

电力生产与废物管理：对多种选择进行比较

IAEA 的一份调查报告比较了

核能发电和化石燃料发电废物管理费用的估计值

核能问世时，人们曾欢呼它将提供“最廉价的电力”。自那以后，已经过去了许多年。但开发核能的直接动机依然是为了在短期和长期内提供一种既买得起又可靠的电力来源。因此，发电成本极为重要，选用哪种成本计算方法同样也很重要。多年来，包括国际原子能机构(IAEA)在内的许多组织，对不同发电方式的相对成本进行了估算和比较，以便得出一个正确的看法。

自最初开发核裂变反应堆时起，放射性废物的管理就时常被看成影响核动力发展的主要难题之一。人们的担心已经扩展到与此相关的费用，特别是与高放废物或未经后处理乏燃料的处置相关的费用。核动力的反对者们在其论点中，广泛地但并非总是客观地引用这种费用。近来，一些环境保护主义者组织已经开始意识到任何一种能源生产方式都产生废物，并且都有环境影响，如果不加以适当控制，这些影响也许是不可接受的。近几年，“温室效应”、“酸雨”等课题逐步升级成为重要的政治问题。这已促使人们对燃烧化石燃料所产生废物的管理问题进行更加仔细的研究。过去对化石燃料废物的监管普遍很松，特别是世界上的某些地区。我们目前正处于这样一个阶段：核动力废物的管理活动依然受到极其严格的监管；用于管制来自化石燃料

发电厂的废物的法规也越来越严格。由于几乎可以肯定大部分电力将继续由这两种来源提供，因而现在正是评审各种废物管理实践及其费用的好时机。

本文是以 IAEA 进行的一项关于现有的废物管理费用估算值的调查为基础编写的。最近，已完成若干项有关不同的核废物管理阶段的费用研究工作。收集这些研究工作的成果，并将其与依靠其他能源的电力生产方式的废物管理费用做一客观比较，将是有益的。这种比较，可使我们对各种电力生产方式的经济与环境因素有一个正确的看法。

这次比较只涉及典型核电厂与典型化石燃料电厂所产生废物的管理费用。很明显，与电力的第三种主要来源即水电相关的各项废物管理费很低，因而此处不予考虑。化石燃料与核燃料均可在若干不同类型的发电机组中应用。鉴于对所有可能类型的机组都加以考虑是不实际的，因此笔者在比较时仅仅选用装机容量为 1000 兆瓦电(MWe)的机组作代表，并假定它们都将以 70% 的容量因子运行 30 年。

