

# 辐照后铀元件中 $^{106}\text{Ru}$ 的分离测定

魏启慧 黄美新

制定了分离测定核燃料溶解液中  $^{106}\text{Ru}$ - $^{106}\text{Rh}$  的放化程序。对  $\text{H}_2\text{SO}_4$ - $\text{NaBiO}_3$  蒸馏法作了进一步的研究,使钐的回收率达到  $99.6 \pm 0.5\%$ 。分离测定了已冷却两年的辐照铀元件中  $^{106}\text{Ru}$  的含量,以计算  $^{235}\text{U}$  和  $^{239}\text{Pu}$  裂变数。用  $\text{NaI}(\text{Tl})$  单道  $\gamma$  谱仪(阱型晶体)测定液体源,方法简便、快速、准确。测定值的相对标准偏差为  $\pm 0.5\%$ 。

关键词  $^{106}\text{Ru}$ - $^{106}\text{Rh}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{148}\text{Nd}$ , 放化分离。

## 一、前 言

对辐照后核燃料的燃耗测定,选择  $^{106}\text{Ru}$  作裂变监测体有其特殊意义。(1) 对于  $^{106}\text{Ru}$  热中子裂变产额,  $^{239}\text{Pu}$  比  $^{235}\text{U}$  大 10.8 倍<sup>[1]</sup>。因此,  $^{106}\text{Ru}$  生成量灵敏地反应了  $^{239}\text{Pu}$  参与裂变的贡献。R. S. Forsyth<sup>[2]</sup>、J. Krtil 等人<sup>[3]</sup>用  $\gamma$  谱仪测定  $^{106}\text{Ru}$  及  $^{137}\text{Cs}$ , 计算了  $^{235}\text{U}$  和  $^{239}\text{Pu}$  在低丰度铀燃料中的相对裂变数。测定燃耗值的理想监测体是对  $^{235}\text{U}$  和  $^{239}\text{Pu}$  具有完全相同裂变产额的裂变产物,而这种核素很少,经常用作燃耗监测体的  $^{137}\text{Cs}$  和  $^{144}\text{Ce}$ , 其产额值都有差异需作校正,因此判断  $^{235}\text{U}$  与  $^{239}\text{Pu}$  参与裂变的比值就不可缺少。此外,  $^{235}\text{U}$  与  $^{239}\text{Pu}$  的裂变能也有差别,分别为 200.8 MeV 和 209.3 MeV<sup>[4]</sup>。利用核动力时,精确核算释放的能量,也需区别两者裂变的贡献。(2) 如裂变反应来自单一燃料,则  $^{106}\text{Ru}$  也是良好的燃耗监测体。(3) 测定  $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$  和  $^{106}\text{Ru}/^{137}\text{Cs}$  原子密度比来寻求燃耗值和 Pu 产值之间定量关系<sup>[5]</sup>是值得注意的。

本文对  $\text{H}_2\text{SO}_4$ - $\text{NaBiO}_3$  蒸馏裂变产物中  $^{106}\text{Ru}$  的程序作进一步研究后表明,蒸馏时载带  $\text{RuO}_4$  的空气流纯度是十分重要的因素。混有还原性杂质可能使  $\text{RuO}_4$  ( $\text{Ru}$  处于最高氧化态很不稳定)还原成  $\text{RuO}_2$  留在器壁(载体量少时,情况更明显),引起回收率降低或数值不稳定。为此 G. Kesser<sup>[6]</sup> 曾用极纯的氦气流代替空气流,但此法昂贵。我们采用的办法是将空气流经过盛有  $\text{KMnO}_4$  溶液的缓冲瓶,同时加入少量钐载体,可使钐的回收率稳定在  $99.6 \pm 0.5\%$ 。因而在测定  $^{106}\text{Ru}$ - $^{106}\text{Rh}$  的程序中不需要传统的测定化学产额的步骤,仅校正固定回收率即可。样品制成液体源,溶液均匀,取样方便。此外,采用了探测效率高,几何因素影响最小,稳定性好的  $\text{NaI}(\text{Tl})$   $\gamma$  谱仪(阱型晶体)来测量  $^{106}\text{Rh}$  的 511.8 keV 的峰面积(冷却两年以上,  $^{103}\text{Ru}$  已衰变至可忽略的量),整个方法简便、快速、准确。

