

低放废物处置设施的规划和运行

IAEA 专题会议论文集

核科学技术情报研究所

一九九九年六月

前 言

在过去的 30—40 年间,国际原子能机构(IAEA)的成员国建造了大量的低放废物处置设施。作为这些工作的结果,已在各类低放废物处置设施的规划、选址、设计、许可证审批、建造、运行和封闭等方面获得广泛的经验。然而,包括一些发展中国家在内的许多成员国仍然面临着实施低放废物处置计划问题。看来很清楚,上述经验对这些正在规划低放废物处置设施的成员国是有所帮助的,并且就是对于那些希望改进已有低放废物处置系统的成员国来说,也可从上述经验中获益。为了便于交流这方面的资料,IAEA 于 1996 年 6 月 17—21 日在维也纳 IAEA 总部召开了《低放废物处置设施的规划和运行》国际会议。

来自 46 个国家的 114 位专家出席了会议。他们提交的 48 篇口头报告和 10 篇张贴论文涉及低放废物处置的所有主要方面:管制和许可证审批、基础结构和规划、选址、处置系统和运行、运行后阶段和安全评价。美国 Vanderbilt 大学的 F. L. Parker 作了题为“低放废物—高技术解决?”的主旨报告。会议期间召开了以加拿大原子能有限公司的 D. H. Charlesworth 为主席的公开讨论,讨论集中于过去的处置实践和试图圈定发展中国家低放废物处置的适宜方法。

会议清楚地表明,低放废物的处置立足于成熟的和已得到验证的技术。但是要求正确地选择处置库的位置,在它们的建设、运行和关闭工作中实施适当的技术,适当地限制和控制废物中的放射性核素含量,以及在关注的时间段内安全可以满意地得到保证。虽然现有的低放废物处置系统一般说来在技术上是令人满意的,但是日益关心寻找花费更小的管理被称为甚低水平废物的方法。日益感兴趣的其他领域还有过去处置实践、补救和运行后阶段的再评价。在实施低放废物处置计划的工作中,较为基础性的问题继续得到关注。在工业化国家,由于公众的关注和反对,实施低放废物的处置计划遇到了困难;在发展中国家,由于缺少基础结构和资源,也遇到了困难。

本会议论文集包含了口头发言和以张贴形式提出的所有论文以及公开讨论的摘要。希望本会议论文集能为低放废物处置涉及的决策者、营运者、审管者和科学家提供有用的信息资源。在此国际原子能机构(IAEA)希望表示它对这次学术讨论会的主旨报告发言人、公开讨论会的主持人、各会场的主持人以及口头报告和贴报的作者的感谢。

目 录

主旨报告	(1)
低放废物——高技术解决?	(3)
法规和许可证审批	(17)
加拿大放射性废物处置设施许可证审批的审管体系	(19)
莫霍夫采放射性废物处置设施—许可证审批程序情况	(26)
有关英国德里格低放废物处置场的法规和性能评价	(32)
放射性废物安全标准(RADWASS)计划和极低放射性废物的管理	(40)
基础结构和规划	(47)
南非瓦尔普茨放射性废物管理设施的规划和运行	(49)
加拿大巧克河实验室从贮存库向处置库的过渡	(57)
马来西亚未来低放废物处置设施计划	(63)
古巴低中放废物处置的目前活动	(68)
埃及贮存和处置低中放废物展望	(70)
中国建造低中放废物处置库的政策和规划	(80)
六个所低放废物处置中心的设计概念及其发展	(85)
IAEA—WATRP 对挪威低中放废物贮存和处置两用设施的审评	(93)
国家放射性废物管理基础—规划低中放废物处置库的一个重要因素	(99)
美国低放废物协作区的管理—西南部协作区简史	(106)
选址	(115)
澳大利亚国家低放废物处置库选址过程	(117)
近地表处置库选址中的辐射防护因素	(124)
中国低中放废物处置设施选址活动	(130)
克罗地亚的低中放废物处置:选址、设计和公众接受问题	(134)
匈牙利低中放废物处置库库址选择程序	(141)
意大利低放废物的处置:地质稳定性标准的重要性	(149)
切尔纳沃达核电厂低中放固态废物的近地表最终处置库	(154)
州表决得出否定结果以后瑞士韦伦堡低中放废物处置库的状况	(162)
处置系统和运行	(169)
奥布中心的运行	(171)
捷克共和国放射性废物处置设施的规划和运行经验	(175)
西班牙在埃尔卡布里尔处置设施启动后于低中放废物处置方面获得的经验	(184)
印度在低放固体废物近地表处置方面的经验	(194)
莫尔斯莱本处置库对放射性废物的处置	(201)
俄罗斯低中放废物处置的经验	(209)
瑞典低放废物最终处置库(SFR)的 8 年运行经验	(215)