燃料循环

化石燃料循环。煤是工业化国家用于发电的主要化石燃料，尽管天然气的份额正在迅速上升。在有些国家，石油也是电力生产的重要燃料，但由于石油价格的变化

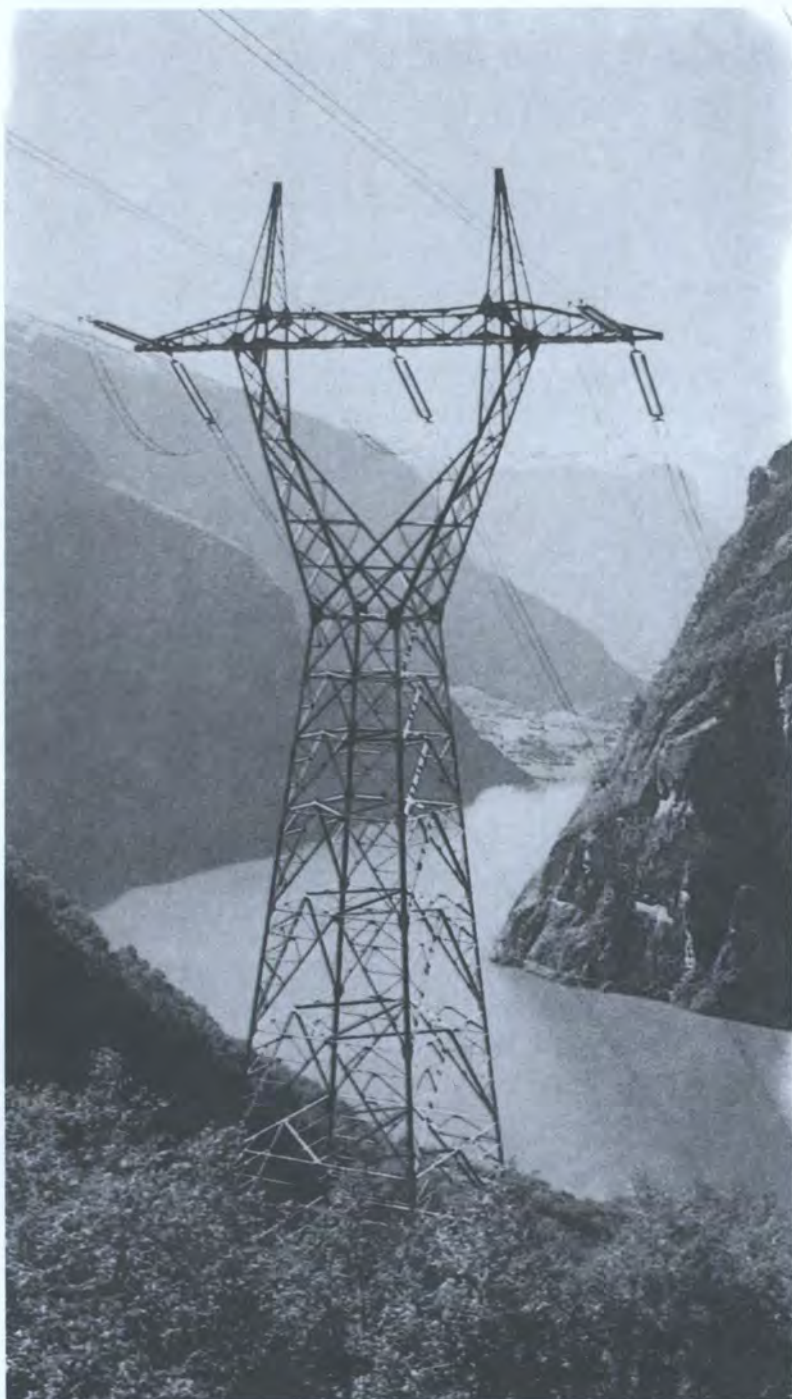
V. Tsyplov

Tsyplov 先生是 IAEA 核燃料循环与废物管理处职员。

可能很快,因而许多国家尽量避免利用它。从废物产生量方面看,石油介于煤与天然气之间。因此,将煤与天然气选作供比较用的代表性化石燃料。

现代燃煤电厂以煤粉为燃料。煤在燃烧时与氧气反应生成二氧化碳(CO_2)。在燃烧过程中,还生成氮的氧化物(NO_x)、二氧化硫(SO_2)、飞灰以及其它一些污染性副产

挪威的输电力线。(来源:挪威能源部)



物(包括煤中所含的放射性核素)。

就基荷发电而言,有两种天然气发电机组可供使用。一种是常规的蒸汽循环(CSC)机组,另一种是较新式的机组。后者在蒸汽循环之前使用燃气轮机,以提高机组效率。这种组合方式被称为复合循环(CC)机组。天然气的燃烧过程比煤的干净得多,其主要燃烧产物是 CO_2 、水和 NO_x 。

常规的燃煤发电机组和以天然气为燃料的复合循环机组,可能是将来的化石燃料发电的主要来源。在与化石燃料所产生废物的管理相关的问题“谱”中,这两种机组居于两端。(参看第29页图)。

核燃料循环。核发电机组依靠重元素原子核裂变时产生的热能发电。利用热能产生驱动汽轮发电机组用的蒸汽。

目前铀是主要的核燃料。它存在于自然界,利用传统的采矿技术开采,然后被加工成适于在核反应堆中使用的燃料。天然铀含有两种主要的同位素,即铀-238和铀-235。只有铀-235的原子核是易裂变的,但它仅占天然铀的0.7%。有些反应堆采用天然铀作燃料,但多数反应堆现在使用稍加浓铀,其中的铀-235含量被提高(或浓缩)到百分之几。因此,大部分的铀要浓缩之后才能制成可装入反应堆使用的燃料元件。

从反应堆中卸出的乏燃料(通常每年一次),其中含有未燃尽的铀、裂变产物、钚及其他重元素。人们可以将乏燃料溶解,用化学方法进行处理(后处理),以便提取未用掉的铀和钚,供制造燃料使用和再循环。再一种办法是乏燃料不经后处理直接作为废物处置掉。

