



能源物理

第六讲：核能

马红孺

目录

反应堆

钚：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故

能源物理

第六讲：核能

作者 马红孺

上海交通大学大学 机械与动力学院

October 24, 2016



目录

能源物理

第六讲：核能

马红孺

目录

反应堆

钚：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故

- 1 反应堆
- 2 钚：物理和化学
- 3 核废料
- 4 核事故
- 5 反应堆安全
- 6 对人体的危害
- 7 人体接收辐射剂量
- 8 辐射剂量与癌症
- 9 切尔诺贝利事故



请评教

能源物理

第六讲：核能

马红孺

目录

反应堆

铀：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故

请 网 上 评 教 ！

请 网 上 评 教 ！



反应堆类型

能源物理

第六讲：核能

马红福

目录

反应堆

铀：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

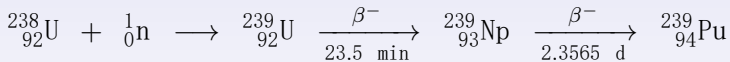
切尔诺贝利事故

压水堆：

利用高压循环水作为减速剂和传热介质

维持反应堆只需要每次裂变的一个中子诱发下一次裂变，多余的中子被吸收或衰变。

当铀-238 吸收中子后，其中的大部分经过一系列的衰变最终成为钚 (Pu) -239， ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ (plutonium)



${}_{93}^{239}\text{Np}$ (镎, neptunium), 钚 (Pu) 是一种裂变材料!!



增殖堆

能源物理

第六讲：核能

马红儒

目录

反应堆

铀：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

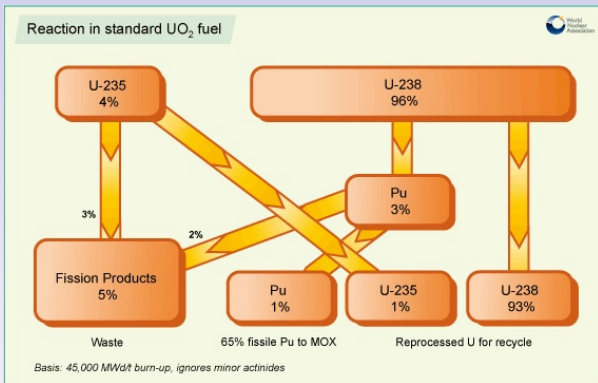
对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故

核能



钚-239 的裂变平均放出三个中子，增殖效率更高，有可能把所有铀-238 变为钚-239，核燃料的使用效率提高 140 倍。

问题：

1，增殖堆大量制造钚，钚的提纯非常简单，可以用来制造核武器，恐怖分子

2，使用快中子，可能导致链式反应失控，造成核爆炸



能源物理

第六讲：核能

马红儒

目录

反应堆

铀：物理和化学

核废料

核事故

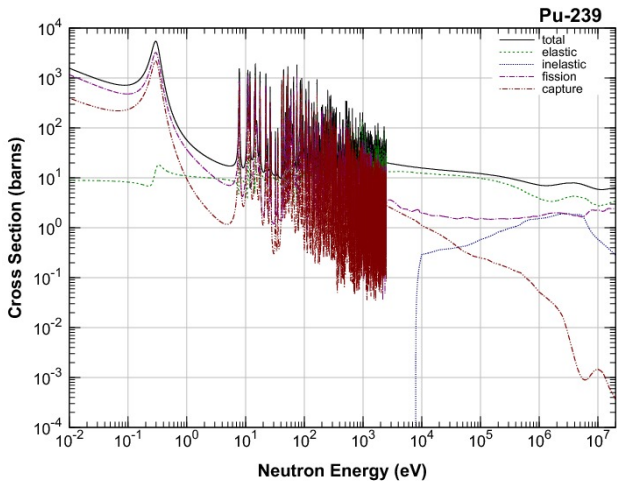
反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故





