

到 2050 年

铀供给分析

Analysis of Uranium
Supply to 2050



海军出版社



ISBN 7-5027-5845-3



9 787502 758455 >

ISBN 7-5027-5845-3/P·732

定价: 14.00 元

编者的话

铀是一种能源资源,也是一种重要的战略资源,对国民经济、核电事业和国防工业的发展都具有重要的作用。铀资源的预测和分析对最近一段时间及未来的战略远景都具有特殊的意义,也是地质勘查工作的一项重要任务。国际原子能机构每年都要统计世界各国铀生产、铀勘查情况,并与国际经济合作与发展组织的核能机构(NEA/OECD)联合两年一次编辑出版一本“红皮书”,该书全面报道了近两年世界各国铀生产、铀资源、铀需求状况,以及对铀的供求关系进行全面分析。本书是综合国际原子能机构(IAEA)对未来 50 年世界铀供给分析的最新技术报告编译而成。本书对现有铀资源和推测铀资源,以及铀的主要供应、次级供应和未来铀需求及几个主要产铀国的铀生产作了较系统的分析,展示了大量的数据和附图,内容新颖、资料详实,这对我国了解和掌握世界铀资源及对未来 50 年的铀供给分析,推动我国铀矿地质勘查工作和核事业的发展具有重要的参考作用。

通过调研,搜集了大量有关铀资源的资料,在此基础上出版本书,以供有关单位领导决策和广大铀矿地质工作者参考。

本书的编译工作由潘燕、李德连、张书成共同完成,谈

成龙高级工程师进行了技术校对,文字录入和编排工作分别由李彤、李珍媛完成。

由于水平有限、时间紧,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者
2002 年 8 月



前 言

燃料供应对于任何能源系统的维持能力具有内在的重要意义。因此,对所有希望加深了解核燃料供应的投资者来说了解有关长期铀供应的系统分析报告是很重要的。与其他燃料相比,核电工业有利时段的跨度相当大。一个核电站从开始计划到关闭的时间跨度可能长达 50 多年。一个铀矿山和选矿厂从开始勘探到生产和关闭的使用周期一般为 20~40 年,一个具有丰富资源的基础设施的使用周期可能达 50 多年。因此,很明显,展望未来 50 年的铀供应对于长期计划来说意义重大。

自从 IAEA 制定的至 2035 年的铀供应预测以来,已经过去了近 10 年。由于准备研究铀供应的工作已变得越来越复杂,所以铀开采和选矿工业也已经发生了显著的变化。因为次要的或非生产性供应已经增加,因此铀供应正日趋多样化。因而,完成一项新的分析工作以提供所需的信息用于做出与核电及其燃料供应有关的战略决策非常重要。对于政府和工业策划者、政策制定和决策者以及项目管理人员而言,本研究极其有用。潜在的用户包括核燃料的消费者和生产者。

本书是 IAEA 有关铀供应和需求分析资料的综合。因为它包括 IAEA 有关至 2050 年铀供应的首次预测,为读者

III

提供了一种有关选择铀供应情况在此期间如何变化的认知。此分析是建立在铀资源和生产设施的现有知识基础之上。假设用最经济(最低成本)的方法,用目前工艺水平的生产技术来生产铀。它考虑到了铀生产设施是在项目计划、运行、退役和关闭时应用最佳实践方法以对环境造成最小影响,且能够运营为前提。该分析的基础是建立在已发表的有关铀需求量的预测报告之上。这些预测涵盖了从极低程度地使用核电到极高程度使用核电的范围。虽然该分析的目的不是用来预测核电的使用状况,但是它可以为用户提供一种未来铀供应结果的一些可能性的解释。



