

# 中国高放废物地质处置 十年进展

王 驹 范显华 徐国庆 郑华铃 主编



原子能出版社

# 中国高放废物地质处置 十年进展

主 编:王 驹 范显华 徐国庆 郑华铃  
副主编:王承祖 范智文 周文斌 闵茂中  
编 委:郭永海 章英杰 孙庆红 陈伟明  
高必娥 刘晓东 罗兴章

原子能出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

中国高放废物地质处置十年进展/王驹等主编. —北京:原子能出版社, 2004. 6  
ISBN 7-5022-3173-0

I. 中… II. 王… III. 放射性废物处置-进展-中国 IV. TL942

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 062898 号

## 内 容 简 介

本书包括总论、处置地质、处置化学、缓冲/回填材料、安全评价、地下实验室和有关考察报告等 7 部分,基本反映了我国高放废物地质处置研究领域在 1991—2000 年间的发展全貌。此外,一些论文还提及了 2000 年以后有关工作的最新进展。本书以科研论文为主,兼收了总体工作回顾、战略规划探讨和国际进展报告等内容;考虑到国际交流的需要,还收编了部分以英文形式发表的论文。

本文可供核工业、地质研究部门和环保部门的相关科技人员和管理干部参考,也可供有关专业的大专院校师生(包括研究生)参考。

## 中国高放废物地质处置十年进展

---

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100037)

责任编辑 谭俊 张梅

责任校对 李建慧

责任印制 丁怀兰 刘芳燕

印 刷 保定市印刷厂

经 销 全国新华书店

开 本 787mm×1092mm 1/16

字 数 783 千字

印 张 31.5 彩页 2

版 次 2004 年 7 月第 1 版 2004 年 7 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5022-3173-0 / TL·1016

定 价 98.00 元

---

版权所有 侵权必究(如有缺页、倒装,请与出版社联系调换)



高放废物地质研究九五年度学术年会于1996年3月在山西太原召开,图为与会代表合影



由核工业北京地质研究院主办的高放废物地质处置国际学术研讨会于1996年8月在北京举行,图为与会代表合影

封面图为甘肃北山日出。摄影:宗自华  
封底图为甘肃北山地貌。摄影:王 驹





国际著名水文地质学家、美国劳伦斯伯克利国家实验室 P. A. Witherspoon 教授 1996 年 7 月在核工业北京地质研究院讲学（左起：李晓清, 王晓黎, P. A. Witherspoon, 徐国庆, 王驹）



我国高放废物地质处置场址评价研究第一个钻孔——北山 1 号孔于 2000 年 7 月 8 日胜利开孔, 图为开孔典礼现场



美国核废物技术评审委员会委员、美国卡耐基梅隆大学校长 J. Cohen 博士 1996 年 5 月在核工业北京地质研究院讲学, (左起：徐国庆, J. Cohen, 王驹)



甘肃北山 1 号孔全貌

## 序

高放废物的安全处置是一项关系到核工业可持续发展、保护环境和保护人民健康的重要而紧迫的任务,也是我国科研人员和工程技术人员面临的一项重大挑战。西方国家的经验教训表明,能否安全处置高放废物,已成为制约核能工业可持续发展的最关键因素之一。《中华人民共和国放射性污染防治法》提出了“高水平放射性固体废物实行集中的深地质处置, $\alpha$ 放射性固体废物也实行深地质处置”的法律要求。我国军工核设施产生的高放废物以及核电站产生的高放废物必须妥善地加以处理并最终安全处置。高放废物中含有较大量强放射性、高毒性、长寿命放射性核素,对其进行深地质处置是一项世界性难题,并且,这项工作还具有研究周期长、涉及学科多的特点。为完成安全处置我国高放废物的战略任务,我们应该开展系统的基础性研究和前期工程研究工作。在我国国家中长期科技战略规划中明确列入高放射性废物处理处置研究,并在2020年前建成用于地质处置研究的地下实验室是必要的。

我国从1985年起开展了高放废物地质处置研究工作,1986年成立了“高放废物深地质处置研究专家协调组”。20年来,我国科研人员紧密跟踪国外进展,开展了高放废物地质处置选址和场址评价、处置化学、缓冲回填材料、概念设计、天然类比和性能评价等方面的研究,还积极开展国内外学术交流和合作。本文集收录了我国1991—2000十年间在高放废物地质处置各领域取得的有代表性的成果,基本反映了我国这一领域的全貌。文集虽以科研论文为主,但也兼顾了工作总结、规划探讨和国际进展方面的论文。考虑到国际交流的需要,文集收录了若干篇英文论文。