钚：物理和化学

能源物理

第六讲：核能

马红孺

目录

反应堆

钚：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故

化学方面，钚是重金属，具有重金属的所有可能的危害。

物理方面：

钚的半衰期是 24000 年，主要是 α 衰变

α 粒子一般无法穿透人的表皮，没有危险。

如果吸入钚，则对肺将造成辐射伤害。

吸入 20mg，会导致辐射病而在 1-2 月死亡

吸入 0.08mg，就可能显著提高癌症概率

钚的粉尘是否会很快落下？ 没有完全解决



贫铀

能源物理

第六讲：核能

马红福

目录

反应堆

铀：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故

在铀的提纯过程中，得到一部分铀-238，一般用来制作弹头（高密度，铅的 2 倍）和装甲

铀 238 的半衰期是 45 亿年，铀-235 是 7 亿年，是铀 238 的 $\frac{1}{6.5}$

所以：有一半铀 238 留了下来

而只有 $1/2^{6.5} = 1.1\%$ 铀 235 留了下来

贫铀的危害？

重金属

放射性

禁止使用，或更本质：禁止战争



核废料

能源物理

第六讲：核能

马红福

目录

反应堆

钚：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故

- 裂变产物基本上都是放射性的。
- 半衰期从秒到很长（数万年或更长）都有
- 例如铯占产物的 5%，其半衰期是 28 年
- 在反应堆关机后，裂变产物的放射性会继续放出大量的热量，并持续很长的时间



核废料

能源物理

第六讲：核能

马红瑞

目录

反应堆

铀：物理和化学

核废料

核事故

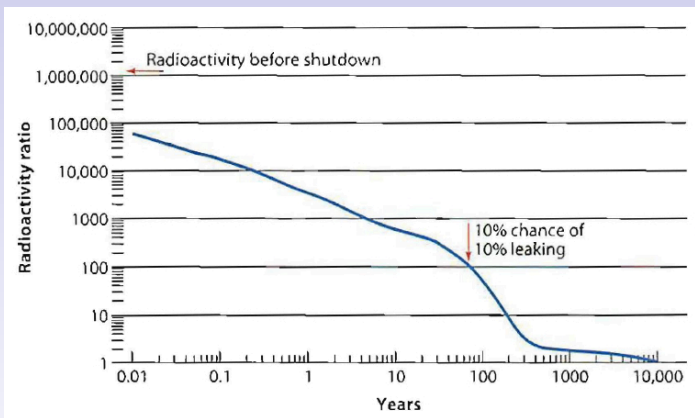
反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故



放射强度与天然铀的比较. 大约 10000 年降到 1.



核废料

能源物理

第六讲：核能

马红福

目录

反应堆

钚：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故

一种可能的方法是深埋于地质稳定地区.

多长时间? 10000 年! 太多不确定因素!

10000 年前, 那是人类的很久很久以前.

真的需要 10000 年吗? 如果降到了铀辐射的 100 倍, 假定有 10% 的可能性泄露 10%, 那么就是 1%, 即本来的水平, 这大概是 100 年的位置.



核废料

能源物理

第六讲：核能

马红孺

目录

反应堆

环：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故

经过 300 年，辐射降到铀的 3 倍左右。即使有 50% 的可能性泄露 50%，其辐射量也只是铀的本来水平。

另一种可能的方法是把核废料发射的太阳上去！但是如果发射失败？这种概率在目前还是很大的。

目前，核废料储存在核电站附近，如何处理更多的是一个政治问题，而不是技术问题。



反应堆会爆炸吗？

能源物理

第六讲：核能

马红福

目录

反应堆

钚：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故

会爆炸，但不是原子弹！

原子弹的链式增殖反应，在大约经过 80 代后，几乎所有铀-235 均发生裂变

$$2^{80} \approx 10^{24}$$

温度达到上百万度。

反应堆有慢化剂，在失控时，温度升高，在温度高达数千度时，发生常规爆炸。

常规爆炸的规模比核爆小百万倍。



事故停堆的危险

能源物理

第六讲：核能

马红福

目录

反应堆

铀：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故

- 停堆后，如果冷却系统失效
- 链式反应停止，裂变产物衰变放出大量热量，
- 慢化水在高温下分解，外漏，化学反应产生氢气，爆炸
- 常规爆炸，辐射外溢
- 或温度不断升高，燃料熔化，继续升高，反应堆的容器底部熔化，气体外泄，带着大量放射性尘埃向周围扩散... ..