核燃料循环的两种主要类型是一次通过式热中子堆循环和带后处理的热中子堆循环。(参看第30页图。)在“一次通过式”热堆循环中,乏燃料不被后处理,而被贮存在库中,直至最终作为废物处置掉。在带后处理的热堆循环中,乏燃料被后处理,使铀和钚同裂变产物分离。回收的铀、钚(或两者一起)可被返回到新的燃料元件中。

目前用于发电的热堆有多种类型。世

界上用得最多的是压水反应堆(PWR)。因此,在带后处理和不带后处理的两种场合,均选用压水堆为这次比较的典型堆型。尽管其他类型反应堆产生的废物在某些细节上与PWR的有所不同,但一般认为作为典型堆型的PWR具有足够的代表性。

废物的产生

燃料循环的每个阶段如矿物开采、燃料的制造或制备、电力生产以及退役,都产生废物。

使用核燃料发电产生的废物,在数量和类型上,都与使用化石燃料发电产生的废物相去甚远。前者是数量相对较少的放射性物质。相反,使用化石燃料的发电机组要烧大量的化石燃料,它的运行所产生的废物含有很多燃烧产物。两类发电机组都产生气态、液态和固态的废物。

人们尚未广泛意识到的一点是,煤电机组在运行时会向环境释放大量放射性物质,就潜在的生物学后果而言,其数量与输出电功率相近的核电机组的例行释放量相当。天然气的生产与使用过程也向大气释放放射性氡。

化石燃料废物。化石燃料循环的废物大部分产生于电力生产阶段,尽管就煤而言,在开采和燃料制备阶段也产生大量的固体废物。

化石燃料的燃烧生成 CO_2 。按单位能含量考虑,烧天然气产生的 CO_2 量略高于烧煤的一半。煤燃烧还产生硫的氧化物(SO_2 和 SO_3),而天然气的燃烧产物几乎不含硫的化合物。煤和天然气的燃烧还产生氮的氧化物(NO_x)。

煤燃烧时还产生颗粒物(灰)。大约10%的灰留在锅炉里,尔后即被排走,它们被称为底灰。不过,大部分灰以极细的粒状物形式存在于烟道气中,它们被称为飞灰。

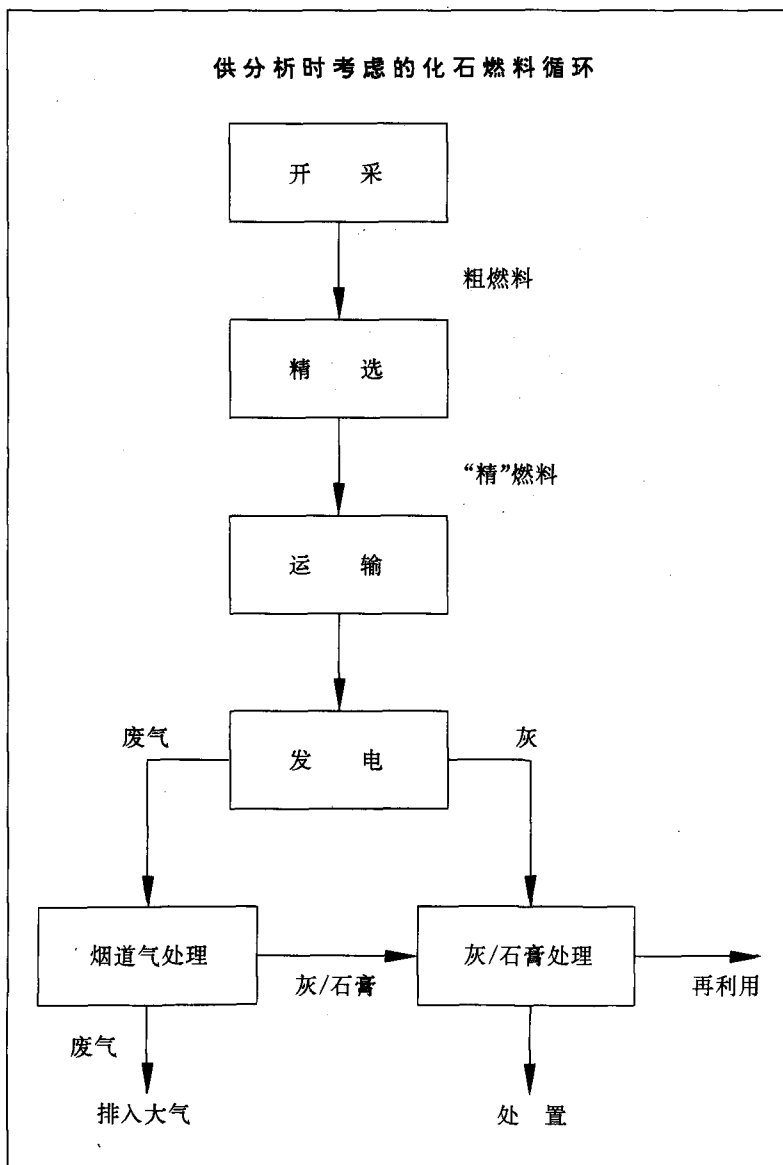
就化石燃料发电设施而言,退役工作可能在发电机组运行寿期结束后不久即开始。退役废物通常是一些与拆除有关的废物,因而不会带来后遗症的特殊危害。