目前我国核电面临大发展的机遇,对高放废物地质处置提出了新的要求,军工高放废物处理处置项目也进入关键阶段,目前还正值制定十一·五规划和2020年规划之际,本文集的出版无疑将起到总结成果、交流经验的作用,也必将为推动我国高放废物地质处置工作、为我国核工业的可持续发展和保护环境作出贡献。

潘自强

2004年5月

# 前 言

高放废物的安全处置是关系到我国核能工业可持续发展和环境保护的不可避免的重大问题。我国原子弹的成功爆炸使我国拥有了核威慑力量,也使我国迈入了核大国的行列。但是,原子弹的研制和生产过程中产生的军工高水平放射性废物(简称高放废物)却是一个不可避免的重大环境问题。核电站的投入使用也产生核废料,其中,从反应堆堆芯中替换出来的燃烧后的燃料棒称为乏燃料,它具有极强的放射性。乏燃料经过后处理,回收其中的有用元素钚和铀之后,剩下的就是必须进行固化处理和安全处置的高放废液。对其进行安全处置也是一项极其重大的课题。

我国从1985年起开展高放废物地质处置研究工作,1986年成立了“高放废物深地质处置研究专家协调组”。1991—2000年的十年是我国高放废物地质处置研究重要的十年,是承前启后的十年。这十年间,核工业北京地质研究院、中国原子能科学研究院、中国辐射防护研究院和核工业北京工程设计研究院以及南京大学、清华大学和华东地质学院等院所和院校在处置库选址和场址评价、处置化学、缓冲回填材料、概念设计、天然类比、性能评价和地下实验室等方面开展了研究,还积极开展国内外学术交流和合作。提出了2040年前后建成我国高放废物地质处置库的工作目标,确定了我国高放废物处置走深地质处置的技术路线,提出了场址—地下实验室—处置库“三步曲”式的总体实施方案。已初步选定甘肃北山地区为高放废物处置库重点预选区,并确定花岗岩为候选围岩。已初步确定内蒙古高庙子膨润土为首选缓冲回填材料,建立了低氧手套箱和模拟处置库条件的小型试验装置,获得了一批放射性核素(主要是Np, Pu, Tc)的迁移行为数据。1999年启动国际原子能机构技术合作项目:“中国高放废物地质处置选址和场址评价研究”,首次开启了高放废物地质处置国际合作的大门。为反映这十年的工作进展,利于交流,我们编辑了这本文集。文集包括总论、处置地质、处置化学、缓冲回填材料、安全评价、地下实验室和有关考察报告等板块,基本反映了这一研究领域的全貌。不仅如此,一些论文还提及了2000年以后有关工作获得的最新进展。文集以科研论文为主,兼收了总体工作回顾、战略规划探讨和国际进展报告等内容,还收编了部分以英文形式发表的论文。

本文集是团结一致集体劳动的成果。借此机会,我们感谢国内外支持和指导我国高放废物地质处置研究的各界人士,感谢为文集撰写和提交论文的各位作者。此外,还要感谢高必娥研究员为编辑本书所付出的辛勤劳动。

特别要感谢中国工程院院士、中国核工业集团公司科学技术委员会主任潘自强研究员在本书即将出版之际,写来了充满鼓励、鞭策和期望的序言。

高放废物地质处置是一项技术难度大、研究周期长、涉及学科多的高科技系统工程。十年所做的工作还很初步,积累的技术基础还很薄弱,离满足我国高放废物地质处置的要求甚远。今后还需加大投入,深入研究。尽管付出了很大的努力,本文集可能还有不尽人意之处,恳请读者不吝赐教。本文的出版若能起到推动我国高放废物地质处置研究的作用,则编者之愿也。

编者谨识

2004年5月于北京



# 目 录

## 1 总论

- 1.1 我国高放废物地质处置研究十年进展  
..... 王 驹 郑华玲 徐国庆 范显华 王承祖 范智文(1)
- 1.2 我国高放废物深地质处置战略规划探讨..... 王 驹(13)
- 1.3 关于我国高放废物深部地质处置研究的初步设想(2000—2040)..... 徐国庆(27)