目 次

1 提要	(1)
1.1 目的	(1)
1.2 需求预测	(1)
1.3 次级供应	(2)
1.4 主要供应和以市场为基础的产量	(3)
1.5 以市场为基础的产量贡献预测	(3)
1.6 资源类别	(3)
1.7 生产中心投产的先后顺序	(5)
1.8 到 2050 年累积的供求分析	(5)
1.9 到 2050 年累积的供求分析结果	(7)
1.10 生产成本的预算	(7)
1.11 敏感性分析	(8)
1.12 讨论	(9)
2 引言	(11)
3 研究范围	(13)
4 方法和推测	(17)
4.1 需求	(18)
4.2 供应	(25)
4.2.1 来自剩余防御库存的 HEU (高浓缩铀)	(30)
4.2.2 库存	(38)
4.2.3 MOX (混合氧化物燃料) 和 RepU (再处理铀)	(42)
4.2.4 贫化铀资源 (尾料)	(44)
4.2.5 天然铀生产	(50)

5 分析	(76)
5.1 铀资源的可获量和利用——中等需求情形	(77)
5.1.1 研究 RAR——数据的综合	(77)
5.1.2 研究 RAR——数据的局限性	(84)
5.1.3 未归属的 RAR——数据的综合	(88)
5.1.4 未归属的 RAR——数据的局限性	(90)
5.1.5 总 RAR——数据的局限性	(91)
5.1.6 EAR - I ——数据的综合	(93)
5.1.7 EAR - I ——数据的局限性	(97)
5.1.8 EAR - II ——数据的综合	(98)
5.1.9 EAR - II ——数据的局限性	(101)
5.2 铀资源的可获量和利用——低位需求情形	(103)
5.3 铀资源的可获量和利用——高位需求情形	(104)
6 结论	(108)
6.1 充足的资源	(109)
6.1.1 充足的 RAR——EAR - II	(109)
6.1.2 低浓缩尾料检测的影响	(111)
6.1.3 SR	(112)
6.1.4 非常规资源	(119)
6.1.5 敏感性研究	(122)
6.1.6 生产能力和未利用资源	(126)
6.2 勘探的必要性	(129)
6.3 生产成本和铀市场价格的关系	(132)
6.4 三种需求情形下的环境意义	(134)
附录 I 国际应用系统分析学会 (IIASA) 和世界能源委员会 (WEC) 的研究	(136)
附录 II 尾料再浓缩的经济模型	(139)
附录 III 世界铀生产工业的回顾	(141)
III.1 澳大利亚	(144)

Ⅲ.2	加拿大	(146)
Ⅲ.3	哈萨克斯坦	(148)
Ⅲ.4	尼日尔	(150)
Ⅲ.5	俄罗斯	(152)
Ⅲ.6	乌克兰	(154)
Ⅲ.7	美国	(155)
Ⅲ.8	乌兹别克斯坦	(158)
附录Ⅳ	国际铀资源评价计划 (IUREP)	(160)
附录Ⅴ	资源定义和术语	(162)
术语汇编		(171)
参考文献		(175)

1 提 要

1.1 目 的

至少在未来 50 年中核电有望成为世界能源构架中的一个重要部分,大多数的预测还要远远超过它。当然,提供充足的铀供应可以用来支持一些分析家们预测的每年 1%~3% 的核电正常增长率。本书的目的就是评价供应、满足反应堆对铀需求量(需求)的保证程度,并且说明可纳入被预测供应量的可信度水平。

1.2 需求预测

考虑了 3 种需求情形(低位、中位和高位),包含了有关全世界经济增长及其关联的能源、核电相应增长的大范围的预测。这些情形与参考文献[1]中第 1 份关键问题报告中的“核变量”类似。IAEA(国际原子能机构)根据 1999 年后期获得的信息编辑了 2000~2020 年之间的需求预测。参考文献[2]中,国际应用系统分析学会和世界能源委员会(IIASA/WEC)提出了需求情形的长期部分(2020~2050 年)的分析,该书中的图 4 阐明了 IIASA/WEC 提出的 6 种情况下的核发电的预测情况。表 1 列出本书中着重强调的至 2050 年 3 种需求情形下铀的累积需求量和对其建立的预测依据。

