

铀生产工作的卫生防护

王曉聞編著

中国工业出版社

序 言

由于原子能事业的迅速发展，天然放射性物质，特别是目前原子能燃料的主要来源铀的生产工业，越来越显出其重要的地位；而在铀矿勘探与开采、铀化合物制备、金属铀冶炼以及有关铀的应用与研究试验的一系列工作中，力求改善劳动条件与防止环境污染，以保证工作人员与周围居民的健康，也就成为愈加迫切的问题。

铀及其化合物不仅在化学性质上是极毒的；且由于天然放射性衰变的缘故，它们还会使工作人员受到 α 、 β 及 γ 等射线的损害。除了了解生产工艺过程及其可能产生的毒害因素之外，还应该充分掌握这些有害物质的特性（特别是它们的放射特性）与它们对人体的危害作用；然后才能适当地采取各种有效的安全技术、环境卫生以及个人防护与保健等措施，以做好铀生产中的卫生防护工作。

可是，自从1789年铀被发现以后的一百七十多年中，人们对于铀的化学毒性与放射损害方面的研究做得还很不够，关于铀生产工作中劳动保护方面的资料也不多，现将散见各处的有关铀生产工作中卫生防护的文献资料加以归纳整理，写成此书，以供参考。

作 者

1962年5月于北京

第一章 緒 論

第一节 鈾的来源及用途

鈾是一种稀散的元素；但它在自然界中的相对含量却不比一些常見的金屬少。根据許多不同的資料，鈾在地壳表层的平均含量約为 $3-4 \times 10^{-4}\%$ ，在普通岩石中的含量約 $0.2-25 \times 10^{-4}\%$ 。依此，若以地壳表层的厚度为20公里計算，則其中鈾的总含量約达 1.3×10^{14} 吨之多。这就是說，其总量約为金的1000倍，銀的30倍，而几乎与鉛和鋅相等。

鈾在自然界中常以各种不同的鈾矿物状态存在。在煤炭和石油的沉积层中，在海水及其他天然水中也含有一定数量的鈾。甚至在土壤中、在所有动植物体内以及在宇宙空間也都存在着微量的鈾。

天然岩石中的鈾常常以四价和六价的阳离子状态存在。鈾矿成分中还常含有碱土金屬、稀土和其他重金屬；因此，其組成极为多端，有时还非常复杂。目前已經发现的鈾矿物約有150种以上；按其化学組成大致分为下列三大类：

第一是氧化物类鈾矿，其中主要的有晶质瀝青鈾矿(Uraninite)和土状瀝青鈾矿(Pitchblend)两种。前者基本上是二氧化鈾，具有特殊的綠色光泽，常和独居石、鋇石、长石、云母等共生于花崗偉晶岩中；其中尚含有鈾放射性衰变的一系列产物和相当数量的稀土金屬或釷；其品位一般不超过50%。后者具有同样的化学組成，但外表成土块状，大多数不含有釷及稀土金屬；其品位約达50—75%。这一类矿石是

現代工業上最重要的鈾礦，其主要產地有捷克、美國的科羅拉多（Colorado）礦區、加拿大的大熊湖（Great Bear Lake）礦區和剛果等。

其次是鈦鉍鉍復酸鹽類鈾礦，其組成中常含有不同比例的稀土、鈾、鉍、鉍、鈦等礦物。此類鈾礦的品種極多，礦物的組成非常複雜。如澳洲南部的鈦鈾磁鐵礦（Davidite）和東非馬達加斯加的鈦鈾鈾礦（Betafite）等都是屬於這一類的代表性鈾礦。

第三是磷酸鹽類和鉍酸鹽類鈾礦，此類的常見礦石有鈣鈾雲母（Autunite）、銅鈾雲母（Topbeinite）、鉍鉍鈾礦（Carnotite）等等。鈾在此類礦物的組成中常以鈾酰離子的形式與磷酸根和鉍酸根離子相結合。英國和葡萄牙的鈾礦多屬於磷酸鹽類。鉍酸鹽鈾礦多分布于沉積岩的風化區內，其主要產地有美國科羅拉多和剛果等。此類鈾礦常呈悅目的黃綠色，是屬於次生的礦石，一般品位約為40—55%左右。

