

E+S #14

# 能源与安全

能源与环境研究所出版 · 美国华盛顿 · 二〇〇〇年第三期

## 铀负担

罗伯特·布鲁克斯

阿妮塔·塞斯<sup>1</sup>

自 1789 年问世时起到 20 世纪初，铀用于陶瓷和玻璃制造中上彩、上光。<sup>2</sup>自 20 世纪初至三十年代末，铀作为镭生产中的废物被丢弃，而镭则用于医疗用途及使工具和手表刻度盘发光。尽管在全世界都是以微量被发现，铀经常在浓度达到矿石 0.1-0.5% 的地方被开采。象加拿大萨斯喀彻温保留地那样，铀浓度超过 10% 或甚至更高的实数罕见。

开采通常有四种方法：

- ▶ 露天矿；
- ▶ 地下；
- ▶ 在自然位置过滤开采，它包含注入溶剂，如盐酸、碳酸烷烃和过氧化氢，以将铀

铀矿工人用矿场用车运送铀矿石（1995 年 Circa）。就对健康的负面效应而言，铀开采已经成为核材料生产中最具破坏性的步骤之一。

从矿石主体中溶解出来。用后的溶液用压力输回地下；以及

- ▶ 多次过滤，用来将铀作为黄金和磷酸盐开采中极低矿石的副产品恢复出来。这一过程包括将滤出溶液（典型的为硫酸或碳酸氨）通过矿石堆反复渗滤以溶解铀，直到其在溶液

### 在本期内

测量放射性：术语&单位.....	10
测量放射性：装置&方法.....	14
阿琼谈废物加速器嬗变.....	19

中的含量高到足以萃取。

铀制造包括从矿石中萃取铀并将其加工为便于运输的氧化粉。开采和制造过程都使工人、附近居民以及环境暴露于不同危险中。要理解这些，首先必须懂得铀矿的构成。

天然铀有三种释放阿尔法射线的同位素：铀 238、铀 235 和铀 234。这些同位素还释放一些伽玛射线。[术语汇编见第 13 页]铀 238 是这些同位素中含量最高的（在天然铀中占近 99.3%），半衰期为 45 亿年。铀 235（约 0.7%）和铀 234（含量仅有 0.005%，但在铀放射性中占了近一半）的半衰期分别为 7 亿 4 百万年和 24 万 5 千年。[见下表]铀 238 的衰退产生了许多放射性衰退产物，包括钍 234、钍 230、镭 226、氡-222、钋-218 和钋-214。这些衰变产物在矿石中总是与天然铀共存。[见铀衰变链，第 3 页]

天然铀中发现的同位素

同位素	天然铀中的百分比 (以重量计算)	半衰期 (年)
铀 238	99.284	44.6 亿
铀 235	0.711	7.04 亿
铀 234	0.0055	24.5 万

铀既有放射性，也有化学毒性。在人体以外，天然铀仅造成很小的危险，因为其释放的伽玛射线相对较弱（除非受照射时间很长）。一旦将天然铀吸入或食入人体，由于其释放阿尔法射线，会增加患肺癌和骨癌的风险。铀 238 的衰变产物增加了对健康的危险。在钍 230 在骨中趋向被吸收的地方，大部分钍 234 发生衰变。钋散布在软组织和骨头中。镭与钙相似，累积在骨

## 《能源与安全》

《能源与安全》是一份报导核不扩散、裁军和能源可持续性的时事通讯刊物，由能源与环境研究所 (IEER) 一年发行 4 次。

IEER 地址: 6935 Laurel Avenue, Takoma Park, MD 20912, USA

电话: (301) 270-5500

传真: (301) 270-3029

电子函件: [ieer@ieer.org](mailto:ieer@ieer.org)

万维网址: <http://www.ieer.org>

能源与环境研究所就广泛的问题向公众和决策者提供有见地的、明确的和稳妥的科学技术研究报告。该研究所旨在向公共政策事务提出科学的意见，以促进科学的民主化和更健康的环境。

### 能源与环境研究所成员:

所长: 阿琼·麦克贾尼, 博士  
全球对外协调员: 米切尔·博伊德  
图书馆员: 洛伊丝·查墨斯  
簿记员: 戴安娜·科恩  
对外协调员: 丽莎·莱德维奇  
项目科学家: 安妮·麦克贾尼  
行政助理: 贝特西·瑟洛-希尔兹  
资深科学家: 希斯汉姆·泽里夫

### 感谢我们的支持者

我们衷心感谢我们的资助者，是他们的慷慨资助使我们能够开展项目，给从事有关核武器问题工作的基层组织提供技术援助，并进行全球接触计划。我们的资助者是 W. Alton Jones Foundation, John D. And Catherine T. MacArthur Foundation, Public Welfare Foundation, New Land Foundaation, Rockefeller Financial Services, John Merck Fund, Ploughshares Fund, Unitarian Universalist Veatch Program at Shelter Rock, Town Creek Foundation, Beldon II Fund, Turner Foundation, Ford Foundation 和 Stewart R. Mott Charitable Trust.

制作

Cutting Edge Graphics

编辑

丽莎·莱德维奇

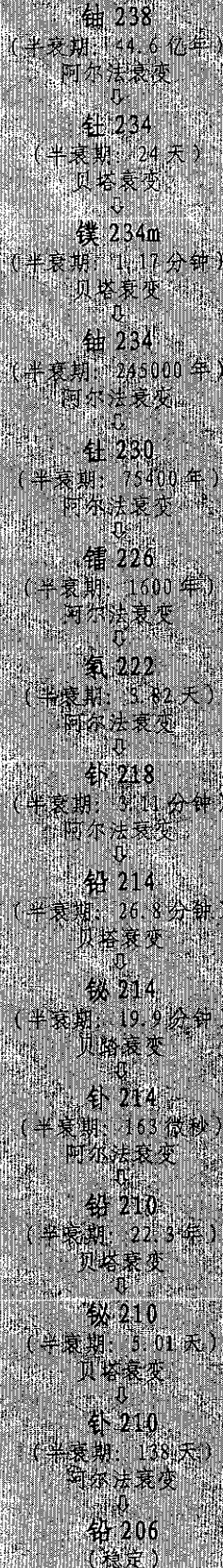
本期英文版于 2000 年 9 月出版。

头的表面，并在稍后进入骨骼基质。镭一旦食入很危险。已知它会引起骨癌，正如 20 世纪 20 年代通过在仪表盘上刷镭工匠的不幸命运所发现的。那些刷镭工匠在舔齐他们的刷子以取得更好的效果时不经意地食入了镭。

气体氦 222 是氡 226 的衰变产物，半衰期为 3.82 天。氡及其衰变产物历史上是铀矿工人患肺癌程度增加的罪魁祸首。传统的地下开采对工人最危险，因为他们更多地暴露在氡衰变物之下。工人们吸入空气中的钋 218、铅 214、铋 214 和钋 214。这些放射性元素在肺中衰变一直是铀矿工人们受辐射的主要途径，历史上对矿工们患癌程度上升负有责任。受氡及其衰变产物的照射以工作级别和工作级别月衡量。<sup>3</sup>

铀矿工人还面临许多与非放射性有关的危险。如果食入或吸入，可溶铀由于其作为重金属的化学毒性而影响肾脏。铀蕴藏其中的矿石也包含非放射性的有毒重金属。它们随地点而不同，但可能包括砷、铅、钼和锰。硅石粉尘在打钻过程中产生，会引起肺部伤痕逐渐恶化，这限制了肺功能并会导致癌症，增加患肺结核、类风湿性关节炎和肾病的风险。如所有采矿一样，铀