法国浅地层处置低中放废物的经验.....	(220)
印度卡克拉帕尔(Kakrapar)核电站低放固体废物处置设施的运行经验	(230)
英国德里格低放废物处置场的废物接收政策及运行开发.....	(235)
安全评价	(243)
瑞典放射性废物最终处置库(SFR)长期性能的评估	(245)
作为一种管理手段的安全分析—实例分析.....	(256)
杜库凡尼处置库的安全评价及废物接受标准的评估.....	(263)
巴西第一座处置库的初步安全评估.....	(271)
从低放废物处置库释放的放射性核素的近场和远场效应.....	(277)
反应堆退役产生的极低放废物的近地表处置及有关的安全要求.....	(286)
低放的和豁免的混合废物处置的安全评价.....	(292)
一座加拿大低放废物处置设施关闭后性能评价中的不确定性和灵敏度分析.....	(302)
IAEA 有关近地表放射性废物处置设施安全评价的协调研究计划的结果	(310)
用安全评估方法选择低放废物处置库址.....	(320)
运行后	(325)
从 25 年老的近地表处置库取回低放废物和中放废物	(327)
叶科列斯国家低放废物处置设施运行管理经验.....	(333)
湿低放废物掩埋场地表水的运行后监测.....	(338)
对近地表低放废物处置场关闭后控制的考虑.....	(346)
一座低放废物处置设施的最终关闭.....	(358)
张贴的报告	(365)
去污工作中产生的放射性废物储存区域地下水的放射生态学监测.....	(367)
杜库凡尼浅地层处置库工程屏障的性能.....	(370)
捷克共和国理查德 II 矿井中的放射性废物处置库的污染输运的模型化	(374)
秘鲁中低放废物的处置.....	(377)
安全评价比较(SACO)方法学在放射性、毒性和城市固体废物的浅地层处置系统的应用 ...	(379)
低放废物处置设施安全评价目标定向软件的开发.....	(382)
乌克兰放射性废物处置运行许可证审评中的经验.....	(387)
真菌类微生物活性对来自近地表处置的放射性核素移动性的影响.....	(390)
低放废物处置设施安全评价中生物圈不确定性分析.....	(395)
大叻核研究所低放废物处置设施的九年运行经验.....	(400)
开放讨论	(405)
讨论摘要.....	(407)

主旨报告

低放废物——高技术解决？

F. L. Parker

(美国 Vanderbilt 大学)

摘 要

1944 年美国在田纳西州橡树岭建立了第一个低放废物处置场。这是一个地面设施，它具有城市废物堆放场的特征：处置设施没有衬里，废物没有固化，处置设施也没有专设的覆盖层。该处置场的位置虽然方便，但是后来被确定为许多在地质上不适于处置任何状态的放射性废物的场址之一，除非废物为非常稀的、放射性非常低的液体，或许在橡树岭有个例外，即将水泥浆喷入破裂的页岩中。现在我们已改为将废物完全固定在高度工程性的废物包中，并埋存在深地质层，而且用模糊逻辑对到 10000 年的性能进行了评价。我们已经从场址位置要方便改为在全国范围内寻找既最少反对的又能满足范围广泛的和严格的技术标准的场址。我们已经从选址没有或很少有公众的技术参与改为在确定低放废物处置场址时，公众的可接受性可能是最重要的考虑。由于公众的反对，一些可能的场址已经被放弃。信任、风险和正当性已变得较设施的技术细节或它的存在带来的计算剂量更为重要。国际原子能机构 (IAEA) 认为，低中放废物的管理是“已得到证实的”和“成熟的”。因此，目标应是通过实现 M. English 概括的要求来重新获得公众的信任：获得过程中涉及当局的接受和对承担责任人的信任、对风险的适当评估和确定构成正当性的组分。开展这方面工作的一个方法是，扩大公众在风险评估各阶段的作用。另一个方法是提供技术上和环境保护上这样优良的设施和场址，以致在决策过程中，技术问题不是一个因素。

1 引言

早在 1500 年，当在德国萨克森的 Schneeberg 钴矿和捷克波希米亚的 Joachimsthal 沥青铀矿的矿工中发现较多的肺病患者，就已认识到放射性废物的影响。当然，那时并不知道所得的是癌症，并是由电离辐射引起的。后来，由于回旋加速器和其他加速器的发展、乏燃料的后处理以分离出钚和处理靶件以分离出各种同位素导致产生各种类别和形状的低放废物。

从早期以来，已处置废物的体积和活度大大增多了。例如，美国 1962 年开始营运的第一个商业处置场址，当年处置了 1900m^3 和 300kg 源材料。1963 年总计达 5800m^3 和 1PBq (未计衰变)。在后来，处置总量达峰值，1971 年为 31000m^3 和 44PBq ，1980 年为 92000m^3 和 12PBq ，1994 年为 24000m^3 和 28PBq ^[1]。

1958 年以前,美国原子能委员会各基地共向环境排放 96PBq 废物。远非精确和完整的统计,每年的排放量为 $3.3 \times 10^7 \text{ m}^3$ 废物^[2]。仅以体积描述的固体废物就从 1952 年的 2200 m^3 上升到 1961 年的 37000 m^3 ^[2]。“由于废物的不均匀性,有关废物的活度水平的数据很少。监测在进行,所以从事固体废物装卸操作的人员可以避免受到照射”。虽然基地在进行打包和焚烧,但是 1955 年的处理作业被描述为基本上没有。整个费用(收集、浓缩、包装、运输和处置)的范围为每立方米 27—200 美元^[2]。

