

高放废物地质处置战略讨论

傅冰骏

(中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

摘 要 概述了全球核电开发情况 ,介绍了高放废物地质处置国际态势及发展动向 ,对我国有关工作提出了意见和建议。

关键词 高放废物 地质处置 岩石力学 地下研究实验室

中图分类号 :X771 文献标识码 :C 文章编号 :1672-7428(2004)09-0001-05

Strategic Discussion on Geological Disposal of Highly Radioactive Waste/FU Bing-jun (Institute of Geology and Geophysics ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100029 ,China)

Abstract :This article describes the present situation and future trends both at home and abroad related to the geological disposal of highly radioactive waste. On the basis of analyzing the background condition of China ,some comments and suggestions are put forward.

Key words :highly radioactive waste ;geological disposal ;rock mechanics ;Underground Research Laboratory (URL)

1 一个全球为之困惑的难题

高放废物主要来自核电站。自 1954 年世界上第一座核电站在苏联投入运行以来 ,核电建设已有 50 年的历史。根据国际原子能机构统计 ,截至到 2002 年底 ,全世界共有 441 台核电机组在运行 ,总发电量为 2.574 万亿 kW · h ,相当于全球总发电量的 17% 左右。半个世纪以来 ,人类一方面发展核能 ,取得巨大的经济效益 ;另一方面 ,迄今为止还没有彻底解决高放废物的处置问题。出于对安全、环保的考虑 ,在欧美一些发达国家 ,除法国以外 ,已基本上停建或关闭核电站。如瑞典于 1980 年以全民公决方式通过立法 ,不允许再建核电站 ,已有核电机组应在 2010 年前逐步关闭。德国总理施罗德于 2000 年 6 月宣布逐步关闭 19 座核电站 ,放弃核能发电。与此相反 ,亚洲一些国家正致力于核能发电。据国际原子能机构统计 ,东亚和东南亚地区现约有 100 个核反应堆在运转 ,有 20 个反应堆正在兴建 ,另外还有 40 个反应堆处于规划之中。当前 ,日本和韩国都有约占全国 39% 的电力来自核电。尽管上述两个国家近年来都发生过核事故(日本茨城、敦贺 韩国月城) ,但两国政府仍计划兴建更多的核电站。

不管是放弃核能发电 ,还是继续核能发电 ,主要来自核电站的高放废物处置是人类迫切需要解决的

难题。虽然经过近半个世纪的努力 ,但到现在为止 ,还没有一个国家建成可以安全、永久储存高放废物的设施。

2 国际发展态势

2.1 概述

为了安全、永久处置高放废物 ,科学家提出了不同的方案 :太空处置、冰层处置、海底处置、岩熔处置及深部地质处置等。经过比较 ,都认为深部地质处置是最佳方案。这种方案的实质是利用深达 500 ~ 1000 m 的地下岩石洞室(结晶岩、岩盐、粘土岩等) 作为永久处置库或称地质处置库 ,再通过工程屏障永久隔离高放废物。

如前所述 ,到现在为止 ,还没有一个国家已经建成地质处置库。在时间方面 ,走在前列的几个国家是 :美国计划于 2010 年在 Yucca Mountain 建成世界上第一座处置库 ;芬兰计划在 2020 年在 Olkiluoto 建成处置库 ;瑞典已选出 2 处比较场址(Osthhammar 和 Oskarshamn) ,预计在 2007 年才能最终确定。

2.2 国际合作组织及其主要活动

在国际合作方面 ,做出突出贡献的主要有以下组织 :

(1) 国际原子能机构(IAEA , International Atomic Energy Agency) ;

收稿日期 2004-08-10

作者简介 :傅冰骏(1930-) ,男(汉族) ,山东高密人 ,中国科学院地质与地球物理研究所研究员 ,中国岩石力学与工程学会顾问 ,中国锚固与注浆技术协作网副理事长《中国岩石力学与工程动态》主编 ,从事岩石力学与岩石工程等方面的研究工作 ,北京市朝阳区祁家豁子(010) 62008462 ,csrme@vip.sina.com。