### 铀衰变链 (仅为主支)



矿工人面临受伤的高风险；然而，在过去几年里，随着安全措施的提高，这些风险在大多数国家里已经下降。

铀矿工人受到的(辐射)剂量可以通过适当通风、仔细计划以及完善设计和工作实践来降低。然而，全世界许多矿场的操作者拒绝改进工作条件的步骤。例如，美国直到 20 世纪 60 年代才建立对付已知健康风险的保护措施，尽管美国公共健康署 50 年代初的研究就表明，美国工人面临的危险与欧洲的相似。那时，欧洲患肺癌程度的恶化已经显示出来。受到美国加速发展原子弹的推动，加拿大于 40 年代开始大规模开采和加工(铀矿)。直到 1968 年才对加拿大矿工受到放射性辐射的上限作出规定。苏联直到 1954 年才对其经营的东德矿场实施辐射保护措施；那些地方在此后的几十年里仍是放射性灾难。工人的健康和安全的在纳米比亚罗森矿场同样受到忽视。在运营的头三年里，它并未规定工人必须戴胶片带，后来只规定必须在铀萃取的最后阶段戴。一份 1992 年的研究发现，“在整个[20 世纪 80 年代]，罗森对空运铀的工业卫

生标准是天然铀[放射性保护国际委员会推荐最大值]派生空运浓度的近 6 倍，当前科学证据中暗含限制的 36 倍。”<sup>4</sup>

对铀矿工人的健康已经进行了很多研究，记录了肺癌程度的恶化。在捷克斯洛伐克，自 1970 年以来已对几组矿工进行了跟踪研究。一份报告研究了 4042 名 1948-1957 年间开始井下工作的矿工，发现到 1985 年肺癌死亡的人数是预计数量的 5 倍。<sup>5</sup>在加拿大，安大略研究报告调查了 1955-1986 年间 50,201 名矿工的资料（包括 15,000 名仅在安大略铀矿工作的矿工），发现肺癌死亡人数比未受辐射人群预期的 171.8 人超出 120 人。在美

USPHS 小组进行了许多跟踪研究。由霍农（Hornung）和梅因哈特（Meinhardt）于 1988 年进行的研究提出吸烟与受氡衰变产物辐射的相互促进效应。在澳大利亚、东德和法国矿工的研究中也发现肺癌死亡超过预期人数。在许多地区，如非洲、前苏联和中国，有关健康和环境影响的信息不易获得，在这些地区进行的研究较少。

制造过程涉及从其它矿石成分中化学分离铀，这一过程中产生的废物也对健康和环境造成严重危害。就典型铀浓度 0.2%来说，为获取 2 吨铀需要 1000 吨矿石，而剩余 998 吨废物。这些废物被<sup>1</sup>称为

**为核武器计划开采铀的地点**

放射性，还有重金属和来自诸如硫酸和氯化氨等制造制剂的化学有毒物质。

尾料从制造过程中分离出来时大约 40%是固体，60%是液体。液体最终会渗入土壤，引起地表水污染的危险。风力将细微、可吸入人体的放射性颗粒从干燥的尾料储放地吹散开去，辐射工人和附近居民。制造尾料还经常用于房屋建造，导致住户受到高剂量氡。制造尾料构成核燃料循环（不包括矿石废物）产生的放射性废物总数的 95%以上，而且生命期很长（尽管只是放射性中一小部分）。

在最初几十年里，制造尾料被置于未加防护措施的尾料池里，导致了地表水污染。尾料隔墙断裂，

导致储存其中的尾料排放物泄露，造成大面积污染。1979 年，联合核铀制造尾料隔墙在新墨西哥州车尔克罗克附近破裂，泄露 9400 万加仑尾料液体和 1100 吨尾料固体，散布到离该设施 60 英里的地方。在加拿大安大略伊利奥特湖地区，Serpent 河水系中有 80 公里，包括 10 个内湖，已经受到污染。伊利奥特湖也经历了 30 次尾料隔墙险情，有关于 125 次在萨斯喀彻温放射性溢出的报道。美国正修补尾料（存放）地区，其方法是通过在尾料下面增加塑料隔层来防止渗漏，并将它们维持在水下以降低氡衰变产物的排放。

铀生产受到一些国家寻求核武器和核能的驱动，其结果造成的负

铀矿前十名，1997 年（仅限于“西方世界”）

矿名	国家	拥有者	矿井类型	产量 (吨铀)	世界产量中的 百分比
Key Lake	加拿大	Cameco/Uranerz	露天	5433	15.2
Rabbit Lake	加拿大	Cameco/Uranerz	地下	4632	13.0
Ranger	澳大利亚	ERA	露天	4095	11.5
Rossing	纳米比亚	RTZ (69%)	露天	2905	8.1
Akouta	尼日尔	COGEMA/Onaremm	地下	2139	6.0
Cluff Lake	加拿大	COGEMA	露天/地下	1964	5.5
Olympic Dam	澳大利亚	WMC	副产品 (铜) 地下	1425	4.0
Arlit	尼日尔	COGEMA/Onarem	露天	1358	3.8
Vaal Reefs	南非	Anglo-American (27.6%)	副产品 (金) 地下	677	1.9
Highland	美国	Cameco	ISL	597	1.7
西方世界来自前十位矿井的总数				25225	70.7

来源：铀研究所，<http://www.unilondon.org/utopmin.htm>。主要铀矿开采公司列表可查找：<http://www.unilondon.org/utopco.htm>。

担却不合理地由土著、殖民地和其它被统治的人民来承担。美国大约三分之二的铀置放地在土著美国人的土地上，来自恣意妄为的制造厂的所有美国生产的制造尾料中，有约三分之一在纳瓦霍保留地。萨斯喀彻温北部是克里和提纳部落的居住地，也是某些矿产最丰富的地区，全世界超过 20%的铀在那里开采。

法国核武器和反应堆中使用的许多铀一直在尼日尔和加蓬开采。尽管这些矿井属于法国公司 Cogema，但它们不采用与法国执行的相同的健康和环境规定。尼日尔的状况促使 BBC 制作人克里斯·奥尔加帝评论说，“地球上一些最贫困的人受雇于最危险的环境之一，以使世界上最富有国家的电力机车获得动力，这些国家的炸弹获得燃料。”<sup>6</sup>其它欧洲国家和日本也从尼日尔和加蓬购买铀。英国公司 Rio Tinto Zinc 开始在纳米比亚采矿经营，1976 年在罗森的行动违反联合国 1974 年法令，该法令规定，未经联合国纳米比亚理事会同意，不得开采任何纳米比亚自然资源。直到 1990 年，纳米比亚还是南非的殖民地。这些铀中的大部分被用于加速英国的核武器计划和日本的民用核能生产。

在大多数国家，铀矿开采就制剂以及受影响人群的数量而言已经成为核材料生产中最危险的步骤。识别受到铀矿开采和制造活动影响的人群需要做出更大的努力，以评估他们受到辐射的程度，并向他们提供健康监测和有关帮助。各国应该在放射保护国际委员会建议（每

年工人受辐射最多 2 雷姆）的基础上制订标准，以保护铀矿工人和住在采矿和制造地点附近的居民。鉴于无核国家和被统治人民承担的不合理负担，他们应该得到足够的健康和环境监测，受破坏地区的环境修复，以及对过去不公正待遇的补偿，以重新修整污染的显著不平等。

