

doi: 10.11720/wtyht.2024.1556

王驹, 云龙. 高放废物地质处置地下实验室的定义、分类和功能以及我国北山下实验室的科研规划[J]. 物探与化探, 2024, 48(6): 1507-1518. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1556>Wang J, Yun L. Definition, classification, and functions of underground research laboratories for the geological disposal of high-level radioactive waste and the scientific research plan of Beishan underground research laboratory[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(6): 1507-1518. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1556>

高放废物地质处置地下实验室的定义、分类和功能 以及我国北山下实验室的科研规划

王驹^{1,2}, 云龙^{1,2}

(1. 国家原子能结构高放废物地质处置创新中心, 北京 100029; 2. 核工业北京地质研究院, 北京 100029)

摘要: 高放废物地质处置地下实验室是验证潜在处置库场址安全性和适宜性, 以及开发处置技术的关键设施, 其在潜在处置库的选址和系统设计、处置工程理论与技术研发、安全与特性评价、全尺度现场试验和现场示范等方面都起到了不可替代的作用。本文着重介绍了地下实验室的定义、分类和功能, 并对国内外已有的主要地下实验室进行了归类, 即地下实验室一般可分为普通地下实验室(第一代)和特定场址地下实验室(第二代)。随着我国处置库选址工作从全国筛选、区域筛选、地段筛选, 进入到场址筛选及评价、地下实验室建设阶段, 在总结国内外主要经验的基础上, 我们于2010年和2014年分别提出了“特定场址地下实验室”和“第三代地下实验室”的概念, 并建立了首座高放废物地质处置地下实验室“北山地下实验室”, 也是世界上第一座特定场区地下实验室。笔者对该实验室的选址历程、规划、定位和功能, 以及在建设过程中主要科研试验内容的功能和主要开展的现场试验进行了介绍, 为下一步的处置库的选址和研发提供指导意见。

关键词: 高放废物; 地下实验室; 定于与分类; 特定场区地下实验室; 北山地下实验室

中图分类号: O319.56

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2024)06-1507-12

0 引言

深地质处置是国际上普遍认可的永久处置高水平放射性废物(高放废物)的方法, 其核心是将高放废物置于一定深部的处置库中, 保证其在万年甚至十万年尺度与人类和环境安全隔离。为了采用最佳技术和工程设计来实现处置库的长期安全, 其研发和建设过程一般需要几十年的时间, 且在其开发过程中, 必须向所有政府、公众等利益相关机构证明处置系统的可行性、安全性和适当性, 然后才能推动整个研发过程。而地下实验室为解决以上问题提供了一个良好的平台。在证明处置安全性、获取现场地质信息、验证建设可行性等领域, 地下实验室都起到

了不可替代的作用^[1-3]。近几年, 随着世界上多个国家地下实验室和处置库项目的持续推进, 以及我国北山地下实验室的开工建设, 高放废物处置领域又有了新的发展, 一些新的概念被相继提出。本文从地下实验室的定义、功能和基本分类等角度对国内外已有地下实验室进行归类, 在此基础上, 重点对我国首座高放废物地下实验室、国际上首座特定场址地下实验室——北山地下实验室的选址历程、定位和功能及研究内容进行介绍。

1 高放废物地下实验室的定义与分类

从高放废物深地质处置概念提出以来, 地下实验室作为验证潜在处置库场址安全性和适宜性的关

收稿日期: 2023-12-21; 修回日期: 2024-07-25

基金项目: 中国国家原子能机构放射性废物处置项目“地下实验室深部地质环境研究”(FZ2101)

第一作者: 王驹(1964-), 男, 博士, 博士生导师, 1984年毕业于南京大学地质学系放射性地质矿产专业, 现任中核集团放射性废物处置领域首席专家、北山地下实验室建设工程总设计师, 长期从事高放废物地质处置技术研究工作。Email: wangju9818@163.com

键设施,其重要性就越来越受到重视。它起到了处置库选址和系统设计、处置工程理论与技术研发、安全与特性评价、全尺度现场试验和现场示范等作用^[4]。

1.1 地下实验室的定义与内涵

高放废物地质处置地下实验室(underground research laboratories,URLs)是指建造于一定深度、用于开发和验证高放废物地质处置技术、在一定情况下用于评价场址适宜性的地下研究设施。地下实验室建成后,将成为处置库研究开发、验证实验、研发处置设备的中心^[1-7]。

地下实验室可以是一个专门建造的设施,在其中进行长期的大型试验研究;也可以是一个相对简单的设施,与现有的地下设施,如公路隧道、水力隧道相连。其围岩应与潜在处置库的围岩相同,包括花岗岩、盐岩、黏土岩、页岩和凝灰岩。其建设深度从地下几百到一公里,也可以建在更浅的位置^[2,8]。

地下实验室为研究处置围岩和工程屏障的水文、热、机械、化学和生物特性及其耦合过程提供了一个平台,此外,还可以研发处置概念、开发处置库建设、运行和关闭所需的相关技术工艺,验证工程屏障和监测系统的长期性能^[9]。而最重要的,地下实验室将提供直接进入未来实际处置相同或类似环境的途径。建成后,地下实验室将成为未来处置库开发相关的专门处置技术和论证适宜性的关键设施,也将为国际合作项目提供重要的平台^[2,4]。

1.2 地下实验室的功能和基本分类

地下实验室主要依据设施的功能与结构、研发阶段或目的等进行分类(图1)。NEA提出地下实验室可分为两大类^[2],即普通地下实验室(generic URLs)和特定场址地下实验室(site-specific URLs),也被称为第一代和第二代地下实验室。2010年,为推进中国首座高放废物地质处置地下实验室的建设,我们提出了“特定场区地下实验室”的概念,也被称为“第三代地下实验室”^[8-12]。

1) 普通地下实验室(generic URLs,第一代)

该类地下实验室的位置并非处于潜在处置库场址位置,而是用于一般研究和试验目的而开发的设施,为在其他位置处置高放废物提供技术支撑。因此,这类设施的要求相对简单,国外往往将废弃的矿山、隧洞等作为普通地下实验室使用。

总的来说,普通地下实验室在处置库的选址阶段非常有用。开发的核心目标包括3方面:获取场址特征和地下实验室的建造技术与经验;为现场模



图1 地下实验室类型划分及功能概述

(据 Blechschmidt 等^[13]修改)

Fig.1 Overview of URL types and their characteristics

(modified from Blechschmidt, et al.^[13])

拟实验室提供场所;验证潜在处置库的选址技术和方法。因此,这类实验室与潜在处置库的位置并不相同,也不要求其建在潜在处置围岩中。

一般来讲,建设地下工程需要投入大量的资金,并要进行后期的维护,以确保安全运行。因此,将已有的矿山或隧道进行二次开发和利用,转变为普通地下实验室成为许多国家的选择。使用现有矿山或隧道有以下优点:①可以充分利用原有矿山或隧道的维护和安全基础设施;②与新建地下实验室相比,更易获得扩建现有矿山或隧道的规划许可,并节省了大量建设成本。而这类设施的缺点是围岩内先存结构往往不能很好地符合最终处置库的条件,因此也决定了其只适合处置库研发的早期阶段。我们可以称这类建于原有矿山或隧道的普通地下实验室为1.0版本(图2),表1列出了已运行的该类实验室的运行机构、围岩类型和运行时间等信息。

