

高等学校教学参考书

核能经济学

——核燃料技术经济基础

[苏] H. M. 西涅夫 著
B. B. 巴图洛夫

原子能出版社

高等学校教学参考书

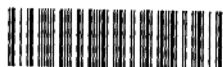
核 能 经 济 学

核燃料技术经济基础

[苏] H.M. 西涅夫 著
B.B. 巴图洛夫

胡丕显 陈 中 孙智惠 徐秀华 孙秀桐 译
连培生 校

XA448/23



3 0084 4674 6



原子能出版社
B 539181

内 容 简 介

本书论述了核能在能源中的地位, 发展核能的重要意义, 并从经济的角度介绍了天然铀、浓缩铀、核燃料元件和组件的生产, 以及乏燃料元件后处理、放射性废物处理等各级工艺的特点和由它们所决定的经济学; 给出了核电站燃料消耗的计算公式和数据表, 核燃料利用效率的控制参数和不同的成本限值。本书按原书第二版(1984年)译出。原书第一版于1980年发行。

原书经苏联高等和中等专业教育部批准为高等院校核电站和装置、核电站设备生产和安装专业用的教材。

本书可作为我国高等院校核能工程专业的教材, 亦可供与核能有关的工程技术人员、能源规划和管理人员参考。

Н. М. СИНЕВ В. Б. БАТУРОВ
ЭКОНОМИКА АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ И ЭКОНОМИКИ
ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Издание второе, переработанное и дополненное

МОСКВА ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1984

高等学校教学参考书

核 能 经 济 学

核能科学技术经济基础

Н. М. 西涅夫

[苏] В. Б. 巴图洛夫 著

胡丕显 陈 中 孙智惠 徐秀华 孙秀桐 译

连培生 校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

国防科工委印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 新华书店经售

☆

开本787×1092 1/16 · 印张15.75 · 字数375千字

1988年11月北京第一版 · 1988年11月北京第一次印刷

印数 1—1000

ISBN 7-5022-0096-7

TL 37 (课) 定价 3.10元

译 序

核裂变能的开发利用始于军事需要。第二次世界大战初期,美国担心希特勒德国在秘密研制核武器,决定赶在德国的前面。为此,美国投入了巨大的人力物力,吸收了本国和由欧洲迁美的许多著名科学家参加,在异乎寻常的短时间内解决了核裂变武器的理论和技术问题,建成了制造原子弹所必需的初期核工业,制成了原子弹。在一切为了军事需要的前提下,经济因素被置于次要的地位。

五十年代初,核裂变能开始以实验规模用于发电和动力。苏、英、加、美等国先后建成了最初的一批核电站。至七十年代,核电工业技术已臻成熟,许多国家的核电站已经定型,主要设备已经标准化,一些核能工业发达国家开始输出核电技术、成套的核电站或关键设备。到1987年7月底,在世界上有407座核电站反应堆在运行,核发电量占世界总发电量的16%。法国的核电已占全国总发电量的70%以上。在一些核能工业发达的国家,核电成本已低于火电。

作为新兴的能源,核裂变能(包括核电和核供热)必将有更大的发展。如何充分地利用核燃料的资源——天然铀,如何经济地实现铀-钍燃料循环,以及如何经济有效地建设核燃料循环中各企业,是各发展核裂变能国家关切的问题。

我国核电起步较晚,但我国有独立的核工业体系,有较强的科学和工程技术力量,具有发展核能的有利条件。党和政府对核能发展给予重视,广东大亚湾核电站和浙江秦山核电站正在积极建设中。核能的经济学已经上升为必须考虑的重要方面。

《核能经济学》是一本关于核能经济学的入门书。它以通俗的语言,深入浅出地阐述了世界能源的需求和资源,以及它们的发展趋势;介绍了核燃料和核能的工艺学及它们的特点,并把它们与有机燃料能源的工艺学从经济上和资源上作了比较;阐述了核裂变能在能源中的地位;提出了充分利用核燃料资源和经济地发展核能事业的见解。

本书的出版,对我国从事普通能源、核能、核燃料工业的领导和规划管理人员,核工程设计、设备制造和安装的工程技术人员,以及有关专业的高校师生,定将是有益处的。

1983年译者着手按原书第一版(1980年)进行翻译,1985年翻译结束后得到原书的第二版(1984年),随即按第二版进行修订,于1986年初修订、校对结束。本书第一、三、四、五、六、九、十一章由胡丕显译,第二章由陈中译,第七章由孙智慧译,第八章由徐秀华译,第十章由孙秀桐译。胡丕显做了全书的统稿工作并校阅了第二、七、八、十章书稿。连培生校阅了全书。

限于水平,译文难免有错误之处,欢迎读者批评指正。

· 译 者

前 言

在第一座核电站投入运行(1954年)以来的三十年里,核能工业走过了创建、完善和发展的重要途径,现已成为科学技术进步的重要因素。

到1984年,全世界核电站的总装机容量超过200GW。投入运行和建造中的核电站反应堆的单堆热功率为3.2~4.8GW,电功率为1~1.5GW。运行中的核电站证明,核电不仅经济,而且能够在严格保证核安全、辐射安全和保护环境的条件下可靠地运行。