对辐照后的铀元件,分离测定了核反应中生成  $^{106}\text{Ru}$  的核密度。将  $^{106}\text{Ru}$  的实验值与已测得的  $^{137}\text{Cs}$ <sup>[7]</sup> 或  $^{148}\text{Nd}$ <sup>[8]</sup> 的实验值列联立方程,可求得  $^{235}\text{U}$  和  $^{239}\text{Pu}$  的裂变数。由于考虑到了  $^{238}\text{U}$  参与裂变的贡献不可忽略(理论计算  $^{238}\text{U}$  超热中子裂变产额占 5.39%<sup>[9]</sup>),经预先扣除掉后,获得的结果比较符合实际。计算值<sup>[9]</sup>和实验值的接近,表明是一种测定  $^{235}\text{U}$  和  $^{239}\text{Pu}$  裂变数较简便可靠的方法。

## 二、实 验

### 1. 试剂及仪器

钉载体：将三氯化钉用 1 M HCl 溶解，配成含钉 1 毫克/毫升的溶液。放化纯  $^{106}\text{Ru}$ - $^{106}\text{Rh}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ - $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$  指示剂：从裂变产物中分别提纯这四种指示剂，每种指示剂均经过二种方法重复纯化以确保纯度。最后获得的溶液分别在红外灯下蒸干，加几滴浓硝酸及过氯酸蒸干至不再冒白烟(以破坏有机物)。再加硝酸蒸干，用 0.4 M HNO<sub>3</sub> 溶解。 $^{134}\text{Cs}$  指示剂：光谱纯 CsCl，经反应堆照射后，用硝酸溶解。NaI(Tl) 阱型晶体：3" × 3"。聚乙烯测量管(带塞)：φ 10 mm，高 40 mm。尖端拉细的 2 毫升移液管：经体积校正用上半段刻度取样。

### 2. 实验装置和程序

实验装置见图 1。图左边为装有 KMnO<sub>4</sub> 水溶液的缓冲瓶，压缩空气经洗涤后进入中间 50 ml 蒸馏瓶。钉在此处被 NaBiO<sub>3</sub> 氧化为 RuO<sub>4</sub>，经过加热蒸馏，RuO<sub>4</sub> 气体被空气流携带进入右边吸收瓶中。吸收瓶为 10 ml 容量瓶，内装 6 ml 吸收液(4 M HCl，含 4 滴 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)。

实验程序如下：用尖端拉细的移液管，准确移取 1 ml 裂变产物溶液放入蒸馏瓶中，再加入 0.5 ml 钉载体、7.5 ml 12 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、6 ml H<sub>2</sub>O 及 1 克 NaBiO<sub>3</sub>。接通压缩空气，流速 2—4 气泡/秒。蒸馏瓶磨口处用 H<sub>2</sub>O 封好后，用 300 瓦电炉加热，溶液沸腾后，保持微沸状态继续蒸馏 8 分钟。先移出装吸收液的容量瓶使出气管尖端离开液面，再切断压缩空气及电炉。用 4 M HCl 冲洗出气管尖端，洗涤液也收集在容量瓶中(使钉转移完全)，加 H<sub>2</sub>O 稀释至刻度。准确移出 1.00 毫升溶液放入聚乙烯测量管中(盖好并封口)，在 NaI(Tl) 阱型晶体中测量  $^{106}\text{Ru}$  的平衡子体  $^{106}\text{Rh}$  的 511.8 keV 峰面积。校正测量效率(用  $4\pi\beta-\gamma$  符合测量过的  $^{106}\text{Ru}$ - $^{106}\text{Rh}$  标准溶液刻度效率)及钉的回收率(99.6 ± 0.5%)，计算样品中  $^{106}\text{Ru}$ - $^{106}\text{Rh}$  衰变率。如用平面晶体测量，钉吸收液中有很少量 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>，放置一段时间后产生气泡，体积稍有改变对测量结果有一些影响。为此可将装钉吸收液的容量瓶在沸水浴上加热 20 分钟，除去气泡，钉回收率不

