

835897

HENENG YU HUANJING · HENENG YU HUANJING

587

7/4372

核能与环境

E. E. 埃-欣 纳威 等 编

(联合国环境规划署)

原子能出版社



核 能 与 环 境

E.E.埃-欣纳威 等编
(联合国环境规划署)

杨启烈 李 锐
姜 樾 卢仁华 译
李恒腾 郝彦威

袁良本 林成勤等校

原 子 能 出 版 社

内 容 简 介

本书系联合国环境规划署能源特别委员会主席E.E.埃-欣纳威等编写的一本论述核电站和核工业各生产环节的环境问题的著作。书中评价了铀矿开采、水冶和核燃料加工、制造的环境影响，论述了核电站和核动力堆事故中的放射性释放以及核燃料后处理对环境的影响，讨论了核废物的处置和管理以及放射性物质运输所带来的环境问题，对核能的非放射性的环境影响也专门进行了讨论。

本书可供从事核电站和核工业环境保护的技术人员参考，也可供高等院校原子能和环境工程专业师生参考。

NUCLEAR ENERGY AND THE ENVIRONMENT

Edited by ESSAM E.EL-HINNAWI

United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya

Publisher at Pergamon Press

First edition 1980

核 能 与 环 境

E.E.埃-欣纳威 等编

杨启烈 等译

袁良本 等校

责任编辑 韩国光

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京丰华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092^{1/16}印张13.25字数325千字

1987年11月北京第一版·1987年11月北京第一次印刷

印数1—1330·统一书号: 15175·752

定价: 3.25元

前 言

核能是一种重要的动力资源。可是，核动力的开发却引起了一系列复杂的争论。这些争论涉及政治和社会经济、环境和道德以及技术等方面的问题。

核动力的支持者宣称，核动力作为一种安全而干净的能源，是未来世界不可缺少的。他们断言，同各种化石燃料相比，核能会以较低的价格提供电的基荷；如若没有核能，则人类对电能日益增长的需求将不可能得到满足。他们认为，核能比化石燃料对环境和人类健康的危害更小。他们还强调，反应堆发生严重事故的几率很小；放射性废物仅在数百年内才具有危害性，而且在此期间还可以进行处理，使它们不致对人类及其环境造成任何损害。

另一方面，核动力的批评者认为，核能是一种不能接受的危险能源。他们对其经济竞争能力和安全性，以及对人类当前和后代健康的影响都表示怀疑。他们特别强调发生灾难性事故的可能性，以及来自放射性废物的持久威胁，担心这些因素将危及未来几千年的文明。他们断言，核动力将导致核武器在全世界的扩散，而核燃料循环设施则可能成为恐怖主义者攻击的目标。核动力的批评者列举出许多国家都未签署“不扩散核武器条约”；同时还指出，为防止将核技术从生产动力转为生产武器的核监督，实际上是无效的。他们对缺乏监督放射性物质的方法表示担心，也担心在实践上难于有效地核实核物料的贮存量。他们对各国可以很容易地退出监督协定，以及对缺乏有效的制裁办法来防止受监督的核物料的转移等，都进行了批评。

编写本书的意图，是在综合评价核能对环境影响的准备过程中产生的。该评价是联合国环境规划署(UNEP)所承担的对不同能源的生产、运输和使用中产生的环境问题的一系列研究的一部分。这些研究工作的大纲是本书的编者制定的。有关核能方面的研究，邀请了许多国际著名权威参与撰写核燃料循环各个阶段的环境问题的专论。这些论文最初是为编写一份联合国环境规划署的综合性报告而准备的。然而，鉴于该问题具有广泛的兴趣，我们认为出版若干原始论文更为可取。

希望此书能向读者提供本领域的各国专家对核燃料循环各阶段的环境影响所作的公正评价。本书各章所阐述的仅是各个作者自己的观点，并不代表他们所在的组织、机构或联合国环境规划署。

最后，我对各章作者真诚的合作表示感谢。感谢联合国环境规划署执行主任 M.K.Tolba 博士，没有他的支持和鼓励，本书是不可能完成的；感谢联合国环境规划署副执行主任 P.S.Thacher 先生和助理执行主任 S.Evtcev 博士的帮助和支持；感谢渥太华比斯沃斯联合公司(Biswas and Associates)董事 Asit K.Biswas 博士在编写本书的整个过程中所给予的关心并提出建议和帮助。

Essam E.El-Hinnawi

肯尼亚，内罗毕

1980年2月

目 录

前 言	
第一章 绪论	(1)
第二章 放射性矿石的开采和水冶与核燃料精制加工和制造过程的环境影响的评价	(11)
第三章 核电站的环境影响	(36)
第四章 核能对环境的非放射性影响	(51)
第五章 核动力反应堆事故中的放射性释放对环境的影响	(66)
第六章 核燃料后处理的环境影响	(96)
第七章 核废物的处置：处置工艺及环境危害	(117)
第八章 核燃料循环的废物管理对环境的影响	(141)
第九章 核燃料循环中的放射性物质运输对环境的影响	(186)
第十章 核能的未来	(200)

第一章 绪 论

Essam E.El-Hinnawi

(联合国环境规划署能源特别委员会主席)