切尔诺贝利核电站事故，福岛



人体接收辐射剂量

能源物理

第六讲：核能

马红福

目录

反应堆

钚：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故

一般用人体接收的辐射剂量来评价辐射的危害

剂量的单位：希沃特 (Sievert, Sv). 这个单位表示的是考虑了各种不同辐射的效应和不同脏器的承受程度后的等效值.

希沃特这个单位太大，通常用毫希沃特 (mSv)，另一个过去常用的单位是雷姆 (rem)，

$$1\text{Sv} = 100\text{rem} = 1000\text{mSv}, \quad 1\text{rem} = 10\text{mSv}$$



人体接收辐射剂量

能源物理

第六讲：核能

马红福

目录

反应堆

钚：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故

下表所示是各种剂量的可能后果

剂量 (mSv)	标准和后果
0.05	核电站工作人员一年的累计辐射
0.1-0.3	一次 X-射线胸透的剂量
0.2	从上海到旧金山飞行往返的剂量 (宇宙线)
1	一般工人一年的辐射剂量 从事辐射工作的妇女从告知怀孕到生产的极限剂量
1.5	与每天吸烟 30 支的吸烟者共同居住一年被动吸入的剂量
2.0	地球人一年的剂量
7	一次 CT 检查
13-60	每天吸烟 30 支的一年累计剂量



人体接收辐射剂量

能源物理

第六讲：核能

马红孺

目录

反应堆

钚：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故

剂量 (mSv)	标准和后果
50	辐射工作者一年的累计辐射极限
100	已经证明对体会产生明显危害的辐射剂量
250	福岛第一核电站现场人员暂定辐射上限 白血球减少
500	淋巴球减少 国际放射防护委员会规定的除人命救援外所能承受的辐射剂量
1000	辐射病症状，恶心，呕吐等
2000	细胞组织破坏，内部出血，脱毛脱发，死亡率 5%
3000-5000	死亡率 50%
7000 以上	死亡率 99%

$$LD50(50\% \text{ 致死剂量}) = 3Sv$$



辐射剂量与癌症

能源物理

第六讲：核能

马红儒

目录

反应堆

钚：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

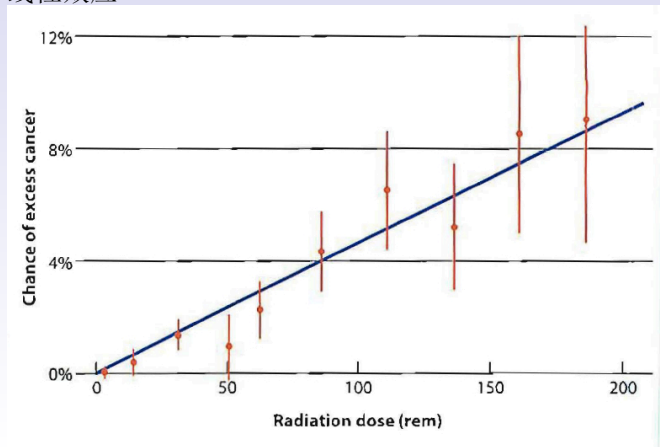
辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故

辐射剂量的积累能够增加癌症的发病概率

致癌的剂量是 25Sv (25000mSv, 或 2500rem). 但人在 10Sv 的剂量下已经致死.

线性效应





辐射剂量与癌症

能源物理

第六讲：核能

马红孺

目录

反应堆

钚：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故

如果每个人接受 50mSv ，那么，500 个人的总剂量就是 25000mSv ，从而达到一个致癌剂量。于是就有一个额外的癌症患者。

一般，大约 20% 的人死于癌症，从概率看，500 人中将会有 100 人死于癌症，而每人 50mSv 的剂量把此数字变为 101。致癌的剂量是 25Sv (25000mSv)：概率意义！