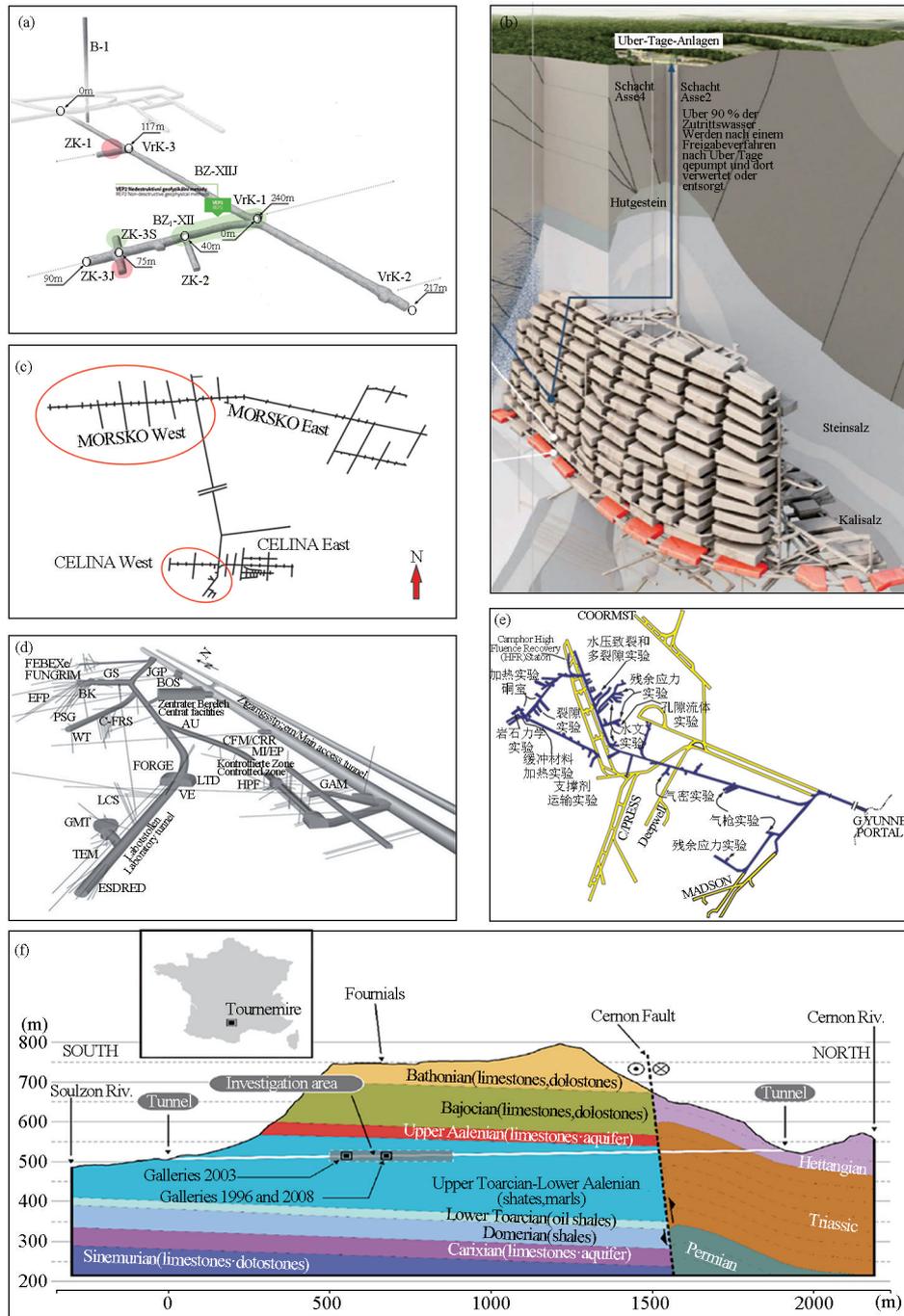
为了解决以上问题,在与潜在处置库类似的地质环境中建立的普通地下实验室可称为1.1版本。相比1.0版本,1.1版本的普通地下实验室在获取施工前的非扰动数据,优化处置库的设计、挖掘和施工技术,以及提高地下设施的整体运行水平等方面更具优势,其建设过程中还可以有效地将地表调查数据与地下工程开挖过程中获得的数据进行联合分析。此外,这类地下实验室也提供了一个良好的沟通渠道,便于公众访问、建立公众信任,以利于处置库项目的推进。而代价就是这类专门建造的普通地

下实验室需要大量的开挖、建设和运行的成本投入(图3)。各国在运行的该类地下实验室详细情况见表2。

2) 特定场址地下实验室 (site-specific URLs, 第二代)

特定场址地下实验室是前期场址特征评价工作的延续, 当前期的选址工作基本结束, 并确定了未来

处置库的场址后, 在完成场址的地表调查, 需要直接进入地下获得处置围岩的相关信息, 开发挖掘技术, 优化概念模型等时, 就可以考虑建设特定场址地下实验室^[2]。因此, 特定场址地下实验室是建设在潜在处置库场址或场址附近的实验设施, 是场址开发成为最终处置库的关键过渡设施。这类地下实验室的核心作用是场址特性评价和最终处置库确认。



a—Bukov Underground Research Facility, URF^[14] (捷克); b—Asse II mine^[15] (德国); c—Josef Regional Underground Research Center, URC^[16] (捷克); d—Grimsel Test Site, GTS^[13] (瑞士); e—G-Tunnel^[17] (美国); f—Toumemire Research Tunnel^[18] (法国)

图2 利用原有矿山或隧道扩建的普通地下实验室(1.0版)示意
Fig.2 General URLs (version 1.0) using existing mines or tunnels

