

信息交流

## 核废物地质处置中 岩石选用现状及其开发研究

楼凤升

(核工业部北京铀矿研究所)

**主题词:** 核废物, 地质处理, 屏障, 岩石, 石盐, 粘土, 花岗岩

**提 要:** 核废物处置已成为当务之急, 其目的是要保证人类与环境的安全。普遍采用的方法是地质处置, 即保寻安全封闭的天然屏障。为此, 岩石的研究就至关重要。目前, 各国选用的岩石不一, 并不断变化, 主要为石盐、粘土和花岗岩。开发研究总趋势是建立地下实验室, 进行现场试验。

## 一、前言

随着核工业的发展和核技术的广泛应用,核废物的管理已成为当务之急,受到有核国家的普遍重视。据统计,一座 $2 \times 100$ 万瓩压水堆电站,每年约有 $1000\text{m}^3$ 固体废物,寿期按40年计算,即有 $4 \times 10^4\text{m}^3$ 。影响时间将延续300—600年。根据放射性强度,一般将核废物分为低中放和高放两类。日本分低放、阿尔发和高放三类。也有的按强度、半衰期、辐射能等综合考虑进行详细分类。

核废物管理包括处理和处置两个部份。处理指对放射性废物进行固化和固化以前的分离、焚烧、压缩、包装以及运输等一系列过程<sup>[1]</sup>。处置即为处理好的核废物选择、确定、建设永久安放场地。处置方法有地质、深孔、页岩灌浆、井坑灌注、南极冰罩、宇宙法等。海洋处置因受际海域管理限制,74年停止了使用,但研究工作还在积极进行。

## 二、地质处置的目的和要求

地质处置是当前最现实、最基本的方法。目的是使之与人类生产、生活环境相隔离,控制现在,保证将来,不影响身体健康与生态平衡。所谓以地质观点选择合适放置场地,即利用地质体对核废物加以密封屏蔽,并用矿山手段挖掘建设处置库。因而又称地质定位法或矿山地质处置法。这种方法不但理论上为人们普遍理解接受,而且有加蓬奥克洛天然反应堆提供了佐证。该堆已断续反应50万年之久,在原地保存了6吨裂变产物和2吨铀,并已裂变为无碍物质,有力地说明一定的地质体具有保存核废物的非常能力。

地质处置场要求构造稳定,有一定深度,上下有隔水层,地下水不渗出地表,远离积水洪水区,可认识程度高,预测可靠,矿产资源贫乏。同时要考虑环保、经济、政治等诸多因素,如人烟稀少,有交通可达,靠近废物产生地,非国民经济重要开发区等。

## 三、岩石选用现状

岩石在核废物地质处置中至关重要,是天然屏障的直接对象。八十年代初,美国岩石力学工作者有一半力量从事核废物地质处置研究,并促使部份地学、力学、地球物理的专业人员改搞岩石学。日本在地质处置国际合作项目中,第一个就是可能性地层调查,并制定了长远规划。认为这是近年来国际岩石力学界最活跃的中心课题。

美国在七十年代初,强调在盐矿中建处置库,现在选了三种岩石:一是内华达州的奈利斯空军基地附近的凝灰岩,计划本世纪末建成启用。另一种是得克萨斯州阿马里洛石盐,准备建成上存低中放、下埋高放的双层核废物处置库,深600m,占地 $4.85\text{km}^2$ 。第三种是华盛顿州的玄武岩,上层存放3200桶低中放、下层埋藏3500罐高放废物,深1130m,占地 $7.61\text{km}^2$ 。因而岩石的研究以石盐、凝灰岩、花岗岩、玄武岩为主要对象<sup>[2]</sup>。

英国在七十年代末集中在结晶岩中。地质研究所和原子能机构都要求研究花岗岩的热效应和渗透性。然而,近年来对沉积岩发生了兴趣,将要比林罕硬石膏矿和贝佛群艾尔斯托粘土可否作处置场进行评价。84年还下达了两项在大陆架海底之下厚层粘土中处置长寿命中

放废物可行性研究任务,并正在寻找另一可进行研究的海岸现场<sup>[3]</sup>。

加拿大、法国、瑞典、瑞士、芬兰都选用花岗岩<sup>[4]</sup>,同时对粘土和石盐进行开发研究。意大利、比利时选用粘土。西班牙、西德、丹麦、荷兰选用石盐。印度强调结晶质岩石。日本对多种岩石开展研究。苏联强调就地取材。

