

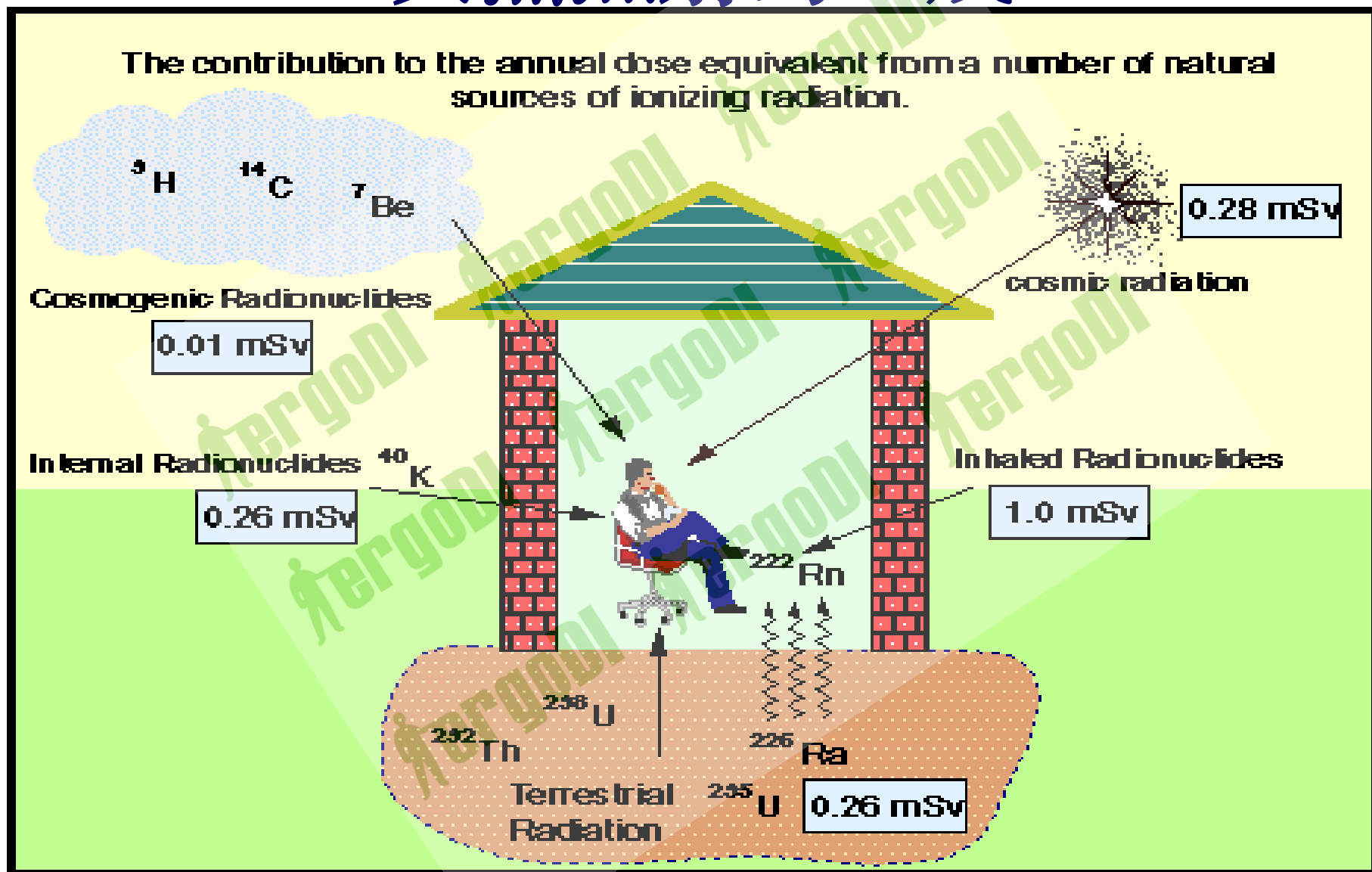
# 核技术中的放射源

马敏阳

2011-05-10

# 天然照射的组成

The contribution to the annual dose equivalent from a number of natural sources of ionizing radiation.



# 1.原生放射性核素

自有地球以来就存在于地壳内的放射性核素，称为原生放射性核素。原生放射性核素可分为两类，一类是有衰变系列的核素，主要是铀系（ $^{238}\text{U}$ 放射系）和钍系（ $^{232}\text{Th}$ 放射系）两个系的一些核素。另一类是无衰变系列的放射性核素如 $^{40}\text{K}$ 、 $^{87}\text{Rb}$ 等。

原生放射性核素，广泛存在于地球的岩石、土壤、江河、湖海中。这些元素的活度浓度和分布随着岩石构造的类型不同而变化。花岗岩中的活度浓度最高。土壤和岩石中所含的铀、钍、镭、钾等元素，以 $^{40}\text{K}$ 的活度浓度最高。



宇宙射线引起的簇射

### 3. 宇生放射性核素，以 $^{14}\text{C}$ , $^3\text{H}$ 为主要。

热中子与大气中的氮发生核反应

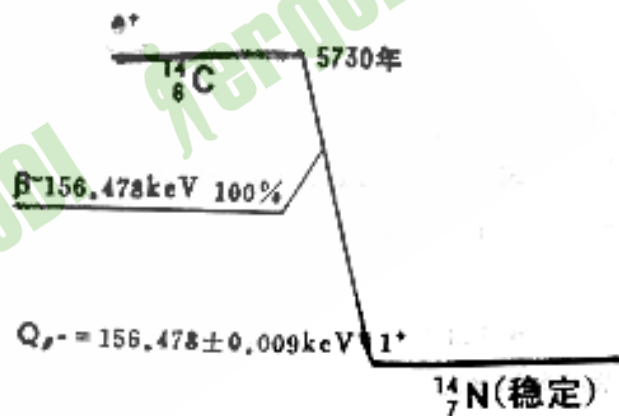


$^{14}_7\text{N}(n, p)^{14}_6\text{C}$  反应截面:

