

自然类比研究

Natural Analogue Study

罗上庚

(中国原子能科学研究院放射化学研究所所长, 副研究员)

提 要 在过去 10 年中, 自然类比研究在预测高放射性废物和 α -废物处置库的性能方面起着日益重要的作用。自然类比研究可以为处置库的性能提供 100 万年以上的长期预测资料和数据, 远远超过实验室的模拟试验。许多自然类比研究, 例如对铀矿、奥克洛天然反应堆、天然玻璃、青铜古炮和中国新石器时代的混凝土和长沙马王堆古汉墓女尸的研究都有力地证明对放射性废物处置的安全性评估是可靠的。

自然类比研究(Natural Analogue Study)是近十年新兴的一门边缘科学, 它研究的对象是与地质处置放射性废物类似的天然现象及天然或人造物质经过漫长历史年代之后的变化。自然类比研究的对象是不受人控制的自然过程, 它能提供实验室和现场试验所不可能获得的数据或证明。

地位和作用

核裂变的发现已使人类进入原子时代, 核能的开发利用给人们带来了莫大的好处, 但是它也产生难以处置的放射性废物。放射性废物的毒性只能依靠自身衰变作用来消除, 因此人们采取多重屏障体系, 将其与生物圈隔离几百年(低、中水平放射性废物)、几万年乃至几十万年(高水平放射性废物和 α 废物), 直至达到无害水平。

核电厂乏燃料后处理产生的高放废物和 α 废物的深地质处置已被公认是一种现实可行的安全处置方法, 这是根据现有认识建立的数学模式和从实验获得的参数再外推到几万年、几十万年所作出的结论。实际上, 放射性核素从其宿主固化体中释出, 通过工程屏障和天然屏障迁移到生物圈, 对人体产生内照射和(或)外照射危害, 是一个极其复杂的过程, 其中有正向作用: 溶解、扩散、渗透、地下水运输、胶体载带、微生物作用等; 也有逆向作用: 衰变、离子交换、吸附、沉降、聚沉、矿化、稀释分散等等。其反应动力学是极其缓慢的。千万年之后, 自然环境和人类生活状况有多大变化, 也是难以预估的。因此, 根据有限时间和空间所作的实验而建立的评价模式是否正确, 所选取的参数是否恰当, 尚有待于

充分论证。自然类比研究正是提供这种论证的重要方法。自然类比研究的重要作用在于:

1. 验证由实验室和现场试验所建立的高放废物、 α 废物处置安全评价模式;
2. 为地质处置高放废物、 α 废物的安全性提供佐证, 使放射性废物处置获得公众的信任和支持;
3. 为高放废物、 α 废物处置场的选址和建设提供科学指导。

铀矿的自然类比研究

在自然界有三个放射性系, 即铀系(铀-镭系)、钍系和镤系, 其相应的起始元素(母体元素)为 ^{238}U (U I)、 ^{232}Th 和 ^{235}U (AcU)。经过一系列放射性衰变, 最终分别变为 ^{206}Pb (RaG), ^{208}Pb (ThD) 和 ^{207}Pb (AcD) 三种稳定同位素。在正常衰变过程中铀和镭之间可达到一定的比例关系 ($\text{Ra} / \text{U} = 3.4 \times 10^{-7}$), 即处于平衡状态。但是铀、镭的地球化学性质不同, 由于环境的改变, 两者的正常比例可能被破坏, 即发生铀或镭的相对富集或贫化, 使铀和镭处于不平衡状态。

铀矿可类比成放射性废物处置库, 可用于研究:

1. 铀系核素的不平衡状态;
2. 铀系核素迁移速率;
3. 铀矿地球化学和水文地质条件, 地下水、胶体、有机物、微生物对核素迁移的影响;
4. 地质作用对核素迁移的影响, 例如核素沿断层的迁移等;

