核反应堆运行中的实际问题

能出版社

核反应堆运行中的实际问题

〔苏〕B. И. 弗拉基米罗夫　著

原 子 能 出 版 社

核反应堆运行中的实际问题

〔苏〕B. И. 弗拉基米罗夫 著
任 弋 杨水泉 徐及明 译

原 子 能 出 版 社

内 容 简 介

本书研究核反应堆运行中所遇到的物理热工问题；具体内容有：反应堆储能的确定，控制棒临界位置的计算，安全启动方式的选择，由反应堆中毒所决定的允许和被迫停堆时间的确定，剩余释热的计算，反应堆冷却工况的选择，核安全措施等。

书中列举了有关公式、典型习题以及具体的求解方法。

本书可供从事核动力装置运行的工人、工程技术人员以及大专院校有关专业的师生和从事核动力研究的人员参考。

В. И. Владимиров

Практические задачи по эксплуатации ядерных реакторов

М., Атомиздат, 1972.

核反应堆运行中的实际问题

[苏] В. И. 弗拉基米罗夫 著

任 弋 杨水泉 徐及明 译

☆

原子能出版社出版

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

(限国内发行)

☆

开本 $850\times1168^{1}/_{32}$·印张 $6^{3}/_{16}$·字数 164 千字

1976 年 12 月北京第一版·1976 年 12 月北京第一次印刷

印数 001—2100 ·定价：0.78 元

统一书号：15175·075

前　　言

核动力这个新技术领域的蓬勃发展，要求在研究核动力装置的理论、计算和设计问题的同时，总结和研究核反应堆运行的技术问题。在核动力装置运行中产生许多物理、热工问题，而反应堆及其整个核动力装置工作的稳定性、经济性、可靠性及安全性均有赖于这些问题的正确解决。例如，属于这类问题的有：反应堆在运行周期中不同时刻的后备反应性及其储能的确定，在已知后备反应性条件下反应堆功率可能改变范围的选择，由停堆后中毒所决定的允许停堆时间和被迫停堆时间的确定，反应堆带功率运行前控制棒临界位置的计算，反应堆启动方法的选取，剩余释热的计算，停堆后反应堆冷却工况的选择，各种事故情况下反应堆安全性的评价及其他。

目前有关核动力装置的文献虽然很多，但对上述许多问题却很少从实际运行角度予以重视。

本书试图对核动力装置工作中所遇到的一些基本问题加以研究并使之系统化。书中的习题系根据几种类型核反应堆的运行经验编成。本书分三章。每章又有几节。每节所涉及问题的面更窄些。各节列出了计算关系式、图、表和解决该种类型的习题所必需的定义；还给出了习题的条件，这些条件除第一章的某些问题外都完全具有实际性质；同时，在求解具体例题中，还列举了计算方法。

我们取文献[1—5、8、17、18]内所引用的数据的平均值作为原始的物理参数，假定这个堆称为TP。当然，对于每个具体反应堆来说，其原始参数是互不相同的，但在大多数情况下是非本质的，只有数量上的差异。若是为具有特定技术参数的反应堆而编的习题，则在条件中加以说明。

第一章，扼要叙述作为能源和放射源的核反应堆。

第二章，阐述在反应堆工作过程中如何确定其功率、燃耗、结渣和中毒效应及其他，这些都影响反应堆的工况、储能及其改变功率的灵活性。

第三章，研究反应堆功率调节、启动、停堆和冷却问题。同时，还就保证反应堆的核安全，分析了一些习题和一些事故情况的可能后果。

在许多习题中研究了变动工况，这对于移动式核反应堆、试验堆以及固定的核动力装置（譬如，併入电力系统运行并根据电网负荷曲线来调节反应堆功率的原子能电站），都具有代表性。在反应堆发生故障而要求降低功率或短期停堆时，也同样出现过渡工况。

