

# 第五不稳定核素系及其特性

张家骅

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

**摘要** 将 4 个分别以  $^{238}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$ 、 $^{237}\text{Np}$  为母体的, 由于内因的放射性衰变作用而形成的不稳定核素系加以剖析, 并分析其成系所遵循的规律, 发育阶段和进入平衡阶段后所显出的特性等。以此作为参照样本, 分析了  $^{238}\text{U}$  (或  $^{232}\text{Th}$ ) 在核反应堆的中子通量连续作用下所产生的各代衍生核素的演化过程, 并得出完全符合形成不稳定核素系的条件。为此特称之为第五不稳定核素系。它在达到平衡阶段时所显现的特征为: 全系核素在外因作用下 (即堆中子的作用下) 所导致的原子损耗几乎全部转化为裂变产物。

**关键词** 不稳定核素系, 衍生核素, 中子通量, 耗裂转化比

作者曾报道过“第五不稳定核素系”的存在<sup>[1]</sup>, 指的是  $^{238}\text{U}$  (或  $^{232}\text{Th}$ ) 在核反应堆中子通量的长期作用下所产生的多代衍生核素离列, 当其原子密度达到饱和时会形成一个处于平衡状态的不稳定核素系。取名“第五”是由于已经有四个放射性衰变核素系, 即铀系 ( $^{238}\text{U}$ )、钍系 ( $^{232}\text{Th}$ )、镅系 ( $^{235}\text{U}$ ) 和镎系 ( $^{237}\text{Np}$ ), 括号内的核素是该系的母体。可以看出这四个系的共同特点是相邻的两代核素的质量差为 4 或 0, 即  $\Delta A = 4, 0$ ; 如  $\Delta A = 4$  表明是  $\alpha$  衰变, 如  $\Delta A = 0$  则表明是  $\beta$  衰变。同时也看出有些后来找到的核素如  $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{240}\text{Pu}$  等并未能列入这四个系之中。由此看出成系与否有它自身的规律, 符合这一规律才能成为系中的成员。了解这一规律就可以用它来衡量  $^{238}\text{U}$  (或  $^{232}\text{Th}$ ) 在堆中子通量的连续作用下所产生的一代接着一代的衍生核素序列在什么条件下能成为“不稳定核素系”。此处衍生核素是由于吸收中子而产生的, 相邻两代核素的  $\Delta A = 1$ , 衍生核素的质量要比母体的在 (但也有少数是由  $\beta$  衰变相连生的, 即  $\Delta A = 0$ ), 代序越远的衍生核素其原子质量数越大且没有明确的极限。由于  $A$  相同的两个核素总是只能有一个核素较为稳定些, 而由中子作用的衍生核素又是  $\Delta A = 1$ , 这样就导致以  $^{238}\text{U}$  为母体所产生的衍生核素序列除极个别的外几乎和以  $^{232}\text{Th}$  为母体的远些代序的衍生核素完全相同<sup>[2]</sup>, 即属于同一个不稳定核素系。故在已知的四个放射性衰变核素系之外称这一个受外因作用而形成的不稳定核素系为“第五不稳定核素系”似乎是相宜的。

## 1 放射性衰变核素系的剖析

众所周知, 原子序数大于 93 的所有核素全都是放射性的。但是它们之中有些核素并不能纳入已知的四个放射性衰变核素系之中, 如  $^{236}\text{U}$ 、 $^{240}\text{Pu}$  只能是钍系的前体,  $^{242}\text{Pu}$  只能是铀系的前体等。为了弄清这一问题, 不妨回顾一下放射性衰变核素系的母体和各代子体的发育历程: 令  $N$  和  $\Delta$  分别代表原子密度和衰变常数, 符号右下标  $0, 1, 2, \dots, i, \dots, (l-1), l$  分别代表母体, 第 1 代子体, 第 2 代子体,  $\dots$ , 第  $i$  代子体末代前一代的子体和末代子体。在开始

