

铀矿开采中的氡

国际原子能机构一九七三年九月
四日至七日在美国华盛顿召开的关于
铀矿开采中的氡会议文集

68

原子能出版社

铀矿开采中的氡
王恒德 等译
周注谋 等校
原子能出版社出版
(北京 2108 信箱)
北京印刷一厂印刷
(北京市西便门)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售



开本 787×1092 $\frac{1}{32}$ ·印张 5.5·字数 120 千字
1983 年 5 月第一版·1983 年 5 月第一次印刷
印数 001—900 ·统一书号: 15175·473
定价: 0.70 元

内 容 简 介

本书译自国际原子能机构 1975 年出版的关于铀矿开采中的氡《Radon in Uranium Mining》会议文集。本书共收集了美国、法国、加拿大、巴西等国有关铀矿井通风技术、氡的析出和控制,以及执行氡的辐射防护标准对采矿经济的影响等 9 篇论文和 3 篇报告。这些论文和报告对研究和掌握控制铀矿井中氡的析出,加强通风降氡管理,采取通风降氡技术措施,降低氡和氡子体浓度,消除氡和氡子体对铀矿工作人员的危害有一定的参考价值。

本书可供从事铀矿地质和矿山生产管理、通风防护、科研设计方面的有关人员,以及大专院校有关专业师生参考。

目 录

执行辐射防护和废物管理条例对铀生产成本和 矿石储量的影响 (第一次会议)	1
更严格的射线照射标准对铀生产成本和 矿石储量的影响 (IAEA-PL-565/6)	3
辐射防护标准对铀市场的 影响 (IAEA-PL-565/2)	15
执行辐射防护和废物管理条例对铀生产成本的 影响 (IAEA-PL-565/4)	37
铀矿开采中的氡: 南非铀矿采取防护措施 对铀资源的影响 (IAEA-PL-565/9)	48
第一次会议总结报告	56
铀矿井通风的技术问题 (第二次会议)	61
在铀矿井中控制氡子体的通风及其它问题 (IAEA-PL-565/5)	63
法国铀矿井的通风 (IAEA-PL-565/3)	76
控制氡子体特有的矿山工程和通风问题 (IAEA-PL-565/7)	111
第二次会议总结报告——铀矿通风的技术问题	124
不同类型矿体的氡释放方式的研究 (第三次会议)	127
岩石和矿物析出氡-222的特性 (IAEA-PL-565/1)	129
美国铀矿石的氡析出的实验室研究 (IAEA-PL-565/8)	154
第三次会议总结报告	166

执行辐射防护和废物管理条例对铀生产成本和矿石储量的影响

(第一次会议)

更严格的射线照射标准对铀 生产成本和矿石储量的影响 (IAEA-PL-565/6)

[美] F. E. 麦金利 (Mc Ginley)

提 要

铀矿山大气中的氡子体产物可能是井下铀矿工肺癌发病率比预期的高的原因。虽然从1950年开始在美国铀矿山中就已经进行了氡子体的测量工作，但是直到1960年没有对采用的标准进行过调整，也没有开始进行系统的监测。1967年联邦辐射委员会(FRC)建议职业性照射控制为每个矿工接受的照射量在任何连续三个月中不超过6工作水平月(WLM)，在连续十二个月不超过12工作水平月。其后的几年里，对降低照射标准的必要性存在着重大争论。最后根据联邦辐射委员会的建议，采用了每年4工作水平月的标准，自1971年7月1日生效。所有的标准都要求记录每个矿工受到的氡子体的累积照射量。

降低照射标准对美国铀矿开采的影响是难以估价的。1968年和1970年，经与政府订立合同的条件下，由两个公司研究了对产品成本和矿石储量的经济影响，他们所用的资料和数据是由各个矿山经营者和美国原子能委员会提供的。后面的研究涉及到，为了满足当时提出的每年4工作水平月的标准，工业界将大约需要两年的时间对矿山做必要的实际改