$$\sigma = 1.7 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 (b)$$

放射性核素  $^{14}\text{C}$  的半衰期

$$T_{1/2} = 5730 \text{ 年}$$



在大气高空中形成的  $^{14}\text{C}$  是自然界的唯一来源。

## (二) 人工辐射源

若在人工制备放射源时，带电粒子束或中子束的强度是一定的，则放射性核素的产生率 $P$ 也是恒定的，而源在制备过程中同时又在衰变。

$$P = N_t \cdot \sigma \cdot \Phi$$

$N_t$  为样品中被活化材料中元素的原子数，可视为常数。因此放射性核素的变化率为：

$$\frac{dN(t)}{dt} = P - \lambda N(t)$$

利用初始条件 $t=0$ 时， $N(t)=0$ ，解方程得：

$$N(t) = \frac{P}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

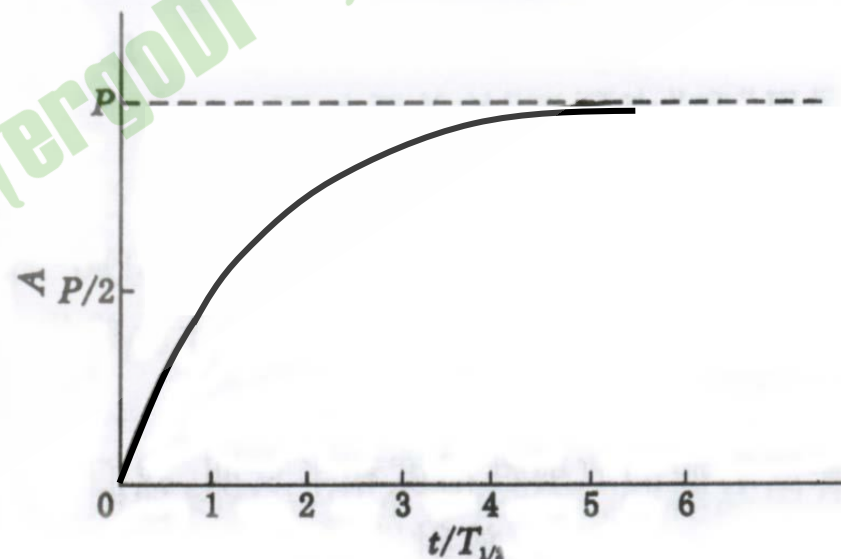
则活度为： $A(t) = \lambda \cdot N(t) = N_t \sigma \Phi (1 - e^{-\lambda t})$

定义：饱和因子  $S$ ， $S = 1 - e^{-\lambda t}$

人工放射性活度随时间的变化：

$t/T_{1/2}$	0.5	1	2	3	4	5	6
$A/P$	0.293	0.500	0.750	0.875	0.938	0.969	0.985

若要  $A(t)$  达到  $P$  的 99%，则需要时间为  $t = 6.65 T_{1/2}$ 。



人工放射性生长曲线



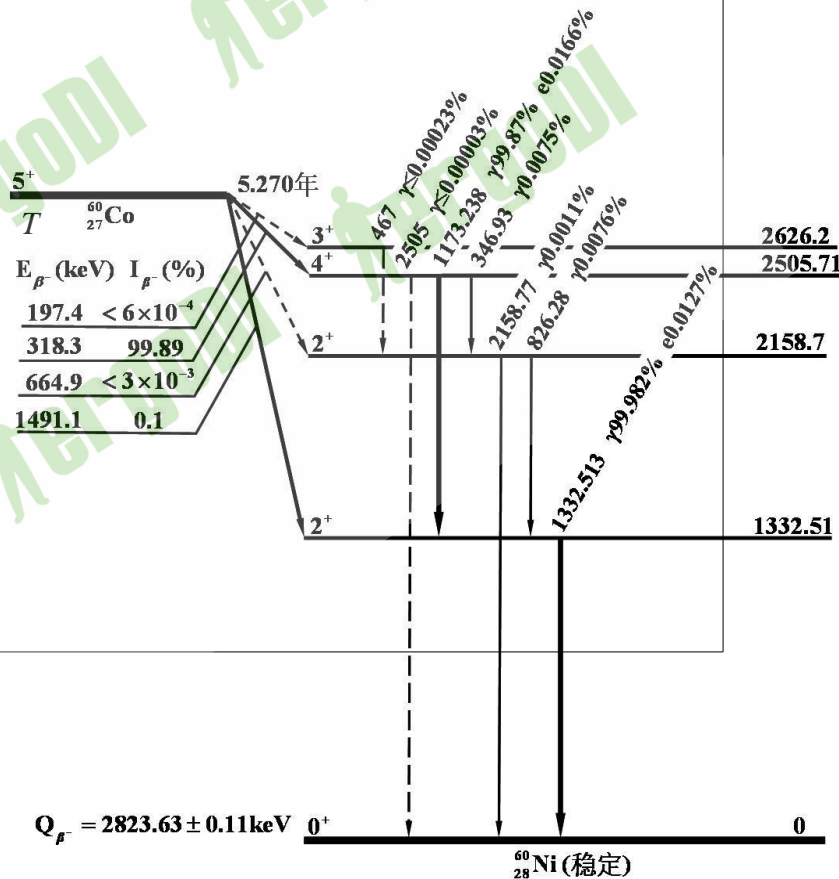
以反应堆生产 $^{60}\text{Co}$ 源为例：

将金属钴 ( $^{59}\text{Co}$ ,  $\rho = 100\%$ ) 放在反应堆孔道内，发生核反应  $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$  反应截面为  $\sigma$ ，

$^{60}\text{Co}$  的半衰期  $T_{1/2} = 5.270a$ ，这时饱和的放射源活度为

$$A = N_t \cdot \sigma \cdot \Phi$$

$^{60}\text{Co}$  源是核技术应用中常用的放射源和辐照源，发射能量为1.17MeV和1.33MeV的  $\gamma$  射线。





所产生的放射性同位素的活度如下计算：

$$A(t) = \frac{\sigma \phi m \rho N_A}{A} (1 - e^{-\lambda t})$$

式中：A(t)为所产生的放射性同位素的活度，Bq； $\sigma$ 为生成放射性同位素的反应截面， $\text{cm}^2$ ； $\phi$ 为靶子辐照处的中子注量率， $\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ；m为靶元素的重量，g； $\rho$ 为稳定同位素的丰度，丰度为100%时， $\rho = 100\%$ ； $N_A$ 为阿佛加得罗常数， $6.02 \times 10^{23}$ ；A为靶元素的原子量； $\lambda$ 为生成放射性同位素的衰变常数， $1/\text{s}$ ；t为照射时间，s。

例如1克 $^{59}\text{Co}$ 在 $2 \times 10^{13} \text{ n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 热中子注量下辐照一年，生成的 $^{60}\text{Co}$ 的活度约为 $9.25 \times 10^{11} \text{ Bq}$ （25Ci）。