根据苏共二十四和二十五大的决议,苏联在第九、十两个五年计划期间实现了巨大的核能发展计划。到1983年底,苏联的核电站的总装机容量超过了20GW。根据苏共二十六次(1981年)的决议,在当前的十年里(1981~1990年),苏联核容量还要增长数倍。将要建成的水冷中子反应堆核电站,其反应堆的单堆热功率达4~6GW(BBOP-1000, ПБМК-1000和ПБМК-1500)。除大力发展核电站外,还要广为建造核供热站和核热电站。与此同时,还要把快中子增殖堆及其燃料循环的研究设计工作大大向前推进一步。1972年建造的、温正运行中的示范性钠冷快中子反应堆BH-350(舍甫琴柯市)和从1980年4月起在别洛雅尔斯克顺利运行的、目前世界上最大的电功率为600MW的快中子堆核电站BH-600所取得的科研、设计、建造和运行的经验,将对快堆发展起促进作用。

因此,在今后十年中,核热电源在燃料-能源系统中将占有重要的地位,它的发展是进一步发展整个国家经济的关键问题。

苏共二十五、二十六次决议和1983年4月苏共中央和苏联部长会议批准的苏联电气化长远规划中指出,在改进全国燃料-能源平衡方面,在苏联的欧洲部分超前发展核能是最重要的方向之一。在苏联的欧洲部分计划大量建造大型核电站、核供热站和核热电站。这些规划指示的实现,可以节省大量投资,并大大减轻由东向西运送日益增多的燃料和能源的组织工作,降低热能和电能生产的日常运营费用,增强苏联欧洲部分供电的可靠性。

用于核电站、核供热站和核热电站的新的能源燃料——核燃料的利用,在今后十年中可以大大降低对有机燃料的需要量,首先可以降低苏联欧洲部分许多地区对石油的需要量。正是苏联的这一部分集中了主要的能源用户,也正是在这里廉价有机燃料的短缺年复一年地增大,而这个短缺主要由东部地区运送燃料来弥补。

《核能经济学》一书的总观点是作者根据一系列表征这一新工业领域经济特点的主要情况确定的。而这些经济特点决定于核燃料在能源工业中利用的特点。

由于核燃料的热值极高,用核燃料代替有机燃料,主要依靠缩减有机燃料的开采、运输方面的费用使国民经济获得经济效益,而核电站的直接经济效益则较小。这表明,对于核能的经济性,应把核能作为全国燃料-能源体系的组成部分,即在跨部门的基础上来考虑,而不应孤立地比较核电站和火电站的经济性。因此必须把核电站和核燃料的经济性结合起来考虑,正如同必须把火电站同它的燃料供应的经济性结合起来考虑一样。

建造核电站的比投资,通常超过建造火电站的0.5到1倍。但是,在评价核能投资的经济效益时,应计入燃料供应工业的必要投资。对于核电,应包括采冶、浓缩、燃料制造、后

处理、放射性废物的短期贮存和永久处置等燃料循环企业的必要投资；而对于火电，则应包括有机燃料的开采、精制和运输企业，以及运输设施的建造、燃料的贮存和燃烧前的加工等的必要投资。

这样比较的结果是，核电站具有明显的优越性。

但是，与任何有机燃料相比，核燃料的生产工艺都要复杂得多。核燃料生产和后处理工艺所能达到的水平决定着它们的成本，从而在很大程度上决定着核能的经济性。所以本书作者认为，有必要根据公开发表的资料向与核电站和核能设施的设计、建造和运行有关的大学生和工程师们广泛地介绍一些有关核燃料生产工艺和经济学方面的基础知识。如果对核燃料生产全部工序的工艺、各工序费用的构成和比重等没有清楚的了解，就不可能探讨核燃料的经济问题，从而也不能讨论单个核电站和核能总体的经济问题。

作为能源一个分支的核能，与普通火电的燃料-能源体系相比，一个极其重要的标志是它具有高的劳动生产率。

应该把包括核电站、核供热站、核热电站以及核燃料循环企业在内的核能工业视为全国燃料-能源体系及其能源供应系统的组成部分。

通过核能经济的分析，可以找出核能的主要技术经济特点和规律，以及与核燃料循环的工艺和经济有密切关系的指标和发展的趋势。

核能工业还很年轻。核电站的设计、建造和运行方面的经验正在迅速地积累起来。核电站投入的规模日益扩大。核电站的设计和结构方案、设备的制造和安装工艺、燃料元件和组件的生产、控制系统和装置、核反应堆保护和核电站总体安全保证的技术措施等都在不断得到改善。核燃料开采和加工处理的工艺在不断向前发展，放射性废物的排放、处理和埋藏的复杂问题正在逐步解决。核燃料循环各个阶段的工艺最佳化正在探索中。核电站各系统和结构的标准化、统一化和定型化工作已展开。在保证核安全、辐射安全和全部系统工作的可靠性以及保护环境方面，正在采取一些特殊的措施。

上述一切尚在发展当中，产生的技术和经济问题有时得不到单一的答案。对于这类因资料不足尚不能得出单一答案的问题，作者力求阐明现有的可供选择的观念并加以评述。作者在对一些成本数据的理解上遇到了困难，这些数据是不稳定的，而且在资本主义国家，特别在美国，这些数据因通货膨胀和经济危机而波动得十分厉害。这与比投资、天然铀价格和浓缩加工成本的上涨、乏燃料后处理和放射性废物埋藏的成本预测等有关。

本书有些章节，根据国际原子能机构和世界能源会议以及其它权威性机构的资料，讨论了今后五十年内世界能源及其供应的发展等一般性问题以及今后世界能源资源利用构成的预测；阐述了在世界能源需求日益增长的情况下核能作为不断增长的可供选择的能源的地位；讨论了苏联燃料-能源体系和电力工业发展中的主要问题以及促使在苏联欧洲部分以超前的速度发展核能的能源供应的特殊性；指出了现阶段能源发展的一般规律和趋势以及核能的作用。

