

裂变产物放射特性手册

〔苏〕Н. Г. 古雪夫

原子能出版社

57-63

内 容 简 介

书中列出了在核反应堆内和在瞬发裂变时形成的裂变产物的基本放射特性：独立产额和累积产额；裂变产物及其混合物的微分放射性和总放射性，微分 γ 当量和总 γ 当量；单位反应堆功率的 γ 释能率； γ 辐射的有效剂量谱和能谱组成。本书对各种最常见的裂变类型，按不同的辐照时间（在反应堆内）和辐照后的冷却时间（或瞬发裂变后的滞留时间），计算了裂变产物放射特性。

本书可供从事裂变物质再加工或在各个科学技术领域从事裂变物质利用工作的物理学家、设计工程师以及其他工作人员参考。它对高等院校工程物理专业的大学生和研究生也是有用的。

Николай Григорьевич Гусев,
Петр Михайлович Рубцов,
Виктор Владимирович Коваленко,
Виктор Михайлович Колобашкин

РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ СПРАВОЧНИК

Атомиздат 1974

☆

裂变产物放射特性手册

[苏] Н. Г. 古雪夫等编

华明川 邢馥吏译

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京印刷一厂印刷

(北京西便门)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $13\frac{3}{4}$ ·字数 327 千字

1980年6月北京第一版·1980年6月北京第一次印刷

印数001—2500·统一书号：15175·181

定价：2.00元

前言

铀、钚、钍、超铀元素等重核被中子分裂时，生成大量的人造放射性核素——裂变产物。本书研究的是在核反应堆内或在瞬发裂变时产生的裂变产物的放射特性。这些特性包括：裂变的独立产额和累积产额；总的和微分的放射性及 γ 当量； γ 辐射的有效能量和有效谱；单位功率释能率和光子数。重点是裂变产物及其混合物的 γ 辐射特性。

必须指出，半导体探测器的应用为实验工作者更精确地测定衰变图提供了很大的可能性。因此在本书中采用了根据近几年的期刊文献资料计算的光子产额（它们将在H. Г. 古雪夫和П. П. 德米特里耶夫的手册《放射性同位素光子辐射》中发表）。本书的特点是资料齐全，并对在裂变独立产额、半衰期、 γ 辐射的光子产额及能量、同量异位链的分支系数等计算中所采用的原始数据作了根本的订正。

现代固定式核反应堆是在暂时停堆期间进行部分换料的。书中首次给出周期性停止运行的反应堆内产生的裂变产物混合物的放射特性。在下列情况下，人们要同裂变产物打交道：对堆内辐照过的核燃料进行化学和冶金处理时，核电站和其他反应堆运行时，处理、运输及贮存放射性废物时，在使用临界装置，在辐射化学研究中以及在国民经济若干领域中。

对辐照过燃料元件中 Cs^{134} 的积累和衰变也作了计算。 Cs^{134} 是稳定裂变产物 Cs^{133} 俘获热中子而产生的。

对由热中子引起的 U^{235} 裂变产物给出了最完整的放射特性。对其它裂变类型，这些参数以简略的形式给出。

为简明起见，表格中的 $N \times 10^{\pm n}$ 数值写成 $N \pm n$ 形式。

附录 I 列出了核反应堆裂变产物混合物放射性 $Q(T, t)$ 及释能率 $S(T, t)$ 的计算公式和系数(A, B, C, D)。这些经验公式的最大误差为 $\pm 10\%$ 。

附录 II 给出了氪(Kr)、氙(Xe)同位素及其逸出燃料元件后 0—12 小时内所生成的子体产物的混合物的放射特性和有效能谱。列出了以下三种情况的例子：*a.* 瞬时释放；*b.* 燃料元件熔化；*c.* 临界装置的瞬时释放。注意，*a* 和 *b* 情况下的放射特性只适用于 $60 \text{天} \leq T \leq 3 \text{年}$ 。

Л. А. 鲁尚斯基和 В. П. 丘尔金参加编制附录。

目 录

前言

第一章 裂变物质和裂变产物的基本物理特性	(1)
引言	(1)
1.1 关于重核裂变的概念	(1)
1.2 裂变产物的独立产额和累积产额定义	(2)
1.3 对输入参数的讨论	(10)
1.4 同量异位链图	(23)
参考文献	(30)
第二章 裂变产物放射特性的计算	(31)
引言	(31)
2.1 裂变产物比放射性的计算方法	(31)
2.2 裂变产物混合物 γ 辐射的有效能量和有效谱组成的计算	(35)
2.3 恒定功率反应堆内形成的裂变产物比放射性	(41)
2.4 裂变产物混合物的派生放射特性	(42)
参考文献	(42)
第三章 热中子反应堆内形成的 U^{235} 裂变产物的放射特性	(43)
引言	(43)
3.1 辐照时间 $T=3$ 年的 U_{th}^{235} 裂变产物比放射性 $Q(T, t)$, 居里/千瓦	(45)
冷却时间 $t=0-12$ 小时	(45)
冷却时间 $t=1-90$ 天	(48)
冷却时间 $t=120$ 天—10年	(50)
3.2 辐照时间 $T=3$ 年的 U_{th}^{235} 裂变产物比 γ 当量 $M(T, t)$, 克镭当量/千瓦	(51)
冷却时间 $t=0-12$ 小时	(51)
冷却时间 $t=1-90$ 天	(53)
冷却时间 $t=120$ 天—10年	(54)
3.3 辐照时间 $T=1$ 年的 U_{th}^{235} 裂变产物比放射性 $Q(T, t)$, 居里/千瓦	(54)
冷却时间 $t=0-90$ 天	(54)
冷却时间 $t=120$ 天—10年	(55)
3.4 辐照时间 $T=1$ 年的 U_{th}^{235} 裂变产物比 γ 当量 $M(T, t)$, 克镭当量/千瓦	(56)
冷却时间 $t=0-90$ 天	(56)
冷却时间 $t=120$ 天—10年	(56)
3.5 辐照时间 $T=120$ 天的 U_{th}^{235} 裂变产物比放射性 $Q(T, t)$, 居里/千瓦	(57)
冷却时间 $t=0-90$ 天	(57)
冷却时间 $t=120$ 天—10年	(58)
3.6 辐照时间 $T=120$ 天的 U_{th}^{235} 裂变产物比 γ 当量 $M(T, t)$, 克镭当量/千瓦	(59)
冷却时间 $t=0-90$ 天	(59)
冷却时间 $t=120$ 天—10年	(59)
3.7 辐照时间 $T=0.01$ 天的 U_{th}^{235} 裂变产物比放射性 $Q(T, t)$, 居里/千瓦	(60)
3.8 U_{th}^{235} 裂变产物混合物的总放射性 $Q(T, t)$, 居里/千瓦	(64)
3.9 U_{th}^{235} 裂变产物混合物的总 γ 当量 $M(T, t)$, 克镭当量/千瓦	(64)
3.10 U_{th}^{235} 裂变产物混合物 γ 辐射的总释能率 $S(T, t)$, 10^{10} 兆电子伏/秒·千瓦	(65)

3.11 U_{th}^{235} 裂变产物混合物的总 γ 光子数 $N(T, t)$, 10^{10} γ 光子/秒·千瓦	(65)
3.12 U_{th}^{235} 裂变产物混合物 γ 辐射的光子数谱有效能量 $E_i(T, t)$, 千电子伏/ γ 光子	(66)
辐照时间 $T=0.01-150$ 天, 冷却时间 $t=0-10$ 年	(66)
辐照时间 $T=180$ 天 $-\infty$, 冷却时间 $t=0-10$ 年	(68)
3.13 U_{th}^{235} 裂变产物混合物 γ 辐射的剂量谱有效能量 $E_i(T, t)$, 千电子伏/ γ 光子	(69)
辐照时间 $T=0.01-150$ 天, 冷却时间 $t=0-10$ 年	(69)
辐照时间 $T=180$ 天 $-\infty$, 冷却时间 $t=0-10$ 年	(71)
3.14 U_{th}^{235} 裂变产物混合物 γ 辐射的有效剂量谱组成 $n_i(E_i, T, t)$, %	(73)
辐照时间 $T=0.01$ 天 $-\infty$, 冷却时间 $t=0-10$ 年	(73)
3.15 U_{th}^{235} 裂变产物混合物 γ 辐射的有效能谱组成 $n_i(E_i, T, t)$, %	(74)
辐照时间 $T=0.01$ 天 $-\infty$, 冷却时间 $t=0-10$ 年	(74)
3.16 U_{th}^{235} 裂变产物混合物 γ 辐射的有效光子数谱组成 $n_i(E_i, T, t)$, %	(76)
辐照时间 $T=0.01$ 天 $-\infty$, 冷却时间 $t=0-10$ 年	(76)