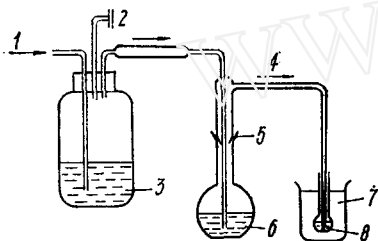


图 1 钉的蒸馏装置

1—压缩空气进口；2—调节流速的活塞；3—KMnO<sub>4</sub> 水溶液；4—RuO<sub>4</sub>(空气)；5—磨口；6—NaBiO<sub>3</sub>+H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+Ru；7—冷水；8—HCl+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>。

变。

## 三、结果和讨论

### 1. 对 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-NaBiO<sub>3</sub> 蒸馏钉方法的研究

蒸馏法分离钉是较广泛应用的经典方法<sup>[10-13]</sup>，本文对以下几方面作了进一步研究。

(1) 钉在蒸馏体系中的分布 加入钉载体及  $^{106}\text{Ru}$ - $^{106}\text{Rh}$  指示剂，按实验程序操作，用

带有两个吸收管的蒸馏器蒸馏钌(图2)。蒸馏后残渣中仅留下0.14%，这表明氧化钌是完全的。且二次吸收液中含钌0.08%，因此只需一次吸收的装置即可，见表1。

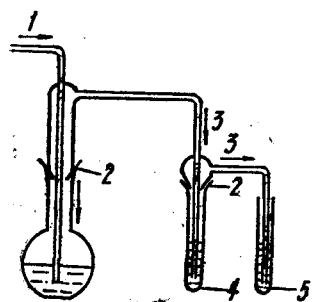


图2 带两个吸收管的蒸馏器  
1—压缩空气进口；2—磨口；3—RuO<sub>4</sub>和空气流；4—吸收液I；5—吸收液II。

(2) 压缩空气的净化处理 载带 RuO<sub>4</sub> 的空气流的净化是十分关键的。输送压缩空气的设备及管道中可能引入(或偶然引入)灰尘、油污及微量还原性杂质,可能使不稳定的 RuO<sub>4</sub> 还原成 RuO<sub>2</sub> 留在器壁引起回收率降低。本文加入钌载体量比较少(0.5毫克)影响比较明显(见表2)。如不经过多次实验数据对比分析,可能将偏低的数据简单地归结于不小心的蒸馏<sup>[14]</sup>。为消除影响,我们将空气流经装有 KMnO<sub>4</sub> 溶液的缓冲瓶净化后再通入蒸馏瓶中,钌的回收率就稳定在 99.6 ± 0.5%。

(3) 沸腾蒸馏时间对钌回收率的影响 NaBiO<sub>3</sub> 对钌的氧化作用是在溶液沸腾时才迅速进行。室温下加入 NaBiO<sub>3</sub> 后通空气流3分钟,吸收液中仅有0.27%的钌,300瓦电炉加热3分钟(尚未沸腾)也仅含0.82%的钌。溶液沸腾5分钟以上可定量回收,见表3。

表1 钌在蒸馏体系中分布

蒸馏后残留量 %	吸收液 I 含量	吸收液 II 含量
0.14	99.6	0.08
0.14	99.7	0.08

表2 压缩空气不经过 KMnO<sub>4</sub> 处理,蒸馏钌的回收率\*

实验序号	1				2				3				4			
回收率, %	97.6	97.8	98.0	98.1	98.4	97.2	99.2	97.2	94.0	94.0	99.1	94.5	96.2	88.2	98.2	98.0

\* 用<sup>106</sup>Ru-<sup>106</sup>Rh作指示剂,不同时间测定的结果。

表3 沸腾蒸馏时间对钌回收率的影响\*

沸腾蒸馏时间,分	钌的回收率 %	
	有载体	无载体
0(室温通空气流3分钟)	0.27	—
0(加热通空气流3分钟)	0.82	—
1	12.1	12.2
2	96.5	—
3	98.3	—
5	99.6	—
8	99.6	94.6
10	99.8	—
15	99.7	94.3