表 1 中的中位情形被选作低位和高位情形之间的平均铀需求。中位需求情形的预测是依据 IIASA/WEC 情形 C2 而做出的,它们被描述为“相当乐观和富有挑战性”,与此同时设定能源政策将清楚地划归为环境保护的目的。本书里的中位需求情形不应与 IIASA/WEC 情形 B 混为一谈,IIASA/WEC 还把其情形 B 当作它们的“中位能源需求情形”,它们把情形 B 描述为“更重实效”并且比情形 A

和 C 包含了更加实际的细节。IIASA/WEC“中位能源需求情形”(情形 B)的铀需求将比本研究的中位需求情形要高。然而,它还低于本研究中的高位需求情形。

表 1 提议的 3 种需求情形

铀需求情形	2000~2050 年的 累积需求量(t U*)	前 提
低位 (IIASA/WEC 情形 C1)	3 390 000	中等水平经济增长 以生态为依托而推动的能源政策 低位能源需求增长 到 2100 年核电逐步淘汰
中位 (IIASA/WEC 情形 C2) (该情形处于高位和低位 铀需求情形的中间范围)	5 394 100	中等水平经济增长 以生态为依托而推动的能源政策 低位能源需求增长 包括发展中国家在内的世界核电持续发展
高位 (IIASA/WEC 情形 A3)	7 577 300	经济高速增长 “可燃成分高的和清洁的”能源,未来不依 靠严格的环境政策措施 核电快速发展

1.3 次级供应

一般可以将铀供应分成两类——次级供应和主要供应。次级供应包括高浓缩铀(HEU)、天然和低浓缩铀(LEU)库存、混合氧化物燃料(MOX)、再处理铀(RepU)和贫化铀的再富集(尾料)。主要供应包括所有新开采和处理的铀。如果次级供应以一种有次序的系统

* t U——表示“吨金属铀”,参见本书第 15 页。

和按时的方式供应给市场的话,那么,预测在 2000 年次级供应占需求的 42%。到 2025 年,预测在中位需求情形和高位需求情形下,次级供应的贡献分别降低到需求的 6%和 4%,而其所占百分比将持续下降到 2050 年。预测在中位和高位需求情形下,到 2050 年,次级供应的贡献分别为累积需求的 11%和 8%左右。

1.4 主要供应和以市场为基础的产量

随着来自次级供应贡献的减少,主要供应的作用将增强。主要供应可分成两大类——不受市场条件约束的或受市场条件控制的,诸如独联体国家(CIS)、中国和小国家计划的产量,以及以市场为基础的产量。以市场为基础的生产需求量,并从年需求量中减去它们的总和。

1.5 以市场为基础的产量贡献预测

对于 2000 年的中位需求情形而言,以市场为基础的产量占铀需求量的 46%左右;到 2025 年,需求量将增长到需求的 86%。在高位需求情形下,以市场为基础的产量将从 2000 年需求的 45%增长到至 2025 年需求的 92%左右。预测 2000~2050 年之间,在中位和高位需求情形下,以市场为基础的产量分别满足累积需求量的 77%和 85%。

1.6 资源类别

本书的主要目的是评估常规铀资源满足以市场为基础的生产需求量的保证程度。常规资源指的是那些具有既定生产史的资源,即铀既是主要产品、附带产品也是重要副产品(例如,金)。使用来自《铀资源、生产和需求》(即红皮书)^[3]、IAEA 和 OECD 核能机构

(OECD/NEA)联合报告的可信度水平以及定义的有关生产成本与成本范围的资料对常规资源进行分类。以最高可信度的已知资源确实可靠资源(RAR)加上估算附加资源 - I 类(EAR - I)开始,接着用较低可信度的未发现的(潜在的)资源[估算附加资源 - II 类(EAR - II)和推测资源(SR)]来识别资源。

下面给出了常规资源类别的定义。

可靠资源(RAR)指的是产在具有一定规模、品位和形态的已知矿床中的铀,但其中的铀必须能用现行可靠的开采和加工技术在给定的生产成本范围内提取。吨数和品位的计算以矿床的特定样品数据和测量数据以及对矿床特点的认识为基础。RAR 具有很高的可信度。