本书供从事核动力装置运行的工程技术人员及准备参加此项工作的人员使用。同时，对于所有从事核动力研究的人员，均能有所帮助。

目 录

第一章　作为能源和电离辐射源的核反应堆

§1　原子、原子核、原子能

基本定义和计算关系式

1．近似于球形、质量数为 A 的原子核的半径

$$R_{核}\approx 1.2\times 10^{-13}A^{1/3}\text{ 厘米}$$

核的相互作用的半径稍微大一些：

$$R_{核作用}\approx 1.4\times 10^{-13}A^{1/3}\text{ 厘米}$$

2．彼此相距 r（厘米）的电荷 Z_1 和 Z_2 间的相互作用力按库仑定律确定：

$$F_e=\frac{Z_1eZ_2e}{r^2}\text{达因}$$

其中 $e=4.8\times 10^{-10}$ CGS 制静电单位——基本电荷。

3．彼此相距 r（厘米）的两个质量分别为 m_1 和 m_2（克）的物体之间的引力按牛顿定律确定：

$$F_m=\gamma\frac{m_1m_2}{r^2}\text{达因}$$

其中 $\gamma=6.67\times 10^{-8}$ 厘米^3/(克·秒^2)——万有引力常数。

4．具有频率 ν（秒$^{-1}$）和波长 $\lambda=\frac{C}{\nu}$（厘米）的电磁辐射能

$$E=h\nu\quad\text{尔格}$$

其中 $h=6.62\times 10^{-27}$ 尔格·秒——普朗克常数；$C=3\times 10^{10}$ 厘米/秒——在真空中的光速。

5．具有速度 v（厘米/秒）、质量为 m（克）的粒子的平均动能

$$E=\frac{1}{2}mv^2=\frac{3}{2}kT=\frac{1}{2}\frac{h^2}{m\lambda^2}\text{尔格}$$

其中 $k=1.38\times 10^{-16}$ 尔格/度——玻耳兹曼常数；$T(°\mathrm{K})=t(°\mathrm{C})+$

273——摄氏温度 t 所对应的用开氏度表示的绝对温度；$\lambda = h/mv$——在量子力学中描述粒子的德布罗意波长(见§1-4和5)。

6．具有质量 m(克)、在麦克斯韦速度分布中相应于最可几速度 v(厘米/秒)的粒子的能量，通过玻耳兹曼常数和绝对温度 T(见§1-5)来确定：

$$E = \frac{mv^2}{2} = kT \text{ 尔格} = 8.6\times10^{-5}T \text{ 电子伏}$$

7．质量 m(克)与其相应的能量 E 之间的关系按爱因斯坦定律确定：

$$E = mC^2 \text{ 尔格}$$

其中 $C = 3\times10^{10}$厘米/秒——在真空中的光速；如果质量以原子质量单位(1原子质量单位 $= 1.66\times10^{-24}$克)表示，则

$$E = 931\,m \text{ 兆电子伏}$$

8．由核子数 A(Z 个质子和 N 个中子)组成的核的质量亏损为

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{\text{核}}$$

其中 m_p、m_n、$m_{\text{核}}$——相应为质子、中子和核的质量。

9．核的结合能——定义为由单独的核子而形成核时所释放出来的能量；换言之，亦即将核分裂为组成它的单独的核子所必须消耗的能量：

$$E_{\text{结合}} = 931\,\Delta m \text{ 兆电子伏}$$

其中 Δm——质量亏损(见§1-8)，原子质量单位。

结合能可以通过中性原子的质量，即初始原子的质量 M 和氢原子的质量 M_{H} 来表示：

$$E_{\text{结合}} = 931[ZM_{\text{H}} + (A-Z)m_n - M] \text{兆电子伏}$$

10．比结合能——在具有质量数为 A 和总结合能为 $E_{\text{结合}}$ 的核中，每一个核子所必需的平均结合能(见§1-9)为

$$\mathscr{E} = E_{\text{结合}}/A \text{ 兆电子伏}$$

11．利用中子使重核分裂为两个碎片时的质量变化为

$$\Delta m_f = M + m_n - [M_1 + M_2 + (2\sim3)m_n]$$

其中M、m_n、M_1、M_2——相应为初始原子、中子和裂变碎片原子的质量。

12．重核裂变为两个碎片时放出的能量

$$E_f=931\Delta m_f \text{兆电子伏}$$

其中Δm_f(见§1-11)用原子质量单位表示。

习题

1.1 估计核物质的密度。

解答：核物质的密度$\gamma_{核}=m_{核}/V_{核}$(克/厘米^3)，式中$m_{核}$——核的质量，克；$V_{核}$——核的体积，厘米^3。考虑到$m_n\approx m_p\approx1.67\times10^{-24}$克，得到：

$$m_{核}=m_nN+m_pZ\approx1.67\times10^{-24}A \text{ 克}$$

$$V_{核}\approx\frac{4}{3}\pi R^3_{核}=\frac{4}{3}\pi(1.2\times10^{-13})^3A\approx10^{-38}A \text{ 厘米}^3$$

