

三、放射性核素的来源

1. 天然放射性核素

在自然界中，原子序数小于 83 的每一种元素都有一个或几个稳定同位素（ ^{43}Tc 、 ^{61}Pm 除外）；大于或等于 83 的元素，则为天然放射性元素。

在自然界存在三个衰变系列，其母体核素半衰期相当长，在地球形成过程就存在。

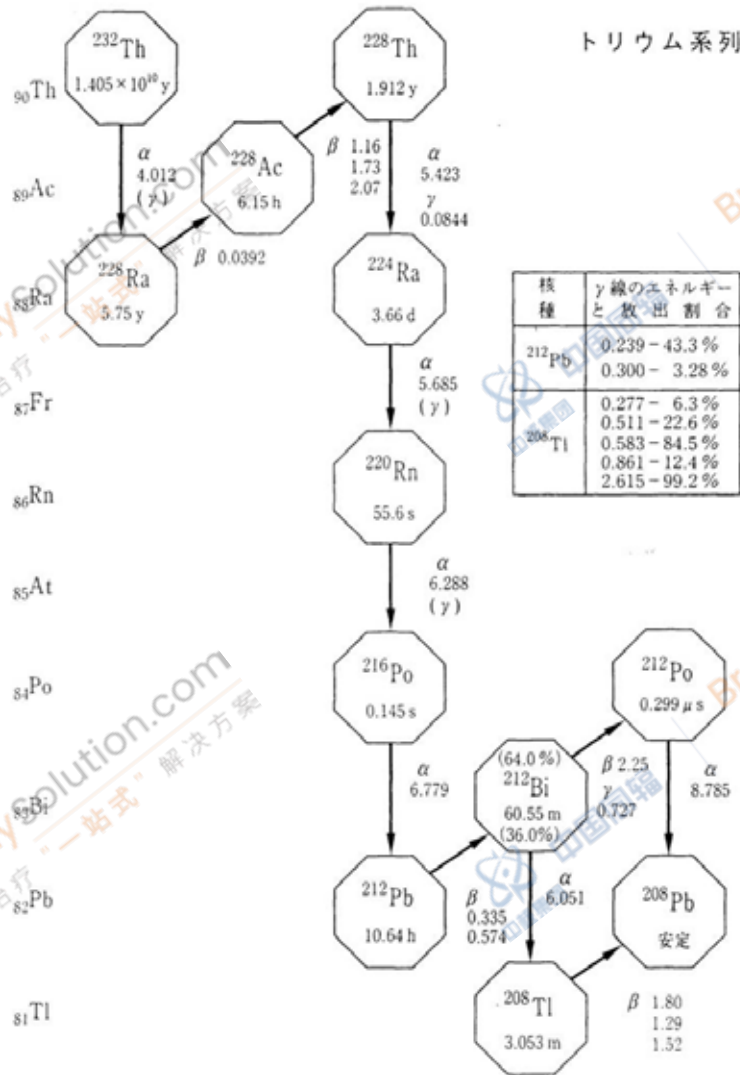


图 3-1 钍-232 衰变系列

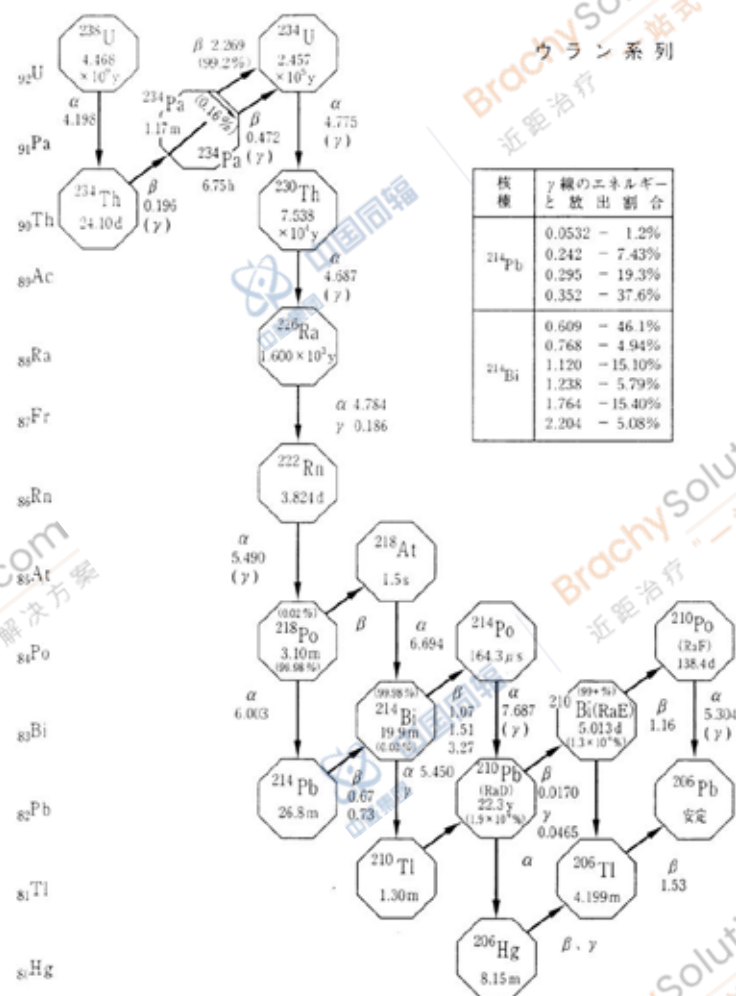


图 3-2 铀-238 衰变系列

アクチニウム系列

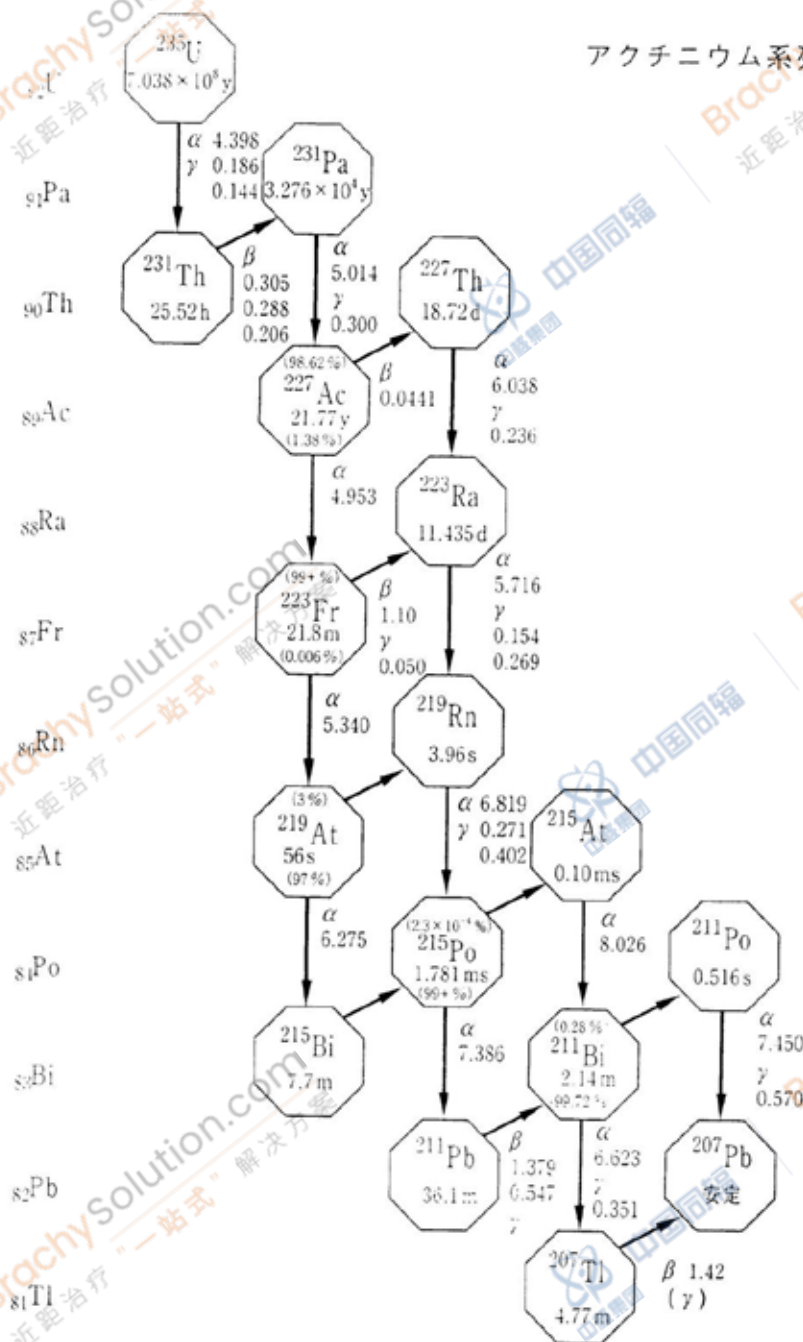


图 3-3 铀-235 衰变系列

ネプツニウム系列

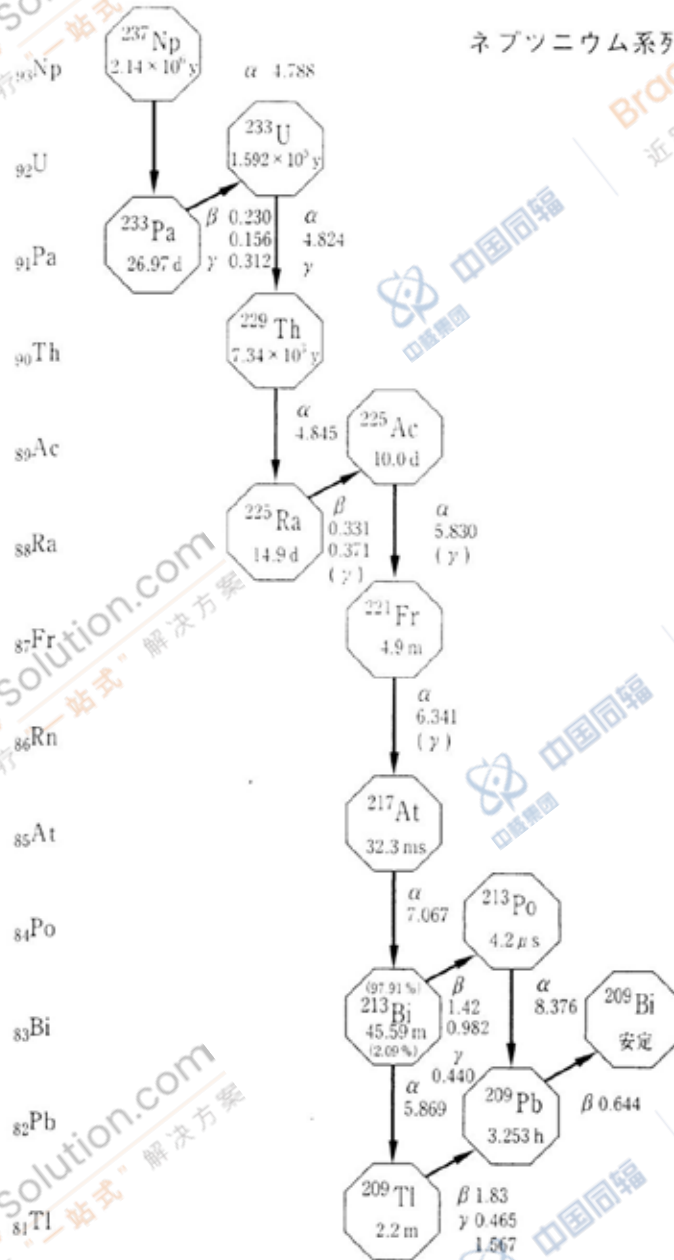


图 3-4 镎-237 衰变系列

表 3-1 四个衰变系列放射性核素表

元素 符号	自然界存在三个衰变系列						镎-237 衰变系	
	钍-232 衰变系		铀-238 衰变系		铀-235 衰变系		核素 符号	半衰期
Np							^{237}Np	2.144E+6y
			^{238}U	4.468E+9 y	^{235}U	7.04E+8y	^{233}U	1.592E+5y
Pa			^{234}U	2.455E+5y				
			^{234}Pa	6.7 h	^{231}Pa	3.276E+4	^{233}Pa	26.967 d

						y		
Th	²³² Th	1.405E+10 y	²³⁴ Th	24.1 d	²³¹ Th	25.52 h	²²⁹ Th	7.34E+3 y
	²²⁸ Th	1.9116 y	²³⁰ Th	7.538E+4 y	²²⁷ Th	18.68 d		
Ac	²²⁸ Ac	6.15 h			²²⁷ Ac	21.772 y	²²⁵ Ac	10 d
Ra	²²⁸ Ra	5.75 y	²²⁶ Ra	1600 y	²²³ Ra	11.43 d	²²⁵ Ra	14.9 d
	²²⁴ Ra	3.66 d						
Fr					²²³ Fr	22 m	²²¹ Fr	4.9 m
Rn	²²⁰ Rn	55.6 s	²²² Rn	3.8235 d	²¹⁹ Rn	3.96 s		
At			²¹⁸ At	1.5 s	²¹⁹ At	56 s	²¹⁷ At	3.23E-2 s
					²¹⁵ At	1.0E-4 s		
Po	²¹⁶ Po	0.145 s	²¹⁸ Po	3.1 m	²¹⁵ Po	1.781E-3s	²¹³ Po	4.2E-6 s
	²¹² Po	2.99E-7 s	²¹⁴ Po	1.643E-4 s	²¹¹ Po	0.516 s		
			²¹⁰ Po	138.376 d				