估算附加资源 - I 类(EAR - I)指的是 RAR 以外的,主要以直接的地质判据为依据,预计可能存在于详细勘探矿床延伸部分中的铀,或存在于已确定了地质延续性的矿床中的铀,但因具体的数据(包括矿床测量数据)不足和对矿床地质特征的了解尚不充分,还不能把该类资源列入 RAR 类。进一步圈定和回收的吨数、品位和成本的估计以尽可能的取样和对该矿床特定的认识为基础;矿床的特点应根据对特定矿床或其他类似矿床中了解得最好的部分来确定。该类资源估算的可信度比 RAR 类要低。

估算附加资源 - II 类(EAR - II)指的是 EAR - I 类的附加铀资源。该类资源产于已知矿床的矿化区或已知矿床的地质走向延伸区,主要是根据间接的判据估算的。这类资源的吨数、品位、发现成本的估算应主要以类似产出环境的已知矿床的地质特征和可能获得的地质、地球物理或地球化学判据为基础。该类资源估算的可信度低于 EAR - I 类。

推测资源(SR)指的是 EAR - II 的附加铀资源,是一种主要以间接判据和地质外推为基础而估算的铀资源,它存在于可用现有勘探技术发现的矿床中。该类资源中所设想的矿床位置仅可大致地认定在某一给定区域或地质走向内。正如该类资源的名称所表明的那

样,此类资源的存在及规模具有明显的推测性质。

品位很低的、目前尚不具经济意义或者其中的铀仅仅作作为次要副产品回收的资源被视为非常规资源(例如,磷酸盐类、独居石、煤、褐煤、黑色页岩等)。本书中仅将少量的磷酸盐类副产品铀(即,约为总量的 2%)纳入供应分析。

1.7 生产中心投产的先后顺序

生产中心和其相关的资源也是通过预测生产成本的方法来进行排序的。生产中心开始运行以满足以市场为基础的生产需求量,其先后顺序预测通常以可信度和成本的综合情况为依据。可以认为,在最高可信度的资源类别中的最低成本生产者将满足需求的初步增长,接着是成本逐渐提高的生产者,直到满足年度的需求为止。

用于预测生产和资源保证程度的模型既不提供一个 50 年期间铀生产工业将如何发展的确切预告,也未提供有关的预测。相反,该模型在现有经验的基础上给出了一系列情况,其中每一种情况都会表明有关铀工业在给出的各种条件组合发生变化时如何选择的方案。

1.8 到 2050 年累积的供求分析

用两种方法来度量满足需求资源的保证程度。第一种度量方法是采用建立以市场为基础的生产需求量,对不同可信度水平的资源进行直接对比。第二种度量方法通过预测产量和需求量的比较,考虑到了并非所有的资源在本研究工作期间都被利用的事实。表 2 给出了在中位和高位需求情形下,适于探明资源的两种方法之间差别的重要性。

预测来自高可信度的 RAR 的产量足以满足低位需求情形时的全部需求量。因此,在低位需求情形下,供与求的差额不能作为一个

要素反映出来。当我们进入中位需求情形时,相对高可信度的已知资源仅比建立在以市场为基础的生产需求量少146 000 t U,或者从2041~2050年每年都低于年需求。加入较低可信度(未开采的)的EAR-Ⅱ之后,资源量实际上超过需求量约 2×10^6 t U。然而,生产中心何时从成本上证明是合算的以及它们的资源基数规模妨碍了完全利用资源的可能性,结果造成产自己知资源的产量和以市场为基础的生产需求量之间所预测的缺口达844 500 t U。