因而，

$$\gamma_{核}\approx\frac{1.67\times10^{-24}A}{10^{-38}A}\approx10^{14}\text{克/厘米}^3=100\text{ 百万吨/厘米}^3$$

1.2 a) 相距$r=10^{-10}$厘米的两个质子，б)两个中子彼此也分开同样的距离，试问相互作用的能量各等于多少？

解答：a) 按照库仑定律(§1-2)，质子相斥飞出时带有的能量为

$$E=F_e\cdot r=(4.8\times10^{-10})^2/10^{-10}\times1.6\times10^{-12}$$
$$=1.4\times10^3\text{ 电子伏}=1.4\text{ 千电子伏}$$

其中1.6×10^{-12}尔格$=1$电子伏(见附录2)。

б) 在该种情况下，中子之间的距离大于核力作用的半径(§1-1)，因此不发生相互作用。

1.3 U^{235}的核，分裂为碎片锶核$_{38}Sr^{95}$和氙核$_{54}Xe^{139}$；求当它们相距为其半径之和的距离的瞬间，碎片以多大的能量飞出？

解答：带电粒子在相距$R_{Sr}+R_{Xe}\approx11.6\times10^{-13}$厘米(§1-1)时，相斥的能量根据§1-2应为

$$E=\frac{38\times54\times(4.8\times10^{-10})^2}{11.6\times10^{-13}\times1.6\times10^{-12}}=2.55\times10^8\text{电子伏}=255$$

兆电子伏

1.4　试问质子的静电斥力比它们的万有引力大多少倍？

解答：根据库仑定律(§1-2)和牛顿定律(§1-3)可以得到：

$$\frac{F_e}{F_m}=\frac{e^2}{\nu m_p^2}=\frac{(4\cdot8\times10^{-10})^2}{6.67\times10^{-8}(1.67\times10^{-24})^2}\approx10^{36}$$

由此可见，核内的万有引力可以忽略不计。

1.5　试问1克物质相当于多大的能量？

解答：按§1-7的公式，利用附录2的单位换算关系，可得：

$$E=9\times10^{20}\text{ 尔格}=25\times10^3\text{ 兆瓦·时}=21.5\times10^9\text{大卡}$$
$$=56.2\times10^{25}\text{ 兆电子伏}$$

1.6　一个100瓦的灯泡，工作1000小时之后，其灼热灯丝的电磁辐射共消耗了多少质量？

解答：按照§1-7的公式，利用附录2的数据，求得$\Delta m=10^5/9\times10^{20}\times2.78\times10^{-11}=4\times10^{-6}$克$=2.4\times10^{18}$原子质量单位

1.7　试问氧的同位素$_8O^{16}$的总结合能和比结合能各等于多少？

解答：按§1-8至10和附录7，对$_8O^{16}$可得：$\Delta m=0.13696$原子质量单位；$E_{结合}=127$兆电子伏；$\mathscr{E}=8$兆电子伏。

1.8　试问自由核子聚合成氦核$_2He^4$时释放出多大的能量？氦核子的比结合能等于多少？

解答：根据§1-8和9及附录7，我们得到：氦核形成时的质量亏损$\Delta m=0.03037$原子质量单位；结合能(也就是自由核子聚合成氦核时所释放出的能量)$E_{结合}=28$兆电子伏；比结合能$\mathscr{E}=7$兆电子伏。

