定量吸附Sr,吸附的Sr易于用去离子水解吸下来,研制出一套相应的亚快化分离装置。将两步延迟分离原理与冠醚萃取色层法相结合,设计了用2个萃取色层柱前后串联的快速放化分离流程,整个操作流程可在200s左右完成。用辐照 $^{235}\text{U}$ 的裂变产物溶液进行了全流程验证,得到的 $^{91}\text{Sr}$ 溶液为放化纯,Sr的化学回收率大于90%,对 $^{92}\text{Sr}$ 的去污因子大于 $10^2$ ,对其它主要核素的去污因子大于 $10^3$ ,结果满足衰变数据测量的要求。

**关键词:** $^{91}\text{Sr}$ ; 二环己基-18-冠-6-Kel-F 萃取色层树脂; 二环己基-18-冠-6-Amberlite 萃取色层树脂; 萃取色层法; 亚快化分离装置

中图分类号: O657.4 文献标识码: A

## Study on Sub-Rapid Separation of $^{91}\text{Sr}$

YANG Zhi-hong, DING You-qian, ZHANG Sheng-dong, GUO Jing-ru, CUI An-zhi

China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275(126), Beijing 102413, China

**Abstract:** For accurately measurement of the decay data of  $^{91}\text{Sr}$ , the prerequisite was to obtain pure  $^{91}\text{Sr}$  specimens. Based on the analysis of parent-daughter relationships in the three relevant fission product decay chains, a two-step delayed chemical separation procedure for rapid isolation of  $^{91}\text{Sr}$  from neutron-irradiated  $^{235}\text{U}$  sample was developed. Two types of dicyclohexano-18-crown-6 extraction chromatographic resins were prepared with Kel-F powder and Amberlite XAD-7, respectively, as support. Sr can be rapidly and quantitatively absorbed on both resins and easily eluted from them with deionized water. A corresponding sub-rapid separation device was manufactured in which two delayed extraction chromatographic columns in series were incorporated. The usefulness of the procedure and device was verified by using real fission products solution obtained by dissolution of neutron-irradiated  $^{235}\text{U}$ . The whole process is completed within 200 s. The  $^{91}\text{Sr}$  product is radioactively pure, with an overall recovery better than 90%. The decontamination factor is greater than  $10^2$  for  $^{92}\text{Sr}$ , and better than  $10^3$  for other radionuclides. The quality of  $^{91}\text{Sr}$  specimens thus prepared can meet the requirements for its decay data measurements.

**Key words:**  $^{91}\text{Sr}$ ; dicyclohexano-18-crown-6-Kel-F extraction chromatographic resin; dicyclo-

hexano-18-crown-6-amberlite extraction chromatographic resin; extraction chromatographic; sub-rapid separation device

$^{91}\text{Sr}$  是短寿命丰中子核素 ( $T_{1/2} = 9.63 \text{ h}$ )。为了准确测定其衰变数据,首先要从中子辐照  $^{235}\text{U}$  生成的裂变产物中分离出放化纯的  $^{91}\text{Sr}$ 。在  $^{91}\text{Sr}$  的同位素中,  $^{92}\text{Sr}$  的半衰期 ( $T_{1/2} = 2.71 \text{ h}$ ) 与  $^{91}\text{Sr}$  很接近,如果直接从裂变产物中提取  $^{91}\text{Sr}$ ,得到的产品中必然存在大量的  $^{92}\text{Sr}$ ,这将对衰变数

据测量产生较大影响。通过对相关衰变链(图 1)的分析,可采用“两步延迟分离法”<sup>[1]</sup>,即:  $^{235}\text{U}$  经短时间热中子辐照后,  $^{92}\text{Rb}$  和  $^{93}\text{Rb}$  很快就衰变成  $^{92}\text{Sr}$  和  $^{93}\text{Sr}$ ,此时快速从裂变产物中分离出 Rb,得到纯  $^{91}\text{Rb}$ ,将  $^{91}\text{Rb}$  放置衰变,得到无同位素杂质的  $^{91}\text{Sr}$ 。

