

隋 鹏 程 编著



0024786

核能开发与利用的 安全防护知识

F-416

2

科学普及出版社

427315



2 016 9340 8

核能开发与利用的 安全防护知识

隋鹏程 编著



科学普及出版社

核能开发与利用的安全防护知识

隋鹏程 编著

责任编辑：黄明鲁

封面设计：窦桂芳

科学普及出版社出版(北京白石桥紫竹院公园内)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
朝 阳 六 六 七 厂 印 刷

开本：787×1092毫米 $1/32$ 印张：27/8 字数：59千字

1981年12月第1版 1981年12月第1次印刷

印数：1—1,500册 定价：0.27元

统一书号：15051·1019 本社书号：0199

内 容 提 要

随着科学技术的发展，原子能已广泛应用于国民经济各个部门，造福于人类。但是作为核原料的铀、钍等矿物的放射性危害，却又有其不安全的一面。如何认识这种危害，以加强防护，确保安全生产，是“四化”建设中极为重要的一项工作。本书介绍了核能开发与利用的安全防护知识。作者多年从事这项科学研究与教学工作，对放射性矿物的有害因素，以及矿山开采和核能利用的安全防护措施等，作了较详尽的叙述，既可供从事这一专业的工作者参考，也适合于关心和利用原子能的各方面的同志阅读。

写在书的前头

原子能在世界各先进工业化国家已经广泛应用于国民经济的各个部门。二十世纪四十年代实现了人工核裂变以后，铀成了生产核武器的战略物质。铀、钍等天然放射性元素是原子能的核燃料。原子能源可使舰艇、远航船舶和破冰船在不增添燃料的情况下长期航行。核反应堆是一种维持可控制的核链式反应的设备。它既可以用来获得新的核燃料，或用来获得能量，也可从中获得人工放射性同位素。1966年以后，以铀作燃料的发电用反应堆已发展到能在经济上与其他能源相竞争的地步，铀的新市场不断扩大。现在核能已被认为是很有希望的新能源，核发电大有前途，对铀的需要不断增加。1939年，科学家发现了中子作用下铀原子核的分裂反应，出现了粒子加速器。它是用来加速基本原子粒子的设备，它依靠电场或磁场的能量来增加带电粒子的速度。在原子物理学发展的开始阶段，人们就曾利用铀、镭、钋作原料，以便放出快速粒子来作实验研究。科学家们依靠天然放射性元素曾经有过许多重大的发现。例如，中子的发现、人工放射性的发现以及核分裂的发现。后来又创造了现代的加速器，并依靠它获得高速度的强大的原子粒子。此后更加广泛地利用了上述发现，进一步揭露出原子粒子的内部奥妙。

放射性同位素在医学上挽救了千百万病人的生命。在人工放射性同位素发现以前，医学上就用天然铀、镭、新钍等放

射性元素作治疗。又如“电子感应加速器”可以治疗恶性肿瘤。近年来，医学、生物学、地质学、考古学以及其他科学部门，都已经广泛地应用放射性同位素。天然的或人工的放射性同位素都离不开核能源，都和铀钍矿物与反应堆有关联。

工业上利用原子能辐射作用进行许多化学反应过程。工业的物质分离以及催化过程的研究与利用，核辐射都有着重大的经济意义。在冶金工业和机械制造业中，用放射性同位素来确定合金的结构，进行金属的磨损试验以及用于机器制件的探伤等。

以示踪原子为基础的新的研究方法已广泛应用于自然科学的各种领域。

核能源的铀是190年前发现的。在铀矿的开发以及利用原子能的过程中，虽然有对人类造福的一面，但也有其不安全因素危害人的一面。姑且不谈原子武器的杀伤，仅只核能的和平利用，就有不少人牺牲在放射性危害之中。因此，必须了解开发放射性矿山的客观规律，懂得利用核能的安全防护知识，做到安全生产，保护铀矿工人和从事放射性物质生产与研究的工作人员的安全、健康，促进核能的开发与利用，为祖国的四个现代化服务。这就是编写本书的目的。