表 1 普通地下实验室(1.0 版)介绍
Table 1 Overview of general URLs (version 1.0) introduction

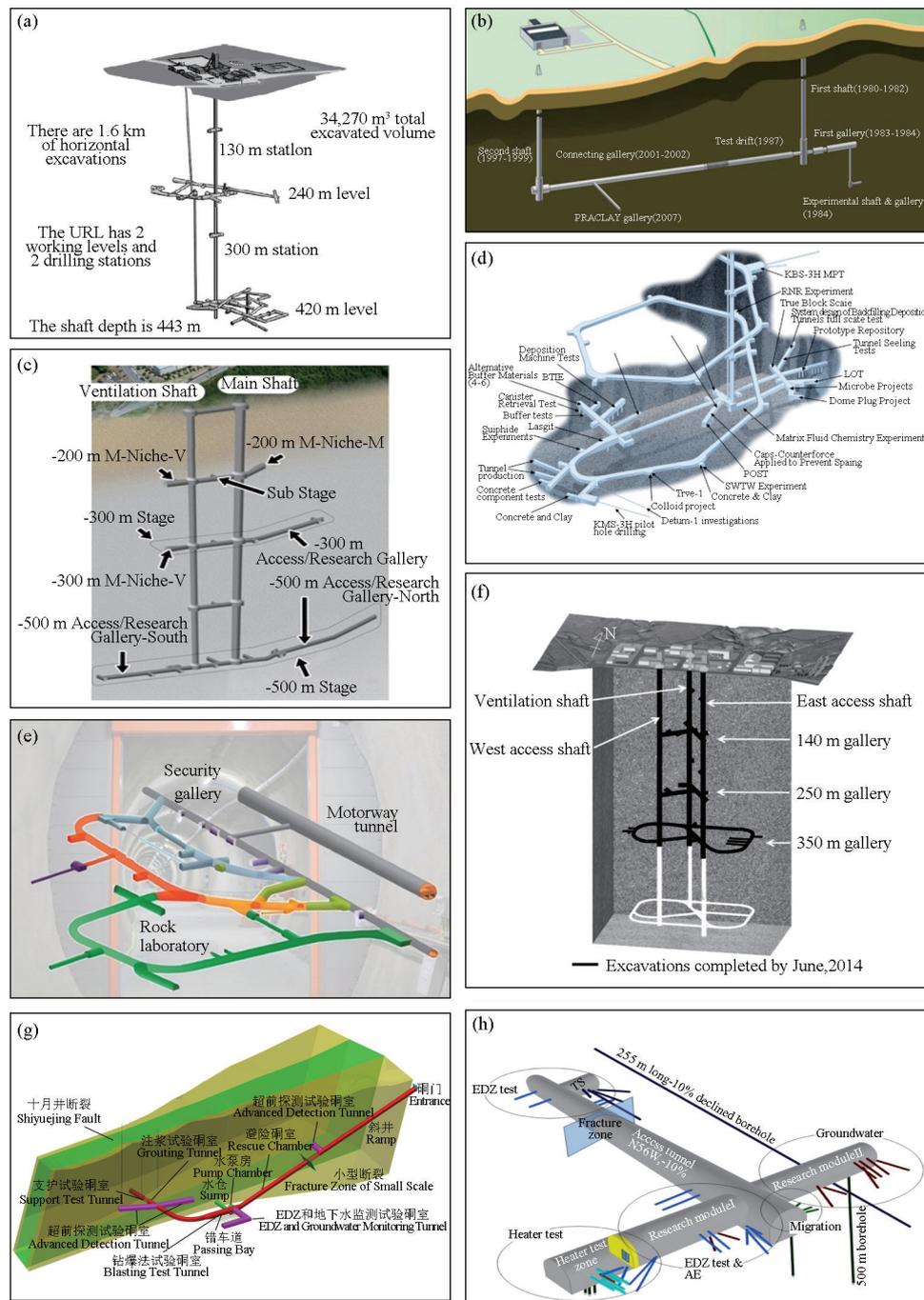
序号	名称	国家与运行机构	运行时间	围岩与深度/m	参考文献
1	Bukov Underground Research Facility (URF)	捷克,捷克放射性废物贮存管理局 (Radioactive Waste Repository Authority, SÚRAO)	2013~至今	结晶岩/花岗岩,550~1200	[14]
2	Josef Regional Underground Research Center (URC)	捷克,捷克技术大学 (Czech Technical University)	2007~至今	凝灰岩和花岗闪长岩, <200	[16]
3	Amelie	法国,国家放射性废物管理机构 (French National Radioactive Waste Management Agency, Andra)	1979~1990	盐岩, >300	[13]
4	Fanay-Augerès underground laboratory	法国,辐射防护与核安全研究所 (Institute for Radiation Protection and Nuclear Safety, IRSN)	1980~1990	花岗岩	[19]
5	Tournemire Research Tunnel	法国,辐射防护与核安全研究所 (Institute for Radiation Protection and Nuclear Safety, IRSN)	1989~至今	黏土岩,200~250	[18]
6	Asse II mine	德国,联邦辐射防护局 (Bundesamt für Strahlenschutz, BFS)/联邦企业监事会 (Bundes-Gesellschaft für Endlagerung mbH, BGE)	1965~1995	盐岩, 490~800 m 水平巷道, 950 m 的硐室	[15,20]
7	Tono	日本,日本原子能机构 (Japan Atomic Energy Agency, JAEA)	1986~2006	沉积岩,130	[13]
8	Kamaishi		1988~1998	花岗岩	[13]
9	Stripa mine	瑞典,瑞典核燃料和废料管理公司 (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB)	1976~1992	花岗岩,360~410	[17]
10	Climax Spent Fuel Test Facility, Nevada	美国,美国能源部 (U.S. Department of Energy, DOE)	1978~1983	花岗岩,420	[21]
11	G-Tunnel, Nevada		1979~1990	凝灰岩,300	[22]
12	Grimmel Test Site (GTS)	瑞士,瑞士国家放射性废物处置合作公司 (National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, Nagra)	1984~至今	花岗岩,450	[13]

与普通地下实验室相比,特定场址地下实验室的优点是其实验和运行环境与潜在处置库相似或相同,且其设施将成为未来处置库的组成部分。这就使得一方面,可以扩大实验室的研究、开发和示范 (RD&D) 范围,开展真实处置环境的现场试验;另一方面,实验室建设期完成后,现场设施可以在处置库阶段继续投入使用,包括地面建筑、安全设施及公用交通、水电和通讯设施等,这样可以有效地节约后期处置库建设成本。当然,相对上述优点,特定场址地下实验室在建设和后期的现场实验过程中也存在局限,因为地下实验室的建设和正常运行不能危及未来处置库的系统安全,也要减少对围岩屏障体系的破坏。如在地下实验室设计过程中,要考虑未来处置深度及处置巷道的可扩展性;现场调查阶段,应当避免大量的钻孔施工等^[2,4,16]。

各国在这类地下实验室的开发过程中都各具自

特点,或说是各为了某一特定目标而开发。如美国新墨西哥州的“废物隔离中间设施 WIPP” (waste isolation pilot plant) 充分利用了前期的工程设施,该实验室位于层状盐岩之下 (图 4e),20 世纪 70 年代中期确定了该实验室的场址,1981 年开工建设,1984~1990 年期间进行了几次大规模地下试验,1999 年开始处置超铀废物^[32]。

而芬兰的 ONKALO 地下实验室实质上起着“场址特性评价”的作用。由于 POSIVA 已经获得芬兰政府将 ONKALO 地下实验室作为最终处置库的许可,因此该地下实验室的主要工作已转为长期性能监测和处置设施安全的论证,如开展围岩的适宜性评价研究,进行 1:1 尺度原位实验,测试处置过程中使用的技术、组织和程序等,从而为在 2023~2024 年进行最终处置的试运行建立试验区。该实验室也将作为最终处置库的一部分^[16,33]。



a—Whiteshell Underground Research Laboratory^[23] (加拿大); b—High-Activity Disposal Experiment Site, HADES^[24] (比利时); c—Mizunami Underground Research Laboratory, MIU^[25] (日本); d—Äspö Hard Rock Laboratory, HRL^[26] (瑞典); e—Mont. Terri Rock Laboratory^[27] (瑞士); f—Horonobe Underground Research Center^[28] (日本); g—北山坑探设施^[29] (中国); h—KAERI Underground Research Tunnel, KURT^[30] (韩国)