## 2 处置地质

- 2.1 我国高放废物处置库甘肃北山预选区区域地壳稳定性研究  
..... 王 驹 徐国庆 金远新 陈伟明 郭永海 杨天笑(38)
- 2.2 旧井地段 1/5 万区域地质特征研究..... 王 驹 陈伟明 金远新 苏 锐(55)
- 2.3 中国高放废物处置库围岩岩石类型的选择..... 金远新 王文广 陈璋如(62)
- 2.4 北山地区地下水同位素特征..... 郭永海 刘淑芬 吕川河(75)
- 2.5 中国高放废物处置库北山预选区地下水化学特征研究..... 杨天笑 郭永海(81)
- 2.6 高放废物处置库预选场地地学信息库的建立  
..... 李 军 樊 艾 黄树桃 王 驹(89)
- 2.7 甘肃北山及其邻区地壳稳定性模糊综合评价  
..... 陈伟明 王 驹 金远新 徐国庆(94)
- 2.8 高放废物处置库甘肃北山预选区水文地质条件分析  
..... 郭永海 苏 锐 刘淑芬 吕川河(101)
- 2.9 Preliminary Site Characterization at Beishan, Northwest China—A Potential  
Site for China's High-Level Radioactive Waste Repository  
..... WANG Ju, XUE Weiming, ZHENG Hualing, SU Rui (108)
- 2.10 Study of the Crustal Stability of the Beishan Area, Gansu Province, China—the  
Preselected Area for China's High Level Radioactive Waste Repository  
..... XU Guoqing, WANG Ju, JIN Yuanxin, CHEN Wei-ming(117)
- 2.11 Isotope Study of Groundwater in Beishan Area, Gansu Province  
..... GUO Yong-hai, LIU Shu-fen, YANG Tian-xiao(123)

## 3 处置化学

- 3.1 关于高放废物深地质处置中放射化学问题的思考 ..... 郑华玲(131)
- 3.2 裂片核素在岩石中的迁移研究 ..... 温瑞媛 常 辉 王祥云 高宏成(134)
- 3.3 吸附放射性碘、镅材料的筛选..... 曾继述 夏德迎(139)

- 3.4  $^{99}\text{Tc}$  在活性炭上的吸附行为 ..... 夏德迎 曾继述(145)
- 3.5 锕系核素 $^{237}\text{Np}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  在膨润土和矿物上的吸附 ..... 曾继述 夏德迎(150)
- 3.6  $^{237}\text{Np}$  在膨润土中吸附行为的研究 ..... 姚 军 苏锡光 龙会遵 范显华(154)
- 3.7  $^{237}\text{Np}$  在膨润土中表现扩散系数  $D_a$  值的测定  
..... 姚 军 苏锡光 龙会遵 范显华(164)
- 3.8 镅在膨润土中吸附与扩散的研究 ..... 任立宏 苏锡光 龙会遵(173)
- 3.9 放射性核素镅在造岩矿物上的吸附  
..... 李 敏 范显华 魏连生 章英杰 矫海洋(180)
- 3.10  $\text{Np(IV)}$  的溶解行为研究  
..... 章英杰 姚 军 矫海洋 任立宏 周 舵 范显华(188)
- 3.11  $\text{Am(III)}$  与腐殖酸配合行为的研究 ..... 章英杰 赵 欣 魏连生 林漳基(193)
- 3.12  $\text{Np(V)}$  与  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  离子的配合行为研究  
..... 章英杰 矫海洋 魏连生 赵 欣 林漳基(199)
- 3.13  $\text{Np(V)}$  与  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  离子的配合行为研究  
..... 章英杰 矫海洋 魏连生 赵 欣 林漳基(205)
- 3.14  $\text{Pu(VI)}$  在模拟地下水中还原行为的研究  
..... 魏连生 赵燕菊 孔令琴 林漳基(215)
- 3.15 花岗岩体单裂隙中核素迁移数学模型  
..... 苏 锐 李春江 王 驹 高宏成(222)
- 3.16 模拟 HLW 处置库环境核素迁移实验装置 RADMIG 的设计  
..... 姜桂林 刘金红 徐国庆(229)
- 3.17 元素镓、铈存在形式的模拟研究 ..... 周文斌 张展适(234)
- 3.18  $\text{Am(III)}$  胶体行为研究 ..... 赵 欣 章英杰 魏连生 林漳基(238)
- 3.19  $\text{Np(V)}$  存在形态及胶体行为研究 ..... 赵 欣 章英杰 魏连生 林漳基(246)
- 3.20 Diffusion of Fission Fragment Nuclides in Granite  
..... WEN Rui-yan, GAO Hong-cheng, WANG Xiang-yun, LIU Yuan-fang(255)
- 3.21 The Migration Behavior of  $^{99}\text{Tc}$  in Natural Single Fracture Granite Media  
..... SU Rui, WANG Ju, LI Chun-jiang, GAO Hong-cheng(262)
- 3.22 Use of Inorganic Sorbents as Backfill Material for Underground Repositories  
..... XU Guo-qing, GU Qi-fang, DU Zhi-chao, FAN Xuan-lin(272)
- 3.23 Nuclide Migration Experiment in Simulated HLW Repository Condition with  
RADMIG Device ..... LIU Jin-hong, JIANG Gui-lin, XU Guo-qing(281)
- 3.24 Sorption of Radionuclides Technetium and Iodine on Minerals  
..... ZHUANG Hui-e, ZENG Ji-shu, ZHU Lan-ying(286)
- 3.25 A Kinetic Study of the Reduction of Plutonium with Humic Acid  
..... TAN Jian-xin, CHEN Yao-zhong, LIN Zhang-ji(292)
- 3.26 A Kinetic Study of the Reduction of  $\text{Np(VI)}$  with Humic Acid  
..... CHEN Yao-zhong, TAN Bing-mei, LIN Zhang-ji(297)