本书的放射性地质及矿山防护部分曾蒙东北工学院关绍宗、刘海宴二位教授审核，铀矿辐射防护历史蒙湖南第六研究所张启宇工程师提供部分材料在此表示衷心感谢。

由于本人知识面较窄，写作水平不高，谬误之处一定不少，请予批评指正。

编著者

00214/11

目 录

第一部分 放射性和放射性矿物	1
天然铀和钍是什么样的物质	1
地壳中的铀钍矿石	4
原子核和放射性同位素	5
放射性矿山常碰到的三种射线辐射	7
放射性防护科学的产生	8
放射性同位素的蜕变规律	9
地下核燃料的“三大家族”	11
放射性强度与剂量	12
第二部分 放射性矿山的有害因素	16
射线对人体的影响	16
矿工肺癌的历史记载	18
氡的子孙是罪魁祸首	19
矿内大气中氡的性质	21
氡有八代子孙	23
氡向矿内大气中涌出的影响因素	24
氡子体和放射性气溶胶	26
氡和氡子体对人体的危害	29
矽(硅)尘危害与氡及其子体的复合作用	31
铀钍矿物的采选冶过程中不安全因素的估量	33
第三部分 开采核燃料的安全防护措施	36
放射性矿体开采的一般知识	36
放射性矿山地面总体布局的防护要求	37

开拓与采矿的一般安全要求	38
通风是防止矿内大气污染的主要措施	39
排氦的风量计算	47
防止放射性粉尘和气溶胶危害的措施	51
矿工个体防护和剂量监督	58
采冶过程中含铀废水对环境的污染	61
第四部分 核能利用的安全防护知识	66
原子能发电站的劳动保护	66
粒子加速器及其防护措施	70
金属机件和设备 γ 探伤时的防护	73
利用放射性同位素研究机器细件的磨损	77
贮运放射性同位素的安全防护	79

第一部分 放射性和放射性矿物

天然铀和钍是什么样的物质

铀是1789年由德国人克拉普罗特首先发现的，是从沥青铀矿中分离出来的。当时他认为是“铀”的那种粉末状物质，实际上是二氧化铀 (UO_2)。只是在1841年法国人别里果才从矿石中提炼出金属铀。在发现铀的放射性以前，人们已经在开采铀矿石，整整一百年时间，开采铀矿只是为了从中提取黄色的铀染料——“铀黄”。它是一种铀盐，其典型成分是 $\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$ ，用来涂染陶瓷和玻璃。玻璃用铀着色后就呈现黄绿的荧光色彩。1896年柏克勒尔发现了铀化合物的放射性辐射，两年以后，1898年居里夫妇在铀矿中发现了新的放射性元素——镭和钋。经过四年的努力，他们从沥青铀矿的矿渣中提取了第一次纯镭。从此，铀矿石的开采和铀盐的选冶就实行了变革。这些厂矿的生产目的变成了提炼镭，而铀只是其副产品。根据文献记载，铀曾用于照相和提取化学试剂，并和钨、钼的同族元素一样，曾经将铀用于炼钢的添加剂。

1939年发现铀的核裂变现象，1942年实现了裂变反应，这就完全改变了铀的应用范围。目前，铀是获取原子能的主要原料，也是生产核武器的战略物质。在特殊的铀反应堆或

核反应堆中能逐渐释放出原子能。作为核燃料的铀、钍以及它们共生的许多矿物和矿床，分布遍于全世界。世界各国均广泛地采用它们作为获取原子能的原料。五十年代前后，美国、苏联、加拿大、法国、刚果、南非、澳大利亚等国都已逐步加大了开发铀矿的规模。

1954年，苏联首先建成了第一座原子能发电站。它所应用的是异质反应堆。该堆利用含5%的 U^{235} 的浓缩铀作为核燃料。许多国家的动力堆不仅使用金属铀，而且还用二氧化铀，以及铀化合物的溶液和悬浮液。

铀是一种放射性化学元素，在周期表中属于Ⅵ族。天然铀是三个元素的混合物，它们之间有一定的比例关系： U^{238} 占99.28%； U^{234} 占0.005%； AcU^{235} （钷铀）占0.7%。

在自然界的各种铀矿物中，在煤和石油的矿层中，在海水和其它天然水中都有铀，不过含量多少不等，有的只含有微量，由于技术水平所限，难于开发利用的也不在少数。铀在铀的天然矿物中的含量为每吨铀内含0.34克。

