

超热中子活化分析的进一步研究

田伟之

(原子能研究所)

本文建议用一个一般化有利因子 $F = \sqrt{G} \sqrt{R_i} / R$, 来真实地反映超热中子活化导致的探测极限或计数统计的实际改善。经典的 Brune 定义和近来提出的 Bem 定义, 可以分别看作本定义在 $G = R_i$ 和 $G = 1$ 时的特例。为了得到最佳有利因子, 推荐在不同孔道(甚至不同的堆)上分别进行全堆谱中子活化(TNA)和超热中子活化(ENA)。本文还全面评价了镉和氮化硼屏蔽体的利弊。此外, 测定了38个反应, H_c 孔道中 ENA 对于15-2孔道中 TNA 的有利因子。最后, 对33个干扰反应, 给出了在这两种照射条件下的干扰因子, 并讨论了 ENA 的干扰放大。

关键词 超热中子活化分析, 有利因子, 镉(硼)比, 干扰放大。

一、引言

堆中子活化后, 许多种岩石样品产生强的 ^{28}Al , ^{56}Mn , ^{24}Na , ^{42}K , ^{51}Cr , ^{46}Sc , ^{59}Fe , ^{140}La 等放射性核素, 而多数生物样品则产生强的 ^{24}Na , ^{42}K , ^{32}P , ^{38}Cl , ^{65}Zn 等核素。所有上述核素的生成反应都有低的共振积分对热中子截面比(I/σ_{th})。超热中子活化可以大大压低它们的放射性, 从而对 I/σ_{th} 较高的元素 Ga, As, Se, Br, Rb, Sr, Mo, Pd, Ag, Cd, In, Sb, Cs, Ba, Sm, Gd, Tb, Tm, Ta, W, Pt, Au, Th, U 等的分析精密性或探测极限有不同程度的改善。因此, 超热中子活化可作为进一步挖掘仪器堆中子活化分析潜力的重要手段。

本文拟就有利因子、Cd(B)比、屏蔽体材料和干扰放大等几个问题, 对超热中子活化分析在若干基础和应用方面作些进一步的探讨。并给出38个反应在最优化照射位置的有利因子。

1. 关于有利因子

(1) Brune 等人^[1]的定义(F_a) 1964年 Brune 等人认为, 对于一个具体的分析问题, ENA 比之 TNA 的有利程度, 可以用有利因子 F_a 进行估计: $F_a = R_i / R$, 其中, R 和 R_i 分别为待测和干扰核素的Cd(B)比。 $R = N / N_e$, 式中 N 和 N_e 分别为在其它条件相同时, 某核素没有和有Cd(B)屏蔽活化时产生的放射性。角注“e”表示“超热”, “i”表示“干扰核”。

(2) Bem 等人^[2]的定义(F'_a) 1981年 Bem 等人提出, Brune 等人没有考虑到Cd(B)屏蔽后, 待测核素的活化率亦减低 R 倍, 从而导致计数统计误差相应增加这一因素, 因此,

1982年10月22日收到。

它不能在统计意义上给出超热中子活化潜力的真正估价。Bem等人认为, 有利因子应定义为超热活化带来的统计误差改善。即: $F'_s = \delta/\delta_e$ 。其中 δ 和 δ_e 分别为 TNA 和 ENA 时, 某待测核素的相对计数统计误差。经作者推导后得到: $F'_s = \sqrt{R_i}/R$ 。与 F_s 比较, F'_s 值要小, $F'_s = F_s/\sqrt{R_i}$ 。

(3) 我们的建议

i. F'_s 的新含义 Bem 等人定义了基于“相对标偏改善”的有利因子 F'_s 。事实上, 我们常常更关心某一待测元素能否测到, 然后才是测量的精密度。所以, 有利因子最好定义为探测极限的改善: $F'_s = L_e/L_{ee}$ 。式中, L_e 和 L_{ee} 分别为 TNA 和 ENA 对某一核素的判断极限。其值 $L_e = 2.33\sqrt{N_b}/A$ 。式中, N_b 为本底计数, A 为待测元素的比计数率^[9]。所以:

$$F'_s = \frac{2.33\sqrt{N_b}/A}{2.33\sqrt{N_{be}}/A_e} = \frac{\sqrt{N_b}/\sqrt{N_{be}}}{A/A_e} = \frac{\sqrt{R_i}}{R} = F'_s$$