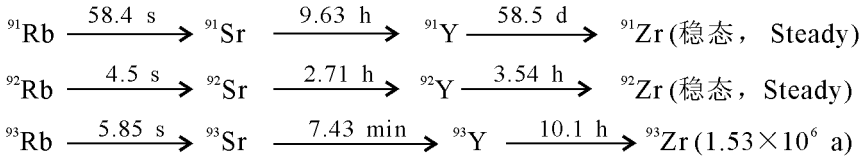


图 1 与 Sr 同位素相关的衰变链

Fig. 1 Decay chains involved Sr isotopes

此“两步延迟分离法”的主要对象是 Rb-Sr 分离。欲达到此目的,可以直接从裂变产物中提取 Rb,也可以从裂变产物中除掉 Sr。而提取 Rb 的方法文献报道较少,通常较费时。

文献 [2-4] 报道了二环己基-18-冠-6 (DCH18C6) 对 Sr 有明显的孔径-直径效应,可选择性的萃取 Sr。将这种冠醚制成萃取色层树脂 (Sr. spec, EICrom Industries, Inc.) 可在一定的硝酸浓度范围内定量吸附 Sr 而与其它元素分离, Sr 可以用  $0.05 \text{ mol/L HNO}_3$  或者去离子水解吸。该萃取色层法吸附、解吸条件简单,且易于实现自动和快速分离。文献 [5-7] 应用这种冠醚萃取色层法分离了样品中长寿的  $^{90}\text{Sr}$  ( $T_{1/2} = 28.8 \text{ a}$ ), 将该方法应用于短寿命核素的快速分离尚未见报道。本工作拟将该冠醚萃取色层法应用于短寿命核素  $^{91}\text{Sr}$  的分离中,同时拟研制一套相应的快速分离装置,以建立  $^{91}\text{Sr}$  的快速放化分离流程。

## 1 方法原理

两步延迟分离法以选择合适的辐照、冷却和分离时间为基础。假设辐照的  $^{235}\text{U}$  靶量为  $60 \mu\text{g}$  时,计算了不同辐照时间下所产生的  $^{91}\text{Rb}$ ,  $^{92}\text{Rb}$ ,  $^{139}\text{Cs}$  3 个核素的放射性活度,绘出变化曲线并示于图 2。由图 2 可知,辐照  $30 \sim 40 \text{ s}$  时,  $^{92}\text{Rb}$  的放射性活度已达到最大值,  $^{91}\text{Rb}$  的放射性活度在辐照  $300 \text{ s}$  时达到最大值。辐照时间太长,一

些寿命较长的核素(如  $^{139}\text{Cs}$ ) 的相对含量将会增大;辐照时间太短,  $^{91}\text{Rb}$  的活度较低。因此,选择辐照时间为  $30 \sim 60 \text{ s}$ 。

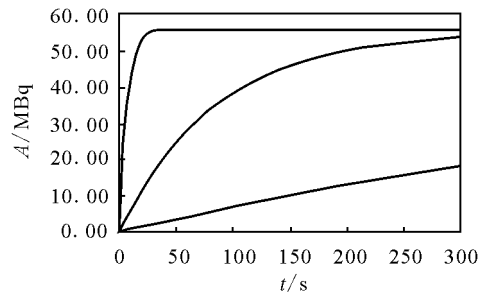


图 2  $^{91}\text{Rb}$ ,  $^{92}\text{Rb}$ ,  $^{139}\text{Cs}$  放射性活度随辐照时间的变化曲线

Fig. 2 Relationship between the activity of  $^{91}\text{Rb}$ ,  $^{92}\text{Rb}$ ,  $^{139}\text{Cs}$  and irradiation period

选择不同的冷却时间,计算出  $^{91}\text{Rb}$  和  $^{92}\text{Rb}$  相应的放射性活度,绘出变化曲线并示于图 3。由图 3 可知,冷却约  $1 \text{ min}$  时,  $^{92}\text{Rb}$  就全部衰变成  $^{92}\text{Sr}$ ,此时可快速进行 Rb-Sr 分离,提取出  $^{91}\text{Rb}$ 。冷却时间越长,  $^{91}\text{Rb}$  衰变得越多,回收率越低。因此,冷却时间最好选择在  $1 \text{ min}$  左右。

将分离出的  $^{91}\text{Rb}$  放置使其衰变成  $^{91}\text{Sr}$ 。图 4 计算了不同放置时间下  $^{91}\text{Sr}$  放射性活度的增长曲线。由图 4 可知,放置约  $5 \sim 10 \text{ min}$  时,  $^{91}\text{Sr}$  的放射性活度可达到最大值,此时可分离 Sr。放置时间过长,一些较长寿命核素的活度会相对增加。