## 2.2 核技术应用中的放射源

(1) **密封源**放射源：永久密封在容器中或者有严密包层并呈固态的放射性材料。

**$\alpha$ 放射源**： $^{210}\text{Po}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 等；

特点：易防护，防止摄入体内而引起内照射。

**$\beta$ 放射源**： $^3\text{H}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ — $^{90}\text{Y}$ 、 $^{147}\text{Pm}$ 等；

特点：要考虑外照射，用轻材料如铝、有机玻璃等防护，以减少韧致辐射。

**低能光子源**：包括低能 $\gamma$ 源、特征X射线源和 $\beta$ 射线引起的韧致辐射，如 $^{55}\text{Fe}$ 、 $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 等；

特点：一般均有铍窗，注意保护。

## $\gamma$ 放射源:

$\gamma$  放射源是使用最多的放射源，广泛用于工业、农业、医疗和科研等各个部门。

**辐照源:** 为了获得高剂量率的辐射场，装源量多数在 $3 \times 10^{15} - 2 \times 10^{16} \text{Bq}$  (约为 $10^5 - 6 \times 10^5 \text{Ci}$ ) 范围内。

**工业核仪表及医疗照射等:**

活度在 $10^8 - 2 \times 10^{12} \text{Bq}$  ( $3 \text{mCi} - 60 \text{Ci}$ ) 的范围内。

$\gamma$  射线的贯穿能力很强，其辐照范围往往超出工作场所之外。使用  $\gamma$  放射源主要防止外照射。

## 中子源

### $(\alpha, n)$ 型中子源:

将重核  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  等  $\alpha$  粒子发射体, 与粉紧密混合后发生反应而得到的: 其共同的反应过程为



常用中子源为  $^{210}\text{Po}-\text{Be}$ ,  $^{241}\text{Am}-\text{Be}$ ,  $^{239}\text{Pu}-\text{Be}$ 。

**自发裂变中子源:** 利用重核自发裂变产生中子的中子源称为自发裂变中子源。其中  $^{252}\text{Cf}$  中子源最合适, 应用最多。

## (2) 非密封源

非密封源主要用于医学诊断、治疗用放射性药物和同位素示踪剂。

其特点是由于开放性操作，状态可能包括固态、液态和气态，容易引起放射性污染。需有良好的工作场所和条件。须考虑：

工作场所的分级；

放射性核素的毒性的分组。

最常用的核素有： $^{125}\text{I}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 $^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{32}\text{P}$ 、 $^{35}\text{S}$ 、 $^{153}\text{Sm}$ 、 $^{89}\text{Sr}$ 、 $^{18}\text{F}$ 、 $^{99}\text{Mo}$ 等

### (3) 射线装置

包括X射线机、加速器及中子发生器。

(1) **X射线机**目前使用极为广泛，用于医学诊断和治疗、工业探伤、X射线荧光分析。X射线光子能谱为韧致辐射的连续谱上叠加靶的特征X射线的单色峰（图2-1）。

(2) **加速器**加速带电粒子以获得高能量的装置。由于其多样性，辐射也明显的不同。

(3) **中子管**利用  $D(d,n)^3He, T(d,n)^4He$  反应获得2.5MeV和14MeV能量的单能中子。是一种紧凑型的加速器，可获得较高的中子产额，中子的防护是关键。



## • $\alpha$ 射线标准源

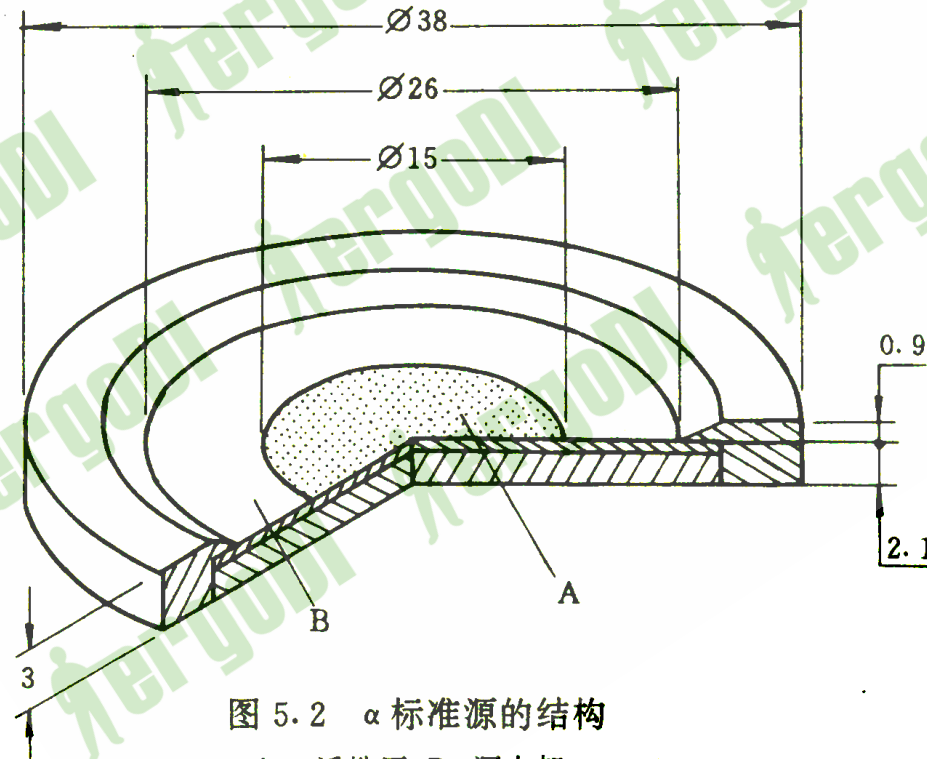
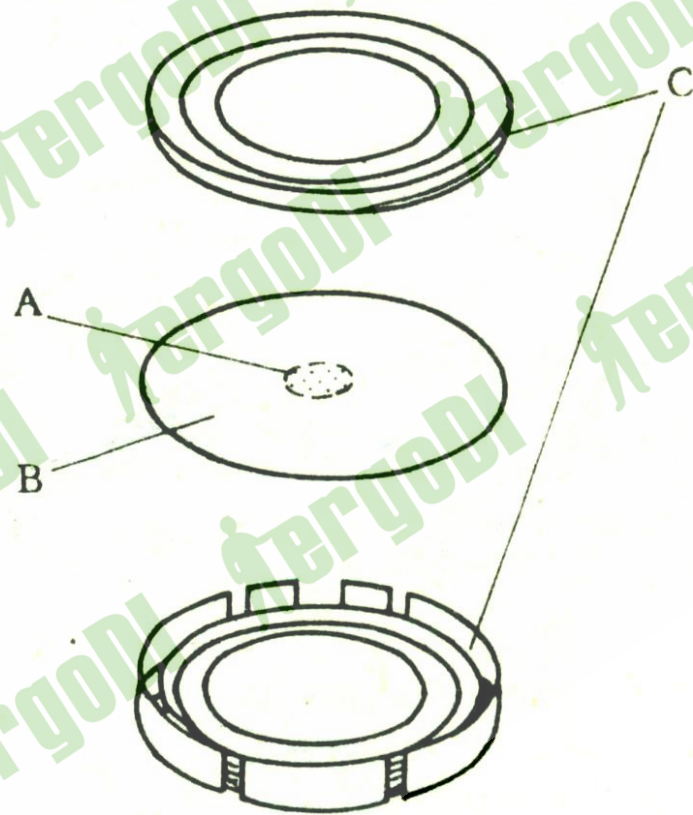