能源长期以来就被看成是满足人类基本需要, 促进和支持经济发展, 以及提高生活水平的重要因素。在历史上, 能源曾经被认为是价廉而丰富的。可是, 近来已经认识到, 化石燃料, 特别是石油, 在数量上是有限的, 而且应当看作是正在枯竭的资源。“能源危机”一词已经成为全世界的流行语。但是要给这一“危机”下定义是很困难的。问题的引起是由于供应不足还是供应脆弱(易受破坏)? 或者, 能源价格上涨成为全球性通货膨胀和经济衰退的重要原因? 也许危机一词可以定义为对能源的“过度”需求, 或浪费能源的普遍习惯? 当然, 危机一词可能包括上述的全部含义。

能源的生产和使用所带来的环境问题, 在一些地区和国家, 在某些情况下甚至在整个区域的范围内, 已成为广泛争论的课题。对环境认识和反污染运动已经影响了许多国家的能源政策的制定。而且, 近来还认识到各国在这一问题上不是孤立的, 一个国家的行动可能影响邻国的环境。但是, 不应该把环境保护的目标看成是同能源政策不相容的或强加于能源政策的束缚, 在保持和改善环境质量与取决于能源可利用性的社会经济目标之间应当能够保持平衡。

能源的生产和使用所带来的环境问题, 已日益成为各国制定能源政策和战略时考虑的重要因素。对于核能来说情况更是如此。核动力设施的研制和运行一开始, 人们就认识到该技术与许多安全和环境危害问题有关。但是, 核作业在国家与国际范围内都受到管理机构的监督, 这种监督保证了高度的安全和环境保护。核设施的设计、建造和运转都按照严格的标准进行, 而且关于辐射对人的影响已有广泛的研究。一般来说, 虽然研究工作的目的在于鉴定辐射对地球生物圈的影响, 但是很清楚, 这是一个复杂的领域, 为了能更详尽地评价低水平辐射对生物圈的影响, 需要进一步的研究。此外, 普遍的看法是, 与核能和其它常规能源有关的环境问题并未完全解决。对于可供选择的能源战略方针的评价, 无论是在地区、区域或全球的范围内, 都要求进行彻底的综合性研究。

一、环 境 影 响

“环境”一词可定义为: 人类和其它生物赖以生存的整个外界的物理和生物的系统。环境虽是一个包含许多相互作用的组成部分的复杂系统, 但它是一个整体。对环境的明智的管理, 取决于对它的下述组成部分, 即岩石、矿物、水体、土壤及其现在可能有的植被、动物和气候等的认识。良好的管理可以避免由于不可逆转的损害而造成的污染、侵蚀, 以及资源的浪费。阻止这类环境的退化, 与当其出现之后再去矫正相比, 是更重要的任务, 而且也肯定会更加有效。

在任何一种特殊能源技术的各种潜在的环境影响中，有一些是主要的，而另一些则影响较小；有一些很重要，而另一些则无足轻重；有一些只有短期影响，而另一些则具有长期影响；有一些可能是有害的，而另一些则可能是有利的。它们可能出现在不同的地理区域，并以各种方式影响不同的公众。关于对环境影响的性质、规模和地理分布的评价，与有关环境影响的价值和重要性的估价应该有所区别。对于许多被确定为有“影响”的环境变化，现今的知识和技术水平，往往仅能作出定性的评价。只有在少数的情况下，才有可能定量地对环境影响作出评价。决策的最终作出，必须根据代价-利益分析，以及其他定量化的输入和定性的信息等的综合考虑。

对各种能源对策的环境影响的讨论，过去较多地集中在短期的问题上，如职业人员和公众的健康，以及对物理环境的直接影响等，而不太注意长期的社会经济的和环境的后果。但是，现在分析这些长期影响的倾向正在日益增长。这类长期影响包括的范围从已有基本数据且所涉及的危险也相当肯定的影响到性质上仅是推断的且很少数据可供利用的各种影响。

生物圈包括由地形、土壤、气候、供水和排水等物理特征所维持的各种有机体、植物和动物。对于给定的开发行为来说，这些物理特征可能受到影响，进而生物圈也可能受到影响。无论什么时候释放污染物，要分析这些污染物的环境影响，就需要具有如下的知识：

- (1) 所释放的污染物的数量和类型；
- (2) 这些污染物在环境中的分散状况；
- (3) 污染物所遵循的生态途径；
- (4) 污染物与其对人类及环境的损害之间的关系；
- (5) 损害的程度，包括损害的代价（当有可能作这类评价时）。

某些污染物的总影响，可能取决于正的或负的协同效应。虽然若干污染物的“可接受水平的标准已经制定出来，但对有关辐射照射的假定，以及对致癌化学品和可能有致突变或致畸变效应的物质，仍持谨慎态度。因为不存在阈值，这些效应能在很低的照射量（剂量）下发生。另一特点是，放射性物质和其他许多致癌物质，在其释放停止之后很长的时间内，仍可能停留在环境中（而且很容易进入食物链）。虽然评价这类污染物的长期影响比较困难，但应该进行尝试。这种尝试应考虑这些污染物在环境中的不同途径，生物地球化学循环，以及它们在环境中的归宿等。