(2) 经济合作与开发组织核能机构(OECD/NEA, Organization for Economic Cooperation and Development/Nuclear Energy Agency);

(3) 国际放射性辐射防护委员会(ICRP, International Commission on Radiological Protection);

(4) 核能机构(NEA, Nuclear Energy Agency);

(5) 欧共体(EC, European Community) 现为欧盟(EU, European Union);

(6) 欧共体委员会(CEC, Commission of European Communities);

(7) 瑞典核燃料与废物管理公司(SKB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.);

(8) 国际岩石力学学会(ISRM, International Society for Rock Mechanics)。

几十年来,上述各个国际组织通过各种活动,有力地促进了科技进步和学科发展。其中最具有影响力的是前两个机构,即 IAEA 和 OECD/NEA。它们先后组织或联合组织了多次高水平的国际会议。其中,1999 年在美国丹佛、2003 年在瑞典斯德哥尔摩召开的“高放废物地质处置库国际大会”影响巨大。1999 年 OECD/NEA 出版了专著《国际放射性废物地质处置十年进展》,综述了各国在法律、法规、处置规划、处置方法、技术路线、场址评价、地下实验室、工程屏障、处置库建造、安全评价、公众接受程度方面取得的进展。该书是在调查了美、英、日、德、法、加拿大、荷兰、比利时、捷克、瑞士、瑞典、芬兰等国家 17 个组织的情况后编写的,很有学习、参考价值。

此外,IAEA 对人才培养也十分重视,制订了地下研究设施中废物处置技术培训和示范教学计划(Training & Demonstration Program of Waste Disposal Techniques in Underground Research Facilities)。近期打算 2004 年 10 月在美国加州 Lawrence Berkeley 国家实验室(National Laboratory) 2005 年上半年在捷克举办为期数周的学习班,面向世界培养人才。

国际岩石力学学会(ISRM)对这个前沿课题一直十分重视。在 1987 年召开的第 6 届国际岩石力学大会上(加拿大蒙特利尔)“岩体中的液体流动与废物处理”,包括场地调查、岩体性质、地下水流动、污染物扩散、废物隔离、渗流控制、热应力与开挖对岩体的损伤、现场监测与反分析等被列为第 1 个主题进行重点研讨。此后,历届大会或年会都将高放废物地质处置列为重点议题。2003 年 9 月在南非 Sandton 召开的第 10 届国际岩石力学大会上, L.

Muller 奖(国际岩石力学界最高奖)得主,美国 C. Fairhurst 教授(第 7 届国际岩石力学学会主席)就此做了特邀报告,报告题目是“岩石力学与放射性废物隔离——在地质学领域是一小步,在岩石力学领域是一大步”。此外,在大会上还专门设立了一个分会,在国际范围内,就美国计划建立深部地下科学与工程实验室(DUSEL, Deep Underground Science and Engineering Laboratory)进行了有益的探讨。2003 年 10 月在瑞典斯德哥尔摩,国际岩石力学学会又主办了“地球系统热力学——水力学——岩石力学——化学耦合过程:基础研究、模拟方法、试验技术及工程应用国际学术会议”(Geo Proc 2003),主要是针对高放废物处置召开的。2004 年 5 月在三峡工程现场召开的“中国岩石(SINOROCK—2004)”国际岩石力学研讨会上,由 C. Fairhurst 教授发起,钱七虎院士主持召开了“岩石力学与核废物隔离”(Rock Mechanics and Nuclear Waste Isolation)专题会议。会上,中外专家就上述专题进行了有益的探索。

2.3 地下研究实验室

建立地下研究实验室(URL, Underground Research Laboratory)是地质处置的一个极为重要的环节。国外的研究工作始于 1965 年。当时美国在 Kansas 州的 Lyons 旧矿中对岩盐进行过加热实验。20 世纪 70 年代以来,地下实验室得到很大的发展。到目前为止,总数大约有 30 个。