除了上述這些礦物之外，還有許多含鈾的有機物質。在瑞典發現一種含鈾的煤礦，其灰分中含鈾達2.8%之多。根據不同的資料，土壤中含有的鈾約為 10^{-6} — $10^{-4}\%$ ；海水中含鈾約 $2.0 \times 10^{-7}\%$ ；在放射性礦區的地下水中含鈾可達 10^{-6} — $10^{-5}\%$ 。

目前大多數學者還認為鈾是一種微量的生命元素，在生物的細胞質中正常都含有極微量的鈾。在動物及人類的骨髓中含鈾約 $3.17 \times 10^{-8}\%$ ；甲狀腺中含鈾約 $4.52 \times 10^{-6}\%$ ；血液中含鈾約 $4.0 \times 10^{-10}\%$ ；在胚胎中也發現有鈾存在。

鈾自1789年被克拉普洛特（M.H.Klaproth）氏在瀝青鈾礦中發現之後，約經半世紀未找到實際的用途。到了1853年才有少量的鈾化合物被用作玻璃、陶瓷和琺瑯的着色劑。

1898年居里夫妇 (Marie和Pier Curie) 发现沥青铀矿中含有鐳以后, 铀矿加工的数量大为增多; 但其主要产品为鐳, 而铀化合物仅是一种副产物。可是, 自此以后, 铀在各方面的用途也就逐渐扩大了: 如钢及其他有色金属炼制用的配料, 有机化学制备用的接触剂, 橡胶工业中的防老剂和增硬剂, 以及皮革、摄影、化学分析、医药、光电仪器等工业中都得到不同程度的应用。

在1942年原子核能的利用开始被掌握之后, 铀在人类生活的各个方面才显出其极端重要的作用。铀是目前最主要的核燃料; 据粗略的计算, 一公斤金属铀裂变时所产生的能量约等于两万吨三硝基甲苯爆炸时所放出的能量, 或相当于三千吨优质煤燃烧时所产生的热量, 或相当于一千万度电能。由此可见, 铀在现代国防和科学技术方面所占的重要地位了。目前, 核燃料铀已被应用在原子弹、原子破冰船、原子能发电站、原子潜水艇等方面; 毫无疑问, 将来它将更广泛地被用作动力的来源, 给科学发展开辟一条新的道路。

第二节 铀及其化合物的物理化学性质

铀是目前所知道的、天然存在的、最重的一种化学元素, 其原子量为 238.07。它也是一种天然放射性的化学元素。其化学符号为 U, 属于元素周期表中第七周期第六族, 其原子序数为 92。金属铀外表似铁, 呈银灰色, 比重 18.7, 质软且易于机械加工。它极易氧化, 在摄氏 1130 度下于真空或惰性气体中熔融; 粉末状的铀能在空气中自燃; 如在氧气或空气中加热, 则迅速燃烧而生成八氧化三铀。铀不溶于水和碱, 但易溶于酸中。

铀的化学活性很大, 能与氧、碳、氮、卤素、硫以及许

多有机化合物发生作用。其原子价有 2, 3, 4, 5, 6 五种；其化合物中最常见的是六价的，一般呈黄色，其次为四价的，呈深绿色，其余均不稳定，且无实际意义。

铀与其同族元素钍及钷等相似，也是两性的元素：在酸性及中性介质中形成铀酰阳离子 $[\text{UO}_2]^{2+}$ ；但在碱性介质中则形成铀酸根 $[\text{UO}_4]^{2-}$ 或重铀酸根 $[\text{U}_2\text{O}_7]^{2-}$ 阴离子。