---

<sup>1</sup> 本文最初发表于能源与环境研究所全球通讯《能源与安全》1997 年第 4 期。

<sup>2</sup> 本文写作过程中，我们大量参考了阿琼·麦克贾尼、哈瓦德·胡和凯瑟琳·严编写的《核废地：核武器生产及其健康和环境效应全球指南》（坎布里奇：麻省理工学院出版社，1995 年）。特别相关的是：第四章“武器生产的健康危险”（大维·萨姆纳、哈瓦德·胡和阿利斯塔·伍德瓦德）和第五章“军用目的的铀开采和碾磨”（凯瑟琳·严、阿尔伯特·唐奈、阿纳利·亚斯、A. 詹姆斯·鲁滕伯格和斯科特·塞利斯卡）。

<sup>3</sup> 工作级别（WL）指，在 1 升空气中氡衰变产物的数量（也称氡子核或氡后代），会导致释放  $130,000 \times 10^6$  电子伏特阿尔法粒子能量。如果氡后代与空气中的氡形成均衡（这是假定氡已在空气中停留了一段时间），那么 1 升空气中约 100 微微居里（3.7 贝克）氡等于 1 工作级别。工作级别月份（WLM）测量一个矿工在一个工作月（170 小时）通过呼吸含有浓度为 1 个工作级别的空气所得到的总放射剂量。

<sup>4</sup> G. 德罗普京和 D. 克拉克，《过去的辐射：揭示 Rössing 铀矿的健康和环境风险》Partizans, 伦敦：1992 年，（同《核荒地》中的引用，第 144 页）。

<sup>5</sup> J. 塞弗克、L. 托姆塞克、E. 昆兹、V. 普拉塞克、D. 巴克利、和 A. M. 凯勒，“捷克斯洛伐克铀矿工人肺癌死亡的跟踪调查”，《健康物理学》，第 64 卷，第 355-369 页，（同《核荒地》中引用，第 159 页）。

<sup>6</sup> 转引自《核荒地》，第 106 页。

## 电离辐射的健康风险

戴维·萨姆纳

哈瓦德·胡

·阿利斯塔·伍德沃德<sup>1</sup>

电离辐射可以引起随机（偶然）和必然（非偶然）效应。如果超过最低辐射剂量，就出现必然效应。在此门槛上，那些效应已经在大多数或所有受辐射者身上看到，严重程度还随剂量上升。必然效应在任何个体身上的出现及其严重程度按道理可以预测。射线灼伤是产生必然效应的一个例子。

就成人而言，当整个人体受到的（辐射）剂量超过约 1 西韦特，非偶然效应起主导作用。一项例外是男子暂时不育症，当睾丸单独受到约 0.15 格雷剂量时，它就可能出现。<sup>2</sup>[有关辐射的单位和术语，见始于第 10 和第 13 页的文章。]对于儿童，引起先天畸形和其它发育不正常的底线已被估计为达妊娠 28 天内受到辐射 0.25 格雷。

单个（部位）受到辐射剂量超过约 1 格雷引起辐射病，剧烈后果包括：恶心、呕吐和腹泻，有时伴有不适、发烧和出血。受害者在几小时、几天或几周内死亡。其它严重后果可以包括不育和射线灼伤，取决于吸收的剂量和受辐射率。使受辐射人口的半数在得不到治疗的情况下在六十天内死去的剂量被称为 LD50（LD 代表致命剂量，50 代表 50%）。成人的数量为 4 西韦特。六十天这个期间有时候明确地表示出来，那样该剂量就称为 LD50/60 剂量。一般而言，根据日期的数字（T）——此后观察到的死亡不计算在内，可以指明许多不同的

LD50 剂量。

对于小于约 1 西韦特的辐射剂量，随机效应一直是最大担忧。最严重的随机效应——癌症和遗传性生殖损伤，在受辐射后可以存在许多年或几十年。人们认为，这些效应没有最低底线；剂量下降时，这些效应仍可能出现，但出现的频率降低。然而，低剂量（10 毫西韦特或更低）的不确定性很大。过去几年里，对低剂量辐射后果严重性的估计趋向认为，其严重性在上升，但此课题仍具争议。

由于电离辐射可以损害事实上任何细胞的遗传物质，在人体的许多位置和组织都可能出现癌症。实际影响部分取决于受辐射的途径。例如，外部射线，如 X 射线或伽玛射线，可以以几十年后引起这些器官癌症的方法影响造血细胞或许多器官中的 DNA。应该强调的是，各组织对辐射损伤的敏感度不同。比如，肌肉不如骨髓敏感。

有许多途径可以使人体受到内部射线的影响。氡的衰变产物存在于地下铀矿，可能被矿工吸入并在他们的肺中沉积下来。释放出大部分高-LET 阿尔法粒子的钚 2339 的微粒或其它 actinides 可以被吸入人体，并在肺支气管的上皮内层存积下来。通过该种途径受到的辐射剂量增加了患肺癌的风险。此外，可溶性微粒可以通过血液或淋巴系统被吸收，并被传递到身体的其它部分。某些元素，如镭、锶、或碘，趋向于在某些器官中沉积下来。例如，碘 131 向甲状腺释放其主要电离辐射，使其成为最有可能由此患癌的地方。碘 131 也用来对付甲状腺癌，因为释放的射线杀死癌变细

胞，产生健康细胞。但如果甲状腺中没有病变，射线影响的就仅是健康细胞。

### 对电离辐射引起癌症风险的估计

各种机构已经对受到电离辐射患癌症的风险作出估计，其中特别需要指出的有：联合国原子辐射效应科学委员会（UNSCEAR）、美国国家科学院电离辐射生物效应委员会（BEIR）、以及辐射防护国际委员会（ICRP）。这些估计主要来自对广岛和长崎轰炸幸存者的研究，也来自各种不同人群，他们出于治疗或诊断目的或象表盘漆工和铀矿工人一样，在工作中受到辐射[见前文“铀负担”，第1页]。

对于广岛和长崎原子弹轰炸的幸存者的研究表明，根据统计，受到辐射剂量超过0.2格雷，患癌的可能大大增加。这些剂量在爆炸后突然传递（到人体中）。将这些资料运用于估计低剂量电离辐射或剂量传递逐渐增加所造成的患癌风险时，产生了许多问题。

第一个问题是如何将剂量-反应关系下推至低剂量。通常的假设是运用“线性无临界”模式——就是说，风险与剂量直接成正比，无临界值。由于低剂量辐射的主要效应是诱发癌症，而癌症是种有许多病因的常见疾病，线性无临界模式尚不可能加以核实；然而，这种理论有许多放射生物学的证据，它也普遍用于公众健康保护目的，比如制订标准等。

第二个问题是必须对将来患癌风险的计算如何变化作出某种假设。毕竟，超过半数的广岛、长崎幸存者仍在人间。目前，资料最适合相对风险模式——就是说，患癌风险与“随机”

或“自然”患癌风险成比例。如果此理论正确，那么在生命后期辐射诱发癌症的数量将上升。

第三个问题是辐射的相对生物有效性部分取决于辐射的能量。例如，资料显示，低能中子和阿尔法粒子就产生生物损伤而言比高能粒子（每单位吸收的能量）更有效。<sup>3</sup>这样，如照平常做法，假定一个质量常数有时可能造成对剂量估计的不准确。

最后，存在与低剂量效应和低-LET辐射的低剂量率有关的不确定性。美国国家科学院电离辐射生物效应委员会、辐射防护国际委员会和其他一些机构的结论表明，与基于高剂量和高剂量率的低-LET辐射资料线性推断所产生的预期相比，低剂量和低-LET辐射的剂量率对产生癌症、尤其是白血病影响较小（即，其效应在低剂量及低剂量率时为非线性）。不幸的是，评估DREF修正有效性的流行病学数据库寥寥。