变,估计不同的矿山执行新标准的经费每磅 U_3O_8 在0到0.93美元范围内不等,平均0.24美元。据估计,这一改变使得美国每磅 U_3O_8 8美元的地下矿石储量减少2%。然而,工业界进行的成本估计表明,这类地下储量将减少10—22%,美国储量总数减少5—10%。这种研究是很复杂的,特别是当考虑到美国实际地下矿山的大小、产量、开采时间、所用的开采方法、工作的复杂性、采用的通风方式和围岩性质等都有相当大的差别。

采用1971年7月1日生效的(每年4工作水平月)标准,它的实际影响是难以估价的。无疑,开采成本增加了,很多小的高成本贫矿倒闭了。但是这可能反映最近的市场象降低照射标准那样减少了。

至于谈到进一步降低照射标准的影响,无疑价格要升高,还会有一些矿山要倒闭,用坑采方法可开采的储量将显著减少。但根据流行病学调查的结果表明,由于照射标准的进一步降低,铀矿工中肺癌的波及面在减小,这足以说明降低照射标准的必要性。

1. 序 言

一般认为,铀矿工中肺癌发病率过高,至少有一部分是由于受到高浓度氡及其子体的照射造成的,而且发生肺癌的危险随照射量的增加而增加。尽管这种看法很普遍,但在法律上及在调查防护标准方面还存在着很大分歧。1960年到1969年期间各方面的立法机关召开了几次公众意见听取会,最后把标准降低了,1971年7月1日生效的标准是1960年标准的三分之一^[1]。工业部门和各个采矿团体强烈反对降低照射标准,他们认为这对卫生防护说来是不必要的,因为这样做会影响地下采矿的经济效益。正如其它标准一样,确定利用原

子能而引起的危险和得到的利益之间的平衡是困难的。本文试图评述矿山射线照射标准的演变过程，以及降低标准对成本和矿石储量的影响。

2. 美国矿山标准的演变

井下铀矿工中肺癌发病率比预期的还要高，这可能是由于铀矿井大气中存在氡的子体产物，肺癌的增加是由于氡子体在呼吸道中放射性衰变引起的。在美国，虽然铀钒共生的“钾钒铀矿”型矿石早在1898年就首次开采了，但是生产量一直受到限制，直到1935年由于需要钒，这类矿石的市场才扩大。然而，直到美国原子能委员会(US AEC)1948年提出第一个采购矿石的货单之后，这种生产上升的趋势并没有导致大规模的开采，如表 1 所列。直到1960年地下矿工人数（全

表 1 逐年地下矿山和雇工估计数^[2]

年 别	矿 山 座 数	雇 工 人 数
1954	450	916
1957	850	2430
1960	703	4908
1963	573	3510
1966	533	2545
1969	145	2133
1972	141	1766

部私营企业）才得到大量增加。此后，矿工人数减少了，这是由于官方铀市场缩小造成的。近几年来，地下矿工人数继续减少，但是如果为了满足核动力工业对铀的需要量，预计井下铀矿工人的数量将大大超过1960年的水平。1957年以来，

矿山数目大量减少，是基于大规模作业的结果，而且在尤拉文（Uravan）矿带关闭了规模小、成本高的贫矿。

在美国铀矿山中，虽然大约从1950年开始就已经进行了氡子体的测量工作，但是一直到1960年还不是国家统一进行的，而是一些较大的矿业公司在井下进行的系统监测。1959年美国公共卫生局、1960年美国标准协会（American Standard Association, Inc.）（ASA）*和美国原子能委员会推荐过铀矿山的标准，在铀矿井大气中最大容许氡子体浓度为1工作水平（WL）**。美国标准协会的标准包括几个等级的处置水平：当任何工作区呈现的工作水平大于1.0而小于3.0时，要求确定工人的加权平均照射量^[3]。如果抽样呈现的工作水平大于10.0时，应立即减小工人的照射量，改善工作条件。ASA标准还提出了矿山通风和空气采样的程序。

自从各州对矿山负责检查以来，各州采用的标准与上述标准相近。西部五个采铀的州控制水平稍有不同，但是一般说来，进行是好的，对工业说来平均水平1957年是7工作水平，1966年下降为2.1工作水平^[1]。