图 3 新建的普通地下实验室(1.1 版)示意

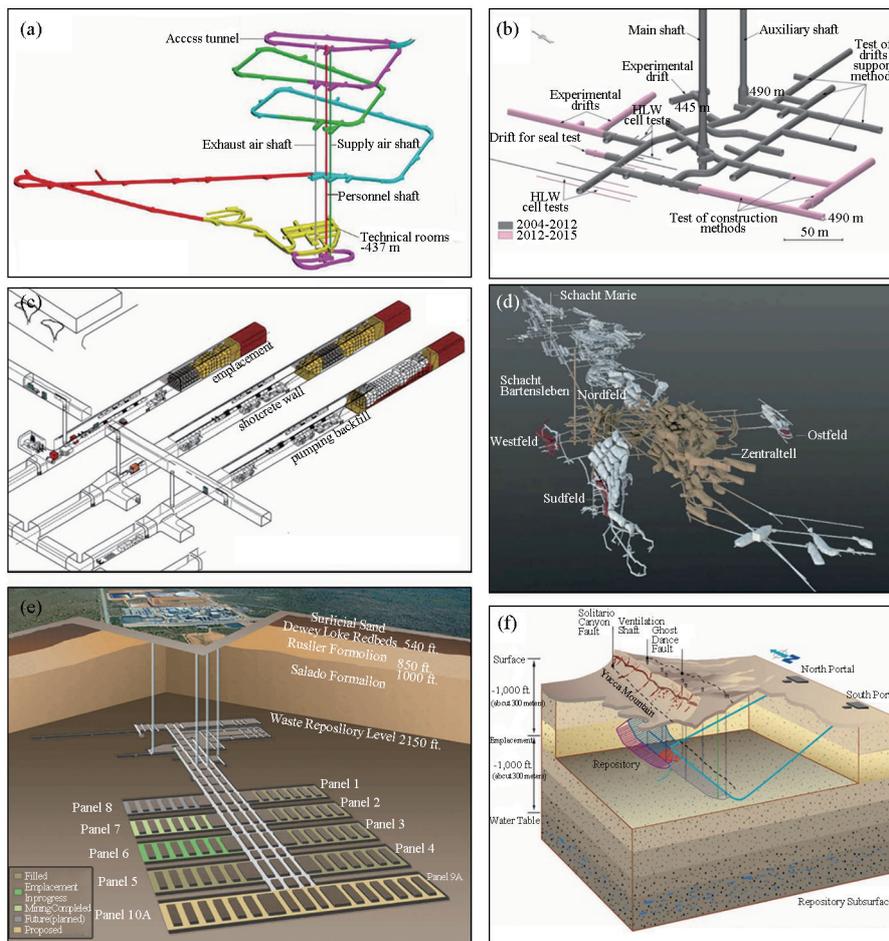
Fig.3 New constructed general URLs (version 1.1)

比较特殊的是德国的 Konrad 地下实验室, 一般来讲, 利用现有的地下设施(如隧道或废弃的矿井)的, 通常会作为普通地下实验室来使用, 而不作为特定场址的地下实验室。德国的 Konrad 铁矿一直到 20 世纪 70 年代还在开采矿石, 铁矿开采停止后, 该

矿作为地下实验室进行研发, 以评估将该矿用于处置低、中水平放射性废物的可能性。在研究取得积极成果后, 该矿获得申请许可后, 改为处置设施, 预计将于 2027 年开始处置业务^[34]。各国特定场址地下实验室情况如表 3 所示。

表2 普通地下实验室(1.1版)介绍
Table 2 Overview of new constructed generic URLs (version 1.1)

序号	名称	国家与运行机构	运行时间	围岩与深度/m	参考文献
1	Whiteshell Underground Research Laboratory	加拿大,加拿大原子能机构(Atomic Energy of Canada, AECL)	1963~1985	花岗岩, 240~420	[23]
2	High-Activity Disposal Experiment Site URL, Mol (HADES)	比利时,比利时国家放射性废物和浓缩裂变材料机构(Belgian National Agency for Radioactive Waste and Enriched Fissile Material)	1984~至今	黏土岩, 225	[24]
3	Mizunami Underground Research Laboratory (MIU)	日本,日本原子能机构(Japan Atomic Energy Agency, JAEA)	2004~至今	花岗岩, 500, 1000	[25]
4	Horonobe Underground Research Center	日本,日本原子能机构(Japan Atomic Energy Agency, JAEA)	2000~至今	沉积岩, 1000	[28]
5	北山坑探设施(Beishan Exploration Tunnel, Bet)	中国,核工业北京地质研究院(BRIUG, CNNC)	2015~至今	花岗岩, 50	[29]
6	KAERI Underground Research Tunnel (KURT)	韩国,韩国原子能研究所(Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI)	2006~至今	花岗岩, 90	[31]
7	Äspö Hard Rock Laboratory (HRL)	瑞典,瑞典放射性废物管理公司(Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB)	1995~至今	花岗岩, 200~460	[26]
8	Mont. Terri Rock Laboratory	瑞士,瑞士国家放射性废物处置合作公司(National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, Nagra)	1995~至今	黏土岩, 400	[27]
9	Busted Butte, Yucca Mountain, Nevada	美国,美国能源部(Department of Energy, DOE)	1987~2011	凝灰岩, 420	[30]



a—ONKALO Underground Rock Characterisation Facility, URCF^[29] (芬兰); b—Meuse-Haute-Marne Research Centre^[31] (法国); c—Konrad Repository site^[27] (德国); d—Morsleben Repository, ERAM^[30] (德国); e—Waste Isolation Pilot Plant, WIPP^[32] (美国); f—Exploratory Studies Facility (ESF), Yucca Mountain^[35] (美国)

图4 国外主要特定场址地下实验室示意
Fig.4 Schematic of major site-specific URLs abroad

表3 特定场址地下实验室
Table 3 Overview of Area-specific URLs

序号	名称	国家与运行机构	运行时间	围岩与深度/m	参考文献
1	ONKALO Underground Rock Characterisation Facility	芬兰, Posiva OY	2003 年至今	石英闪长岩, 500	[35]
2	Meuse-Haute-Marne Research Centre	法国, 法国国家放射性废物管理机构 (French national radioactive waste management agency, ANDRA)	2000 年至今	页岩(黏土岩), 450~500	[36]
3	Gorleben Site	德国, 联邦辐射防护局(Bundesamt für Strahlenschutz, BFS)/联邦企业监事会	1985~1990 年, 2010 年	盐岩(盐丘), >900	[33]
4	Konrad	(Bundes-Gesellschaft für Endlagerung	1980 年至今	灰岩, 800~1300	[34]
5	Morsleben Repository (ERAM)	mbH, BGE)	1981~1998 年	盐岩(盐丘), >525	[37]
6	Waste isolation pilot plant (WIPP)	美国, 美国能源部(Department of Energy ,DOE)	1982~1999 年	盐岩(盐床), >655	[32]
7	Exploratory studies facility (ESF), Yucca Mountain, Nevada		1996~2010 年	凝灰岩, 300	[38]