评价任一燃料循环不同阶段产生的环境影响，对开发能源的方案和方案“组合”的决策和政策制定具有重要意义。保护自然环境对人类赖以生存的食物、空气和水循环的维护和管理，以及对社会经济的发展都是十分重要的。任一能源技术对人类环境的最重要的影响，可能是对健康、安全和社会福利方面的影响。对核动力来说，公众的关心集中于下列几点：

- (1) 可能与核燃料循环某些部分有关的辐射对人的效应，包括躯体的和遗传的效应；
- (2) 核燃料循环各阶段在国民经济上的代价和效益的不同特性，以及在时间上和地区之间的分布；
- (3) 与放射性废物和（或）乏燃料处置有关的环境影响；
- (4) 从乏燃料的后处理分离出的钚的使用情况；担心被恐怖主义者盗窃和错误使用，或转用于生产核武器；

(5) 需要对核燃料循环的某些部分作连续的监测和监视。对于废物处置, 这种监督可能要延长到现行的安全处置观点得到验证并被接受时为止。

核动力工业产生的许多环境影响与化石燃料(特别是煤燃料)产生的相似, 例如热污染, 占用土地, 非放射性和放射性的排放物, 以及职业危害等。但是, 对核燃料循环作业排放物主要关心的是放射性及其对生物圈的影响。特别是对人类健康的影响。虽然辐射防护的主要目的是为那些使人类受其照射的活动建立和维持适当的安全条件, 但是为保护人类所需要的安全水平大概也足以对其他种生物(虽然不是其中所有的个体)提供足够的防护(ICRP-26, 1977)。因此国际放射防护委员会(ICRP)相信, 如果人类受到足够的保护, 则生物很可能也会受到充分的保护。但是, 生态变化有时难以预见, 需要注意接受较高辐射剂量地区的生态变化(Royal Commission Environmental Protection, 1976)。

放射性释放到环境中会对生物圈造成辐射照射。这可能受许多途径的影响。这些“环境途径”如图1所示。辐射照射可能是外部的、内部的或两者都存在。外照射产生于辐射源处于人体外部的时候, 例如放射性沉积于地面或象云一样通过上空。如果释放的某种放射性被摄入体内则会产生内照射。这种情况可能直接产生于吸入某些被释放的放射性, 或由食用被污染的食物而摄入放射性。后者可通过“食物链”而产生。这种食物链可能只有一级, 例如叶类蔬菜受直接污染; 或者经过一系列的级而转移到人类的食物。这些食物链的性质依赖于生态因素; 由于放射性物质的化学性质, 它们可能被暴露于污染物中的植物群或动物群所浓集。

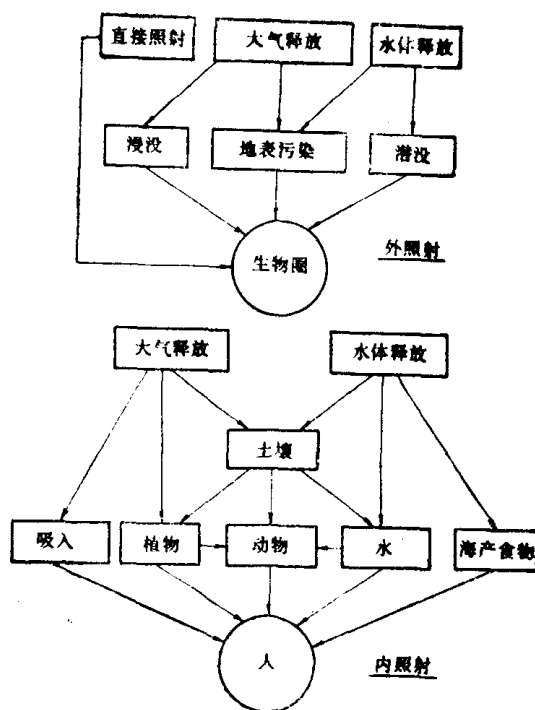


图1 辐射照射途径

该过程具有很强的地区特性, 而且随之而产生的对人的照射还取决于食物的消耗率和习惯。由于后一种原因, ICRP 提出了“关键组”的概念。对于任何一种拟定的向环境释放放射性的方式, 通常都会发现由于某种途径使一组人员(“关键组”)接受的辐射照射量高于

其它的居民,适当控制该组成员的照射量,就能保证公众的单个成员的安全防护。关键组的大小是可变化的,这取决于各种特定的环境,而且和该组成员的特定食谱和工作习惯有关。这些食物链,常常是导致放射性被人摄入从而对人造成辐照的最重要的环境途径。

电离辐射的危害性首先由人工辐射源产生的照射显现出来。上世纪末X射线的发现和放射性物质的鉴定与分离,除带来巨大的利益之外,还产生了料想不到的危害。由于对人体辐射损伤的观察以及对动物的放射生物学实验,增进了对辐射的总效应的知识,这就使辐射防护的需要成为明显的事。国际上在这方面采取的第一个行动是1928年第二届国际放射学会议决定建立国际放射防护委员会,以便在辐射防护领域内提供指导和提出建议。在我们的环境中,由于来自人工辐射源(如加速器、核反应堆和人工制造的放射性核素)的放射性活度的增加,因而辐射潜在的危害和辐射防护的问题也就随之增加。这使UNSCEAR(联合国原子辐射效应科学委员会)、ICRP和类似的团体必须对辐射水平和效应进行评价,并为辐射防护提供建议(详见UNSCEAR,1977;ICRP-26,1977)。