Bi	²¹² Bi	60.55 m	²¹⁴ Bi	19.9 m	²¹⁵ Bi	7.6 m	²¹³ Bi	45.59 m
			²¹⁰ Bi	5.013 d	²¹¹ Bi	2.14 m	²⁰⁹ Bi	稳定
Tl	²⁰⁸ Tl	3.053 m	²¹⁰ Tl	1.3 m	²⁰⁷ Tl	4.77 m	²⁰⁹ Tl	2.161 m
			²⁰⁶ Tl	4.2 m				
Hg			²⁰⁶ Hg	8.15 m				
Pb	²¹² Pb	10.64h	²¹⁴ Pb	26.8 m	²¹¹ Pb	36.1 m	²⁰⁹ Pb	3.253 h
	²⁰⁸ Pb	稳定	²¹⁰ Pb	22.2 y	²⁰⁷ Pb	稳定		
			²⁰⁶ Pb	稳定				

表 3-2 其他天然放射性核素 (18)

核素	同位素丰度, %	半衰期, 年	衰变形式
⁴⁰ K	0.00117	1.251x10 ⁹	β ⁻ (89%,EC(11%))
⁸⁷ Rb	27.83	4.923x10 ¹⁰	β ⁻
⁹² Nb	2x10 ⁻¹¹	3.47x10 ⁷	EC
¹¹³ Cd	12.2	7.7x10 ¹⁵	β ⁻
¹¹⁵ In	95.7	4.41x10 ¹⁴	β ⁻
¹³⁸ La	0.089	1.02x10 ¹¹	β ⁻ (32%,EC(68%))
¹⁴⁴ Nd	23.8	2.29x10 ¹⁵	α
¹⁴⁶ Sm	<2x10 ⁻⁷	1.03x10 ⁸	α
¹⁴⁷ Sm	15.1	1.06x10 ¹¹	α
¹⁴⁸ Sm	11.3	7x10 ¹⁵	α
¹⁵² Gd	0.2	1.08x10 ¹⁴	α
¹⁷⁶ Lu	2.61	3.85x10 ¹⁰	β ⁻
¹⁷⁴ Hf	0.16	2x10 ¹⁵	α
¹⁸⁷ Re	62.6	4.12x10 ¹⁰	β ⁻
¹⁸⁶ Os	1.6	2x10 ¹⁵	α
¹⁹⁰ Pt	0.013	6.5x10 ¹¹	α

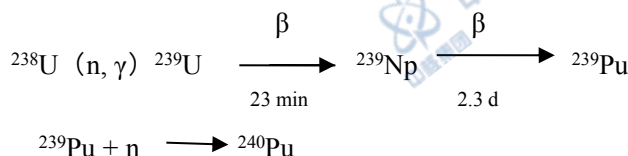
天然放射性核素除铀、钍核材料外, 具有实用意义的其它天然放射性核素主要是 ²²⁶Ra、²¹⁰Pb 和 ²¹⁰Po 等。现在 ²¹⁰Po 可以用堆照铋生产; ²²⁶Ra 的功能可以用其它放射性核素代替。

2. 核反应堆辐照生产放射性核素

核裂变的发现为核能核技术在军事上和经济上的应用开辟了广阔的前程。在军事上有了威力强大的核裂变武器原子弹。裂变核武器属‘非自控链式反应’。利用易裂变核素进行可控的自持核链式反应的装置，称作**核反应堆**，简称反应堆。

反应堆按用途分为生产堆、研究堆和动力堆。

生产堆辐照 ^{238}U 生成 ^{239}Pu ，



核武器用 ^{239}Pu 中 ^{240}Pu 量应低于 6~7%，通常是照射铀 100 天左右，取出来进行分离。

动力堆是以提供动力为目标反应堆。燃料元件燃烧比较深，是生产堆的 10 倍以上，铀材料得到充分利用，生成的 ^{239}Pu 中 ^{240}Pu 量相当高，达到 19% 以上。