5. 铀系核素向生物圈的输运,测定其在土壤、地表水、饮用水、动植物体中的分布等。

钍矿情况和铀矿类比研究类似。当前世界上很多国家(如美、英、法、加、澳、日、巴西、西班牙、芬兰、瑞典、瑞士等)都在作铀(钍)矿自然类比研究。典型的例子有以下三个:

1. 澳大利亚 Alligator River Province 铀矿,从 1981 年开始研究工作,受美国核管会和英国环境部支持,现在是经济合作发展组织的核能机构(OECD/NEA)领导的国际自然类比研究场址,有澳、日、英、美、瑞典等国参加。

2. 巴西波苏斯迪卡尔达斯钍矿,1986 年开始研究工作,这是美、英、瑞典、瑞士等国参加的另一个国际自然类比研究场址。

3. 加拿大 Cigar 湖铀矿,这是世界上最大、最富的铀矿。加拿大原子能委员会用它研究其 CANDU 堆(以天然铀作燃料、重水作慢化剂)的乏燃料将来进行直接地质处置的安全性(见表 1)。

表 1 加拿大自然类比研究

	Cigar 湖富铀矿	CANDU 堆乏燃料
铀 状 态	沥青铀矿(UO ₂), 铀石(USiO ₄ , 含有 12~55%(U))	UO ₂ 86%(U)
浓 度	450m	500~1000m
深 度	1.75×10 ⁵ t	1.5×10 ⁵ t
数 量	1.3×10 ⁹ 年	>10 ⁶ 年
保存时间	矿体外围有粘土层、蚀变主岩层、砂石主岩层、冰碛岩层、变质岩层。	乏燃料元件封装在钛容器中,周围填充钠膨润土、砂缓冲物质,回填物质,再外面是几百米厚的花岗岩。
屏 障	铀迁移未超过 5~10m	

考古自然类比研究

考古自然类比研究可分为天然物考古自然类

比研究和人造物考古自然类比研究两大类(见表 2)。

1. 天然物考古自然类比研究

在 1972 年发现的西非加蓬共和国奥克洛(Oklo)天然反应堆是一个突出的自然类比研究场址。奥克洛原是一个铀矿,经过地壳变迁形成了罕见的富铀带(²³⁵U 达到 3.75%),后来又进了水,大约在 20 亿年前发生了链式裂变反应,持续 70 万年,产生了大量裂变产物和锕系核素。奥克洛地区是高孔隙、高渗透性、含有丰富水分的粘土沉积层。但挖掘发现,这个天然反应堆产生的裂变产物、锕系核素及其子体经过 20 亿年仅仅迁移几厘米到几米远。这个事实有力证明,地质构造可以实现安全隔离放射性核素。现在许多研究工作还正在那里进行。

日本、瑞士、瑞典、法国等国的科学家正在研究各种天然玻璃体,考察其溶解、析晶和腐蚀风化情况,以此论证高放废物玻璃固化体的耐久性。

美国科学家研究铁陨石的组成、结构、腐蚀风化速率和耐腐蚀机理,探讨高放废物固化体包装容器的选材和加工工艺。对自然金属矿物类比研究也有类似的意义。

2. 人造物考古自然类比研究

这方面的研究工作很多,例如:瑞典对从波罗的海底砂土中发掘的青铜古炮(1676 年造)作了研究。研究发现,这门青铜古炮含铜 96.3%,主要腐蚀产物是赤铜矿和孔雀石,其腐蚀不是氧化反应,而是还原过程;对于 100%纯铜,经过 10 万年,腐蚀深度小于 5mm。因此,瑞典考虑选用铜材作为乏燃料元件直接处置的包装容器。

日本对 Ohdaira Mound 出土的古剑(1380 年造)作了研究,X 射线测定技术测出腐蚀速率为 0.0028mm/年,证明在深地下金属腐蚀速率比在空气中低得多,这为放射性废物深地质处置的