作者认为，在探讨核燃料使用的特殊性之前，简单介绍有机燃料的性质及使用特点是有益的。

核电站和核燃料的经济问题是复杂的，迄今还研究得不够，文献中报道得也比较少。作者试图从最新资料、处理方法和评价的角度，考虑到能源势态的不断变化，尽可能地作出综合的阐述。书中有些问题还讨论得不够全面和透彻。

本书内容以《核能经济学》讲义为基础。俄罗斯苏维埃联邦社会主义共和国功勋科学技术工作者、技术科学博士H.M.西涅夫教授在莫斯科动力学院核电站专业，技术科学副博士B.B.巴图洛夫副教授在莫斯科工程物理学院用这本讲义讲授了十五年以上。本书2,3,7~9, 11章和§1.4~1.6节由H.M.西涅夫编写；5,6章由B.B.巴图洛夫编写；1,4,10章和§2.7, §3.8节由H.M.西涅夫和B.B.巴图洛夫共同编写。本书的总观点是共同提出的。

本书第一版（1980年）很快销售一空。在第二版中，作者引用了最新资料，进行了一系列的修正、补充和修改，尽力消除或订正第一版中的印刷错误。在第一章中，改写了§1.5和§1.6两节；在第二章中根据苏共二十六大决议和第十一个五年计划中到1990年的数据，做了较大的改动和补充。第八章中增加了新的节，并介绍了铀同位素分离的理论基础。对十一章做了很大的修改和补充。苏联高等和中等专业教育部推荐本版作为高等院校教材。

许多专家、学者在百忙中认真阅读了本书手稿，并提出了许多有益的意见，作者在此表示衷心感谢。大多数意见在书稿最后整理中已予考虑。

衷心希望读者对本书第二版提出批评意见和建议，作者将诚恳接受。

目 录

第一章 能源的资源和消费·核能的地位	1
§1.1 一次能源·有机燃料资源及其消费规模.....	1
§1.2 世界天然铀资源及其能源潜力.....	5
§1.3 能源资源分布和消费的不均匀性以及经济和能源的关系.....	8
§1.4 能源需求的长期预测和核能的地位.....	12
§1.5 能源发展中的燃料-能源问题	14
§1.6 核电容量的当前水平及其增长预测 (1981~2025年)	18
第二章 苏联的燃料-能源体系和电力工业·国家能源系统中的核能	21
§2.1 能源体系.....	21
§2.2 苏联的燃料平衡.....	22
§2.3 苏联的电力工业 (自俄罗斯国家电气化计划到现在)	25
§2.4 苏联的电力结构及其利用.....	26
§2.5 水电站和水力蓄能发电站.....	28
§2.6 核能.....	29
§2.7 能源生产的特点.....	31
§2.8 苏联的统一电力体系.....	34
§2.9 电、热供应发展规划大纲·趋势和规律.....	35
第三章 有机燃料的需求及其利用的特点	37
§3.1 有机燃料的基本性质.....	37
§3.2 火电站对有机燃料的需求.....	39
§3.3 苏联的燃料供应条件和核电的地位.....	41
第四章 核燃料及其使用特点·核电站对燃料的需求	42
§4.1 核燃料的概念.....	42
§4.2 核燃料的特点及其在核能中的应用.....	45
§4.3 燃耗深度——核燃料释热的量度·核电站对燃料的需求.....	50
§4.4 比功率、燃耗深度和燃料在堆内的周期·核电站启动及 运行时燃料的需要量.....	55
§4.5 核燃料的换料方式·核电站运行的过渡期.....	58
第五章 在核燃料复用情况下核电站和核燃料工厂对核燃料的需要量	62
§5.1 核电站和核燃料工厂的必要生产能力.....	62
§5.2 铀的积累.....	64
§5.3 天然铀的需要量.....	66
§5.4 典型的燃料循环系统·复用系数.....	67
§5.5 单位发电量的天然铀和浓缩铀消耗量.....	69

§5.6 燃料循环周期	70
§5.7 快中子反应堆的特性·转换区(屏区)燃料的循环	71
§5.8 核电站全部使用期限内铀的总需要量和燃料循环中铀的周转量	74
第六章 扩展核电对核燃料和核燃料工厂生产能力的需求	77
§6.1 核电发展速度及核电容量增长情况下燃料复用的作用	77
§6.2 扩展核电对天然铀和浓缩铀的需要量	79
§6.3 核电容量增长情况下燃料元件生产和核燃料后处理工厂的必要生产能力	83
第七章 天然铀	87
§7.1 新能源——铀	87
§7.2 铀、钍、钷的主要性能	89
§7.3 铀的分布	94
§7.4 铀矿石和铀矿物	95
§7.5 天然铀的开采量和需要量	97
§7.6 核电容量增长预测和铀的需要量	99
§7.7 水冶加工和铀生产的主要步骤	101
§7.8 机械选矿、破矿和磨矿	102
§7.9 铀的浸出	104
§7.10 溶液澄清、过滤、洗涤和尾矿排放	105
§7.11 地下浸出和堆浸·海水提铀	106
§7.12 用吸附和萃取法制取铀的化学浓缩物	108
§7.13 沉淀和干铀浓缩物的制备	111
§7.14 精制·由化学浓缩物制备核纯铀	112
§7.15 铀矿石开采、加工及天然铀生产经济学	115
第八章 浓缩铀	121
§8.1 浓缩铀——浓缩的核燃料·铀的浓缩方法	121
§8.2 浓缩铀生产原理及原料消耗系数	123
§8.3 同位素分离理论的基本概念及其在铀同位素分离中的应用	125
§8.4 分离功、分离势、分离功率	127
§8.5 分离功单位、分离功率单位	129
§8.6 浓缩铀的现代化工业生产	133
§8.7 浓缩铀的需要量和满足的途径	135
§8.8 气体扩散工艺的进步	136
§8.9 喷嘴分离法	139
§8.10 扩散还是离心?	141
§8.11 浓缩铀价格	143
§8.12 贫铀	148
§8.13 ^{238}U 的积累及其对燃料循环经济的影响	150
第九章 浓缩铀生产工艺基础	153
§9.1 六氟化铀	153