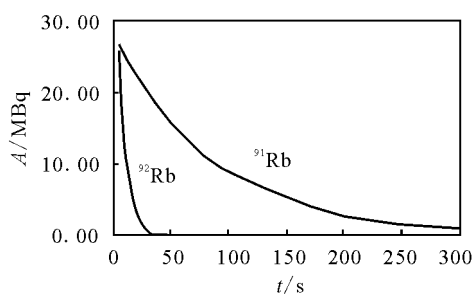


图 3 <sup>91</sup>Rb, <sup>92</sup>Rb 的放射性活度  
随冷却时间的变化曲线

Fig. 3 Relationship between the activity of  
<sup>91</sup>Rb, <sup>92</sup>Rb and cooling period

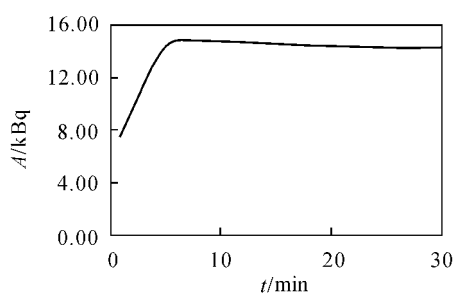


图 4 <sup>91</sup>Sr 放射性活度随生长时间的变化曲线

Fig. 4 Relationship between the activity of  
<sup>91</sup>Sr and growing period

通过上述分析可知,要想分离出纯的无同位素干扰的<sup>91</sup>Sr,首先必须能在辐照<sup>235</sup>U靶溶液后约 1 min 完成 Rb-Sr 分离,提取出 Rb 或者除掉 Sr。

文献[8]对 Sr. spec 冠醚萃取色层树脂的性能进行了详细研究。研究结果指出,在 23~25 ℃、树脂粒径为 50~100 μm 条件下, Sr 的分配比  $D(\text{Sr})$  随着硝酸浓度的增加而增大,在  $\text{HNO}_3$  浓度为 8 mol/L 时,  $D(\text{Sr})$  达到 100, 此时  $D(\text{Sr})/D(\text{Rb}) \approx 330$ 。因此,在该酸度条件下可以实现 Sr-Rb 分离。

## 2 实验部分

### 2.1 试剂和仪器

**2.1.1 试剂** 2 mg/mL <sup>235</sup>U (丰度为 90%) 的硝酸铀酰溶液,兰州核燃料厂提供; 4',4''(5'')-二特-丁基二环己基 18-冠-6 (DCH18C6), 比利时,北京化学试剂公司经销; 大孔树脂 Amberlite XAD-7, 荷兰 Fluka 化学公司,北京化学试剂公司经销; 聚三氟氯乙烯 (Kel-F 粉), 149~177 μm; <sup>85</sup>Sr 示踪剂,在中国原子能科学研究院重水反应堆中辐照  $\text{SrCl}_2$  得到; 正辛醇, 甲醇, 硝酸, 均为分

析纯。

**DCH18C6-Kel-F 萃取色层树脂:** 称 1 g Kel-F 粉作支撑体, 加入 0.4 mL 1 mol/L 的 DCH18C6-正辛醇溶液, 搅拌均匀, 红外灯下烘干后, 浸泡于去离子水中待用。

**DCH18C6-Amberlite 萃取色层树脂:** 将 Amberlite XAD-7 研磨、过筛, 称取 125~149 μm 的该树脂 1 g 作支撑体, 加入甲醇搅成浆液状, 加入 0.7 g 1 mol/L 的 DCH18C6-正辛醇溶液, 慢慢搅拌几分钟, 红外灯下烘干后, 浸泡于去离子水中待用。