收稿日期: 1996-06-04, 修回日期: 1996-07-10

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

时只有母体核素, 其原子密度为  $N_0(0)$ , 于是有

$$N_0(t) = N_0(0)e^{-\Lambda_0 t} \quad (1)$$

式中,  $t$  为时间. 第 1 代子体及其后各代子体的原子密度可用贝特曼公式表示

$$N_1(t) = N_0(0)\Lambda_0 [e^{-\Lambda_0 t}/(\Lambda_1 - \Lambda_0) + e^{-\Lambda_1 t}/(\Lambda_0 - \Lambda_1)] = N_0(0)\Lambda_0 [(e^{-\Lambda_0 t} - e^{-\Lambda_1 t})/\Lambda_{10}] \quad (2)$$

式中,  $\Lambda_{10} = \Lambda_1 - \Lambda_0 = -(\Lambda_0 - \Lambda_1) = -\Lambda_0\Lambda_{10}$  以下用与此相同的简化的方式, 则

第 2 代子体为

$$N_2(t) = N_0(0)\Lambda_0\Lambda_1 [e^{-\Lambda_0 t}/(\Lambda_{10}\Lambda_{20}) + e^{-\Lambda_1 t}/(\Lambda_{01}\Lambda_{21})] = e^{-\Lambda_0 t}/(\Lambda_{02}\Lambda_{12}) \quad (3)$$

第  $i$  代子体为

$$N_i(t) = N_0(0)\Lambda_0\Lambda_1\cdots\Lambda_{i-1} [e^{-\Lambda_0 t}/(\Lambda_{10}\Lambda_{20}\cdots\Lambda_{i0}) + e^{-\Lambda_1 t}/(\Lambda_{01}\Lambda_{21}\cdots\Lambda_{i1}) + e^{-\Lambda_{i-1} t}/(\Lambda_{0,i-1}\Lambda_{1,i-1}\cdots\Lambda_{i-1,i-1}) + e^{-\Lambda_{i-2} t}/(\Lambda_{0,i-2}\Lambda_{1,i-2}\cdots\Lambda_{i-2,i-2}) + \cdots + e^{-\Lambda_1 t}/(\Lambda_{0,i-1}\Lambda_{1,i-1}\cdots\Lambda_{i-1,i-1})] \quad (4)$$

末代子体为稳定性核素,  $\Lambda_l = 0$  故  $\Lambda_{l0} = -\Lambda_0$ , 其余类推

$$N_l(t) = N_0(0)\Lambda_0\Lambda_1\cdots\Lambda_{l-1} [e^{-\Lambda_0 t}/(\Lambda_{10}\Lambda_{20}\cdots(-\Lambda_0)) + e^{-\Lambda_1 t}/(\Lambda_{01}\Lambda_{21}\cdots(-\Lambda_1)) + \cdots + (\Lambda_0\Lambda_1\cdots\Lambda_{l-1})^{-1}] \quad (5)$$

可以看出方括号内的各项数值随着  $t$  的增大呈现指数下降, 而含  $\Lambda$  值较大的项将一个接着一个因太小而被略去, 最终只剩下  $\Lambda$  值最小的一项, 刚好就是母体这一项, 因为四个系的  $\Lambda_0$  值在它的系中均是最小的. 假定当  $t > T$  后, 上式括号内各项除了含  $\Lambda$  的项外其他各项相比之下均因太小而可略去, 则以上式 (2) 至式 (5) 可简化成

$$N_1(t) = N_0(0)(\Lambda_0\Lambda_{10})e^{-\Lambda_0 t} \quad (2')$$

$$N_2(t) = N_0(0)[\Lambda_0\Lambda_1/(\Lambda_{10}\Lambda_{20})]e^{-\Lambda_0 t} \quad (3')$$

$$N_i(t) = N_0(0)[\Lambda_0\Lambda_1\cdots\Lambda_{i-1}/(\Lambda_{10}\Lambda_{20}\cdots\Lambda_{i0})]e^{-\Lambda_0 t} \quad (4')$$

$$N_l(t) = N_0(0)\{1 - [\Lambda_0\Lambda_1\cdots\Lambda_{l-1}/(\Lambda_{10}\Lambda_{20}\cdots\Lambda_{l-1,0})]e^{-\Lambda_0 t}\} \quad (5')$$