图 5.2  $\alpha$  标准源的结构

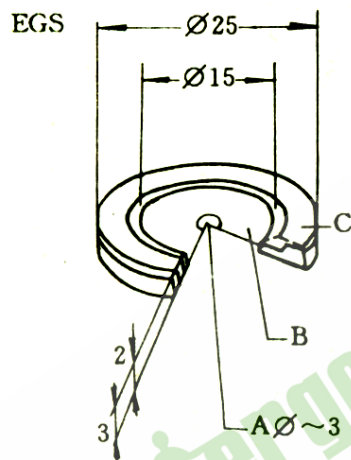
A.  $\alpha$  活性区; B. 源支架。



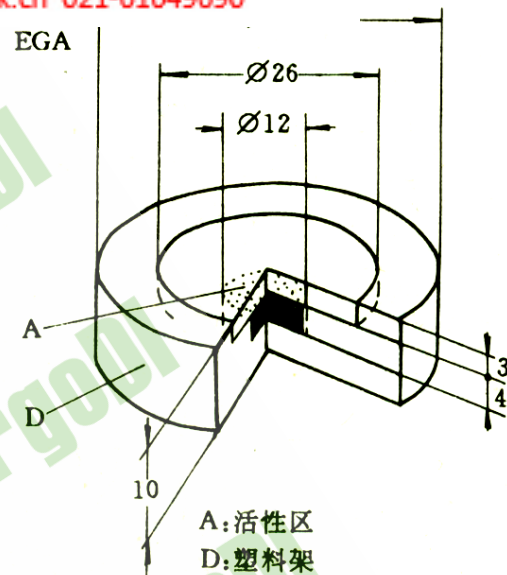
## $\beta$ 标准源的结构



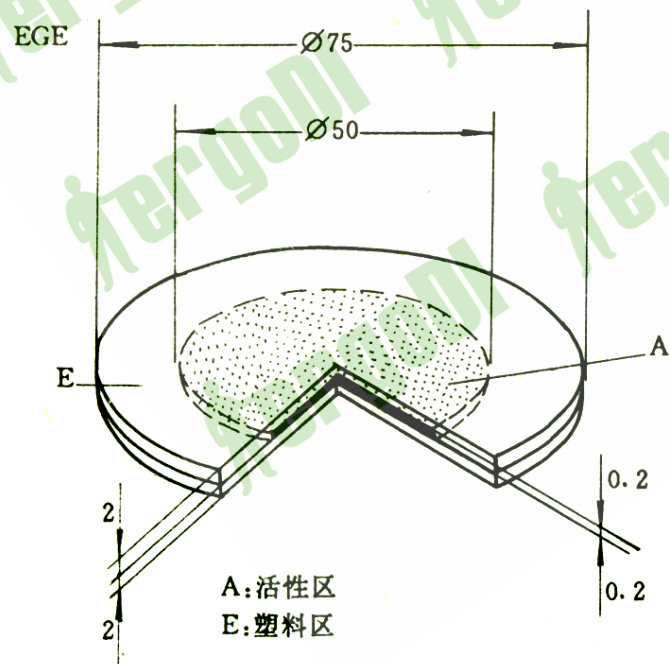
# Y 标准源的结构



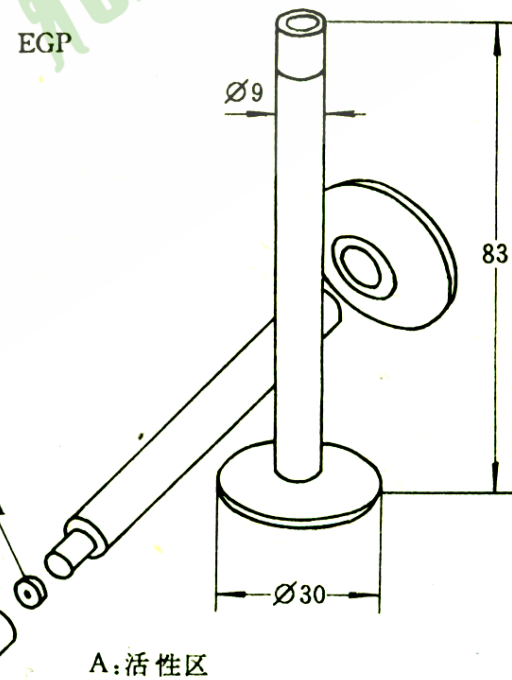
A: 活性区  
B: 塑料薄膜  
C: 塑料环



A: 活性区  
D: 塑料架



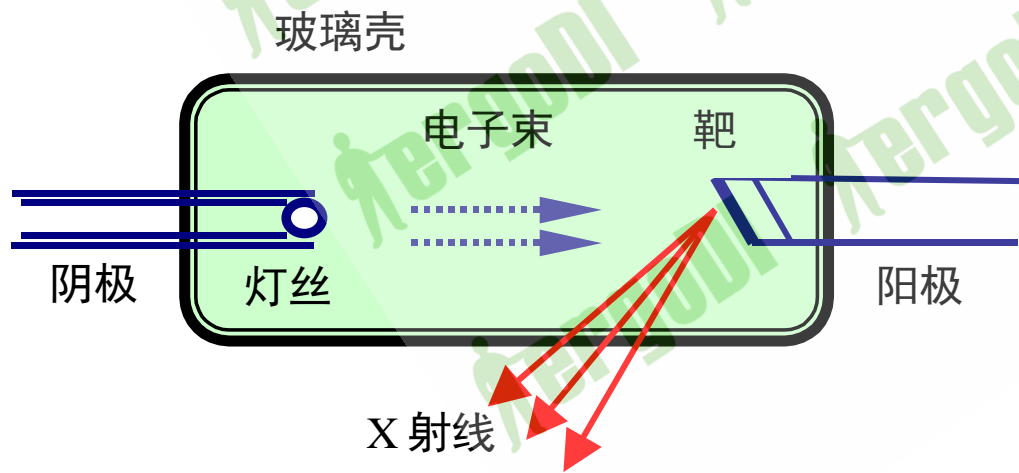
A: 活性区  
E: 塑料区



A: 活性区

# X射线标准源

## • X射线管：



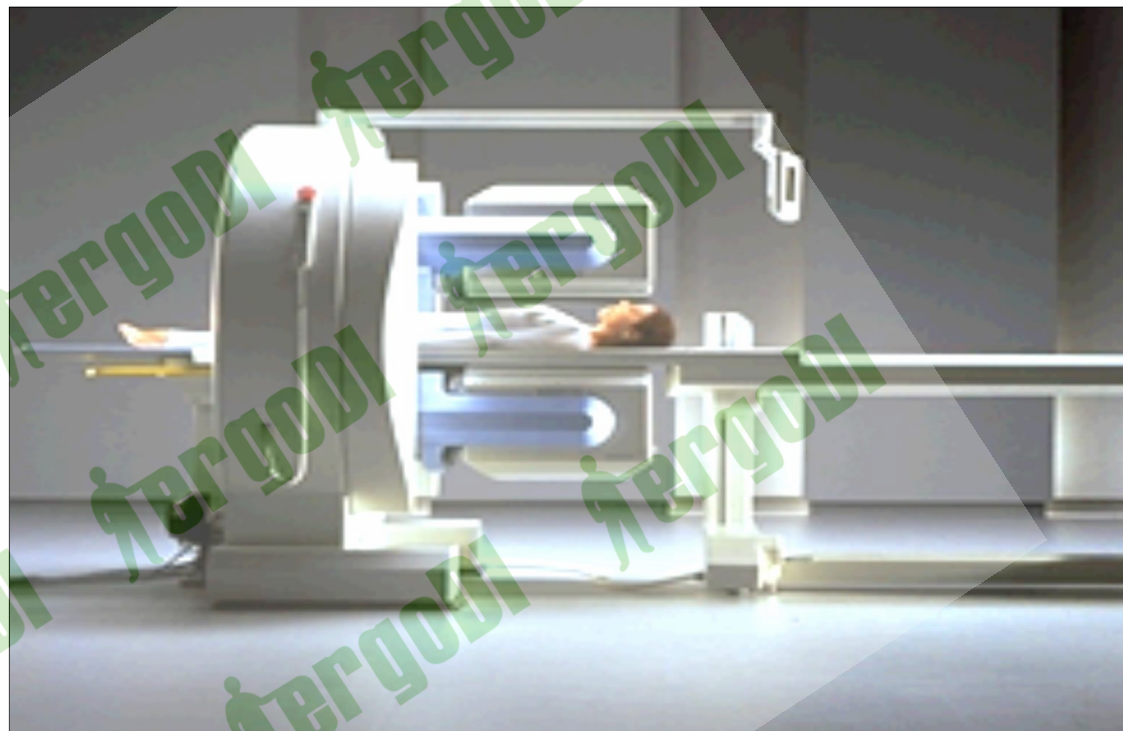
阴极—用于发射电子的灯丝（钨丝）

阳极—用于接受电子轰击的靶（又称对阴极）。

当灯丝被通电加热至高温时（达 $2000^{\circ}\text{C}$ ），大量的热电子产生，在极间的高压作用下被加速，高速轰击到靶面上。高速电子到达靶面，运动突然受阻，其动能部分转变为辐射能，以X射线的形式放出。

# 人工辐射——1. 医疗辐射

- 放射诊断
- 放射治疗
- 核医学



医疗辐射是最大的人工辐射来源，一般地区医疗辐射为天然辐射的20%；各种人工放射性核素，大约80%用于医学目的。

# 表1-9 全世界医用X射线检查的频率、有效剂量和集体剂量 (1991-1996)(UNSCEAR 2000)

检 查	每1000人口 检查次数	每次检查的有 效剂量, mSv	年集体剂 量, 人Sv
胸部X射线摄影	87	0.14	71200
胸部X射线透视	37	1.1	234700
腰椎	15	1.8	159000
胸椎	4.1	1.4	33400
骨盆和腹部	11	0.83	53300
上胃肠道	13	3.7	274000