1959年，按照法令（《公法》86—373），成立联邦辐射委员会（FRC），以便指导“联邦各机构制定辐射标准、确定和实施与各州合作的规划”。在会议研究和讨论的基础上，联邦辐射委员会于1967年9月宣布建议，在任何连续三个月时间内矿工所受照射不得超过6工作水平月，在连续十二个月时间内不得超过12工作水平月。吸入浓度为1工作水平的空气170工作

* 后来称为美国标准协会（USA Standards Institute），现在叫做美国国家标准协会（American National Standards Institute, ANSI）。

** 工作水平（WL）定义为一升空气中含有能最终发射 1.3×10^5 MeV 的 α 潜能的任何结合形式的氡子体。

小时造成的照射量为 1 工作水平月。另外，实际的照射量应保持尽可能远低于这些数值，而且应当测定和保存各个照射量数据^[4]。

在公布 FRC 报告以前，劳工部长于 1967 年 5 月 5 日颁布的 0.3 工作水平的标准，要在对联邦供应合同上应用的沃尔什-希利 (Walsh-Healeg) 条款下实施。劳工部的布告公布之后，在联邦辐射委员会成员、联邦各机构、国会议员和工业部门之间存在分歧，其中有代表性的分歧是关于降低标准的根据和必要性。在 FRC 提出最后建议之前，召开了几次公众意见听取会，进行了多次研究和辩论，从 1971 年 7 月 1 日采用年照射量为 4 工作水平月的标准^[1]。从那时起，一当成本上升和铀的市场减少时，工业界就要与这个标准作斗争。

3. 降低照射标准对成本的影响

因为美国全部铀矿山都是私营公司经营的，所以实际成本是不好评论的。但是 1968 年和 1970 年对这个问题做了两次有意义的研究，讨论了 FRC 遵守政府的条款以及与工业界和美国原子能委员会合作的问题^[5,6]。确定降低照射标准的冲击或者效果，必须承认只会影响到地下开采。在美国，目前大约 40% 的矿石产量来自这些矿，其余的算是露天开采的产品。在 1971 年以前，地下开采的产量一直都超过露天开采产量。表 2 列出了美国地下开采矿山和露天开采矿山的发展情况*。

大约已知矿石储量的 45% (每磅 U_3O_8 成本 8 美元) 在 500

* 除非另有说明，吨指的是短吨。

表 2 地下矿山和露天矿山逐年铀生产情况 (U_3O_8 , 吨)^[7]

年 别	地 下 矿 山	露 天 矿 山
1950	712	98
1955	3570	855
1960	13476	5368
1965	7424	3014
1970	6911	5857
1971	5924	6983
1972	5588	8079

英尺或更深一些的地方，可以预料将来地下矿山的产量仍将占总产量的40—45%。

在调查成本和标准从1工作水平降至推荐的0.3工作水平对工业界的影响方面，资源管理委员会(RMC)分析了矿山平均工作水平与投资营业开支和直接为了控制氡所必需的维持费用之间的关系^[5]。这项研究是必要的，因为工业界为控制成本只累积了与平均矿山工作水平有关的经费资料。任何熟悉铀矿山的人都知道氡子体的浓度可能随不同地点、不同时间、不同气候条件以及不同季节有很大变化。矿山平均工作水平是这些因素的函数，再被测量氡子体浓度的各个矿区工作的人数×小时数加权。这样，在任何矿山，一些矿工可能在本底浓度下工作，另一些矿工可能在超过矿山平均工作水平的地方工作。

关于成本问题，对适当分配氡控制经费的矿山说来历来都是困难的，因为常常控制氡的手段还可能服务于其它目的。但是，随着与降低标准有关的经费的增加，现在各个公司认为有必要分开报告全部氡控制经费，其中包括测量和保存各个照射量数据的经费。

资源管理委员会分析了三个有代表性小矿的资料，这三个矿位于尤拉文矿带，每个矿区年产矿石2200—36200吨，矿山平均工作水平为0.5—3.1。1968年开采每吨矿石的氡控制经费为0.57—1.47美元。经研究断定，工作水平从1.0降到0.3时，假如只用通风的办法就可以有效地改善工作水平，那么通风控制经费大约需增加50%。