研究堆是用作研究工具的反应堆的总称。由于在这类堆上方便放射性核素生产操作，所以大部分放射性核素生产安排在这类堆上。

按照堆芯诱发裂变中子能量的不同，反应堆还可以分为热中子堆，中能中子堆和快中子堆。

动力堆按照用途可以分为发电用反应堆和推进用反应堆。

核电反应堆按堆型分轻水堆（包括压水堆和沸水堆）、重水堆和高温气冷堆，快中子堆也受到重视。

压水堆（PWR）是用加压热水作慢化剂，又作为冷却剂的动力堆。可用低富集度的 ^{235}U ，因而发电成本低，富有竞争力。

沸水堆（BWR）是以轻水作为慢化剂和冷却剂，并在反应堆内直接产生饱和蒸汽的发电用堆。

重水堆（HWR）是用重水作慢化剂的反应堆。由于重水的热中子截面很小，可以使用各种富集度的 ^{235}U （或 ^{239}Pu ）作燃料。

高温气冷堆（HTGR）是以石墨为慢化剂，气体为冷却剂的反应堆。这种堆有望实现钍—铀燃料循环，成为利用钍资源的转换堆。

快中子增殖堆（FBR）是指主要由快中子引起裂变的反应堆。它不需要慢化剂，但需要用高富集度的易裂变材料铀或钚作燃料，以便裂变后产生更多的快中子，使 ^{238}U 转换为新的易裂变核素 ^{239}Pu ，实现增殖。

核聚变能源是未来能源的希望。

利用核裂变除了可供热和发电外，还可以为船舶航行和火箭推进提供动力。

反应堆是强中子源，其中子注量率可达 10^{12} — $10^{16} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。利用中子轰击不同的靶核，可以生产多种放射性核素。反应堆可同时辐照多种样品，而且量大，靶物制备容易，辐照操作简便，成本低。它是制备人工放射性核素最重要的方法。

反应堆生产放射性核素第二种方法是借助于核裂变过程本身，从裂变产物中提取多种有用放射性核素。

中子不带电，与靶核作用不存在库仑势垒，各种能量的中子均可引起核反应。

(n,γ) 反应所需中子能量低（0.025eV 热中子），反应截面大，是实际生产放射性核素最重要、最基本也是最优先考虑采用的核反应。生成的子核与母核属同一种元素的同位素，所以比放射性活度较低。有些子核继续发生衰变，生成另种元素的同位素。

(n,f) 反应（裂变反应）可以释放出大量能量——核能。 ^{235}U 等易裂变核素俘获中子发

生(n,f)反应,生成几百种裂变产物核素,经化学分离可提取多种有重要实用价值的放射性核素。在反应堆短期辐照 ^{235}U 靶,可获得某些有实用意义的短半衰期核素,如 ^{99}Mo , ^{131}I , ^{133}Xe 等。

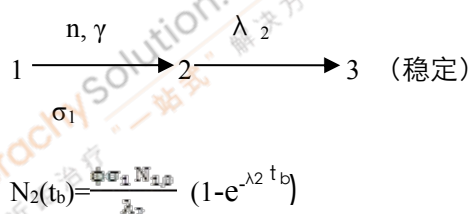
(n,p) 反应的反应能 Q 有正有负。生成的核素不属于靶元素的同位素。(n, p)反应要求中子有较高能量。

(n, α) 由于库仑势垒的阻挡,慢中子和中能中子引起的发射带电粒子的反应是少见的,轻核而且反应能很大时,这种反应截面才有可观的数值。最重要的(n, α)反应是 $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ 。该反应是生产氚的主要方法。

反应堆辐照的靶材料应是:

- (1) 纯度高;
- (2) 靶元素含量高;
- (3) 靶同位素丰度高,必要时用富集同位素靶;
- (4) 辐照稳定性和热稳定性好。

反应堆生产放射性核素的产额,与中子的注量率、能量,靶核的反应截面,靶原子数目,照射持续时间以及生成核素的半衰期有关。简单情况的产额计算如下:



$$A_2(t_b) = \lambda_2 N_2(t_b) = \phi N_{10} (1 - e^{-\lambda_2 t_b})$$

式中, N_2 : t 时刻核素2的原子数; N_{10} : 靶核的原子数; ϕ : 入射粒子注量率 ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$); σ_1 : 靶核的反应截面 (b); λ_2 : 生成核素2的衰变常数 (s^{-1}); t_b : 照射时间 (s); A_2 : 生成核素2的活度 (Bq)。

实际情况是靶核在照射过程中,可能出现各种情况:

- (1) 生成的放射性核素不再继续俘获中子,只发生衰变,变成稳定核素;
- (2) 连续多次中子俘获;
- (3) 既发生核反应又进行衰变。

不论是何种情况,对某一核素的计算来说,实际是计算该放射性核素的净增长率,即生成率减去其消失率。产物放射性核素的净增长率可用下述方程给出:

$$\text{令} \quad \Lambda = \phi \sigma + \lambda$$

$$\text{则} \quad \frac{dN_n}{dt} = \lambda_{n-1} N_{n-1} - \Lambda N_n$$

在 $t=0$ 时, 如有 $N_2^0 = N_3^0 = \dots = N_n^0 = 0$

则上述方程式的通解是:

$$N_n(t) = \Lambda_1^* \Lambda_2^* \dots \Lambda_{n-1}^* N_1^0 \sum_{i=1}^n C_i e^{-\Lambda_i t}$$

$$C_j = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\Lambda_j - \Lambda_i} \quad (j \neq i)$$

式中， ϕ 为中子注量率； σ 为核反应截面； t 为照射时间； Λ_i ， Λ_j 分别为第 j 、 i 个核素的总消失系数，它是衰变常数和核反应消耗系数的总和，即 $\Lambda_i = \phi \sigma_i \lambda_i$ ； Λ_i^* 为链中第 i 个核素形成第 $i+1$ 个核素的形成常数。当第 $i+1$ 个核素仅由第 i 个核素衰变而来时， $\Lambda_i^* = \lambda_i$ ；当第 $i+1$ 个核素仅由第 i 个核素的核反应而来时 $\Lambda_i^* = \phi \sigma_{i+1}$ ，当第 $i+1$ 个核素仅由第 i 个核素的核反应而来时， $\Lambda_i^* = \phi \sigma_i$ ；当两者的贡献都有时， $\Lambda_i^* = \phi \sigma_i \lambda_i$ 。

应当指出的是，上述产额计算公式是假定中子注量率、核反应截面及靶原子数在照射过程中是不变的。实际情况并非完全如此。表 3-4 列出某些核素在不同照射时间的产额。

辐照条件选择。从经济性和合理性考虑，适于生产放射性核素的反应堆应具备如下条件：

- (1) 有足够高的热中子注量率。热中子注量率不应低于 $10^{12} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ，比较理想的情况是达到甚至高于 $10^{14} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。堆内不同位置的照射管道中子注量率不同，要获得高比活度的核素，需要选在高中子注量率的管道。
- (2) 有较大的辐照空间和足够的后备反应性。这是为了满足多品种、大批量样品的辐照，并可以弥补中子损失。
- (3) 具有合理的冷却措施。有必要的冷却回路，吸收核反应产生的热和靶件吸收放射性核素发射的粒子而引起的温度升高。
- (4) 具有合适的中子能谱。堆内中子能谱是很复杂的，堆中不同位置中子的能谱可能很不同。实际生产某种核素，根据其核反应，对于 (n,γ) 反应需要热中子，选择在热中子高的位置，而 (n,p) 反应则需要较高能量的中子，选择在超热中子或快中子高的位置。
- (5) 具有适当的辅助设备和工具
- (6) 合理的辐照时间。

表 3-3 t/T 值对应的 $A(t)/A$ 值

t/T	$[A(t)/A] \%$	t/T	$[A(t)/A] \%$
0.125	8.34	2	75
0.25	15.87	3	87.5
0.5	29.25	4	93.75
1	50	5	96.875

t —辐照时间； T —生成核素半衰期； $A(t)$ — t 辐照时间生成的核素活度； A —饱和活度。

表 3-4 反应堆生产放射性核素的产额

设定：中子注量率 $1 \times 10^{14} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ ；产额 $3.7 \times 10^{10} \text{Bq/g}$ （靶物）。

放射性核素	靶同位素	丰度，%	核反应	截面，b	辐照时间和产额				
					6 h	1d	7d	28d	180d
^3H	^6Li	7.59	(n,α)	941	6.33E-01	2.52E+00	1.72E+01	6.33E+01	2.36E+02
^{14}C	^{14}N	99.63	(n,p)	1.83	2.03E-05	8.11E-05	5.67E-04	2.27E-03	1.46E-02
^{24}Na	^{23}Na	100	(n,γ)	0.53	1.60E+01	4.42E+01	6.58E+01	6.58E+01	6.58E+01
^{27}Mg	^{26}Mg	11.01	(n,γ)	0.039	2.82E-01	2.82E-01	2.82E-01	2.82E-01	2.82E-01