1.9　U^{235}核吸收一个中子后，分裂为2个碎片并放出3个中子。如果碎片在衰变后成为稳定的同位素钇$_{39}Y^{89}$和钕$_{60}Nd^{144}$，试问U^{235}裂变时释放出多大能量？

解答：根据§1-11、12和附录7，$E_f=193$兆电子伏——与习题1.3所得的结果相近。

1.10　试问一公斤氦聚变时所释放出来的能量与一公斤铀裂变时所释放出的能量相比约大多少倍？

解答：由习题1.8和1.9的解答看出，当氦聚变时每一个核子释放出28/4=7兆电子伏的能量，而当铀裂变时则为193/236=0.82兆电子伏。当相同数量（按质量）的氦和铀分别产生聚变和裂变时，它们所释放出的能量，前者为后者的7/0.82≈8.5倍。

实际上目前氦不是由自由核子而是由氢的同位素(氘、氚)聚合而成，这时每一个核子释放出3.5至6兆电子伏的能量。当铀裂变时考虑到各种碎片的产额，每个核释放出约200兆电子伏的能量，即每一个核子释放出0.85兆电子伏的能量。由此可见，在氦聚变反应中可能释放出的能量为同样数量(按质量)铀的同位素裂变时所释放出的能量的4至7倍。

§2　链式反应、增殖系数、反应性

基本定义和计算关系式

1．具有质量数A和密度γ(克/厘米^3)的物质的核浓度

$$N_{核(质量)}=\frac{6.02\times10^{23}}{A}核/克；N_{核(体积)}=\gamma\frac{6.02\times10^{23}}{A}核/厘米^3$$

其中6.02×10^{23}核/克原子——阿佛伽德罗常数。

2．相互作用的宏观截面$\Sigma=\sigma N_{核}$厘米$^{-1}$，其中$\sigma=\sigma_a+\sigma_s$——相互作用的总的微观有效截面，厘米^2；$\sigma_a=\sigma_f+\sigma_r$——吸收截面，$\sigma_f$——裂变截面，$\sigma_r$——辐射俘获截面；$\sigma_s$——散射截面；$N_{核}$——核浓度(核/厘米^3)。

3．中子的自由程与相互作用的宏观截面成反比：

$$\lambda=\frac{1}{\Sigma}厘米$$

4．中子从其能量为E_0的产生点到它慢化至能量为E的点所通过的直线平均距离，以中子年龄τ(厘米^2)来描述。

5．中子从它成为热中子的点到被吸收的点所通过的直线平

均距离，以扩散长度 L(厘米)来描述。

6. 中子由产生点到被吸收点所通过的直线平均距离，以徙动长度 M(厘米)来描述：$M^2=(\tau+L^2)$厘米^2。

7. 当中子与核碰撞时，用中子的平均对数能量缩减率来表征中子从碰撞前具有能量 E_1，到碰撞后为 E_2 的能量损失：

$$\xi=\overline{\ln(E_1/E_2)}\approx\frac{2}{A+2/3}$$

式中 A——核的质量数。

8. 在具有对数能量缩减率 ξ(§2-7) 的慢化剂中，裂变中子从能量 E_0 慢化到能量 $E<E_0$ 所必需的平均碰撞次数

$$Z=\frac{1}{\xi}\ln\frac{E_0}{E}$$

由平均裂变能 $E_0=2$ 兆电子伏慢化到热能 $E_T=0.025$ 电子伏的碰撞次数

$$Z=18.2/\xi$$

9. 中子的慢化系数

$$K_{慢化}=\xi\sum_s/\sum_a=\xi\lambda_a/\lambda_s$$

式中 $\xi\sum_s$——慢化剂的慢化能力，厘米$^{-1}$。

10. 中子通量 $\Phi=nv$ 中子/(厘米^2·秒)；式中 n——中子密度，1/厘米^3；v——中子的速度，厘米/秒。

11. 在单位时间单位体积内的核反应数目

$$\omega=\Phi\sum=nv\sigma N_{核}\ 1/(厘米^3\cdot秒)$$

12. 热中子核反应堆的临界方程式为：

$$K_{有效}=K_{\infty}p_{慢化}p_{扩散}=K_{\infty}e^{-B^2\tau}/(1+B^2L^2)=1$$

其中 $K_{有效}$——中子的有效增殖系数；K_{∞}——未考虑中子泄漏的增殖系数，即对无限大介质而言(见§2-13)；$p_{慢化}=e^{-B^2\tau}$——在慢化过程中的不泄漏几率；$p_{扩散}=\dfrac{1}{1+B^2L^2}$——在扩散过程中的不泄漏几率；$B$——几何参数，对半径为 R(厘米)、高度为 H(厘米)的圆柱形活性区由下式确定：

$$B^2=\left(\frac{\pi}{H+2\delta_{有效}}\right)^2+\left(\frac{2.405}{R+\delta_{有效}}\right)^2\ 厘米^{-2}$$