§9.2 气体扩散法分离铀同位素 (物理基础)	156
§9.3 气体扩散厂的工艺特性	161
§9.4 离心法分离铀同位素	166
§9.5 逆流离心机分离气体的物理基础	167
§9.6 逆流离心机的结构	172
§9.7 离心法工艺的进步	175
§9.8 离心法的特点及其经济评价和预测	177
第十章 热中子反应堆核电站燃料元件和组件	180
§10.1 反应堆活性区以及对燃料元件和组件的要求	180
§10.2 二氧化铀及芯块的制备	189
§10.3 铀基金属燃料	192
§10.4 用于工艺管道、燃料组件和元件的锆合金	194
§10.5 燃料元件的制造	198
§10.6 燃料元件制造费用	199
第十一章 乏燃料的化学后处理	203
§11.1 核电站燃料循环的最后阶段·核燃料回收的必要性	203
§11.2 核燃料元件中放射性裂变产物的积累	205
§11.3 乏燃料的冷却时间和放射性活度	208
§11.4 由核电站到化学后处理厂的乏燃料运输	212
§11.5 乏燃料的“干”容器和长期贮库	214
§11.6 核燃料的溶剂萃取法后处理	217
§11.7 放射化学后处理工厂	220
§11.8 放射性废物及其处理和最终处置问题	226
§11.9 关于乏燃料中气态裂变产物的去除及无害化处理问题	232
§11.10 乏燃料的气态氟化干法后处理	234
§11.11 乏燃料回收的经济学问题	235
§11.12 核电的燃料循环费用	238
参考文献	239

第一章 能源的资源 and 消费 · 核能的地位

§1.1 一次能源 · 有机燃料资源及其消费规模

能源的生产和消费,是社会的技术进步和经济发展的主要标志之一。到目前为止,主要的能源资源有煤、石油、天然气、油页岩、泥煤和木柴等有机燃料;河流的水能资源也占有重要的位置。所有这些能源资源都来自一个源泉——太阳。地壳中的有机燃料能源宝库,是在地球长期发展的过程中太阳光作用于地球生物圈的产物。自然界中水的不断循环,也是太阳的作用造成的。

据估计,每昼夜太阳传递给地球的能量,平均大致相当于540Gt 标准煤*的能量。然而,只有照射在生物有效作用表面的那一部分太阳能可以通过光合作用被地壳吸收。而这个生物有效表面只占地球表面积的1/10左右。假定光合作用的实际效率为0.1~1%,则地球上有机燃料可能的积累速率相当于每年20~200Gt 标准煤。如果把这一数字与现有的矿物有机燃料储量估计值作一比较,就会得出这样的结论:有机燃料实际形成和积累的速率还要小得多。

对地壳中有机燃料潜在资源(煤、石油、天然气)有不同的估计。由于计算上的困难、勘探资料的不足、估计开采价值方法的差异以及有些地方难于到达等,各估算数字很不相同。最有权权威性的是各国际能源研究机构的评价值。

根据第九次世界能源会议(1974年美国,底特律)**资料,在现代工艺水平基础上可以开采的矿物有机燃料储量,约相当于1.1~1.4Tt 标准煤。考虑矿物燃料开采工艺的进步,估计苏联以外可开采的有机燃料储量为7.5~8Tt 标准煤:煤,6.1~6.3Tt 标准煤(占全部有机燃料资源的80%左右);石油,1.1~1.2Tt 标准煤(占15%左右);天然气,360~400Gt 标准煤(占5%左右)。

表1.1所载为各种矿物燃料资源的较新(1980年)估计(包括经近年来地质勘探资料证实并修订过的和推定的数据)。

通过对许多难于到达地区(大陆架、荒漠、亚北极地带以及其它无人烟的地区)的勘探,还可能增加不少储量,而燃料开采和提取工艺的进步,可以使现在认为是在开发上明不上算和无前途的地区,成为可以开发并在经济上是可取的。

1975年世界一次能源消费水平为8.7Gt 标准煤(见表1.2),大大低于有机燃料资源可能的恢复速率。但考虑到世界能源的需求在不断上升,则这个差距就不算大了。如果今后15年能源需求的增长速率(4~5%)保持不变,到1990年,能源消费就是1975年的2倍,而到2000年时,则为1975年的3倍。

* 标准煤——热值为7000kcal/kg (~29.3MJ/kg) 或 7×10^6 kcal/t (~29.3GJ/t)的燃料。美国和西欧也采用这一折算单位,称为煤当量。(1kcal=4.1868kJ)