³² P	³¹ P	100	(n, γ)	0.172	1.09E-01	4.29E-01	2.61E+00	6.72E+00	9.04E+00
³² P	³² S	95.02	(n,p)	0.03	3.36E-05	1.32E-04	8.02E-04	2.07E-03	2.78E-03
³² P	³⁵ Cl	75.77	(n,α)	0.08	4.02E-02	1.58E-01	9.60E-01	2.47E+00	3.33E+00
³⁵ S	³⁴ S	4.21	(n,γ)	0.235	9.60E-04	3.83E-03	2.62E-02	9.65E-02	3.69E-01
³⁵ S	³⁵ Cl	75.77	(n,p)	0.489	3.36E-02	1.34E-01	9.17E-01	3.38E+00	1.29E+01
³⁶ Cl	³⁵ Cl	75.77	(n, γ)	43.55	2.39E-06	9.57E-06	6.69E-05	2.66E-04	1.66E-03
³⁸ Cl	³⁷ Cl	24.23	(n, γ)	0.43	4.81E+00	4.82E+00	4.82E+00	4.82E+00	4.81E+00
³⁷ Ar	³⁶ Ar	0.336	(n,γ)	5.2	3.52E-03	1.40E-02	9.23E-02	3.03E-01	6.90E-01
³⁹ Ar	³⁸ Ar	0.063	(n,γ)	0.8	3.62E-08	1.45E-07	9.96E-07	3.78E-06	1.69E-05
⁴¹ Ar	⁴⁰ Ar	99.6	(n,γ)	0.66	2.41E+01	2.68E+01	2.68E+01	2.68E+01	2.68E+01
⁴² K	⁴¹ K	6.73	(n,γ)	1.45	1.17E+00	3.03E+00	4.09E+00	4.09E+00	4.08E+00
⁴⁵ Ga	⁴⁴ Ga	2.09	(n, γ)	0.88	7.88E-04	3.15E-03	2.18E-02	8.33E-02	3.97E-01
⁴⁷ Ca	⁴⁶ Ca	0.004	(n, γ)	0.72	4.51E-05	1.70E-04	7.90E-04	1.19E-03	1.20E-03
⁴⁶ Sc	⁴⁵ Sc	100	(n,γ)	17.4	2.03E+00	8.11E+00	5.54E+01	2.03E+02	7.48E+02
⁵¹ Cr	⁵⁰ Cr	4.345	(n, γ)	15.9	1.35E-01	5.34E-01	3.47E+00	1.09E+01	2.10E+01
⁵⁶ Mn	⁵⁵ Mn	100	(n,γ)	13.36	3.16E+02	3.93E+02	3.94E+02	3.93E+02	3.86E+02
⁵⁵ Fe	⁵⁴ Fe	5.845	(n,γ)	2.25	6.61E-04	2.64E-03	1.85E-02	7.33E-02	4.47E-01
⁵⁹ Fe	⁵⁸ Fe	0.282	(n, γ)	1.30	4.06E-04	1.61E-03	1.08E-02	3.69E-02	9.80E-02
⁶⁰ Co	⁵⁹ Co	100	(n,γ)	37.18	9.23E-02	3.69E-01	2.58E+00	1.03E+01	6.33E+01
⁶³ Ni	⁶² Ni	3.634	(n, γ)	14.5	6.93E-05	2.77E-04	1.94E-03	7.72E-03	4.83E-02
⁶⁴ Cu	⁶³ Cu	69.17	(n,γ)	4.52	2.23E+01	5.75E+01	7.73E+01	7.72E+01	7.68E+01
⁶⁵ Zn	⁶⁴ Zn	48.63	(n, γ)	1.1	6.52E-03	2.60E-02	1.79E-01	6.82E-01	3.10E+00
⁷² Ga	⁷¹ Ga	39.89	(n,γ)	4.73	1.12E+01	3.04E+01	4.38E+01	4.38E+01	4.36E+01
⁷¹ Ge	⁷⁰ Ge	20.37	(n,γ)	3.17	2.46E-01	9.61E-01	5.65E+00	1.33E+01	1.63E+01
⁷⁶ As	⁷⁵ As	100	(n, γ)	4.23	1.43E+01	4.58E+01	9.66E+01	9.77E+01	9.71E+01
⁷⁷ As	⁷⁶ Ge	7.83	(n, γ) + β ⁻	0.14	2.11E-03	2.19E-02	1.16E-01	1.24E-01	1.24E-01
⁷⁵ Se	⁷⁴ Se	0.89	(n, γ)	51.8	1.37E-02	5.48E-02	3.77E-01	1.41E+00	5.87E+00
⁸² Br	⁸¹ Br	49.31	(n, γ)	2.36	2.95E+00	9.97E+00	2.56E+01	2.65E+01	2.65E+01
⁷⁹ Kr	⁷⁸ Kr	0.35	(n,γ)	4.73	3.71E-02	1.25E-01	3.20E-01	3.31E-01	3.29E-01
⁸⁵ Kr	⁸⁴ Kr	57	(n, γ)	0.042	1.99E-06	7.96E-06	5.57E-05	2.23E-04	1.43E-03
⁸⁶ Rb	⁸⁵ Rb	72.17	(n,γ)	0.427	6.11E-02	2.41E-01	1.51E+00	4.27E+00	6.59E+00
⁸⁵ Sr	⁸⁴ Sr	0.56	(n, γ)	0.62	2.41E-04	9.62E-04	6.52E-03	2.34E-02	7.72E-02
⁸⁹ Sr	⁸⁸ Sr	82.58	(n,γ)	0.058	3.05E-04	1.21E-03	8.15E-03	2.84E-02	8.14E-02
⁹⁰ Y	⁸⁹ Y	100	(n,γ)	1.28	1.47E+00	5.36E+00	1.96E+01	2.34E+01	2.34E+01
⁹⁵ Zr	⁹⁴ Zr	17.38	(n, γ)	0.05	4.18E-04	1.67E-03	1.13E-02	4.05E-02	1.33E-01
⁹⁷ Zr	⁹⁶ Zr	2.8	(n, γ)	0.02	2.49E-03	7.16E-03	1.14E-02	1.14E-02	1.14E-02
⁹⁹ Mo	⁹⁸ Mo	24.13	(n, γ)	0.137	3.25E-02	1.19E-01	4.41E-01	5.32E-01	5.32E-01
⁹⁷ Ru	⁹⁶ Ru	5.54	(n,γ)	0.22	1.50E-02	5.48E-02	2.09E-01	2.57E-01	2.58E-01
¹⁰³ Ru	¹⁰² Ru	31.55	(n, γ)	1.21	2.71E-02	1.08E-01	7.16E-01	2.40E+00	5.89E+00
¹⁰³ Pd	¹⁰² Pd	1.02	(n, γ)	3.4	5.38E-03	2.12E-02	1.32E-01	3.61E-01	5.28E-01
¹⁰⁹ Pd	¹⁰⁸ Pd	26.46	(n,γ)	7.6	8.99E+00	2.41E+01	3.43E+01	3.43E+01	3.39E+01
¹¹⁰ Ag	¹⁰⁹ Ag	48.16	(n,γ)	86	2.24E-02	8.95E-02	6.20E-01	2.39E+00	1.20E+01