国际上有代表性的合作项目有以下几个。

2.3.1 国际 Stripa 计划

Stripa 地下试验研究室位于瑞典中部。利用废旧铁矿山,从 1976 年起进行综合研究。1977 ~ 1980 年由瑞典核燃料和废物管理公司(SKB)、美国 Lawrence Berkeley 实验室(LBL)和加州大学(UC, University of California)共同合作进行。1981 年春,在经济合作与开发组织的策划下,正式启动国际 Stripa 计划。参加的成员国为:瑞典、美国、芬兰、日本、瑞士,副成员国有:加拿大和法国。

这期间进行的试验研究项目有:加热试验、地球物理勘探、水文地质和水化学研究、核素迁移模拟试验、回填材料膨润土性能研究等。该项目已于 1992 年结束。

2.3.2 国际 Äspö 计划

这项计划也是瑞典 SKB 公司发起组织的。项目的实质是在地下深处(最深距地表 460 m)的花岗岩体中建造一个与实际情况相符的地质环境,以便

研究、开发、完善高放废物地质处置技术 ,同时对外开放 ,向公众宣传、演示有关技术、方法。从 1986 年开始进行综合性的工程地质勘测 ,包括区域稳定性调查、地下水渗流规律、放射性核素迁移等(其中压水试验的深度达 1000 m ,同时进行了长期抽水试验与放射性示踪试验)。1990 年以后 ,一面进行开挖 ,一面进行现场实验。1993 年 ,瑞典与加拿大、日本、芬兰、法国、英国、美国等国家的 10 个科研机构签定协议 ,进行广泛的国际合作。后来 ,德国、瑞士、西班牙、欧盟也参加了工作。

在该地下实验室进行的实验项目如下。

(1)比例尺为 1: 1 的现场深层地质处置系统原型试验。处置系统将废物体、废物罐、缓冲材料、回填材料等都包括在内。

(2)现场开挖扰动区实验(ZEDEX ,Zone of Excavation Disturbance Experiment)。实验在地表以下 420 m 深处的两条平洞中进行 ,平洞之间的距离为 25 m。主要目的在于探索两种不同的开挖方法(隧道掘进机法和常规钻爆法)对开挖扰动区的影响。

(3)现场放射性核素迁移实验。主要研究放射性核素在裂隙岩体和基质中的迁移、扩散规律以及微生物、胶体、地下水等对核素迁移的影响。

2.3.3 国际 DECOVALEX 计划

该计划的全称为 Dvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments in nuclear waste isolation。由瑞典核电监管局(SKI)发起。计划的实质是以多学科研究为基础 ,开发耦合模型 ;以室内外科学实验为基础 ,检验各种模型的有效性。耦合模型的主要研究对象是地质介质的热力学—水力学—岩体力学(T - H - M ,Thermo - Hydro - Mechanical)的共同作用。后来又加上化学作用(Chemical Process)形成 T - H - M - C 耦合过程。它是迄今为止历时最长、最具影响力的大型国际合作计划 ,结合不同国家的地下实验室进行研究。

DECOVALEX 第 I 期(1992 ~ 1995)有来自瑞典、加拿大、法国、英国、美国、日本、芬兰等国家的 9 个赞助机构、15 个研究单位参加。主要研究了裂隙岩体中的渗流规律 ,热力学性能以及岩体的应力、变形等。

第 II 期(1996 ~ 1998)有 11 个赞助机构、11 个研究单位参加。主要结合英国的 Sellafield 及日本的釜石(Kamaishi)核废物地质处置库进行。此外 ,还研究岩石节理的本构关系以及与处置库设计、运行有关的耦合过程。

第 III 期(1999 ~ 2001) ,主要结合 :