\* 用<sup>106</sup>Ru-<sup>106</sup>Rh为指示剂。

(4)  $H_2SO_4$ 冒烟前的处理对钌回收率的影响 R. P. Larsen 等<sup>[14]</sup>担心在蒸馏体系中含有  $Cl^-$  及  $NO_3^-$  等对钌的氧化有影响, 于是采用加  $H_2SO_4$  蒸发至冒烟以破坏  $NO_3^-$  及  $Cl^-$  (简称前处理) 后再进行钌的蒸馏。后来人们作为惯例而引用。我们的结果表明前处理是不安全的,  $H_2SO_4$  开始冒烟时, 钌也就开始挥发而损失, 冒烟时间越长损失越大, 对无载体样品影响更显著。用  $^{106}Ru-^{106}Rh$  为指示剂, 加入钌载体 0.5 毫克, 当加热至  $H_2SO_4$  刚开始冒烟时, 钌就能损失 1.7%, 回收率降为 97.9%。如无载体, 冒烟一分钟后钌就只剩下 6.6%, 见表 4。我们的实验结果还表明在 15 毫升蒸馏液中  $HCl$  及  $HNO_3$  浓度不超过 0.35 M, 可直接取样蒸馏, 不影响钌的定量回收。如浓度太大, 分解  $NaBiO_3$  太多, 以至钌的氧化作用不能进行, 则必须加热  $H_2SO_4$  赶掉一些  $HCl$  及  $HNO_3$ , 但一定不能让  $H_2SO_4$  冒烟。Z. Hölggye 等<sup>[13]</sup>曾报道, 蒸发钌的络合物溶液时, 当温度  $>300^\circ C$ , 就能观察到钌的挥发。所以当  $H_2SO_4$  冒烟时, 温度达到  $360^\circ C$ , 浓  $H_2SO_4$  很可能将钌氧化为  $RuO_4$  而造成 Ru 的损失。

表 4  $H_2SO_4$ 冒烟前的处理对钌回收率影响  
钌载体量: 0.5毫克, 原始样品中  $HCl$  及  $HNO_3$  浓度  $\leq 0.35 M$

$H_2SO_4$ 冒 烟 时 间, 分	钌 回 收 率, %
0 (直接蒸馏)	99.6 ± 0.5
蒸发 $H_2SO_4$ 溶液到刚开始冒烟	97.9
0.5	94.2
5	75.6
8	32.6
1	6.6*

\* 为无载体蒸馏。

(5) 钌载体量对回收率的影响 用  $^{106}Ru-^{106}Rh$  为指示剂作了钌载体量对回收率的影响, 结果表明只有在加入钌载体  $\geq 160$  微克时, 才能保证蒸馏钌的定量回收, 见表 5。对无载体钌的蒸馏, 用  $^{106}Ru-^{106}Rh$  指示剂或裂变产物的蒸馏, 都相当载体量很少的蒸馏(裂变产物中有钌的稳定同位素), 经  $KMnO_4$  溶液处理过的空气流清除了还原性杂质或不饱和物质取得了好效果, 都达到了比较高和稳定的回收率, 见表 6。但是, 回收率都没有达到 99% 以上。因此我们认为蒸馏无载体(不外加载体)钌不能作为定量分析钌的方法。理

表 5 钌载体量对回收率的影响

加入钌载体量, 微克	6	40	80	160	400	500
钌回收率, %	94.8	97.2	98.2	99.6	99.6	99.6

表 6 钌的无载体蒸馏回收率

实 验 条 件	钌 的 回 收 率, %	平均值及相对标准偏差, %
$^{106}Ru-^{106}Rh$ 指示剂	93.9 91.9 94.2 96.2 93.2 96.4	94.3 ± 1.8
裂变产物溶液蒸馏 $^{106}Ru-^{106}Rh$	93.8 93.7 93.7 92.0 93.3 92.9 93.5	93.3 ± 0.7