二、核动力的增长

为了满足世界电能需求的一部分,核能的开发和商业应用已有大约20年的历史。1978年全世界20个国家共有227个动力堆在运转,核电的总装机容量为110.8GW(e),约占全世界电功率容量的6%。

在过去三年中,对到本世纪末核动力的增长已有几种估计(表1)。这些估计数字(中央计划经济国家不包括在内)互相之间差别较大,1985年以后差别就更大一些。

表1 核动力增长估计值的比较(GW(e))

	1985	1990	1995	2000
OECD-NEA (1976)	479~530	—	—	2005~2480
Hanrahan等 (1976)	358	629	—	1410
Krymm和Woite (1976)	350~400	—	—	1500~1800
Giraud (1976)	420	940	1500	2100
Messer (1977)	310~360	550~650	—	—
Williams (1977)	300~350	500~600	730~870	900~1100
Braatz和Dibbert(1977)	372~456	700~865	1110~1360	—
WAES (1977)	291~412	—	—	913~1772
Duret等 (1978)	303	—	—	1543
OECD (1978)	278~368	504~700	750~1220	1000~1890

经济合作与发展组织(OECD)提出的数值(1978)反映了两种趋势:最低的数字表示“现时的趋势”注意到对能量利用和供应的现行模式,以及目前新反应堆建设的迟缓,而且设想该趋势还会继续下去;较高的数字代表“加速的”趋势,这种趋势反映了相应于可能得不到常规燃料而计划的有雄心的核动力规划。最近国际原子能机构(IAEA,1979)估计,到2000年时,全世界总的核动力将增长到1100~1700GW(e)的规模(见表2)。

应该指出,对未来长时期核能生产的估计不可避免地要产生很大的不确定性,而且仅提供非常一般的说明,其可靠性必须经常受到严格的修正。很多能源预测(包括上述的一些预测)都是建立在各种不同的假设和组合程序之上的,这就使这些预测仅为近似性的和象

表2 世界电能和核能总装机容量的估计值[GW(e)]*

	1978	1980	1985	1990	2000
总 电 能	1900	2100	2700~3000	3300~3700	5500~6600
总 核 能	110	170	300~350	475~600	1100~1700
核能(%)	5.8	8.0	11.7~12	14~16.2	20~26

*根据IAEA估计(1979)。

征性的,而且经常发生变化。影响这些预测的主要因素是:

- (1)世界和区域性的经济发展状况;
- (2)经济增长和能源消耗的关系;
- (3)能源的生产和消耗所受到的物理、经济、环境和政治的约束;
- (4)不同能源未来的价格;
- (5)不可再生的资源将来利用的可能性和使用它们的优先程度;
- (6)公众对核动力发展的反应和担心,等等。

三、核 燃 料 循 环

“核燃料循环”是指铀矿的开采和水冶,核燃料元件制造,反应堆运行,乏燃料的后处理(当选择再循环方案时),以及循环各阶段产生的废物的管理等全部过程。

1. 核反应堆的类型

核反应堆按照它们的基本物理原理分为两大主要类型。“热堆”是指用慢中子维持链式反应的反应堆,而“快堆”则是指依靠快中子维持链式反应的反应堆。在第一种类型的反应堆中,裂变是由一些与“慢化剂”的原子核碰撞而失去大部分原始能量的慢中子诱发的。这样的慢中子很容易使 ^{235}U 裂变,而逃避燃料中大量存在的 ^{238}U 的俘获。在这样的条件下用重水或石墨作慢化剂可以在天然铀中诱发链式反应,如用普通水(轻水)作慢化剂,象通常实践中使用的那样,必须使 ^{235}U 的含量由天然铀的0.7%浓缩到约2~3%。在“快堆”中,可裂变核的浓度比较高,因此链式反应可由裂变放出快中子来维持,而不需要慢化剂。“快堆”可用浓缩到20%的铀运行,但通常用相应数量的最初在热中子反应堆中产生的 ^{239}Pu ,而 ^{239}Pu 最终可在快中子反应堆中增殖。

(1) 气冷热中子堆

气冷热中子堆包括镁诺克斯(Magnox)反应堆、改进型气冷反应堆(AGR)和高温气冷反应堆(HTGR)。在第一种反应堆中,用镁合金 Magnox 作包壳的天然铀金属燃料棒插入作为慢化剂的石墨块,以加压的二氧化碳作冷却剂。AGR 堆是 Magnox 堆的改进型,堆中的燃料稍有浓缩(约2%的 ^{235}U),而且是二氧化铀(UO_2)的形式。HTGR 堆是另一种类型的反应堆。燃料用混有氧化钍或碳化钍增殖组分的 ^{233}U (氧化物或碳化物),以石墨作慢化剂。 ^{232}Th 俘获中子变成 ^{233}U ,它是可裂变的,因而增加了反应堆的燃料供应。该堆用氮作冷却气体。

