



高放废物处置 地下实验室

经济合作发展组织核能机构 编

核工业北京地质研究院

高放废物处置

地下实验室

经济合作发展组织核能机构 编

刘 军
张铁岭 译
王 驹 校

核工业北京地质研究院

2014 年 2 月

The Role of Underground Laboratories in Nuclear Waste Disposal Programmes

NUCLEAR ENERGY AGENCY ORGANISATION FOR ECONOMIC
CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, 2001

（中译本的出版得到经济合作与发展组织核能机构的许可，但经济合作与发展组织核能机构声明不对该中译本承担责任。如出现译文与原文不一致的情况，以原文为准。）

前 言

核能机构（NEA）的放射性废物管理委员会（RWMC）是由世界各国放射性废物管理领域的执行单位、监管机关、决策机关及研发机构的高级代表参与的论坛。RWMC 为国际性科研项目提供了一种重要的合作机制，通过这种机制，合作各方可以分享最新的开发成果与经验，共用最新的专业技术工具或方法。由于 RWMC 与许多技术专家保持着密切联系，所以能够提供及时的和权威性的专家审查。因此，RWMC 可以为核能机构各成员国解决放射性废物问题提供帮助，促进放射性废物短期与长期的安全管理。

本报告是 RWMC 的基础性文件，虽然由技术专家集体起草，其读者群却可以包括决策者和广大公众中的关注者。文章对何为地下研究实验室（URL），其各种类型、位置、已有的研发类型、对各国的价值、决定建造地下实验室时需要考虑的问题以及国际合作的机会与益处等等都做了详尽的阐释。

目录

1、引言.....	- 1 -
2、URL 之基本目的与现有 URL 综览.....	- 5 -
3、URL 的贡献.....	- 26 -
4、URL 的战略作用与时间选择.....	- 45 -
5、国际合作.....	- 59 -
6、结论.....	- 62 -

1、引言

地质处置是专门针对长寿命放射性废物开发出来的一种长期安全管理方案。其基本构想是将此类废物放进一个能够安全、可靠地将之隔离，从而保护人类与环境健康的深地下处置库当中。这一构想方案的确立经过了广泛的咨询并与其他方案进行了反复的比较。未来处置库选择哪些地质建造作为主岩，主要取决于地质建造的长期稳定状态，取决于其容纳废物处置设施的能力，保护工程系统长期安全功能的能力以及预防或阻止一切偶然的放射性泄漏的能力。工程屏障系统是天然地质屏障的补充，可以提供基本的物理、化学圈闭。整个系统应提供长期的被动安全，以尽量减轻对未来人类

造成的负担。然而，为了进一步保险，也为了废物及其处置设施的长治久安，在处置库关闭后相当长的一个时期内，仍需继续对场址实施监督和控管。

对于放射性废物地下处置库设计，长期安全及具体实现方面的各种相关问题，NEA 许多成员国的实施单位和监管机构都在开展调查，寻求解决方案。每一种解决方案的可行性、安全性和适宜性都必须向实施单位、监管机构、科技界、决策机关及广大公众进行充分展示。一方面要实际展示所有关键的技术诸元，另一方面要展示实施单位所循决策程序的置信性，证明其计划是经过审查的，开发活动是有授权的。尤其重要的是，必须提出令人信服的证据，

证明提议中的处置库的所有安全问题都已有了充分的把握，其中包括对所有不确定性的把握，综合天然-工程系统未来长期性能的预测中，不确定性是难以避免的。

世界各国所有大型放射性废物处置计划都包含一个关键的部分，那就是建造一个或若干个地下设施以开展特性评价、测试、技术开发及验证（论证）等各项活动。这种设施，世人称为“地下研究实验室”或简称为 URL^①，是获取科技信息和实践经验的基础设施。这些信息和经验，对于处置设施的设计，建造是不可或缺的，更重要的是可信赖的开发安全预案，而安全预案研究对于处置库开发的每一个阶段都是必需的。

本报告拟就以下方面进行若干概括和总结。

- 在处置库开发计划中建设 URL 的目的；
- NEA 各成员国迄今已开发或计划开发的 URL 概况；
- 此类设施对于处置库开发计划和安全预案开发的不同作用（贡献）；
- 各国处置计划中对 URL 开发时机的把握；
- URL 开发中国际合作的机遇与益处。

① URL 是 underground research laboratory（地下研究实验室）或 underground rock laboratory（地下岩石实验室）的首字母。这一广为接受的术语专指处置库开发计划中用于各种实践活动的地下设施。

2、URL 之基本目的与现有 URL 综览

什么是 URL？

URL 应是这样一种地下设施：在其中得以开展特性评价、测试、技术开发及论证等一系列活动，以支撑放射性废物地下处置库的开发。每一个处置库都必须开展浩大的特性评价工作。因此，所有处置库，按本报告采用的定义，自然可视为 URL。URL 可以是专门目的的精心设计建造的设施，用于开展大型研究项目并使用很多年；也可以是一个十分简单的设施，例如利用现有矿山工程（或地下工程）建造的设施，用于某项专门的调查活动。无论是就各个国家而言，抑或就全球而言，这些 URL 都应选择适合于建造处置库的岩石作为主岩，如花岗岩、