** 世界能源会议第九次会议于1974年在美国底特律召开。世界能源会议由世界能源组织召开,每三年一次,会上交换能源情报,并讨论能源发展的问题。

由于世界经济发展的各种因素的影响, 1980~2000 年期间世界燃料-能源需求的增长速率将明显下降, 预计在全世界范围内燃料能源需求为每年约增长2%。

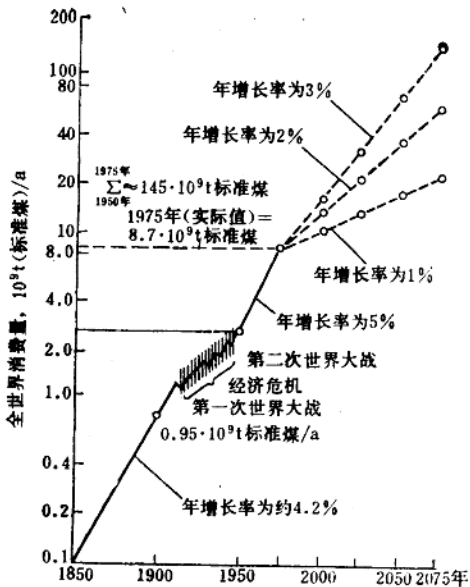


图1.1 世界能源需要量(1850~1975年为实际值, 1975~2075年为按年增长率为1,2,3%求得预测值)

1900年到1975年期间消费的燃料约为245Gt 标准煤(图中以边长6.3km的正立方体表示)。该图还示出了在不利用有机燃料以外任何其它能源条件下, 1900~2000年, 1900~2025年, 1900~2050年, 1900~2065年各时期燃料的总消费量。上述计算的依据是1975年各种能源的世界实际消费量为8.7Gt 标准煤, 能源需求的增长率取适中值, 每年增长3%和2%。

根据预计的能源需求增长率(每年约为3%和2%), 由现在到2065和2100年各种能源的总需要量可能为6Tt 标准煤左右。

表1.3所载为 1975~2075 年期间世界燃料-能源可能需求的计算值(根据不同的预测)。

图 1.1 所示为 2075 年以前世界一次能源需要量的实际值和按不同的年增长率计算的预测值。

现在再来看一下, 世界上的有机燃料储量有多少, 以及如果不加速利用其它能源, 有机燃料储量能否保证人类对能源不断增长的需求(见图1.2)。

根据苏联科学工作者的估计*, 地球上的化学燃料的可能储量为 12.8Tt 标准煤, 其中 11.2Tt 是煤, 1.6Tt 是石油和天然气。可以开采的(根据现代开采工艺的可能性和经济合理性)约为估计储量的 25~50%。

为了直观地表示世界有机燃料储量, 用边长为 23.4km 的正立方体表示世界的估计储量, 1km³ 表示 1Gt 标准煤(或 1m³ 表示 1t 标准煤)(见图1.2)。据估算, 自

表1.1 推定的和用现代生产技术可以开采的世界矿物燃料资源

燃 料	已 证 实		推定, Gt 标准煤	总计, Gt 标准煤	现 在 可 利 用	
	Gt 标准煤	%			Gt 标准煤	%
普通石油	130	3.85	360	490	130	14.1
油页岩石油	50	1.51	720	770	30	3.3
油砂石油	50	1.51	360	410	30	3.3
天然气	80	2.38	270	350	80	8.7
煤	2000	60.5	7730	9740	490	—
褐煤	1000	30.25	2400	3400	145	—

* Кириллин В. А. Энергетика—проблемы и перспективы. —Коммунист, 1975, No1, с. 44~46.

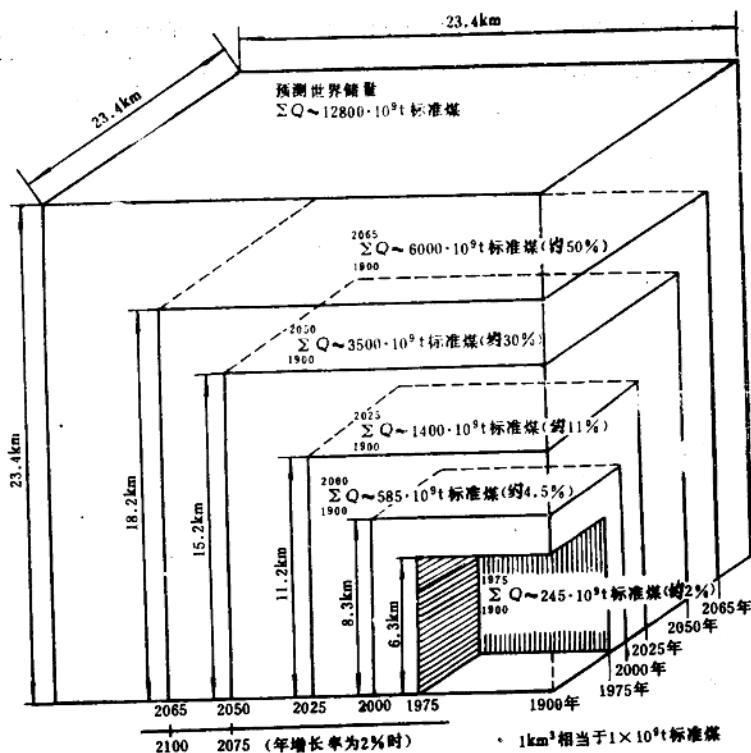


图1.2 世界矿物有机燃料估计储量和消费规模 (按世界能源需求的增长率为每年3%和2%计算, 假设不利用任何其它能源)