(2) 水冷堆

水冷堆用轻水或重水作冷却剂。全世界的商业动力堆大多数用轻水,因而被称为轻水堆(LWR)。所有类型的反应堆中最简单的是沸水堆(BWR),它用水作冷却剂和慢化剂,并直

接提供驱动涡轮机的蒸汽。燃料是低浓缩度（典型的为 2.4% ^{235}U ）的二氧化铀。在压水堆(PWR)中，用加压的水作冷却剂和慢化剂。高温的冷却剂水用来使低压的回路系统生产蒸汽。燃料也是低浓缩的二氧化铀（约 3% 的 ^{235}U ）。加压重水堆(PHWR)用 加压的重水同时作慢化剂和冷却剂。它用与 PWR 堆一样的方法在二回路中生产蒸汽。但是，PHWR 堆中的二氧化铀是未经浓缩的。这类堆的最普通的类型是“加拿大重水铀反应堆”(CANDU)。产汽重水堆(SGHR)用重水作慢化剂而用轻水作冷却剂。和 BWR 堆一样，轻水蒸发提供蒸汽直接驱动涡轮机。该类型的反应堆中，燃料是浓缩到含 2% ^{235}U 的二氧化铀。

(3) 快堆

已建造的或迄今计划建造的快堆都是增殖堆。快中子增殖堆(FBR)所用燃料的典型组成是约 20% 的钚氧化物和天然铀或贫铀氧化物。至今计划建造的主导类型的FBR堆中，由反应堆燃料的中子将可转换材料（例如主要置于堆芯周围再生区中的 ^{238}U ）转化为易裂变材料 ^{239}Pu ，因而有“增殖堆”的名称。作为原型运行的 FBR 堆的常见堆型是液态金属快中子增殖堆(LMFBR)，堆中用液态钠作冷却剂。

2. 轻水堆核燃料循环

至少到 2000 年，最普通的堆型将是轻水堆(LWR)（见表3）。

目前 LWR 堆的燃料由浓缩度为 2.5~3% 的 ^{235}U 组成。其他易裂变材料如 ^{239}Pu 或 ^{233}U 也可以使用。LWR 堆中生产的能来源于热中子引起的 ^{235}U 裂变。但是，热中子也与 ^{238}U 相互作用而生成易裂变的钚，而钚又反过来经裂变反应对能的生产作出贡献。LWR 的平均转换比为 0.6，即每 10 个 ^{235}U 原子裂变，就有 6 个钚原子生成。此时将乏燃料从堆中卸出，燃料中发生的一半以上的裂变是来自自身产生的钚而不是来自 ^{235}U 。

表3 到2000年各类反应堆所占比例*

年份	总核能 [GW(e)]	LWR (%)	AGR (%)	HWR (%)	GGR (%)	FBR (%)	HTGR (%)
1977	87	85.1	3.5	4.6	6.9	—	—
1980	146	86.3	4.1	4.8	4.1	0.7	—
1985	278	90.2	2.2	4.7	2.2	0.4	0.4
1990	504	91.2	1.2	5.6	1.2	0.4	0.4
1995	750	91.1	0.8	6.7	0.5	0.5	0.4
2000	1000	90.1	0.6	7.5	0.2	1.0	0.6

* 根据OECD/NEA (1977)；不包括苏联、东欧国家和中国的数字。

LWR 轻水堆（压水堆与沸水堆的比例约为6:4）。

AGR 改进型气冷堆。

HWR 重水堆。

GGR 气冷石墨堆。

FBR 快中子增殖堆。

HTGR 高温气冷堆。

当核燃料由于易裂变物质的消耗，燃料和燃料元件内吸收中子的副产物的积累，因而不再能按经济的功率水平维持中子链式反应时，就被认为是乏燃料。但是，此时燃料中仍含有相当数量的易裂变的核素。在典型情况下1GW(e)·a 产生的44t乏燃料中含有约260kg 易裂变的钚和 350kg 未加利用的 ^{235}U 。LWR 堆乏燃料从堆芯取出之后，有几种可供选择

的方案:

(1) 乏燃料棒不经后处理而直接处置。这就是不再循环方案。根据处置性质又分为永久性的(抛弃)或可回取的(贮存)两种情况。

(2) 通过乏燃料的后处理回收铀。这种铀中所含的 ^{235}U 稍高于天然铀,可进一步浓缩后供制造新燃料用。该方案叫做铀单独再循环。在此阶段,乏燃料中的钚又分两种情况:永久处置(抛弃)或可回取的贮存(贮藏)。

(3) 从乏燃料中回收钚,并与 ^{235}U 含量较低的铀或 ^{238}U 形成铀-钚混合氧化物或“混合氧化物”燃料。在该情况下钚已进行了再循环。

LWR堆核燃料循环的这几种方案可用图2、3和4加以说明。

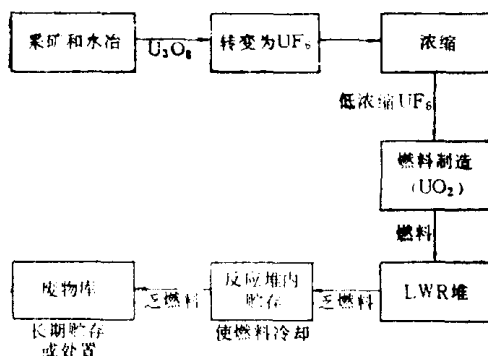


图2 LWR堆燃料循环：不再循环方案
(根据APS,1978)