纯铀是一种发亮的浅色金属。在空气中它很快变暗，为了一层薄薄的氧化物所覆盖。

铀的化学性质很复杂，铀有2—6的全部化合价数。它具有两性的特征，很容易与各种有机和无机化合物起反应。最著名的铀化合物有：硝酸铀酰、硫酸铀酰和碳酸铀酰。铀容易和氧化合，同卤化物、硫化物、碳化物等也起反应。铀的物理性质和放射性质，将在后边结合具体问题再做讲述。

铀及其化合物的化学毒性和放射特性，对人的健康均有危害。易溶于水的铀化合物毒性最大；难溶于水的则毒性较小。化合物的毒性还取决于灰尘粒子的大小，细小的灰尘毒

性最大。铀化合物可以通过肺、消化道、无伤的皮肤进入机体，引起急性和慢性中毒，主要是肾脏损伤、尿毒症、肝炎、神经系统损伤、贫血等。

作为核能原料，除铀之外还有钍等。

钍及其化合物在各工业部门中用途很广。金属钍及其化合物可用作电灯的气体吸收剂，白炽灯丝的钨的附加剂，用于有机和无机合成时的触媒剂。钍加入合金后能改善铁、镍、钴、铜、钼等的性质。在美国，钍用来制造镁合金，应用于航空工业和弹道导弹的生产。

钍还可以用于电子真空工业，制造X射线管的对阴极、雷达灯泡、高压水银弧形灯。

钍同铀一样，是获取核燃料的主要来源。钍与浓缩铀的合金可用以制备反应堆的释热元件，在中子作用下获得核燃料 U^{233} 。许多国家也有用钍作燃料建造反应堆。目前钍的开采、冶炼、制取等工业规模日益增大。

钍是1828年由别勒切利乌斯首先发现的，并由他命名以纪念古代斯基泰的那维亚的“钍神”。

钍也是重金属，化合价为4，原子量为232.12，原子序数90，比重12.16，位于周期表第Ⅳ族的最后列。钍与盐酸强烈反应。钍的毒性主要是损伤神经系统和造血器官。

铀、钍及其衰变产物最严重的远期后果就是发生恶性肿瘤。

《中华人民共和国矿山安全卫生法》规定：井下作业地点，天然铀不得超过每立方米空气中0.02毫克；天然钍也不得超过0.02毫克/立方米。

地壳中的铀钍矿石

铀与钍在地壳中的分布比其他矿物广，现在已经知道的含铀矿物就有百种以上。铀钍矿床的类型繁多。铀、钍与其他矿物共生的更多。例如，铀与金属矿共生，我国某铜矿的矿床中有沥青铀矿、铜铀云母等，铀的品位高低不等；也有的在金属矿体的围岩内形成铀矿体，如某铅锌矿的围岩中含有铀微量的沥青铀矿；某矿体围岩接触带内有铀矿化浸染或团块状，主要是铀铀矿、晶质铀矿，品位不均，在1%—0.004%之间；我国不少稀有、稀土金属矿床里有铀与钍的共生，但分布较为分散。

地壳内的岩浆矿床中，花岗岩、正长岩、辉长岩、黄绿石、方钍石等都有含铀矿物。

伟晶岩矿床中，如铀铀矿以及暗色黑稀金矿、晶质铀矿、硅铀铀矿、黑铀钙铀矿等；在白云母的伟晶岩中，铀也形成铀铀矿和褐铀铀矿等单独矿物，但多数为铀铁矿和绿柱石等不含铀的矿物。伟晶岩中的钍见于独居石、钍石、褐帘石、铀钍类的矿物中。铀钍常与稀土及锆元素共生。

热液形成的多金属矿床 矿脉主要是石英，其中富集有金属硫化矿物，如铜、铅、锌、钨、钼、锡、锑、砷、汞、铋、镍、钴、金、银、锆、镓、铟、碲、硒以及铀。高温热液矿床，铀主要呈沥青铀矿而析出于石英、锡石的矿脉中，或与铋、钴、铋、砷等硫化物共生。中温与低温的热液矿床中，沥青铀矿是主要类型，其共生矿物有：方解石、白云石、石英、赤铁矿、黄铁矿以及萤石。钍以独居石和钍石存在。