(1)瑞士的 Grimsel 地质处置库 ,进行比例尺为 1: 1 的工程屏障实验(FEBEX ,Full - scale Engineering Barrier Experiment) ;

(2)美国内华达州 Yucca Mountain 地质处置库 ,进行加热实验。

此外 ,还对处置系统的运行、安全评价原则和方法进行了研究。

DECOVALEX 现已进行到第 IV 期。最近的一次会议是在法国 Avignon 召开的。

2.4 几点值得注意的动向

2.4.1 高放废物处置是一项“ 通天工程 ”

运用了最高权力机构 :国会、总统、总理来监管此事。如美国 Yucca Mountain 高放废物库场址的选定是由布什总统于 2002 年批准的。英国高放废物研究计划、实施大纲是由英国上院审定的 ,其它国家如瑞典、芬兰、瑞士、德国、法国、日本等无不如此。

2.4.2 各国投入大量资金

如美国在 1996 年投入 Yucca Mountain 项目的费用高达 2.5 亿美元 ;瑞典核燃料和废物管理公司(SKB)于 1995 年用于建造 Äspö 地下实验室研究的投资为 5 亿克朗(约合 6000 万美元) ,用于建造高放废物罐的费用为 1.5 亿克朗(约合 1800 万美元)。

一般地讲 ,一些发达国家都建立了稳定的投资渠道。除政府投资以外 ,还建立了相应的资金(如乏燃料基金等)。芬兰政府则根据“ 谁造成污染谁治理 ”的原则规定所有核废物处置费用由电力公司承担。

2.4.3 三条非成文的原则

为了保持综合平衡和可持续发展 ,国际社会提出 3 条非成文的原则 :

(1)高放废物的最终处置不可给当前社会造成难以接受的经济负担 ;

(2)高放废物处置的最终场地选择不造成国际争端 ;

(3)“ 代际公平 ” ,即当代人产出的高放废物应由当代人处置 ,不应或尽量避免留给下一代。

2.4.4 制订了明确的法律、法规和健全的管理体制

为保证高放废物的安全处置 ,各国政府制订了有关法律、法规。执行起来有法可依 ,有章可循。如芬兰政府于 1988 年出台了核能法令和核能章程(Nuclear Energy Act and Statute) ,1994 年对该法令进行了修改 ,明确规定所有在芬兰产生的核废物要

在本国进行最终处理;所有外国的核废物一律不许进入芬兰。同时责成国务院负责贯彻实施。

1991年12月法国出台了国会法(Act of Parliament),制定了总体规划,明确了责任、义务,成立了专门的监管机构。1998年美国核管理委员会(US-NRC, U. S. Nuclear Regulatory Commission)出台了Yucca Mountain 高放废物处置章程。

在国际范围内,IAEA颁布了“乏燃料安全管理与放射性废物安全管理公约”,ICRP出版了“固体放射性废物处置的辐射防护原则”(ICRP-64)“放射性废物处置辐射防护政策”(ICRP-77)等一系列文件。

2.4.5 重视公众的参与、理解和支持

针对社会上尚有一部分公众对核能发电及核废物处置尚持疑惧态度,让公众参与、理解和支持高放废物地质处置是一个非常关键的问题。加拿大原子能公司(AECL, Atomic Energy of Canada Ltd)在花岗岩体中建成的Lac du Bannet地下实验研究室(URL,最深达455 m)早在20世纪80年代就对公众开放。瑞典Äspö地下实验研究室也早已成为联系群众的窗口,目前每年大约有12000人前去参观。通过这些活动,力图建立新型的科技与公众的关系,使公众对地质处置有更多的知情权,提高信心,理解和支持这项工作。

2.4.6 重视数据库建设

当前,“数字地球”(Digital Earth)的浪潮席卷全世界。作为地球科学的一部分,高放废物地质处置也不例外。这项工作已引起各国的普遍重视。近年来,英国已成功地开发出了Nirex数字地球科学数据库(NDGD, Nirex Digital Geoscience Database)。DECD/NEA也为推动这一工作做出了不少的努力。进一步建立、健全全球性的高放废物地质处置数据库已成为一个总的发展趋势。