其中 $\delta_{有效}$——反射层有效节省，即由于存在中子反射层而减少的活性区线性尺寸，厘米。

13．无限大介质热中子反应堆(即不考虑中子泄漏)的增殖系数 $K_\infty=\nu_{有效}\mu\varphi\theta$； 其中$\nu_{有效}$——燃料中俘获一个中子所产生的有效中子数；$\nu$——燃料的一个核产生裂变时所放出的平均中子数；$\mu$——快中子增殖系数；$\varphi$——中子逃脱 U^{238} 共振俘获的几率；θ——热中子利用系数。

14．剩余增殖系数——有效增殖系数与1之差：

$$\delta K_{有效}=K_{有效}-1$$

15．反应性

$$\rho=\frac{K_{有效}-1}{K_{有效}}=\frac{\delta K_{有效}}{K_{有效}}100\%$$

应该区别“反应性”与“后备反应性”的概念。反应性是指反应堆的状态偏离临界状态的程度。既然在这种情况下 $K_{有效}$接近于1，则 $\rho\approx\delta K_{有效}$。后备反应性是指，当中子吸收体完全从活性区内取出时最大可能的反应性。在这种情况下，通常(换料周期末除外)，$K_{有效}$显著地大于1，因此 $\delta K_{有效}\neq\rho_{后备}$。

习题

2.1 往核反应堆的活性区装入燃料 $_{92}U^{235}$ 和中子慢化剂铍($_4Be^9$)，核数比 $N_{U-235}/N_{Be-9}=0.4\%$， 试求燃料对慢化剂的重量比。

解答：根据公式§2-1，对于均匀混合的物质，可以写为

$$N_{核}(核/厘米^3)=\frac{m(克)}{V(厘米^3)}\times\frac{6.02\times10^{23}}{A}\left(\frac{核}{克}\right)$$

因此，

$$\frac{m_U}{m_{Be}}=\frac{N_U}{N_{Be}}\times\frac{A_U}{A_{Be}}=0.004\times\frac{235}{9}=0.105=10.5\%$$

2.2 能量为 $E_1=0.025$ 电子伏的中子密度 $n_1=10^5$中子/厘米^3；而能量为 $E_2=1$ 千电子伏的中子密度 $n_2=10^3$中子/厘米^3；试问哪一种中子通量大？

解答：一种能量的中子通量等于 nv(§2-10)，其中，中子速

度与能量的关系为 $E=\frac{1}{2}mv^2$(见§1-5)，因此，

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2}=\frac{n_1}{n_2}\sqrt{\frac{E_1}{E_2}}=0.5;\ \Phi_1=0.5\,\Phi_2$$

由此可见，尽管热中子密度是能量为 1 千电子伏的中子密度的 100 倍，热中子通量却小 50%。

2.3 在有 U^{235} 的增殖介质内，热中子密度等于 10^6中子/厘米^3，而燃料浓度 $N_{U-235}=5\times10^{18}$核/厘米^3，试确定每秒钟的裂变数和无裂变的吸收数。

解答：按照§2-11 和附录4，当$v=2.2\times10^5$厘米/(秒·小时)：

a) 1 厘米^{3}内的裂变数等于 $nv\sigma_f N_{核}=10^6\times2.2\times10^5\times582\times10^{-24}\times5\times10^{18}=6.4\times10^8$裂变数/(厘米^3·秒)；

b) 在 1 厘米^{3}的U^{235}($\sigma_r=101\times10^{-24}$厘米^2)内，无裂变的吸收数等于 1.1×10^8吸收数/(厘米^3·秒)。