铀酰的盐类极稳定，溶于水时呈黄色，如受到紫外线照射即发出黄绿色的荧光现象。所有易溶于水的铀酰盐类都是极毒的物质，最常见的有硝酸铀酰 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ，硫酸铀酰 $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ，醋酸铀酰 $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 等。硝酸铀酰是最易溶解的铀化合物，溶于水及许多有机溶剂中。在加热时失去水分，而变成八氧化三铀。铀生产工艺中常见的难溶性铀酰盐类有：草酸铀酰 $\text{UO}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ，各种磷酸铀酰（如 UO_2HPO_4 ， $\text{UO}_2\text{NH}_4\text{PO}_4$ 等），钒酸铀酰钠 $\text{Na}(\text{UO}_2)\text{VO}_4$ ，亚铁氰铀酰 $(\text{UO}_2)_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 等。

此外，氟化铀酰 UO_2F_2 也是值得重视的一种铀酰盐类。它是淡黄色结晶状粉末，易溶于水，在空气中水解生成六氟化铀并混有氟化氢；因此，它是铀化合物中毒性最大的一种。

铀酰还有一个特性，即能与大多数无机酸根结合成络合离子，其中主要有：

硝酸铀酰络合离子，如三硝酸铀酰离子 $[\text{UO}_2(\text{NO}_3)_3]^-$ 和四硝酸铀酰络合离子 $[\text{UO}_2(\text{NO}_3)_4]^{2-}$ ；硫酸铀酰络合离子，如二硫酸铀酰络合离子 $[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2]^{2-}$ 和三硫酸铀酰络合离子 $[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_3]^{4-}$ ；碳酸铀酰络合离子，如三碳酸铀酰络合离子 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ 和二碳酸铀酰络合离子 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2-}$ 等。

此外，鈾酰尚能与許多有机溶剂或萃取剂生成絡合物。这一特性在鈾的提取与精制工艺中具有非常重要的意义。

六价鈾在碱性介质中成为阴离子状态，与碱金属化合生成相应的重鈾酸盐，并从溶液中沉淀出来。如于鈾盐溶液中加入氢氧化鈉則生成黃褐色的重鈾酸鈉 $\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$ 沉淀；加入氨水則生成重鈾酸銨 $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$ 沉淀。实际生产中常利用此一性质将鈾从溶液中回收。

鈾的氧化物也是极常見而有实际意义的。氧化鈾有一氧化鈾 UO ，二氧化鈾 UO_2 ，八氧化三鈾 U_3O_8 ，三氧化鈾 UO_3 和过氧化鈾 UO_4 等五种。一氧化鈾仅存在于金属鈾表面氧化的薄层中。黑褐色的二氧化鈾、橙紅色的三氧化鈾和暗綠色的八氧化三鈾都是制备核燃料鈾时的中間制品；二氧化鈾也可直接用作陶质核燃料鈾。氧化鈾中以八氧化三鈾最为稳定；当温度超过摄氏700度时鈾的氧化物都轉变为較稳定的八氧化三鈾，过氧化鈾仅以二水合物的形式存在 $(\text{UO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ ；在过氧化氢精制过程中利用过氧化氢从含鈾溶液中将过氧化鈾沉淀分离出来。鈾的氧化物大都难溶于水中。

鈾易与卤素作用，生成一系列的卤化物；其中最普遍的是四价的和六价的氟化物—— UF_4 和 UF_6 。四氟化鈾为綠色的粉末状結晶，难溶于水与弱酸中。在侵入肺部时，能氧化成氟化鈾酰，引起生理上极大的危害。在鈾工业中俗称为綠盐，是制造金属鈾和六氟化鈾的原料，而六氟化鈾又是制造濃縮鈾（即含鈾235較天然鈾为多的金属鈾）的原料。四氟化鈾被碱金属（金属鈣或金属鎂）还原时即得金属鈾。六氟化鈾为粉黃色粉末，极易揮发，在摄氏56度时即开始沸騰而成气态。在鈾厂的气体扩散車間中即利用此特性将鈾235与鈾238分离。六氟化鈾极不稳定，如遇空气中湿气即水解而生成氟化