表 2 考古研究对废物处置的意义

研 究 对 象	研 究 情 况
天然物考古研究	奥克洛天然反应堆 1972 年发掘西非加蓬共和国富铀矿进水形成的天然反应堆,铀和大部分裂变产物保留在场址 20 亿年。
	火山玻璃体 流纹岩玻璃体 玄武岩玻璃体 日本、瑞士、瑞典合作研究 2.4×10 ⁶ 年 2×10 ⁵ 年 } 冰岛海底、法国研究 研究受地下水作用各种元素的溶解情况,析晶、沉淀情况,腐蚀情况,与玻璃固体腐蚀相比。
	铁 陨 石 自然金属矿 (铜、汞、金、银) 含铁量很高,有的年代很久,达 10 ⁶ 年 腐蚀风化很少 腐蚀和氧化很少 研究其受风化腐蚀影响的腐蚀速率、腐蚀条件、抗腐蚀机理,应用于包装容器研制。
人造物考古研究	古代金属制品 (古 炮、古 剑、古 钟) 考察铜、青铜、铸铁、铁、铅、锡、银等的耐腐蚀作用。 例如:瑞典研究波罗的海出土的青铜古炮(1676 年建造),主要腐蚀产物是赤铜矿和孔雀石,是在还原条件下形成的,腐蚀程度<10 mm,100 000 年
	古建筑 考察古水泥、灰浆、混凝土上的耐久性
	古墓 如:我国长沙 1972 年发掘马王堆女尸和其附葬品,在地下经 2100 年保存完好,证明粘土、活性炭是阻止水、气渗透的有效屏障

安全性又提供了佐证。

英国科学家考察古建筑物沙浆的风化程度,

探索建造耐久的工程屏障——耐久混凝土的配方。我国发掘的新石器时代的混凝土,已有

5 000 年历史。至今这混凝土地面仍保持平整光洁, 抗压强度还相当于现在的 100[#]水泥 (100 kg/cm²), 这项发掘对建造耐久的工程屏障有极重要价值。

举世闻名的我国长沙马王堆 (见图 1、2) 是 1972 年发掘的汉墓, 已有 2 100 年历史, 可是女尸仍然皮肤湿润, 富有弹性, 内部器官基本完整, 胃内尚存有 138.5 颗甜瓜籽, 表明死者患的是急症。3 000 多件随葬品也保存完好。女尸身