对于废物,尚无正式的分类。因此,每个基地使用它自己的规定。一般说来,废物可分为以下三类:

- 低放废物,比活度的数量级为 10^4 Bq/L ;
- 中放废物,比活度的数量级为 10^7 Bq/L ;
- 高放废物,比活度的数量级为 10^{10} Bq/L ;

虽然 IAEA 已经正式通过了废物的分类,但是国家主管当局和地方团体仍在使用它们自己的废物分类。在 IAEA 于最近(1994 年)通过的废物分类标准中,把释热功率密度低于 2 kW/m^3 的所有放射性废物都规定为低中放废物^[3]。短寿命的低中放废物中的长寿命 α 核素含量对于每个包装限于 4000 Bq/g ,对于所有包装的平均值限于 400 Bq/g 。不过,这一规定在最近(1994 年)出版的“放射性废物管理概况”^[4]中还没有得到采用。该文献说,低中放废物的管理被认为是“已得到证实的”和“成熟的”,“这些废物含有的长寿命放射性核素可以忽略不计,适于近地表处置”。

本文探讨我们如何从将未整备废物弃入地沟到采用已得到证实的和成熟的技术,以及为什么在一些国家有关低放废物处置设施的选址、申请许可证和营运这样困难。当我们采用 IAEA 的目前分类规定时,我们必须记住,这是一个发展的目标。

80 年代初期,IAEA 的建议(表 1)指出,低中放的长寿命废物可以放置在矿井、洞穴或以液体喷入可渗透的深地层或以自固化的流体喷入诱发的低渗透层的裂缝中^[5]。然而,最近提出的指南(表 2)比较保守,不但处置方案少了,而且要求严格了^[3]。

表 3 列出 IAEA 成员国目前采用的和计划的处理、整备、贮存和处置技术^[4]。在过去的 35 年期间,已有约 40 个近地表处置设施投入运行,另外 30 个可望在今后 15 年投入运行。IAEA 工作人员根据他们的废物管理数据库^[4],已得出如下结论:

- (1) 近地表处置现在是并且将来很可能继续是最通用的处置方法;
- (2) 不是所有成员国都处于相同的发展或实施阶段;
- (3) 对低放废物来说,近地表处置是已得到证实的可接受的方法;
- (4) 成员国采用的技术方法取决于他们的地质、气候和社会—经济条件。

让我们来看看,有关“已得到证实的和可接受”的论断是否是事实。从 1995 年 IAEA 废物管理研究文摘^[6]可以判定 IAEA 成员国正在进行的研究工作数量。如表 4 所列,仅找出 73 份文摘,其中 70% 以上是美国开展的工作。处置和处理研究占多数。虽然数据库可能不完整,但由于相对缺乏研究,也说明大多数国家深信,低放废物处置的确是已得到证实的技术。

2 里程碑

表 1 IAEA 推荐的放射性废物地下处置^[3]

	废物类别			
	长寿命		短寿命	
	中放和低放		中放	低放
埋置入深地质层	干	固体, 已固定, 有包装	可用, 但可能较需要更严格	
	湿	同上, 可能有更多专设屏障		
埋置入矿井或洞穴	干	可能的, 取决于环境	固体, 可能有包装	
	湿	不推荐	固体, 已固定, 有包装	
埋置入浅地层	干	不推荐	固体, 已固定, 有包装	固体, 可能已固定或包装
	湿	不推荐	可能的; 已固定; 有包 定或已包装, 有更多 专设屏障	可能的; 固体, 已固 定, 有包装, 有更多 专设屏障
将自固化液体喷入 低渗透率地层的诱 发裂缝	采用已验证的适当技术对某些放 射性核素, 也许是可能的		采用适当技术是可用的	
将液体喷入深地层 可渗透地区	采用已验证的适当技术对某些放 射性核素, 也许是可能的		采用适当技术是可用的	

表 2 为低中放废物 ($<2\text{kW/m}^2$) 推荐的处置方法^[3]

短寿命废物	简单的地表垃圾填埋场 专设的地表设施 在地下不同深度处置 (约几十米)
短寿命和长寿命废物	深地质层处置

表 3 IAEA 成员国的低放废物管理情况^[4]

	运行中	计划的
处理		
化学沉淀	19*	9
离子交换	24	3
衰变/稀释	14	0
压实	32	13
蒸发	27	4
焚烧	19	19
其他方法	6	6
整备		
混凝土	34	20
沥青	13	5
聚合物	9	7
其他方法	5	6
贮存方法		0
专设贮存设施	37	
浅地层贮存	2	
处置		
专设地表贮存	6	12
近地表	7	18
深地质层处置库	2	6
工程加固设施 (地表)	4	13
岩洞	3	5
衰变/稀释	5	0
简单地沟	4	2
其他方法	5	5

* 一些国家有多个方法。

表 4 低放废物管理的研究^[4]