合理，准确？



请评教

能源物理

第六讲：核能

马红孺

目录

反应堆

铀：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故

请 网 上 评 教 ！

请 网 上 评 教 ！



切尔诺贝利事故

能源物理

第六讲：核能

马红福

目录

反应堆

钚：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故

三次重大的核事故：

美国三里岛，1979年3月28日，5级；基本上没有造成严重的环境影响。

苏联切尔诺贝利，1986年4月26日，7级（最高级）；造成严重的环境影响。

日本福岛，2011年3月11日，7级；比较严重的环境影响。

切尔诺贝利核电站的事故是到目前为止三次重大核事故中最严重的一次，我们试图对这次事故的影响做一个介绍。



切尔诺贝利事故

能源物理

第六讲：核能

马红孺

目录

反应堆

铀：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故

切尔诺贝利核电站的事故现场。





切尔诺贝利事故

能源物理

第六讲：核能

马红福

目录

反应堆

钚：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

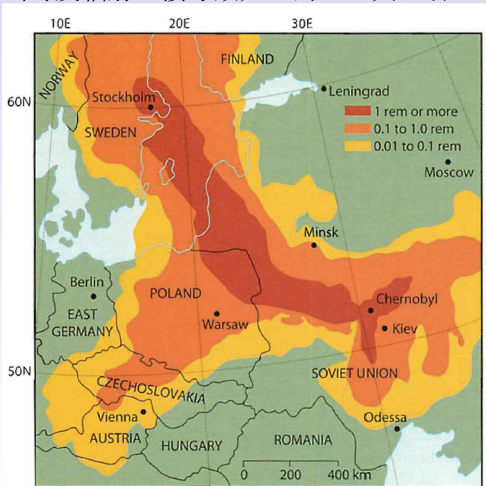
对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故

事故原因：基本上属于一系列实验的安排和操作失误。事故导致反应堆爆炸，堆芯外露，大量辐射物质外泄。事故当时及辐射直接导致死亡约 60 人左右。





切尔诺贝利事故

能源物理

第六讲：核能

马红瑞

目录

反应堆

铀：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故

后续效应：

按照线性理论推断：

1，按照国际原子能机构的推算，切尔诺贝利事故对全球的辐射剂量是 600000Sv，于是，由此导致的额外癌症

$$\frac{600000}{25} = 24000$$

即全世界将有 24000 额外的癌症源于这次事故.

2，辐射最强的区域：40000 人平均接受 0.45Sv 剂量，总剂量 18000Sv，

$$\frac{18000}{25} = 720$$

在这一区域，正常情况下，大约 $40000 \times 20\% = 8000$ 人死于癌症，辐射增加了 720，占 8%



切尔诺贝利事故

能源物理

第六讲：核能

马红孺

目录

反应堆

钚：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故

3, 在所有受影响的范围内大约有 1 亿人, 正常癌症的死亡人数大约 2 千万, 因辐射而增加的人数大约 24000 人, 占

0.024%

30 年后, 无法确切得到事故影响的长期危害。

随着技术的进步, 切尔诺贝利事故这样严重的事故应该不会
再发生, 但是, 福岛核电站的事故和最近的冷却系统短路导
致的事故, 又表明情况也许不是这样。

如何避免人为事故?!?!?!??



今日切尔诺贝利

能源物理

第六讲：核能

马红孺

目录

反应堆

铀：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故





今日切尔诺贝利

能源物理

第六讲：核能

马红孺

目录

反应堆

铀：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故





今日切尔诺贝利

能源物理

第六讲：核能

马红孺

目录

反应堆

铀：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故





今日切尔诺贝利

能源物理

第六讲：核能

马红孺

目录

反应堆

铀：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故





今日切尔诺贝利

能源物理

第六讲：核能

马红孺

目录

反应堆

铀：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故





与其他事故比较

能源物理

第六讲：核能

马红福

目录

反应堆

铀：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故

- 1984 年 12 月 3 日美国联合碳化印度分公司在波帕尔的化学工厂泄漏出 40 吨有毒的异氰酸甲酯和其他有毒气体，该毒气杀死大约 15,000 人，并且使 150,000 至 600,000 人受到伤害。
- 1889 年美国约翰镇水灾，2,209 人死亡。
- 1975 年中国河南驻马店“75·8”溃坝事件，三万左右(?) 23 万(??) 死亡。
- 1952 年英国伦敦烟雾，英国伦敦大约 12,000 人死亡。

核电事故的危害：更多是心理问题？



内陆核电站

能源物理

第六讲：核能

马红孺

目录

反应堆

钚：物理和化学

核废料

核事故

反应堆安全

对人体的危害

人体接收辐射剂量

辐射剂量与癌症

切尔诺贝利事故

在内陆建造核电站，一旦发生事故造成江水污染，其后果：实际的和心理的影响将非常严重。