表2 适于探明资源的两种方法的对比

中位需求情形(10^6 t U)		
已知资源量	RAR	RAR + EAR - I
需求量和资源量之间的差额	(1.025)	(0.146)
需求量和产量之间的差额	(1.540)	(0.845)
已知资源量 + EAR - Ⅱ	RAR + EAR - I + EAR - Ⅱ *	
需求量和资源量之间的差额		+ 2.079
需求量和产量之间的差额		(0.307)
高位需求情形(10^6 t U)		
已知资源量	RAR	RAR + EAR - I
需求量和资源量之间的差额	(3.273)	(2.394)
需求量和产量之间的差额	(3.734)	(2.950)
已知资源量 + EAR - Ⅱ	RAR + EAR - I + EAR - Ⅱ *	
需求量和资源量之间的差额		(0.169)
需求量和产量之间的差额		(2.060)

* 强调 EAR - Ⅱ 为尚未发现资源很重要;除非花费大量的和及时的勘探费用去发现,否则 EAR - I 不会成为更高可信度的资源。

在高位需求情形下,差额更明显。例如,在高位需求情形下,已知资源比以市场为基础的生产需求量少2 394 000 t U。在高位需求

情形下,预测来自已知资源的产量和以市场为基础的生产需求量之间的差额为2 950 000 t U。与 2035 年时的中位需求情形相比,预计来自已知资源的产量和需求量之间的首次差额会在高位需求情形时的 2026 年出现。

1.9 到 2050 年累积的供求分析结果

如上所述,在中位和高位需求情形下,甚至计及 EAR - II 时,较低成本(<130 美元/kg U)的常规资源也不能满足铀需求。然而,如果将极高成本(>130 美元/kg U)的常规资源和非常规资源一起考虑,那么充足的资源量既可满足中位需求情形也会满足高位需求情形。对此,铀价明显提高不可避免。据此分析,将在下一节讨论未来生产成本的预测趋势。

估计还有 8.7×10^6 t U 左右的 SR(推测资源)。它们包含新发现的附加低成本资源的潜力。然而,对这种来自 SR 的新发现,进行大量且及时的勘查活动很重要。因此,在最终的分析工作中,中位和高位需求情形能够由极高成本的常规资源和非常规资源提供,或由新的、较低成本的来自 SR 的常规资源的新发现来提供。

1.10 生产成本的预算

为确保将来相对低成本的资源量供应,必须采用适当的方式来开发资源以便它们有效地满足有用的需求量。在过去的 10 年中,次级供应和 CIS(独联体国家)的产量共同减少了以市场为基础的生产需求量并抑制了铀的市场价格,同样也成为勘查活动和新项目开发活动的阻碍因素。正如我们所期望的那样,从成本上说预测的生产中心适于开始运行的时机选择将成为市场价格趋势的间接指示。表 3 提供了假设产量来自不同可信度的资源量,在中位和高位需求情形下,不同成本范围的生产中心首先从成本上证明合理的大致年份

的对比情况。

据表 3 中的对比情况,在中位需求情形下,假设仅有已知资源(RAR 和 $EAR - I$)具有可用性,那么成本超过 52 美元/kg U、78 美元/kg U 和 130 美元/kg U 的生产中心将分别到约 2021、2027 和 2034 年方能从成本上得到证明是合理的。在高位需求情形下,分别到约 2015、2022 和 2026 年在相同成本类别中的已知资源的生产中心才能从成本上证明是合理的。

表 3 不同成本的生产中心被证明为合理成本时年份的对比情况

	52~78 美元/kg U	>78~130 美元/kg U	>130 美元/kg U
中位需求情形			
RAR	2019	2024	2028
RAR + EAR - I	2021	2027	2034
RAR + EAR - I + EAR - II	2021	2029	2041
高位需求情形			
RAR	2013	2019	2023
RAR + EAR - I	2015	2022	2026
RAR + EAR - I + EAR - II	2015	2023	2031

1.11 敏感性分析

展望未来 50 年,明显存在着内在的不确定性而需要大量的推测。已尽了一切努力来记录所有的推测,并全面地描述建立在本书基础上的方法论。通过预测不同供应源的有效性变化结果,借助量化的不确定性来完成敏感性分析。

完成的敏感性分析表明,有限的次级供应将对供与求的关系产生有限的影响;当需要渐渐提高生产成本时,也会产生有限的影响。