国家	文摘数
美国	53
比利时, 印度	3
俄罗斯, 罗马尼亚, 缅甸	2
西班牙, 智利, 保加利亚, 白俄罗斯, 日本, 德国, 英国, 斯洛文尼亚	1
主题	
处置	16
处理	15
分离流程	4
放射性废物管理, 玻璃固化	3
地下处置, 非破坏性分析, 放射性废物贮存, 废物运输, 辐射监测	2
其他	1

2.1 第一个低放废物处置场

已知第一个低放废物处置场是 1944 年在田纳西州橡树岭建立的, 它用于“处置被放射性污染的破玻璃器皿, 或清洁程度不足于在其他工作中使用的材料”^[7]。

2.2 商业废物处置设施的失败——美国

由于运行实绩不能令人满意, 美国已投入全面服务的 6 个商业放射性废物处置设施中的 3 个已经关闭 (肯塔基州的马克西弗拉茨处置场、纽约州的西谷处置场和伊利诺斯州的谢菲尔德处置场)。第 4 个处置场, 即内华达州的比蒂处置场, 在 1992 年 12 月 31 日也被关闭, 原因是内华达州已成为洛基山协作区的成员, 该协作区的低放废物将在科罗拉多州处置。然而 1992 年洛基山协作区理事会与西北协作区委员会达成协议, 允许它们的废物运到华盛顿州里奇兰低放废物处置场去处置^[8]。表 5 列出 6 个处置场的一些资料^[9]。现在, 美国 95% 以上的低放废物都送到巴威尔处理场去处置。现在第三个处置场, 犹他州的恩韦罗克尔, 可以接收 A 类的废物, 它代表法律规定需要送核管理委员会批准的或协议州的场址处置的废物的最低放射性浓度。

表 5 美国 6 个低放废物处置场废物处置时的体积和活度 (1993 年)^[7]

处置设施	开始营运时间	关闭时间	废物总体积, m ³	副产物材料 ¹ PBq	源材料 ² 10 ⁶ kg	特种核材料 ³ kg
比蒂	1962.9	1992	130000	24	1.8	280
马克西弗拉茨	1963.1	1977	140000	89	0.2	430
西谷	1963	1975	70000	47	0.5	60
里奇兰	1965.9		360000	13	6.1	160
谢菲尔德	1968	1978	90000	2.23	0.5	60
巴威尔	1971.4		700000	264	15.3	3100

1. 副产物材料: “主要为利用其源材料含量而加工任何矿石以提取或浓缩铀或钍产生的尾矿或废物, 包括溶浸采矿产生的分散于地面的废物”。^[9]
2. 源材料: “(1) 任何化学或物理形态的铀或钍或它们的任何组合物, 或 (2) 以重量计含万分之五 (0.05%) 或更多的下列矿石: (i) 铀、(ii) 钍或 (iii) 它们的任何组合物。源材料不包括特种核材料”。^[9]
3. 特种核材料: “(1) 钚-235、浓缩铀-233 同位素或铀-235 同位素的铀, 以及核管理委员会依据原子能法第 51 条的规定确定为特种核材料的任何其他材料; 或 (2) 经过人工浓缩的上述任何材料”。^[9]

除比蒂以外,所有已关闭的处置场都位于美国的潮湿地区,但导致失败的原因却是不相同的。在关闭前,马克西弗拉茨处置场是美国最大的商业低放废物处置场,它的失败是接收的废物没有或很少进行过整备。这最后导致下沉和渗入大于渗出,于是产生“浴缸效应”。

不当的管理和实践导致放射性物质通过废物的溢出(事故性的和故意的)和推土机械对地面与地沟土壤的扰动而向处置场外转移。另外,虽然那时已经认识到,简易地模型化地质环境是所需要的,但是马克西弗拉茨却未能这样做^[10]。该场地的不均匀性和各向异性,极可能导致一些放射性核素向处置场外转移。在美国联邦法规 10CFR61 中,核管理委员会要求^[11],处置场应能特征化、模型化、分析和监测;不受预计的人口增长的干扰;没有自然资源;在洪泛区上游;上游的排水区尽量少;在地下水位以上;不在地下水排放区;离开地壳构造活动区;处于地表地质过程缓慢的地区;远离对其设施或活动有妨碍的地区。

西谷处置场也发生过浴缸效应。1975 年 3 月,处置设施的溢流速率达每天约 5 升^[12]。于是决定停止接收废物,直到纽约州环境保护局对重新开放处置场的所有要求得到满足。这一天至今仍未到来。经过长期的一系列工作之后,处置场将被关闭。渗漏并未带来显著的健康效应^[12]。

谢菲尔德处置场在提出申请修改许可证,以便允许使用压实法来充填处置用地沟和在原来的场界内再建一条处置用地沟时,被关闭了。发现氚的迁移较原来的估计快,原因是砂和砾石较场址调查时原来推断的大。增加处置用地沟的申请被否定后,由于没有处置空间,接收废物停止了。后来在处置场外发现了氚,不过浓度大大低于 780Bq/L 的标准。

所有这些由于核素在地下水中的迁移速度加快而被关闭的处置场都处于潮湿地区。然而,处于潮湿地区的第四个处置场——巴威尔,仍在很好的营运。地区地下水位低于地表 10—20m,氚浓度仅稍有升高,约为 6Bq/L。