表1.2 世界一次燃料-能源消费量*

单位: Mt标准煤

能 源	1860年	1900年	1913年	1950年	1970年	1975年	1980年***
总 计	555 (100%)	950 (100%)	1569 (100%)	2852 (100%)	7546 (100%)	8718 (100%)	9600 (100%)
石 油	0.1 —	29 (3)	77 (4.9)	680 (23.8)	3058 (40.6)	3560 (40.8)	4050 (42)
天然气	4.9 (0.9)	9 (1)	22 (1.4)	256 (9.1)	1405 (18.6)	1700 (19.5)	1720 (18)
煤	137 (25)	723 (76)	1255 (80)	1544 (54.1)	2282 (30.2)	2506 (28.7)	2900 (30)
泥 煤	92 (16.3)	6 (0.6)	6 (0.4)	18 (0.6)	22 (0.3)	22 (0.3)	330 (3.4)
木 柴	317 (57)	167 (17.4)	164 (10.4)	167 (5.8)	314 (4.1)	320 (3.7)	600 (6.6)
水电**(当量)	4 (0.8)	16 (2)	45 (2.9)	187 (6.6)	465 (6.2)	610 (7.0)	600 (6.6)

* 引自 Народное хозяйство СССР в 1975 году. ЦСУ СССР. М.: Статистика, 1976, с. 146. 1860年; 数据取自 Экономика энергетики СССР. Мелентьев Л. А., Штейнгауз Е. О. М.—Л.: Госэнергиздат, 1963, с. 46.

** 水电站发电量按相应各年发电 1 kWh 所需平均燃料耗量换算为标准煤单位。

*** 数据未经修正。

表1.3 以1975年实际消费量为基准按两种增长率(3%, 2%)求得的世界燃料总需要量

燃料需要量, Gt 标准煤			燃料总需要量, Gt 标准煤		
年	年 增 长 率		时 期	年 增 长 率	
	3%	2%		3%	2%
1975	8.7	(实际值)	1900~1975年	245	(实际值)
2000	18.2	14.3	1975~2000年	340	290
2025	38	22.4	1975~2025年	1170	780
2050	78	37.4	1750~2050年	3225	1730
2075	160	63.0	1750~2075年	6200	3600

由图1.2可以看出, 按照上述能源需求增长率, 如不利用其它能源, 到二十一世纪末, 我们居住的这个星球上的有机燃料储量将接近枯竭。能源势态如此严峻的发展是可以防止的, 办法是首先要加强并广泛利用象核燃料这样的与太阳能无关的能源, 并且有效地更大规模利用在太阳辐射作用下不断恢复(再生)的各种能源。后者包括河流的水能资源, 生物质能(木柴、工农业废物), 以及基于利用被聚集的太阳能、风能、海洋热能和波浪能的装置等。

根据有科学根据的预测, 在二十世纪最后的二十五年里, 核能将以相当高的速度发展, 到2000年时, 核能可能占世界能源总消费量的15%左右, 而到二十一世纪中叶, 核能和可再生能源一起, 将超过总消费量的50%。在此期间, 还同时进行着降低能源消费和节约能源的过程。由于科学技术的进步, 获取、转换和利用能源的效率将不断上升, 损失将不断下降, 换能和耗能设备的效率系数将不断提高。生产重要材料和产品以及重要工艺过程的能耗将显著下降, 各种能源消费的经济效益都会提高。所有这些将改变国民收入增长与能源消费之间现有的比例关系: 以较小的比能耗和比劳力消耗, 获得较多的物质财富和福利。

在这样的条件下, 世界能源消费的年增长率可能逐渐趋于稳定, 在个别地区甚至以前达到的水平可能有所下降。

在预测世界能源未来的发展时应考虑到, 直接利用聚集的太阳光能来生产热能和电能的工艺出现质的飞跃, 在原则上也是可能的。

根据理论计算, 现代世界对能的需求, 仅靠 22000km² 地球表面每年接受的太阳辐射能就能得到满足。如果假设太阳辐射能的利用效率不大于5%, 那么必须装设太阳光反射镜的地球表面积约为450000km² (约等于法国本土的面积。显然, 这种聚集太阳能的球面装置不可能设置在一个地方。目前, 在一些国家(美国、日本、印度等)所推广的是适合当地应用的小功率太阳能装置: 住宅采暖、蒸馏水、空调、通过光电电池获得电能供给照明和家用电器等。100~1000MW的太阳能发电站正在研究设计当中。

在开发不受地球的昼夜和季节规律限制和不受气候影响, 能够保证连续供电的大容量蓄电池的同时, 解决工业规模利用太阳能的问题, 将使人类能够获得取之不尽的能源。然而, 现实的问题首先是, 聚集和转换太阳能的成本太高, 目前还难以有把握地预计到二十世纪末有多少太阳能可以直接用来弥补日益增长的能源需求, 只有可不断再生的河流水能资源将会越来越多地参加能源的平衡。但世界上潜在的水力资源已经不很多了。据1974年估计, 这些潜在的水力资源每年可以发电7.5PWh, 约相当于2.5Gt 标准煤的发电量。1975年世界能源

消费中,水电约占7%,相当于0.6Gt标准煤的发电量。苏联可供开发的潜在水力资源,能保证每年发电2.1PWh,其中经济上合算的为0.8~1.095PWh。水力资源的全部利用,每年可节省相当于350Mt标准煤的燃料资源。但即使最大限度地利用潜在水力资源,它在世界能源平衡中的份额也很小,对未来全球性能源问题的解决不会有重大的影响。