2.4 带有铍反射层的圆柱形核反应堆活性区尺寸如下：高 2 米，半径 1 米；试问由于铍反射层的存在，该反应堆的活性区体积节省多少？

解答：反射层的有效节省约等于在反射层材料内中子的徙动长度(对于铍$M\approx25$ 厘米)，据此确定无反射层和有反射层的活性区体积：

$$V_{无反射层}=\pi(R+\delta_{有效})^2(H+2\delta_{有效})=12.3\ 米^3$$

$$V_{有反射层}=\pi R^2H=6.3\ 米^3$$

$$\Delta V=V_{无反射层}-V_{有反射层}=6\ 米^3$$

所以，当有反射层时活性区的体积约节省 100%。

2.5 反应堆在 5 兆瓦的功率下工作，由无裂变吸收造成的中子损失为 45%，问有多少中子泄漏到活性区之外？

解答：每一个核裂变产生 2.5 个中子，其中只有一个中子用来维持链式反应；有 $0.45\times2.5=1.1$ 个中子为无裂变吸收；有 $2.5-(1.0+1.1)=0.4$ 个中子，即 16%泄漏出活性区之外。

当反应堆在 5 兆瓦的功率下工作时，其裂变速率为 3.1×

$10^{13}\times5\times10^{3}=1.6\times10^{17}$ 裂变/秒［因为1瓩相当于 3.1×10^{13} 裂变/秒(见习题4.1)］，因此，从活性区泄漏的中子数为 $1.6\times10^{17}\times0.4=6.4\times10^{16}$ 中子/秒。

2.6 剩余增殖系数和反应性的物理意义是什么？

解答：如果用 n_1 表示一代的中子数，而经过一代寿期时间的下一代中子数用 $n_2=n_1\pm\Delta n$ 表示，那么 $K_{有效}$ 可以表示为

$$K_{有效}=\frac{n_2}{n_1}=(n_1\pm\Delta n)/n_1=1\pm\Delta n/n_1$$

从另一方面，$K_{有效}=1\pm\delta K_{有效}$，由此可见，剩余增殖系数 $\delta K_{有效}=\pm\Delta n/n_1$ 是新的一代中子数目的相对变化对上一代中子数目之比。反应性的物理意义由下式导出：

$$\rho=\frac{\delta K_{有效}}{K_{有效}}=\pm\frac{\Delta n}{n_1}\Big/\frac{n_2}{n_1}=\pm\frac{\Delta n}{n_2}$$

由此可见，反应性——即新的一代中子数量变化的份额。

§3 电离辐射

基本定义、计算关系式和表格

1．放射性衰变按指数规律进行：

$$N(t)=N_0e^{-\lambda t}=N_0e^{-t/\tau}=N_0e^{-\frac{0.693t}{T}}=N_02^{-t/T}$$

其中 N_0、$N(t)$——放射性同位素的初始数量和在 t 时刻的数量；λ——衰变常数，即单位时间内核的衰变几率，秒$^{-1}$；$\tau=1/\lambda$——放射性核的平均寿期，秒；$T=0.693\tau$——半衰期，即放射性物质从初始量平均衰变掉一半所经历的时间，秒。

2．放射性强度 C——放射性同位素数量的量度，等于在单位时间内原子核衰变的数目(符号参见§3-1)：

$$C=-\frac{dN}{dt}=\lambda N=\frac{0.693}{T}N\ 衰变数/秒$$

任一种放射源放射性强度的测量单位，采用每秒钟内的衰变数(衰变数/秒)或用公制系统以外的单位(居里)。当放射性物质每秒产生 3.7×10^{10} 核衰变时（222×10^{10} 衰变/分)，其放射性强度

称为1居里。在实际计算中常采用更小的单位：毫居里(1居里$=10^3$毫居里)、微居里(1居里$=10^6$微居里)。

3．具有质量数A，半衰期T(秒)和质量m(克)的放射性同位素的放射性强度：

$$C=\frac{6.02\times10^{23}}{A}m\lambda\left(\frac{衰变数}{秒}\right)=\frac{4.17\times10^{23}}{AT}m\left(\frac{衰变数}{秒}\right)$$
$$=\frac{1.13\times10^{13}}{AT}m\ 居里$$