**2.1.2 仪器** GEM-70200-plus 型 HPGe  $\gamma$  能谱仪探测系统, 美国 ORTEC 公司; 阱型 NaI 多道  $\gamma$  谱仪, 美国 ORTEC 公司。

### 2.2 实验方法

**2.2.1 DCH18C6-Kel-F 和 DCH18C6-Amberlite 萃取色层柱对 Sr 的吸附、解吸** 分别取一定量的 DCH18C6-Kel-F 和 DCH18C6-Amberlite 萃取色层树脂, 湿法装柱, 柱子分别为  $\phi_{\text{内}} 5 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ , 柱体积 0.6 mL 和  $\phi_{\text{内}} 4 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ , 柱体积 0.5 mL 的 2 个玻璃柱。常温常压下, 流速定为 0.3 mL/min。先用 6 mL 的 8 mol/L  $\text{HNO}_3$  预平衡柱子。以 <sup>85</sup>Sr 为示踪剂, 以 1 mL 8 mol/L  $\text{HNO}_3$  溶液作为上柱介质, 再用 2 mL 8 mol/L  $\text{HNO}_3$  洗涤, 最后用 5 mL 去离子水解吸。每支测量管收集 1 mL 流出液, 用 NaI 多道  $\gamma$  谱仪测量每管的计数率。

其它实验条件不变, 加压改变流速为 2 mL/min, 分别研究这 2 个萃取色层柱对 Sr 的吸附、解吸情况。

**2.2.2 对辐照<sup>235</sup>U 裂变产物的分离** 将含 60 μg <sup>235</sup>U 的硝酸铀酰溶液 (1 mL 8 mol/L  $\text{HNO}_3$  介质) 密封于聚乙烯管中, 装入底部带有圆洞的兔子盒, 用气体传输系统打入中国原子能科学研究院的重水反应堆中 (中子注量率  $\phi \approx 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 辐照 30 s。出堆后由气体传输系统直接将靶子打到自行研制的预先保持抽空状态的亚快化分离装置上, 使裂变产物溶液通过第 1 个 DCH18C6-Kel-F 萃取色层柱 ( $\phi 5 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ )。流出液放置约 10 min 后, 过第 2 个 DCH18C6-Kel-F 萃取色层柱 ( $\phi 5 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ )。用 3 mL 8 mol/L  $\text{HNO}_3$  洗涤第 2 个柱子 2 次, 用 3 mL 去离子水解吸第 2 个柱子 (产品), 最后用 3 mL  $\text{H}_2\text{O}$  解吸第 1 个柱子。将每个操作步骤的流出

液收集于 1 支测量管中,用 HPGe  $\gamma$  多道谱仪测量核素的放射性活度。用 Gammavision 5.2 解谱软件进行解谱,以所有流出液中各核素放射性活度之和作为总量进行计算。

### 3 结果和讨论

#### 3.1 萃取色层柱对 Sr 的吸附、解吸

通过对自行制备的 2 种冠醚萃取色层树脂对 Sr 的吸附、解吸实验发现,当流速为 0.3 mL/min,用 8 mol/L  $\text{HNO}_3$  上柱和洗涤时,DCH18C6-Kel-F 萃取色层柱与 DCH18C6-Amberlite 萃取色层柱均能定量吸附 Sr,用 3 mL(约 5 个柱体积)去离

子水可将 99% 的 Sr 解吸下来。淋洗曲线示于图 5(a,b)。

当流速提高至 2 mL/min,用 8 mol/L  $\text{HNO}_3$  上柱和洗涤时,DCH18C6-Kel-F 萃取色层柱与 DCH18C6-Amberlite 萃取色层柱均能定量吸附 Sr,用 3 mL 去离子水可解吸 99% 的 Sr,淋洗曲线示于图 5(c,d)。这表明所制备的这 2 种冠醚萃取色层树脂均可用于  $^{91}\text{Sr}$  的快速分离。但实验发现,这 2 种冠醚萃取色层树脂的稳定性较差,重复使用 2 次以后就会发生穿透现象。因此,每次实验前应更换新的树脂。