尽管具有这些潜在的限制，大多数癌症预测继续使用由现有辐射防护委员会估计的患癌风险系数。他们目前的估计如下：

联合国原子辐射效应科学委员会，1993年<sup>4</sup>：高剂量下致命癌症风险为每人-西韦特0.11（较之与广岛和长崎轰炸的幸存者所经历的）。对于低剂量，联合国原子辐射效应科学委员会声称，“没有单独数据可以引用”作为风险减小系数，“但是很清楚，此系数很小。对日本人的研究数据表明，该系数不超过2。”<sup>5</sup>对年龄在18-64岁间的人群（相当于典型的工业劳动力人口的年龄），系数为2在低剂量率为每人-西韦特0.04时产生患致命癌症风险。

美国国家科学院电离辐射生物效



应委员会，1990<sup>6</sup>；基于广岛和长期幸存者的数据，单独剂量 0.1 西韦特下，每人-西韦特患致命癌症率为 0.08。这一数据在低剂量率时未做修正以降低患癌风险。

辐射防护国际委员会，1991<sup>7</sup>：整个人群每人-西韦特患致命癌症风险为 0.05，成年工人每人-西韦特致命癌症风险 0.04，两个数据都考虑了低剂量问题，整合的剂量率下降系数为 2。

美国环境保护署使用每人-西韦特癌症发生风险系数为 0.06。<sup>8</sup>由于癌症发生率比癌症致命率约高 50%，其暗含的致命癌症风险为每人-西韦特 0.04。

对每单位剂量（患病）风险的估计再次得到实质性修正（向上或向下）。如美国国家科学院电离辐射生物效应委员会所指出的：

大多数原子弹（轰炸）幸存者仍在人间，如果要对生命风险作出可靠估计，必须跟踪他们的死亡历程。这一工作对于那些在孩童时或在母胎中就受到辐射，现在正进入患癌最大风

险期的幸存者来说，尤为重要。<sup>9</sup>

<sup>1</sup> 使用《核荒地》一书（由阿琼·麦克贾尼、哈罗德·胡和凯瑟琳·严编，坎布里奇：麻省理工学院出版社，1995 年）得到授权，第四章“核武器生产的健康风险”。该文曾出现于能源与环境研究所全球通讯《能源与安全》第四期（1997 年）。

<sup>2</sup> 辐射防护国际委员会 1990 年建议。辐射防护国际委员会出版物 60。辐射防护国际委员会年报，第 21 卷，第 1-3 期。剑桥，纽约：Pergamon 出版社，1991 年，第 15 页。

<sup>3</sup> 国家研究理事会，电离辐射生物效应委员会：《受到低度电离辐射对健康的影响》。BEIR V，华盛顿特区：国家学术出版社，1990 年，第 27-30 页。

<sup>4</sup> 联合国原子辐射效应科学委员会（UNSCEAR）：《电离辐射的来源、效应及风险》，纽约：联合国，1993 年，第 16-17 页。

<sup>5</sup> 同上，第 17 页。

<sup>6</sup> 国家研究理事会 1990，第 5-6 页。

<sup>7</sup> ICRP1991，第 69-70 页。

<sup>8</sup> 美国环境保护署：“有关放射性地点清理规则的问题集”，EPA402-R-93-084，华盛顿特区：放射性与室内空气办公室，1993 年 9 月，第 7 页。

<sup>9</sup> 国家研究理事会 1990 年，第 8 页。

## 为什么本期没有原子智力测验？

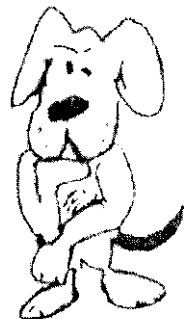
秃头博士和他爱好智力测验的爱犬伽吗曾说，能源与环境研究所将奖给回答上一期《能源与安全》（2000 年第 2 期）特别原子智力测验最准确的读者 108 美元，这不是在开玩笑。

至今，我们只收到了一份答案，而伽吗仍未找到满意的答案！

如果你尚未试试，考虑一下帮助伽吗解开核废物数量之谜。在上一期《能源与安全》第 20 页或能源与环境研究所网址：<http://www.ieer.org/sdafiles/vol-8/8>

-3/puzzler.html，你可找到特别原子智力测验栏目。

为了让我们的读者有更多时间解答此具挑战性的问题，我们决定不在本期设立新的智力测验，而代之以延长上期特别原子智力测验的期限。新的截止日期是 2000 年 11 月 1 日。稍后，我们将公布我们之所获。



祝大家早日解决该问题！

## 测量放射性：术语与单位

戴维·克罗斯  
丽莎·莱德维奇

放射性物质衰变时释放出电离射线。当原子核通过释放粒子（阿尔法粒子、电子或一个或多个中子）自发衰变时，出现放射性衰变。

电离辐射的四种形式是阿尔法粒子、贝塔粒子、伽吗粒子和非直接的中子。所有这些有足够能量电离原子，换句话说，带走一个或多个该原子的电子。

一个阿尔法粒子由 2 个质子和 2 个中子构成，相当于一个氦原子的原子核。阿尔法粒子易于电离它们接触的物质，将能量传递给该物质的电子。阿尔法粒子在空气中可以移动几微米，但一般而言，其范围随介质密度增大而下降。例如，阿尔法粒子无法穿透人类皮肤的外表层，但如果被吸入人体，阿尔法粒子可以损伤肺组织。

贝塔粒子是一个负电子或正电子，比阿尔法粒子轻得多。因此，贝塔离子失去能量的过程比阿尔法粒子的长。中等能量的贝塔粒子在空气中移动约 1 米，在人体组织中移动约 1 微米。

伽吗射线是电磁辐射。如果阿尔法或贝塔衰变后的剩余原子核处于活性状态，放射性元素可以释放伽吗射线（以不连续光束或被称为光子的量子形式）。伽吗射线的穿透力可以比阿尔法或贝塔粒子强得多；高能伽吗射线光子可以穿过人体而根本不对人体组织产生作用。当伽吗射线作用于人体组织时，它们电离原子。“X 射

线”这一术语有时也用来指放射性衰变过程中释放的伽吗射线，它在放射性衰变导致的电磁辐射中处于能量谱的低端。

中子是不带电荷的中性粒子。与阿尔法和贝塔粒子不同，它们不与电子相互作用，或直接产生电离。然而，中子可以通过不同途径间接地电离，这些途径有：弹性碰撞、无弹性散落、非弹性散落、俘获反应、或分裂过程。这些过程各自导致释放伽吗射线、贝塔辐射，并在分裂情况下产生更多中子。更详尽解释，请参见《受到低度电离辐射对健康的影响》（BEIR V 报告），国家学术出版社，1990 年，第 15-17 页。

### 测量辐射程度

电离辐射可以用电子伏特、尔格和焦耳等单位测量。电子伏特（简称 eV）是与电子移动有关的能量单位。在一个氢原子（一个质子加一个电子）中，电子被“牢牢束缚住”。将此电子从质子边带走消耗能量。将此电子从质子边完全带走需要 13.6 电子伏特能量。那时，我们说原子“电离化”了。在此意义上，牢牢束缚于氢中的电子的“电离能量”是 13.6 电子伏特。

电子是很轻的物质，因此我们不能指望一个电子伏特能代表很大能量。一个电子伏特仅有  $1.6 \times 10^{-19}$  焦耳能量，换句话说，1 焦耳的百亿亿分之十六。1 焦耳（缩写为 J）相当于 1 瓦灯泡使用 1 秒所消耗的能量数。与放射性衰变有关的能量变化范围在每个原子核几千到几百万电子伏