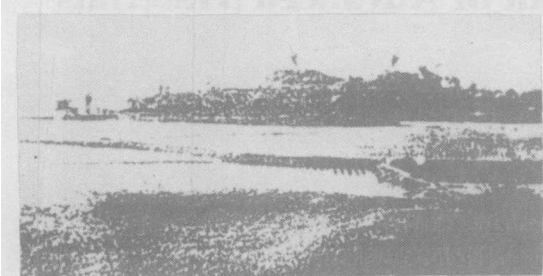


图1 长沙汉代马王堆

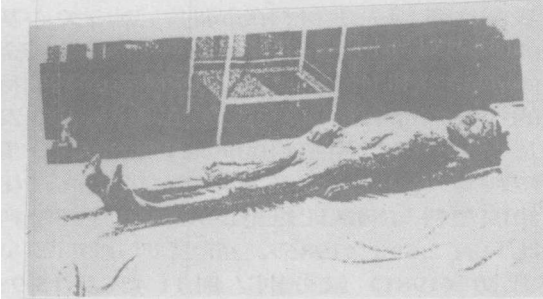


图2 马王堆出土女尸

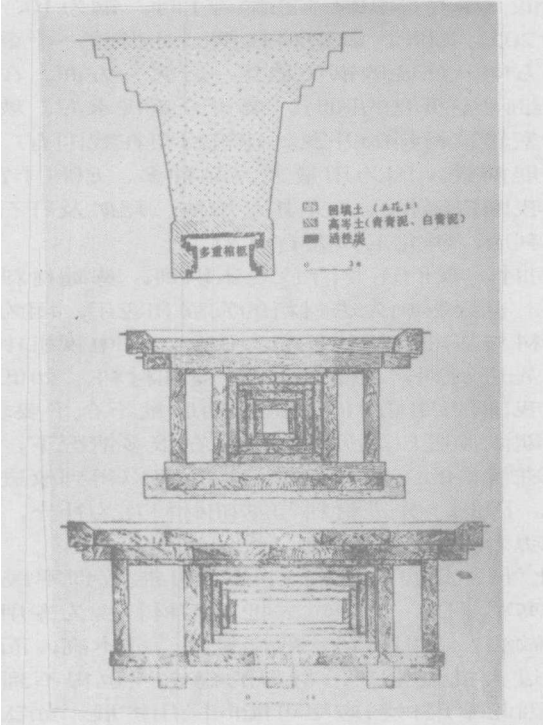


图3 汉代马王堆女尸埋葬场(上)和多重棺槨(中、下)

裹多层织物并施加防腐剂, 放置在四重棺槨中。外棺周围有 30~40 cm 厚的木炭 (约 5 t), 再外

面是 60~300 cm 厚夯实的高岭土 (青膏泥、白膏泥), 墓穴中填充五花土, 逐层夯实 (见图 3)。此墓位于小丘上, 墓深 16 m, 周围是水田。长沙地区属亚热带气候, 潮湿多雨, 年降雨量约 1 400 mm。马王堆的发掘, 一方面告诉我们, 尸体浅土、棺木埋葬尚可完好保存 2 000 多年, 采用精心设计的多重屏障体系处置放射性废物, 将放射性核素同生物圈安全隔离起来是完全可以实现的, 可以信赖的, 不必疑虑; 另一方面它还启示人们如何去实现这种隔离, 马王堆采取了隔水、隔气 (绝氧) 的重要措施。我们现在浅地埋藏处置低、中放废物所采取的措施是与此类似的 (见表 3)。

表3 中国古墓葬和中低放废物浅地埋藏处置比较

	中国古墓葬	放射性废物埋藏处置
目的	防止尸体和随葬品腐烂	防止核素迁移
要求	密封、隔绝空气、抑菌、防水	隔水、滞留核素
设计依据	设置多重屏障	设置多重屏障
技术措施	(1)依山为陵, 积土为坟 (排水、防渗) (2)多层织物包裹, 放置防腐剂 (防腐抑菌) (3)漆棺装殓 (隔绝空气、水) (4)粘土、木炭回填 (隔绝空气、防渗) (5)砖石、“三合土”构筑 (隔离、防盗) (6)粘土地质介质 (隔绝空气、防渗) (7)排水沟 (排水)	库址利于排水疏水 (排水、防渗) 固定和固化 (滞留) 涂漆钢桶包装 (隔水) 粘土回填 (滞留、防渗) 混凝土构筑 (隔离) 粘土地质介质 (滞留) 排水设施 (排水)

发展前景

自然类比研究对解决开发利用核能征途上尚未攻克的难关——安全处置高放废物和 α 废物有着重要作用。它应运而生, 方兴未艾, 有着广阔的发展前途。

自然类比研究是涉及多学科的系统工程, 需要多方面人才配合, 需要各种装置和设备, 需要先进分析测试手段。满足自然类比研究的场址条件又是很难得的, 所以适宜国际合作进行。1985 年欧洲共同体成立了国际自然类比工作组, 至今已在比利时、瑞士、美国、巴西召开了四次工作会议。

我国国土辽阔, 历史悠久, 有不少铀矿和各种自然条件。勤劳聪明的祖先创造了许多奇绩, 等待我们去发掘和研究。我们应该充分利用我国有利条件, 开展独立研究, 或吸引外资合作研究, 迎头赶上, 有所发现, 有所贡献。

(责任编辑 刘先曙)