我国目前对岩石选用的意见不一,但集中在花岗岩和粘土岩中。强调从实际出发,把岩石作为地质系统的一个部份进行现场和实验室研究。

#### 四、对岩石的开发研究

如上所述,各国选用岩石不一,并在不断变化,但集中选用了花岗岩、粘土岩和石盐,较好地利用了岩石性能。

(一)花岗岩:美国、加拿大、西德、法国、美国、瑞士、芬兰、日本等国和瑞典合作,在斯特里帕(Stripa)废铁矿360m水平上对灰至浅红色花岗岩体模拟核废物处置库进行了综合性的现场和室内试验<sup>[5]</sup>,主要内容是岩石力学特征、热效应、核素迁移等,以便更好地利用岩石均粒致密、低渗透性和孔隙度、高抗压强度(中粗粒为800kg/cm<sup>2</sup>,细粒达2000kg/cm<sup>2</sup>)和成岩温度(在2000个大气压、有一定挥发份参与下的最低形成温度为600—700℃)。因而其变形可略而不计,花岗岩不受废物罐温度(100—150℃)的影响。

我国某地花岗岩的力学分析结果如下:

据七个样品热导率测定,介于2.30—3.58w/m·c之间,平均3.12。对花岗岩中主要造岩矿物作了分配系数K<sub>d</sub>值测定,设石英为1,即斜长石≈10,微斜长石≈200,白云母≈600,黑云母≈600—700。

(二)粘土岩:我国粘土矿分布广泛,储量占世界首位,已查明和正在探查的矿床达

项 目	单 位	弱风化细粒花岗岩	强风化细粒花岗岩
1.抗压强度	Kg/cm <sup>2</sup>	1675	1033
2.饱和态抗压强度	Kg/cm <sup>2</sup>	1614	909
3.弹性模量	Kg/cm <sup>2</sup>	40.5×10 <sup>4</sup>	26.0×10 <sup>4</sup>
4.泊松比		0.26	0.23
5.比重		2—62	2.62
6.单位容重	g/cm <sup>3</sup>	2.59	2.59
7.孔隙度	%	1.34	2.29

600多个。研究工作已取得巨大成果。

粘土岩具渗透性低、吸水、耐火、烧结、吸附、可塑性等特征,一般分高岭土、膨润土、镁质粘土及耐火陶瓷粘土四类,其中凝灰岩或火山岩在海水或地下水作用下经化学风化在碱性介质中沉积而成的属于膨润土类的蒙脱石粘土是处置场比较理想的岩石。其形成条件是pH大,溶液中SiO<sub>2</sub>多和阳离子含量高。据大量试验结果,对放射性核素的阻滞吸附作用,粘土岩高于结晶质岩石:如对Cs、Ce、Pu、Rn、Zr,页岩>凝灰岩>花岗岩,如对Pu的滞留系数,页岩≈1000,花岗岩和玄武岩为200—500。而蒙脱石又高于其他粘土矿物,如高岭石、地开石、滑石、蛭石等,有时高达数十甚至数百倍。这和其成份、内部结构有内在联系。

蒙脱石由二层Si-O四面体夹一层Al-O(OH)八面体组成。a轴长5.23 Å, b轴切托型9.00,

怀俄明型8.97, C轴不固定。六次配位的 $\text{Al}^{3+}$  (离子半径 $R=0.61$ ) 和 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  ( $R$ 分别为0.63、0.69、0.80) 分别置换四次配位的 $\text{Si}^{4+}$ 与 $\text{Al}^{3+}$  ( $R$ 分别为0.34、0.47) 时, 必然增强离子键和晶体表面电学性质。其键长, 四次配位的 $\text{Si-O}$ (1.62)、 $\text{Al-O}$ (1.77) 小于与其结合的六次配位的 $\text{Mg-O}$ (2.10)、 $\text{Al-O}$ (1.91), 引起结构定向应变。为平衡应力场, 往往形成平行 $\alpha$ 轴的针状、鳞片状或绒毛状等表面积大、吸附力强的细晶。蒙脱石结构单元层中的阳离子异价类质同像置换所产生的层电荷使垂直于层面方向易膨胀和形成分散细粒, 具吸附性和阳离子交换能力。水分子被吸附所释放出的能量为80—150mg当量/100g, 其大小与阳离子种类有关。它与表面的水化能是蒙脱石膨胀的主动动力, 而它与晶体间的静电引力、范德华力则抑制膨胀。故交换性阳离子容量过大过小都不利, 一般70—110mg当量/100g较好。因而钠基怀俄明型较钙基切托型具有更好的膨胀性、胶体分散性和吸附能力, 也更适宜选作核废物处置天然屏障或作为回填密封材料<sup>[6]</sup>。也是放射性废液进行水力压裂法处置的理想围岩<sup>[7]</sup>。

(三) 石盐: 早在六十年代, 就有一些国家选用石盐作处置场。美国、法国曾作为重点进行研究。西德认为这是最可取的安全可靠岩石之一, 并利用北部阿瑟(Asse)盐矿, 已成功地处置了中低放废物和高放废物贮存试验<sup>[8][9]</sup>。