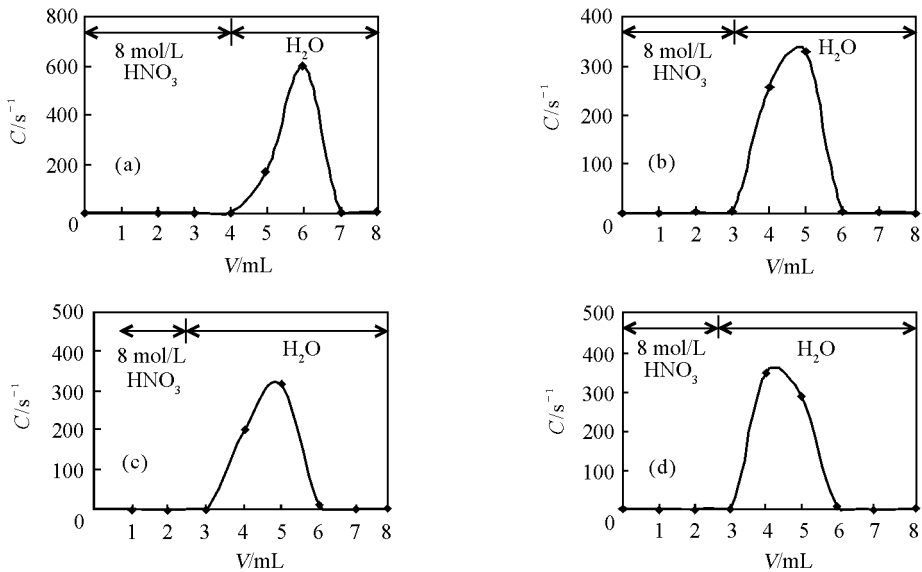


图 5 不同流速下 2 种萃取色层树脂对 Sr 的淋洗曲线

Fig. 5 Elution curves of Sr under different flow velocity by DCH18C6-Kel-F and DCH18C6-Amberlite

(a),(c)——DCH18C6-Kel-F,(b),(d)——DCH18C6-Amberlite;

(a),(b)——0.3 mL/min,(c),(d)——2 mL/min

#### 3.2 DCH18C6-Kel-F 萃取色层柱对 $^{235}\text{U}$ 裂变产物核素的吸附

鉴于 2 种冠醚萃取色层树脂对 Sr 的吸附效果相似,本工作仅选用 DCH18C6-Kel-F 萃取色层柱进行了其对  $^{235}\text{U}$  裂变产物溶液中各放射性核素的吸附和洗涤实验,实验结果列入表 1。从表 1 数据可以看出,以 1 mL 8 mol/L  $\text{HNO}_3$  为介质的  $^{235}\text{U}$  裂变产物溶液上柱时,DCH18C6-Kel-F 萃取色层柱可定量吸附 Sr,并且吸附牢固,用 3 mL 8 mol/L  $\text{HNO}_3$  洗涤时 Sr 没有损失;Rb 仅有少量被吸附在柱上,约 99.5% 的 Rb 可直接流过滤柱子。这样利用 1 个萃取色层柱可以实现 Rb-Sr 分离的目的。由表 1 还可以看出,其它一些核素

在柱上也有一定的吸附,尤其是 Sr 的同族元素 Ba 的吸附量较大,约为 70%。但是,除了 Ba 之外,其它核素用 3 mL 8 mol/L  $\text{HNO}_3$  基本可以洗掉。而不被吸附的杂质核素将随 Rb 一起流出。因此,在 Rb 衰变成 Sr 后,还必须进行 Sr 与这些杂质核素的分离。根据以上实验结果,可以使含 Sr 的流分再经过 1 个萃取色层柱,将 Sr 吸附,除掉其它杂质核素。

#### 3.3 亚快化分离装置

要实现  $^{235}\text{U}$  样品辐照后 1 min 内完成 Rb-Sr 的分离,必须建立一套相应的快速分离装置,以解决从铀靶中快速取样并且快速过柱的问题。

表 1 DCH18C6-Kel-F 萃取色层柱对<sup>235</sup>U 裂变产物溶液中各放射性核素的吸附率及洗涤率

Table 1 Percents of absorption and washing of fission production radionuclides of <sup>235</sup>U by DCH18C6-Kel-F

| 核素<br>(Nuclide)   | $Y_{abs}/\%$ | $Y_{was}/\%$ | 核素<br>(Nuclide)   | $Y_{abs}/\%$ | $Y_{was}/\%$ |
|-------------------|--------------|--------------|-------------------|--------------|--------------|
| <sup>86</sup> Rb  | 0.5          | 99           | <sup>128</sup> Sn | 31           | 28           |
| <sup>92</sup> Sr  | 100          | 0            | <sup>134</sup> Te | 23           | 26           |
| <sup>94</sup> Y   | 33           | 26           | <sup>134</sup> I  | 25           | 28           |
| <sup>97</sup> Nb  | 42           | 26           | <sup>139</sup> Ba | 66           | 34           |
| <sup>101</sup> Mo | 37           | 28           | <sup>141</sup> Ba | 70           | 40           |
| <sup>101</sup> Tc | 23           | 25           | <sup>142</sup> La | 42           | 31           |
| <sup>107</sup> Rh | 36           | 40           | <sup>143</sup> La | 49           | 32           |
| <sup>131</sup> Sb | 44           | 26           | <sup>146</sup> Pr | 28           | 24           |