2.4.7 地质处置的长期安全性仍是一个众所关注的焦点

由于含钚核废物的半衰期为2.4万年,因此进行地质处置时所要考虑的时间安全因素至少为1万年,甚至几十万年。为确保万无一失,人们把处置安全问题与科学技术、政治经济并列为“人类在该领域面临的三大挑战”。一些国家如美国、瑞典、芬兰等开发了大型安全评价计算机程序,完成了阶段性安全评估报告。国际原子能机构出版了安全系列丛书(IAEA Safety Series),并启动放射性废物安全标准(RADWASS)计划。近年来,在高放废物处置的

概念设计中,法国等国家考虑了废物的可回收性及处置过程的反演操作(Ability to reverse the storage operation)。瑞士提出了可开展长期监测的处置库概念设计方法。

3 我国发展概况及对今后工作的意见和建议

3.1 概况

我国已建成核电机组8套,在建3套。到2005年,预计核电装机容量将达870万kW,2010年将达到2000万kW,2020年将达到3200~4000万kW。按此规划推算,到2010年我国积累乏燃料将达1000 t,到2015年将达到2000 t,2020年以后,每年将产生1000 t乏燃料。

我国于1985年由核工业部制定了“高放废物深地质处置研究发展计划”(即SDC计划,后称DGD计划),并于1986年开始实施。该计划分4个阶段,即:技术准备阶段、地质研究阶段、现场实验阶段和处置库建造阶段。采用深部地质处置技术路线,计划在2040年左右建成我国第1座地质处置库。

经过近20年的不懈努力,我国完成了高放废物深地质处置总体规划和总体技术研究,选址和场址评价研究,处置库概念设计调研,缓冲回填材料性能研究,核素迁移研究,核素水溶液化学研究,天然类比研究,国外性能评价调研及计算机模拟等大量工作。现已确定甘肃北山为高放废物处置库的重点预选区,开展场址评价方法学研究。选择内蒙古高庙子膨润土作为缓冲回填材料。

近年来,在国家自然科学基金委员会、中国科学院知识创新工程、核工业总公司、中国科学院武汉岩土力学所知识创新工程等项目的支持下,我们在应力—水流耦合过程、温度—应力—水流耦合过程、化学作用等方面的研究取得许多进展。

在国际合作方面,我国与国际原子能机构开展了两期技术合作项目。第1期为“中国高放废物处置库选址和场址评价研究”(1999~2001);第2期为“中国高放废物地质处置库场址评价和性能研究”(2003~2005)。此外,还与美、法、日、德、韩、瑞士、瑞典、比利时等国家建立了技术联系。最近,我国科学家参加了国际合作DECOVALEX计划的第2课题——“结晶岩开挖扰动区H-M-C研究”工作。2004年5月在三峡工程现场召开了国际核废物处置中关键岩石力学问题研讨会。

3.2 对我国今后工作的意见和建议

3.2.1 加强宏观调控

从总体上看,我国在高放废物地质处置方面起步晚、底子薄,与国际先进水平相比,还有不少差距。本文提到的 7 条国际发展动向都值得我们注意。特别希望国家高层权利机构:人大、国务院能够进一步过问此事,加强领导,全面规划,建立、健全有关法律、法规,增加资金投入(不一定全靠国家投资,芬兰政府提出的“生产责任延伸制”也是一条可行的途径)。

3.2.2 结合国情,实现跨越式发展

在学习、吸收国外先进经验的过程中,不能停留在一般的模仿和跟踪,必须进行原始性创新,实现跨越式发展。多年来的工程实践说明,在地学领域,国外一些行之有效的办法,面对中国如此复杂的地质介质,常常无能为力。我们必须根据自己的特点发展、建立高放废物地质处置系统。