第四章 热中子反应堆内形成的 U_{th}^{233} 裂变产物的放射特性 (79)

4.1 辐照时间 $T=3$ 年的 U_{th}^{233} 裂变产物比放射性 $Q(T, t)$, 居里/千瓦	(79)
冷却时间 $t=0-12$ 小时	(79)
冷却时间 $t=1-90$ 天	(83)
冷却时间 $t=120$ 天 -10 年	(84)
4.2 辐照时间 $T=3$ 年的 U_{th}^{233} 裂变产物比 γ 当量 $M(T, t)$, 克镭当量/千瓦	(85)
冷却时间 $t=0-12$ 小时	(85)
冷却时间 $t=1-90$ 天	(87)
冷却时间 $t=120$ 天 -10 年	(88)
4.3 辐照时间 $T=1$ 年的 U_{th}^{233} 裂变产物比放射性 $Q(T, t)$, 居里/千瓦	(89)
冷却时间 $t=0-90$ 天	(89)
冷却时间 $t=120$ 天 -10 年	(89)
4.4 辐照时间 $T=1$ 年的 U_{th}^{233} 裂变产物比 γ 当量 $M(T, t)$, 克镭当量/千瓦	(90)
冷却时间 $t=0-90$ 天	(90)
冷却时间 $t=120$ 天 -10 年	(91)
4.5 辐照时间 $T=120$ 天的 U_{th}^{233} 裂变产物比放射性 $Q(T, t)$, 居里/千瓦	(92)
冷却时间 $t=0-90$ 天	(92)
冷却时间 $t=120$ 天 -10 年	(93)
4.6 辐照时间 $T=120$ 天的 U_{th}^{233} 裂变产物比 γ 当量 $M(T, t)$, 克镭当量/千瓦	(94)
冷却时间 $t=0-90$ 天	(94)
冷却时间 $t=120$ 天 -10 年	(94)
4.7 U_{th}^{233} 裂变产物混合物的总放射性 $Q(T, t)$, 居里/千瓦	(95)
4.8 U_{th}^{233} 裂变产物混合物的总 γ 当量 $M(T, t)$, 克镭当量/千瓦	(96)
4.9 U_{th}^{233} 裂变产物混合物 γ 辐射的总释能率 $S(T, t)$, 10^{10} 兆电子伏/秒·千瓦	(96)
4.10 U_{th}^{233} 裂变产物混合物的总 γ 光子数 $N(T, t)$, 10^{10} γ 光子/秒·千瓦	(97)
4.11 U_{th}^{233} 裂变产物混合物 γ 辐射的有效剂量谱组成 $n_i(E_i, T, t)$, %	(97)
辐照时间 $T=0.01$ 天 $-\infty$, 冷却时间 $t=0-10$ 年	(97)
4.12 U_{th}^{233} 裂变产物混合物 γ 辐射的有效能谱组成 $n_i(E_i, T, t)$, %	(99)
辐照时间 $T=0.01$ 天 $-\infty$, 冷却时间 $t=0-10$ 年	(99)
4.13 U_{th}^{233} 裂变产物混合物 γ 辐射的有效光子数谱组成 $n_i(E_i, T, t)$, %	(101)
辐照时间 $T=0.01$ 天 $-\infty$, 冷却时间 $t=0-10$ 年	(101)

第五章 热中子反应堆内形成的 Pu_{th}^{239} 裂变产物的放射特性 (103)

5.1	辐照时间 $T = 3$ 年的 $\text{Pu}_{\text{th}}^{239}$ 裂变产物比放射性 $Q(T, t)$, 居里/千瓦	(103)
	冷却时间 $t = 0 - 12$ 小时	(103)
	冷却时间 $t = 1 - 90$ 天	(106)
	冷却时间 $t = 120$ 天—10 年	(108)
5.2	辐照时间 $T = 3$ 年的 $\text{Pu}_{\text{th}}^{239}$ 裂变产物比 γ 当量 $M(T, t)$, 克镭当量/千瓦	(110)
	冷却时间 $t = 0 - 12$ 小时	(110)
	冷却时间 $t = 1 - 90$ 天	(112)
	冷却时间 $t = 120$ 天—10 年	(113)
5.3	辐照时间 $T = 1$ 年的 $\text{Pu}_{\text{th}}^{239}$ 裂变产物比放射性 $Q(T, t)$, 居里/千瓦	(114)
	冷却时间 $t = 0 - 90$ 天	(114)
	冷却时间 $t = 120$ 天—10 年	(114)
5.4	辐照时间 $T = 1$ 年的 $\text{Pu}_{\text{th}}^{239}$ 裂变产物比 γ 当量, 克镭当量/千瓦	(115)
	冷却时间 $t = 0 - 90$ 天	(115)
	冷却时间 $t = 120$ 天—10 年	(116)
5.5	辐照时间 $T = 120$ 天的 $\text{Pu}_{\text{th}}^{239}$ 裂变产物比放射性 $Q(T, t)$, 居里/千瓦	(117)
	冷却时间 $t = 0 - 90$ 天	(117)
	冷却时间 $t = 120$ 天—10 年	(118)
5.6	辐照时间 $T = 120$ 天的 $\text{Pu}_{\text{th}}^{239}$ 裂变产物比 γ 当量 $M(T, t)$, 克镭当量/千瓦	(119)
	冷却时间 $t = 0 - 90$ 天	(119)
	冷却时间 $t = 120$ 天—10 年	(120)
5.7	$\text{Pu}_{\text{th}}^{239}$ 裂变产物混合物的总放射性 $Q(T, t)$, 居里/千瓦	(121)
5.8	$\text{Pu}_{\text{th}}^{239}$ 裂变产物混合物的总 γ 当量 $M(T, t)$, 克镭当量/千瓦	(121)
5.9	$\text{Pu}_{\text{th}}^{239}$ 裂变产物混合物 γ 辐射的总释能率 $S(T, t)$, 10^{10} 兆电子伏/秒·千瓦	(122)
5.10	$\text{Pu}_{\text{th}}^{239}$ 裂变产物混合物的总 γ 光子数 $N(T, t)$, 10^{10} γ 光子/秒·千瓦	(122)
5.11	$\text{Pu}_{\text{th}}^{239}$ 裂变产物混合物 γ 辐射的有效剂量谱组成 $n_i(E_i, T, t)$, %	(123)
	辐照时间 $T = 0.01$ 天— ∞ , 冷却时间 $t = 0 - 10$ 年	(123)
5.12	$\text{Pu}_{\text{th}}^{239}$ 裂变产物混合物 γ 辐射的有效能谱组成 $n_i(E_i, T, t)$, %	(124)
5.13	$\text{Pu}_{\text{th}}^{239}$ 裂变产物混合物 γ 辐射的有效光子数谱组成 $n_i(E_i, T, t)$, %	(126)
	辐照时间 $T = 0.01 - \infty$, 冷却时间 $t = 0 - 10$ 年	(126)

第六章 反应堆内由裂变谱中子所形成的 U_f^{238} 裂变产物的放射特性 (128)