沉积矿床 陆相沉积主要是含铀钒的砂岩；含铀湖相石灰岩中有非晶质铀矿；海成沉积中常见的是含铀磷块岩、黑色页岩和石灰岩。含铀的煤及煤质页岩中，铀石与铀黑为原生铀矿物。钍仍以独居石形式集中于冲击层中，也有的钍矿物在重砂中存在。铀钍也含在铝土矿中。

有工业价值的铀矿物只有几种。它们是：沥青铀矿（氧化铀类）、钾钒铀矿、铜铀云母、钙铀云母等。前两种矿物价值最大。

沥青铀矿主要含有八氧化三铀（ U_3O_8 ），是一种暗黑蓝色的矿石。铀矿石中必定有镭和铅，因为它们是铀的衰变产物。沥青铀矿是一种火成岩矿，钾钒铀矿（ $K_2UO_2 \cdot V_2O_5 \cdot 3H_2O$ ）是一种水成沉积岩，一般见于砂岩中。

含铀矿体呈脉状、矿柱状和不规则的形状。矿脉的大小不等，从几米到几十米长。铀及其共生矿物的矿床多数埋藏在深度为几百米到一千米左右的地下。几百年来为了开采出这种有用的矿物，不知有多少矿工付出巨大的代价，牺牲了许多宝贵的生命。只有作好放射性矿山的防护，才能保证安全生产。

原子核和放射性同位素

一切物质的分子都是由原子组成的。物质的基本粒子有质子、中子和电子，并由它们构成原子。原子的直径大约为一亿分之一厘米。它由两部分组成：不大的、坚实的、带有正电荷的核心，叫做原子核；另一部分是在原子核周围沿着一定轨道旋转着的外层电子，或叫轨道电子。原子核的体积比原子小得多，仅占原子大小的万分之一。但是原子核的质量

几乎等于整个原子的质量，这是由于外层电子的质量比原子核的质量小得多，相比之下，电子的质量已经微不足道的缘故。精确地说，原子核的质量占原子全部质量的 99.95%。

原子核由质量几乎相等的两种质点（粒子）组成：即不带电荷的中子和带有正电荷的质子。质子的电荷量与外层电子的电荷量相等，但符号相反。质子数就是核中电荷数，也就是门捷列夫元素周期表上相应化学元素的原子序数。外层电子的数目决定了各种元素的化学性质。具有电子结构相同的元素，其化学性质也相同。

原子序数相同的元素，在元素周期表上处于同一位置。也就是电荷相同但质量不同（电荷数相同就是质子数相同，质量不同是因为中子数不等）的原子核称之为该元素的同位素。同一元素的同位素在化学性质上几乎是完全相同的。

同位素分稳定的与不稳定的两种：原子核结构不会自发地发生改变的同位素；原子核不受外在原因的作用就自发地改变了核的构成，而且在核转换的同时放射出有害的射线。后者叫做放射性同位素。它改变了元素的理化性质。

自然界所遇的放射性同位素，如上述的铀、钍矿床中的矿物元素，属于天然放射性同位素；应用加速器或反应堆等核反应的方法人工获得的同位素，属于人造放射性同位素。

掌握放射性同位素的理化性质和生物效应，可以在生产斗争中为人民谋福的同时，控制它危害人的一面，作到安全生产。

天然放射性同位素的原子序数都大于81，约有44种；而人造的放射性同位素，由于核物理的发达，目前已超过一千五百种。

放射性同位素原子核自发蜕变过程放出的各种射线的辐

射，当它和物质相互作用时，在物质中能直接或间接地产生带电的离子，且具有相当大的能量，并产生生物学效应，这叫做致电离辐射。

放射性矿山常碰到的三种射线辐射

1. 阿耳法辐射(或称 α 射线、甲种粒子) 一般只在原子序数83以上的天然放射性同位素，如镭、钍、铀等的原子核蜕变时才形成 α 射线。它是带有两个正电荷和质量数为4的氦原子核。它的质量约为电子的七千倍，以每小时2千万米的高速从原子核中逸出，能量为2—9百万电子伏。它在物质中传播的轨道是直线，而且射程较短，在空气中的射程只有1—11厘米；在生物软组织中只有20—40微米；在铅、铝等金属物质中只有10微米。所以，作为外照射源来说， α 射线并无危险，只要距它20厘米，或人体前边设置由纸、铝、玻璃或其他材料制成的简单屏蔽，就足以将辐射全部吸收掉。但由于它有很强的电离作用，所以在进入人体并积聚在机体内部时所形成的“内照射”，能损伤内脏器官，较为危险。