由可能是(i)RuO<sub>4</sub>在蒸馏后的泥浆状残液中的溶解度不能忽略不计(75°C水中RuO<sub>4</sub>的溶解度为22.29克/升,沸腾时挥发很快<sup>[16]</sup>)。如果不是绝对的完全挥发,而是稍留一些在残留液中,当载体量加得多,残留钌所占相对百分比可少到忽略不计。对无载体钌蒸馏相对百分比就显著,以至达不到定量回收。(ii)极少量的RuO<sub>2</sub>不可避免地会在器壁上的吸附。

(6) 去污实验 按实验程序操作,冷却二年的辐照铀元件溶解液中,存在的主要裂变产物<sup>95</sup>Zr-<sup>95</sup>Nb, <sup>137</sup>Cs, <sup>144</sup>Ce-<sup>144</sup>Pr的去污因子,分别为 $1.0 \times 10^4$ ,  $5.7 \times 10^3$ ,  $\geq 3.4 \times 10^3$ 。

(7) 蒸馏法(本程序)分离测定钌的回收率及精密性 以<sup>106</sup>Ru-<sup>106</sup>Rh为指示剂用NaI(Tl)阱型晶体测定了本程序对钌的回收率为 $99.6 \pm 0.5\%$ 。如果用平面晶体测量,将最后获得的含H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>的钌吸收液,在沸水浴上加热20分钟,除去H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>后再取样测量,钌的回收率不变,见表7。每个样品测量的统计误差 $\leq 0.15\%$ 。

表 7 蒸馏法分离测定钌的回收率及精密性

实 验 条 件	含 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 吸 收 液	除 去 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 吸 收 液
钌回收率, %	99.31 99.04 100.3 99.36 99.51 100.1	99.30 99.24 99.54 99.83 99.79
平均回收率%	99.6	99.6
相对标准偏差%	±0.5	±0.3

### 2. <sup>106</sup>Ru-<sup>106</sup>Rh 衰变率的测定

用 $4\pi\beta-\gamma$ 符合法测定的<sup>106</sup>Ru-<sup>106</sup>Rh标准溶液刻度NaI(Tl)阱型晶体的探测效率,相对标准偏差为 $\pm 0.1-0.2\%$ ,见表8。为了检查探测效率的稳定性,用<sup>137</sup>Cs作监督源,间隔不同时间测量,测定值的相对标准偏差为 $\pm 0.12\%$ ,见表9。结果表明测量的重复性

表 8 NaI(Tl)  $\gamma$  谱仪(阱型晶体)刻度<sup>106</sup>Ru-<sup>106</sup>Rh探测效率(刻度<sup>106</sup>Rh511.8KeV峰面积)

间 隔 时 间, 天	<sup>106</sup> Ru- <sup>106</sup> Rh 探测效率, %	相 对 标 准 偏 差, %
0	6.962	±0.10
305	7.041	±0.20
319	7.066	±0.10
563	7.024	±0.16
586	6.965	±0.26
686	6.953	±0.19

好。由于样品制成液体源,放射性分布很均匀,制源误差非常小。用NaI(Tl)阱型晶体测量具有探测效率高、本底低、几何因素影响小和稳定性好的特点。此外注意了减少各环节引入的误差,如用尖端拉细的移液管取样,精密性为 $\pm 0.1\%$ ,作温度对体积影响的校正,测量的统计误差保持 $\leq 0.15\%$ 等。因而,使测定样品中<sup>106</sup>Ru-<sup>106</sup>Rh衰变率总误差较小。