所以, 式 $F'_s = \sqrt{R_i}/R$ 既是基于“相对标偏改善”的有利因子, 也是基于“探测极限改善”的有利因子。

ii. 一般化有利因子 F 以上推导中, 都包含了一个假定——包和不包 Cd(B) 活化的样品均在相同的几何条件下测量。实际上, 对所有有必要使用 ENA 的样品, 在 TNA 后, 几乎总是在距探测器较远的位置上测量 (为避免计数率效应)。而 ENA 则大大减低了总放射性, 从而可以在较近的架位上测量。若测量位置的改变使计数率提高 G 倍, 则 $N'_{ie} = GN_{ie}$, $N'_e = GN_e$ (在此忽略了距离改变后探测效率曲线斜率的微小变化和可能存在的真符合效应)。我们定义测量位置最佳化了的—般化有利因子 F 如下:

$$F = \frac{\sqrt{N_i/N'_{ie}}}{N/N'_e} = \frac{\sqrt{N_i/N_{ie} \cdot G}}{N/N_e \cdot G} = \frac{\sqrt{G} \cdot \sqrt{R_i}}{R}$$

当测量位置不变时, $G=1$, $F=F'_s$, 即是 Bem 等人定义的有利因子; 当测量位置可以降低到足够低, 使计数率的提高完全“补偿”了包 Cd(B) 造成的干扰核素放射性减低, 即 $G=R_i$ 时, 则 $F=R_i/R=F_s$, 也就是 Brune 等人定义的有利因子。这样, Brune 的有利因子被赋予了统计的意义。

2. 照射位置的最佳化

镉比 R_{cd} 本来是堆物理中描述某一中子谱超热和热通量比的参数 ($R_{cd} = N/N_{cd} = \frac{\Phi_{th}}{\Phi_e}$ 。

$\frac{\sigma_{th}}{I} + 1$), 自然, N 和 N_{cd} 是在相同的照射位置和测量的条件下得到的。在 ENA 分析史上一直沿用这一参数。事实上, ENA 灵敏度取决于超热通量 Φ_e 的提高 (ENA 活化率 $RR_e = \Phi_e \cdot I$)。所以, ENA 最好在 Φ_e 较高的“硬谱”孔道里进行, 而这恰好是 TNA 较少使用的孔道 (为了避免快中子阈反应干扰等)。此外, “硬谱”孔道热通量相对较低, 所以屏蔽体放热较少, 屏蔽核素燃耗率 ($\Phi_{th} \cdot \sigma_{th,sh}$) 也较低。

鉴于 TNA 和 ENA 一般不应在同一孔道里进行, 我们令: $R^{br} = N^{br}/N_e^{br}$, 式中, N^{br} 和 N_e^{br} 分别为不包和包 Cd(B) 情况下在各自位置上某核素受到相同时间的照射在相同条件下测量得到的放射性。

Brune 等人的定义中 $R \geq 1$ (只对快中子阈反应 R 等于 1), 而 R^b 则完全可以小于 1 [见表 2 中的 ^{54}Fe , $^{58}\text{Ni}(n, p)$ 反应和 ^{96}Zr , ^{98}Mo , $^{114}\text{Cd}(n, \gamma)$ 反应], 从而大大地提高了对强共振核素和靠阈反应测定的核素的分析能力。