这些早期经验表明,即便在无包装、未压实和场址很少工程性工作的不利环境下,低放废物也能“安全的”处置(即在管理限制内)。现在,在整备和工程设计上已有很大的变化,这不仅由于法律上有规定,而且更多的是公众和美学上的要求。

2.3 海洋处置

同时,从 1951 年至 1969 年对低放废物进行过海洋处置。投弃的放射性物质总量达 3.5PBq^[13],这些废物大多装在 200 升和 300 升的容器中,投弃的容器总数达 89500 个。这可以和下列数字相比较:到 1994 年美国能源部和商业处置场处置的废物为 69PBq 和 $4.49 \times 10^9 \text{m}^3$ ^[1];海洋中的天然放射性活度为 54PBq。而且,虽然已在投弃地点作过许多调查研究,但是从废物释放的放射性非常少。公众之所以拒绝这种处置方式,主要出于感觉、一些容器漂上了海岸、政治原由、海洋的神秘性和神圣化。

2.4 水力压裂

从 1959 年至 1965 年,曾实验喷注少量放射性物质入橡树岭国家实验室地下页岩的裂缝中。这一方案获得证实后,国家科学院—国家研究委员会对这一方法进行了审评,向深度为 200 至 300m 的裂缝中喷注了含 48PBq 的 $1.73 \times 10^7 \text{m}^3$ 特制的水泥浆^[1]。在水力压裂场址附近的水井中发现液体废物后,停止了注射。产生的原因确定是,对水泥浆组成不够重视和每次注射后的水泥浆凝固时间不够。

2.5 地质处置——固体废物

为了进行实验,联邦德国从1967年至1978年曾将该国所产生的全部低放废物和大部分中放废物放入不伦瑞克附近的阿塞废弃盐矿中^[14]。虽然阿塞的岩盐属于二叠纪的Zechstein系,但是位于哈尔茨山脉北麓前沿地的盐矿是三叠纪的非对称背斜。从1916年至1964年,曾在该矿的490—800m深处开采岩盐。低放废物放在深750m的先前挖空的硐室中,中放废物放在深490m的硐室^[15]。这是第一次地质处置低中放固体废物。

2.6 近地表的工程设施

尽管固体废物的地沟处置还没有对健康产生影响,但是公众和审管者对此方法是不满意的。法国从1969年开始,将经过更多整备的废物放入设在阿格半岛的芒什贮存中心(CSM)经过更多工程工作的近地表设施。

CSM处置设计从砾石底、压实土壤、粘土回填和具塑料帽的土壤覆盖的埋存地沟,过渡到放在宽阔地沟中的独块巨石,该地沟的底、侧墙和隔墙都是钢筋混凝土的并含有集水系统。每层废物都经过压实,并用混凝土回填。整个独块巨大也用混凝土回填并覆盖钢筋混凝土帽。坟墓建在埋存的独块巨石的顶上,混凝土的废物容器堆放在其中,并回填砾石和碎石,顶部用压实的土壤和粘土覆盖。对废物包装进行了严格的检查。如果废物没有固定,就要对废物桶进行压实,并把它放入混凝土容器中再加混凝土。对金属箱也注入混凝土以进行固定^[16]。虽然那时嘲笑这样的处置设计过头,建造也过头,但是法国的设计变成了近地表处置的标准,别的地方也按此审批许可证(例如在橡树岭)。到1994年CSM已处置约535000m³废物,其中含有约 3.7×10^6 GBq的⁹⁰Sr和 1.3×10^7 GBq的¹³⁷Cs^[4]。下面讨论的奥布贮存中心(CSA)是CSM方法的改进,它采用地面上的独块巨石和开口部分的活动封闭。

2.7 地面下的工程设施

瑞典的低中放反应堆废物最终处置库(SFR)建在靠近福斯马克核电站的波罗的海海床下50m处。它于1986年开始运行。SFR除了是第一个高工程的海床下作业外,它还具有另一特点,即大部分废物用专门设计的船运输,从而避免了与陆地运输有关的常见问题。

2.8 深地质层处置——未整备废物

低中放废物的第一座深地质层最终处置库1979年出现在德意志民主共和国莫尔斯莱本村附近的巴尔滕斯莱本矿。德国统一后,反应堆安全协会(GRS)检查了该矿的处置工作,并由反应堆安全委员会(RSK)对该处置库的工作进行了评价^[17]。RSK断定,从技术观点来看,在莫尔斯莱本继续进行处置绝对不存在安全上的危险。

2.9 深地质层处置——整备过的废物

虽然还没有一个国家建造了深地质层处置库,但是一些国家,包括英国、瑞典、德国和瑞士,正在积极这样做。选择这样做的理由是各种各样的(短寿命和长寿命废物共用一个处置库,减少技术风险,选择场址的延期等等),但是下面两个场址或许会受到特别的关注。

2.9.1 瑞典的低中放长寿命废物处置库(SFL3—5)

瑞典是唯一一个为低中放废物建设单独处置库的国家,虽然它的处置库现在也接收某些短寿命废物,而且在SFR关闭后将接收所有的低中放废物^[18]。SFL3将接收来自斯图兹