### 3. 辐照后铀元件中<sup>235</sup>U、<sup>239</sup>Pu 裂变数的测定

辐照后天然铀元件经冷却两年后用本程序分离测定了<sup>106</sup>Ru的核密度,与已测得的

表 9 用  $^{137}\text{Cs}$  监督源检查测量仪器的稳定性

间隔时间, 天	$^{137}\text{Cs}$ 监督源, 计数/10分钟				衰变校正系数	校正后 $^{137}\text{Cs}$ 源强, 计数/10分钟	平均值及相对 标准偏差
	1	2	3	平均			
0	337114	337355	338620	337696	1.00000	337690	337897 ± 0.12%
43	336755	336519	336940	336738	0.997298	337650	
50	336773	336842	336404	336673	0.996858	337734	
78	336320	336785	—	336553	0.995104	338209	
86	306042	335791	335815	335882	0.994603	337705	
100	336151	336038	335894	336027	0.993727	338149	
113	336112	335497	336657	336088	0.992915	338486	
120	335583	335164	334293	335014	0.992477	337553	

$^{137}\text{Cs}$  核密度<sup>[7]</sup>或  $^{148}\text{Na}$  的核密度<sup>[8]</sup>列联立方程式 I 和 II, 可获得  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  的裂变数。

$$\text{I} \begin{cases} {}^{235}\text{Y}_{106} \cdot {}^{235}\text{F} + {}^{239}\text{Y}_{106} \cdot {}^{239}\text{F} = N_{106} \\ {}^{235}\text{Y}_{137} \cdot {}^{235}\text{F} + {}^{239}\text{Y}_{137} \cdot {}^{239}\text{F} = N_{137} \end{cases}$$

$$\text{II} \begin{cases} {}^{235}\text{Y}_{106} \cdot {}^{235}\text{F} + {}^{239}\text{Y}_{106} \cdot {}^{239}\text{F} = N_{106} \\ {}^{235}\text{Y}_{148} \cdot {}^{238}\text{F} + {}^{239}\text{Y}_{148} \cdot {}^{239}\text{F} = N_{148} \end{cases}$$

${}^{235}\text{Y}_{106}$ ,  ${}^{235}\text{Y}_{137}$ ,  ${}^{235}\text{Y}_{148}$  分别为  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{148}\text{Nd}$  在  $^{235}\text{U}$  中裂变产额;  ${}^{239}\text{Y}_{106}$ ,  ${}^{239}\text{Y}_{137}$ ,  ${}^{239}\text{Y}_{148}$  分别为  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{148}\text{Nd}$  在  $^{239}\text{Pu}$  中裂变产额;  $N_{106}$ ,  $N_{137}$ ,  $N_{148}$  分别为  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{148}\text{Nd}$  生成的核密度(扣除  $^{238}\text{U}$  裂变的贡献)。未知数  ${}^{235}\text{F}$ ,  ${}^{239}\text{F}$  分别为  $^{235}\text{U}$  和  $^{239}\text{Pu}$  的裂变数。

$^{238}\text{U}$  超热中子的裂变贡献按理论计算占 5.39%<sup>[9]</sup>, 本文认为不可忽略, 将其扣除后列联立方程式 I、II。用实验结果计算获得的  ${}^{235}\text{F}$ ,  ${}^{239}\text{F}$  值与朱荣保等<sup>[9]</sup>给出的计算值相近, 见表 10。用这种方法求得  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  的裂变数是一种较简便可靠的方法。

$^{106}\text{Ru}$ - $^{106}\text{Rh}$  的  $4\pi\beta\text{-}\gamma$  符合绝对测量是由杨留成, 吕峰, 陈国安完成, 薄膜源的制备由贺先运, 种培基完成,  $\gamma$  谱仪的刻度由朱荣保, 王世举, 张增瑞完成, 在此一并致谢。

表 10  $^{235}\text{U}$  及  $^{239}\text{Pu}$  的裂变数的测定

可裂变核素	重核裂变数, 裂变数/单位铀重量			
	实 验 值			计 算 值
	I( $^{106}\text{Ru}, ^{137}\text{Cs}$ )	II( $^{106}\text{Ru}, ^{148}\text{Nd}$ )	平 均 值	
$^{235}\text{U}$	$1.78 \times 10^{18}$	$1.85 \times 10^{18}$	$18.2 \times 10^{18}$	$1.82 \times 10^{18}$
$^{239}\text{Pu}$	$2.38 \times 10^{17}$	$2.32 \times 10^{17}$	$2.35 \times 10^{17}$	$2.01 \times 10^{17}$
$^{238}\text{U}$	—	—	—	$1.15 \times 10^{17}$

### 参 考 文 献

- [1] 杨滢, 五瓠, 原子能科学技术, 4, 483(1981).
- [2] R. S. Forsyth et al., AE-390(1970).