氢及铀酸盐类；因此，其毒害很大，且有严重的腐蚀作用。

铀的氯化物中最稳定的是三氯化铀。四氯化铀和六氯化铀吸水性都很大；四氯化铀是淡绿色，带光泽结晶体，六氯化铀是一种结晶物质，其熔点为摄氏175.5度。它们象六氟化铀一样，遇湿气即行水解而放出腐蚀性很强的盐酸气。

溴化铀和碘化铀也是较常见的铀化合物。铀在摄氏250—300度间与氢气作用生成黑色的氢化铀 UH_3 粉末；当温度升高到摄氏350—400度时氢化铀即分解为氢气和粉末状金属铀。铀还会和硫、碳、氮等生成各种化合物：碳化铀有一碳化铀 UC 和二碳化铀 UC_2 ；氮化铀有一氮化铀 UN ，三氮化二铀 U_2N_3 和二氮化铀 UN_2 等。

第三节 铀及其衰变产物的放射特性

铀是一种天然放射性元素，故除了具有与一般重金属元素相似的一些性质外，尚具有特殊的放射性。铀矿石中存在的天然铀是三种铀同位素——铀238，铀235和铀234的混合物，其中以铀238占绝大多数。铀天然同位素的有关数据见下表（表1）。

铀的天然同位素及其有关数据

表 1

铀的同位素的名称	放射特性 及放射量 (%)	射线能量 (兆电子伏)	半衰期 (年)	在天然铀 中的含量 (%)
铀238(U I)	α , 48.9	4.18	4.49×10^8	99.285
铀234(U II)	α , 48.9	4.76	2.48×10^5	0.005
铀235(AcU, 钍铀)	α , 2.2	4.58	7.17×10^8	0.710

除了上述三种天然同位素之外，鈾尚有十一种由人工制得的同位素；其质量数分别为227、228、229、230、231、232、233、236、237、239和240。它們都是放射性的同位素。

鈾233、鈾235和鈾238是原子核能燃料的最重要来源。前两种可直接用作反应堆的燃料，而鈾238則須經人工衰变为釷239后，才能应用。后两种是由鈾矿中提制得来的，而鈾233則是先从釷矿中制得金屬釷，然后經人工衰变而成的。这三种鈾同位素分別属于三个放射性系，即釷放射系、錒鈾放射系和鈾放射系。現在仅将有关的鈾系和錒鈾系的衰变过程及一些主要数据介紹如下（表2）。

由表中可知天然存在的鈾，在衰变时可相继生成鈾放射系的十七种同位素和錒鈾放射系的十四种同位素，并放出 α 粒子、 β 粒子和 γ 量子而最后变成稳定性的鉛同位素。由于大部分鈾矿都经历了长久的地质年代，其衰变产物处于平衡状态，且彼此間具有一定的数量关系。根据这些数量与半衰期，可以认为鈾矿石的放射特性主要取决于鈾放射系的各放射性同位素；而錒鈾放射系則可略而不計。

鈾238（鈾I）的半衰期約4.5亿年，衰变时放出 α 射线而变成鈾 X_1 ；其所放出 α 粒子的能量約为4.2兆电子伏。鈾 X_1 的半衰期为24.1天，衰变时放出軟 β 射线，最大能量約0.2兆电子伏。鈾 X_1 的性质与釷极相近，是釷的同位素（釷234）。它衰变后，大部分（99.85%）变成鈾 X_2 （鐳234），仅小部分（0.15%）变成鈾 X_2 的核同质異能素鈾 Z 。鈾 X_2 的半衰期为1.18分钟，衰变时放出 β 射线，能量在0.6—2.32兆电子伏之間，衰变产物为鈾II（鈾234）。鈾 X_2 衰变时还放出較多的 γ 射线，其能量約为0.8兆电子伏。鈾 Z 的半衰期为6.7小时；鈾II的半衰期为 2.5×10^4 年。