图 6 为本工作设计的<sup>91</sup>Sr 亚快化分离装置。A 为研制成功的气、液两用针式自动抽样装置。装置上端与“气动传输系统”的末端管道相连,是靶盒的进入端。装置底部安装有 2 个高低不同的  $\phi 0.8$  mm 医用针头,较低的针头用于从靶盒中抽

取液体(或气体),较高的针头则起到进气减压的作用。装置底部的侧面开有 2 个圆孔,用于排掉管路中多余的气体。靶盒为聚乙烯材料,两针头可借助跑兔系统自身的动力直接刺入靶盒中。

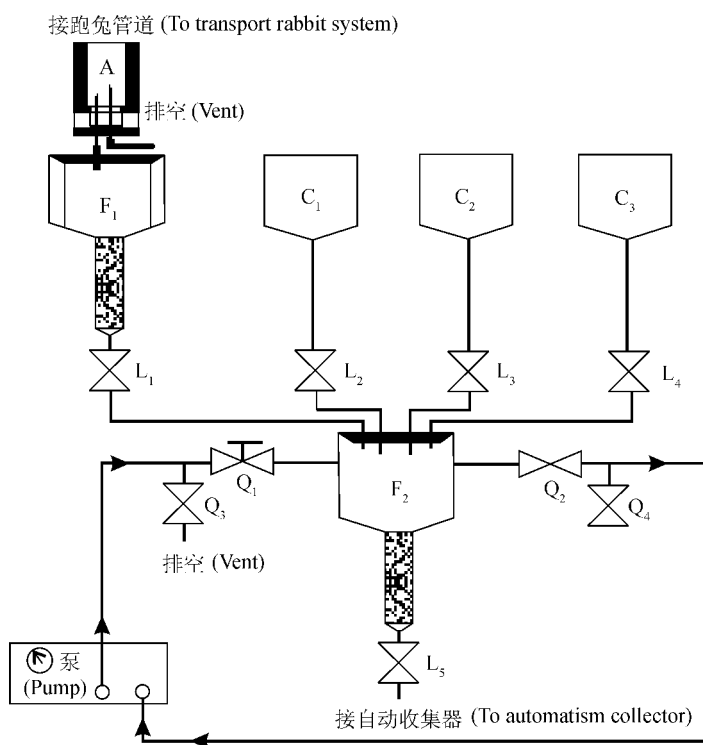


图 6 <sup>91</sup>Sr 亚快化分离装置

Fig. 6 Sub-rapid separation device of <sup>91</sup>Sr

C<sub>1</sub>—C<sub>3</sub>——贮液槽 (Storage tank),

L<sub>1</sub>—L<sub>5</sub>——液体电磁阀 (Liquid solenoid valve),

Q<sub>1</sub>—Q<sub>4</sub>——气体电磁阀 (Gas solenoid valve),

F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>——DCH18C6-Kel-F (或 DCH18C6-Amberlite) 色层柱 (Chro-matographic column)

$F_1$  与  $F_2$  为两个带有过渡室的萃取色层分离单元,单元下部为  $\phi 5 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  冠醚萃取色层柱,是整套装置的分离主体部分。为了实现两步延迟分离,将 2 个柱子设计成前后串连的方式,裂变产物溶液经跑兔管道传输到自动抽样装置上,立即过  $F_1$  的色层柱完成 Rb-Sr 分离。流出液刚好贮存在  $F_2$  的过渡室中,等  $^{91}\text{Rb}$  生成  $^{91}\text{Sr}$  之后,过  $F_2$  的色层柱,进行 Sr 与其它元素的分离。这里无需介质转换, $F_1$  的流出液即为  $F_2$  的上柱介质。