(下转第440页)

## 程序的热验证及结果

为了对推荐程序(图1)进行热验证,我们采用热中子辐照的 $^{235}\text{U}$ 靶,作了两次模拟实验,分别取各流份和适当放射性强度的 $^{235}\text{U}$ 辐照样品(作为测量标准),在配有4096道分析器的Ge(Li)探测器上进行测量,通过计算机程序自动找峰,计算峰面积,从而得到元素在各流份中的相对含量(表3)。其结果与预期结果基本一致。但由于一些核素的相对含量较低, $\gamma$ 分支比较低,仅在各自流份中测得准确,其它流份中测量误差大。

该程序已用于3 MeV中子诱发 $^{238}\text{U}$ 裂变产额测定中,实践证明程序稳定可靠,整个程序可在10—11小时内完成。能把裂变产物元素Cs、Ag、Sr-Ba、Cd、Pd、RE、Zr、Te-Mo、Sn、Sb分成十组,并且回收了铀。

唐培家等同志曾协助测量部份样品。谨致谢忱。

### 参 考 文 献

- [1] J. G. Cuninghame et al., AERE-R 5587(1967).
- [2] T. V. Healy, *Radiochim. Acta*, 2, 52(1963).
- [3] R. Cornelis, *J. Radioanal. Chem.*, 1, 5(1968).
- [4] R. Denig, *J. Radioanal. Chem.*, 6, 331 (1970).
- [5] В. М. Вдовенко и др., *Радиохимия*, 13, 416(1971).
- [6] Leon Wish, *Anal. Chem.*, 31, 326(1959).
- [7] W. J. Krause, KFK-2192(1975).
- [8] M. Szlaurová et al., *J. Radioanal. Chem.*, 21, 211—216(1974).
- [9] 原子能研究所裂变产额组, *核化学与放射化学*, 2, 1, 1(1980).
- [10] J. Korkisch, *Modern methods for the separation of rare metal ions*, Pergamon press, p. 53(1969)
- [11] K. A. Kraus, F. Nelson, *International conference of the peaceful uses of atomic energy*, 7, 113 (1955).

(编辑部收到日期: 1982年9月3日)

(上接第446页)

- [3] J. Krtil et al., *Analytical Methods in the Nuclear Fuel cycle*, p. 491, IAEA, Vienna, 1972.
- [4] J. D. Chen et al., AECL-5236(1976).
- [5] V. Petényi et al., *J. Radioanal. Chem.*, 51, 133(1979).
- [6] G. Kesser et al., *Anal. Chem.* 38, 221(1966).
- [7] 林灿生等, *原子能科学技术*, 5, 233(1983).
- [8] 施玉全等, 同位素稀释质谱法测定反应堆元件样品中 $^{148}\text{Nd}$ 的化学分离, 原子能研究所内部资料(1981).
- [9] 朱荣保等, 用 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{144}\text{Ce}$ 、 $^{148}\text{Nd}$ 为监测体计算反应堆辐照元件能耗的方法, 原子能研究所内部资料, 1981年.
- [10] L. E. Glendenin, *Radiochemical Studies, The Fission Products Book 3, Paper 260, 1549, McGraw-Hill, New York, 1951.*
- [11] R. P. Larsen et al., ANL-5810(1957).
- [12] 郭景儒, *原子能科学技术*, 7, 557(1963).
- [13] 黄浩新等, Purex 流程中放射性钨的测定, 原子能研究所内部资料(1965).
- [14] R. P. Larsen et al., *Anal. Chem.*, 31 176(1959).
- [15] Z. Hölgge et al., *J. Radioanal. Chem.* 42, 133(1978).
- [16] О. Е. Звягинцев и др., *Химия Рутения*. стр. 51, Издательство «Наука», Москва, 1965.

(编辑部收到日期: 1982年9月3日)