6.1	辐照时间 $T = 3$ 年的 U_f^{238} 裂变产物比放射性 $Q(T, t)$, 居里/千瓦	(128)
	冷却时间 $t = 0 - 12$ 小时	(128)
	冷却时间 $t = 1 - 90$ 天	(131)
	冷却时间 $t = 120$ 天—10 年	(133)
6.2	辐照时间 $T = 3$ 年的 U_f^{238} 裂变产物比 γ 当量 $M(T, t)$, 克镭当量/千瓦	(135)
	冷却时间 $t = 0 - 12$ 小时	(135)
	冷却时间 $t = 1 - 90$ 天	(137)
	冷却时间 $t = 120$ 天—10 年	(138)
6.3	辐照时间 $T = 1$ 年的 U_f^{238} 裂变产物比放射性 $Q(T, t)$, 居里/千瓦	(139)
	冷却时间 $t = 0 - 90$ 天	(139)
	冷却时间 $t = 120$ 天—10 年	(139)
6.4	辐照时间 $T = 1$ 年的 U_f^{238} 裂变产物比 γ 当量 $M(T, t)$, 克镭当量/千瓦	(140)
	冷却时间 $t = 0 - 90$ 天	(140)
	冷却时间 $t = 120$ 天—10 年	(141)
6.5	辐照时间 $T = 120$ 天的 U_f^{238} 裂变产物比放射性 $Q(T, t)$, 居里/千瓦	(142)
	冷却时间 $t = 0 - 90$ 天	(142)

冷却时间 $t = 120$ 天—10 年	(142)
6.6 辐照时间 $T = 120$ 天的 U_1^{238} 裂变产物比 γ 当量 $M(T, t)$, 克镭当量/千瓦	(143)
冷却时间 $t = 0$ —90 天	(143)
冷却时间 $t = 120$ 天—10 年	(144)
6.7 U_1^{238} 裂变产物混合物的总放射性 $Q(T, t)$, 居里/千瓦	(145)
6.8 U_1^{238} 裂变产物混合物的总 γ 当量 $M(T, t)$, 克镭当量/千瓦	(145)
6.9 U_1^{238} 裂变产物混合物 γ 辐射的总释能率 $S(T, t)$, 10^{10} 兆电子伏/秒·千瓦	(146)
6.10 U_1^{238} 裂变产物混合物的总 γ 光子数 $N(T, t)$, 10^{10} γ 光子/秒·千瓦	(146)
6.11 U_1^{238} 裂变产物混合物 γ 辐射的光子数谱有效能量 $E_1(T, t)$, 千电子伏/ γ 光子	(147)
辐照时间 $T = 0.01$ 天— ∞ , 冷却时间 $t = 0$ —10 年	(147)
6.12 U_1^{238} 裂变产物混合物 γ 辐射的剂量谱有效能量 $E_1(T, t)$, 千电子伏/ γ 光子	(148)
辐照时间 $T = 0.01$ 天— ∞ , 冷却时间 $t = 0$ —10 年	(148)
6.13 U_1^{238} 裂变产物混合物 γ 辐射的有效测量谱组成 $n_1(E_1, T, t)$, %	(150)
辐照时间 $T = 0.01$ 天— ∞ , 冷却时间 $t = 0$ —10 年	(150)
6.14 U_1^{238} 裂变产物混合物 γ 辐射的有效能谱组成 $n_1(E_1, T, t)$, %	(152)
辐照时间 $T = 0.01$ 天— ∞ , 冷却时间 $t = 0$ —10 年	(152)
6.15 U_1^{238} 裂变产物混合物 γ 辐射的有效光子数谱组成 $n_1(E_1, T, t)$, %	(154)
辐照时间 $T = 0.01$ 天— ∞ , 冷却时间 $t = 0$ —10 年	(154)

第七章 反应堆内由裂变谱中子所形成的 U^{235} 、 Pu^{239} 和 Th^{232} 裂变产物混合物的

总放射性、总 γ 当量、总释能率和总 γ 光子数

7.1 U_1^{235} 裂变产物混合物的总放射性 $Q(T, t)$, 居里/千瓦	(156)
7.2 U_1^{235} 裂变产物混合物的总 γ 当量 $M(T, t)$, 克镭当量/千瓦	(156)
7.3 U_1^{235} 裂变产物混合物 γ 辐射的总释能率 $S(T, t)$, 10^{10} 兆电子伏/秒·千瓦	(157)
7.4 U_1^{235} 裂变产物混合物的总 γ 光子数 $N(T, t)$, 10^{10} γ 光子/秒·千瓦	(157)
7.5 Pu_1^{239} 裂变产物混合物的总放射性 $Q(T, t)$, 居里/千瓦	(158)
7.6 Pu_1^{239} 裂变产物混合物的总 γ 当量 $M(T, t)$, 克镭当量/千瓦	(158)
7.7 Pu_1^{239} 裂变产物混合物 γ 辐射的总释能率 $S(T, t)$, 10^{10} 兆电子伏/秒·千瓦	(159)
7.8 Pu_1^{239} 裂变产物混合物的总 γ 光子数 $N(T, t)$, 10^{10} γ 光子/秒·千瓦	(159)
7.9 Th_1^{232} 裂变产物混合物的总放射性 $Q(T, t)$, 居里/千瓦	(160)
7.10 Th_1^{232} 裂变产物混合物的总 γ 当量 $M(T, t)$, 克镭当量/千瓦	(160)
7.11 Th_1^{232} 裂变产物混合物 γ 辐射的总释能率 $S(T, t)$, 10^{10} 兆电子伏/秒·千瓦	(161)
7.12 Th_1^{232} 裂变产物混合物的总 γ 光子数 $N(T, t)$, 10^{10} γ 光子/秒·千瓦	(161)

第八章 周期性停堆的热中子反应堆内形成的 U^{235} 裂变产物混合物的放射特性

引言	(162)
8.1 在周期性停堆, $\omega = 1$ 千瓦, $T = 360$ 天条件下 U_{th}^{235} 裂变产物混合物的放射特性	(164)
8.2 在周期性停堆, $\omega = 1$ 千瓦, $T = 60$ 天条件下 U_{th}^{235} 裂变产物混合物的放射特性	(167)

第九章 瞬发裂变产物的放射特性

引言	(170)
9.1 由热中子引起的 U^{235} 瞬发裂变产物的放射性 $Q_f(t)$, 居里/千吨梯恩梯当量裂变 或居里/ 1.45×10^{23} 次裂变	(172)
裂变后时间 $t = 0$ —12 小时	(172)
裂变后时间 $t = 1$ —365 天	(176)
9.2 核爆炸威力为 1 千吨梯恩梯当量裂变时, 由热中子引起的 U^{235} 瞬发裂变产物混合物的放射特性	(179)

9.3	由裂变谱中子引起的 U^{235} 瞬发裂变产物的放射性 $Q_j(t)$, 居里/千吨梯恩梯当量裂变或 居里/ 1.45×10^{23} 次裂变	(181)
	裂变后时间 $t = 0 - 12$ 小时	(181)
	裂变后时间 $t = 1 - 365$ 天	(185)
9.4	由裂变谱中子引起的 Pu^{239} 瞬发裂变产物的放射性 $Q_j(t)$, 居里/千吨梯恩梯当量裂变或 居里/ 1.45×10^{23} 次裂变	(188)
	裂变后时间 $t = 0 - 12$ 小时	(188)
	裂变后时间 $t = 1 - 365$ 天	(192)
9.5	核爆炸威力为 1 千吨梯恩梯当量裂变时, 由裂变谱中子引起的 Pu^{239} 瞬发裂变产物混合物的放射特性	(195)
9.6	由能量 $E = 14$ 兆电子伏中子引起的 U^{238} 瞬发裂变产物的 放射性 $Q_j(t)$, 居里/千吨梯恩梯当量裂变或居里/ 1.45×10^{23} 次裂变	(197)
	裂变后时间 $t = 0 - 12$ 小时	(197)
	裂变后时间 $t = 1 - 365$ 天	(201)
9.7	核爆炸威力为 1 千吨梯恩梯当量裂变时, 由裂变谱中子引起的 U^{238} 瞬发裂变产物混合物的放射特性	(204)
第十章	核燃料内 Cs^{134} 的形成	(206)
	引言	(206)
10.1	计算核反应堆内 Cs^{134} 积累的公式	(206)
10.2	在热中子引起 U^{235} 裂变的情况下, 反应堆内由于 $Cs^{133}(n, \gamma)Cs^{134}$ 反应而积累的 Cs^{134} 的放射性 $Q(T, t)$, 居里/千瓦	(208)
10.3	在热中子引起 Pu^{239} 裂变的情况下, 反应堆内由于 $Cs^{133}(n, \gamma)Cs^{134}$ 反应而积累的 Cs^{134} 的放射性 $Q(T, t)$, 居里/千瓦	(209)
附录 I	确定核反应堆裂变产物混合物的放射性 $Q(T, t)$ 和 γ 辐射释能率 $S(T, t)$ 的 经验公式及其系数(A, B, C, D)	(210)
附录 II	惰性气体逸出燃料元件后形成的Kr、Xe及其子体同位素混合物的放射特性 (T ——辐照时间; τ ——重核裂变停止后惰性气体在密封的燃料元件内的保 持时间; t ——惰性气体逸出燃料元件后的时间)	(211)
	惰性气体及其子体同位素混合物的积分特性	(211)
	惰性气体及其子体同位素混合物 γ 辐射的有效能谱	(212)