3) 特定场区地下实验室 (Area-specific URL, 第三代)

第三代地下实验室, 即特定场区地下实验室 (area-specific URL), 是为推进我国首座地下实验室的建设而提出来的, 它是指建设在高放废物处置库重点预选区有代表性的围岩中的, 起着场址评价、处置技术研发, 具有扩展功能 (有可能扩展成为处置库) 的地下研究设施。该实验室既起普通地下实验室的作用, 又可起着潜在的“特定场址地下实验室”的作用, 对推动高放废物处置库的选址落地具有十分重要的意义^[8-11]。

特定场区地下实验室的建设, 既取决于是否已经确定处置库场址, 又不完全取决于处置库场址。它包含两层意思: 前者是指, 只要处置库场址已经大体确定, 则可确定地下实验室场址; 而后者是指, 即使处置库场址没有确定, 只要处置库的预选区已经大体确定, 则可以选择地下实验室的场址。进一步理解为, 只要地下实验室场址的地质、水文地质、工程地质和深部地质环境等条件具有代表性, 且与未来潜在的处置库场址相似, 则可以确定地下实验室场址。

由于这类地下实验室只是一个特定的研究设施, 与未来处置库没有十分紧密的联系, 因此, 场址获得审批就相对简单和容易。另外, 特定场区地下实验室还具有一个潜在的巨大作用, 即通过在这类地下实验室中开展实验和场址评价工作, 在确认该

类场址适宜作为处置库场址后, 有可能大大加快处置库选址的进程。

因此, 我国首座高放废物地质处置地下实验室的总体定位可以是建设在特定场区 (处置库重点预选区) 有代表性的岩石之中、位于 500 m 深度左右、功能较为完备且具有扩展功能的, 为高放废物地质处置研究开发服务和场址评价服务的、具有国际先进水平的科研设施和平台。

Blechsmidt 等^[13]在评论我们提出的“第三代地下实验室”时指出, 第三代地下实验室应当包含两层含义: 由第二代地下实验室 (特定场址型) 演化而来; 有可能成为未来处置库的组成部分, 但在处置库关闭后, 其仍然保持开放, 其主要作用是验证工程屏障的阻滞效果和处置库运行的安全性 (见表 4)。

总的来说, 从表 1~表 4 统计结果来看, 29 个地下实验室中包括了 21 个普通地下实验室 (第一代)、7 个特点场址地下实验室 (第二代) 和 1 个特定场区地下实验室 (第三代)。其中, 第一代中有 12 是在利用已有地下工程或在原有基础上部分扩建的 (1.0 版), 9 个是新建的 (1.1 版)。而特定场址地下实验室中, 只有芬兰的 ONKALO 地下实验室已经获得许可, 将在不久的将来扩建为处置库。在围岩类型方面, 有 13 个实验室在结晶岩中, 5 个在蒸发岩中, 6 个在泥质岩中, 5 个在其他岩石类型, 如火山凝灰岩或泥质岩石以外的沉积岩中。

表4 特定场区地下实验室
Table 4 Overview of area-specific URLs

序号	名称	国家与运行机构	运行时间	围岩与深度/m
1	北山下实验室 (Beishan Underground Research Laboratory, Beishan URL)	中国, 核工业北京地质研究院 (BRIUG, CNNC)	在建	花岗岩, 280 和 560m 两个实验室水平

2 我国高放废物地质处置北山地下实验室

北山地下实验室场址位于甘肃河西走廊北侧的北山南缘,距酒泉市和玉门市直线距离分别为 150

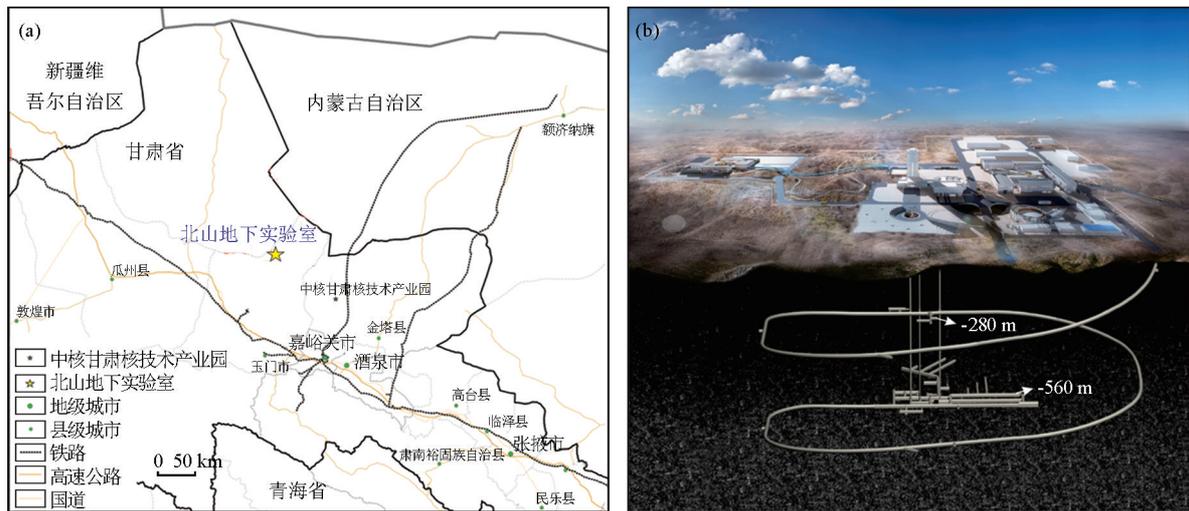


图 5 北山地下实验室位置 (a) 和实验室总体布局设计示意 (b)

Fig.5 The Location (a) and design (b) of Beishan URL

地下实验室采取三竖井(人员竖井、通风井和入风井)+螺旋斜坡道的设计,分别包括-280 m 和-560 m 两个试验水平。斜坡道全长约 7.0 km,断面为圆形,直径 7.03 m;水平转弯半径 255 m,竖曲线转弯半径为 380 m;最大坡度 10%,平均坡度 9%。斜坡道采用全断面隧道掘进机(TBM)开挖,是目前世界上第一条采用 TBM 开挖的螺旋斜坡道(图 5b)。

2.1 地下实验室的选址历程和规划

地下实验室的选址是在我国高放废物地质处置库选址的基础上进行的。我国高放废物处置库的选址工作始于 1985 年。依据 2013 年颁布的 HAD 401/06—2013《核安全导则》,选址过程可分为 4 个阶段,包括全国筛选、区域筛选、地段筛选和场地确认^[37-40]。具体如下:

1) 全国筛选(1985~1986 年)。参考 HAD 401/06—2013 标准,全国有 6 个地区被选为潜在区域,包括中国西南地区、中国东部地区、内蒙古地区、中国南方地区、中国西北地区 and 新疆地区。