同样，对5个较大的矿山的资料进行了分析，这些矿山的矿石年产量为每个矿区78000—278000吨。虽然大矿的氡控制经费(每吨0.51—0.92美元)略低于小矿，但是估计为了达到0.3工作水平所需要增加的百分数基本上是相同的。

根据对工业的广泛调查，资源管理委员会估计，为了把矿山平均照射量从1工作水平降到0.3工作水平，氡控制经费增加50—100%。如更有效地利用现有的通风系统使经费达到下限是可能的，所需要的经费上限，主要用来改进或者增加现有设备。大矿和小矿都在这个范围内。由于这些数据是一般的，所以使用这些估计时要注意，它不是对任何一个矿山都适用的。

阿瑟·D·利特尔(Arthur D. Little)公司(ADL)1970年的研究比前面介绍的研究更广泛，它的资料是分析了26个矿山得到的^[6]。另外，ADL调查了年照射量为12、8、4工作水平月的矿山，评价了对矿产工业、核动力工业、用电户和依赖于铀生产的团体的经济影响。研究中选择26个矿代表了总矿山数的21%，矿石生产总量的77%，地下采矿部门雇用工人数的74%。其中包括新的、中年的和老的矿山；小型的、中型的和大型的生产部门，以及只生产铀的矿山和那些为了生产共生矿物(钒)的矿山。经费数据以1970年3月的情况为主。

ADL的研究断定，为了满足当时提出的每年4工作水平月的标准，美国的工业界大约需要两年的时间在矿山里做些必要的实际改造。对于不同的矿山，为了遵守新标准所付出的代价，在逐渐增长的基础上，从0—0.93美元不等，平均每磅 U_3O_8 精矿0.24美元。大约开采每吨矿石的经费平均增加1.00美元，这是以在美国加工的矿石的平均 U_3O_8 品位估算的。

工业界对相同的26个矿山做的估计表明，遵守每年4工作水平月的标准付出的代价要大大超过ADL的估计，范围在每磅 U_3O_8 0—1.75美元之间，大约平均0.70美元。用与以上相同的依据，工业界计算的平均经费是每吨约2.80美元，或者说差不多是ADL预计的三倍。对各个矿山估计的不一致主要是由关于“停止工作”的指令的假设引起的。ADL假设矿山是连续营业的，因而这个指令的频数将大约与1970年相同。工业界假设“停止工作”的指令的频数将有增加，因为到辐射水平高于控制水平时工作区将关闭，必须把矿工转移到别处，这必然会使生产率降低。在经费估算中，其它不一致的部分主要是排风井和通风装置要求的。与ADL相比，工业界估计的经费较多，而且设想的分期偿还也不同。

概括起来说，这些研究表明，为了遵守矿山照射标准从每年12工作水平月降低到4工作水平月，工业界将会增加开采成本，增加的幅度为平均每磅 U_3O_8 0.24—0.70美元，这要取决于做出怎样的假设。在这类研究中存在很多复杂因素，因为每个矿山的大小、产量、可采期的长短、所用的开采方法、操作的复杂性、采用的通风方案和围岩的性质都有很大差别。

要在广泛的基础上确定降低照射标准到每年4工作水平

月对地下采矿经费的实际影响是困难的。无疑控制氡的经费增加了，正如尤拉文矿带最大的采矿公司所证实的那样，要增加开掘通风井、购买和使用静电过滤器^[8]。在同一时间里，生产矿山的数目显著减少(约25%)。关闭的很多矿山都是由于不可能维持增加了的基本经费和氡控制经费。然而，这种情况可能反映最近市场象降低照射标准那样减少了。