放射性强度为C(居里)的放射性同位素的质量(克)：

$$m=\begin{cases}8.9\times10^{-14}ATC(T,\ 秒)\\5.3\times10^{-12}ATC(T,\ 分)\\3.2\times10^{-10}ATC(T,\ 小时)\\7.7\times10^{-9}ATC(T,\ 日)\\2.8\times10^{-6}ATC(T,\ 年)\end{cases}$$

4．具有体积相应为V_1(升)和V_2(升)以及比放射性强度为C_{V_1}(居里/升)和C_{V_2}(居里/升)的两种介质，合在一起时的放射性强度

$$C_V=(C_{V_1}V_1+C_{V_2}V_2)/(V_1+V_2)居里/升$$

当具有不同放射性强度的两种介质混合时，根据一种介质比放射性强度的改变可以估计介质的混合速度(例如载热剂从一个回路流向另一个回路)：

$$G=\frac{\Delta V}{t}=\frac{V_2}{t}\cdot\frac{C_V-C_{V_2}}{C_{V_1}-C_V}升/小时$$

其中C_{V_1}和C_{V_2}——体积为V_1和V_2(升)的第1和第2种介质的比放射性强度；$C_V=\dfrac{C_{V_1}\Delta V+C_{V_2}V_2}{V_2+\Delta V}$——经过时间$t$(小时)，第二种介质的比放射性强度；在此时间内进入到第二种介质的第一种体积为ΔV(升)的放射性物质：

$$\Delta V=V_2(C_V-C_{V_2})/(C_{V_1}-C_V)$$

在微小渗漏的情况下，可以认为$V_2+\Delta V\approx V_2$，就是说，$C_{V_1}\Delta V+C_{V_2}V_2\approx C_VV_2$，因此，$G=\dfrac{V_2}{t}\times\dfrac{C_V-C_{V_2}}{C_{V_1}}$升/小时。

5．拉德——吸收辐射的剂量单位，等于在1克被照射的物质中吸收100尔格的能量。拉德可作为任何介质吸收任何种类射线的剂量测量单位。

6．伦琴——这是伦琴射线或γ射线的辐射剂量单位。它定义为：当压力为760毫米汞柱、温度为0℃时在1立方厘米空气中产生电离的正负电荷为1个静电单位。当剂量为1伦琴时，在1立方厘米空气中吸收87尔格的能量，而在1克生物组织中则吸收93—95尔格的能量。这个单位仅仅适用于光子能量不超过3兆电子伏的γ射线。

7．为定量地表示引起生物效应的照射剂量，引入生物当量伦琴单位。任何一种辐射的剂量，当它的生物效应相当于1伦琴的伦琴射线或γ射线的作用时，称1生物当量伦琴（бэр）。

8．单位时间的剂量，称为剂量率：

$$p=\frac{dD}{dt}$$

在时间t内得到的剂量为$D=\int_0^t pdt$。剂量率由数值$p_0(t=0)$按照该同位素的半衰期的指数规律随时间衰减：$p(t)=p_0e^{-\lambda t}$。由此可见，在时间t内获得的剂量为

$$D=p_0\int_0^t e^{-\lambda t}dt=(p_0/\lambda)(1-e^{-\lambda t})$$

如果时间间隔显著地小于放射性同位素的半衰期，那末：

$$D=p_0t,\qquad p=p_0=D/t$$

剂量率用拉德/小时、伦琴/小时、生物当量伦琴/小时或是它们的派生单位：毫拉德/小时、毫伦/小时、毫生物当量伦琴/小时、毫伦/秒、微伦/秒等单位来测量。各分单位之间的关系如下：

1伦/小时＝280微伦/秒，

1微伦/秒＝3.6毫伦/小时等等

对于点源来说，剂量率与距离的平方成反比：

$$p_1/p_2=R_2^2/R_1^2;\qquad p_2=p_1(R_1/R_2)^2$$

9．天然放射性本底——这是在没有外源电离辐射的情况下，由宇宙射线和土壤、建筑物以及住宅的放射性辐射对该地区所造