3. 关于屏蔽体

迄今为止主要使用三类屏蔽体: i) 镉——屏蔽热中子; ii) 硼 (B , B_2C , BN , B_2O_3)——屏蔽热中子和部分低能共振中子; iii) 复合屏蔽体—— $\text{Cd} + \text{B}$, 选择性中子过滤器。其中, i) 和 ii) 屏蔽体使用最为普遍。屏蔽体 BN 比 Cd 的主要优点是: i) 耐高温、燃耗率低 ($\sigma_{a, \text{B}}^{10}$ 为 $\sigma_{a, \text{Cd}}^{113}$ 的 1/5), 故可长时间的照射; ii) 残留放射性少, 人身剂量低, 可测定短寿命核素, 屏蔽盒可反复使用; iii) 毒性低, 制作安全; iv) 由 B 和 Cd 的中子吸收截面曲线 (图 1) 可见, ^{113}Cd 的 $\sigma_{a, \text{Cd}}$ 在 $\sim 0.5\text{eV}$ 处有约 3 个数量级的下降, 所以对 $E_n > 0.5\text{eV}$ 的中子几乎是“透明”的, 而 ^{10}B 的截面曲线呈单调下降, 低能共振中子在 B 屏蔽下会有相当的衰减, 这有利于具有较高能量的共振峰核素的测定, 特别有利于通过快中子阈反应测定的核素。其主要缺点: i) 如上所述的原因, 对低能共振峰核素, 诸如 ^{197}Au , ^{115}In , ^{193}Ir , ^{152}Sm 等, 有利因子没有 Cd 屏蔽体高。故 Rossitto 等人^[4] 推荐, (n, γ) 共振峰能量 $E_R < 2\text{eV}$ 的核素, 用 Cd 屏蔽有利; $E_R > 15\text{eV}$ 的核素, 用 B 或 $\text{B} + \text{Cd}$ 屏蔽有利; $2\text{eV} < E_R < 15\text{eV}$ 的核素, 用 $\text{B} + \text{Cd}$ 屏蔽有利^[4]; ii) $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 为放热反应, 且释放能量几乎全耗于盒体, 故发热量极高, 样品和包装必须耐高温。

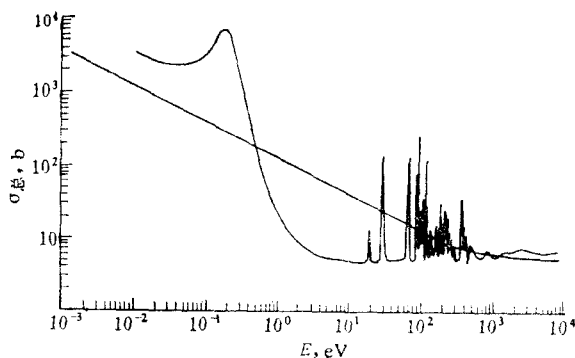


图 1 B和Cd的中子吸收截面曲线

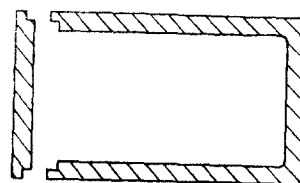


图 2 BN屏蔽盒示意图

综上所述, 在我们的 10MW 重水反应堆上, 超 Cd 活化实际意义不大 (只能照射几十分钟), 而以 BN 作屏蔽体的超 B 活化是实用的 (至少每次可照射几十小时, 且可反复使用)。

4. 有利因子的测定

基于以上讨论, 我们选用轻水堆的一个硬中子谱孔道 H_1 进行超 B 活化 (BN 屏蔽盒示于图 2), 而在重水堆重水反射层的一个“软谱”孔道 (15-2) 进行 TNA, 测定了 38 个反应相对于 $^{23}\text{Na}(n, \gamma)$ 的有利因子。结果列于表 1。