有迫切意义的是,不断改善燃料-能源的平衡,寻找和探索并有效利用新能源,首先是核燃料。在能源供应方面扩大核燃料应用的规模,就能有效地降低不可再生的有机燃料资源的亏损;而在将来,则能在许多工业领域和运输方面部分或全部取代有机燃料。大家都知道,掌握新的能源技术和推广使用它的过程长达数十年之久(见图1.3)。从这个角度来看,在二十世纪中叶,作为一种崭新的一次能源的核能的发现,是非常及时的。今后,人类将在利用传统能源的同时,以越来越大的规模利用核能。在二十一世纪的后半个世纪里,各种形式的核能将成为人类进一步向前发展中主要依靠的能源。

世界上的核燃料资源又怎么样呢?它能够完全消除威胁着人类进步的燃料短缺的问题吗?核能在满足日益增长的世界能源需求中起什么样的作用呢?

§1.2 世界天然铀资源及其能源潜力

就可用储量的估计而言,铀比其它有机燃料在更大程度上取决于国土地质勘探的规模。有工业开采价值矿点的储量特别重要。国际原子能机构*和经济合作与发展组织**的核能机构,根据对新发现铀矿床的评价和地质勘探的结果,每年都公布修正过的世界天然铀储量、产量和需求量。地壳中铀的储量分为“可靠”储量和“补充推定”储量。这两种储量又都按基本原料——八氧化三铀的开采、加工和制备的成本(以美元为单位)***划为两级:低于或

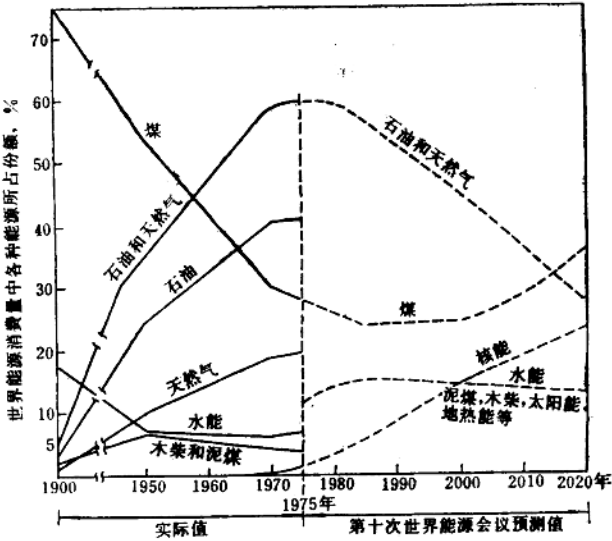


图1.3 1900~2020年期间各种一次能源世界总需要量的发展动态

* 国际原子能机构——为促进扩大原子能的和平利用于1957年成立,属联合国组织。有114个成员国参加(1978年),苏联参加了该组织。国际原子能机构总部设于维也纳(奥地利)。该机构的一个最重要的职能是,根据1980年底100个以上国家签署的《防止核武器扩散条约》,保证核的裂变和聚变能仅用于和平目的。

** 经济合作与发展组织——在美国倡议下于1961年成立,是资本主义国家政治经济协调组织。该组织有24个成员国,包括美国、加拿大、日本、澳大利亚和西欧资本主义国家。1974年,该组织成员国一次能源消费量占全世界一次能源消费量的58.3%,其中包括进口石油1.3Gt。

*** 1978年以前,铀的价格(按1973年行情)分为四类:低于26;39;78和130美元/kg。在1974年以前期间(即资本主义国家能源危机之前),认为39美元/kg的价格过高,不能保证核电的经济合理性。在进行价格比较时,应考虑通货膨胀、物价的普遍上涨和美元贬值。

等于66美元/kg(换算为金属铀成本为80美元/kg 铀)和由66到110美元/kg (80~130美元/kg 铀)。

根据国际原子能机构和经济合作与发展组织下属核能机构发表的资料,按1978年的情况,世界的总储量(不包括苏联和社会主义国家)约为9.0Mt;其中可靠储量约为4.62Mt(约占50%),其中2Mt属于成本低于80美元/kg的“廉价”铀。

现在,由于天然铀的需求量较低,1980年世界天然铀产量(苏联除外)约为41kt,主要开采的是“廉价”铀,即含 U_3O_8 0.1%以上的铀矿石。随着铀需求的增长,预计工业上将利用含 U_3O_8 低达0.02%的贫铀矿。根据国外专家的估计,由这样的矿石中提取铀,矿石开采和加工的成本要比从含量为0.1%的矿石中提取铀至少高一倍。当铀的成本在80美元/kg铀以下时,热中子反应堆核电站可以同有机燃料电站相竞争。在某些地方条件下,当铀成本高达130美元/kg铀时,热中子反应堆核电站仍能保证必要的经济合理性。

在资本主义世界中,石油、天然气和煤的价格继续上涨,使铀的成本上限向上浮动,使铀矿石在工业利用上经济合理的铀含量向更加贫铀的方向浮动,这导致可用储量的增加。然而,现在关于铀的可靠储量和补充推定储量的数据,远未充分反映地壳中铀资源的真实情况。在铀资源的勘探上,美国的工作做得最多。根据美国能源部的计算(1978年5月份资料),美国的可靠铀储量估计为890kt(成本低于130美元/kg铀的类别),可保证总电功率为160GW的核电站运行30年*。美国的成本低于130美元/kg铀的可能储量估计为3.5Mt,其中推定的为1.4Mt,可能和推测的为2.1Mt。如果把美国的数据作为计算的基础,并假定未知部分储量与未勘探和很少了解地区的面积成正比,那么在考虑地质因素和铀矿分布的情况下,世界可能的铀储量估计约为25~30Mt。并可以认为,所有这些储量的开采和加工,在经济上是上算的。