2) 区域筛选(1986~1989 年)。根据前一阶段的调查结果,进一步调查确定了 21 个候选地区。在中国西北地区,甘肃省北山地区被认为是最具潜力的地区。

3) 地段筛选(1990 年至今)。自 1990 年以来,主要工作集中在甘肃北山地区。但自 2011 年后,也

km 和 80 km,行政区划隶属甘肃省肃北县(图 5a)。场址所在地区为低山丘陵地形,海拔一般为 1 700~1 800 m,属半沙漠大陆性气候。场址围岩主体岩性为形成于印支期的片麻状花岗闪长岩和英云闪长岩等,岩体面积约 94 km²,厚度达 2 000 m。

在新疆和内蒙古进行了花岗岩侵入体钻探,以寻找合适的地点,与北山场址进行比选。

由于我国首座地下实验室早在 2010 就被规划为特定场区型地下实验室。以此为指导,在随后的选址工作中,综合分析对比了甘肃北山、内蒙古、新疆预选区这 3 大预选区中 9 个预选场址(旧井西、新场、沙枣园、算井子、雅满苏、天湖东、阿奇山 1 号、塔木素、诺日公)的地质条件、未来自然变化、水文地质条件、人类活动、建造和工程条件、环境保护、土地利用、社会经济和人文条件等场址条件和特征,先筛选出新场、沙枣园、诺日公和雅满苏 4 个场址。在获得当地政府同意的基础上,经国家层面专家评审会的评审,最终确定甘肃北山新场为我国首座高放废物地质处置地下实验室场址。以新场场址为基础,完成了地下实验室的工程设计。2021 年 6 月地下实验室正式开工建设^[40]。

2.2 北山地下实验室的定位和功能

北山地下实验室为第三代地下实验室,其总体定位如前所述,是建设在特定场区(处置库重点预选区)有代表性的岩石之中、位于 560 m 深度左右、功能较为完备且具有扩展功能的,为高放废物地质处置研究开发服务和场址评价服务的、具有国际先进水平的科研设施和平台。其基本功能包括:评价场址深部环境,开展 1:1 工程尺度验证实验,开发处置库施工、建造、回填和封闭技术,全面掌握处置技

术,为地下现场实验提供深部实验巷道、水、电、通风、通讯、安全和应急等后勤保障,为公众参观地下实验室提供窗口等。它既起普通地下实验室的作用,又可起着潜在的“特定场址地下实验室”的作用^[8-11]。

根据研究开发的需要,在现场开展的试验分为如下3类:①现场获取相关数据的试验,包括深部环境地质条件参数测量、围岩物理和化学特征参数测量、围岩岩石力学特征和岩体稳定性参数测量、地下水流动和物质(包括核素、胶体、气体、腐殖酸等)运移参数测量等,为处置库场址性能评价和安全评价提供技术参数;②相关技术开发和验证试验,包括处置库选址和评价技术开发与验证、安全评价技术开发与验证、处置库建造技术开发与验证、处置库运行技术开发与验证、现场长期监测技术开发与验证等;③原型处置或示范处置试验。包括开展1:1工程尺度的现场实验,在真实的深部地质环境中考验工程

屏障,如放射性废物体、废物罐及缓冲回填材料等的性能,为未来实施真正的处置作业提供经验。

2.3 北山地下实验室建设中开展的科研内容

地下实验室现场试验分为5大研究领域,包括处置库场址评价及其评价技术研发、工程技术研发、核素迁移研究、安全评价技术研发和高放废物地质处置数据与信息管理系统研发。研发阶段可分为工程建设前、工程建设、初期研究、中长期研究和远期研究等5个阶段。对应配套了5大类科研项目,涉及了地下实验室场址深部地质环境、水文地质特征、深部围岩力学特征和长期稳定性评价、环境监测、深部岩体开挖关键技术、处置坑机械开挖设备研制、示范处置巷硐结构布置及处置概念、缓冲材料原位试验安装技术和核素释出和迁移行为等多个方向的研究。现场试验位置和研究内容分别见图6和表5^[40]。

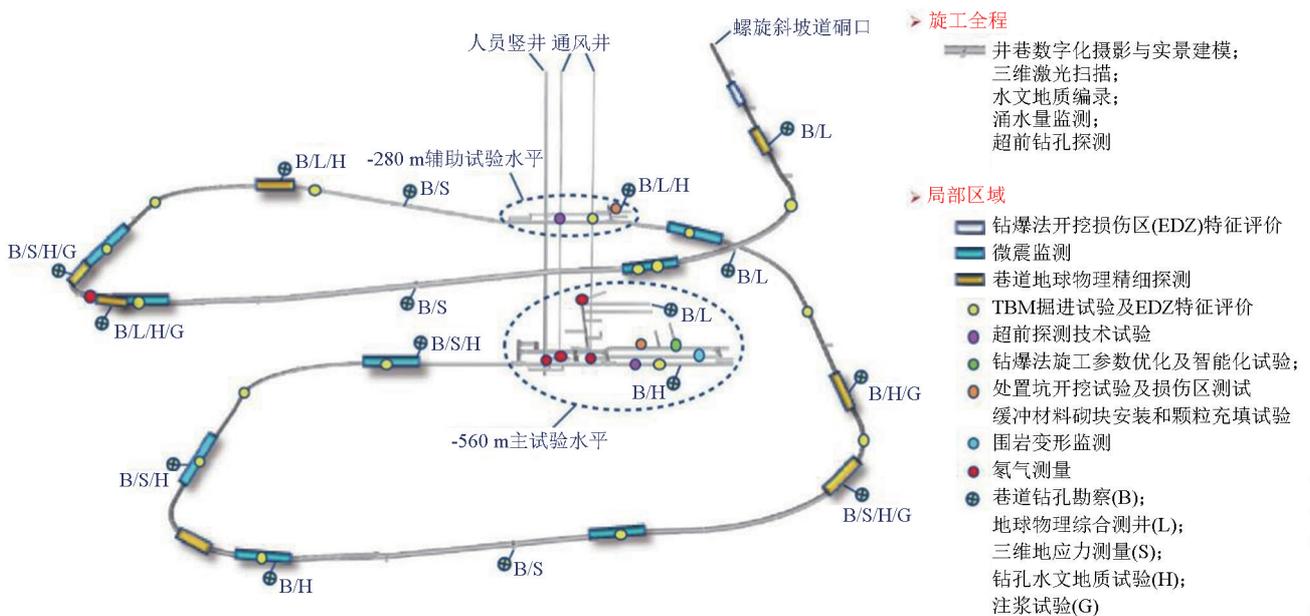


图6 地下实验室建设过程中现场试验规划示意

Fig.6 Schematic illustration of the planning of in-situ tests during URL construction

3 结论与展望

深地质处置是国际上普遍认可的高放废物永久安全处置方法。地下实验室是验证潜在处置库场址安全性和适宜性的关键设施,对推进处置库的选址和系统设计、处置工程理论与技术研发、安全评价、全尺度现场试验和现场示范等方面起着不可替代的作用。高放废物处置地下实验室一般可以分为两