第一章 裂变物质和裂变产物的基本物理特性

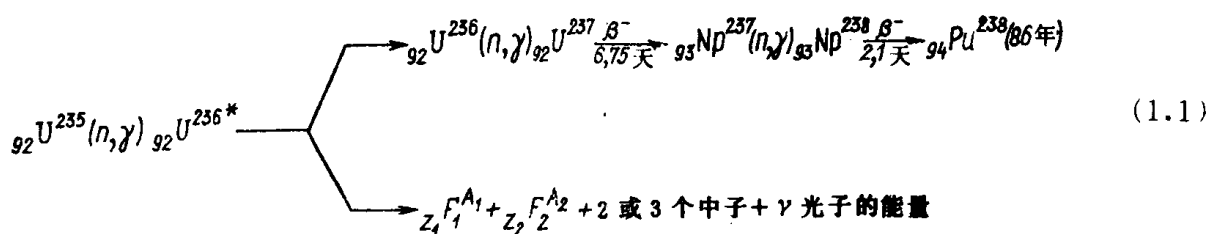
引言

本章列举的数据可称为计算放射特性的“输入参数”。这方面首先涉及的是裂变产物的绝对独立产额和链产额^①。大家知道,现代的理论还不可能严格地计算绝对独立产额,而这个参数是计算比放射性和其他放射特性所必需的。通常采用的基本上是由热中子引起的 U^{235} 裂变产物的实验数据。研究了一种半经验计算方法,借助于它计算了所缺少的独立产额。在今后获得实验数据的过程中可以对该方法作出严格的评价。在这一章里亦简单地描述裂变物质和裂变产物,并给出同量异位链图。引用的同位素半衰期基本上按照文献[1,2]。

1.1 关于重核裂变的概念

在中子、质子、重核、介子及 γ 光子作用下均能发生核裂变。在这里,我们只研究铀、钍和钷重核在中子作用下的裂变。因为在这种裂变情况下出现新的中子,它们能够继续引起核裂变,从而保证了自持链式反应。

中子引起重核裂变的机理在文献中有足够详细的描述(例如[3]),因此我们仅限于概括地叙述这个问题。作为例子,讨论一下在核反应堆内中子与铀 235 的反应:

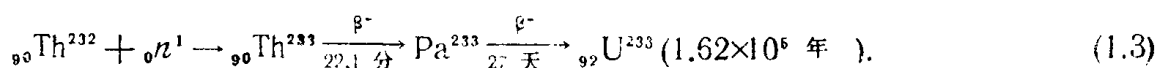
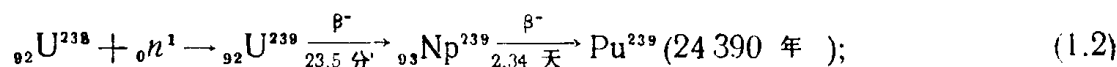


首先发生中子的辐射俘获,形成新的复合核(也称复核),其质量数为初始靶核的质量数加1。这时,复合核(在本例中即为 U^{236*})处在激发状态,它的最低激发能等于所吸收中子的结合能。如果中子结合能高于势垒(裂变势垒),靶核便能在吸收具有任何动能的中子时发生裂变。含有奇数中子数(更确切地说,是偶数质子数 Z_0 及奇数核子数 A)的重核属于这种类型,如 ${}_{92}U^{233}$, ${}_{92}U^{235}$, ${}_{94}Pu^{239}$ 。它们可在任何能量的中子作用下发生裂变。通常把这些重核叫做裂变核素,并把它们列为初级核燃料。

如果中子结合能小于势垒,则只有在结合能和中子动能之和大于核的势垒时才能裂变。属于这种核素类型的有 ${}_{92}U^{238}$ 和 ${}_{90}Th^{232}$,它们含有偶数中子数。它们仅在被吸收的中子

① 原文系“质量产额”,国外多数文献称“链产额”。——译注

动能与结合能之和足够大时(在 U^{238} 和 Th^{232} 情况下分别为1兆电子伏和1.2兆电子伏)发生裂变。把这种“阈能”核素称为“原料”,并把它们列为次级核燃料。在自然界,除原料核素之外,只存在一种裂变核素—— U^{235} 。 U^{235} 在天然铀中的含量为0.7%。其它裂变物质是在核反应堆内从原料核素的下列反应中人为地产生的:



(1.1)–(1.3)式是不完全的。实际上,在核反应堆里,由于各种核反应(特别是辐射俘获反应)和放射性衰变,产生着大量新的重核素(称为超铀核素)。

在裂变时生成两个新核——裂变碎片,它们所携带的能量约占总裂变能的83%。裂变释放出的部分能量转为裂变碎片的激发能。这些裂变碎片含有过多的中子。每个裂变碎片在从激发态转入基态过程中放出1个或几个中子以及 γ 光子。它们称为瞬发中子和瞬发 γ 光子。

放出瞬发中子之后,裂变碎片变成裂变产物。裂变产物的质量数 A 在72到166范围内。由重核生成的裂变产物,与中等质量数的核素相比,具有过多的中子,因此是不稳定的 β 放射性核素,构成了同量异位链。裂变产物的 β 衰变过程伴随着发射反中微子,并在多数情况下也放出 γ 光子。有一些短寿命裂变产物(溴、碘等的同位素)放出中子。这种中子叫做缓发中子。平均而言,大部分初始裂变产物在达到稳定状态之前要经过三次或四次放射性蜕变。

在核反应堆里,裂变碎片、瞬发中子和瞬发 γ 光子的动能,以及裂变产物的 β 粒子和 γ 光子的动能,最终都转变为热能。每次核裂变释放的总能量大约等于200兆电子伏。实际上,不同类型的裂变所释放的能量略有差别。在热中子引起 U^{235} 核裂变的情况下有下列能量转变为热能:裂变碎片动能166兆电子伏;瞬发 γ 光子能量7兆电子伏;瞬发中子能量5兆电子伏;俘获 γ 光子能量8兆电子伏;裂变产物的缓发 β 粒子能量7兆电子伏和 γ 光子能量6兆电子伏。

反应堆热功率 $w = 1$ 瓦时,相对应的单位时间内的核裂变数 N 等于:

$$N = \frac{1}{200 \left[\frac{\text{兆电子伏}}{\text{裂变}} \right] \times 1.6 \times 10^{-13} \left[\frac{\text{瓦} \cdot \text{秒}}{\text{兆电子伏}} \right]} = 3.1 \times 10^{10} [\text{裂变/秒} \cdot \text{瓦}] \quad (1.4)$$

3.1×10^{10} 裂变/秒·瓦这个数值在计算反应堆裂变产物比放射性时是作为常数利用的。这样,反应堆比功率1瓦/克(或1千瓦/公斤,或1兆瓦/吨)对应着 3.1×10^{10} 裂变/秒·克。如果核燃料是天然铀,那么在单位比功率下热中子通量密度为 3.5×10^{12} 中子/厘米²·秒。