阿瑟盐矿于1906年开始开采, 1964年关闭。1965年开始核废物盐矿处置的庞大开发研究。主要内容有:

1. 稳定性观测: 布有12个观测点, 40个会聚测点及相应的参比点, 并设有20个水准点。能同时查明巷道侧面底、顶的相对运动和绝对值, 地表扩大的固定点网, 可获得有关矿山沉降的可能性与具体数据。

2. 热扩散试验: 装有两台加热器和三台园柱形电热元件, 通过96个测点进行热扩散观测。加热器电功率最高调到1.5千瓦, 相当于高放废物的比功率。连续试验超过5700小时, 温度由2.5到240℃, 最后达225—240℃。

3. 水岩反映研究: 采用1:10000地质图, 在泉水、污水渠布置了64个测点, 进行了温度、pH、Eh、电导和水的注入量等测量、取样和水岩之面反应研究、同位素分析。

4. 耐腐蚀试验: 为查明热、盐、盐液、放射性辐射对材料的影响以便优选废物贮存容器, 对15种不同材料(每种制成6个梯)进行了现场和实验室试验。结果是: 在300℃盐矿中无坑状腐蚀、损耗 $<0.01\text{mm/年}$ 的有超级 $\text{V}_2\text{A}$ 不锈钢等三种。

5. 矿山机械试验: 为搞清岩盐抗压强度、应力和形变, 采用了三轴水压机、单轴试验机进行试验并专门制备了大直径岩心钻孔机, 以便能经济地得到合格的试验体。

在上述大量研究试验基础上, 确定利用阿瑟盐矿作为低中放废物处置库是合适的。其有利因素是:

(1) 阿瑟位哈尔茨(Harz)山脉北缘, 与北部和墨西哥湾盐穹不同, 侧面无蘑菇形横断面, 构造简单, 实际由三迭纪地层组成不对称背斜。南侧地层倾角近于90°, 北侧自南至北由陡变缓, 升高400—500m, 因而有老地层出露, 盐矿由海水蒸发而成, 产于镁质灰岩中, 层位稳定, 厚度大, 约1500—3000m, 且背斜层越向下, 盐层越宽。其下部为古生代坚固岩石。历史上无地震记载。背斜侧面被不渗水的硬石膏和页岩复盖, 不和地下水直接接触。

(2) 含水量低, 孔隙度和渗透率小。岩盐沉淀标志着水体蒸发量达93%以上, 难以产

生渗水。即使有渗透,被岩盐饱和后,也失去溶解能力。据试验,假设每天渗水量达 $50000\text{m}^3$ ,渗到750m深部需三个月,渗满盐矿,要两年多时间,而一个硐室仅在六天后盐液的饱和度就达99%以上。实际不可能产生溶解,这就限制了水的循环。钻孔证明,岩盐顶盖是粉砂岩、石膏、硬石膏,几乎完全干燥,不会出现盐溶液在大范围内的循环,也不会给间壁和顶盖带来严重影响。况且固化核废物的浸出率很低,外面还有密封罐、填料、人工屏障等。因而从构造和岩性上就几乎排除了对人类环境的污染。

(3) 石盐的热传导能力强,能最大限度降低近场效应。

(4) 可塑性好,能将核废物紧密包裹起来,形成重重的天然屏障。

(5) 便于建成坚固的大型硐室,开采成本低,既易于挖掘,又能不同程度的应用原有的矿坑及100多个容积达 $3.5 \times 10^6\text{m}^3$ 的硐室。

阿瑟盐矿作为高放废物处置场的试验研究结果是否定的。主要问题是:(1)矿内含有一层钾碱盐,光卤石含量达52%(岩盐30%,硫酸镁钒14%),当温度大于 $110^\circ\text{C}$ 时,脱水成无水化合物,大于 $165^\circ\text{C}$ 时,可放出盐酸气体。在水饱和氯化钠溶液中溶解度大,抗压能力差。

(2) 1906年,西面1.5km I号矿曾发生过洪水,今后也不能排除。(3)光卤石中 $\text{MgCl}_2$ 盐水对容器有强腐蚀作用。(4)测定几千年后的地下岩系力学稳定性和安全性,目前尚缺乏精确的手段。而且岩盐受到巨大负荷时,就会产生蠕变,其速率随压应力增大而增加。其结果,一方面易使各种大小的裂隙愈合,孔隙度进一步减小,另一方面也会引起深部工程的不稳定性。据实验,工程深度不宜超过600m。压应力和辐射热对盐矿将会引起的后果是西德、欧洲共同体、美国等正在研究的重点协作课题。