天然铀放射性衰变过程及一些主要的数据

表 2

同位素的名称			射线及其 能量 (兆电子伏)	半衰期 (秒)	天然铀中 的含量 (克/克铀238)
元 素	符 号	习 用			
铀238	${}_{92}\text{U}^{238}$	铀 I	α 4.13—4.18 γ 0.05	1.42×10^{17}	1
钍234	${}_{90}\text{Th}^{234}$	铀 X_1	β 0.10—0.19 γ 0.04—0.09	2.12×10^8	1.49×10^{-11}
镤234	${}_{91}\text{Pa}^{234}$	铀 X_2 (99.85%)	β 0.60—2.32 γ 0.78—0.82	68.4	4.82×10^{-16}
镤234	${}_{91}\text{Pa}^{234}$	铀 Z (0.15%)	β 0.45—1.20 γ 0.81—0.88	2.41×10^8	2.5×10^{-16}
铀234	${}_{92}\text{U}^{234}$	铀 II	α 4.72—4.76 γ 0.05—0.12	7.35×10^{12}	5.18×10^{-5}
钍230	${}_{90}\text{Th}^{230}$	镤 (Io)	α 4.46—4.68 γ 0.07—0.25	2.62×10^{12}	1.85×10^{-8}
镭226	${}_{82}\text{Ra}^{226}$	镭	α 4.59—4.78 γ 0.19	5.01×10^{10}	3.53×10^{-7}
锕222	${}_{89}\text{Ac}^{222}$	锕 (Rn)	α 5.48	3.30×10^8	2.32×10^{-12}
钋218	${}_{84}\text{Po}^{218}$	镭 A	α 6.00	183	1.29×10^{-16}
铋218	${}_{83}\text{Bi}^{218}$	铋	α 7.79	2.0	0.136×10^{-18}
铅214	${}_{82}\text{Pb}^{214}$	镭 B	β 0.35—0.78 γ 0.05—0.35	1.61×10^8	1.13×10^{-14}
铋214	${}_{83}\text{Bi}^{214}$	镭 C	β 1.65—3.17 γ 0.06—1.77	1.18×10^8	8.31×10^{-15}
钋214	${}_{84}\text{Po}^{214}$	镭 C' (99.96%)	α 7.68	1.60×10^{-4}	1.06×10^{-21}

同位素的名称			射线及其量 (兆电子伏)	半衰期 (秒)	天然铀中的含量 (克/克铀238)
元素	符号	习用			
铀210	${}_{81}\text{Th}^{210}$	镭C'' (0.04%)	β 1.80	79.2	2.28×10^{-18}
铅210	${}_{82}\text{Pb}^{210}$	镭D	β 0.017 γ 0.01—0.05	6.94×10^8	4.89×10^{-9}
铋210	${}_{83}\text{Bi}^{210}$	镭E	β 1.17	4.32×10^5	3.04×10^{-12}
钋210	${}_{84}\text{Po}^{210}$	镭F (钋)	α 5.30 γ 0.08—0.80	1.21×10^7	8.52×10^{-11}
铅206	${}_{84}\text{Pb}^{206}$	镭G	(稳定的)	—	—

以上由铀238到铅206共十八种同位素，均属于铀放射系

铀235	${}_{92}\text{U}^{235}$	镭铀 (AcU)	α 4.20—4.58 γ 0.09—0.39	2.24×10^{10}	7.1×10^{-3}
钍231	${}_{90}\text{Th}^{231}$	钍Y	β 0.09—0.30 γ 0.02—0.23	9.20×10^4	2.9×10^{-14}
镤231	${}_{91}\text{Pa}^{231}$	镤	α 4.66—5.04 γ 0.02—0.38	1.01×10^{12}	3.12×10^{-7}
锕227	${}_{89}\text{Ac}^{227}$	锕	α 4.6—4.95 β 0.01 γ 0.02—0.3	6.62×10^8	2.06×10^{-10}
钍227	${}_{90}\text{Th}^{227}$	射锕 (RaAc)	α 5.67—6.02 γ 0.05—0.64	1.63×10^6	5.1×10^{-13}
镭223	${}_{87}\text{Fr}^{223}$	镭K	β 1.20 γ 0.10	1.26×10^3	4.78×10^{-18}