¹⁰⁹ Cd	¹⁰⁸ Cd	0.89	(n, γ)	0.72	5.37E-05	2.14E-04	1.47E-03	5.46E-03	2.18E-02
¹¹⁵ Cd	¹¹⁴ Cd	28.73	(n, γ)	0.30	9.34E-02	3.34E-01	1.11E+00	1.25E+00	1.25E+00
¹¹³ Sn	¹¹² Sn	0.97	(n, γ)	0.71	1.97E-04	7.85E-04	5.40E-03	2.03E-02	8.65E-02
¹²³ Sn	¹²² Sn	4.63	(n, γ)	0.139	1.54E-04	6.15E-04	4.24E-03	1.60E-02	7.12E-02
¹²² Sb	¹²¹ Sb	57.21	(n, γ)	5.9	2.81E+00	1.02E+01	3.77E+01	4.52E+01	4.49E+01
¹²⁴ Sb	¹²³ Sb	42.79	(n, γ)	4.1	7.10E-02	2.83E-01	1.91E+00	6.80E+00	2.14E+01
¹²⁵ I	¹²⁴ Xe	0.095	(n, γ) + EC	165	6.14E-04	7.74E-03	1.17E-01	4.34E-01	1.04E+00
¹³¹ I	¹³⁰ Te	34.08	(n, γ) + β ⁻	0.29	2.33E-02	9.79E-02	5.49E-01	1.11E+00	1.22E+00
¹²⁵ Xe	¹²⁴ Xe	0.095	(n, γ)	165	3.32E-01	9.38E-01	1.44E+00	1.41E+00	1.19E+00
¹²⁷ Xe	¹²⁶ Xe	0.088	(n, γ)	3.5	1.62E-04	6.42E-04	4.25E-03	1.41E-02	3.28E-02
¹³³ Xe	¹³² Xe	26.91	(n, γ)	0.415	4.88E-02	1.86E-01	9.06E-01	1.46E+00	1.50E+00
¹³¹ Cs	¹³⁰ Ba	0.106	(n, γ) + EC	8.7	1.95E-05	3.03E-04	1.15E-02	8.03E-02	1.47E-01
¹³⁴ Cs	¹³³ Cs	100	(n, γ)	30.3	7.47E-02	2.99E-01	2.07E+00	8.10E+00	4.37E+01
¹³¹ Ba	¹³⁰ Ba	0.106	(n, γ)	8.7	2.12E-03	8.30E-03	4.88E-02	1.16E-1	1.40E-01
¹³³ Ba	¹³² Ba	0.101	(n, γ)	6.5	3.78E-06	1.51E-05	1.06E-04	4.22E-04	2.67E-03
¹⁴⁰ La	¹³⁹ La	99.91	(n, γ)	9.04	1.03E+01	3.54E+01	9.87E+01	1.04E+02	1.03E+02
¹³⁹ Ce	¹³⁸ Ce	0.251	(n, γ)	1.02	4.02E-05	1.60E-04	1.09E-03	3.96E-03	1.40E-02
¹⁴¹ Ce	¹⁴⁰ Ce	88.45	(n, γ)	0.58	3.11E-02	1.24E-01	8.12E-01	2.63E+00	5.67E+00
¹⁴³ Ce	¹⁴² Ce	11.114	(n, γ)	0.97	1.45E-01	4.84E-01	1.19E+00	1.22E+00	1.22E+00
¹⁴² Pr	¹⁴¹ Pr	100	(n, γ)	11.5	2.60E+01	7.72E+01	1.32E+02	1.33E+02	1.32E+02
¹⁴⁷ Nd	¹⁴⁶ Nd	17.2	(n, γ)	1.41	4.25E-02	1.66E-01	9.58E-01	2.17E+00	2.56E+00
¹⁴⁵ Sm	¹⁴⁴ Sm	3.07	(n, γ)	1.64	1.20E-04	4.78E-04	3.31E-03	1.27E-02	6.17E-02
¹⁵¹ Sm	¹⁵⁰ Sm	7.38	(n, γ)	100	4.14E-04	1.58E-03	7.72E-3	1.24E-02	1.12E-02
¹⁵³ Sm	¹⁵² Sm	26.75	(n, γ)	206	5.05E+01	1.78E+02	5.40E+02	5.68E+02	4.33E+02
¹⁵² Eu	¹⁵¹ Eu	47.81	(n, γ)	5900	1.12E+00	4.31E+00	2.27E+01	3.38E+01	1.81E-01
¹⁵⁴ Eu	¹⁵³ Eu	52.19	(n, γ)	312	4.46E-02	2.57E-01	1.71E+00	5.77E+00	1.20E+01
¹⁵³ Gd	¹⁵² Gd	0.2	(n, γ)	735	1.05E-02	3.73E-02	1.20E-01	1.19E-01	4.52E-02
¹⁵⁹ Gd	¹⁵⁸ Gd	24.84	(n, γ)	2.2	1.32E+00	3.85E+00	6.38E+00	6.39E+00	6.37E+00
¹⁶⁰ Tb	¹⁵⁹ Tb	100	(n, γ)	23.3	6.26E-01	2.49E+00	1.67E+01	5.78E+01	1.59E+02
¹⁵⁹ Dy	¹⁵⁸ Dy	0.1	(n, γ)	43	5.18E-04	2.07E-03	1.43E-02	5.40E-02	2.40E-01
¹⁶⁵ Dy	¹⁶⁴ Dy	28.18	(n, γ)	1040	6.22E+03	7.41E+03	6.88E+03	5.32E+03	9.28E+02
¹⁶⁶ Ho	¹⁶⁵ Ho	100	(n, γ)	61.2	8.81E+00	2.84E+02	6.11E+02	6.13E+02	5.64E+02
¹⁶⁹ Er	¹⁶⁸ Er	26.98	(n, γ)	2.74	1.31E-01	5.08E-01	2.88E+00	6.24E+00	7.12E+00
¹⁷¹ Er	¹⁷⁰ Er	14.91	(n, γ)	8.85	3.57E+00	7.48E+00	8.40E+00	8.39E+00	8.33E+00
¹⁷⁰ Tm	¹⁶⁹ Tm	100	(n, γ)	105	1.47E+00	5.86E+00	4.01E+01	1.49E+02	5.84E+02
¹⁷⁵ Yb	¹⁷⁴ Yb	31.83	(n, γ)	63.2	7.86E+00	2.96E+01	1.33E+02	1.91E+02	1.84E+02
¹⁷⁷ Lu	¹⁷⁶ Lu	2.59	(n, γ)	2090	1.29E+01	4.94E+01	2.44E+02	3.37E+02	2.35E+01
¹⁷⁵ Hf	¹⁷⁴ Hf	0.16	(n, γ)	549	2.05E-02	8.15E-02	5.46E-01	1.87E+00	4.05E+00
¹⁸¹ Hf	¹⁸⁰ Hf	35.08	(n, γ)	13.04	1.64E-01	6.52E-01	4.34E+00	1.47E+01	3.70E+01
¹⁸² Ta	¹⁸¹ Ta	99.99	(n, γ)	20.5	2.82E-01	1.10E+00	6.16E+00	1.30E+01	1.44E+01

^{181}W	^{180}W	0.12	(n, γ)	30	4.93E-04	1.97E-03	1.35E-02	5.09E-02	2.16E-01
^{185}W	^{184}W	30.64	(n, γ)	1.7	1.13E-02	4.51E-02	3.07E-01	1.12E+00	3.96E+00
^{187}W	^{186}W	28.43	(n, γ)	38.5	1.53E+01	4.80E+01	9.47E+01	9.48E+01	9.02E+01
^{186}Re	^{185}Re	37.40	(n, γ)	112	1.65E+00	6.15E+01	2.65E+02	3.57E+02	3.10E+02
^{188}Re	^{187}Re	62.6	(n, γ)	76.4	8.89E+01	2.55E+02	4.06E+02	4.01E+02	3.65E+02
^{185}Os	^{184}Os	0.02	(n, γ)	3000	9.47E-03	3.74E-02	2.37E-01	6.75E-01	5.22E-01
^{191}Os	^{190}Os	26.36	(n, γ)	3.9	9.85E-02	3.87E-01	2.35E+00	6.08E+00	8.15E+00
^{192}Ir	^{191}Ir	37.3	(n, γ)	309	2.28E+00	9.05E+00	5.89E+01	1.85E+02	2.89E+02
^{194}Ir	^{193}Ir	62.7	(n, γ)	111	1.20E+02	3.58E+02	6.12E+02	6.02E+02	5.24E+02
^{197}Pt	^{196}Pt	25.24	(n, γ)	0.41	3.28E-01	9.63E-01	1.61E+00	1.61E+00	1.61E+00
^{198}Au	^{197}Au	100	(n, γ)	98.65	4.94E+01	1.67E+02	4.24E+02	4.33E+02	3.80E+02
^{197}Hg	^{196}Hg	0.15	(n, γ)	3080	2.43E+00	8.75E+00	2.90E+01	2.11E+01	1.47E+00
^{203}Hg	^{102}Hg	29.86	(n, γ)	4.42	4.38E-02	1.74E-01	1.17E+00	4.02E+00	1.09E+01
^{204}Tl	^{203}Tl	29.52	(n, γ)	11.4	3.25E-03	1.30E-02	9.06E-02	3.60E-01	2.18E+00
^{210}Bi	^{209}Bi	100	(n, γ)	0.024	6.40E-03	2.43E-02	1.17E-01	1.85E-01	188E-01
^{210}Po	^{209}Bi	100	(n, γ) + β^-	0.024	4.03E-06	6.22E-05	2.34E-03	1.87E-02	1.09E-01
^{233}Pa	^{232}Th	100	(n, γ) + β^-	7.35	3.02E-01	1.29E+00	8.51E+00	2.65E+01	5.11E+01

3. 从裂变产物中提取某些放射性核素

^{235}U 和 ^{239}Pu 等重核裂变时, 可以释放出大量能量—核能, 并生成多种人工放射性核素。在原子质量数 $A=95$ 和 $A=139$ 附近呈现两个极大值—双驼峰 (见图 3-2)。裂变产物包括近 50 种元素的约 400 种核素。其中产额较大, 半衰期较长而具有实际应用价值的放射性核素列于表 3-5, 长寿命裂变核素的收率与燃料元件的冷却时间有关 (见表 3-6), 至于短寿命裂变核素如: ^{99}Mo , ^{131}I , ^{133}Xe 等, 则需要从短期辐照 ^{235}U 靶中分离。

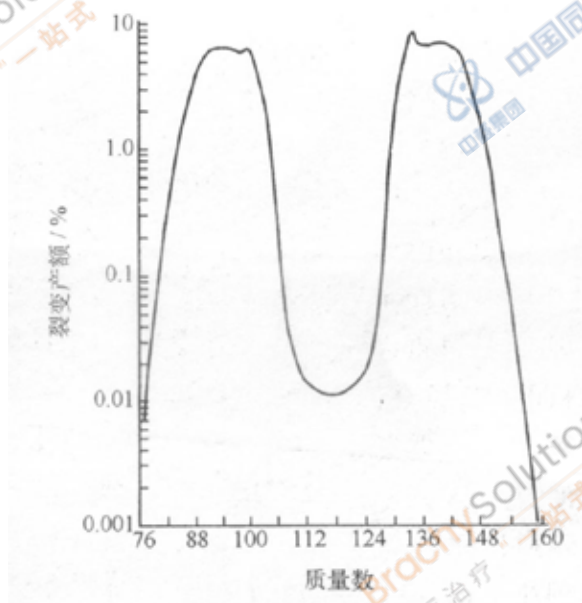


图 3-5 裂变产额与裂变产物质量数的函数关系

表 3-5 热中子和裂变谱中子诱发 ^{235}U 和 ^{239}Pu 裂变某些裂变核素累计产额(%)