# 全世界医用X射线检查的频率、有效剂量 和集体剂量 (1991-1996) (续)

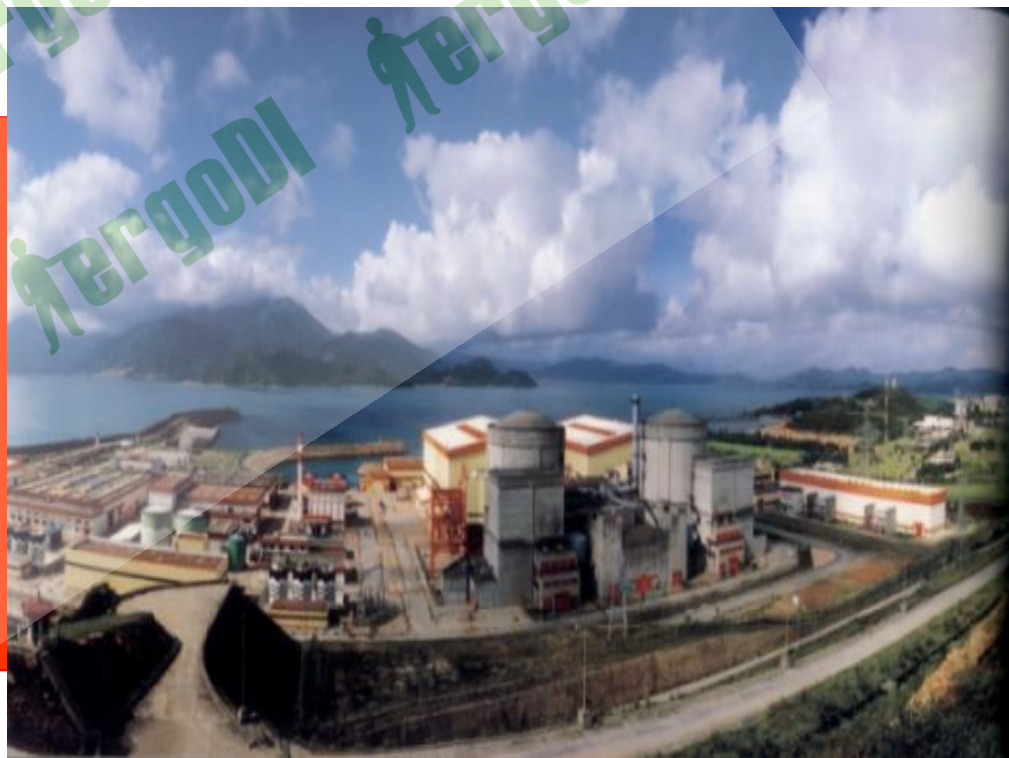
检 查	每1000人口 检查次数	每次检查的有 效剂量, mSv	年集体剂 量, 人Sv
下胃肠道	3.4	6.4	127000
尿路造影	3.8	3.7	81300
<b>CT</b>	<b>16</b>	<b>8.6</b>	<b>785000</b>
血管造影	2.1	12	143000
介入程序	0.84	20	98000
.....	.....	.....	.....
<b>总 计</b>	<b>330</b>		<b>2330000</b>

# 人工辐射——2. 核电站

**反应堆运行：** 大气，Kr、Xe、I、 $^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{16}\text{N}$ 、 $^{35}\text{S}$ 、 $^{41}\text{Ar}$ ；水中， $^3\text{H}$ 和裂变产物。

**后处理：** 长寿命核素， $^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{85}\text{Kr}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 等，以及超铀元素的同位素。

核能生产所致居民人均  
年剂量当量，美国、加  
拿大为  $3 \times 10^{-8} \text{Sv}$ ，英国  
为  $2.5 \times 10^{-6} \text{Sv}$





# 燃煤的放射性污染问题

燃煤对环境的影响

化学物质污染

放射性物质污染

煤散逸飞灰中放射性核素的平均含量:

$^{40}\text{K}$ 为265Bq/kg,  $^{238}\text{U}$ 为200Bq/kg,

$^{210}\text{Pb}$ 为930Bq/kg,  $^{210}\text{Po}$ 为1700Bq/kg,

$^{232}\text{Th}$ 为70Bq/kg,  $^{228}\text{Th}$ 为为110Bq/kg,

$^{228}\text{Ra}$ 为130Bq/kg

**燃煤电站导致的居民辐射剂量  
是核电站的3倍!**

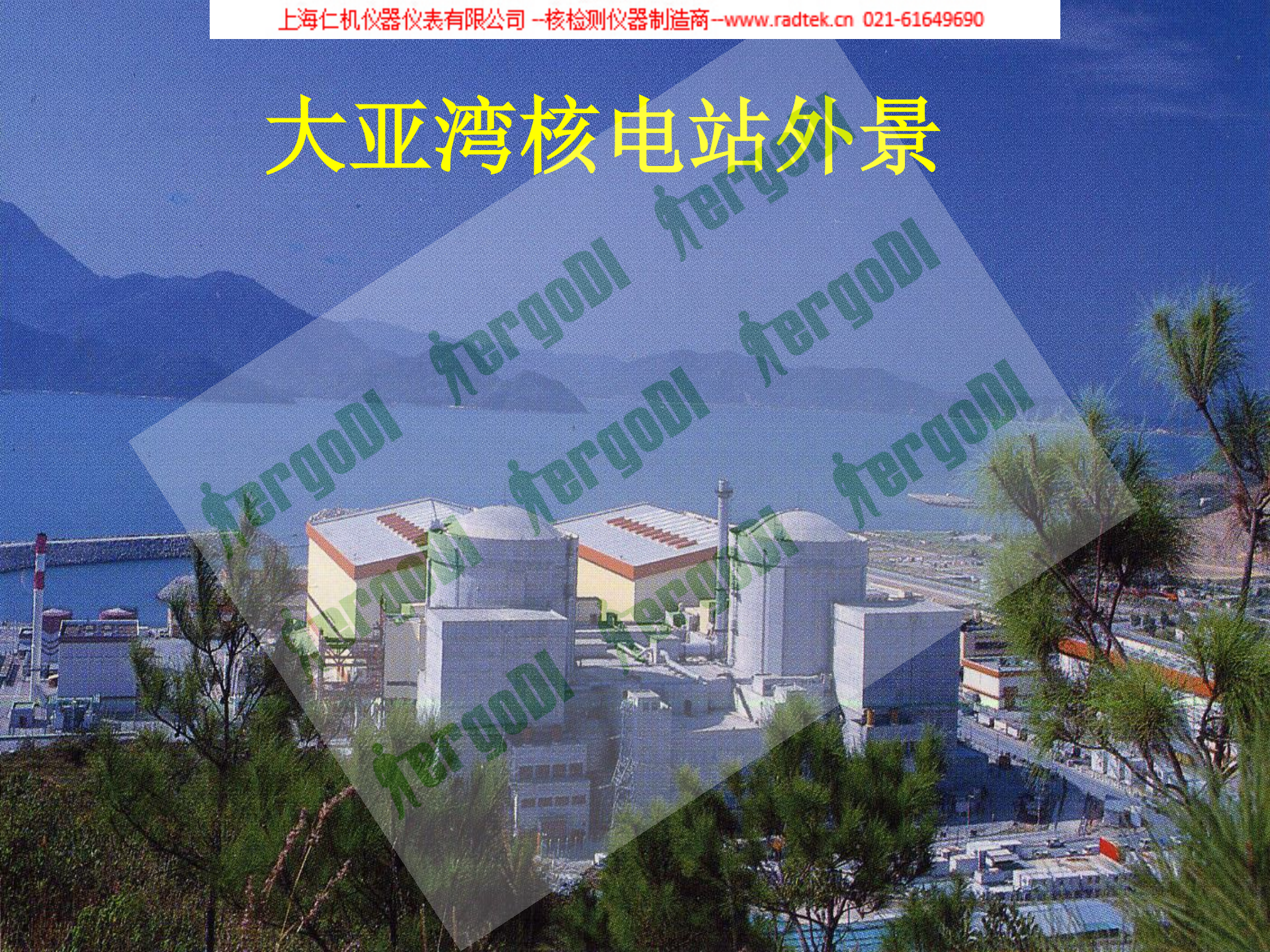


# 秦山核电站外景





# 大亚湾核电站外景





# 田湾核电站



XINHUA



2007年12月20日拍摄的田湾核电站厂区





在福建宁德核电站建设工地，工人们开始浇注第一罐混凝土。



浙江三门核电项目一期工程前期准备性施工情景



# 人工辐射——3. 核爆炸



放射性落下灰

局部沉降

带状沉降

全球性沉降

外照射： $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{95}\text{Zr}$ 、 $^{106}\text{Ru}$ 、 $^{140}\text{Ba}$ 等；