- 3.27 Solubility Studies of Np (V) in Simulated Underground Water  
 ..... ZHANG Ying-jie, REN Li-hong, JIAO Hai-yang, (302)  
 YAO Jun, SU Xi-guang, FAN Xian-hua

## 4 缓冲/回填材料研究

- 4.1 高放废物地质处置库缓冲/回填材料性能测定  
 ..... 刘月妙 徐国庆 刘淑芬(311)
- 4.2 膨润土矿床筛选  
 ... 徐国庆 李永利 顾绮芳 王文广 杜志超 李 军 杨贵生 肖湘萍(318)
- 4.3 我国高放废物处置库缓冲/回填材料压实膨胀特性研究  
 ..... 刘月妙 徐国庆 刘淑芬 陈璋如(329)
- 4.4 膨润土在高放废物处置工程中的应用 ... 刘月妙 徐国庆 陈璋如 刘淑芬(334)
- 4.5 高放废物处置回填材料筛选研究 ..... 赵 欣 章英杰 魏连生 林漳基(340)
- 4.6 膨润土的热力学性能及其在高放废物处置中的应用研究  
 ..... 王承祖 李廷君 彭继宁 李国鼎 沈珍瑶(348)
- 4.7 高压实膨润土热湿力耦合宏观效应实验室模拟  
 ..... 沈珍瑶 李国鼎 李书绅 王承祖(362)
- 4.8 高放废物处置库近场热湿力耦合初步模拟 ..... 沈珍瑶 李国鼎 李书绅(370)

## 5 安全评价

- 5.1 高放废物处置库系统性能评价内容及方法 ..... 杨天笑 郭永海 王 驹(379)
- 5.2 中国高放废物处置库选址中灵敏地质特征的初步确认  
 ..... 陈伟明 王 驹 若杉圭一郎(385)
- 5.3 北山地区地下水与花岗岩及玻璃固化体相互作用的模拟研究  
 ..... 周文斌 张展适(391)
- 5.4 铀矿床的天然类似物研究 ..... 陈璋如 郭起凤 赵云龙 肖 丰 张家富(399)
- 5.5 The Geochemical Behavior of Iodine-129 in Uranium Deposit  
 ..... CHEN Zhang-ru, GUO Qi-feng, ZHAO Yun-long, XIAO Feng, ZHANG Jia-fu(408)
- 5.6 Preliminary Study on Corrosion Layers of Unearthed Bronzes Relics of Xizhou  
 Dynasty, China ..... CHEN Zhang-ru, WEN Zhi-jian, FAN Guang, JIANG Gui-lin(413)
- 5.7 Uranium-Series Radionuclide and Element Migration Around the Sanerliu Granite-  
 Hosted Uranium Deposit in Southern China as a Natural Analogue for High-level  
 Radwaste Repositories ..... MIN Mao-zhong, FANG Chang-quan(420)
- 5.8 Migration of Some Elements and Radionuclides Across a Granite-Granite Contact  
 Zone: A Natural Analogue for Safe Disposal of High-Level Radwastes  
 ..... LUO Xing-zhang, MIN Mao-zhong, ZHANG Guang-hui, (439)  
 LI Xian-guo, YANG Zhe, ZHAI Li-ying, ZHU De-ling