核素	半衰期	^{235}U		^{239}Pu	
		热中子	裂变谱中子	热中子	裂变谱中子
^{72}Zn	46.5 h	2.69×10^{-5}	2.30×10^{-4}	1.07×10^{-4}	6.95×10^{-4}
^{72}Ga	14.1 h	2.69×10^{-5}	2.30×10^{-4}	1.08×10^{-4}	7.08×10^{-4}
^{73}Ga	4.86 h	1.13×10^{-4}	9.65×10^{-4}	2.37×10^{-4}	9.14×10^{-4}
^{74}Ga	8.12 m	3.64×10^{-4}	2.27×10^{-3}	5.60×10^{-4}	1.84×10^{-3}
^{75}Ge	82.78 m	1.19×10^{-3}	3.92×10^{-3}	1.32×10^{-3}	2.94×10^{-3}
^{77}Ge	11.3 h	3.06×10^{-3}	8.09×10^{-3}	2.98×10^{-2}	5.49×10^{-3}
^{77}As	38.83 h	3.47×10^{-3}	2.25×10^{-2}	7.45×10^{-3}	1.26×10^{-2}
^{78}Ge	88 m	1.86×10^{-2}	4.74×10^{-2}	2.37×10^{-2}	2.12×10^{-2}
^{78}As	90.7 m	1.88×10^{-2}	4.81×10^{-2}	2.49×10^{-2}	2.29×10^{-2}
^{79}As	9.01 m	5.29×10^{-2}	6.62×10^{-2}	4.76×10^{-2}	4.35×10^{-2}
$^{81\text{m}}\text{Se}$	57.28 m	7.70×10^{-3}	5.02×10^{-3}	4.94×10^{-3}	1.08×10^{-2}
^{81}Se	18.45 m	0.216	0.235	0.177	9.14×10^{-2}
^{82}Br	35.3 h	1.54×10^{-4}	5.67×10^{-4}	3.93×10^{-3}	3.31×10^{-3}
^{83}Br	2.4 h	0.531	0.577	0.295	0.369
$^{83\text{m}}\text{Kr}$	1.83 h	0.531	0.577	0.295	0.369
$^{85\text{m}}\text{Kr}$	4.48 h	1.311	1.295	0.550	0.613
^{85}Kr	10.756 y	0.288	0.286	0.130	0.152
^{86}Rb	18.642d	9.81×10^{-5}	3.30×10^{-4}	4.87×10^{-4}	3.33×10^{-3}
^{87}Kr	76.3 m	2.54	2.41	0.950	1.06
^{88}Kr	2.84 h	3.56	3.33	1.32	1.23
^{89}Sr	50.53 d	4.85	4.54	1.71	1.79
^{90}Sr	28.79 y	5.92	5.50	2.12	2.08
^{91}Sr	9.63 h	5.92	5.59	2.49	2.41
^{91}Y	58.51d	5.92	5.60	2.49	2.43
^{92}Sr	2.66 h	5.95	5.68	2.99	2.86
^{92}Y	3.54 h	5.96	5.72	3.01	2.94
^{93}Sr	7.423 m	6.27	6.00	3.73	3.29
^{93}Y	10.18 h	6.37	6.10	3.90	3.67
^{94}Y	18.7 m	6.41	6.18	4.42	4.15
^{95}Zr	64.032 d	6.46	6.39	4.92	4.73
^{97}Zr	16.744 h	5.94	5.86	6.15	6.74
^{99}Mo	65.94 d	6.13	5.70	6.15	5.88
^{103}Ru	39.26 d	3.14	3.29	6.99	6.74
^{105}Rh	35.36h	0.986	1.15	5.42	5.16
^{106}Ru	373.59 d	0.392	0.576	4.28	4.60
^{109}Pd	13.7012 h	0.0308	0.116	1.41	1.70
^{111}Ag	7.45 d	0.0184	0.044	0.272	0.535
$^{115\text{m}}\text{Cd}$	44.6 d	1.46×10^{-3}	4.21×10^{-3}	5.15×10^{-3}	1.14×10^{-2}

¹¹⁵ Cd	53.46 h	9.16x10 ⁻²	2.62x10 ⁻²	3.18x10 ⁻²	6.04x10 ⁻²
¹²¹ Sn	27.03 h	1.29x10 ⁻²	3.55x10 ⁻²	3.64x10 ⁻²	6.66x10 ⁻²
¹²⁹ Sb	4.4 h	0.637	1.01	1.46	1.38
^{129m} Te	33.6 d	0.119	0.188	0.266	0.227
¹³⁰ I	12.36 h	2.41x10 ⁻⁴	1.64x10 ⁻⁴	5.92x10 ⁻³	2.95x10 ⁻³
¹³¹ I	8.0207 d	2.84	3.24	3.74	4.08
¹³² Te	3.204 d	4.19	4.61	5.15	5.23
¹³² I	2.295 h	4.21	4.66	5.27	5.45
¹³³ I	20.8 h	6.77	6.46	6.93	6.52
^{133m} Xe	2.19 d	0.191	0.186	0.228	0.226
¹³³ Xe	5.243 d	6.77	6.47	6.97	6.58
¹³⁵ I	6.57 h	6.41	5.95	6.31	5.70
^{135m} Xe	15.29 m	1.06	1.09	1.56	1.67
¹³⁵ Xe	9.14 h	6.63	6.28	7.47	7.14
¹³⁶ Cs	13.16 d	5.27x10 ⁻³	1.56x10 ⁻²	0.105	0.147
¹³⁷ Cs	30.1671 y	6.26	6.17	6.69	6.29
¹³⁹ Ba	83.06 m	6.48	6.34	5.64	5.82
¹⁴⁰ Ba	12.752 d	6.32	6.02	5.57	5.24
¹⁴¹ Ce	32.508 d	5.89	6.01	5.36	5.56
¹⁴³ Ce	33.039 h	5.97	5.65	4.56	4.16
¹⁴³ Pr	13.57 d	5.97	5.26	3.83	3.55
¹⁴⁴ Ce	284.91 d	5.46	5.26	3.83	3.55
¹⁴⁵ Pr	5.984 h	3.94	3.71	3.08	2.89
¹⁴⁷ Nd	10.98 d	2.28	2.39	2.07	2.06
¹⁴⁷ Pm	2.6234 y	2.28	2.39	2.07	2.06
¹⁴⁸ Nd	稳定	1.69	1.68	1.69	1.64
¹⁴⁹ Pm	53.08 h	1.09	1.09	1.26	1.29
¹⁵¹ Pm	28.4 h	0.422	0.437	0.779	0.795
¹⁵³ Sm	46.5 h	0.163	0.202	0.373	0.412
¹⁵⁶ Eu	15.19 d	0.0136	0.0743	0.120	0.144
¹⁵⁹ Gd	18.479 h	0.00105	0.00309	0.0213	0.0394
¹⁶¹ Tb	6.906 d	8.81x10 ⁻⁵	4.08x10 ⁻⁴	4.99x10 ⁻³	1.02x10 ⁻²
¹⁶⁶ Dy	81.6 h	4.66x10 ⁻⁷	5.81x10 ⁻⁶	6.85x10 ⁻⁵	6.70x10 ⁻⁴

注：裂变产额是指裂变中产生某一给定种类裂变产物的份额。通常以 100 个核裂变产生的该核裂变产物核素个数（%）来表示。

表 3-6 一些主要长寿命裂变产物核素的部分核性质和数量

核素	半衰期	衰变方式	卸出燃料中的总含量 / (3.7 TBq)		
			刚卸出	冷却 150 天	冷却 10 年
⁹⁰ Sr	28.79 y	β	2.11x10 ⁴	2.09x10 ⁴	1.65x10 ⁴
⁹⁹ Tc	2.111x10 ⁵ y	β	3.90	3.90	3.90
¹⁰⁶ Ru	373.59 d	β	1.48x10 ⁵	1.12x10 ⁵	1.50x10 ²

¹⁰⁷ Pd	6.5 x10 ⁶ y	β	3.00x10 ⁻²	3.00x10 ⁻²	3.00x10 ⁻²
¹²⁵ Sb	2.75856 y	β, γ	2.37x10 ³	2.15x10 ³	1.85x10 ²
¹²⁹ I	1.57x10 ⁷ y	β	1.01x10 ⁻²	1.02x10 ⁻²	1.02x10 ⁻²
¹³⁴ Cs	2.0648 y	β, γ	6.7x10 ⁴	5.82x10 ⁴	2.28x10 ³
¹³⁷ Cs	30.1671 y	β, γ	2.94x10 ⁴	2.92x10 ⁴	2.33x10 ³
¹⁴⁴ Ce	284. 91 d	β, γ	3.02x10 ⁵	2.10x10 ⁴	4.11x10 ¹
¹⁴⁷ Pm	2.6234 y	β	2.78x10 ⁴	2.65x10 ⁴	2.11x10 ³
¹⁵¹ Sm	90 y	β	3.41x10 ²	3.41x10 ²	3.16x10 ²
¹⁵⁴ Eu	8.593 y	β, γ	1.91x10 ³	1.84x10 ³	8.6x10 ²