从这些表达式可以看出放射性衰变核素系在形成过程中可以分为两个阶段, 当  $t < T$  时是发育阶段,  $t > T$  则是平衡阶段, 各代不稳定核素子体的原子密度均达到饱和状态, 且子体对母体的动态原子密度比  $R$  为常数, 即

$$R_1 = N_1(t)/N_0(t) = \Lambda_0\Lambda_{10}$$

$$R_2 = N_2(t)/N_0(t) = \Lambda_0\Lambda_1/(\Lambda_{10}\Lambda_{20})$$

$\vdots$

$$R_i = N_i(t)/N_0(t) = \Lambda_0\Lambda_1\cdots\Lambda_{i-1}/(\Lambda_{10}\Lambda_{20}\cdots\Lambda_{i0})$$

$\vdots$

$$R_l(t) = N_l(t)/N_0(t) = e^{-\Lambda_0 t} - [\Lambda_1\Lambda_2\cdots\Lambda_{l-1}/(\Lambda_0\Lambda_1\cdots\Lambda_{l-1})]e^{-\Lambda_{l-1} t}$$

由此可见只有末代子体是个例外,  $R_l(t)$  为  $t$  的函数. 由于  $R_1, R_2, \cdots, R_{l-1}$  均是常数, 那么一开始时如果能将各子体的含量按  $R_1, R_2, \cdots$  的比数用人工方法将其配好, 则整个系统马上就进入平衡阶段, 各核素的衰变情况分别如下

母体开始时密度为  $N_0(0)$ , 因而

$$N_0(t) = N_0(0)e^{-\Lambda_0 t} \quad (1)^*$$

随后接着产生的各代子体如式 (2) 至式 (5) 所表达的, 同时由人工配制的各核素均作为母体衰变, 故后代子体系统的各代子体密度应将各相同核素的密度求和, 这样有

$$N_1(t) = N_0(0)[\Lambda_0\Lambda_{10}e^{-\Lambda_0 t} + (\Lambda_0\Lambda_{01})e^{-\Lambda_1 t} + (\Lambda_0\Lambda_{01})e^{-\Lambda_1 t}] = N_0(0)R_1e^{-\Lambda_0 t} \quad (2)^*$$



因 (中子) 作用而导致该核素耗损的物理参数。显然

$$\Lambda^n = H\epsilon = H[\epsilon^c + \epsilon^f + \epsilon^{2n} \dots] \quad (8)$$

式中,  $H$  为反应堆的中子通量,  $\epsilon$  为该核素与堆中子作用的反应截面,  $\epsilon^c$  为  $(n, \gamma)$  反应的截面,  $\epsilon^f$  为  $(n, f)$  反应 (即核素吸收中子而导致自身裂变) 的截面,  $\epsilon^{2n}$  为  $(n, 2n)$  反应的截面。事实上,  $\epsilon$  包含多种不同的反应截面, 但数值较大而能使核素改变其质量组成的只有式 (8) 所标明的三种, 其它的都可予以省略; 而且  $\epsilon$  并不固定, 而是与中子能谱有关。同时堆的中子通量  $H$  也是可变的。因此,  $\Lambda^n$  值虽然在恒定的  $H$  和  $\epsilon$  值下可以作为常数处理, 但它并不象  $\Lambda^R$  那样是固定不变的值。在通常情况下,  $H$  值在  $10^{13} - 10^{14}$  这两个量级, 而  $\epsilon$  值, 参照单群中子 *Origen-2* 程序的资料, 在  $10^{-24} - 10^{-22}$  这三个量级, 所以  $\Lambda^n$  值当在  $10^{-8} - 10^{-1}$  的范围内。这样对于长半衰期的核素如  $^{238}\text{U}$   $^{232}\text{U}$  等,  $\Lambda^R$  可以略去; 而对于短半衰期的核素如  $^{239}\text{U}$   $^{239}\text{Np}$   $^{233}\text{Th}$   $^{237}\text{U}$  等, 则  $\Lambda^n$  可略去; 只有很少的核素必须两者并存, 但较弱的可作为分支的不稳定核素序列处理。  $\epsilon^{2n}$  值一般都较小, 相文将暂且不作处理, 以免处理分支序列时增加演算的复杂性, 但这样的省略并不影响原理上的真实性。这样,  $\Lambda^n = \lambda^c + \lambda^f$ , 当  $\Lambda^R \ll \Lambda^n$  时,  $\Lambda = \Lambda^n = \lambda^c + \lambda^f$ ; 当  $\Lambda^n \ll \Lambda^R$  时,  $\Lambda = \lambda^R + \lambda^f$ ,  $\lambda^f$  所以要保留守全是为了系统演算上的需要。这样,  $^{239}\text{U}$  在堆中子的长期连续作用下, 母体及各代衍长核素的原子密度表达国