1.2 裂变产物的独立产额和累积产额定义

1.2.1 术 语

绝对独立产额 在裂变过程中直接形成某种同位素(质量数为 A 、原子序数为 Z 的核素)

的几率称为该同位素的绝对独立产额 y ，它须按下式归一：

$$\sum_A \sum_Z y(A, Z) = 200\% \quad (1.5)$$

即包括稳定同位素在内的所有裂变产物同位素的总产额为 200%。

相对独立产额 在把具有一定质量数的所有同量异位素的总产额归一化为 1 的条件下 (见 1.6 式) 确定的裂变过程中直接形成某种同位素的几率称为该同位素的相对独立产额 y_f 。

$$\sum_Z y_f(A, Z) |_{A=\text{常数}} = 1 \quad (1.6)$$

绝对累积产额 在把所有同位素的独立产额归一化为 200% 的条件下确定的由于所有各种过程而形成某种同位素的几率称为该同位素的绝对累积产额 Y 。

相对累积产额 在把具有一定质量数的所有同量异位素的独立产额归一化为 1 的条件下确定的由于所有各种过程而形成某种同位素的几率称为该同位素的相对累积产额 Y_f 。

对于无分支的链有下列关系式：

$$Y(A, Z) = \sum_Z y(A, Z) \quad (1.7)$$

$$Y_f(A, Z) = \sum_Z y_f(A, Z) \quad (1.8)$$

公式 (1.7) 和 (1.8) 中的总和符号表示对质量数为 A 的同量异位链中某核素之先驱核素的独立产额求和，包括该核素本身的独立产额。

链产额 由于所有各种过程而形成质量数为 A 的诸同量异位素的几率称为链产额 y_A 。链产额由裂变质量产额曲线 (费米“双峰”曲线) 确定，并归一化为

$$\sum_A y_A = 200\% \quad (1.9)$$

对任一质量数为 A 的衰变链，

$$y_A = \sum_Z^n y(A, Z) - \sum_Z^k f_A y(A, Z) + \sum_Z^m f_{A+1} y(A+1, Z) \quad (1.10)$$

式中： n —— A 链中的核素数； k —— A 链中放出缓发中子的核素的原子序数； m —— $A+1$ 链中放出缓发中子的核素的原子序数； f_A ， f_{A+1} ——分支系数。

显然，在 A 和 $A+1$ 链中无放出缓发中子的核素的情况下， A 链产额 y_A 为该链所有同量异位素的绝对独立产额之和。同位素的绝对独立产额和相对独立产额之间的关系由下式确定：

$$y = y_f y_A \quad (1.11)$$

这个关系式将在后面的计算中广泛采用。

1.2.2 链 产 额

对于计算裂变产物独立产额所必需的链产额取自文献 [4]。这些参数列于表 1.1。

裂变链产额 γ_A , %

表 1.1

质 量 数	热中子			快中子, $E=14$ 兆电子伏					裂变中子				
	U^{235}	Pu^{239}	U^{238}	U^{235}	U^{233}	U^{238}	Th ²³²	Pu^{239}	U^{235}	U^{233}	U^{238}	Pu^{239}	Th ²³²
72	1.6—5	1.2—4	1.9—4	6.3—3	1.5—2	3.0—3	7.0—3	1.4—2	1.2—4	5.6—4	1.7—4	9.8—5	3.3—4
73	1.1—4	3.5—4	5.4—5	1.222	2.3—2	4.8—3	1.1—2	1.9—2	5.8—4	1.2—3	3.4—4	2.1—4	4.5—4
74	3.5—4	1.0—3	1.4—3	1.7—2	3.5—2	8.0—3	2—2	2.8—2	1.7—3	2.8—3	4.3—4	4.5—4	9.1—4
75	1.1—3	2.5—3	3.8—3	2.7—2	5.4—2	1.4—2	3.5—2	4.1—2	4.0—3	7.0—3	9.2—4	1.0—3	2.2—3
76	3.4—3	6.0—3	8—3	4.0—2	8.1—2	2.2—2	6—2	5.6—2	8.0—3	1.4—2	2.0—3	2.2—3	2.5—3
77	8.3—3	1.3—2	2.1—2	6.8—2	0.12	3.7—2	0.1	7.4—2	1.5—2	3.2—2	4.0—3	4.9—3	1.5—2
78	2.0—2	2.6—2	4.5—2	0.12	0.18	6.2—2	0.17	9.4—2	2.0—2	7.0—2	9.0—3	1.1—2	3.9—2
79	5.6—2	5.1—2	8.8—2	0.19	0.26	0.10	0.26	0.12	3.5—2	0.18	2.0—3	2.4—2	9.7—2
80	9.0—2	9.4—2	0.17	0.31	0.37	0.18	0.40	0.15	0.12	0.34	4.4—2	5.0—2	0.24
81	0.20	0.18	0.45	0.48	0.55	0.28	0.66	0.19	0.21	0.62	8.8—2	0.10	0.55
82	0.33	0.23	0.71	0.74	0.84	0.44	1.2	0.24	0.34	1.0	0.19	0.21	1.1
83	0.53	0.30	1.0	1.2	1.3	0.64	1.9	0.30	0.47	1.7	0.39	0.36	1.9
84	0.98	0.48	1.8	1.4	2.0	0.89	2.8	0.39	1.1	2.6	0.86	0.56	3.6
85	1.30	0.56	2.4	1.9	2.6	1.1	3.6	0.49	1.5	3.6	1.2	0.67	3.8
86	1.95	0.77	2.9	2.4	3.2	1.4	4.3	0.61	1.9	4.4	1.5	0.88	5.9
87	2.54	0.94	4.3	3.2	3.8	1.8	5.2	0.76	2.8	5.1	1.8	0.97	6.2
88	3.61	1.4	5.6	3.6	4.3	2.1	5.8	0.93	3.6	5.6	3.6	1.3	6.4
89	4.77	1.7	5.8	4.1	4.8	2.3	6.0	1.1	4.1	6.2	2.9	1.6	6.6
90	5.83	2.2	6.4	4.5	5.2	2.9	5.8	1.4	5.1	6.5	3.1	2.2	6.7
91	5.91	2.9	6.6	4.9	5.6	2.8	5.9	1.6	5.2	6.6	3.7	2.6	6.6
92	5.98	3.1	6.8	5.0	5.7	3.2	5.6	1.9	5.3	6.7	4.2	3.2	6.2
93	6.4	4.0	7.1	5.1	6.0	4.2	5.7	2.2	5.4	6.7	4.6	3.8	5.8
94	6.44	4.5	7.0	5.0	5.7	4.4	6.1	2.5	5.6	6.6	5.1	4.2	5.5
95	6.52	5.0	5.3	5.1	5.6	5.1	6.8	2.8	6.6	6.5	5.0	5.1	5.2
96	6.26	5.2	5.9	5.0	5.3	5.4	5.7	3.0	7.0	6.2	5.1	5.1	5.1
97	6.05	5.6	5.5	5.0	5.4	5.6	4.2	3.3	6.4	5.9	5.4	5.1	4.7
98	5.86	5.9	5.3	5.1	4.4	5.0	3.0	3.6	6.0	5.4	5.8	5.8	4.2
99	6.17	6.1	5.1	4.7	3.7	5.7	2.0	4.2	6.1	4.7	6.2	5.9	2.7
100	5.90	7.1	4.4	4.2	3.1	5.6	1.7	5.3	5.4	3.5	6.2	6.9	1.4
101	5.20	6.5	3.1	3.6	2.8	5.5	1.3	6.1	5.7	2.0	6.3	6.0	0.73
102	4.19	6.3	2.3	3.7	2.5	5.1	1.0	6.2	5.2	1.0	6.0	6.0	0.36
103	3.0	5.7	2.0	3.4	2.3	4.9	0.75	6.3	3.7	0.41	6.4	6.0	0.16
104	1.69	5.4	1.0	2.5	2.0	4.0	0.84	6.1	2.4	0.28	5.5	6.8	7.6—2
105	0.90	3.9	0.48	1.7	1.8	3.4	0.92	5.3	1.2	0.20	4.4	4.7	6.0—2
106	0.389	4.7	0.25	1.5	1.5	3.1	0.80	4.2	0.71	0.16	2.8	4.6	5.6—2
107	0.19	3.0	0.15	1.3	1.3	2.4	0.87	3.3	0.28	0.14	1.3	4.7	5.7—2
108	7.0—2	2.2	7.7—2	1.2	1.2	1.5	0.93	2.6	0.17	0.13	0.52	3.3	5.8—2
109	3.0—2	1.5	4.6—2	1.2	1.2	1.2	1.1	2.1	0.13	0.12	0.35	1.7	5.8—2
110	2.0—2	0.76	3.2—2	1.2	1.2	0.90	1.2	1.7	7.3—2	0.11	0.11	1.0	6.3—2
111	1.85—2	0.23	2.3—2	1.1	1.2	0.82	1.2	1.4	4.8—2	0.10	3.2—2	0.48	7.1—2
112	1.1—2	0.10	1.9—2	0.87	1.1	0.73	1.3	1.4	4.2—2	9.2—2	4.6—2	0.18	6.5—2
113	1.1—2	6.5—2	1.7—2	1.0	1.1	0.83	1.5	1.3	3.9—2	8.6—2	4.2—2	0.16	5.9—2
114	1.2—2	4.7—2	1.5—2	1.0	1.1	0.72	1.5	1.3	3.5—2	8.0—2	4.0—2	0.10	6.2—2
115	1.0—2	3.8—2	1.4—2	1.0	1.0	0.72	1.4	1.3	3.3—2	7.6—2	3.3—2	8.2—2	6.5—2
116	1.1—2	3.3—2	1.4—2	1.0	1.0	0.71	1.4	1.3	3.6—2	7.3—2	3.8—2	6.4—2	6.2—2
117	1.1—2	3.1—2	1.4—2	1.0	1.1	0.72	1.3	1.2	4.8—2	7.1—2	3.8—2	7.3—2	6.0—2