核废物。同化石燃料循环一样,核燃料循环的每个阶段均产生废物。

采矿废物主要是矿坑水和废岩石堆。铀水冶尾矿的性质虽然大体上与采矿废物类似,但它们含有几乎全部的从铀衰变而来的天然放射性子体。

转化与浓缩过程产生固体废物和含有某些气载铀的气态废物。此外,浓缩工厂产生大量贫化铀。在本比较中,将贫化铀视为废物。

燃料制造产生的废物为各种固体流和液体流。它们是被铀污染的或是被铀钚污染的,取决于所用燃料是否由后处理回收的。



核电厂的许多种液态废物流带有放射性。此外,反应堆运行时还产生少量气态废物。同时,反应堆运行还产生多种固态废物,它们是受污染的部件或被活化的部件。

后处理废物中包含的放射性物质主要是作为乏燃料的一部分被送入后处理厂的裂变产物、活化产物以及少量锕系元素。它们以各种固态和液态废物流的形式存在。

核燃料循环设施中的某些部件有较强的放射性,退役期间必须采用昂贵的远距操作技术。推迟退役即等待放射性衰减,可以降低退役费用和减小采用远距操作技术

的必要性。就核电厂而言,暂缓退役是全世界普遍采用的策略,在本比较中把它选为典型做法。核燃料循环设施退役中产生的放射性废物,大部分是低放(LLW)固体废物。另有少量的中放废物(ILW)和高放废物(HLW)或超铀废物,它们都与乏燃料的后处理和混合氧化物燃料的制造有关。