$C_1, C_2$  用于存放洗涤液,  $C_3$  用于存放洗脱液。 $F_1, C_1, C_2, C_3$  下端均接有液体电磁阀( $L_1 - L_5$ ),它们通过管道并联接入  $F_2$ ,可以分别对  $F_2$  色层柱进行洗涤和解吸。一个无油真空泵为整套装置提供了循环式的气体动力,并且可以通过调节泵的压力控制流速。 $Q_1 - Q_4$  为气体电磁阀。所有操作由控制系统完成。

实验前先打开  $L_1$  和  $Q_2$ ,使  $F_1, F_2$  中产生负压。停照后铀靶以跑兔系统的气体为动力直接被打到抽样装置的双针头上,分离装置立即将 1 mL 裂变产物溶液抽过第 1 个萃取色层柱,此时  $^{92}\text{Sr}$  和  $^{93}\text{Sr}$  被吸附,  $^{91}\text{Rb}$  流出并被贮存在  $F_2$  的过渡室。这一步骤可在 50 s 完成,其中包括铀靶在跑兔系统的传输过程(最快为 30 s),此时间段刚好完成 Rb-Sr 分离前的延迟过程。放置约 10 min (第二步延迟),等  $^{91}\text{Rb}$  生成  $^{91}\text{Sr}$  后,关闭  $Q_2$ ,打开  $Q_1$  和  $Q_3$ ,  $F_2$  中产生正压。打开  $L_5$ ,让  $F_2$  过渡室中的溶液通过第 2 个萃取色层柱,  $^{91}\text{Sr}$  被吸附。同样,在  $L_2, L_3, L_4, L_5$  的控制下,完成对第 2 个萃取色层柱的洗涤与解吸。整个操作过程可在 200 s 左右完成。

### 3.4 分离流程的建立

将两步分离原理与冠醚萃取色层法相结合,设计出  $^{91}\text{Sr}$  的分离流程如下:

(1) 湿法将所制备的 DCH18C6-Kel-F (或 DCH18C6-Amberlite) 萃取色层树脂装入自行研制的亚快化分离装置的两个柱子上;

(2) 取适量  $^{235}\text{U}$  的硝酸铀酰溶液,以 1 mL 8 mol/L  $\text{HNO}_3$  为介质,密封在聚乙烯管中,打入反应堆,辐照 30~60 s;

(3) 停照后立即将靶子打到快化分离装置的双针头上,分离装置快速将裂变产物溶液抽过第 1 个萃取色层柱;

(4)  $^{91}\text{Rb}$  流出液在储液槽中放置约 10 min

后,通过第 2 个萃取色层柱;

(5) 用 3 mL 8 mol/L  $\text{HNO}_3$  洗涤第 2 个萃取色层柱,重复 1 次;

(6) 用 3 mL 去离子水解吸第 2 个萃取色层柱,得到  $^{91}\text{Sr}$  溶液。

### 3.5 $^{235}\text{U}$ 辐照靶中 $^{91}\text{Sr}$ 的分离

利用所设计的分离流程,从辐照后约含 60  $\mu\text{g}$   $^{235}\text{U}$  的硝酸铀酰溶液中分离出放化纯的  $^{91}\text{Sr}$ 。该流程对 Sr 的化学回收率为  $(93 \pm 5)\%$ ,对主要  $\gamma$  核素的去污因子(DF)列入表 2。从表 2 结果看出,该流程对  $^{92}\text{Sr}$  的去污因子大于  $10^2$ ,对其他主要  $\gamma$  核素的去污因子大于  $10^3$ ,结果满足衰变数据测量的要求。