表1.1 (续)

质量数	热中子			快中子, $E=14$ 兆电子伏					裂变中子				
	U ²³⁵	Pu ²³⁹	U ²³³	U ²³⁵	U ²³³	U ²³⁸	Th ²³²	Pu ²³⁹	U ²³⁵	U ²³³	U ²³⁸	Pu ²³⁹	Th ²³²
118	1.2—2	3.2—2	1.4—2	0.97	1.1	0.70	1.3	1.2	5.0—2	7.1—2	3.7—2	5.9—3	6.0—2
119	1.2—2	3.3—2	1.4—2	0.98	1.1	0.69	1.2	1.3	5.2—2	7.6—2	3.7—2	7.0—3	6.0—2
120	1.2—2	3.7—2	1.6—2	1.1	1.1	0.74	1.1	1.3	5.3—2	8.4—2	3.8—2	2.1—2	6.0—2
121	1.3—2	4.4—2	1.8—2	1.2	1.1	0.85	1.0	1.3	5.4—2	0.10	4.0—2	4.3—2	6.0—2
122	1.5—2	5.3—2	2.3—2	1.2	1.1	0.84	0.86	1.3	5.4—2	0.13	4.3—2	7.2—2	4.3—2
123	1.65—2	6.7—2	3.2—2	1.3	1.2	0.82	0.74	1.4	5.4—2	0.17	4.5—2	0.13	3.0—2
124	2.0—2	8.6—2	5.4—2	1.3	1.3	0.88	0.67	1.4	5.7—2	0.23	4.7—2	0.16	2.7—2
125	2.9—2	0.12	0.11	1.4	1.5	1.0	0.58	1.6	7.3—2	0.32	5.0—2	0.23	2.6—2
126	5.0—2	0.25	0.24	1.4	1.8	1.3	0.78	1.8	0.18	0.45	7.8—2	0.41	3.6—2
127	0.135	0.39	0.59	1.5	2.2	1.6	1.2	2.0	0.40	0.63	0.15	0.63	9.1—2
128	0.365	0.59	1.1	1.8	2.4	2.1	1.6	2.4	0.44	0.96	0.30	1.1	0.21
129	0.90	1.0	2.0	2.7	2.7	2.8	2.0	2.8	0.80	1.6	0.90	1.8	0.49
130	2.0	2.3	2.7	3.4	3.0	3.6	2.5	3.3	1.50	2.6	2.1	3.0	1.0
131	2.91	4.7	4.2	4.4	3.4	4.5	2.8	3.9	3.20	3.7	3.3	4.8	1.7
132	4.2	5.3	4.9	4.7	4.0	4.7	3.1	4.6	4.50	4.8	4.9	5.8	2.8
133	7.48	7.1	5.9	5.5	4.4	5.8	3.8	4.8	5.90	5.6	5.6	6.0	5.5
134	7.78	7.5	6.0	5.6	4.6	5.4	6.7	5.0	7.20	6.0	6.8	6.4	5.7
135	6.54	7.3	4.7	5.0	5.0	6.0	4.8	5.1	6.3	6.2	6.2	6.2	6.0
136	6.32	6.6	6.6	5.4	4.8	6.3	3.6	5.2	6.4	6.2	6.1	6.9	6.3
137	6.35	6.5	6.5	5.9	4.7	6.0	3.8	5.2	6.4	6.3	6.4	6.1	6.4
138	6.71	6.5	6.2	3.9	5.1	5.5	4.5	5.1	6.4	6.4	6.5	5.4	6.4
139	6.51	6.2	5.9	4.9	5.8	4.7	5.4	4.2	6.3	6.3	6.3	5.2	6.3
140	6.36	5.5	6.2	4.6	5.0	4.6	6.0	4.3	6.0	6.3	5.9	5.0	7.9
141	5.80	6.0	7.2	3.8	4.7	4.7	5.9	4.3	5.7	6.8	5.6	4.7	7.8
142	5.89	5.0	6.7	4.1	5.1	4.2	5.7	4.1	5.5	6.0	5.2	4.4	7.5
143	5.86	4.4	6.1	3.9	5.6	3.7	5.3	4.0	5.6	5.0	4.9	4.6	7.0
144	5.43	3.7	4.9	3.3	2.6	3.3	5.3	3.9	5.3	4.2	4.5	3.6	7.6
145	3.68	3.4	3.0	2.7	2.0	2.9	5.1	3.7	4.4	3.3	3.8	3.3	6.9
146	2.74	2.6	2.6	2.2	1.6	2.4	3.5	3.4	3.3	2.4	3.3	2.7	5.2
147	2.16	2.2	1.9	1.8	1.3	2.0	1.9	3.0	2.7	1.7	3.0	2.3	3.4
148	1.70	1.7	1.2	1.4	0.90	1.6	1.2	2.6	1.8	1.2	2.4	1.7	2.0
149	1.11	1.3	0.81	1.1	0.64	1.3	0.66	2.2	1.2	0.82	2.0	1.4	1.0
150	0.642	1.0	0.54	0.79	0.46	1.2	0.42	1.8	0.78	0.54	1.4	1.1	0.70
151	0.390	0.81	0.36	0.57	0.31	0.83	0.25	1.4	0.45	0.35	0.94	0.7	0.42
152	0.220	0.58	0.19	0.47	0.21	0.61	0.14	1.1	0.31	0.22	0.62	0.58	0.31
153	0.146	0.41	0.12	0.24	0.16	0.40	8.6—2	0.82	0.19	0.13	0.40	0.48	0.20
154	6.5—2	0.29	6.0—2	0.15	9.8—2	0.30	6.2—2	0.61	0.10	6.7—2	0.22	0.33	4.0—2
155	3.1—2	0.19	3.1—2	9.0—2	6.6—2	0.21	4.4—2	0.45	3.0—2	3.5—2	0.11	0.18	8.9—3
156	1.4—2	0.12	1.1—2	5.5—2	4.3—2	0.12	3.6—2	0.3	2.1—2	1.8—2	7.0—2	8.0—2	2.6—3
157	6.2—3	7.1—2	6.4—3	3.5—2	2.8—2	7.2—2	1.2—2	0.2	1.3—3	1.0—2	3.7—2	4.1—2	1.1—3
158	3.1—3	3.7—2	2.3—3	2.1—2	1.8—2	4.3—2	6.0—3	0.13	7.0—3	4.7—3	1.7—2	1.9—2	5.2—4
159	1.1—3	1.9—2	9.0—4	1.3—2	1.2—2	2.6—2	4.4—3	6.1—2	3.5—3	1.8—3	8.5—3	9.0—3	2.5—4
160	3.5—4	8.8—3	3.3—4	8.0—3	7.5—3	1.6—2	1.7—3	3.3—2	1.5—3	8.5—4	5.9—3	4.0—3	1.2—4
161	8.0—5	4.3—3	1.2—4	5.8—3	5.0—3	8.9—3	1.1—3	2.5—2	4.7—4	4.9—4	4.6—3	1.6—3	8.3—5