威克 (Studsvik) 研究中心的废物、乏燃料中间贮存中心 (CLAB) 的运行废物和乏燃料包装厂的废物。SFL4 将用于处置退役废物, 而 SFL5 用于处置反应堆部件。SFL 将设在深度为 500m 的结晶岩中。与它们相距 1 公里远还将建处置经包装的乏燃料的 SFL2 设施。

2.9.2 瑞士高工程的深地质层处置库

就低中放废物的处置来说, 瑞士国家放射性废物贮存公司 (NAGRA) 提出的方案^[19], 在技术上或许是最先进的。按照该方案, 放入处置库的废物都经过彻底的整备和包装, 并用混凝土以类似法国建地表坟墓的方法进行封闭。

2.10 最新的近地表处置

法国新的奥布贮存中心 (CSA) 包含了低中放废物近地表处置的大多数新思想, 它不同于 CSM 设计: 建在地面上, 设分开的处置室, 在营运阶段可避免雨水直接进入。^[20]

2.11 技术的最新水平

有关处置低中放短寿命废物的运行经验的最近一篇论文^[21]描述了自最初处置在无衬里的浅层地沟以来所发生的如下变化:

- (1) 设计基于多屏障方案。
- (2) 考虑到场址的具体条件, 处置库的设计包含适用的工程屏障。
- (3) 在运行区和处置库外界之间设适当的缓冲区。
- (4) 为废物的分隔和再包装以及去污提供场地和设备。
- (5) 针对天气条件对处置作业的影响采取措施, 例如设可移动的顶盖以阻止雨水进入处置区。
- (6) 在处置结构附近设渗透廊/钻孔, 以收集和监测地下水。
- (7) 设计较好的覆盖层, 以阻止闯入和限制水流入。

该论文得出结论, “过去 50 年的世界经验表明, 在近地表处置设施, 低中放短寿命废物可以成功地与人类和环境相隔离。”

与上为姊妹篇的有关低中放长寿命废物的论文^[22]得出结论, 采用的整备技术取决于废物所含的具体裂变产物的活度和化学组成。裂变产物含量高的与高放废液一同玻璃固化。与短寿命废物一样, 这里也要求大力减小废物的体积和减少废物的形态。沥青固化已在比利时的欧化工厂成功地实施过。不过对于着火和辐解产生的氢仍比较关心。水泥固化不存在什么问题, 不过对体积的增大、辐解产生气体和腐蚀仍比较关心。大规模的焚烧, 在包容的设计和实施、炉灰处理、保持亚临界以及废气的有效和可靠的过滤方面, 仍存在困难。对美国汉福特基地最近达成的三方协议, 要求对低中放废物单独进行玻璃固化^[23]。最先对低中放废物进行玻璃固化的是位于俄罗斯扎戈尔斯克的 Radon 设施^[24]。美国 Clemson 大学已开展了中间工厂规模的研究工作^[25]。

2.12 安全分析

对第一个处置场址来说, 安全分析主要是避免废物装卸工作人员受到过高的外照射剂量。现在已进展到类似于瑞士在对深地质层处置的保证 (Gewachr) 研究^[26]所采用的 3×10^{-4} mSv/a 的预期剂量, 即较管理限值低两个数量级还多, 进展到设在北卡罗来纳州的美国最新近地表设施——威克/查塔姆场址——对闯入者/水井情景提出的 8.6×10^{-3} mSv/a 预期剂量^[27]和得克萨斯场址的 1.1×10^{-3} mSv/a, 进展到 SFL3 的 10^{-9} Sv/a 和整个 SFL3—

5 的 $5 \times 10^{-5} \text{Sv/a}$ 的初步近场预期剂量^[18]。

2.13 成本

随着美国处置场成本的猛增至超过 11000 美元/ m^3 ，送到处置场处置的废物体积已大幅度减少（表 6^[29]）。这不一定伴随着低放废物中的放射性活度同样降低。由于成本高，污染材料有一些减少。为了实现减小体积，已采用了许多减容技术^[28]。这些技术可以远低于处置费用实施。结果，密西西比以东的核电公司的所有低放废物都通过科学生态集团公司（SEG）设在橡树岭的田纳西工厂，然后才运到巴威尔去处置。这种趋向几乎可以肯定还要继续下去。

表 6 巴威尔低放废物管理设施的价格清单^[29]

1995 年 7 月 1 日

基本处置费，标准废物	2800 美元/ m^3
南卡罗来纳低放废物处置费	8300 美元/ m^3 附加费：
封闭	衬里
技术	辐照过的硬件
超重	容器装卸
^3H 和 ^{14}C 含量	特种核材料

3 建立处置场的成功

最近，当三个新的低放废物处置设施（法国的奥布处置场、芬兰的奥尔基洛托处置库和西班牙的埃尔卡布里尔处置库）已经启动或已准备好启动的时候，世界放射性废物管理方面最著名的学者之一，经济合作与发展组织核能机构的 Jean-Pierre Olivier 写道^[29]，使这些设施能够启动至少有三点主要考虑：