表1 超B中子活化有利因子

反 应	灵敏度S, c/3000s·μg		R_B^{br}	$F_A (= \frac{R_B^{br}(Na)}{R_B^{br}})$	$F'_A (= \frac{\sqrt{R_B^{br}(Na)}}{R_B^{br}})$	E_R, eV	E_γ, keV
	$N_{内}(H_4)$	$N_{外}(15-2)$					
$^{23}\text{Na}(n, \gamma)^{24}\text{Na}$	1.56×10^5	8.68×10^6	55.8	1.00	0.134	3130	1368.6
$^{41}\text{K}(n, \gamma)^{42}\text{K}$	3.50×10^3	1.70×10^5	48.5	1.15	0.154	9040	1524.6
$^{46}\text{Sc}(n, \gamma)^{46}\text{Sc}$	4.54×10^4	3.96×10^6	87.3	0.64	8.55×10^{-2}	2120	889.3
$^{50}\text{Cr}(n, \gamma)^{51}\text{Cr}$	8.14×10^2	6.22×10^4	76.4	0.73	9.80×10^{-2}	5950	320.1
$^{58}\text{Fe}(n, \gamma)^{59}\text{Fe}$	6.94	2.54×10^2	36.6	1.52	0.204	325	1291.6
$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$	4.47×10^1	2.74×10^{-1}	6.12×10^{-3}	9.11×10^3	1.22×10^3	—	834.8
$^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$	9.15×10^3	1.50×10^5	16.4	3.40	0.455	133	1332.5
$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$	3.18×10^3	2.30×10^1	7.23×10^{-3}	7.59×10^3	1.03×10^3	—	810.8
$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$	4.25×10^5	1.36×10^7	32.2	1.74	0.233	742	511.0
$^{64}\text{Zn}(n, \gamma)^{65}\text{Zn}$	5.88×10^2	6.30×10^4	11.6	4.81	0.645	428	1115.4
$^{71}\text{Ga}(n, \gamma)^{72}\text{Ga}$	2.86×10^6	1.45×10^7	5.02	11.1	1.49	152	834.0
$^{75}\text{As}(n, \gamma)^{76}\text{As}$	4.32×10^6	1.36×10^7	3.15	17.7	2.37	102	559.1
$^{76}\text{Se}(n, \gamma)^{77}\text{Se}$	1.79×10^4	4.99×10^4	2.79	20.0	2.68	29.5	264.7
$^{85}\text{Rb}(n, \gamma)^{86}\text{Rb}$	8.36×10^3	1.50×10^4	1.79	31.2	4.17	376	1076.6
$^{84}\text{Sr}(n, r)^{85}\text{Sr}$	3.52×10^2	6.62×10^2	1.88	29.7	3.97	464	514.0
$^{94}\text{Zr}(n, \gamma)^{95}\text{Zr}$	8.87×10^1	4.83×10^2	5.45	10.2	1.37	4520	724.2
$^{96}\text{Zr}(n, \gamma)^{97}\text{Zr}$	2.63×10^4	9.78×10^2	3.71×10^{-2}	1.50×10^3	201	340	743.4
$^{98}\text{Mo}(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$	4.21×10^5	2.60×10^5	6.17×10^{-1}	90.1	12.1	211	140.5
$^{107}\text{Ag}(n, \gamma)^{110m}\text{Ag}$	1.50×10^4	4.19×10^4	2.79	20.2	2.70	14.1	657.7
	8.95×10^3	2.46×10^4	2.75				884.7
$^{114}\text{Cd}(n, \gamma)^{115}\text{Cd}$	9.11×10^4	8.23×10^4	9.00×10^{-1}	62.1	8.33	178	336.2 (^{115m}In)
$^{121}\text{Sb}(n, \gamma)^{122}\text{Sb}$	4.41×10^6	6.19×10^6	1.40	39.8	5.35	11.2	564.2
$^{133}\text{Cs}(n, \gamma)^{134}\text{Cs}$	9.67×10^4	2.48×10^5	2.56	21.8	2.92	8.68	795.8
$^{130}\text{Ba}(n, \gamma)^{131}\text{Ba}$	2.38×10^3	4.39×10^3	1.85	30.1	4.03		496.2
$^{139}\text{La}(n, \gamma)^{140}\text{La}$	4.75×10^5	1.13×10^7	23.7	2.35	0.315	76.8	487.0
$^{140}\text{Ce}(n, \gamma)^{141}\text{Ce}$	3.76×10^3	1.15×10^5	30.6	1.82	0.244	11400	115.4
$^{141}\text{Pr}(n, \gamma)^{142}\text{Pr}$	4.50×10^4	7.23×10^5	16.1	3.46	0.463	251	1575.6
$^{146}\text{Nd}(n, \gamma)^{147}\text{Nd}$	6.29×10^3	7.58×10^4	12.1	4.61	0.617	728	91.1
$^{152}\text{Sm}(n, \gamma)^{153}\text{Sm}$	2.67×10^7	8.89×10^7	3.33	16.8	2.24	8.33	103.2
$^{151}\text{Eu}(n, \gamma)^{152}\text{Eu}$	5.80×10^4	1.16×10^6	20.0	2.79	0.373		344.3
$^{158}\text{Gd}(n, \gamma)^{159}\text{Gd}$	3.94×10^5	4.90×10^5	1.24	45.0	6.02	45.4	363.3
$^{159}\text{Tb}(n, \gamma)^{160}\text{Tb}$	3.00×10^5	7.17×10^5	2.39	23.4	3.13	11.4	298.6
$^{174}\text{Yb}(n, \gamma)^{175}\text{Yb}$	5.05×10^4	3.62×10^6	71.6	0.73	0.104	390	396.3
$^{176}\text{Lu}(n, \gamma)^{177}\text{Lu}$	3.53×10^5	1.66×10^7	47.0	1.19	0.159		208.3
$^{180}\text{Hf}(n, \gamma)^{181}\text{Hf}$	4.51×10^4	5.31×10^5	11.8	4.74	0.633		482.0
$^{181}\text{Ta}(n, \gamma)^{182}\text{Ta}$	1.52×10^5	1.70×10^5	1.11	50.3	6.71	7.61	1221.4
$^{186}\text{W}(n, \gamma)^{187}\text{W}$	2.71×10^6	8.33×10^6	3.08	18.1	2.38	19.5	685.8
$^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$	5.64×10^7	2.01×10^8	3.56	15.7	2.10	5.47	411.8
$^{232}\text{Th}(n, \gamma)^{233}\text{Pa}$	3.15×10^5	7.02×10^5	2.23	25.0	3.34	53.5	311.9