类,即普通地下实验室(第一代)和特定场址地下实验室(第二代)。为推进我国首座高放废物地质处置地下实验室的建设,我们首次提出了“特定场区地下实验室”即“第三代地下实验室”的概念。这一概念得到了国内外的广泛认可,并在北山地下实验室的建设中付诸实施。

我国首座地下实验室的总体定位是:建设在特定场区(处置库重点预选区)有代表性的岩石之中、位于500 m深度左右、功能较为完备且具有扩展功

表5 地下实验室建设过程中现场试验规划
Table 5 Planning of in-situ tests during URL construction

研究类别	研究项目	现场试验项目		
地下实验室 场址特征评价	地下实验室场址深部地质环境研究	1. 施工期全过程井巷地质编录		
		2. 巷道钻探勘察与地球物理综合测井		
		3. 巷道围岩地球物理精细探测		
	地下实验室场址水文地质特性研究	4. 全场址三维微地震监测		
		5. 跨断层与 GNSS 形变场监测		
		6. 巷道水文地质编录		
		7. 巷道钻孔水文地质试验		
		8. 钻孔与巷道水文地质监测		
	地下实验室深部围岩力学特性和长期稳定性研究	9. 开挖过程结构面及其对渗透特性影响的精细识别		
		10. 围岩非饱和过程及其水力学参数监测		
		11. 地应力测量		
		12. 围岩变形监测		
地下实验室场址环境长期监测和影响研究	13. 硐室施工过程中氦气防护及连续监测技术研究			
深部岩体开挖 技术类	地下实验室深部岩体开挖关键技术研究	14. 钻爆法施工参数优化及智能化施工现场试验		
		15. 钻爆法 EDZ 评价		
		16. 斜坡道 TBM 现场掘进及辅助智能化施工试验		
		17. -560 m 开挖技术综合试验		
		18. 超前探测技术试验		
		19. 地下实验室注浆试验		
		20. 斜坡道 TBM 施工微震监测		
		21. 金属构件腐蚀监测		
		22. 处置坑开挖试验及损伤区测试		
		23. 围岩适宜性评价准则		
		现场试验关键技术研发类	地下实验室深部岩体开挖关键技术研究	24. 缓冲材料砌块安装和膨润土颗粒充填现场试验

能的,为高放废物地质处置研究开发服务和场址评价服务的、具有国际先进水平的科研设施和平台。其性质为“特定场区型地下实验室”。北山地下实验室的基本功能包括:评价场址深部环境,开展 1:1 工程尺度验证实验,开发处置库施工、建造、回填和封闭技术,全面掌握处置技术,为地下现场实验提供深部实验巷道、水、电、通风、通讯、安全和应急等后勤保障,为公众参观地下实验室提供窗口等。它既起普通地下实验室的作用,又可起着潜在的“特定场址地下实验室”的作用。

北山地下实验室是我国首座高放废物地质处置地下实验室,作为“十三五”国家重点工程,其顺利开工标志着我国高放废物地质处置研发进入新的阶段,即地下实验室研发阶段。工程自 2021 年 6 月正式开工以来,在科技创新、场址评价、工程施工和项目管理等方面取得了重大进展,工程的进度、安全和质量可控。项目建设进展和成果在国内外多次重要会议上进行了介绍,获得积极评价和良好反响。尤其是全球首台大坡度小转弯半径硬岩隧道掘进机“北山 1 号”的成功研制和世界上首条采用 TBM 开挖螺旋斜坡道的工程方案及其顺利实施,显示了我国在高放废物地质处置领域的科技创新能力和水平。目前,地下实验室建设正在全面进行,竖井和斜

坡道的施工正在稳步推进,相关科研正在配套跟进。截至 2023 年 12 月 10 日,主竖井已经掘进到 560 m 深,“北山 1 号”硬岩掘进机已经完成螺旋斜坡道 3 000 m 长度的掘进。随着竖井越来越深、斜坡道越来越长,面临的技术挑战、安全风险也越来越大,尤其是“北山 1 号”将开掘更加完整的岩体,出渣皮带转弯次数逐渐增多,反坡排水和独头通风距离日益增长,这将对施工技术和管带来严峻挑战。未来在开挖条件下,我们将从岩石力学特征、处置设备研发安全评价等方面开展更深入的研究,以期对处置库的研发继续积累经验。

参考文献(References):

- [1] Nuclear Energy Agency. The role of underground laboratories in nuclear waste disposal programmes [M]. New York: OECD Publications, 2001.
- [2] Nuclear Energy Agency. Underground research laboratories [M]. New York: OECD Publications, 2013.
- [3] International Atomic Energy Agency. The use of scientific and technical results from underground research laboratory investigations for the geological disposal of radioactive waste [R]. Vienna: IAEA, 2001.
- [4] Mayer S J, Van Marcke P, Jung H, et al. Important roles of underground research laboratories for the geological disposal of radioactive wastes: An international perspective [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2023, 536(1): 297-309.