注：表中数据是对于 1000MW 压水堆的燃料 (²³⁵U) 连续运行三年而言的值。

4. 加速器生产放射性核素

加速器生产放射性核素是利用被加速的各种带电粒子引发的核反应。加速器生产的放射性核素具有高比活度、贫中子、短寿命等特点，很适合医用要求。回旋加速器造价低，运行维护简单，效率高，是生产放射性核素优先选择，加速的粒子一般是氘核(d)和氚核(p)，也有 ³He 和 α 粒子。加速重粒子进行核反应则用于科研目的。

加速器生产核素分薄靶和厚靶。薄靶是指入射粒子在靶中的能量损失相对于初始动能 E 可以忽略不计靶的厚度。实际生产放射性核素时，为了得到更多的放射性产品，充分利用束流往往采用厚靶。厚靶大于粒子在靶中的射程 R(E)，或靶厚度不小于将入射粒子能量衰减到相应核反应阈值所需要的靶厚度。

薄靶产额 Y(E)含义是对于给定的入射粒子能量，每单位电量和每减少 1MeV 能量所产生的放射性活度。其单位是 Bq/(μ A · h · MeV) 设入射粒子在靶中的穿透深度为 x，辐照薄层 dx 内放射性核素的生成和衰变可表示为

$$\frac{dN(x)}{dt} = n\sigma(x) S dx - \lambda N(x)$$

式中：N—生成的放射性核素的原子数； $\frac{dN(x)}{dt}$ —粒子注量率 ($m^{-1} \cdot s^{-1}$)；n—单位质量的靶核数 (kg^{-1})；σ—核反应截面(m^2)；x—入射粒子在靶中的穿透深度 (kg/m^2)；λ—生成核素的衰变常数 (s^{-1})；t—照射时间；S—靶子的受辐照面积 (m^2)。

厚靶产额 Y 定义为单位电流强度的入射粒子，单位时间内在靶上产生核素的放射性活度。它的单位是毫居里/ (毫安 · 小时) (mCi/mA · h)。厚靶产额 Y 可以用下列方法导出。当激发函数已知时，得到的放射性活度总量 A(Bq)可用下式计算：

$$A = (1 - e^{-\lambda t}) \frac{nI}{Z} 6.25 \times 10^{12} \int_0^{E_m} 10^{-24} \sigma(E) x(E) dE$$

式中常数项合并后

$$A = 6.25 \times 10^{12} \frac{nI}{Z} (1 - e^{-\lambda t}) \int_0^{E_m} \sigma(E) x(E) dE$$

式中，λ为生成放射性核素的衰变常数(h^{-1})； t 为照射时间(h)； n 为靶子物中适合活化的靶核密度 (原子数/ cm^3)。 $n = 6.02 \times 10^{23} (\rho p / M)$, (ρ 为靶子物密度, g/cm^3 ； M 为靶原子的原子量； p 为靶物中靶原子的质量分数)； I 为入射粒子的束流强度 (μA)； Z 为入射粒子的电

荷数； $\sigma(E)$ 为靶核的反应截面(b)； $\chi(E)$ 为能量在 E 到 $E+dE$ 间隔内，轰击粒子在靶中穿过的距离 (cm)； E_m 为入射粒子在靶表面的能量(MeV)。

$$A \approx 2.59 \times 10^{12} \frac{I_{pp}}{ZMT_{1/2}} \int_0^{E_m} \sigma(E) \chi(E) dE (\text{Bq})$$

用 $1\mu\text{A}$ 的粒子束流强度，照射 1h 所得的核素的放射性活度为厚靶产额 Y ，用下式表示：

$$Y = \frac{A}{I_t} = 2.59 \times 10^{12} \frac{PP}{ZMT_{1/2}} \int_0^{E_m} \sigma(E) \chi(E) dE (\text{Bq} / \mu\text{A} \cdot \text{h})$$

$$Y = 7 \times 10^7 \frac{PP}{ZMT_{1/2}} \int_0^{E_m} \sigma(E) \chi(E) dE (\mu\text{Ci} / \mu\text{A} \cdot \text{h})$$

厚靶产额 Y 虽然可用上述公式计算，但在实验中影响因素很多，往往计算值与实验值不能完全一致。一般用实验数据。

表 3-7 加速器生产核素的产额

核素	半衰期 $T_{1/2}$	衰变方式, (%)	γ 射线能量, keV, 及强度 (%)	核反应	能量范围 (MeV)	厚靶产额 $\text{mCi} / \mu\text{A} \cdot \text{h}$
^{11}C	20.39 m	β^+ (99.96) EC(0.04)	511 (199.652)	$^{14}\text{N}(\text{p}, \alpha)$	13~3	103
				$^{11}\text{B}(\text{p}, \text{n})$	10~0	92
				$^{10}\text{B}(\text{d}, \text{n})$	10~0	67
^{13}N	9.965 m	β^+ (99.9) EC(0.1)	511 (199.61)	$^{12}\text{C}(\text{d}, \text{n})$	8~0	53
				$^{13}\text{C}(\text{p}, \text{n})$	10~0	120
				$^{16}\text{O}(\text{p}, \alpha)$	16~7	45
^{15}O	122.24 s	β^+ (99.9) EC(0.1)	511 (199.8)	$^{14}\text{N}(\text{d}, \text{n})$	8~0	64
				$^{15}\text{N}(\text{p}, \text{n})$	10~0	60
				$^{16}\text{O}(\text{p}, \text{pn})$	26~16	100
^{18}F	109.77 m	β^+ (96.73) EC(3.27)	511(193.46)	$^{20}\text{Ne}(\text{d}, \alpha)$	14~0	30
				$^{18}\text{O}(\text{p}, \text{n})$	16~3	30
				$^{16}\text{O}(^3\text{He}, \text{p})$	41~14	13
^{22}Na	2.6019y	β^+ (89.9) EC(10.1)	511(179.79) 1274(99.9)	$^{24}\text{Mg}(\text{d}, \alpha)$	15~5	3.5
^{28}Mg	20.915 h	β^- (100)	30.64(66)	$^{27}\text{Al}(\alpha, 3\text{p})$	80~50	0.2
^{30}P	2.498 m	β^+ (99.85) EC(0.15)	511(199.71) 2235(0.069)	$^{27}\text{Al}(\alpha, \text{n})$	11~3	5.5
				$^{30}\text{Si}(\text{p}, \text{n})$	20~5	38
^{38}K	7.636 m	β^+ (99.77) EC(0.23)	511(199.54) 2167((99.858)	$^{35}\text{Cl}(\alpha, \text{n})$	22→7	7
				$^{38}\text{Ar}(\text{p}, \text{n})$	16→12	21
				$^{40}\text{Ca}(\text{d}, \alpha)$	12→0	5.6
				$^{40}\text{Ar}(\text{p}, 3\text{n})$	32→30	5.2
^{52}Mn	5.591 d	β^+ (29.6) EC(70.4)	511(59.2) 1434(100)	$^{52}\text{Cr}(\text{p}, \text{n})$	25~6	150
				$^{52}\text{Cr}(\text{d}, 2\text{n})$	25~10	90