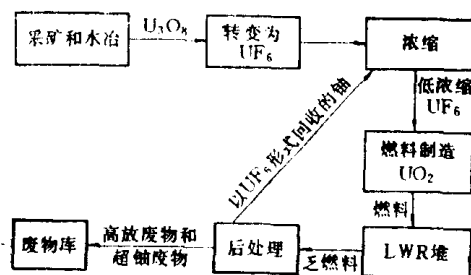


图3 LWR堆燃料循环：铀单独再循环
(根据APS,1978)

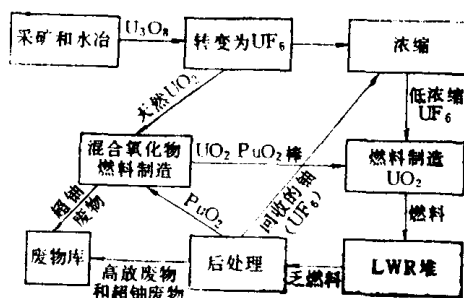


图4 LWR燃料循环：铀和钚再循环
(根据APS,1978)

目前, LWR 堆燃料的再循环方案在美国已经无限期的推迟, 仅有少量的再循环方案在其他的地方进行。一些研究工作对不同方案作了比较 (如 GESMO, 1976; APS, 1978), 并得出如下的看法:

(1) 当铀和钚都再循环时, 2000 年浓缩铀的供应需求比铀单独再循环的方案要减少约 20%。与不再循环的方案相比, U_3O_8 和天然 UF_6 的需求会降低约 30%。

(2) 铀和钚的再循环会导致在安全防护方面有更多要求的纯铀的商业贸易。

(3) 如果全部乏燃料都进行后处理, 且钚也进行再循环, 则进入各种核废物中的钚的数量预期会达到不进行再循环时的钚的 1~2%。但钚的再循环要求更多的操作, 如后处理、混合氧化物的制造, 以及各种类型的废物的管理等。这些将会引起更多的经济、健康、安全和环境方面的问题, 这些问题不同于不进行再循环的方案所遇到的问题。

LWR 生产 1GW(e)·a 电能对燃料循环的需要概括地列于表 4。

3. 其他燃料循环

单从扩大资源来说, 在通常的 PWR 堆和 BWR 堆工艺中用钍代替 ^{235}U , 能提供实际的一定程度的利益。铀-钍混合氧化物燃料已经制成, 而且已在 LWR 堆中做过实验, 证明它具有令人满意的性能。前面已经说过, 轻水堆的再循环方案将在反应堆的 30 年使用期内导致对矿石需求的显著减少 (U-Pu 再循环和不再循环的方案相比, 整个使用期的净增益约为 30%)。采用 LWR-Th 反应堆在铀矿开采方面可进一步节省约 16%。对钍的利用来说, 重新设计堆芯或慢化-冷却系统以改进转换比, 可能得到好处。

表4 LWR生产1GW(e)·a电能对燃料循环的需要——不再循环方案*

燃料循环阶段	单 位	需 要 量
采矿**	t(U_3O_8)	340
水冶	t(U_3O_8)	307
UF_6 转换	t(U)	266
浓缩	t(SWU)***	132
UO_2 燃料生产	t(U)	43
乏燃料贮存	t/a(重金属)	41.2
运输	km	9.4×10^4
废物管理	ha (公顷)	5

* 根据 GESMO, Vol.3, P.IVJ(E)-17。

** 需要铀矿石的量随矿石的品位而变。在 GESMO 一文中矿石平均品位约为 0.1%; 采掘的矿石量为 340000t/GW(e)·a。

*** 分离功单位(SWU)是将一定数量给定成分的U分成两个组分(一个有较高百分数的 ^{235}U , 另一个只有较低的百分数)所耗费的功。

CANDU 堆的铀矿需要量低于轻水堆燃料再循环。用自身生成的钚再循环, CANDU 堆可能实现显著的节省 (约 50%)。用 ^{235}U 、钍和再循环铀给 CANDU 堆装料, 会导致铀矿石消耗的进一步减少 (这类循环可比自身生成的钚再循环的铀装料方案减少 39~45%)。

高温气冷堆 (HTGR) 是用天然 ^{232}Th 作可转换材料、用高浓缩铀作易裂变材料的氮石墨慢化反应堆。该反应堆的装料用钍、补充的 ^{235}U 以及从乏燃料回收的铀 (^{233}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U)。实现从 LWR 堆乏燃料回收钚作燃料的另一个方法是在 HTGR 堆中再循环这种钚以代替通常使用的高浓缩铀 (^{235}U) 的补给。由钍吸收中子而生成的铀同留在乏燃料中