特之间，这就是为什么单个原子核衰变典型地会导致大量电离。

物质的放射程度以每单位时间内衰变的核素的数量来测量。标准的国际单位或放射性程度被称为贝克尔（缩写为 Bq），它等于每秒一次分裂。放射性程度也用居里测量，居里是基于每克镭 226（370 亿）每秒分裂数量上的历史单位。因此，1 居里 = 370Bq。1 微微居里（1 居里的兆亿分之一）= 0.037Bq，而 1Bq = 27 微微居里。放射性程度也可以用每分钟分裂（dpm）测量，1dpm = 1/60Bq。

特殊活性测量一单位重要物质的

放射性程度。其单位是居里/克或贝克尔/克。这使我们可以比较是否一种物质比另一种物质具有更多或更少放射性。放射性核素的特殊活性与其原子重量及其半衰期成反比。

放射性程度的环境和健康测量通常用土壤、水、空气或组织中的放射性浓度来表述。单位的例子包括微微居/升、贝克尔/立方米、微微居/克、以及分裂数/秒·100 平方厘米。1 微微居（缩写为 pCi）是  $10^{-12}$ （0.000000000001）居里。有时候，用百万分之几（或 ppm）给出或表述的单位土壤或组织中放射性材料的重

在测量电离辐射和辐射剂量中使用的一些单位

单位	描述	等价值
雷姆 (roentgen 的 等价单位)	相当于辐射吸收剂量的单位。它考虑了不同形式电离辐射的相对生物有效性。或者说它们将其能量转移到人体组织的不同途径。用雷姆表示的剂量等于用拉德表示的剂量乘以质量系数(Q)。对于贝他和伽玛辐射，采用的质量系数为 1，就是说：雷姆=拉德。对阿尔法辐射，采用的质量系数为 20，就是说：雷姆是拉德的 20 倍。雷姆实质上测量生物损伤。对于中子，质量系数 Q 典型地采用 10。	雷姆=拉德×Q
西韦特 (Sv)	相当于吸收剂量等于 100 雷姆的单位。	1 西韦特=100 雷姆 西韦特=格雷×Q
拉德 (辐射吸收剂量)	辐射吸收剂量单位。拉德测量置于组织中的能量数。	1 拉德=100 尔格/克
格雷 (Gy)	吸收辐射剂量等于 100 拉德的单位。格雷测量组织中的能量量。	1 格雷=100 拉德
居里 (Ci)	放射性程度的传统单位。等于 1 克纯镭-226 的放射性程度。	1 居里=370 亿分裂数/秒 =370 亿贝克尔
贝克尔 (Bq)	放射性程度的标准国际单位。等于每秒分裂一次。	1 贝克尔=270 居里
每秒分裂数 (dps)	给定原子的核子衰变。1 秒内释放出次原子粒子（如阿尔法粒子）或光子（伽玛射线）的数量。	1 分裂数/秒=1 贝克尔

来源：《核荒地》，麦克贾尼等编，坎布里奇：麻省理工学院出版社，1995 年；《科学为民主行动》，第 6 卷第 2 期，1997 年 11 月；《辐射保护：科学家和物理学家指南》（第三版），贾可布·沙皮罗，坎布里奇：哈佛大学出版社，1990 年。

量可以用质量来表述。它可以被转换成放射程度单位，因为我们知道了不同放射性核素的特殊活性。每分钟每100平方厘米的分裂数是一个经常用来测量物体（如水泥或金属）表面污染程度的单位。

## 测量剂量

将人体置于放射性源旁边会导致受到辐射。为了评估这种照射所带来的危险，人们必须计算吸收能量。它被定义为传递给特定质量组织的能量。剂量在人体中通常不是一成不变的，不同器官或组织可以有选择地吸收放射性物质。

放射性剂量通常用拉德(英文“辐射吸收剂量”的缩写)。1拉德是100尔格/克，换言之，某1克人体组织吸收了100尔格能量。1尔格是千万分之一焦耳。100拉德等于1焦耳/千克(J/kg)，也等于1格雷。格雷是测量辐射剂量的标准国际单位。如果时间被牵涉在内呢？那么我们讨论的是剂量率(或每单位时间剂量)。剂量率单位的一个例子是毫拉德/小时。就日常情况来说，1焦耳(甚至更多，1尔格)是相当小的能量数。但是，就分子或元素的电离潜力而言，1焦耳是巨大的能量。1焦耳电离辐射可以引起几万万次电离。

用伦琴测量由核素放射性衰变引起的空气中的电离数量。在非骨质生物组织中，1伦琴相当于约0.93拉德。空气中，1伦琴等于0.87拉德。用mR/hr显示刻度的仪表盘读作毫伦琴每小时。

物理上而言，测量辐射效应最基本的方法是测量特定重量物质中存有的能量数。然而，能量置放仅是引起生物损伤的辐射潜力的一个方面。每单位置放能量在其置放距离较短时引起的损伤更大。因此，可以在非常短距离内置放其所有能量的阿尔法粒子每单位能量所导致的损失比需要较长途径置放能量的伽玛射线引起的大得多。能量在其间置放的生物物质的重量也很重要。不同器官的敏感程度也不相同。人们已建立相对生物有效性(RBE)概念以试图表达各种辐射产生生物损伤的相对效率。

RBE因受辐射器官受辐射时间以及其它因素而各不相同。出于规范化目的，使用称为质量系数的单独因素将置放能量转用拉德表示，尽管这种做法表明将真实的生命风险相当程度的简单化了。对于贝塔和伽玛辐射，此质量系数为1，就是说，1拉德=1雷姆。阿尔法辐射置放于活性组织中的每单位能量造成大得多的损伤。当前，阿尔法辐射的质量系数为20(将阿尔法辐射的拉德数乘以20得到雷姆数)。我们用“当前”一词是因为阿尔法辐射的质量系数每隔几年就发生变化。当前一般用于中子辐射的质量系数为10。

剂量转换系数(DCFs)用于将人们吸入或食入的放射性数量(用居里或贝克尔表示)转变为剂量(用雷姆和西韦特表示)。用于规范化目的的DCFs来自各种实验数据和数学模式的结合。

**吸收剂量：**置于单位生物组织中的能量数。吸收剂量的单位是拉德和格雷。

**阿尔法辐射：**射线由氢核素构成，氢核素在铀 238、镭 226 和钷 239 等一些重元素放射性分裂时带走电子。阿尔法是希腊字母表中的第一个字符，写作  $\alpha$ 。

**贝塔辐射：**射线由贝塔粒子构成。贝塔粒子是负电子或正电子（带正电荷的电子），由一些元素在放射性衰变过程中以高速释放。贝塔是希腊字母表中第二个字符，写作  $\beta$ 。

**有效剂量等价值（EDE）：**整个人体的等价剂量，计算时用特定器官（或器官集合）的剂量乘以一个系数，以大致描述整个人体的等价剂量，并因此推算放射产生癌症的风险。

**电子：**一种基本粒子，带有一个单位的负电荷。它的质量是质子的  $1/1836$ 。

**对外辐射剂量：**来自人体以外辐射源的剂量。它最常见是来自伽吗射线，尽管贝塔射线可以向皮肤以及其他相对表层的组织传递剂量。

**伽吗辐射：**高能电磁波，就象一些核素放射性衰变中释放出来的一样。伽吗是希腊字母表中的第三个字母，写作  $\gamma$ 。

**对内辐射剂量：**对人体器官的剂量来自通过呼吸、吞食或通过割伤或伤口进入人体的放射性物质。它可以由混合的放射性材料引起的

阿尔法、贝塔和伽吗射线共同构成。对内剂量也包括穿过人体的中子所释放的间接电离。

**电离：**从一个原子带走一个或多个电子或分裂中性分子，从而使元素成为带电荷粒子。

**中性原子：**由于正、负电荷（各自为质子和电子）正好平衡，不带净电荷的原子。在诸如地球上出现的温度下，元素的原子呈中性。

**中子：**比质子略重的基本粒子，不带电荷。自由中子不稳定，衰变为半衰期约为 12 分钟的质子和电子。

**正电子：**带一个正电荷的基本粒子，但其它性质与负电子相同。

**质子：**带正电荷的基本粒子，其质量以原子重量为基准计算为 1。

**相对生物有效性（RBE）：**一个用来表述生物变化相对数量的系数。这种生物变化由特殊类别电离辐射置于人体特别部位的单位能量所引起。RBE 很复杂，因器官不同而不同。由于其复杂性，人们将一个被称为质量系数的简化参数运用到不同形式的辐射中，作为规范化实践来达到估价生物损伤和由此引起患癌风险的目的。