废物管理

化石燃料废物。与矿山煤矸石有关的问题是煤循环所面临的最大废物管理问题。煤矸石的处置是一个值得注意的问题。一种可能的选择是把它们回填到它们所来自的矿井中。

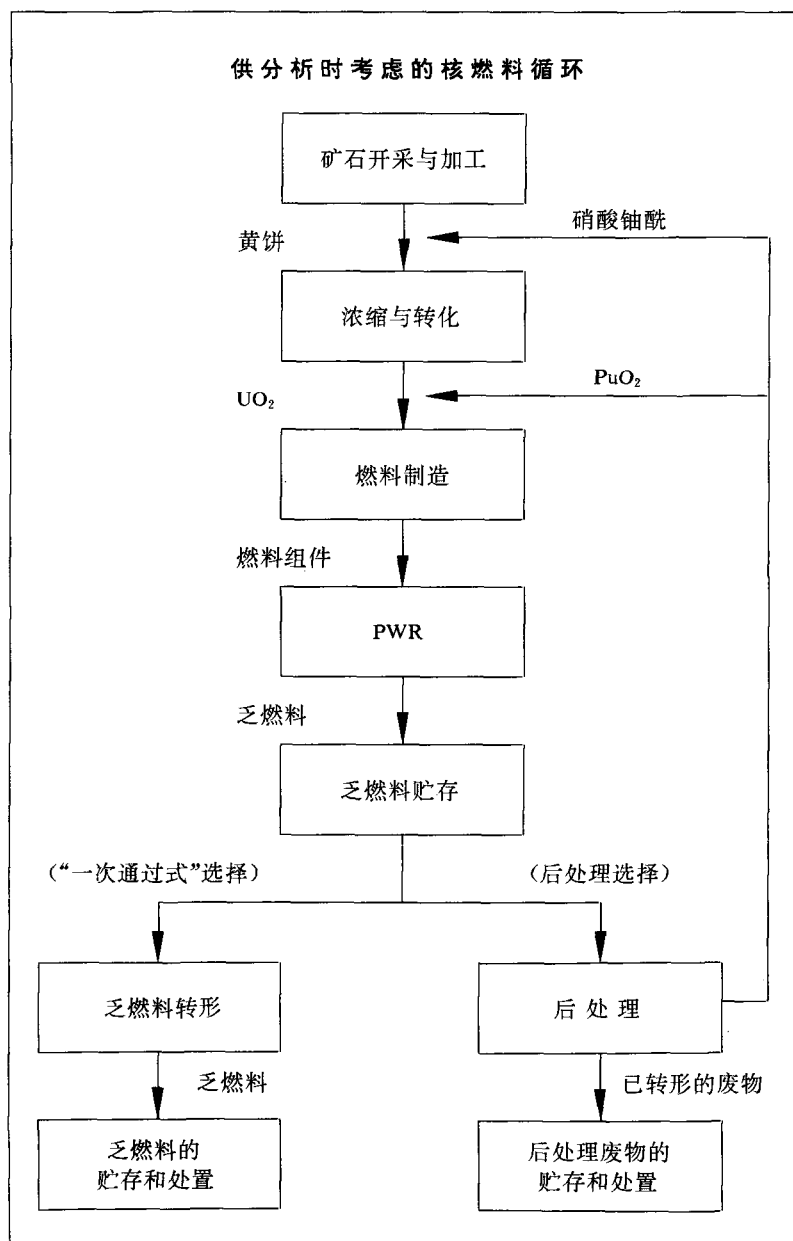
煤电厂的烟道气处理包括三步:除去 NO_x 、降低 SO_2 和减少微粒。对于天然气,它的烟道气废物管理中值得注意的问题只是与氮的氧化物有关的问题,这是目前已能解决的。

修改燃烧过程可适度降低 NO_x 。当然,除去 NO_x 的最有效流程是选择性催化还原(SCR),利用氨和催化剂使 NO_x 还原成氮和水。典型的SCR还原率约为80%。用过的催化物质是这一流程需要处置的唯一废物。不过,可将其主要组分返回供应者以便重新使用。

烟道气脱硫(FGD)的各种流程都使用碱性物质从烟道气中吸收和除去 SO_2 。这种流程往往规模很大且费用较高,因为必须处置大量 SO_2 浓度很低的烟道气。 SO_2 和试剂反应生成大量的产物(石膏)。部分石膏可进行加工,以生产壁板级石膏,其余作为掩埋物处置掉。典型的FGD去除效率为95%。

烟道气中的微粒通常使用静电除尘器(ESP)使其减少,典型的去除效率为95%左右。收集的飞灰和底灰有些可用于生产水泥和公路建筑业,另一些则需作为掩埋物处置掉。

现在,尚没有可减少 CO_2 排放量、费用效果又较好的技术,也从未进行过从气体排出物中除去放射性核素的尝试。各种废



煤循环经废物处理后的废物流

废物流 (g/kWh)	
NO _x	0.25
SO ₂	0.32
排入大气的飞灰	0.07
收集到的飞灰	3.02
石膏	2.10

物流经废物处理后被排入环境。(见上表。)