内照射： $^{14}\text{C}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^3\text{H}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{240}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Pu}$ 等。

食物链转移问题

# 表1-10 各国大气层核爆炸次数 和核爆炸当量

年 份	国 家	试验次数	爆炸当量, Mt
1945~1962	美 国	193	138.6
1949~1962	苏 联	142	357.5
1952~1958	英 国	21	16.7
1960~1974	法 国	45	11.9
1964~1980	中 国	22	20.7
合 计		423	545.4

## 世界主要核国家核试验次数统计

国家	至1992年 试验总数	大气核试验		第一次原 子弹试验	第一次 氢弹试验	第一次地 下核试验
		时间	次数			
美国	942	1945- 1962	212	1945. 7. 16	1952. 10. 3 1	1951. 11. 2 9
前苏联	715	1949- 1962	214	1949. 8. 29	1953. 8. 12	1961. 10. 1 1
英国	44	1952- 1958	21	1952. 10. 3	1957. 5. 15	1962. 3. 1
法国	210	1960- 1974	50	1960. 2. 13	1968. 8. 24	1961. 11. 7
中国	38	1964- 1980	23	1964. 10. 1 6	1967. 6. 17	1969. 9. 23
印度	1		0			1974. 5. 18

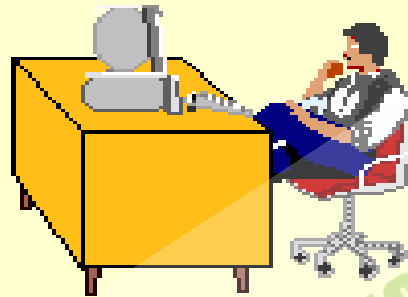
# 表1-11 大气层核试验产生的放射性核素的平均年有效剂量 $\mu\text{Sv}$

年度	北半球				南半球			
	外照射	食入 <sup>1</sup>	吸入	总和	外照射	食入 <sup>1</sup>	吸入	总和
1945-1999	382	531	164	1076	115	178	35	328
2000-2099	124	141		264	31	126		157
2100-2199	12	51		63	3.1	50		53
2000- $\infty$	1.4	2180		2181	0.3	2180		2180
1945- $\infty$	520	2900	164	3580	149	2530	35	2720

1.包括在全球扩散的<sup>3</sup>H和<sup>14</sup>C的贡献。

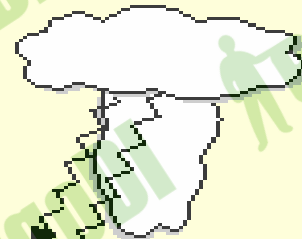
# 人工辐射的组成

The contribution to the annual dose equivalent from a number of man-made sources of ionizing radiation.



Consumer and Office Products

0.04 mSv



0.05 mSv

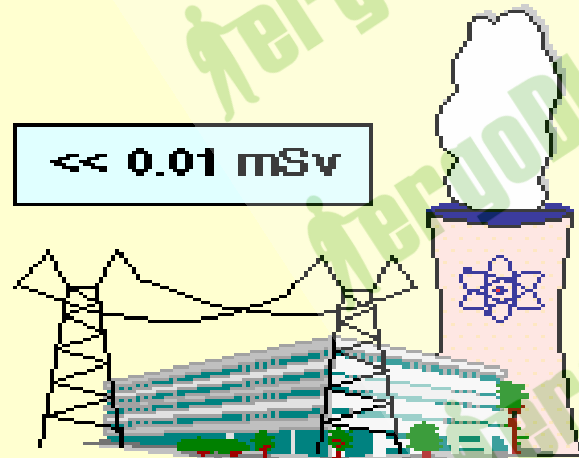
Atmospheric Weapons Testing



0.005 mSv

Airline Travel

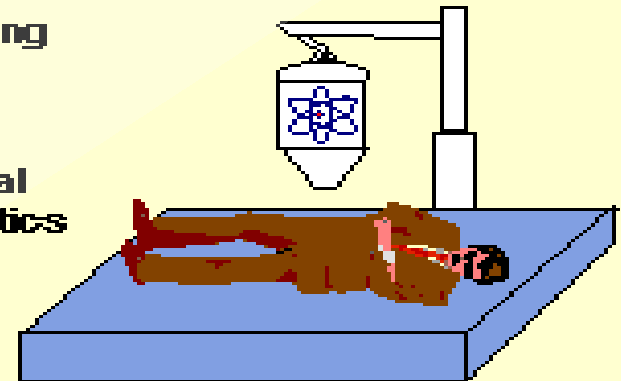
$\ll 0.01$  mSv



Nuclear Power

Medical Diagnostics

0.92 mSv



# 表1-12 日常生活中可能遇到的辐射

类 型	剂量水平(mSv)
看电视每天2小时	<0.01 mSv/a
夜光表	0.02 mSv/a
乘飞机2000km	0.005mSv/h
眼镜（局部）	0.01~0.04mSv/a
家用天然气（局部）	0.06~0.09mSv/a
假牙（局部）	1 $\mu$ Sv/a
吸烟每天20支（“钋弹”）	0.5~1 mSv/a
诊断X射线人均年有效剂量	0.3
CT人均单次有效剂量	8.6
使用火力发电厂带来的照射	0.005
核电站附近人均年有效剂量	0.001-0.02
核设施附近人均年有效剂量	0.001-0.2