1.2.3 由热中子引起的 U^{235} 裂变的独立产额计算

在后面的计算中将以热中子引起的 U^{235} 裂变(简称为 $U_{\text{基}}^{235}$)作为基准^①。这是由于此种裂变独立产额的实验数据在数量上大大超过所有其他类型裂变同类数据的总和。

假定, 相对独立产额由下式描述^②:

$$y_f = (c\pi)^{-1/2} \exp\left[-\frac{(Z-Z_p)^2}{c}\right] \quad (1.12)$$

式中: Z_p ——某一同量异位链的“最可几电荷”(不一定是整数, 通常是非整数); Z ——其独立产额待确定的同量异位素的电荷; 参数 c 为:

$$c = 2(\sigma^2 + 1/12) \quad (1.13)$$

其中 σ^2 是高斯分布的“分散度”。

由关系式(1.11)和(1.12), 可得下式:

$$y = y_A (c\pi)^{-1/2} \exp\left[-\frac{(Z-Z_p)^2}{c}\right] \quad (1.14)$$

利用(1.12)–(1.14)关系式将独立产额的实验数据加以分析, 确定了 Z_p 和 σ 值。然后利用得到的 Z_p 和 σ 值, 求出未知的独立产额。对于一些尚缺乏独立产额实验值的同量异位链, 用外推和内插方法求出 Z_p 值。对于 σ 参数, 如果不能用分析实验数据的方法得到, 那么就从文献[6]选取, 或者取为0.57(这是从实验数据分析中得到的 σ 平均值)。

1.2.4 其他裂变类型的独立产额计算

为了解决这个问题, 利用了公式(1.14), 但各种裂变类型的 Z_p 参数值分别按以下公式计算:

$$[Z_p]_x(A) = [Z_p]_0(A) + [\Delta Z_p]_x(A) \quad (1.15)$$

$$[\Delta Z_p]_x(A) = 0.5(Z_x - 92) - 0.19(A_x - 236) + 0.38[\nu_x(A) - \nu_0(A)] \quad (1.16)$$

上面两个公式中的脚标“ x ”对应于所研究的裂变类型; Z_x 和 A_x 分别为所研究的复合核的电荷和质量; $\nu(A)$ 是裂变碎片放出的快中子数, 此种裂变碎片放出中子后转变为质量数是 A 的裂变产物。

由关系式(1.15)和(1.16)所规定的修改的计算方法在文献[7]中首次采用。这里与文献[7]所不同的是: 考虑了裂变放出的快中子数随着裂变产物的质量数而改变。

因此, 今后独立产额的计算就归结为确定所研究的裂变类型的 $\nu = f(A)$ 关系式。

为 $U_{\text{基}}^{235}$ 而计算的 σ 参数值, 对给定的 A 可用于所有裂变类型。文献[5, 6, 8, 9等]均指出, 作这种近似是可以容许的。

由热中子引起的 U^{233} 和 Pu^{239} 裂变 对这类裂变和 $U_{\text{基}}^{235}$ 基准裂变的中子发射函数取自文献[10–12]。中子发射函数 $\nu = f(A)$ 的正确性按下式检查:

① 为了简明地标记各种裂变类型, 采用缩写符号 Z_x^A 。其中: Z ——裂变核素, A ——裂变核素的质量数; E ——引起裂变的中子能量。例如, 热中子引起 Pu^{239} 裂变缩写为 $Pu_{\text{热}}^{239}$; 裂变谱中子引起 U^{233} 裂变—— $U_{\text{谱}}^{233}$; 14兆电子伏中子引起 U^{238} 裂变—— U_{14}^{238} 。

② 在以后写公式时, 凡与“基准”裂变—— $U_{\text{基}}^{235}$ 有关的参数将带脚标“0”(例如 $[Z_p]_0$, ν_0)。

$$\bar{\nu} = \frac{1}{100} \sum_A \nu(A) y_A \quad (1.17)$$

式中 $\bar{\nu}$ 是每次裂变放出的平均快中子数。表1.2列出的各种裂变类型的 $\bar{\nu}$ 值取自评述论文[13]。

U_{th}^{235} 的 $\nu(A)$ 函数是根据文献[10—12]的资料得到的,在后面的计算中采用了它。

表 1.2 各种裂变类型的 $\bar{\nu}$ 值

裂 变 类 型	Th ²³²	U ²³³	U ²³⁵	U ²³⁸	Pu ²³⁹
n _{th}	—	2.51	2.41	—	2.89
n ₁₄	4.05	4.23	4.50	4.50	4.92

由能量约14兆电子伏的中子所引起的Th²³²、U²³³、U²³⁵、U²³⁸和Pu²³⁹核裂变 利用了有关U²³⁵裂变的实验结果[14,15]。关于由快中子引起其他重核裂变的资料极少[15,16]。

计算步骤如下:

1. 把公式(1.16)改变为以下形式:

$$\nu_x(A) = \nu_0(A) + \frac{1}{0.38} \{ [\Delta Z_p]_x(A) - 0.5(Z_x - 92) + 0.19(A_x - 236) \} \quad (1.18)$$

2. 根据U²³⁵的 Z_p 实验值[14,15]和U²³⁵的各 Z_p 值,并运用(1.15)和(1.18)公式,可计算出与各个 A 值相对应的 ν_1 。

3. 假定U²³⁵以及由质子引起U²³³和U²³⁸裂变的中子发射函数相似[17-19]。这个假定的依据是:对上列裂变类型, $E^* - E_\delta$ 参数值是相近的(E^* ——复合核的激发能[20], E_δ ——复合核的裂变势垒[21])。并考虑到上述第2点,可作出U²³⁵的中子发射近似的曲线[以 $\nu'_1(A)$ 标记](见图1.1)。

以下的计算在电子计算机上进行。

4. 计算出U²³⁵裂变的 $M = \frac{1}{100} \sum_A \nu'_1(A) y_A$,然后利用表1.2和表1.6的数据,计算

出 $k = M^{-1} \bar{\nu}_1$ 。

5. 求得U²³⁵的最终中子发射函数:

$$\nu_1(A) = k \nu'_1(A) \quad (1.19)$$

初始的中子发射函数 $\nu'_1(A)$ 和以 $\bar{\nu}_1$ 归一的最终的中子发射函数 $\nu_1(A)$ 之间差别甚小(见图1.1)。这可以作为所采用的计算方法正确性的证明。

6. 假设由约14兆电子伏中子引起的上述各种类型裂变的中子发射函数是相似的,计算

出 $M_x = \frac{1}{100} \sum_A \nu_1(A) [y_A]_x$ 。式中的脚标“ x ”对应于四种裂变——Th²³²、U²³³、U²³⁸、

Pu²³⁹的任意一种; $\nu_1(A)$ 仍然是对U²³⁵计算的中子发射函数。

7. 计算出 $k_x = M_x^{-1} \bar{\nu}_x$ 。

① 凡与U²³⁵有关的参数,在以后均用脚标“1”标记。

8. 求得所要的中子发射函数:

$$\nu_x(A) = k_x \nu_1(A) \quad (1.20)$$

9. 对每种裂变类型, 运用 U_{235}^{235} 的 $\nu(A)$ 函数及公式(1.15)和(1.16), 求出 Z_P 。然后由公式(1.14)和表1.1的数据, 计算出绝对独立产额(在这里认为参数 σ 值是已知的)。