⁵⁴ Mn	312.12 d	EC(100)	835(99.975)	⁵¹ V(α ,n)	20~9	6
⁵² Fe	8.275 h	β^+ (55.49) EC(44.51)	511(110.98) 168.688(99)	⁵² Cr(³ He,3n)	45~10	0.05
				Ni(p,spall)	800,450	0.65
				⁵⁰ Cr(α ,2n)	40~20	0.01
				⁵⁵ Mn(p,4n)	70~50	0.1
⁵⁷ Co	271.74 d	EC(100)	122.06(85.51)	⁵⁷ Fe(p,n)	20~8	85
				⁶⁰ Ni(p, α)	25~18	35
⁵⁸ Co	70.86 d	β^+ (14.9) EC(85.1)	511(29.8) 810.579(99.45)	⁵⁵ Mn(α ,n)	16~12	21
⁷² Se	8.4 d	EC(100)	46(58)	⁷⁶ As(d,5n)	55~45	0.1
				⁷⁰ Ge(α ,2n)	40~30	0.016
⁷³ Se	7.15 h	β^+ (65.4) EC(34.6)	511(130.77) 361.2(97)	⁷⁵ As(p,3n)	40~30	38
				⁷⁵ As(d,4n)	45~33	17.6
				⁷² Ge(³ He,2n)	23~13	1.5
				⁷⁰ Ge(α ,n)	28~13	3.4
⁷⁵ Br	96.7 m	β^+ (73) EC(27)	511(146) 286.5(88)	⁷⁶ Se(p,2n)	30~22	100
				⁷⁵ As(³ He,3n)	36~25	7.5
				⁷⁶ Se(d,3n)	35~29	82
				⁷⁵ As(α ,4n)	65~54	7.5
⁷⁶ Br	16.2 h	β^+ (55) EC(45)	511(109.46) 559.09(74) 1853.67(14.7)	⁷⁵ As(³ He,2n)	18~10	0.3
				⁷⁶ Se(p,n)	16~10	8
				⁷⁷ Se(p,2n)	25~16	7
⁶² Zn ↓ ⁶² Cu	9.186 h	β^+ (8.4) EC(91.6)	511(16.8) 596.56(25.7)	⁶³ Cu(p,2n)	26~21	3.9
	9.673 m	β^+ (97.43) EC(2.57)	511(194.86)	⁶⁰ Ni(α ,2n)	30~15	0.35
⁶⁸ Ge ↓ ⁶⁸ Ga	270.95 d	EC(100)		⁶⁹ Ga(p,2n) RbBr(p,spall)	22~13 800,500	0.02 0.004
	67.71 m	β^+ (89.1) EC(10.9)	511(178.2) 1077.33(3)			
⁶⁷ Ga	3.2612 d	EC(100)	93.311(39.2) 184.577(21.2)	⁶⁸ Zn(d,n) ⁶⁷ Zn(p,n)		
⁸² Sr ↓ ⁸² Rb	25.36 d	EC(100)		Mo(p,spall)	800	0.1
				⁸⁵ Rb(p,4n)	60~40	0.4
				Kr(³ He,xn)	90~20	0.035
				Kr(α ,xn)	120~20	0.05
⁸⁷ Y	79.8 h	β^+ (0.2) EC(99.8)	511(0.37) 388(82.1) 485(89.7)	⁸⁵ Rb(α ,2n)	40~15	0.85
				⁸⁸ Sr(p,2n) ⁸⁷ Sr(p,n)	26~20 35~15 15~5	1.2 6.5 1.3
⁸⁸ Y	106.65d	β^+ (0.21) EC(99.79)	511(0.42) 898(93.9)	⁸⁸ Sr(p,n)	20~8	72

			1836(99.32)			
¹⁰³ Pd	16.991 d	EC(100)	39.748(0.068) 357.45(0.022)	¹⁰³ Rh (p,n)	15~8	240
¹⁰⁹ Cd	461.4 d	EC(100)	88.033(3.7)	¹⁰⁹ Ag(d,2n)	16~12	6.6
¹¹¹ In	2.8047d	EC(100)	171.28(90.66) 245.4(94.09)	¹¹² Cd(p,2n) ¹¹¹ Cd(p,n) ¹⁰⁹ Ag(α,2n)	22~16 15~4 30~15	190 270 120
¹²³ I	13.27 h	EC(100)	158.97(83.3) 528.96(1.39)	¹²³ Te(p,n) ¹²⁴ Te(p,2n) ¹²¹ Sb(α,2n) ¹²⁷ I(p,5n) ¹²⁴ Xe(p,2n)	15~10 26~17 32~20 67~46 30	65 110 8.6 143~227 37
^{193m} Pt	4.33 d	IT(100)	12.634(0.658)	¹⁹³ Ir(d,2n)		
¹⁹⁵ Au	186.098 d	EC(100)	98.88(10.9)	¹⁹⁵ Pt(p,n)	20~8	8
^{197m} Hg	23.8 h	EC(8.6) IT(91.4)	279(6.1) 133.98(33.5)	¹⁹⁷ Au(d,2n) ¹⁹⁷ Au(p,n)	20~10 25~10	4.5 2.1
²⁰¹ Tl	72.912 h	EC(100)	167.34(10)	²⁰³ Tl(p,3n) ²⁰¹ Hg(p,n)	32~25 20~9	4 1.2
²¹¹ At	7.214 h	α(41.8) EC(58.2)	687(0.261)	²⁰⁹ Bi(α,2n)	29~26	1.3

5. 放射性核素发生器

放射性核素发生器通常是一种能从较长半衰期母体核素中分离出短半衰期核素的装置,为那些远离核反应堆和加速器的地区应用短寿命核素提供了方便条件。

母-子体系中子体放射性核素处于暂时平衡或长期平衡的状态的,可以制备成放射性核素发生器。长半衰期母体核素衰变生成子体核素可用下式表示:

$$A_2 = A_1(1 - e^{-\lambda_2 t}) = A_1(1 - \left(\frac{t}{T_2}\right)^{\ln 2})$$

式中: A_1 —长半衰期放射性核素放射性活度; A_2 —在时刻 t 时子核放射性活度

λ_2 —子体核素衰变常数; T_2 —子体核素半衰期

表 3-8 一些常用核素发生器的性能和用途

母体核素	生产方式	衰变形式	半衰期	E_{β} 最大 keV	子体核素	衰变形式	半衰期	E_{β} 最大 keV	主要 γ 射线能量 keV	主要用途
⁵² Fe	加速器	EC β^+	8.275h	804	^{52m} Mn	β^+	21.1 m	2633	511	PET 显像
⁶² Zn	加速器	EC	9.186		⁶² Cu	β^+	9.673 m	2927	511	PET 显像

		β^+								
^{66}Ni	反应堆	β	54.6 h	226	^{66}Cu	β	5.12 m	2642	1039	放免, 治疗
^{68}Ge	加速器	EC	270.95 d		^{68}Ga	β^+	67.71m	1899	511	PET 显像
^{72}Se	加速器	EC	8.4 d		^{72}As	β^+	26 h	2500	511	PET 显像
^{82}Sr	高能加速器	EC	25.36		^{82}Rb	β^+	1.273 m	3379	511	PET 显像
^{90}Sr	反应堆 U 裂变	β	28.79y	546	^{90}Y	β	64.1 h	2280		治疗
^{99}Mo	反应堆	β	65.94h	1214	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	IT	6.015 h		140.5	体内诊断
^{109}Cd	反应堆	EC	461.4d		$^{109\text{m}}\text{Ag}$	IT	39.6 s		88	RNA
^{112}Pd	(n,f)	β	21.03h	269	^{112}Ag	β	3.13 h	3956	617	放免 治疗
^{113}Sn	反应堆	EC	115.09 d		$^{113\text{m}}\text{In}$	IT	1.6579 h		391.7	体内诊断
^{132}Te	(n,f)	β	3.204d	215	^{132}I	β	2.295 h	2140	668	体内诊断
^{166}Dy	反应堆	β	81.6 h	404	^{166}Ho	β	26.8 h	1853	80.6	放免, 治疗
^{188}W	反应堆	β	69.78d	349	^{188}Re	β	17.004 h	2120	155	治疗
^{191}Os	反应堆	β	15.4 d	142	$^{191\text{m}}\text{Ir}$	IT	4.94 s		129	RNA
^{194}Os	反应堆	β	6.0 y	53	^{194}Ir	β	19.28 h	2246	328	放免, 治疗
$^{195\text{m}}\text{Hg}$	加速器	EC + IT	41.6 h	345	$^{195\text{m}}\text{Au}$	IT	30.5 s		262	RNA
^{212}Pb	加速器	β	10.64h	335	^{212}Bi	β	60.55 m	2248	727	放免, 治疗

6. 超铀元素的合成

超铀元素是指那些原子序数比铀大的元素。截止到 20 世纪末已经合成超铀元素 20 种。合成超铀元素有三种途径：核反应堆合成，热核中子闪爆合成及高能粒子轰击合成。

超铀元素可以作为核动力燃料、核武器装料、合成新元素靶料，还可以用于制造放射源、同位素能源以及和医学诊断和治疗工具。

表 3-9 具有重要实用价值的超铀元素同位素

核素	衰变类型	半衰期	生产方式	主要用途
^{237}Np	α	2.144E+6 y	$^{238}\text{U}(\text{n},2\text{n}) + \beta$ 衰变	制备超铀元素靶物 制备 ^{238}Pu 靶原料,
^{239}Pu	α	2.411E+4 y	$^{238}\text{U}(\text{n},\gamma) + \beta$ 衰变	核燃料
^{238}Pu	α	87.7 y	$^{237}\text{Np}(\text{n},\gamma) + \beta$ 衰变	制备同位素能源, 制备 α 和 χ 射线放射源
^{241}Am	α	432.2 y	^{238}U 多次中子俘获 + ^{241}Pu β 衰变	制备超铀元素靶物 制备 α 源, 低能 γ 源, 中子源

^{242}Cm	α	162.8 d	^{238}U 多次中子俘获 $^{241}\text{Am} (n,\gamma) + \beta$ 衰变	制备 α 源和中子源
^{244}Cm	α	18.1 y	^{238}U 多次中子俘获 + 放射性衰变	制备超铀元素靶物 制备 α 源和中子源
^{252}Cf	$\alpha(96.91\%)$ SF(3.09%)	2.645 y	^{239}Pu 多次中子俘获 + 放射性衰变	制备超铀元素靶物 制备同位素中子源