## 五、开发研究总趋势

1. 由于地质体复杂多变,从地表了解深部岩石的性能有一定难度,实验室模拟与实际差别太大,难以用来作评价依据。因而许多国家正在开发地下研究设施。

欧洲共同体在毛尔的比利时研究中心建设一个地下实验室。在布姆粘土中已开掘223m,表明粘土层稳定。科学家担心深部粘土性状会不会像牙膏。共同体还计划在意大利西西里岛的帕斯魁夏建一个地下实验室,该区有钾盐矿井和上新世粘土相通,粘土厚达数百米,产于与断层相连的盆地深部,而且属于岩温变化大、随深度增加升温迅速的造山活动区。其他地球化学特性、完整的结构和巨大深度、厚度,被认为是长期隔离核废物的可取之处。瑞士在哥里姆包尔正掘进一个地下设施。在欧洲,还广泛利用旧矿山作为处置场和地下实验室。如西德阿瑟盐矿、康拉德铁矿;法国马西福中心在花岗岩内掘进的法内、奥吉列斯铀矿;瑞典的斯特里帕铁矿等。

加拿大原子能有限公司白壳研究所在曼尼托巴省的滨纳瓦北部约10km的兰帽湖正在建设一个被认为同类型中世上最好的地下实验室。基岩主要为花岗岩,其次有闪长岩等晶质岩。距地表300—500m,有好几个现场实验室,如探测分析地下水系统、岩石力学、岩石热应力测定、地质地球化学调查等,研究重点是对放射性核素在地下水、岩石中的迁移和相互作用作出评价。一个为大多数国家普遍接受的SYVAC大型计算机程序能对上述复杂工程及自然现象进行机率性分析计算<sup>[10]</sup>。

美国汉福特地下试验室已于80年开始使用。近年又挖了几个试验坑道,计划建立地层或

岩体的试验和评价设施,以试验研究和计算机模型开发为基础进行现场试验。

2. 把处置场的岩石和有关的构造、水文等当作一个整体、系统进行研究。

3. 实验室仪器与地球物理、遥感技术密切结合进行实验。

4. 由于核废物地质处置要求高,技术难,耗资大,周期长,涉及面广,因而积极提倡国际协作。如日本,79—84年间,就有50个合作项目,5000人参与。IAEA、EEC等国际机构都把促进国际间合作为己任,出版资料文献,提供技术帮助,召开国际会议,举办各种训练班,组织多国协作。

5. 强调针对性。如研究能隔离水文地质单元的构造,对所有岩石都是必要的。而热应力试验主要是在成岩温度较低的岩石中进行。

总的可把岩石研究分为四个方面:(1)一般岩石学。(2)岩石力学:以岩石应力状态、变化特征、人工支护有效性为主,包括力学和工程特性综合试验,缓冲、密封、灌浆材料及其技术试验。(3)隔离阻滞效果研究,包括热力学特性、核素迁移能力、吸附性、可塑性等。(4)测试系统和长期监测系统以及数值模拟方法的研究。

### 参 考 文 献

- [1] Brookins, D. G., 1984, Geochemical aspect of radioactive waste disposal, P. 1—9, 39—66.
- [2] IAEA, 1982, Site investigations for repositories for solid radioactive wastes in shallow ground technical reports series N216, Vienna.
- [3] Klein, R. J., 1983, The state of stress in British rocks, DOE-RW-83.060.
- [4] Vigreux, B., 1986, Some recent developments in the treatment and disposal of radioactive waste.
- [5] SKB-a, deep underground research facility for nuclear waste disposal, This material is obtained from stripa in 1986.
- [6] Tassoni, E., 1983, Geologic disposal of radioactive waste. An in situ heating experiment in clay rock. FNEA-RT/PROT-83-17.
- [7] Weeren, H. O., 1982, New hydrofracture facility at ORNL, CONF-820418.
- [8] Bechthold, W., KFK-2236 GSF-T57 (1975).
- [9] Smrilon et al, KFK-2329 (1976).
- [10] Simmoos, G. R., et al., 1984, Canadian underground research laboratory, IAEA-CN-43/167.

## Study Development and Selecting Rocks in the Geological Disposal of Nuclear waste

Lou Fengsheng

(Beijing Institute of Uranium Geology, Ministry of Nuclear Industry)

**Key words:** nuclear waste; geological disposal; barrier; rock; salt;  
clay; granite

### Abstract

The disposal of the nuclear waste has become urgent. Its purpose is to isolate the wastes from humanbeing. The most liable method now is the geological disposal, that is, to explore a closed and security natural burrier. For this reason, the study of the rocks is very important. Different countries has selected different rocks. No matter what kind of rocks to choose, each utilizes certain characteristics of the rocks. Among those rocks, the halite, clay and granite are most commonly selected.

www.yskw.ac.cn