注：第二栏，灵敏度S指归一到照射24小时、不经冷却、在效率约30%的Ge(Li)探测器最近架位测得的每微克元素的特征峰（见末栏）3000秒的计数；第三栏： $R_B^{br} = N_{外}(15-2)/N_{内}(H_4)$ ；第四、五栏， F_A 、 F'_A 分别为Brune和Bcm定义的有利因子；即分别为 $G=1$ 和 $G=R_B^{br}(Na)$ 的 F ；第六栏， E_R 为有效共振峰能量^[5]；第七栏， E_γ 为测量特征峰的 γ 射线能量。 $^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$ 反应的 $N_{外}(15-2)$ 值是通过阴离子交换法分离掉 ^{59}Fe 后测定的。

5. 干 扰 放 大

堆中子活化分析中, 快中子(n, p), (n, α)阈反应干扰的干扰因子 IF , 定义为单位质量干扰元素与单位质量待测元素生成的同种核素的放射性比:

$$IF = \frac{A_{int}}{A} = \frac{\frac{\Theta_{int}}{M_{int}} \sigma_f \Phi_f}{\frac{\Theta}{M} \sigma \Phi}$$

式中, Θ 为靶核同位素丰度; M 为靶元素原子量; 角注“int”意为干扰元(核)素, σ_f 和 Φ_f 分别为堆快中子截面和通量; σ 和 Φ 分别为(n, p)反应的有效截面和通量; A 为生成核的比放射性。

对于照射位置不变的场合, 包 Cd(B) 的样品活化后, 式中分子不变, 分母减至 R 倍, 故 IF 放大 R 倍。此时的 IF' 为:

$$IF' = \frac{A_{int}}{A/R} = RIF$$

对于照射位置改变的场合(如本工作), 包 Cd(B) 的样品活化后, 不但分母减为 R^{br} 倍, 而且分子也减小 R_{int}^{br} 倍(因 ENA 在较“硬”谱的位置, 故 $R_{int}^{br} < 1$, 实际上分子增大了 $\frac{1}{R_{int}^{br}}$ 倍)。此时的 IF'' 为:

$$IF'' = \frac{A_{int}/R_{int}^{br}}{A/R^{br}} = \frac{R^{br}}{R_{int}^{br}} \cdot IF$$

表 2 给出了 33 个干扰阈反应轻水堆 H_4 孔道 ENA 对重水堆重水反射层孔道 TNA 的干扰放大, 估算了在重水堆重水反射层孔道 TNA 时, 这些反应的干扰因子 $IF(15-2)$, 并推算了在轻水堆 H_4 孔道 ENA 时的干扰因子 $IF''(H_4)$ 。 IF 计算中, 各核参数取自文献[6]。