同位素的名称			射线及其 能 量 (兆电子伏)	半 衰 期 (秒)	天然铀中 的 含 量 (克/克铀238)
元 素	符 号	习 用			
镭223	${}_{88}\text{Ra}^{223}$	镭X	α 5.42—5.86 γ 0.03—0.44	9.7×10^5	3.0×10^{-12}
氡219	${}_{86}\text{Rn}^{219}$	氡 (An)	α 6.43—6.82 γ 0.07—0.59	3.92	1.22×10^{-12}
钋215	${}_{84}\text{Po}^{215}$	钋A	α 7.37	1.83×10^{-3}	5.72×10^{-22}
钋215	${}_{84}\text{At}^{215}$	钋	α 8.00	10^{-4}	1.33×10^{-26}
铅211	${}_{82}\text{Pb}^{211}$	钋B	β 0.57—1.40 γ 0.07—0.83	2.17×10^3	6.76×10^{-16}
铋211	${}_{83}\text{Bi}^{211}$	钋C	α 6.62—6.27 γ 0.35	130	4.08×10^{-17}
钋211	${}_{84}\text{Po}^{211}$	钋C' (0.32%)	α 6.34—7.43 γ 0.54—0.87	0.52	5.27×10^{-22}
铊207	${}_{81}\text{Tl}^{207}$	钋C" (99.68%)	β 0.63—1.50 γ 0.87	286	8.95×10^{-17}
铅207	${}_{82}\text{Pb}^{207}$	钋D	(稳定的)	—	—

以上由铀235到铅207共十五种同位素，均属于钍铀放射系

附注：(1)表中各同位素的含量是指天然铀达到放射性衰变平衡时的数量，并且是以一克铀238为基准；在计算天然铀矿中各同位素的平衡数量时，应将表中含量乘以0.993。

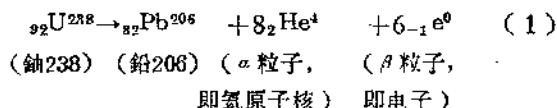
(2)同位素符号中“Em”是代表“射线”，常称镭射线为氡，钋射线为钋，钋射线为钋。其实，它们都是同一元素同位素，其原子序数均为86，在元素周期表中为氡，符号为“Rn”。

(3)铀 X_2 与铀Z是同一种同位素，仅半衰期与射线的能量不一样，它们称为核同质异能素。铀 X_1 衰变时，99.85%变成铀 X_2 ，仅0.15%变成铀Z。

(4)镭C衰变时，99.96%变成镭C'，0.04%变成镭C"。同样，钋C衰变时，0.32%变成钋C'，99.68%变成钋C"。

鈾234衰变产物为釷、錒、錒的射气氦以及釷的衰变子体，最后变成稳定性的鉛206。

鈾放射系衰变的总过程可以下式表之：



因此，处于放射性平衡状态的天然鈾矿，其放射性应为純鈾238的十四倍。純鈾238仅放出 α 粒子，而鈾矿中的鈾除 α 粒子外还放出 β 粒子及 γ 量子。至于新制备的金属鈾和鈾化合物中，除了鈾238和鈾234之外，其他衰变产物均已被清除掉；故其放射性只有原矿石中的1/7，而且主要是 α 射綫。但当存放不久之后，由于釷234和釷234的生成，就开始放出 β 和 γ 射綫。大約一个月后，此二同位素亦达到放射性饱和程度（釷234的半衰期为24.1天，釷234的半衰期为1.175分钟）；此时金属鈾和鈾化合物的放射性約增加为原矿石中的2/7。此后由于釷230的半衰期很长，故其放射性不再有显著的增加。

这样，可以大致认为：鈾矿石經化学加工后，其中5/7的放射性随杂质的清除而損失；因此，純化后的金属鈾及其化合物的放射性毒害远比原矿为小。鈾矿中放射性毒害最大的杂质为：釷226——半衰期很长的 α 粒子放射体，氡222——釷226的气态衰变子体和釷210——极毒的 α 粒子放射体，衰变后成为稳定性的鉛206。对鈾厂矿的劳动卫生方面来讲，这些杂质的放射性毒害实际上比鈾本身要大得多。