# 天然本底辐射——

人类活动引起的天然辐射的增加



# 磷酸盐加工

磷酸盐加工工业可以细分为：

(a) 湿法加工；

(b) 热加工；

(c) 化肥生产。

主要产品是**磷酸**。在热加工中，产品可能是磷光体，或者采用硝酸生成磷酸，磷酸用来生产**化肥**。在用湿法加工的磷酸盐工业中，作为副产品生成**磷石膏**。在热加工中使用焦炭和石膏，产生一种**废渣**。

# 金属矿石加工

- 重要的金属矿石有(二氧化锡或锡、钽铁矿、铌酸盐、褐钨钽矿、重烧线石、铌钨矿和烧绿石/铌、铁、锰及其他)。
- 加工中生成的炉渣常常用来生产水泥。
- 另一个副产品是煤焦油，通常用来生产电极沥青、克鲁苏油、葱油、煤烟油和路焦油混合物。

# 废金属工业

- 各种加工工业产生的废金属，可能含有某种增高水平的天然放射性核素的垢。
- 特定的放射性核素及其浓度与废金属的来源有关。由于核工业的部件及放射源非控制释放可能加列到这些材料中，这些材料也有可能再循环。
- 废金属工业是放射性核素进入环境的可变的、混杂的释放途径。

# 铀矿开采

- 有几个地方存在以前铀矿开采操作中的**残留物**，例如在前东德。对于**回填坑**、**废石**和**渣堆**等的处理程序以及放射后果正在进行评价。

# 含铀的矿物质存放

- **博物馆**：布鲁塞尔的一个博物馆，贮藏着含镭和铀的矿物，尽管加大了通风，**氡的浓度**在 $10\sim 15\text{kBqm}^{-3}$ 之间。
- 除氡外，邻近的贮藏间中观察到高水平 $\gamma$ 辐射。博物馆看管人员房间的 $\gamma$ 辐射水平达到 $5\sim 6\mu\text{Sv/h}$ 。经屏蔽矿物后， $\gamma$ 辐射水平下降到 $1\sim 2\mu\text{Sv/h}$ 。

# 钍化合物

- ▶ 钍主要用在其他产品的**填充剂**、**焊接电极**、**气灯罩**以及专用合金，钍化合物来自于**独居石**，钍化物或方钍石，钍化合物的放射性活度大多数存在于其初级产品金属钍中。

# 锆砂

- 重要的锆矿有锆( $\text{ZrSiO}_4$ )和斜锆石 ( $\text{ZrCh}$ )。
- 经选矿把这些矿物与其他重矿或简单的石英分开。
- 这种加工包括诸如过筛、冲洗、干燥和研磨等程序。
- 这些加工产生的废物。



# 钛色素生产

- ▶ 钛色素包括氧化钛( $\text{TiO}_2$ )和人造金红石。
- ▶ 加工中产生的废物包括大量焦炭、矿石，如 $\text{SiO}_2$ 微粒，以及过滤器芯子(分类上作为化学废物)。

# 化石燃料

- 对于电力生产，最重要的化石燃料是煤、天然气和石油。
- 燃煤过程中产生大量的飞灰和底灰。  
如果建有除硫装置，还要生成石膏。

# 石油和天然气提取

- 在提取石油及天然气时，需要产生大量水，而水中可能含有天然放射性核素，其中主要是 $^{226}\text{Ra}$ 及其衰变产物。
- 由于在油/水界面上的沉淀作用的结果，可能形成垢，或者氡衰变产物(主要是 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{210}\text{Po}$ )在设备上沉积。

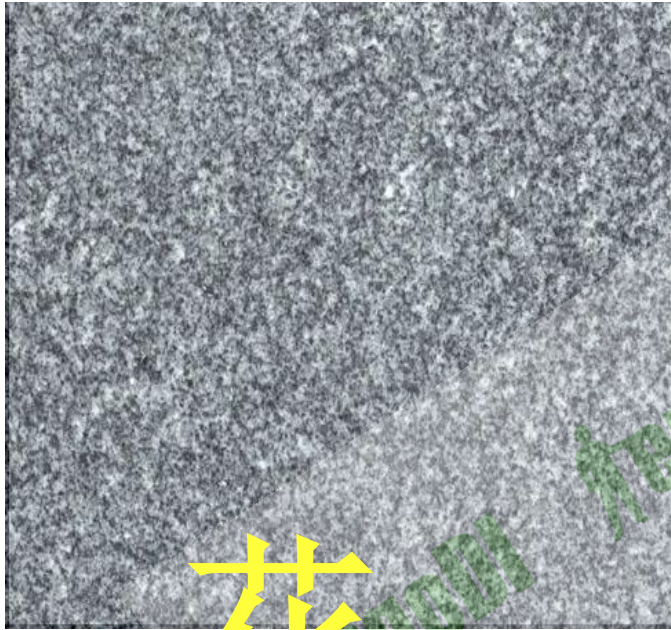
# 建 材

- 在建筑工业中使用的建材可能有些含有较高水平的放射性，它们包括泥灰岩、高炉渣、飞灰、熔渣、脱水物(在水泥工业中)及粘土(陶瓷工业中)。
- 在水泥工业中，作为废物生产出某些砂土。

# 花岗岩与大理石







花  
岗  
岩



大  
理  
石



# 辐射事故对辐射水平的影响与危害

- 核设施事故
- 核技术应用中发生的事故
- 放射源物质运输和废物贮存发生的事故
- 伴生矿事故

# 核技术应用中发生的事故

- 1 辐射源的随意丢失、或被盜；
- 2 例行操作中发生失误使得放射源处于未被屏蔽状态；
- 3 放射性物质的泄露 释放。

# 放射源物质运输和废物贮存发生的事故

- 1 严重的撞击，致使包装包容系统破坏；
- 2 严重的火灾可能使包装的屏蔽或包装物丧失；
- 3 包装上的缺陷可能会降低其承受通常事故条件下产生的应力；
- 4 运输过程发生的货物丢失、被盗致使放射性物质处于失控状态；
- 5 运输过程大雨或洪水等均有可能使货物中放射性物质释出。

# 伴生矿事故

- 1 伴生矿或加工副产品处置不当致使放射性物质污染周围环境；
- 2 尾矿坝塌坝，引起大面积污染。

# 放射性物质在环境中的迁移

- 放射性物质在大气中的迁移；
- 放射性物质在地表水体中的迁移；
- 放射性物质在岩石、土壤和地下水中的迁移；
- 放射性物质通过生物链向人的转移。

Thank you very much!