在表 2 各参量的计算中, 我们粗略地假定, 15-12 和 H_4 孔道的快中子谱具有初级裂变谱的形状。所以, 第三栏中 R_{int}^{br} 值一律用表 1 中 $^{54}\text{Fe}(n, p)$ 和 $^{58}\text{Ni}(n, p)$ 反应 R_{int}^{br} 的平均值 6.7×10^{-3} ; 第四栏对 $IF(15-2)$ 的计算, σ_f 用裂变谱平均截面, σ 用热中子截面(忽略共振中子的贡献), Φ/Φ_f 采用重水反应堆研究者提供的近似值 150; 第五栏中 $IF''(H_4) = M_{IF} \cdot IF(15-2)$ 。

表 2 中的 $IF(15-2)$ 和 $IF''(H_4)$ 值当然不能用于准确地扣除干扰贡献。但在相应条件下估计这些干扰贡献的程度、判断给定干扰反应的贡献是否可以忽略时, 这些数据给出了启示。

参 考 文 献

- [1] Brune, D. et al., *Nukleonik*, **6**, 242 (1964).
- [2] Bem, H. et al., *Anal. Chim. Acta*, **124**, 373 (1981).
- [3] Currie, L. A., *Anal. Chem.*, **40**, 587 (1968).
- [4] Rossitto, F. et al., *Nucl. Instr. Methods*, **103**, 77 (1972).
- [5] Moens, L. et al., *J. Radioanal. Chem.*, **52**, 379 (1979).
- [6] Erdtmann, G., *Neutron Activation Tables*, Verlag Chemie, Weinheim, New York, 1976.

表2 干扰因子和干扰放大

元素 干扰-待测	干扰反应	$M_{IF} \left(= \frac{R_{b_i}}{R_{b_i'}} \right)$	$IF(15-2)$	$IF^*(H_i)$	元素 干扰-待测		$M_{IF} \left(= \frac{R_{b_i}}{R_{b_i'}} \right)$	$IF(15-2)$	$IF^*(H_i)$
Mg-Na	$^{24}\text{Mg}(n, p)$	8.3×10^3	1.4×10^{-5}	1.2×10^{-1}	Ru-Mo	$^{102}\text{Ru}(n, \alpha)$	9.0×10^1	4.6×10^{-7}	4.1×10^{-5}
Al-Na	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)$	8.3×10^3	7.8×10^{-6}	6.5×10^{-2}	Cd-Ag	$^{110}\text{Cd}(n, p)$	4.1×10^2	3.2×10^{-8}	1.3×10^{-5}
Ca-K	$^{42}\text{Ca}(n, p)$	7.2×10^3	1.2×10^{-6}	8.6×10^{-3}	In-Ag	$^{113}\text{In}(n, \alpha)$	4.1×10^2	8.6×10^{-10}	3.5×10^{-7}
Sc-K	$^{45}\text{Sc}(n, \alpha)$	7.2×10^3	1.1×10^{-5}	7.9×10^{-2}	In-Cd	$^{115}\text{In}(n, p)$	1.3×10^2	2.9×10^{-6}	3.8×10^{-4}
Ti-Sc	$^{46}\text{Ti}(n, p)$	1.3×10^4	2.0×10^{-7}	2.6×10^{-3}	Sn-Cd	$^{118}\text{Sn}(n, \alpha)$	1.3×10^2	7.0×10^{-9}	9.1×10^{-7}
Fe-Cr	$^{54}\text{Fe}(n, \alpha)$	1.1×10^4	3.2×10^{-6}	3.5×10^{-2}	Te-Sb	$^{122}\text{Te}(n, p)$	2.1×10^2	7.6×10^{-9}	1.6×10^{-6}
Co-Fe	$^{59}\text{Co}(n, p)$	5.5×10^3	2.7×10^{-4}	1.5	Ce-La	$^{140}\text{Ce}(n, p)$	3.5×10^3	3.3×10^{-9}	1.2×10^{-5}
Ni-Fe	$^{62}\text{Ni}(n, \alpha)$	5.5×10^3	2.4×10^{-7}	1.3×10^{-3}	Pr-Ce	$^{141}\text{Pr}(n, p)$	4.5×10^3	4.6×10^{-7}	2.1×10^{-3}
Ni-Co	$^{60}\text{Ni}(n, p)$	2.4×10^3	2.0×10^{-7}	4.8×10^{-4}	Nd-Ce	$^{144}\text{Nd}(n, \alpha)$	4.5×10^3	8.3×10^{-8}	3.7×10^{-4}
Cu-Co	$^{63}\text{Cu}(n, \alpha)$	2.4×10^3	5.7×10^{-8}	1.4×10^{-4}	Nd-Pr	$^{147}\text{Nd}(n, p)$	2.4×10^3	6.4×10^{-9}	1.5×10^{-5}
Zn-Cu	$^{64}\text{Zn}(n, p)$	4.8×10^3	3.1×10^{-5}	1.5×10^{-1}	Eu-Sm	$^{153}\text{Eu}(n, p)$	5.0×10^2	9.4×10^{-10}	4.7×10^{-7}
Ge-Ga	$^{72}\text{Ge}(n, p)$	7.5×10^2	1.8×10^{-7}	1.4×10^{-4}	Gd-Sm	$^{156}\text{Gd}(n, \alpha)$	5.0×10^2	1.4×10^{-11}	7.0×10^{-9}
As-Ga	$^{75}\text{As}(n, \alpha)$	7.5×10^2	2.1×10^{-8}	1.6×10^{-5}	Tb-Gd	$^{159}\text{Tb}(n, p)$	1.8×10^2	1.1×10^{-7}	2.0×10^{-5}
Se-As	$^{76}\text{Se}(n, p)$	4.7×10^2	8.4×10^{-8}	3.9×10^{-5}	Dy-Gd	$^{162}\text{Dy}(n, \alpha)$	1.5×10^2	1.3×10^{-9}	2.3×10^{-7}
Br-As	$^{79}\text{Br}(n, \alpha)$	4.7×10^2	5.6×10^{-8}	2.6×10^{-5}	Dy-Tb	$^{160}\text{Dy}(n, p)$	2.6×10^2	2.3×10^{-11}	8.3×10^{-9}
Sr-Rb	$^{86}\text{Sr}(n, p)$	2.7×10^2	3.9×10^{-6}	1.1×10^{-3}	Gd-Eu	$^{153}\text{Gd}(n, p)$	3.0×10^3	1.5×10^{-13}	4.5×10^{-10}
Y-Rb	$^{89}\text{Y}(n, \alpha)$	2.7×10^2	3.8×10^{-8}	1.0×10^{-5}					