3.2.3 注意运用新理论、新方法

高放废物地质处置是一个开放的复杂巨系统工程,不仅涉及到一系列岩石力学难题,而且涉及到诸多政治、经济问题。不仅要考虑地质—热力学—水力学—岩石力学—化学—工程(G-T-H-M-C-E)的耦合关系,还要考虑到自然科学和社会科学的耦合关系。不但专业知识跨度很大,而且还有诸多自然和社会的不确定性因素。在这方面,推广应用钱学森先生提出的系统工程理论、方法以及与非线性科学有关的混沌理论、耗散结构论、突变论、协同论、神经网络等新理论、新方法,来指导我们的工作,是非常必要的。

3.2.4 突出自己的研究成果

为了更好地与国际接轨,应该突出自己的研究成果。我国学者在地质力学、岩体流变、岩体结构、岩体工程地质力学、岩体关键块体理论、不连续变形分析(DDA)、数值流形元方法(NMM)、岩石分形分维、人工智能岩石力学等方面的研究在国际上占有重要地位。毫无疑问,这些研究成果可以应用于高放废物地质处置系统。此外,翁文波先生提出的《预测理论》(Theory of Forecasting)对评价地质处置的长期安全也有重要意义。近年来,一些研究成果,如放射性核素在裂隙岩体中的迁移模式研究(谢运棉,1991)、岩石破坏过程分析(RFPA, Rock Failure Process Analysis, 唐春安,1999)、岩石工程设计问题的综合研究(冯夏庭,2004)受到国际同行的普遍重视。“岩石时-温等效原理的理论与实践研究”(刘

泉声等,2002)也很有特色。在此基础上,进一步发扬光大具有中国特色的科研成果,十分必要。

3.2.5 人才培养与公众参与

如前所述,高放废物地质处置是一项开放的复杂巨系统工程。做好这一项充满挑战的系统工程,需要付出几代人的艰苦努力。因此人才培养至关重要。在人才培养方面,除了常规手段以外,还有派出去、请进来、举办学习班等。建议在高等院校、科研院所设置与高放废物地质处置有关的教学内容。另外,也是更重要的一点,就是我们需要培养的是一批高素质的、跨学科的综合型人才。我们不仅需要专家,更需要博专结合,以博带专、一专多能的“杂家”。

在公众参与方面,西方发达国家在充分吸取以往经验、教训的基础上,十分注意公众对高放废物地质处置工作的参与、理解和支持。我国在公众参与方面基本上是空白,建议从现在开始,着手解决这个问题。

3.2.6 国内外技术交流和技合作

高放废物地质处置是全人类共同面临的重大课题,需要进行广泛的国际合作。进一步加强国际合作对缩小我们与发达国家之间的差距,实现跨越式发展很有好处。

在国内技术交流、合作方面,最近(2004 年 7 月)由 5 个全国性学会(中国核学会、中国岩石力学与工程学会、中国地质学会、中国矿物岩石地球化学学会、中国环境学会)联合发起召开的“高放废物地质处置学术研讨会”是一个很好的范例。国际上有关兄弟学会联合成立长期合作秘书处(PCS, Permanent Co-ordinating Secretariat)或就某一专题成立联合技术委员会(JTC, Joint Technical Committee)等的做法值得我们借鉴。建议在适当时间在我国举办一次有关高放废物地质处置的大型国际会议。

3.2.7 抓住机遇,促进发展

经过近 20 年的努力,我国已形成了一支强有力的高放废物地质处置队伍。不少年轻学者在国际舞台上崭露头角。在国外一些权威科研机构也有一些华人专家或留学生从事这方面的工作。更重要的是,近年来在国际范围内经济比较萧条,核电建设相对萎缩,而我国经济建设蒸蒸日上,在核电开发及高放废物地质处置方面充满了机遇和挑战,我们应该充分利用这些有利条件,实现跨越式发展。