表 2 各放射性核素的去污因子

Table 2 Decontamination factors of radionuclides

| 核素<br>(Nuclides)    | DF                  | 核素<br>(Nuclides)  | DF                  |
|---------------------|---------------------|-------------------|---------------------|
| $^{92}\text{Sr}$    | $>1.17 \times 10^2$ | $^{133}\text{Te}$ | $>1.13 \times 10^3$ |
| $^{94}\text{Y}$     | $>3.16 \times 10^3$ | $^{134}\text{Te}$ | $>8.33 \times 10^2$ |
| $^{95}\text{Zr}$    | $>2.33 \times 10^2$ | $^{134}\text{I}$  | $>9.25 \times 10^2$ |
| $^{95}\text{Nb}$    | $>8.83 \times 10^3$ | $^{137}\text{Cs}$ | $>1.62 \times 10^3$ |
| $^{101}\text{Mo}$   | $>9.62 \times 10^3$ | $^{138}\text{Xe}$ | $>5.25 \times 10^2$ |
| $^{101}\text{Tc}$   | $>2.46 \times 10^3$ | $^{138}\text{Cs}$ | $>5.25 \times 10^3$ |
| $^{104}\text{Tc}$   | $>6.60 \times 10^3$ | $^{139}\text{Cs}$ | $>1.09 \times 10^3$ |
| $^{105}\text{Tc}$   | $>2.85 \times 10^2$ | $^{139}\text{Ba}$ | $>5.08 \times 10^2$ |
| $^{107}\text{Rh}$   | $>3.64 \times 10^3$ | $^{141}\text{Ba}$ | $>3.02 \times 10^3$ |
| $^{128}\text{Sn}$   | $>1.04 \times 10^3$ | $^{141}\text{Ce}$ | $>1.61 \times 10^2$ |
| $^{129}\text{Sb}$   | $>1.66 \times 10^2$ | $^{142}\text{Ba}$ | $>1.05 \times 10^3$ |
| $^{130}\text{Sb}$   | $>1.32 \times 10^4$ | $^{143}\text{La}$ | $>2.74 \times 10^3$ |
| $^{131}\text{Te}$   | $>1.93 \times 10^3$ | $^{146}\text{Ce}$ | $>7.84 \times 10^2$ |
| $^{131}\text{Sb}$   | $>9.27 \times 10^3$ | $^{146}\text{Pr}$ | $>1.85 \times 10^3$ |
| $^{133}\text{Te}^m$ | $>2.83 \times 10^3$ | $^{147}\text{Pr}$ | $>3.78 \times 10^3$ |

## 4 结论

1) 本工作以 Kel-F 和 Amberlite XAD-7 为支持体制备的 2 种 DCH18C6 萃取色层树脂在 8 mol/L  $\text{HNO}_3$  介质中均可快速、定量吸附 Sr,吸附的 Sr 用去离子水即可实现解吸,适用于 Sr 的分离;

2) 研制出 1 套适用于  $^{91}\text{Sr}$  快速分离的亚快化分离装置;

3) 将两步延迟分离原理与萃取色层法相结合,设计了用 2 个萃取色层柱前后串联的快速分离流程,并用<sup>235</sup>U 的辐照裂变产物溶液进行了全流程验证,得到的<sup>91</sup>Sr 溶液为放化纯,结果满足衰变数据测量的要求。

#### 参考文献:

- [1] 丁有钱, 崔安智, 杨志红, 等. HDEHP 萃取法从裂变产物中分离<sup>142</sup>La[J]. 核化学与放射化学, 2003, 25(4): 219-222.
- [2] 王文基, 陈伯忠, 戴鲜宁, 等. 二苯并-18-冠-6 对某些放射性核素的萃取与萃取色层分离[J]. 核化学与放射化学, 1980, 2(3): 153-159.
- [3] Smulek W, Lada W A. Separation of Alkaline Earth Metals by Polyethers Using Extraction Chromatography[J]. J Radioanal Chem, 1979, 50 (1-2): 169-178.
- [4] Horwitz E P, Dietz M L, Fisher D E. Separation and Preconcentration of Strontium From Biological, Environmental, and Nuclear Waste Samples by Ex-

traction Chromatography Using a Crown Ether[J]. Anal Chem, 1991, 63: 522-525.

- [5] Vajda N, Ghods-Esphahani A, Cooper E, et al. Determination of Radiostrontium Soil Sample Using a Crown Ether[J]. J Radioanal Nucl Chem, 1992, 162(2): 307-323.
- [6] Horwitz E P, Dietz M L, Chiarizia R. The Application of Novel Extraction Chromatography Materials to the Characterization of Radioactive Waste Solutions[J]. J Radioanal Chem, 1992, 161(2): 575-583.
- [7] Grate J W, Stebin R, Janata J. Automated Analysis of Radionuclides in Nuclear Waste: Rapid Determination of <sup>90</sup>Sr by Sequential Injection Analysis[J]. Anal Chem, 1996, 68: 333-340.
- [8] Horwitz E P, Chiarizia R, Dietz M L. A Novel Strontium-Selective Extraction Chromatographic Resin[J]. Solvent Extr Ion Exch, 1992, 10(2): 313-336.