2. 倍塔辐射(或称 β 射线、乙种粒子) 天然放射性同位素的倍塔辐射，实际上是原子核内某一中子转变为质子时所放出的一种负电子流。其在物质中的轨道不是直线的，它的穿透能力较 α 射线为大，在空气中的最大射程为14.5米，在铝中为4.9毫米，但它的电离能量仅为 α 射线的几分之一，一般不超过3百万电子伏。 β 射线对人体的作用不仅在外照射时对皮肤、粘膜引起伤害，也能进入体内危害内部器官。应用专门屏蔽或增加距辐射源的距离都能避免其外部照射。

3. 伽马辐射 (γ 射线或丙种射线) 它属于波长极短的电磁辐射,被认为是能的光子-量子流。 γ 射线与X射线(伦琴射线)十分相似,区别只是光子的能量不同而已。因为 γ 光子不带电,所以在 γ 蜕变后,它的原子量和原子序数都不变化。 γ 射线的速度等于光速,每秒高达30万公里,它不仅放出大量能量,而且射程极大,穿透性比 β 射线大50—100倍,比 α 射线大一万倍。由此可见, γ 射线的外照射具有最大的危险性,是防护的重点;但由于电离能力弱,对内照射的危险性则较小。

应当指出,在放射性矿物元素的蜕变过程中, γ 射线有时与 α 、 β 射线同时发生。

总之,三种放射性蜕变的个性虽不尽相同,但有许多共同点。首先,都对人体产生致电离辐射;其中 α 射线最强, γ 射线最弱, β 射线居中。其次,三种射线都有一定的穿透能力,其中 γ 射线最强, α 射线最弱, β 射线介于二者之间。最后,三种辐射都能引起生物作用,对人体都有危害,而且蜕变过程中都放出不少能量。

放射性防护科学的产生

自从1895年伦琴教授发现X射线(即伦琴射线)和1896年安德烈·柏克勒尔和玛丽·居里发现放射性以后,就产生了放射防护问题。

伦琴射线发现几个月后,就出现了使用这些射线的实验工作者们的疾病报导。两年后,文献上描述了23个在伦琴射线的作用所引起的皮肤疾患病例。1898年法国居里夫妇又发现了镭元素,这一放射性元素更显示出具有破坏生物机体的

能力。柏克勒尔曾把微量的镭遗放在背心口袋里，当几小时之后，发现这一遗忘时，就在与口袋相应的皮肤位置上发生一个红斑。居里夫人也是由于长期受到镭的照射作用而在1934年逝世的。由于人们对射线危害作用的逐步了解，尤其是放射线强烈的生物学作用被发现以后，促使人们去寻找防护放射性危害的方法。现在，由于天然和人工放射性同位素的广泛利用，由于原子物理学和高能物理学的发展，防护问题愈来愈具有重要的意义，防护的方法也在不断地改进。

研究放射性防护，首先要了解放射性同位素的蜕变规律和放射性强度以及人体吸收放射性的剂量等的关系。

放射性同位素的蜕变规律

1. 位移定律 具有阿耳法辐射的某种放射性物质的原子核，经过 α 蜕变后，其核内要失去两个质子和两个中子，它的质量数就要减少4，原子序数由于减少两个电荷而要减少2。因此，在门捷列夫元素周期表内一定要向左移动两格而形成一个新元素；若某放射性物质经倍塔蜕变后，放出一个电子，相应增加一个正电荷，从而使原子序数增加1，所以经 β 辐射后的新元素一定在门捷列夫元素周期表上向右移动一格；当某一原子核经过伽马蜕变后，由于 γ 光电不带电，所以新元素的原子序数没有变化，在周期表上不变位。

2. 半衰期 1908年卢瑟福发现，盛有少量镭盐的密封容器内出现了两种以前没有的新气体：一个是氦气（化学符号 He）；另一个当时不知道是什么东西，叫镭射气，即现在我们称之为氡气（化学符号 Rn^{222} ）的惰性气体。其后的