- [5] Delay J, Bossart P, Ling L X, et al. Three decades of underground research laboratories: What have we learned? [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2014, 400(1): 7-32.
- [6] 潘自强, 钱七虎. 高放废物地质处置战略研究[M]. 北京: 原子能出版社, 2009.
Pan Z Q, Qian Q H. Study on geological disposal strategy of high-level radioactive waste[M]. Beijing: Atomic Press, 2009.
- [7] 王驹, 苏锐, 陈亮, 等. 中国高放废物地质处置地下实验室场址筛选[J]. 世界核地质科学, 2022, 39(1): 1-13.
Wang J, Su R, Chen L, et al. Site selection of underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China[J]. World Nuclear Geoscience, 2022, 39(1): 1-13.
- [8] Wang J. On area-specific underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(2): 99-104.
- [9] 王驹, 苏锐, 陈亮, 等. 甘肃北山高放废物地质处置地下实验室若干战略问题的考虑, 世界核地质科学[J]. 2014, 31(S1): 125-130.
Wang J, Su R, Chen L, et al. Considerations on several strategic problems on underground laboratory for high-level radioactive waste disposal in Beishan, Gansu Province[J]. World Nuclear Geology, 2014, 31(S1): 125-130.
- [10] 王驹, 苏锐, 陈亮, 等. 论我国高放废物地质处置地下实验室发展战略[J]. 中国核电, 2018, 11(1): 109-115.
Wang J, Su R, Chen L, et al. The development strategy of the underground research laboratory for geological disposal of high level radioactive waste in China[J]. China Nuclear Power, 2018, 11(1): 109-115.
- [11] Wang J, Chen W, Su R, et al. Geological disposal of high-level radioactive waste and its key scientific issues[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 801-812.
- [12] Wang J. High-level radioactive waste disposal in China: Update 2010[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010, 2(1): 1-11.
- [13] Blechschmidt I, Vomvoris S. Relevance of underground rock laboratories for deep geological repository programs[G]//Geological repository systems for safe disposal of spent nuclear fuels and radioactive waste. Amsterdam; Elsevier, 2017: 113-142.
- [14] Radioactive Waste Repository Authority, SÚRAO. Experimental programme 2015-2020[R]. 2020.
- [15] Horst G. Retrieving waste from the Asse salt mine—Facts and challenges[R/OL]. Institut Für Nukleare Entsorgung. <https://www.nwtrb.gov/docs/default-source/meetings/2018/march/geckeis.pdf?sfvrsn=6>.
- [16] Pacovská D, Hausmannová L, Levorová M. The Josef regional underground research centre (JOSEF URC) [J]. Rudarsko-Geolosko-Naftni Zbornik, 2012, 24(1).
- [17] Hans Carlsson. Update: The international stripa project A progress report from the test station in an old Swedish iron mine[J]. IAEA Bulletin, 2007, 3: 25-28.
- [18] Matray J M, Savoye S, Cabrera J. Desaturation and structure relationships around drifts excavated in the well-compacted Tournemire's argillite (Aveyron, France)[J]. Engineering Geology, 2007, 90(1/2): 1-16.
- [19] Barbreau A. Le laboratoire souterrain de fanay-augères[C]//Design and instrumentation of in situ experiments in underground laboratories for radioactive waste disposal. London; Routledge, 2022: 128-141.
- [20] Bundesgesellschaft für Endlagerung. Schachtanlage Asse II[R/OL]. Bundesgesellschaft für Endlagerung. <https://www.bge.de/de/asse>.
- [21] Nevada test site. NTS PHOTO LAB Publication Date[R/OL]. Nevada test site. <https://www.alamy.com/stock-photo/nevada-test-site-map.html?sortBy=relevant>.
- [22] Connolly J R, Mansker W L, Hicks R, et al. Petrology and geochemistry of the grouse canyon member of the belted range tuff, rock-mechanics drift, U12g tunnel, Nevada test site[J]. Nuclear Fuels, 1983, 4: 1-68.
- [23] Chandler N A. Twenty years of underground research at Canada's URL[R]. Atomic Energy of Canada Limited, Whiteshell Laboratories, Pinawa, Manitoba (CA), 2003.
- [24] Li X L, Neerdael B, Raymaekers D, et al. The construction of the HADES underground research laboratory and its role in the development of the Belgian concept of a deep geological repository[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2023, 536(1): 159-184.
- [25] Nakano K, Takeuchi S, Hama K. Mizunami underground research laboratory project results from 1996-1999 period[R]. Japan Nuclear Cycle Development Inst., 2001.
- [26] Svensk Kärnbränslehantering AB. Äspö hard rock laboratory annual report 2020[R]. 2021.
- [27] Bossart P, Bernier F, Birkholzer J, et al. Mont Terri rock laboratory, 20 years of research: Introduction, site characteristics and overview of experiments[G]//Bossart P, Milnes A G. Swiss journal of geosciences supplement. Cham; Springer International Publishing, 2017: 3-22.
- [28] The Horonobe Underground Research Center. Previous R&D tasks & main achievements[R/OL]. The Horonobe Underground Research Center. <https://www.jaea.go.jp/english/04/horonobe/index.html>.
- [29] Wang J, Chen L, Su R, et al. The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: Planning, site selection, site characterization and in situ tests[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(3): 411-435.
- [30] Adams M. Yucca mountain-nevada's perspective[J]. Idaho L. Rev., 2009, 46: 423.
- [31] Kim G Y, Lee J Y, Kim K. KAERI underground research tunnel (KURT)-Phase II activities for HLW disposal technology development in Korea—15253[C]//WM Symposia, Inc., PO Box 27646, 85285-7646 Tempe, AZ (United States), 2015.
- [32] Krieg R D. Reference stratigraphy and rock properties for the waste isolation pilot plant (WIPP) project[R]. Sandia National Labs., Albuquerque, NM (USA), 1984.
- [33] Bracke G, Fischer-Appelt K, Baltes B. Preliminary safety analysis of the gorleben site: Overview-13298[C]//WM2013 Conference, 2013.
- [34] Kunze V. The Construction of the konrad repository—status and perspective-13034[C]//WM Symposia, 1628 E. Southern Avenue, Suite 9-332, Tempe, AZ 85282 (United States), 2013.

- [35] Young R P, Nasser M H B, Sehzadeh M. Mechanical and seismic anisotropy of rocks from the ONKALO underground rock characterization facility [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 126: 104190.
- [36] Delay J, Forbes P L, Roman J. The meuse/haute-maine underground research laboratory: Seven years of scientific investigations [J]. *Clay minerals*, 2007, 25(55): 41.
- [37] Wolf K. The closure of the morsleben repository (ERAM) [R/OL]. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE). <https://www.bge.de/en>.
- [38] Birkholzer J T, Webb S W, Halecky N, et al. Evaluating the moisture conditions in the fractured rock at Yucca Mountain: The impact of natural convection processes in heated emplacement drifts [J]. *Vadose Zone Journal*, 2006, 5(4): 1172-1193.
- [39] 王驹, 苏锐, 陈伟明, 等. 论特定场区地下实验室 [C]// 第三届废物地下处置学术研讨会, 2010.
Wang J, Su R, Chen W M, et al. Describe the area-site URLs [C]// *The Third Symposium on Disposal of High-level Radioactive Waste Disposal*, 2010.
- [40] 王驹, 陈亮, 苏锐, 等. 中国高放废物地质处置北山地下实验室重大进展 [J]. *世界核地质科学*, 2023, 40(S1): 473-490.
Wang J, Chen L, Su R, et al. Beishan underground research laboratory for geological disposal of high level radioactive waste in China-update 2023 [J]. *World Nuclear Geology*, 2023, 40(S1): 473-490.

Definition, classification, and functions of underground research laboratories for the geological disposal of high-level radioactive waste and the scientific research plan of Beishan underground research laboratory

WANG Ju^{1,2}, LUN Long^{1,2}

(1. CAEA Innovation Center for Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste, Beijing 100029, China; 2. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

Abstract: Underground research laboratories (URLs) for the geological disposal of high-level radioactive waste serve as critical facilities for verifying the safety and suitability of the sites of potential disposal repositories and for developing disposal technologies. URLs are irreplaceable in many aspects such as the siting and system design of potential disposal repositories, the development of the theories and technologies for disposal engineering, the safety and characteristic assessments, full-scale field tests, and on-site demonstration. This study highlights the definition, classification, and functions of URLs and categorizes existing primary URLs both in China and abroad. URLs are generally categorized into general URLs (first generation) and site-specific URLs (second generation). The construction of disposal repositories in China has progressed from national, regional, and site screening to site evaluation and to URL construction. The authors of this study proposed the concepts of "site-specific URLs" and "third-generation URLs" in 2010 and 2014, respectively. Furthermore, the Beishan URL—the world's first site-specific URL for the geological disposal of high-level radioactive waste—has been built. This study introduces the siting process, planning, positioning, and functions of the Beishan URL, as well as the functions of primary scientific experiments and main field experiments conducted during its construction. The results of this study serve as a guide for future siting and R&D of disposal repositories.

Key words: high-level radioactive waste; underground research laboratories; definition and classification; site-specific URL; Beishan underground research laboratory

(本文编辑: 蒋实)