母体  $^{238}\text{U}$

$$N_0(t) = N_0(0) e^{-\Lambda_0 t} \quad (\Lambda_0 = \lambda_0^c + \lambda_0^f) \quad (9)$$

第 1 代衍生核素  $^{239}\text{U}$

$$N_1(t) = N_0(0) [(\lambda_0 \Lambda_{10}) e^{-\Lambda_0 t} + (\lambda_0^f \Lambda_{01}) e^{-\Lambda_1 t}] \quad (\Lambda_1 = \lambda_1^c + \lambda_1^f) \quad (10)$$

第 2 代衍生核素  $^{239}\text{Np}$

$$N_2(t) = N_0(0) \lambda_0 \lambda_1 [e^{-\Lambda_0 t} / (\Lambda_{10} \Lambda_{20}) + e^{-\Lambda_1 t} / (\Lambda_{21} \Lambda_{01}) + e^{-\Lambda_2 t} / (\Lambda_{02} \Lambda_{12})] \quad (11)$$

第  $i$  代衍生核素

$$N_i(t) = N_0(0) \lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{i-1} [e^{-\Lambda_0 t} / (\Lambda_{10} \Lambda_{20} \dots \Lambda_{i0}) + e^{-\Lambda_1 t} / (\Lambda_{01} \Lambda_{21} \dots \Lambda_{i1}) + \dots + e^{-\Lambda_i t} / (\Lambda_{0i} \Lambda_{1i} \dots \Lambda_{(i-1)i})] \quad (12)$$

由于  $(n, \gamma)$  反应是一种普遍存在的反应, 衍生的核素序难以确认哪一代是末代。可是, 在这一核素系列中第一核素的  $(n, f)$  反应的截面均不为零, 即每一代核素均有一部分原子因裂变而离开了这个系列, 使衍生核素往后转变的数目越来越少。母体衍生核素的裂变产物原子密度表达式可参照 (5), 因而

$$N_0^f(t) = N_0(0) [\lambda_0^f / (-\Lambda_0)] (e^{-\Lambda_0 t} - 1) = N_0(0) [(\Lambda_{00}) \Lambda_0] (1 - e^{-\Lambda_0 t}) \quad (13)$$

第 1 代衍生核素的裂变

$$N_1^f(t) = N_0(0) \lambda_0 \lambda_1^f \{e^{-\Lambda_0 t} / [(\Lambda_{10} (-\Lambda_0))] + e^{-\Lambda_1 t} / [\Lambda_{01} (-\Lambda_1)] + (\Lambda_{01} \Lambda_1)^{-1}\} \\ = N_0(0) [\lambda_0 \lambda_1^f / (\Lambda_{01} \Lambda_1)] [1 - (\Lambda_1 e^{-\Lambda_0 t} \Lambda_{10}) - (\Lambda_0 e^{-\Lambda_1 t} \Lambda_{01})] \quad (14)$$