核废物。在放射性废物管理方面,现在在使用着多种技术,从最简单的直接排入环境(分散),到将放射性核素固化并放入精心设计建造的的处置设施中这样的尖端技术。

矿冶废物。所有由铀矿石加工产生的废物,在发生任何释放之前都经过处理。水冶厂尾矿的处置通常就在当地进行,一般是将尾矿用土盖起来以减少放射性扩散。

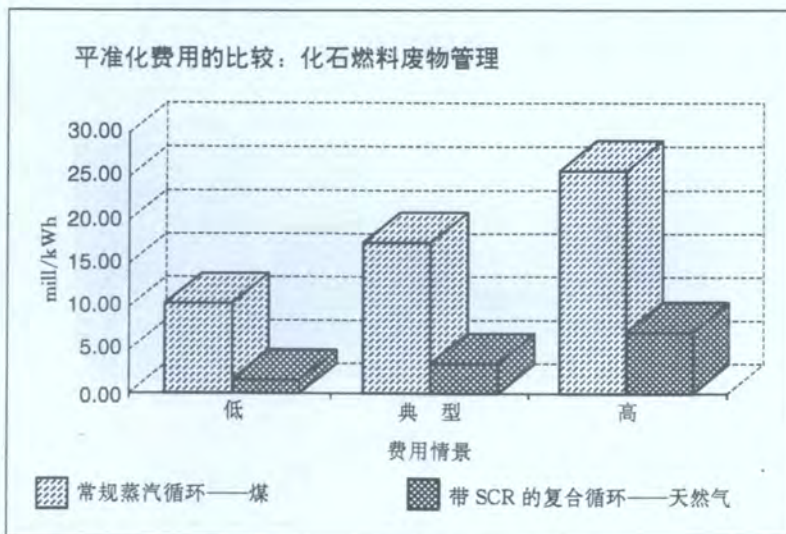
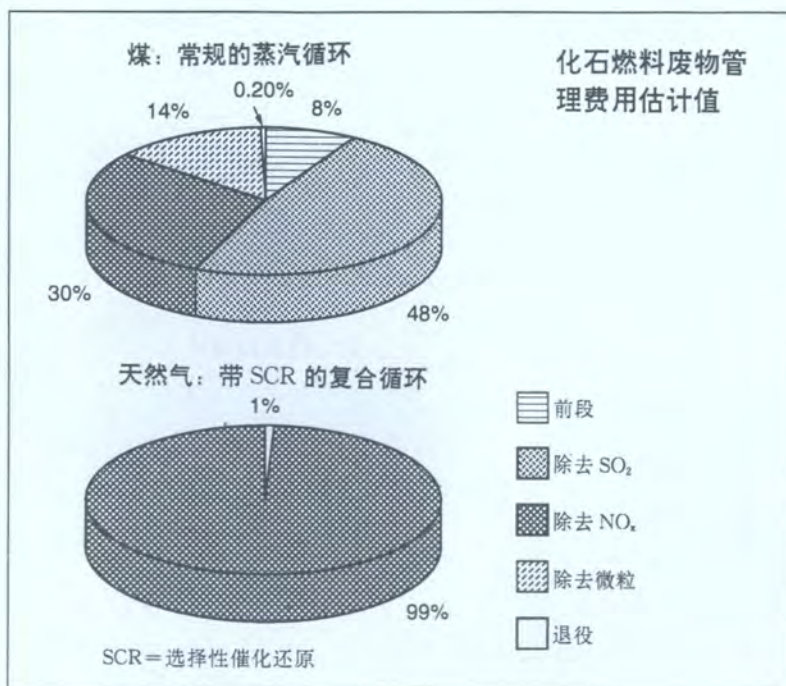
液态废物。液态废物的处理是大多数核设施废物管理体系中的主要组成部分。废物管理方案取决于废物的性质和产生的数量。少量含有短寿命放射性核素的水性废物,可以排入环境。盐浓度高的液态废物可进行蒸发使放射性物质留在浓缩物中,亦可用化学方法使之沉淀以产生其特性适于作进一步处理的淤渣。某些液态废物可被吸附在固态基体上,将这种固体作为下一步处理的前驱物。有时也采用焚烧法对被放射性物质污染的油和可燃熔剂作减容处理。LLW 和 ILW 浓缩物常被包容在水泥和沥青基质内,然后封装于合适的容器中。

来自后处理厂的液态 HLW,含有乏燃料中存在的几乎全部裂变产物。这样的 HLW 目前用玻璃固化法转变成玻璃。熔融的玻璃被浇入不锈钢容器,以待放入合适的深地质处置库中。(这些高发热率的废物在本比较中被定为 C1 类。)

气态废物。气态放射性废物通常被排入大气,但要符合相应的法规要求。在排放前,必要时要对气态废物进行处理,以确保

已转形放射性废物的产生量

阶 段	废物类型	单位	范 围		
			低	典型	高
采矿和水冶	LLW	m ³ /a	20 000	40 000	60 000
转化和浓缩	LLW	m ³ /a	20	20	30
燃料制造	LLW	m ³ /a	20	30	20
核电厂运行	LLW	m ³ /a	100	130	200
	ILW	m ³ /a	50	80	100
	C1	m ³ /a	3.5	4	4
	C2	m ³ /a	20	22	25
	ILW	m ³ /a	50	75	100
后处理	LLW	m ³ /a	470	580	690
	乏燃料(未转形的和一次通过的)	t/a	25	30	35