6 地下实验室

6.1 北京地区地下实验室场地预选 ..... 徐国庆 李永利 梁秀珍 范选林 张家富 (454)  
孙文鹏 赵世勤 王志明 王文广 崔焕敏

6.2 GEN II -S 环境剂量系统的引进及消化 ..... 孙庆红 范智文(469)

7 国际进展

7.1 国际放射性废物地质处置十年进展 ..... 王 驹 张铁铃(476)

7.2 国际放射性废物管理若干发展趋势 ..... 王 驹 谢武成(481)

7.3 芬兰乏燃料地质处置研究历程及经验 ..... 王 驹(484)

7.4 美国高放废物地质处置的管理与进展 ..... 王 驹(488)

# 1 总 论

---

## 我国高放废物地质处置研究十年进展

王 驹<sup>1</sup> 郑华铃<sup>2</sup> 徐国庆<sup>1</sup> 范显华<sup>3</sup> 王承祖<sup>4</sup> 范智文<sup>5</sup>

(<sup>1</sup> 核工业北京地质研究院;<sup>2</sup> 核工业集团公司科技部;<sup>3</sup> 中国原子能科学研究院;

<sup>4</sup> 核工业北京工程设计研究院;<sup>5</sup> 中国辐射防护研究院)

**摘要** 如何安全处置高放废物是核工业可持续发展面临的挑战性问题。我国的高放废物深地质处置研究从 1985 年开始,提出的计划目标是于 2040 年前后建成我国高放废物地质处置库,处置的对象是玻璃固化块、超铀废物和部分乏燃料,处置库为竖井—坑道型,候选围岩为花岗岩,位于饱和带中。在 1991—2000 十年中,我国高放废物地质处置研究取得了进展。已确定我国高放废物最终处置走“深地质处置”,并且是“三步曲”式的技术路线,即处置库选址和场址评价—地下实验室—处置库。经过全国筛选对比,已初步选定甘肃北山地区为重点预选区,该区地处戈壁、地壳结构完整、地壳稳定、人烟稀少、地质条件和水文地质条件均有利。20 世纪 90 年代初期,开展了地下实验室的选址工作,初步选择了北京郊区 2 处地点为我国高放废物地质处置“普通地下实验室”的场址。已确定使用膨润土作为处置库的回填材料,并初步确定内蒙古高庙子膨润土为我国高放废物处置库的首选缓冲回填材料。对膨润土的矿物学、土力学、物理力学性质和热学性质进行了研究。已获得一批放射性核素(主要是 Np, Pu, Tc)在北山花岗岩和膨润土上的吸附分配比、扩散系数和弥散系数等参数,建立了低氧手套箱和模拟处置库温度、压力和氧化还原条件的小型实验装置。高放废物中的关键核素的化学行为研究也取得进展。花岗岩接触带核素迁移、铀矿床中超铀元素迁移、青铜器腐蚀等天然类比研究取得了成果。还开展了高放废物地质处置系统总性能评价源项和生物圈模式的调研。概念设计研究仅在 90 年代初开展了部分研究。1999 年起与国际原子能机构开展了选址和场址评价技术合作项目,极大地提高了我们的技术水平。1991—2000 年期间的科研工作为我国在 21 世纪完成高放废物地质处置奠定了一定基础。

**关键词** 中国 高放废物 地质处置 地下实验室 场址评价



# 1 引言

像其他工业一样,核工业的生产、研究以及核技术应用也会产生废物,即核废物,或称放射性废物。按放射性水平分类,核废物可划分为低放废物、中放废物和高放废物。目前,已有较成熟的技术对低中放废物进行最终安全处置。而对于高放废物,由于其中含有毒性极大、半衰期很长的放射性核素,对它的安全处置是一个世界性难题。