最后，鈾的放射特性还有以下两点值得注意。第一，鈾238能俘获中子而生成新的超鈾元素，其中包括重要的人造核燃料釷239。其次，鈾235在中子作用下能連續不断地产生

核裂变而釋出大量的能。这两个特性是現在原子能工业的基础。

第四节 放射性輻射及其計量单位

上节提到鈾是一种天然放射性元素，其原子核会自行产生衰变，先后放出 α 、 β 和 γ 三种不同射线，最后变为稳定的鉛同位素。这是因为原子序数較大的重元素如鐳、釷、鈾等，其原子核内质子与中子的数目很多，以致核力中的結合力与靜电力（庫倫力）不平衡，从而出現不稳定的状态。鈾衰变过程中所放出的放射性輻射的性能可归納比較如下（表3）。

鈾天然放射性輻射的种类与性能

表 3

性 能 \ 种 类	α 射 线	β 射 线	γ 射 线
射线本质	氦原子核的粒子流，带两个正电荷	电子的粒子流，带一个负电荷	电磁辐射，高能光子流，不带电荷
放射速度	初速1—2万公里每秒	20—30万公里每秒	30万公里每秒（与光速一样）
射 程	在空气中約数十毫米，在有机体組織中約0.03—0.07毫米，一張紙即擋住	在空气中約數米，在有机体中約數毫米到十毫米，厚鉛箔即能擋住	极大，在空气中可达數百米，能穿透人体，須厚鉛板或混凝土才能擋住
电离能力 (設射线能量为2兆电子伏)	电离密度平均每毫米空气达6000对离子	每毫米空气約60对离子	每毫米空气約0.6对离子
穿透能力	最小，假定为1	較大，相当于50—100	最大，相当于10000左右

注：射线穿过物质时，在单位射程上产生的离子对数称为电离密度。

α 射綫和 β 射綫都是粒子流，故亦称 α 粒子和 β 粒子。 α 粒子质量最大（氦原子核质量为 4）当照在螢光屏上时可看到一顆顆閃爍的光点。它与物质的原子碰撞时，因为带电的缘故会使物质产生电离作用，逐渐失去能量并与原子中的电子相結合而成为氦气。同时，由于质量大、速度慢且带电荷多，故碰撞的机会較多，接触的时间較长且作用的能力也較大。其結果， α 粒子在物质中的穿透能力很弱，射程很短，而其电离能力却最强。例如，鈾 238 所放出的 α 粒子，在空气中的射程仅約 27 毫米左右，鈾 234 及鐳 226 約为 32 毫米，氡約 40 毫米，釷 214 約 69 毫米。 β 粒子的质量較小（电子质量約为 $1/1860$ ），故运动速度較大，同时它只带一个电荷；因此，它的穿透力較强，射程較远，而电离能力則較差。就射綫对人体~~的~~損害程度来讲，这两种射綫从外部照射时危害性都不大，很容易加以防护；不过如果被吸入体内（特别是 α 粒子），就会引起严重的后果。

γ 射綫基本上与普通光綫、紫外綫、X 光等一样，仅其能量較大而已（ γ 射綫的量子能量达数十万电子伏，而普通光綫只有数电子伏）。它由于速度极大，故穿透能力远远超过 α 及 β 粒子，使物质电离的几率很小，所生成的电离密度也最小。 γ 射綫穿过物质时，不象 α 及 β 粒子那样逐渐降低其速度，而仅仅减小其量子流中的量子数目，使其强度减弱而已，因为它将全部能量給与物质原子中的电子后即自行消灭。 γ 射綫电离能力虽小，但其穿透力极强，防护比較困难；当照射时对人体所有器官及組織都有伤害作用，故应当特別加以重視。