废气中的放射性物质浓度不超过法定限值。

固体废物。除上面已提到的经玻璃固化的后处理废物外，固体废物还包括包壳和燃料组件的金属部件（定为C2类），过滤器，用过的设备、树脂和淤渣，涤气器机芯和一般的垃圾。除放射性水平极低者外，所有的废物都要求进行某种处理和转形。

处理和转形作业包括减容、将废物转换成比较稳定的形态和包装。就此处考虑

的PWR循环而言，废物管理的各个阶段会产生不同数量的经转形固体废物。（见上页表。）

将废物放入合适的设施——深地质设施或近地表设施——有助于将放射性核素向环境的任何迁移限制到可接受的水平以下。对于一次通过式循环，乏燃料约需贮存数十年，让放射性和伴随的热负荷在处置前衰减。

费用分析方法

根据对现有的估计值的调查，获得了废物管理各个费用组成部分的数据。为了使费用比较有意义，原始数据已作了必要的调整，而且都是针对各个典型情况的。为了把废物管理费用置于可供比较的共同基础之上，有必要按贴现程序把所有的费用流换算成共同的值。这是经济分析中广泛采用的一种程序，有利于对现金流量的时间分布不同的投资选择进行比较。为此，最后已将所有费用估计值换算成一种以1991年7月1日美元每千瓦小时（\$/kWh）表示的平准化单位能量费用（LUC）。

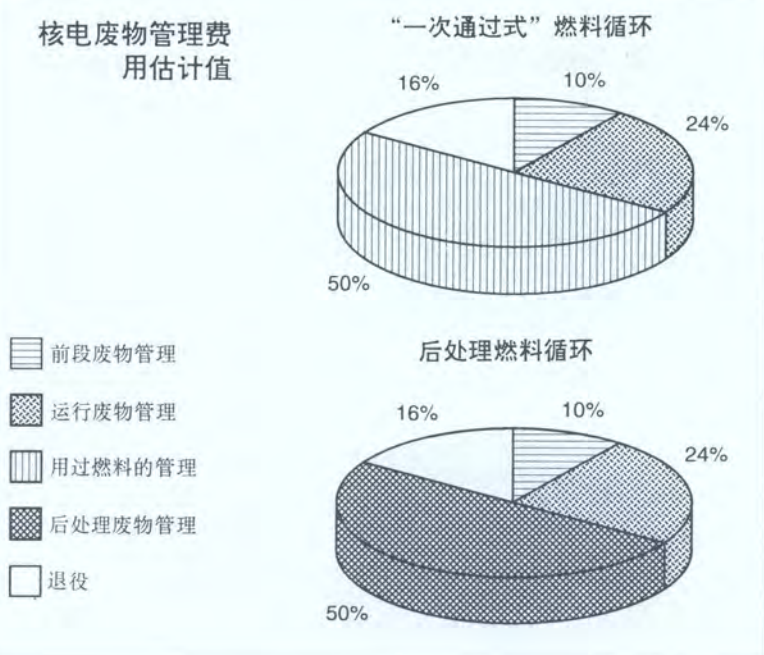
将贴现程序应用于分析核动力废物的管理费用，遇到的主要非议是：将这种程序用到核电站停止发电以后很久的巨大现金流上是欠妥的。非议者认为，这样做对后代不公平，也就是说，电力消费者支付其所得服务的全部费用的份额过小，未受益的后代承担的费用过多。

考虑到这种关切，我们对典型情况作了这样的处理，即在发电机组寿期结束之前，将实际贴现率取为5%，自那以后取为零。经济合作与发展组织的许多国家赞成5%的实际贴现率。此外，还检验了分析结果对贴现率、发电机组容量因子、机组营运寿期等因素的敏感性。

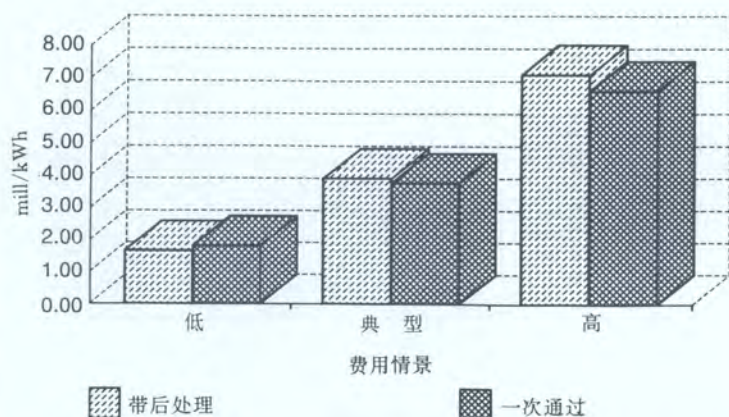
费用数据

化石燃料循环。对于两种化石燃料循环，平准化废物管理费用的范围约为典型

核电废物管理费用估计值



平准化费用的比较：核电废物管理



情况的 0.5—2 倍。(见第 31 页图。)