同理可得第 2 代衍生核素的衰变

$$N_2^f(t) = N_0(0) [\lambda_0 \lambda_1 \lambda_2^f / (\Lambda_{01} \Lambda_{21} \Lambda_2)] [1 - \Lambda_2 \Lambda_2 e^{-\Lambda_0 t} / (\Lambda_{10} \Lambda_{20}) - \Lambda_0 \Lambda_2 e^{-\Lambda_1 t} / (\Lambda_{01} \Lambda_{21}) - \Lambda_0 \Lambda_1 e^{-\Lambda_2 t} / (\Lambda_{02} \Lambda_{12})] \quad (15)$$

第  $i$  代衍生核素的衰变

$$N_i^f(t) = N_0(0) [\lambda_0 \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_i^f / (\Lambda_{01} \Lambda_{21} \dots \Lambda_{i1})] [1 - \Lambda_i \Lambda_{21} \dots \Lambda_{i1} e^{-\Lambda_0 t} / (\Lambda_{10} \Lambda_{20} \dots \Lambda_{i0}) - \Lambda_0 \Lambda_{21} \dots \Lambda_{i1} e^{-\Lambda_1 t} / (\Lambda_{01} \Lambda_{21} \dots \Lambda_{i1}) - \dots - \Lambda_0 \Lambda_{11} \dots \Lambda_{i-1} e^{-\Lambda_i t} / (\Lambda_{0i} \Lambda_{1i} \dots \Lambda_{(i-1)i})] \quad (16)$$

由于  $\Lambda_0$  是本序列各核素的  $\Lambda$  值中最小的, 因而本系的衍生核素群可以从发育阶段发展到平衡饱和阶段, 也可以用人工配制的办法达到这一阶段。这样, 上述各表达式方括号内各指数项除了含  $\Lambda_0$  的项得以保存外, 其他各项均可略去, 因而

$$N_1(t) = N_0(0)\lambda_0 e^{-\Lambda_0 t} \Lambda_{10} \quad (10)^*$$

$$N_2(t) = N_0(0)\lambda_0 \lambda_1 e^{-\Lambda_0 t} / (\Lambda_{10}(\Lambda_{20})) \quad (11)^*$$

第 1 代衍生核素的原子密度表达式为

$$N_i(t) = N_0(0)\lambda_0 \lambda_1 \lambda_2 \cdots \lambda_{i-1} e^{-\Lambda_0 t} / (\Lambda_{10}(\Lambda_{20} \cdots \Lambda_{i0})) \quad (12)^*$$

这里需要作些说明: (1) 这一系列并无明确的末代衍生核素, 可是如果将放射性衰变系中的末代子体看成是母体衰变所耗掉原子的“归宿处”, 那么本系列的母体因中子作用而耗损掉的原子也有明确的归宿处, 那就是通过各代衍生核素的或大或小的裂变反应而变成裂变产物。因此, 裂变产物可以看作是母体与中子作用被耗损原子的归宿处, 也就是母体的末代衍生核素, 但是从母体到末代有许多途径。(2) 从现有的资料可得出母体  $\Lambda_0$  值比各代衍生核素的  $\Lambda$  值都小, 这样在连续不断的堆中子作用下, 本系统各代衍生核素从其发育阶段虽可以发展到饱和平衡阶段, 但需要很长的时间。由于平衡阶段的各代衍生核素对母体的动态原子密度比可以从理论上求得, 这样也可以用人工合成的办法将各核素的组成进行配制, 从而可以较快地进入平衡阶段。平衡阶段各衍生核素的表达式如下 (参照前面的有关公式)

$$\text{母体} \quad N_0(t) = N_0(0) e^{-\Lambda_0 t}$$

$$\text{第 1 代} \quad N_1(t) = N_0(0) (\lambda_0 \Lambda_{10}) e^{-\Lambda_0 t} = N_0(0) R_1 e^{-\Lambda_0 t} \quad (17)$$

$$\text{第 2 代} \quad N_2(t) = N_0(0) [\lambda_0 \lambda_1 / (\Lambda_{10} \Lambda_{20})] e^{-\Lambda_0 t} = N_0(0) R_2 e^{-\Lambda_0 t} \quad (18)$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots$$

$$\text{第 } i \text{ 代} \quad N_i(t) = N_0(0) [\lambda_0 \lambda_1 \lambda_2 \cdots \lambda_{i-1} / (\Lambda_{10} \Lambda_{20} \cdots \Lambda_{i0})] e^{-\Lambda_0 t} = N_0(0) R_i e^{-\Lambda_0 t} \quad (19)$$