FURTHER STUDY ON EPITHERMAL NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS

TIAN WEIZHI

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

ABSTRACT

A generalized advantage factor, $F = \sqrt{G} \cdot \sqrt{R_i}/R$, is proposed to represent real improvement in detection limits or relative counting statistics achieved by using ENAA. The traditional Brune's and recently suggested Bem's definitions can be considered as its two special cases with $G=R_i$ and $G=1$ respectively.

In order to obtain optimum advantage factor, it is recommended that different channels (or even different reactors) be used for total reactor neutron spectrum activation (TNA) and epithermal neutron activation (ENA).

The merits and drawbacks of Cd and BN shielders are reviewed in detail.

In addition, advantage factors of 38 reactions are determined with TNA and ENA in different reactors. Interference factors for 33 interference reactions with both ENA and TNA are estimated and interference multiplications caused by ENA are also discussed.

Key words Epithermal neutron activation analysis (ENAA), Advantage factor, Cd (B) ratio, Interference multiplication.

(上接第182页, Continued from p.182)

radiochemical-alpha spectrometry, a stable chemical yield of $(98.5 \pm 0.5)\%$ of Pu can be obtained if the purification of plutonium is carried out by the extraction with TiOA followed by quantitative electro-deposition directly from back extraction solution with ascorbic acid. When the irradiated uranium rod is cut into pieces, the plutonium concentrations from different pieces show a axially symmetric distribution and a linear relation with known fuel burn up (^{148}Nd). This method needs only a sample of $\sim 0.2 \mu\text{g}$ Pu and the addition of a standard solution of ^{242}Pu is not required.

Key words The method of radiochemical-alpha spectrometry, The concentration of plutonium isotopes, Extraction, Ascorbic acid, Electrodeposition.