与矿物有机燃料储量相比,推测的世界天然铀储量的含能值又如何呢?这取决于在核能设施中核燃料利用的规模、工艺和技术。

众所周知,1t天然铀中仅含有7.1kg易裂变物质(^{235}U)。其余部分(^{238}U)约993kg,在反应堆内受中子照射,可以转变成为(产额甚低)新的易裂变物质钚。1g核燃料(铀或钚)的裂变,可以产生0.95MWd或22800kWh或19.6Gcal(82GJ)**的热能,这相当于2.8t标准煤所产生的。

1t天然铀可能产生的能量与反应堆堆型、燃料循环和再生燃料(铀和钚)复用的计划有关,其变化范围甚大,约为4~600GWd/t。如用热中子反应堆而不复用钚(再循环),则1t天然铀释出的热量相当于12~25kt标准煤释出的(见图1.4)。在热中子反应堆中复用钚,可提高上述产能值0.5~1倍。在这种情况下,天然铀所含能量的利用率为0.8~1.6%,其推测储量25Mt相当于600~1200Gt标准煤,这与石油的估计储量相当,而石油在世界矿物燃料资源平衡中的份额不大于15%。显然,铀对世界能源储量的这种贡献,不能解决人类长期的能源需求问题。然而,如果在快中子反应堆中利用铀-钚燃料,则铀在世界燃料资源平衡中的贡献将增大数十倍。在这种情况下,25Mt天然铀将相当于45Tt标准煤,即超过估计煤储量的好几倍。如果这样做,可以指望至少可以完全解决几百年内的人类能源需求的问题。

* 不考虑核电站乏燃料经后处理回收的铀和钚的复用。

** 假定每一次裂变释放出200MeV能量。

在此期间，可以充分地进一步改进现有能源的利用和生产工艺，并开发新的能源。

上述核燃料能量储备的数据，只考虑了可开采和经济上合理（按今天的概念）的铀资源。众所周知，铀的分布很广，但在地壳中极不集中。铀在地壳中的平均含量为 $3 \times 10^{-4}\%$ 。在许多种岩石（花岗岩、玄武岩）中，都有少量铀存在（ $2 \sim 4\text{g/t}$ ），而海水中的铀可以说是取之不尽的。对海水中铀储量的估价表明，如果能研究出比较经济的海水提铀工艺，则人类的铀资源可以增大到 $4 \sim 6\text{Pt}$ 标准煤（见表1.4）。如果又能研究出受天然铀生产成本的影响不大的核电技术，如增殖核燃料的快中子堆，则在利用这种实际上取之不尽的资源道路上，连经济上的障碍也不存在了。

为了生产核电，除铀外，还可以利用钍。钍在地壳中的平均含量约为 $1.2 \times 10^{-3}\%$ ，几乎为铀的4倍。在必要时利用钍，可使核燃料的储量增加数倍。

因此，掌握核能，实质上仅仅是能源供应和能源资源领域中科学技术革命的开端。这些都是人类进一步前进所必需的。我们是工业规模建造经济上有利的大功率热中子反应堆核电站的见证人和参加者。这种核电站的应用，可以使在现代工艺水平条件下可开采的可靠能源资源扩大一倍。

现在已经开始掌握工业规模建造和运行快中子增殖堆核电站的技术。广泛地利用这样的反应堆发电，就可以完全消除在可预见时期内，世界能源资源所受到的限制。

为了创造新型的核能发生器，现正积极研制受控热核装置。在这样的装置中，强大的能流不是产生于铀、钚重原子核的裂变，而是产生于氢同位素（氘和氚）的轻原子核的聚变。

现在面临的任务是在快中子反应堆中大规模地实现U-Th和U-Pu燃料循环，即将非

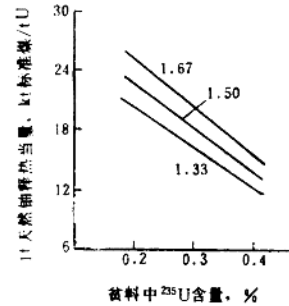


图1.4 热中子反应堆中1t天然铀产能当量值（折算为标准煤吨数）与铀同位素分离工厂燃料中 ^{235}U 含量和发生裂变的 ^{235}U 核数（由 ^{235}U 形成的）的贡献的关系（曲线上的数字为发生裂变的 ^{235}U 和 ^{239}Pu 核数与消耗掉的 ^{235}U 核数的比值，1kg裂变核的产能值相当于2.8kt标准煤燃烧的产能值）

表1.4 世界铀资源以各种使用方式用于热中子堆和快中子堆核电站的产能效率
(按能值折算为标准煤) 单位: Gt标准煤

天然铀资源	用于热中子反应堆			用于快中子增殖反应堆
	不回收核燃料	回收核燃料并复用铀	复用钚	
5Mt (勘定储量)	81	118	236	8850
25Mt (推测储量)	405	590	1180	44250
25Gt (包括利用全世界海水中的铀)	40500	59000	118000	4425000
1t天然铀的产能值, MWd/t	5500*	8000*	16000*	600000**
折算为标准煤吨数, t标准煤/t	16225	23600	47200	1770000

* 分离工厂燃料中 ^{235}U 含量取0.2%。

** 燃料循环中损失合计为2%。