末代子体, 如上所述为裂变产物, 且各代核素均有或大或小的贡献, 必须分别表达。裂变产物还可与中子作用连续演化, 但本文目的只在求裂变产物的产量, 可暂定  $\Lambda_i = 0$ 。因此, 母体衍生核素的裂变量

$$\begin{aligned} N_0^f(t) &= N_0(0) [(\Lambda_0 - \lambda_0 \Lambda_0) (1 - e^{-\Lambda_0 t})] \\ &= N_0 [1 + R_1 - R_1 \Lambda_1 \Lambda_0] (1 - e^{-\Lambda_0 t}) \end{aligned} \quad (20)$$

式中,  $R_1 = \lambda_0 \Lambda_{10}$

第 1 代衍生核素的裂变量

$$\begin{aligned} N_1^f(t) &= N_0(0) R_1 (\lambda_1^f \Lambda_0) (1 - e^{-\Lambda_0 t}) \\ &= N_0(0) [R_1 \Lambda_1 \Lambda_0 + R_2 - R_2 \Lambda_2 \Lambda_0] (1 - e^{-\Lambda_0 t}) \end{aligned} \quad (21)$$

式中,  $R_1$  同前,  $R_2 = R_1 \lambda_1 \Lambda_{20}$

同理得第 2 代衍生核素的裂变量

$$\begin{aligned} N_2^f(t) &= N_0(0) R_1 (\lambda_1^f \Lambda_0) (1 - e^{-\Lambda_0 t}) \\ &= N_0(0) [R_2 \Lambda_2 \Lambda_0 + R_3 - R_3 \Lambda_3 \Lambda_0] (1 - e^{-\Lambda_0 t}) \end{aligned} \quad (22)$$

式中,  $R_2$  同前,  $R_3 = R_2 \lambda_2 \Lambda_{30}$

由此可看出式 (20) — 式 (22) 有相同的表达式, 只是右下标的数字不同而已。依此规律可以将任何一代衍生核素的裂变量写出

$$N_i^f(t) = N_0(0) [R_i \Lambda_i \Lambda_0 + R_{i+1} - R_{i+1} \Lambda_{i+1} \Lambda_0] (1 - e^{-\Lambda_0 t}) \quad (23)$$

从以上各式可以看出每式的方括号内有三项, 但第三项和下一代方括号内的第一项正好相同但符号相反, 故可以互相抵销。这样, 假定只取到第  $r$  代, 则全系统的裂变总量为

$$NF(k, t) = No(0) [1 + R_1 + R_2 + \dots + R_{k+1}] (1 - e^{-\Lambda_0 t} - Nd(k, t)) \quad (24)$$

式中,

$$Nd(k, t) = No(0) R_{k+1} (\Lambda_{k+1} \Lambda_0) (1 - e^{-\Lambda_0 t}) \quad (25)$$

可看成是转变为第  $r+1$  代的总量, 亦即系统的泄漏量。式 (24) 右边的第一项为母体及各衍生核素与堆中子通量作用, 在时间  $0 \sim t$  内所产生的耗损量, 用  $Nc(k, t)$  表示, 则