的钚一起再循环。

液态金属快中子增殖堆(LMFBR)计划实施的目的在于发展用铀和钚作燃料的第一代增殖堆。在Pu-U快增殖堆中,堆芯为钚-铀混合氧化物燃料,其周围用贫铀作再生区,贫铀吸收从堆芯泄出的中子而生成更多的钚。在LMFBR堆中,冷却剂是用液态钠,而在推荐的气冷方案中则用氦气。增殖堆对矿石的需求,仅是生产供第一代增殖堆启动时装料的钚所需要的矿石。上述钚必须从热中子反应堆获得,这类反应堆则需要更多的矿石,原因是它们没有钚的再循环得到的好处。在没有Pu再循环的情况下,LWR堆运行 $1\text{GW(e)}\cdot\text{a}$ 产生约260kg易裂变的钚。为生产启动 1GW(e) 的LMFBR堆所需要的7500kg可裂变的钚(初始堆芯需要3000kgPu,在乏燃料中的Pu被再循环之前更换装料需要4500kg),没有钚再循环的LWR堆必须运行 $30\text{GW(e)}\cdot\text{a}$ 。

由于轻水堆至少在2000年之前将继续是被采用的主要堆型,因此本书下述各章主要评价LWR堆燃料循环不同阶段的环境影响。

致 谢

作者感谢国际原子能机构(IAEA)Y.Ahmed博士;英国原子能管理局安全处(Safety and Reliability Directorate, U.K. Atomic Energy Authority)J.R.Beattie博士,联邦反应堆材料研究所(Institut Federal des Recherches en matiere reacteurs, Würenlingen) K.H. Buob博士,西班牙核能委员会(Junta de Energia Nuclear, Madrid)M.Carriera Vasquez博士,纽约布鲁克海文国家实验室(Brookhaven National Lab., New York) L.D. Hamilton博士,英国核燃料有限公司(British Nuclear Fuels Ltd.) H.Howells博士,巴黎居里研究所(Institut Curie, Paris) H.P. Jammet博士,加拿大曼尼托巴怀特歇尔核子研究所(White shell Nuclear Research Establishment, Manitoba) J. L. Weeks博士,渥太华比斯沃斯联合公司(Biswas and Associates, Ottawa) A. Biswas博士,以及澳大利亚环境部(Department of Environment, Canberra) G.Gorrie博士,感谢他们提供意见和帮助。

参 考 文 献

- APS: American Physical Society: Study Group on Nuclear Fuel Cycles and Waste Management, Review of Modern Physics 50, No. 1 Part II (1978).
- Braatz, U. and Dibbert, H.: Kernbrennstoffversorgung, Jahr. der Atomwirtschaft, (1977)
- Duret, M. F. et al.: The Contribution of Nuclear Power to World Energy Supply 1975-2000. World Energy Resources World Energy Conference, IPC Sci. Techn. Press, London, (1978).
- GISMC: Final Generic Environmental Statement on the use of Recycle Plutonium in Mixed Oxide Fuel in Light Water Cooled Reactors. Vol. 3. U. S. Nucl. Regulatory Comm., NUREG-0002, (1976).
- Giraud, A.: World Energy Resources. Conference on World Nuclear Power. Atomic Ind. Forum November, (1976).
- Hanrahan, F. J. et al.: Demand for Uranium. Atomic Ind. Forum, Phoenix, USA, (1976).
- IAEA: Private Communication, (1979).
- ICRP-26: International Commission on Radiological Protection Publ. No. 26, Pergamon Press, Oxford, (1977).

- Krymm, R. and Woite, G.: IAEA Bulletin, 18. P. 6; (1976).
- Messer, K. P.: Uranium Demand as Judged by Electric Utilities. International Symp. Uranium Supply and Demand, Uranium Institute, London, June, (1977).
- OECD: Nuclear Fuel Cycle Requirements, OECD, Paris, (1978).
- OECD-NEA: Uranium Resources, Production and Demand, OECD, Paris, (1976).
- OECD-NEA: Uranium Resources, Production and Demand, OECD, Paris, (1977).
- Royal Commission Environmental Pollution: Sixth Report, Nuclear Power and the Environment. HMSO, London, (1976).
- UNSCEAR: Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations, New York, (1977).
- WAES, Workshop on Alternativen Energy Strategies, Energy Global Prospects 1985-2000. McGraw-Hill, New York, (1977).
- Williams, K. R.: Projected Energy Requirements up to the year 2000. International Symp. Uranium Supply and Demand, Uranium Institute London, June, (1977).

(杨启烈译, 袁良本校)

第二章 放射性矿石的开采和水冶与核燃料精制加工和制造过程的环境影响的评价

J.M. Costello D.R.Davy

(澳大利亚原子能委员会研究所)

F.C.R. Cattell J.E.Cook

(澳大利亚原子能委员会)

一、 引 言

本章介绍已发表的对几种核燃料循环(从采矿到反应堆燃料制造)环境影响的评价。本文是为联合国环境规划署对各种能源的生产和使用的环境影响的详细评价而撰写的。

不同能源的比较要求尽可能现实地评价其环境影响。保守的评价不适合用来进行比较,即使影响是现实地计算出来的,由于考虑的范围广、分析及权衡影响和代价所用的方法多种多样,比较也会存在一些问题。本章的评论集中于自然资源的利用和污染物的影响,特别是它们对人类健康的影响。从性质上说,本评论属于一般性的。实际的影响在不同国家之间会有所不同,这尤其取决于所使用的标准和法规。即使在这些标准和法规范围内,环境影响也会由于地区以及所使用工艺类型的不同而有差异。一般性评论的不足之处是大量地忽略了这些差异。