- 正式承诺按照国际同意的标准保护现在和遥远将来的居民和环境；
- 越来越重视技术目标和遵循方法的适宜性，以及实现这些目标的安全和实际手段的可得性；
- 目前重点放在公开的和透明的程序上，确保所有有关的社会和其他非技术问题都能得到鉴定、考虑和汇总入结构良好的决策过程中。

然而，自这些论述发表以来，我们看到了瑞士公民投票的受挫，美国国会批准得克萨斯协定的失败和加利福尼亚州与美国内政部之间为已领有许可证的加利福尼亚协作区设施转让土地的争论。很清楚，在 Olivier 指出的三点以外，至少还得增加一个考虑：公众常常要求绝对保证安全。例如，进一步减少计算的剂量不大可能大大提高那部分已经没有信心的人对处置安全的置信度。上面提到的几个例子计算剂量已经大大低于管理限值——北卡罗来纳为 120 分之一、瑞士为 250 分之一，瑞典为 500 分之一，得克萨斯为 900 分之一。

科学不能给安全绝对保证。科学不能预测非常不可能发生的事件发生的可能性，或很有把握地说，在未来的一百万年间处置库会发生什么。用 Alvin Weinberg 的术语来说，这些都在“反科学”（trans-science）范畴^[30]。科学家可以说，哪里科学终止，哪里反科学开始。但是，为了进行指导，我们必须转向已经深深思考了这些问题的哲学家。

4 哲学观点

M. English 思考与低放废物处置设施有关的问题已有一些时间了, 她的观点汇总在她最近出版的一本书中^[32]。她在书中写到, 为使选址过程稳定和持久地进行下去, 在每一阶段必须满足下列条件之一:

- (1) 过程中涉及的当局获得普遍和完全的接受;
- (2) 承担责任的人获得普遍和完全的信任;
- (3) 对风险普遍和全面地进行适当评估;
- (4) 对构成正当性的组分普遍和全面地进行适当的评估。

在极少数国家(至少在我们中的大多数要为生活担心的国家), 仍然普遍和完全地接受行政管理当局的管理。社会或过程越封闭, 多半越必须投合当局的所好。在象美国这样的动辄争吵的社会, 投合当局的所好只能失败。“服从我”甚至不能加以考虑。“信任我”将带来哈哈大笑, 就象说“我来自华盛顿”和“我来帮助你”一样。当局越被接受, 该当局多半越得到信任。不过很清楚, 当局的可能被接受, 也可能是由于别无选择, 或者是由于愚昧无知或对此无兴趣。

如果仅靠权力不能或不大可能获得成功, 那么承担责任的人就需要获得信任。当科学家带着无可挑剔的证明资料坚持反对观点时, 虽然承担责任的人拥有给人以深刻的印象、研究了未来上百万年的巨著, 但是要获得信任也是困难的。当诺贝尔奖获得者, 诸如 Henry Kendall, 对上面的这些讨论持反对观点时, 就很难不考虑他们的意见。不过, 对那些在其专业范围以外进行冒险的诺贝尔奖获得者, 也可能不加以考虑。至于我们进行的性能评价, 我们能确信我们的结果或我们能确信这是我们能使用的最好方法吗? 即使涉及的都是受尊敬的人, 要信任那些承担责任的人也是一个问题。涉及的人(支持者、反对者、审管者及其他有关人员)的哲学观点和动机是这样的不一致, 以致难于形成一个协调一致的报告, 并且不可能符合所有这些观点。

English 的第三点——有关适当评价风险——指出, 取决于使用的准则和研究人员的(和或许是捍卫科学的)观点, 风险的评价大不相同。人们可以从输入或输出数据中, 取5%的值、平均值、中值、几何平均值、95%的值或全值。即使人们能同意使用这些数值, 但在没有科学的一致性的情况下, 我们又能做什么呢? 如在生态风险评价中, 甚至连什么是适当量度的终点都有争论。

由于在满足上述三个准则中都存在困难, 于是人们考虑了第四个准则——适当的评价组成正当性的成分。如风险评价一样, 人们必须在有关正当性的各种不同准则中进行选择。为了简化, English 仅指出三个这样的准则:

公利主义——作为一个整体, 社会最好的应是无视个人权利和个人福利。在某些社会, 如果不是不可能, 也是困难的。另外, 试图计算成本也是海市蜃楼般的。这是社会问题的效益/成本分析具有如此坏的名声的一个原因。

自由意志论——个人权利受到尊重, 通过市场机制获得一致的和社会的目标。我们知道, 市场也不可能提供某些物品的价值, 诸如道德和美学的价值。这些只能靠输入。对于如何指派这些非市场价值, 存在广泛的不一致。

契约论——过程是公正的。达到一公正过程本质上是困难的。谁来决定什么是一个公正的过程？谁来决定在空间和时间上要延到多远？很清楚，不是所有受过程影响的（诸如后代）都能参加该过程。也很清楚，甚至对于一个不公正的过程也可以得出所有都同意是公正的结果，因为在几乎所有的社会，对于什么才是公平或公正的分配货物不可能取得一致意见。