$$Nc(k, t) = No(0) [1 + R_1 + R_2 + \dots + R_{k+1}] (1 - e^{-\Lambda_0 t})$$

或

$$Nc(k, t) = NF(k, t) + Nd(k, t) \quad (26)$$

从理论上讲, 如果  $k$  取很远的代序, 则泄漏  $Nd(k, t)$  将是很小的, 可以略去, 于是有很高耗损—裂变转化比, 即

$$Nc(k, t) = NF(k, t) \quad \text{或} \quad NF(k, t) / Nc(k, t) = 1 \quad (27)$$

即全系统与堆中子通量作用所致的耗损几乎全部转化为裂变产物。这一特点可认为第五不稳定核素的一种特殊属性。这一性质同放射性衰变核素系在平衡阶段全系的表观放射性耗损量全部转化为稳定核素是非常相似的。所不同的是式 (27) 表示的是“几乎全部转化”而不是完全转化。其所以如此, 一是母体及衍生核素与中子的作用可以产生多种反应 (文中只取其中截面较大的两种<sup>[2]</sup>, 而略去其它如  $(n, \alpha)$   $(n, p)$   $(n, pn)$  等); 二是本系并无明确的最后一代的衍生核素, 因而泄漏项总是存在的。

### 3 结 论

(1) 以  $^{238}\text{U}$  (或  $^{232}\text{Th}$ ) 为母体在核反应堆中子通量的连续长期作用下所产生的多代衍生核素序列可以看成是由外因作用而形成的不稳定核素系, 并可称之为“第五不稳定核素系” (简称“五系”)。

(2) 由于母体的  $\Lambda_0$  值与系中其它核素的  $\Lambda$  值相比是最小的, 因此, 本系可以从发育阶段发展到平衡阶段, 但需要较长的时间。如果采用人工配制各衍生核素的组成, 则能够较快地进入平衡阶段。

(3) “五系”是依靠外因即与中子的反应作用来连接相邻两代的衍生核素的。因此当外因消失, “五系”即告解体。

(4) 在平衡阶段, “五系”具有以下三个特殊属性: (a) 衍生核素对母体的动态原子密度比为常数; (b) 各衍生核素在中子作用下的表观耗损率与母体的耗损率相同; (c) 全系统受中子作用的耗损量几乎全部转化为裂变产物。

(5) “五系”的末代衍生核素定为裂变产物, 它是全系耗损物质的归宿处。各代核素均有裂变的几率, 虽然其大小可相差悬殊。

(6) 用人工的方法配制“五系”的组成时, 若  $r$  序数取较小的值, 并据此配制核素入系, 则成为不完整的五系, 可称之为“准五系”。已入系的衍生核素均各属于平衡阶段。未加配制的序数大于  $r$  的核素则处于发育阶段, 此时式 (26) 仍可适用, 这样的“准五系”似乎较易于实现。

### 参 考 文 献

1 Zhang Jiahua. Nuclear Science and Techniques, 1996; 7 (1): 21

2 张家骅. 核技术, 1993; 16 (8): 454

3 McLane JV, *et al.* Neutron Cross Sections, Academic Press, 1988; 2 683

## The fifth unstable nuclide series and its peculiar property

Zhang Jiahua

(Shanghai Institute of Nuclear Research, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

### Abstract

It is pointed out that the group of derived nuclides generated by the interaction of  $^{238}\text{U}$  and reactor neutron flux actually forms a new type of unstable nuclide series, i. e. the fifth unstable nuclide series. The role of fission products played in the series is similar to the stable Pb isotope (or  $^{209}\text{Bi}$ ), the last generation daughter nuclide in the radioactive decay series. So that fission products should be regarded as the generation of derived nuclide of the fifth unstable nuclide series. Since in radioactive decay as well as its whole family of radioactive daughter nuclide of the fifth unstable nuclide series. Since in radioactive decay series the total quantity of atoms lost due to radioactive decay of the parent nuclide as well as its whole family of radioactive daughter nuclides transforms entirely to stable nuclide Pb, this means transformation ratio equals to unity. Thus the peculiar property of transformation ratio approaching unity in the fifth unstable nuclide series is understandable. As a full set of the fifth unstable nuclide series is very difficult to obtain, idea on the quasi- fifth unstable nuclide series, which consists of only the upper generations of the derived nuclides which are in equilibrium with their parent, is introduced.

**Key words** Unstable nuclide series, Derived nuclides, Neutron flux, loss- fission transformation ratio