作为例子, 在图1.1绘出了按上述方法得到的 Pu^{239} 裂变的中子发射函数。

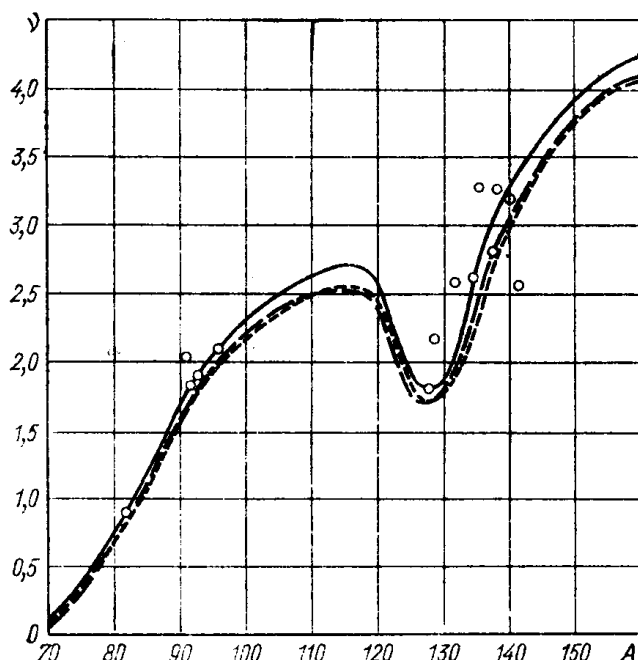


图 1.1 能量为14兆电子伏的中子引起的几种核裂变的中子发射函数 $\nu = f(A)$

○根据文献[14,15]的资料, 用关系式(1.18)而得到的对 U_{14}^{235} 裂变的某些质量数的 ν 值;
—— U_{14}^{235} 裂变的近似中子发射函数; ---- U_{14}^{235} 裂变的最终中子发射函数 (以 $\bar{\nu}$ 为归一); - · - - 按所讨论的方法计算的 Pu^{239} 裂变的中子发射函数

由裂变谱中子引起的 Th^{232} 、 U^{233} 、 U^{235} 、 U^{238} 、 Pu^{239} 裂变 除了文献[16] ($A=135$, Th^{232}) 以外, 至今尚未发表过关于裂变中子反应的裂变产物独立产额的任何实验资料。

计算步骤如下:

1. 假定裂变中子谱可用麦克斯韦分布描述

$$N(E) \sim \sqrt{E} e^{-E/T} \quad (1.21)$$

2. 对每个同量异位链作 $\nu = f(E^* - E_\delta)$ 关系曲线。为此采用文献[10—12, 18—19]的数据及本节中计算得到的中子发射函数(见图1.1)。这种曲线的例子如图1.2所示。然后按0.5兆电子伏的间隔得出 $\nu = f(E^* - E_\delta)$ 函数的数值。

3. 对由裂变谱中子引起的各种裂变类型, 选取 T (核温度) 参数值为1.36兆电子伏^[22]。(以下计算是在M-220型电子计算机上进行的)。

4. 在0—30兆电子伏区间内按0.5兆电子伏的间隔计算出麦克斯韦函数值 $F_M(1.21)$ 。

5. 计算出 $B = \sum_i F_M(E_i)$ 的数值; 其中 E_i 在0—30兆电子伏区间内。

6. 利用表列 $\nu_i = f(E_i)$ 函数值, 求得

$$\bar{\nu} = \frac{1}{B} \sum_i \nu(E_i + c) F_M(E_i + b) \quad (1.22)$$

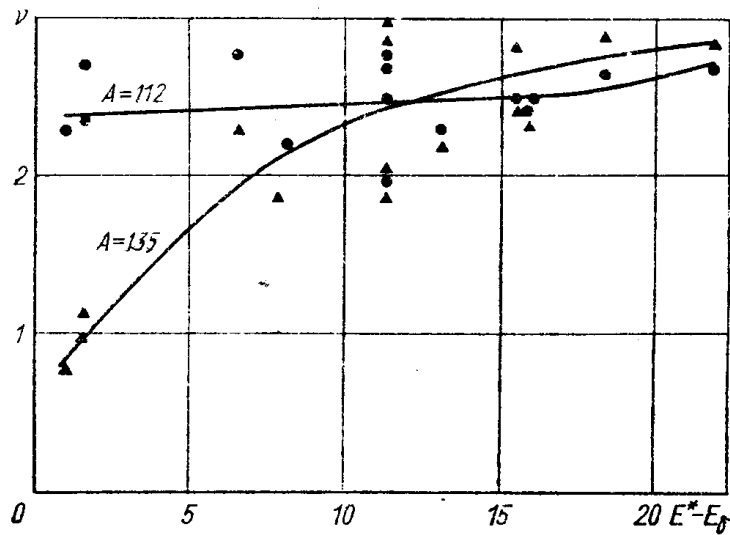


图 1.2 中子发射函数 $\nu = f(E^* - E_\delta)$
 $\blacktriangle$ $A=135$; $\bullet$ $A=112$

其中 $\bar{\nu}$ 是按能量平均的快中子数。这些中子是裂变碎片在向质量数为 A 的裂变产物转变的过程中放出的。

引入参数 b 反映下述情况：对于 Th^{232} 和 U^{238} 来说，能量低于某一定值（阈能）的中子不能引起裂变。也就是说，裂变谱的一部分中子在裂变过程中不起作用，在归一化时应当考虑到这一点。换句话说，在两个函数—— $\nu = f(E^* - E_\delta)$ 和 $F_M(E)$ 相乘时，后者要向左“移动”（图1.3）。因此，对 Th^{232} 和 U^{238} 裂变，参数 b 在数值上等于这些核素的裂变阈能。

由于复核 U^{234*} 、 U^{236*} 和 Pu^{240*} 不存在裂变阈，它们的 b 参数等于零（即裂变谱中子在裂变过程中全部起作用）。

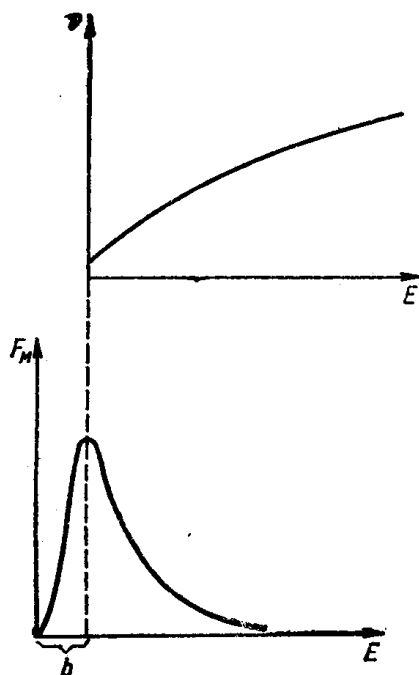


图 1.3 b 参数定义

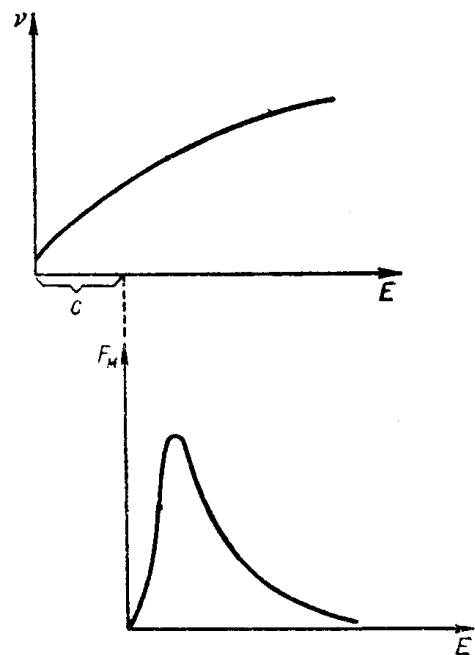


图 1.4 c 参数定义