上述鈾原子核所放出的三种射綫，都能直接或間接地引起物质的电离作用；因此，它們也被称为电离輻射。为了表

示这些射线的质量和数量关系并说明它们对有机体作用的程度，现将其计量单位简略介绍如下。

首先是放射体的放射强度单位，即在单位时间内的放射量；一般以居里和毫克镭当量来表示。居里简称居，常用符号“C”代表，用于 α 及 β 射线。它是指一秒钟内发生 3.7×10^{10} 次原子核衰变的放射性物质的放射量。根据原子核衰变的规律可推导出下列两个公式：

$$Q = 2.8 \times 10^{-8} AT \quad (2)$$

$$C = \frac{3.57 \times 10^6}{AT} \quad (3)$$

式中 C——一克放射性元素的放射强度（居）；

Q——具有一居放射强度的元素重量（克）；

A——放射性元素的原子量（克）；

T——该放射性元素的半衰期（年）。

例如在计算5毫克八氧化三铀的放射强度时，已知：

$$5 \text{ 毫克 } \text{U}_3\text{O}_8 \text{ 中含铀量} = \frac{5 \times 3 \times 238}{840 \times 1000} = 4.24 \times 10^{-6} \text{ 克；}$$

铀的原子量 $A = 238$ ， U_3O_8 的分子量 $= 840$ ；

铀的半衰期 $T = 4.49 \times 10^9$ 年；

故可求得其放射强度

$$\begin{aligned} C &= 4.24 \times 10^{-6} \times \frac{3.57 \times 10^6}{238 \times 4.49 \times 10^9} \\ &= 1.42 \times 10^{-9} \text{ 居 (或 } 1.42 \times 10^{-3} \text{ 微居)。} \end{aligned}$$

毫克镭当量用于 γ 射线。当任何放射性物质的 γ 射线所引起的电离作用和一毫克标准镭源在同样条件下所引起的电离作用相等时，其放射强度即为一毫克镭当量。

其次是放射剂量的单位。所谓放射剂量是在单位体积或

质量的被照射物质中所吸收的放射能量的数值。 γ 射线的物理剂量常用伦琴来表示。伦琴简称伦，常用符号“ r ”代表。它是一立方厘米的干燥空气，在摄氏零度及标准大气压的条件下被照射并生成各为一个静电单位的正负电荷（即离子对）时所吸收的剂量。

在空气中形成一个离子对所耗的能量（即电离功）可近似地取为32.5电子伏；一个电子的电荷为 4.803×10^{-10} 静电单位；一个电子伏的能量相当于 1.6×10^{-12} 尔格。因此，一伦的总能量

$$\begin{aligned} r &= 1 \text{ 静电单位/厘米}^3 \\ &= \frac{1}{4.803 \times 10^{-10}} = 2.083 \times 10^9 \text{ 离子对/厘米}^3 \\ &= 2.083 \times 10^9 \times 32.5 = 6.77 \times 10^{10} \text{ 电子伏/厘米}^3 \\ &= 6.77 \times 10^{10} \times 1.6 \times 10^{-12} = 0.11 \text{ 尔格/厘米}^3 \end{aligned}$$

被吸收的射线剂量也有用拉特（rad）表示，它等于一克物质中吸收100尔格的能量。因为在一克空气中用一伦剂量作用时吸收约85尔格的能，故一拉特也就等于1.19伦。

由此可知，居和伦是代表着两个截然不同的单位概念：前者表示一个放射源在单位时间内所发生的原子衰变数；而后者则表示某一物体被射线照射时所吸收的射线能量数。

α 及 β 射线的物理剂量是用物理伦琴当量（rep）表示。在任何一种射线的作用下，一克物质中所吸收的能量等于一伦 γ 射线在一克空气中消耗于电离的能量时，该射线的剂量便是一物理伦琴当量。

不同射线对生物组织的作用效果不同，故当研究射线对生物的效应时，常以生物伦琴当量作剂量单位。生物伦琴当量（rem）等于物理伦琴当量乘以相对生物效应（RBE）；