## 测量放射性：装置与方法

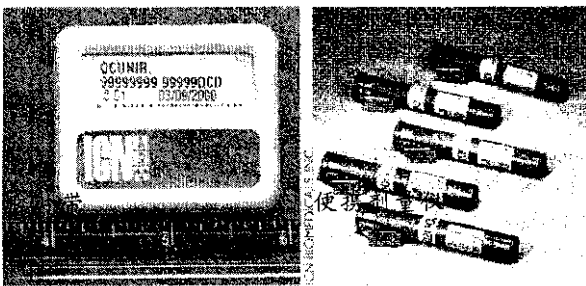
戴维·克罗斯  
丽莎·莱德维奇

用于测量外部受到电离辐射的装置和方法可以分为四组：剂量仪、贝塔和伽吗射线探测器、阿尔法射线探测器、以及中子探测方法。虽然较为间接，也有办法探测内部受到的辐射。我们也将讨论空气、水、植被以及土壤中放射性核素的测量。

### 剂量仪

剂量仪是监测个体外部辐射剂量的装置。两种最常用的剂量仪是热发光剂量仪（TLDs）和胶片带。两种装置都测量积累了一段时间的剂量。例如，胶片带可以戴上一个月。当它们被收集起来分析时，该月的总辐射量就可以确定。

一种广为使用的热发光剂量仪使用氟化锂晶体。当射线被氟化锂吸收时，它将晶体中的电子激发到较高能量水平，这些电子中的一些受到晶体杂质的束缚，保持其活性状态直到晶体变热。当晶体变热时，这些电子逃



逸出受束缚的位置并发出光芒。发出的光芒可以被测量，它与TLDs晶体并推测为个体受到辐射数成比例。一

旦晶体受热达到足够高温，所有受束缚电子将逃逸，而此剂量仪可以重新使用。有些TLDs的敏感度足以测量剂量达几十微拉德的贝塔或伽吗射线。有些TLDs也可以探测中子。

胶片带被用来监测人体受到的贝塔和伽吗射线。为了同时评估不同的射线，一长条胶片布满了吸收器。通过改变吸收器的种类和厚度，人们可以确定皮肤受到的剂量、眼睛晶状体受到的剂量、以及整个人体受到的剂量。有些胶片带上有个小开口并用一片mylar遮住，用来探测贝塔射线，还有一处或多处用金属箔遮住以探测伽吗射线。胶片受到的辐射由胶片冲洗后的黑度确定。胶片带象绷带，可以束紧在口袋或腰带上。

在用胶片带和TLDs测量工人在一段延续时间内辐射剂量的同时，便携式剂量仪测量工人每天受到辐射的剂量。与等待几个星期不同，便携式剂量仪可以探明工人是否在某一工作中受到了危险的剂量。原则上，此人应同时戴胶片带或TLDs和便携式剂量仪。便携式剂量仪可以测得能量上至2兆电子伏特的伽吗射线。它们基本上是使用一节电池的装置。它们由外壳和内部中央电线组成。外壳实质上是个包着半导体材料的塑料管，而内部中央电线与外壳绝缘。附件称为电荷读出器，用来将正电荷置于中央电线。当受到辐射时，这些正电荷中的一部分被辐射产生的离子变为中性。该剂量仪可以直接读出，或连上电荷读出器以确定实际上受到的辐射剂量。便携式剂量仪看上去象钢笔，

可以夹在衬衫口袋中。

### 贝塔和伽吗射线探测器

放射性探测器是用来探测空气中贝塔和伽吗射线的装置。与剂量仪不同，它可以非常及时地直接测出射线，大多数射线探测器探测射线与气体分子的相互作用。当射线在一种气体中慢下来时，它通过从气体原子中排斥电子和剩余正电离子而电离气体。在盖戈尔-穆勒探测器或更为人知的盖戈尔计数器中，无论置于探测器中的能量数或电离辐射的性质，电离的结果产生恒定的输出电脉冲。



测量仪（使用闪烁探针  
[未显示]或薄饼盖戈尔-  
穆勒探针[右侧]）

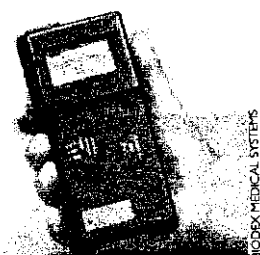
薄饼盖戈尔-穆勒探针（也被  
称为“举止轻盈者”）

另一方面，闪烁计数器和气体流量比例计数器的输出结果与置于测量器中的能量数成比例。

盖戈尔计数器可以计算贝塔粒子和伽吗射线。如果按上一个足够薄的开口（例如，象在“薄饼”探测器一样），盖戈尔计数器也可以探测阿尔法粒子。整个装置事实上由两部分组成：一个盖戈尔-穆勒管（电离产生于其中的探测器）和电子扩大器（它激活一个计算电离的装置）。盖戈尔-穆勒（GM）管由一个圆柱形空腔构成，其中心延伸一金属导线，它与外壳绝缘。该管内含有惰性气体，如氩或氖。高电压提供的正极与中央导线相联；负极与管子外壳相联。

测量辐射源的过程始于将盖戈尔计数器置于辐射源旁边。自发贝塔粒子或伽吗射线将随后电离气体原子。由此产生的电子被强烈吸引到导线正极。在电子移动途中，也有其它被电离的气体分子。这些新电子将进一步产生电离，结果是电离流。一个初始电离导致几十亿次电离，在中央呈正电的导线处集结起来。然后，电子扩大器产生作用，启动计数器装置。

对探测器中气体产生作用并引起电离的贝塔粒子将指示数字。然而，许多伽吗射线将穿过整个气体而不引起任何相互作用，这样就没有记录（除非使用较厚吸收器来捕获高能伽吗射线）。在盖戈尔-穆勒管探测贝塔粒子比伽吗射线更有效的同时，必须对管子进行设计使其开口细到足以允许贝塔粒子穿过。其输出信号无法用来提供有关产生计数的入射粒子类型的信息。为了区分贝塔粒子或伽吗射线，可以使用吸收器。比如，在辐射源和盖戈尔-穆勒管间加入薄型吸收器，就会制止所有贝塔粒子，而允许伽吗射线进入探测器。有



和没有吸收器的计数率可以用来区别贝塔粒子和伽吗射线。

便携测量仪（测量阿尔法、贝塔和伽吗射线）

在盖戈尔计数器点算由入射辐射与气体原子相互作用产生的电离数的同时，闪烁计数器对入射辐射本身的能量敏感。闪烁计数器由一种其受到辐射撞击时会闪光的材料光线扩大器制成。当贝塔粒子在闪烁器中减速时，它传递给闪烁器中原子的能量的