审视这些费用的相对比例便可发现,就常规蒸汽循环发电机组而言,单是 SO_2 的控制便占去了全部废物管理费用的大约 48%。就复合循环而言,废物管理费用的 99% 由除去 NO_x 的费用组成。

化石燃料废物管理费用为接近于 0 到约 25 密尔/千瓦小时 (mill/kWh, 1 密尔为千分之一美元) 之间。预期容量因子、贴现率或营运寿期在通常幅度内变化时,这类费用仍保持在这一范围内。这个范围的低端与燃天然气发电相对应,高端与燃煤发电相对应。无论是低端还是高端,废物管理费用都只是化石燃料基荷发电总成本的一个小至中等的分数。化石燃料发电的总的平准化成本一般为 40—60 mill/kWh。

核燃料循环。分析过的两种核燃料循环的平准化废物管理费用是相同的。(见第 32 页图。)

对于这两种循环,其前段的废物管理费用约占废物管理总费用的 10%。其中的 1/3 用于作为废物加以管理的贫化铀身上。电厂运行所产生废物的管理占总费用的 24%, 16% 是由电厂退役发生的,余下的 50% 与燃料循环的后段有关。

核废物管理费用在 1.6—7.1 mill/kWh 之间。与化石燃料废物管理的情况一样,这部分费用只是发电成本的一个小至中等的分数。核电成本一般为 30—50 mill/kWh。

比较。核燃料循环的废物管理费用,处在两种化石燃料循环的废物管理费用之间。它们与以天然气为燃料的复合循环的费用很接近,后者处于化石燃料循环废物管理费用变化范围的低端。处于化石燃料循环废物管理费用变化范围高端的燃煤选择,其废物管理费用大约是上述两种核燃料循环选择的相应费用的 4 倍。

就两种核燃料循环而言,废物管理费用高低值之比约为 4; 而在燃煤发电场合,相应的值约为 2。可变性方面的这种差异,可部分地归因于这样的事实,即化石燃料场合的费用是以已有技术为基础算出的,

而核场合的费用严重地受目前还不够肯定的废物管理活动的影响。尽管烟道气处理是一个较新的领域,但也已有几个处理车间在运行,因而其费用估计值比某些核废物管理技术(如退役和深地质处理库)的费用估计值更可靠。正因为这样,与核废物管理费用相关的不确定性,大于与本比较中研究过的那些化石燃料废物管理活动相关的不确定性。化石燃料和核燃料废物管理费用估计值的可变性方面的某些差异,也可归因于当地条件(包括法规要求)之间的差异。

未来的可能变化

对于核电来说,在废物管理实践或预测值方面,近期不会有大的变化。但是,将来会出现可影响废物管理费用的某些发展。其中包括增加燃料燃耗方面的尝试、更好的内务管理,以及更有效更先进的废物处理技术(如超压实、生物降解、焚烧和等离子体喷枪燃烧等)。所有这些发展都有希望降低核废物管理费用。未来将在深地质处置库的开发方面取得进展并积累比现在多得多的退役经验。虽然这些也许会使费用变得比预料的高,但它们也将大大减少核废物管理费用估计值的不确定性。

在化石燃料废物管理方面,预料重大进展之一是更广泛地应用精煤技术。这项技术与在发电过程自身内更好地控制释放的技术相结合,必将减少环境影响和废物管理费用。与化石燃料发电有关的另一个可能的进展是对 CO_2 的排放进行管制。这可能涉及到开发在洋底已采空天然气田内处置 CO_2 之类的技术解决办法,或碳税的引入——两种办法都可能大大增加化石燃料废物管理费用。

对于核和化石燃料这两种情况,还存在着现有的废物管理法规将来变得更加严格的可能性。其中包括剩余的环境费用必须由电力公司内部消化的可能性。这样一些改变当然会使电力公司的成本增加。 □