5 新思想

对一个已经这样无止境地仔细观察的主题，很难有新思想。或许某些思想仍经得起重复，或许在新环境它们可能具有较多的影响。或许非常频繁地忘记这样一个事实，即公众不只是一个人。事实上有许多公众——国家的、地区的和当地的，现在和未来的居民、赞成的、反对的和审管者，公利主义者、持自由意志的和社会契约论者，等等。所有这些都必须加以考虑。在这些相互影响中，必须有一个公开的、透明的和公正的过程。必须给出科学上的优越性和对安全的承诺。公众的惧怕必须严肃对待。没有高级管理人员的参与，这是不会发生的。

在美国国家科学院—国家研究委员会的最新报告中^[33]，着重讨论了做这些工作中某些过程，它没有按照先前的范例，在风险评价中严格区分“客观的，科学的和技术的”与“主观的，政治的”，而是把各方面的公众和决策制定者带到一起，从制定方案到工作结束，在公正的过程中建立共识。他们应该是过程的全面参与者，而不仅是在最后时刻盖橡皮图章或拒绝最后的结果。

在其工作在参考文献 [33] 有所报道的委员会和有监测可回取贮存审评委员会中，我们发现最容易毒化讨论的一个因素是，持不同观点的人感到他们的意见没有被倾听，所以他们的关注没有得到认真的对待。这使他们认为过程是不公正的。在风险评价过程中，我们发现，困扰他们的大多数甚至还没有被研究，因为这些绝没有引起注意或被分析者视为没有什么风险而加以拒绝。除非你问公众，什么是他们关心的，你多半不会知道。所以在方案讨论阶段就应该邀请公众参加，使你了解他们的关注。虽然这些关注可能是不必要的，但是也可能是（例如）当地的饮食习惯与一般不同，所以断定他们的关注是正当的。

6 公众的相互影响

对于有争议的设施进行选址和运行不是现在才有。可以从这些经验中学到一些东西。宾夕法尼亚州为了推动它的低放废物处置场址选择并使该场址能投入运行，曾制定过一个社区合伙计划^[34]，其中从其他选址决策中列出 7 条可供学习：

- (1) 在讨论中包括社区的所有部分；
- (2) 使讨论和制定决策公开和可视；
- (3) 为更多的参与者召开小型非正式会议；
- (4) 仅法律要求公众参与的会议是不够的；
- (5) 持不同观点的居民之间的不断讨论是必不可少的；
- (6) 开发者必须赢得信任；
- (7) 安全比经济得益更重要。

正如 Freudenburg 提醒我们的^[35], 在涉及有争论的技术中, 在“真实的”和“感觉的”风险之间二等分, 其真实程度较通常认定的要低。对于与其他人的讨论, 感觉就是真实。

德国最近对什么是公众感觉的风险的研究指出^[36]:

- (1) 化学风险的感觉取决于风险的类别, 例如发射对地面污染;
- (2) 信息的值得信任与感觉的能力和直率有关;
- (3) 信息的类型寻求谁需要它, 例如是来自公司生产产品时的生产风险和产品风险, 还是来自科学家和环境保护主义者的环境和健康风险;
- (4) 妇女比较关心技术风险, 对风险较男人更感兴趣。

7 结论

多少有些惊奇, 对如何推进这一有争议的主题, 我们已花这么长的时间, 才达到这样的了解水平。回想在 50 和 60 年代, 对规划和模型化水资源以达到最佳的解决, 也有过类似的争论。分析已从简单的代价/效益分析, 进展到成本/效能分析、分配的成本/效益分析、Kaldor-Hicks 分析 (优胜者偿付损失者) 和 Pareto 分析 (一个人不伤害任何人可以最好获得的)。最后认识到, 所有这些方法都有它的缺点, 最好的一个人能够希望去做的是使过程尽可能公正和公开, 从而使尽可能多的参与者接受结果。然而很清楚, 没有过程的公正, 就不能保证公正的结果, 同样很清楚, 没有公正的过程, 我们不会取得长期等待的成功。也很清楚的是, 我们必须对问题的非技术方面花费更多的时间。没有争论就没有这一切, 争论是难以对付的、烦乱的和费时的。

参考文献

- [1] Integrated Data Base Report—1994: US Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste Inventories, Projections, and Characteristics, Rep. DOE/RW—0006—Rev. 11, Oak Ridge National Lab., TN (1995) 323 pp.
- [2] STRAUB, C. P., Low-Level Radioactive Wastes: Their Handling, Treatment and Disposal, US Govt Printing Office, Washington, DC (1964) 430 pp.
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Classification of Radioactive Waste: A Safety Guide, Safety Series No. 111—G—1.1, IAEA, Vienna (1994) .
- [4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radioactive Waste Management Profiles: Data from the Waste Management Data Base, IAEA, Vienna (1994) .
- [5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Underground Disposal of Radioactive Wastes: Basic Guidance, Safety Series No. 54, IAEA, Vienna (1981) .
- [6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Waste Management Research Abstracts No. 22: Information on Radioactive Waste Programmes in Progress, IAEA, Vienna (1995) .
- [7] STOW, S. H., Attitudes and Practices Regarding Disposal of Liquid Nuclear Waste at Clinton Laboratories in the Very Early Years: A Historical Analysis, Rep. ORNL/M