一部分转变为光。伽玛射线穿过闪烁器时，它们产生电子，这些电子反过来就象贝塔粒子一样运动，一部分能量转变为光。

闪烁器有各种形状和尺寸。有些是塑料的，而有些为高密度的碘化钠晶体。探测伽玛射线必须要大型、高密度的闪烁器，因为高能量的伽玛射线可以穿过一般厚度的普通物质（人类组织、水泥墙、水等），而几乎不发生相互作用。闪烁器中产生的光线数可以用称为光电倍增管的光线放大器测量。每个光线脉冲的数字表示测量到一次能量在闪烁器中的置放。测量这种能量的能力表明，来自不同来源的辐射可以识别，同时人们可以估算此来源的大小。以上讨论的其它装置无法使我们识别光子的能量数（就是说，伽玛射线的类别）。确定伽玛射线的类别使我们得以推断释放其的放射性核素的类别。

盖戈尔计数器可以制成小型手提装置。它们易于作为便携式辐射监测器使用。闪烁器通常是大型实验室设备。

### 阿尔法射线探测器

探测阿尔法粒子在技术上比探测贝塔粒子和伽玛射线更困难。象贝塔和伽玛射线一样，阿尔法粒子可以产生电离，但在穿透力方面它们不同。

原则上，阿尔法粒子可以用普通的盖戈尔-穆勒管探测。盖戈尔-穆勒计数器装上一个由非常薄的聚酯薄膜开口（如薄饼盖戈尔-穆勒探针）制成的探测器，可以用来探测阿尔法以及伽玛和贝塔辐射。然而，测量阿尔法粒子最好的是所谓的气体流量成比例计数器。

## 用来测量电离辐射的装置

装置	可以测量
胶片带	贝塔粒子 伽玛射线
热发光剂量仪 (TLD)	贝塔粒子 伽玛射线 中子
便携剂量仪	伽玛射线
盖戈尔-穆勒计数器 (盖戈尔计数器)	阿尔法粒子 (如果使用适当的探测器) 贝塔粒子 伽玛射线
闪烁计数器	贝塔粒子 伽玛射线
气体流量成比例计数器	阿尔法粒子 非常低能量的伽玛射线 和贝塔粒子

在一些成比例计数器中，将要测量的放射源或样品直接放入探测器中。在这些“无开口”管中，样品与计数器气体直接接触。象在盖戈尔记述器中，由成比例计数器产生的信号来自电荷，而反过来电荷由入射射线引起的气体电离产生。探测器中的气体通常是 90%氩和 10%甲烷，并在大气压下流过空腔。

与阅读每分钟的计数或每小时的微伦琴相结合（就它们产生的电离而言）的测量阿尔法、贝塔和伽玛射线的手提装置在商业上可以获得（见便携测量仪照片，第 15 页）。例如，阿尔法计数器在工人处理铀（阿尔法释放者）的地方使用。

### 中子探测

伽玛射线被归为电离辐射。它们是电磁射线（就象光），没有电荷与其相联。它们从中性原子带走电子，留下正离子。阿尔法和贝塔粒子是离子，换句话说，它们带净电荷。阿尔



法粒子带 2 个净电荷。贝塔粒子带一个负或正的电荷。以上讨论过的各种方案已经被用于将离子或电离产物变为可测量的事物（计数）。

另一方面，中子是中性子。它们不带电荷，不引起直接电离。中子可以通过它们在核反应中产生的带电粒子或间接电离产生的伽吗射线间接探测到。例如，典型的捕获反应包括由同位素硼 10 捕获的中子。这会激发核反应，这将产生具有特性的伽吗射线，而伽吗射线可以由以上描写的伽吗射线探测方法中的一种探测到。然而，伽吗探测器必须要区分核反应中产生的伽吗射线和来自其它来源的伽吗射线。

做到这一点并不容易，但是如果人们有办法探测到与辐射相关联的能量（见闪烁计数器，上文），那么人们可以由此出发找出与辐射源（例如，已知的衰变产物伽吗射线）也许有关的某些范围内的能量。建立将有特点的伽吗射线与其它伽吗射线区分开来的电路是可能的。

## 环境措施

使用以上描述的装置，与空气监测站、实验室分析的水文取样、土壤取样以及其他设备和方法相结合，可以测量空气、水、植被和土壤中的放射性核素。要探测工作场所空气中的放射性数量，需要用纸过滤器提取一定数量的空气，然后用以上描写过的探测器中的一种进行测量。

液体中的放射性用液体闪烁计数器测量。如果液体是水，这一过程相当常规。例如，使用放射性材料的设施必须测液体废料中的放射性以确定它是否低于废水存放的标准。确定其它液体中的放射性程度，特别是未知

液体中的，比较困难。

测量土壤中释放伽吗射线放射性核素的浓度可以用简易的手提盖戈尔计数器在野外进行。然而，要探测特殊的释放阿尔法或贝塔粒子的放射性核素，就需要用通常在实验室中才有的闪烁计数器或气体流量成比例计数器分析土壤样本。

许多从事放射性核素测量的实验室遵守试验议定书。美国能源部的环境测量实验室（EML）通过其质量评估项目评估参与的实验室。这一项目比较参与实验室的分析表现。环境测量实验室每年约两次公布其评估报告，并使这些报告可以通过网址：<http://www.eml.doe.gov/qap/>找到。

## 内部剂量<sup>1</sup>

外部监测装置，诸如 TLDs，可以测量一个工人已经受到多少外部辐射，但是无法测到通过呼吸、吞食或其它方法进入人体的放射性核素引起的辐射。估计来自人体内部物质的剂量通常困难得多。内部剂量的大小将取决于物质的化学形式、其在人体中的途径和分布、从人体中消除的速率（称为生物半衰期），以及其它因素。由于人与人的新陈代谢因素相当不同，个体从特殊核素中受到的内部剂量可能与用平均生物半衰期计算出来的剂量大不相同。

内部剂量可以同不同方法监测。一种常用的办法是测量尿液中放射性核素的浓度。如果人们知道相对于不同人体负担的排泄率，计算出这些人体负担并由此推断辐射计量就成为可能。

另一种方法是测量人体内部核素释放出来的伽吗射线。既然一部分伽

吗射线穿透人体，由人体内部核素释放的伽玛辐射的一部分就可以逃逸出人体。将这个工人或他或她身体的一部分看作“计数器”，就是测量伽玛射线中的空腔，就可以测量这一数据。这样，我们就有个“整个人体计数器”、“肺计数器”等等。必须十分小心地在测量内部人体负担时排除或修正其它环境放射性来源，特别是氦及其衰变产物。

工人受到的内部（辐射）剂量也可以通过测量工作场所空气中放射性核素的浓度来进行间接评估。在辐射较可能产生的地区，工人们可以戴上便携式空气监测装置以测量呼吸区域——也就是说，非常接近其脸部的空气中放射性核素的浓度。如果呼吸频率、工人戴的防护装置（如果有的话）的效率以及其它要素已知，可以估算工人受到的内部（辐射）剂量。

放射性监测准确而足够细致的实施十分关键。例如，胶片带和 TLDs 在不使用时，必须适当存放，使它们不会在工人受辐射时期的中间受到污染。还有，受到内部辐射威胁的工人必须经常受到监测，其频率应足够用

来确定放射性核素对人体内部造成的负担。

在核武器工业中，工人用剂量仪和受辐射记录严重缺乏。1994 年，美国能源部承认，它所有的工人受到外部辐射的记录不完全、不可靠、并且误导视听，这部分是由于测量装置测量口径差，发行了多种带条，以及剂量仪设置不当。<sup>2</sup>较近时期，一项评估约 1000 个在欧洲的个人监测装置的研究报告发现，通过贝塔和中子剂量监测器记录下来的外部剂量被严重低估了。<sup>3</sup>