4. 降低照射标准对矿石储量的影响

在讨论对矿石储量的影响之前，有必要先了解一些矿石储量的计算方法。为此，加了附录 A “原子能委员会储量估算的一般介绍”。应当注意，降低照射标准使经费的任何增加都会影响矿床边界品位的降低，因而减少了经济上可开发的矿藏吨位。因为每个矿床的矿石储量是在公司提供的资料的基础上分别计算的。所以，除了采用很一般的方法之外，评价降低射线照射标准造成的影响将是困难的，而且是费时的。在前面提到的1970年的研究工作中，ADL估计如果照射标准从每年12工作水平月降低到4工作水平月，每磅 U_3O_8 8美元的地下矿石储量将大约减少2%。然而工业界做的成本估算表明，用地下开采方法可开采的8美元矿石储量要减少10—22%，占美国8美元矿石储量总数的5—10%。因此，人们可以断定，由于照射标准从12工作水平月降低到4工作水平月会使美国已知的每磅 U_3O_8 8美元的矿石储量总数减少达10%。对每磅 U_3O_8 10美元、15美元和30美元的矿石储量的影响可能会略小一些，但是这还没有进行估算。

5. 降低标准对铀矿工肺癌的影响

由于进一步降低照射标准的影响，毫无疑问，成本会显著提高，储量会减少，当然这要取决于所选定的照射水平。工业界表示，很多矿山遵守每年4工作水平月的标准是不经济的，而且经验表明这是确实的。标准进一步显著降低，比如降到0.1工作水平，除非在很理想的情况下，否则会逐渐取消常规的地下开采。连续评价流行病学的数据表明，铀矿工肺癌率有所降低，人们希望这一结果能够排除进一步降低照射标准的必要性^[9]。自从1968年以来肺癌发病率降低了，但不知道是矿山通风的条件改善了还是矿工中吸烟的人减少了的结果。不管是哪种情况，值得注意的是萨康曼诺(Sacco-manno)^[9]的报道是有意义的，他报道铀矿工中160例肺癌患者中只有一例是不吸烟的。这可能是吸烟和氡子体照射共同作用的结果，这促使一些矿山经营者在几年前鼓励矿工戒烟。1969年内务部宣布了采铀的地方禁止吸烟的禁令^[10]。

附录 A 原子能委员会储量估算 的一般介绍^[7]

估计美国的铀矿石储量是用可供开采的预计成本分别为每磅 U_3O_8 8、10、15和30美元表示的。这些储量是由私营铀公司提供的资料推导出来的，对于均匀的矿层是用一致的方法计算的。实际上，原子能委员会以所说的预计成本作为可供开采考虑的储量，并不意味着原子能委员会断定或者预言这种储量就一定以同样的市场价格进行开采的。

简单地说，矿石储量的估算步骤如下：

(1) 确定边界开采的界限, 规定矿物的最低品位 (以 U_3O_8 的百分比表示), 这里指的是从最薄矿层可以开采的矿物, 在这种矿物中回收每磅 U_3O_8 的总经营成本等于选定的每磅预计成本。用下式确定边界品位:

边界品位 =

$$\frac{\text{每吨矿石的采矿、运输、矿区租用费和选矿成本}}{\text{每磅 } U_3O_8 \text{ 的预计成本} \times \text{选矿回收率} \times 20}$$

(2) 估算矿床中满足或者超过边界品位和厚度标准的矿化物质, 以吨和 U_3O_8 的平均品位表示。

(3) 应用所有的预计成本、经营费和基建费, 用第二步的方法推算矿化物质。

(4) 如果第三步中推算的每磅 U_3O_8 成本低于选定的每磅预计成本, 那么这些矿物就作为储量考虑。

地产购置费、勘探经费和其它额外的基本费用都算作开挖费。开挖费、矿山本身的价值, 为换取矿石储量所需要的资金积累和利润都没有算在原子能委员会进行的边界计算或矿石储量的经济估算中。这些因素应由各个公司分别考虑, 并加到其商议中的铀价格里去。

用较少的成本分类, 估计把矿石储量依次分为每磅 U_3O_8 8、10、15和30美元四类就可以包括所有的储量。

参 考 文 献

- [1] Hearings before the Joint Committee on Atomic Energy, Radiation Protection Criteria and Standards—their Basis and Use (1960); Radiation Exposure of Uranium Miners (1967); Radiation Standards for Uranium Mining (1969), US Government Printing Office.
- [2] Federal Radiation Council, Guidance for the Control of Radiation Hazards in Uranium Mining, FRC Rep. No. 8, revised (Sep. 1967) 4; and USAEC data.