对于高放废物最终处置,曾经提出“太空处置”、“深海沟处置”、“冰盖处置”、“岩石熔融处置”等方案。经过多年的研究和实践,目前普遍接受的可行方案是深地质处置,即把高放废物埋在距离地表深约 500—1 000 m 的地质体中,使之永久与人类的生存环境隔离。埋藏高放废物的地下工程即称为高放废物处置库。

高放废物处置库采用的是“多重屏障系统”设计。即把废物(乏燃料或玻璃固化块)贮存在废物罐中、外面包裹缓冲材料,再向外为围岩(花岗岩、凝灰岩、岩盐等)。一般把废物体、废物罐和缓冲回填材料称为工程屏障,把周围的地质体称为天然屏障。考虑到处置库中的废物是毒性大,半衰期长的废物,因而要求处置库的寿命至少要达到 1 万年。这一要求是目前任何工程所没有的。因而,处置库的选址、建造、性能评价就极为复杂。

经过西方一些国家二十多年的工作,已逐步明确建造地下实验室是开发最终处置库必不可少的关键步骤。因此世界各国在地下实验室方面正在进行大量研究,已经有许多地下实验室正在运行,如瑞典的 Aspö,比利时的 Mol,加拿大的 Whiteshell URL,瑞士的 Grimsel 和 Mont Terri,日本的 Kamaishi(釜石)和 Tono(东浓)。法国正在巴黎盆地东部建造 Meuse/Haute Marne 地下实验室,日本还在筹建瑞浪(Mizunami)地下实验室和幌延(Honorable)地下实验室。

各国根据地质条件的不同选择了不同岩性的天然屏障,如瑞典、法国、加拿大和瑞士的处置库准备建在花岗岩之中,德国的建在岩盐之中,美国的建在凝灰岩之中。比利时由于国土狭小,处置库只能选在粘土岩之中。

目前处置库的选址和场址评价工作进展较快的是美国和芬兰。美国已选定内华达州的尤卡山场址,并已完成场址评价工作。美国总统布什已于 2002 年 7 月批准该场址,预计将于 2010 年建成处置库。芬兰议会于 2001 年 5 月批准 Olkiluoto 核电站附近的一处花岗岩为处置库场址,目前正在开展详细的场址评价工作,预计将于 2020 年建成处置库。

各国在进行选址、场址评价和地下实验室研究的同时还开展了大量的基础研究和开发工作,包括处置库设计、性能评价、核素迁移的实验室研究和现场实验、工程屏障研究等。

## 2 高放废物深地质处置计划和技术路线

### 2.1 处置计划

1985 年 9 月前核工业总公司科技核电局提出了“中国高放废物深地质处置研究发展计划”(即 DGD 计划)。该计划分四个阶段,即技术准备阶段、地质研究阶段、现场试验阶段和处置库建造阶段。该计划以高放玻璃固化体和超铀废物以及少量重水堆乏燃料为处置对象,以花岗岩为

处置介质,采用深地质处置技术路线,目标是在 2030—2040 年左右建成一座国家处置库。

随着近年来工作的进展,以及为适应及时、安全最终处置高放废物的需要,对该计划进行了一些修改,将工作划分为:1)选址和场址评价阶段;2)地下实验室阶段;3)现场实验和示范处置阶段;和 4)处置库建设和运行阶段。同时开展性能评价和基础研究。

1)选址和场址评价阶段(2000—2010):完成地段预选和场址初步评价,推荐出处置库场址和地下实验室场址。

2)地下实验室阶段(2011—2020):确定处置库场址,完成场址评价,完成地下实验室的可行性研究,在 2015 年左右开始建设特定场址地下实验室。同时开展处置库初步设计。

3)现场实验和示范处置阶段(2021—2030):在地下实验室开展现场实验,开展示范处置,同时完成处置库的施工图设计并开始建设处置库。

4)处置库建设和运行阶段(2031—2040):完成处置库建设,处置库投入运行。

国防科工委副主任张华祝 2003 年 12 月在斯德哥尔摩国际地质处置库大会上提出我国高放废物地质处置的目标是:在本世纪中叶,建成高放废物地质处置库。还提出把工作规划为三个阶段,即:

1)在 2015 年以前,以处置库选址和场址评价为主,通过地质调查和地质研究,掌握场址评价技术,完成地段预选,确定场址地下实验室场址;