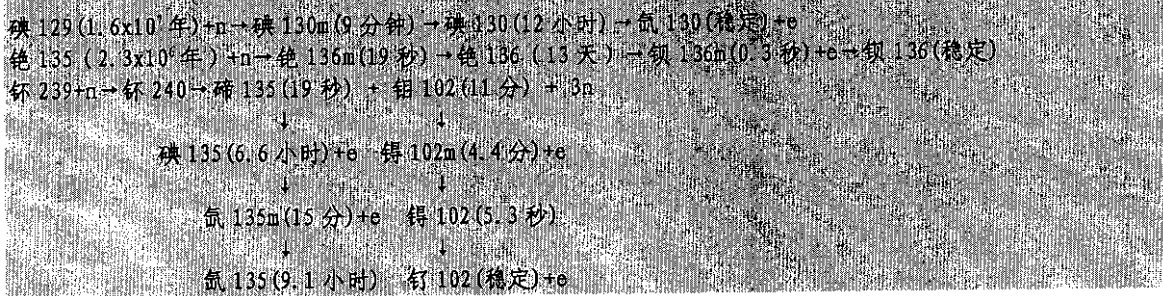
<sup>1</sup> 摘自《科学为民主的行动》第 6 卷第 2 期，1997 年 11 月。

<sup>2</sup> 这一方面更多的信息，见《科学为民主的行动》第 6 卷第 2 期，1997 年 11 月，以及《核荒地》，麦克贾尼、胡和严编，坎布里奇：麻省理工学院出版社，1995 年。

<sup>3</sup> J. M. 鲍迪等，“在欧盟成员国和瑞士常规评估个人（受到辐射）剂量（光子、贝塔和中子）的剂量仪的服务的表现测试”，辐射防护剂量仪 89（1-2），第 107-154 页（2000），报道于《新科学家》2000 年 8 月 26 日。

**错 误 更 正**

在上一期《科学为民主的行动》（第 8 卷第 3 期，2000 年 8 月）的文章“废物埋藏：核炼金投机”中，我们错置了两个电子，并在另一处缺失了一个电子，以下三个方程是第 5 页第一和第二栏底部“衰变物理学”部分出现的那些方程的修正形式。该文章已在能源与环境研究所网址：<http://www.leer.org>上更新。能源与环境研究所出版物纠错清单在该网址也可找到。



↓  
绝 135m (53 分) + e

↓  
绝 135 (2.3 × 10<sup>6</sup> 年)



# Dear Arjun

亲爱的阿琼：

“废物加速器嬗变”确切地说是什  
么？一些新闻报道和其它一些材料  
似乎说，加速器是将乏核燃料嬗变为  
较好形式的废物所需要的唯一条件。  
这种说法对吗？

——与钚打交道者，法国拉阿格

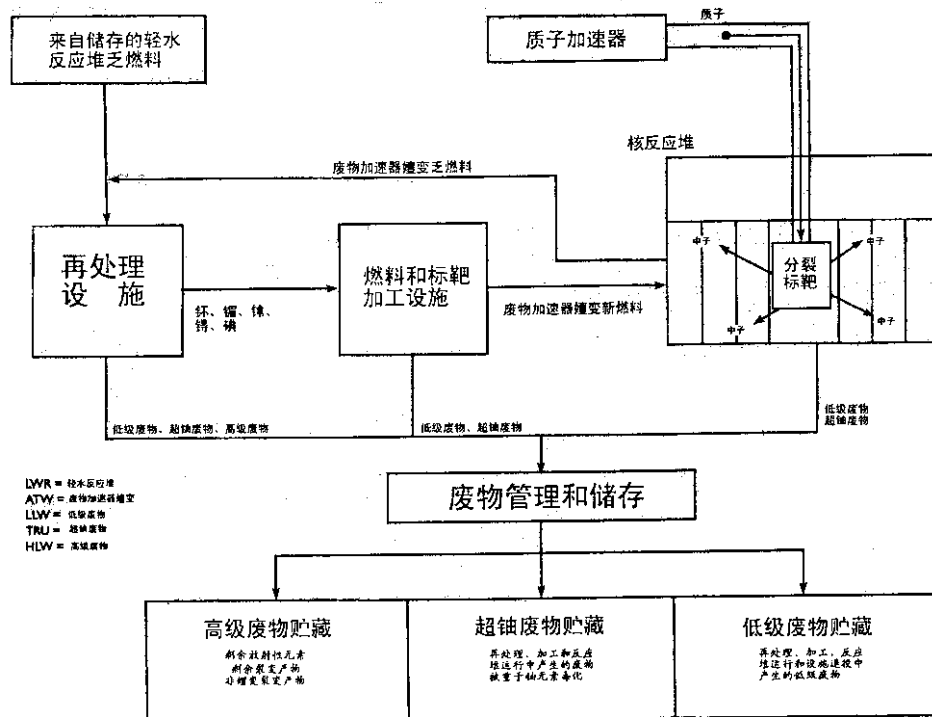
亲爱的与钚打交道者：

“废物加速器嬗变”这一术语事  
实上来自古代炼金士。大多数人知道  
他们探求将铅变成金。其中一小部分  
人也担心他们增多的城市正制造过多  
的垃圾。在寻找方法消除垃圾时，他  
们产生了“废物加速器嬗变”的念头。  
这包括用弹射器将垃圾仍到很远的地  
方，当垃圾接触地面时，它会破裂，  
或“嬗变”为碎片，这些碎片很小以

至于无人会注意或担心它们。结果，  
他们造了一个试验性垃圾弹射器或者  
说“废物加速器”，但很快他们发现，  
它只是将垃圾散步到广大地区，而不  
是消除它。而这就是这种废物加速器  
嬗变的下场。

现在，废物加速器嬗变指处理当  
前核反应堆中高放射性乏燃料的一套  
建议中的核技术。对你的问题的简短  
回答是废物加速器嬗变所要求的比仅  
有加速器多得多。每个加速器要向一  
个（或有时候多个）核反应堆提供中  
子。与这些加速器/反应堆站相联系  
的是核燃料再处理、燃料加工和废物  
管理设施。此外，最后仍需要储存池  
来处置来自废物加速器嬗变的剩余废  
物以及所有飞舞 2 加速器嬗变不能嬗  
变的放射性核素。普通废物加速器嬗  
变系统流程图见下图解。

对你问题更详细的解答，请参见



普通废物加速器嬗变系统图解。向空气和水中释放的放射性和非放射性毒害的最大比例可能来自再处理过程，但这里在图中显示。

我们网址上“亲爱的阿琼”栏目的扩充版。

有关嬗变和废物加速器嬗变的更多信息，见《科学为民主的行动》第8卷第3期（2000年5月）或“核炼金术投机：对嬗变作为核废料管理战

略的评估”。以上通讯和报告的部分可以在能源与环境研究所网址<http://www.ieer.org>找到，或可以向能源与环境研究所订购。

现在有平装本了！

### 核荒地：核武器生产及其健康和环境效应 全球指南



麻省理工学院出版社，2000·669页，平装版，编后记提供简要情况更新

由阿琼·麦克贾尼、哈瓦德·胡和凯瑟琳·严编·国际物理学家防止核战争与能源与环境研究所联合项目

适用于学者、学生、政策制定者、记者以及和平与环保活动家的手册，提供每个已经宣布和事实上核武器国家核武器项目发展的简史。这一完整的文献和分析曝光政府机密，戳穿骗局，这些机密和骗局掩盖了（生产）那些武器想要保护的人民和土地所受到的损害。

能源与环境研究所价格：\$30.00，包括邮费和包装（美国）

订购请联络能源与环境研究所

1-301-270-5500（电话） | 1-301-270-3029（传真） | [ieer@ieer.org](mailto:ieer@ieer.org) | [www.ieer.org](http://www.ieer.org)