2000年经济合作与发展组织(OECD)各国可投入运行的核电厂的预测如表1所示(OECD/NEA, 1977),该预测表明轻水堆将是主要的堆型,约占核电的90%。虽然在《国际核燃料循环评价》中,就防止核武器扩散、环境影响,以及经济和制度上的安排等方面,正在对各种反应堆的对策进行研究,但本报告集中讨论轻水堆所要求的燃料循环作业。

分别用天然铀金属和氧化物作燃料的石墨气冷堆(GGR)和重水堆(HWR)的燃料循环,在采矿、水冶及铀的纯化阶段是相似的,但在燃料的加工和制造作业上则有所不同;轻水堆(LWR)和改进型气冷堆(AGR)要求使用浓缩铀-235的燃料,因此要进行六氟化铀的生产和浓缩。生产铀产生的废物的处置方法(Tsivoglou and O'Connell, 1962)取决于原产国、地区环境条件以及国家对环境的态度。放射性矿石开采和加工中的废物管理工作目前仍在继续研讨中,但有关辐射防护的国际性建议和国家法规已经写成(IAEA, 1976; Commonwealth, Department of Health, 1975)。

美国已完成了核燃料循环影响的环境评价。早期关于铀燃料循环的一般性研究(USAEC, 1974; USEPA, 1973),为支持由LWR导出对土地和水的要求的数据,对排入生物圈的热的、化学的及放射性的流出物作了定量的估计(USAEC, 1974),并估算了健康及辐射效应(USEPA, 1973),这些一般性研究后来被扩展到评价LWR中铀钚再循环的环境影响(USNRC, 1976),以及其它燃料循环方式,如钍-铀增殖反应堆燃料循环的环境影响(USEDA, 1976)。国际上,联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)定期地评价核电造成的辐射剂量,但没有评价相应的公共健康影响(UNSCEAR, 1977)。

本章将比较详细地讨论采用二氧化铀燃料不作再循环的LWR燃料循环,并对其它

表1 反应堆类型分布* (按低功率增加估算)

年份	总功率 GW(e)	LWR (%)	AGR (%)	HWR (%)	GGR (%)	FBR (%)	HTGR (%)
1977	87	85.1	3.5	4.6	6.9	—	—
1980	146	86.3	4.1	4.8	4.1	0.7	—
1985	278	90.2	2.2	4.7	2.2	0.4	0.40
1990	504	91.2	1.2	5.6	1.2	0.4	0.4
1995	750	91.1	0.8	6.7	0.5	0.5	0.4
2000	1000	90.1	0.6	7.5	0.2	1.0	0.6

*根据 OECD/NEA (1977)。

LWR 轻水堆。

AGR改进型气冷堆。

HWR 重水堆。

GGR 石墨气冷堆。

FBR 快中子增殖堆。

HTGR 高温气冷堆。

核燃料循环的环境影响和这类燃料循环作简略的比较。

二、铀燃料循环的前几个阶段

铀是以低品位矿石开采的,通常含铀超过0.1%(重量)。一般情况下矿石在矿区加工,将铀浓集成可经济地运输的形式。浓集的商业产品叫做黄饼,其中铀的氧化物含量一般超过90%。天然铀仅含0.7%的铀-235同位素,在热中子反应堆中通过这种同位素的热中子核裂变可以产生动力。其余99.3%是同位素铀-238,对热中子来说它实际上是不可裂变的但可通过易裂变的钚的生产来提供动力。

不用天然铀而采用铀-235含量较多的浓缩铀,可容许范围较宽的设计方案和更紧凑的堆芯,这样可使投资降低。LWR堆和AGR堆要求用浓缩铀。GGR和HWR堆分别用天然铀的金属和氧化物,而不需要用浓缩铀。

如果需要浓缩,就将粗制的黄饼转变成纯的六氟化铀(UF_6),后者受热很容易蒸发。 UF_6 蒸气中的铀同位素在浓缩厂中得到分离,一般的情况是分离成含铀-235约2~4%的产品气流和贫化到含铀-235约0.2~0.3%的废料“尾”气。

燃料制造包括将浓缩的 UF_6 加工成陶瓷氧化物(UO_2),再加压成型并烧结成燃料芯块。芯块被封装并密封在金属管内,金属管按严整的排列方式组装成燃料元件的组件,组件就可以装入反应堆。

1. 铀矿开采

采矿作业 铀可用三种方法开采:

(1) 露天采矿 该法适用于接近地表的矿体,矿体上面的表土应能方便而经济地除去。这种作业包括采矿,以及与矿床相联的所有物料的清除和堆存。

(2) 地下采矿 该法适用于深度超过100m的矿体,或是矿石处在这样的岩石层之下,如果用其它方法开挖的话,需要作大量爆破和挖掘。该作业与露天采矿相比,对矿石具有更好的选择性,而且产生的废石较少,但采出效率较低。

(3) 溶浸采矿 该法对地下矿床中的矿石进行就地浸出。浸出液用泵打到处 理厂进