2)在 2015—2035 年间,在选定的特定场址上建设地下实验室,开展深部地质环境的评价研究,以及现场试验研究;

3)第三阶段是在完成地下实验室研究的基础上,开始地下处置库的建设。

张华祝副主任还指出:我们的规划中,最关键的是选择合适的场址,并做好详细、充分的场址特征评价工作。

## 2.2 总体实施方案

国外经过 20 多年的研究,已积累大量经验。根据他们的经验,结合我国的实际情况,核工业北京地质研究院王驹 1999 年在提交“核设施退役和三废治理”专项课题“我国高放废物地质处置前期工程——甘肃北山预选区深部地质环境初步研究”时,初步提出我国开发高放废物地质处置库可遵循以下“三步曲”式的总体实施方案,即:

1)处置库选址和场址评价;

2)地下实验室;

3)处置库建设。

同时开展相应的基础研究。

具体的内容为:以处置库选址和场址评价为龙头,从地表调查和深钻孔勘查入手,评价场址的适宜性;在预选的处置库场址上建造地下实验室(即建造“特定场址地下实验室”),评价深部地质环境,开展现场研究和工程规模实验,进行示范处置;最终建成处置库。这一实施方案的最大优点是省时、省力和省钱,可充分吸取国外地下实验室已有的方法学研究成果,可省略建造非处置库场址地下实验室这一工程,一步跨越到建造针对处置库场址的地下实验室。这一技术路线的关键是选择合适的场址和做好详细、充分的场址特征评价工作。我们十五期间开展的高放废物地质处置研究工作,尤其是选址和场址评价工作,基本上是遵循这一总体实施方案开展的。

### 3 场址筛选和场址特性评价方法研究进展

#### 3.1 选址工作进展

选址和场址特性评价研究一直是高放废物地质处置研究工作的重点。处置库选址工作始于 1986 年,主要由核工业北京地质研究院负责。整个选址工作分为四个阶段,即全国筛选、地区筛选、地段筛选和场址筛选。在选址工作中考虑了以下因素:社会因素和自然因素,包括核工业的布局、人口、经济发展潜力、动植物资源、矿产资源、土地资源、废物运输的可行性、公众和当地政府的态度、国家环境保护法律要求、处置库建造和运行的可行性、自然地理因素(地形、地貌、气候、水文等)、地质因素(围岩类型、地壳稳定性、地震、火山、活动断层、地壳应力、大地热流)、水文地质和工程地质因素等。

自 1985 年以来,选址工作经历了 3 个阶段,即全国筛选、地区筛选和地段筛选。

(1)全国筛选(1985—1986)根据初步拟定的选址标准,在全国范围内初步筛选了五片地区,即西南地区、广东北部地区、内蒙地区、华东地区(浙皖苏交界地区)和西北地区。初步收集了各区的社会经济资料和地质资料,并进行了综合对比。由于经费等原因,这一阶段收集的資料是极为初步的。

(2)地区筛选(1986—1989)在前阶段工作的基础上,在前述五片地区中又进一步选出了 21 个地段供进一步工作。在西南地区选择了三个地段,即汉王山、中坝和汉南地区,岩性为页岩和花岗岩。在广东北部地区选择了两个地段,即佛岗花岗岩和九峰花岗岩体。在内蒙地区选择了帕尔江海子和大宝力免两个地段,围岩为花岗岩。在西北地区选择了甘肃北山地区的六个地段即头道河—下天津卫、矿区、白圆头山、前红泉、旧井、新场和饮马场北山地段,岩性为花岗岩和泥岩。后来又选出了野马泉和向阳山地段。

(3)地段筛选(1990—今)自 1990 年以来,选址工作要集中在西北地区进行。具体研究了甘肃北山及其邻区的地壳稳定性、构造格架、地震地质特征、水文地质条件和工程地质条件等,还运用地球物理测量方法和遥感地质方法研究了该区的地壳稳定性。王驹等开展了“甘肃北山预选区地壳稳定性”课题研究,完成的《我国高放废物处置库甘肃北山预选区区域地壳稳定性研究》报告 1999 年获国防科学技术二等奖,研究成果也通过“中国核科技报告”形式和地质出版社公开出版。郭永海等完成了甘肃北山水文地质特征研究课题,华东地质学院余运祥等开展了疏勒河断裂稳定性研究。

(4)这一期间还开展了我国高放废物处置库围岩的筛选研究(金远新等,1997)。综合评价后认为,我国最合适的处置库围岩为花岗岩。

(5)初步建立了我国高放废物处置库预选区地学信息库。建库所需的计算机工作站和软件是由国际原子能机构援助的。

(6)1999 年国际原子能机构批准了我国高放废物地质处置领域第一个技术合作项目——“中国高放废物处置库选址和场址特性评价研究”(项目号 CPR/9/026,期限为 1999—2001)。国际原子能机构技术官员和派遣的专家 M. Raynal, D. Virlogeux, J. F. Aranyossy 来华并赴北山考察指导选址和场址特性评价研究。专家认为北山有可能是世界上最好的处置库场址之一。2003—2005 年,核地研院继续与国际原子能机构合作,开展场址评价和处置系统安全评

价研究。

(7)翻译出版了“世界放射性废物地质处置”、“高放废物处置的若干基本原则”、“高放废物地质处置设施选址安全指南”、“放射性废物处置场水文地质调查”、“高放废物地质处置十年进展”等书籍。

初步经结果表明,甘肃北山地区是一个非常有前景的适宜最终处置高放废物的地区。从1999年开始,开展了实质性的地段筛选及相关研究工作,即在甘肃北山地区开始对三个重点地段(旧井地段、野马泉地段和向阳山地段)开展平行性评价工作,包括1:5万地质填图和钻探工作。到2004年,已完成旧井地段和野马泉地段1:5万地质填图和4口钻孔(北山1、2、3、4号孔)的钻探工作。在今后,还将开展填图和钻探工作。预计2010年最终确定候选地段,2015年左右确定最终场址。

### 3.2 场址评价工作进展

核工业北京地质研究院于1999—2001年在甘肃北山预选区旧井地段开展了场址特性初步评价研究,工作包括旧井地段462 km<sup>2</sup> 1:50 000地面地质填图、水文地质调查和地球物理调查,还首次施工了2口深钻孔,即北山1号孔和北山2号孔,开展了地质研究、水文地质实验、钻孔电视、钻孔雷达、地壳应力测量等研究,获得了深部地质环境的重要参数。

北山1号孔是我国高放废物深地质处置研究项目的第一钻,关系重大,意义深远。该孔的目的是评价旧井地段的完整性,获得深部岩石和地下水样品以及深部地质环境参数。该孔于2000年7月8日开孔,2000年10月20日终孔。终孔孔深703.08 m,岩心采取率达96%,孔斜4.5°,孔深误差0.3 m。北山1号孔的研究结果表明,该孔岩性单一,以完整的似斑状二长花岗岩为主,局部渐变为花岗伟晶岩和英云闪长岩。该孔岩性相当均一、完整,裂隙少,是一理想的候选场地。

北山2号孔是倾角为78°的斜孔,设计孔深500 m,目的是揭穿十月井断裂,获得该断裂的各种参数,为评价场址服务。北山2号孔要穿过视厚度达240 m的破碎带,这在国内,甚至是国际上也是罕见的。该孔于2000年7月26日开钻,2001年5月17日终孔,获得了从十月井断裂上盘、断裂带到下盘的完整的、珍贵的岩心样品。

通过1999—2001年的工作,首次获得甘肃北山场址的深部岩石样品、数据和资料,如钻孔电视图像和钻孔雷达图像等。初步建立了一系列场址评价的方法,包括钻探施工、岩心编录、水文实验、钻孔电视、钻孔水质测量、钻孔雷达、岩体声波测量等方法,初步验证了方法的有效性,为今后的类似工作以及制定相关作业标准提供了借鉴。此外,还积累了在干旱地区花岗岩裂隙介质中开展场址评价的宝贵经验。

## 4 地下研究实验室场址筛选及预可行性研究

1987—1995年期间,在北京郊区进行了地下实验室场址的筛选。基本设想是筛选出我国高放废物地质处置普通地下实验室的场址,在该实验室中仅作方法学实验,同时也可开展国际合作提供场地。通过对北京地区的人防工程、废旧矿山和花岗岩体的调查和综合比较,筛选出2个地下实验室场址,即昌平阳坊花岗岩和怀柔石湖峪钼矿山。分别对两个场址的地质特征、水文地质特征、岩体的岩石学、岩石化学、岩石力学、核素吸附扩散的特征进行了研究。后