盐岩、粘土/页岩和火山凝灰岩等。URL 的深度可以选择数百米至一千米，也可以选择较浅的部位。对于废物处置来讲，通常提到或建议的深度是前者。

URL 可以提供一个平台，用以调查水文学、热力学、力学、化学及生物学等特性以及制约地质处置库天然与人工屏障系统性能的各类耦合作用。URL 也可用来开发处置库建造、运行与关闭所需的技术工艺，用来向专家和普通公众演示这些工艺和处置库的总体概念。URL 还可用来验证工程屏障与监控系统的长期性能，论证废物回取工艺。尤其重要的是，较之各种地表调查手段和实验室研究方法，URL 提供的是直接进入未来处置库所在地质环境的途径。

一旦建成,URL 将成为与处置库开发相关的各种科研, 开发项目及论证活动的中心设施。不仅如此, 它还将成为一些国际合作项目的平台。

URL 的基本目的

对于各国的废物处置计划,URL 都是不可或缺的重要组成部分, 因为它可以提供重要的, 有时是关键的技术经验, 认知水平以及最终处置库安全预案赖以建立的方法要素(单元)的置信度。实现和验证安全目标的策略取决于科学与工程技术水平, 由三个相互关联的部分构成。这三个部分需同时界定, 互动开发。

- 设施选址与处置系统设计——遴选条件有利、具有隔离能力的岩体作为处置库主岩,

开发能与地质环境相容且耐用的长寿命废物包装罐，开发牢靠的工程屏障；

- 基础科学与工程技术支持——制定并实施严密工程技术与科学调查计划以便为处置系统设计、特性验证及性能评价提供必要信息；

- 安全评价——开发各种工具（方法）以便对处置库在未来各种可能的情景下的性能和安全性进行分析评价。

尽管各国的计划采用的术语不尽相同，但在 URL 中为达到上述目标均需开展以下各项工作；

- 特性评价——实地调查，旨在提供处置库主岩的地质、水文地质、地球化学、结构/构造与机械（力学）性质等方面的基本信息，对

条件变化的响应以及安全评价所需的其他数据；

- 测试/试验——广义上包括：各种特性评价方法使用情况的评价，以判断其在今后调查工作中是否可用、可靠；各种工程材料，开挖方法的测试，这些材料及方法是处置库开发所必需的；一系列概念模型和数学模型的测试，以便此后进行处置库系统及/或其某一部分的性能评价；

- 技术开发——用于特性评价、测试、处置库建造、废物码放（及回取）、工程屏障建造以及处置库关闭的设备、技术方法和专项知识的开发；

- 示范——以实际尺寸或缩尺比例，在实物及/或模拟处置库条件下，阐释并论证处置库

设计的可行性，处置库各组成部分的性状、性能，其中包括密封、废物码放与回取技术的论证。

在最后这一项上，示范工作还可能包括在颁发了许可证的设施内进行现在废物的尝试性处置工作。所以说，在 URLs 中开展的工作，从基础研究到试验性废物处置设施开发应有尽有。

URL 的类型

尽管 URL 的开发方式有许多可能性，但至少可以分成两大类：

- 其一是专为研究和试验目的的开发的设施，不能用于废物处置，只能为其他场址的废物处置提供支持信息，此处称其为“普通 URL”；
- 其二是在拟定为废物处置潜在场址的地

方开发的设施，实际上是该场址处置库的前身，这里称之为“特定场址 URL”。

开发普通 URL 是为了获取地下建筑施工技术的一般经验，模型测试与测量技术验证，也是为了获取与某一具体岩石类型有关的信息，认识和经验。因为这种岩类在其他场址上被视为未来处置库的主岩。开发此类普通 URL 主要取决于处置库开发计划所处的阶段。例如：瑞士，早在选址和主岩遴选之前就已经开始在 Grimsel 试验场址上部署全面调查了，而且在近 20 年的时间里，该场址作为一系列国际性研究项目的平台经久不衰；而在 Mont Terri 公路隧道内的调查只是因为它穿过了一套粘土建造之后才开始的。因为瑞士其他地区的粘土建造被

视为潜在的处置库主岩。

地下设施的建立需要浩大的基础设施建设（基建）投入，如坑道掘进，地下设备与管网的维保、安全保障。因此，NEA 成员国已有的普通 URL 多数是利用现有地下工程开发的，如矿山、隧道或者是扩建、或者直接建在其中。利用现在矿山或地下工事就意味着可以利用早期掘进成果，适当的矿山维保系统和基础安全设施。而且申请在矿山或隧道的扩建工程也比申请新场址的开发工程容易获得批准。

这种类型的 URL 利用了现有的地质和基础设施方面的优势或机遇，有助于场址特性评价、处置库建造，运行及关闭等方面的技术开发和经验积累，也有助于各种模型的测试与完善。

在某些情况下，此类设施或许并不能如实地反映处置库内外的全部环境特征，却可以提供一些少花钱，多办事的机会，在处置库开发计划的早期阶段尤其如此。

表 1 列出了 NEA 各成员国利用原有地下设施开发的普通 URLs 的部分基本信息。

有些处置库开发计划决定开发一种有特定目的的普通 URL。这种 URL 一般建在可作为处置库主岩的某种指定的岩类中。这类 URL 必须投入大量的人、财、物力，因为这样的工程必须负担挖掘，建造及各种装备和服务设施的全部成本。但另一方面，也可以获得比较多的数据，例如：建造前（未扰动场址）的数据，地下设计，掘进数据、建造技术以及整体施工数据等。

表 1 核能机构成员国利用原有地下工程开发的通用 URLs

名称	主岩, 位置, 深度	研究机构及演化过程	参与研发的其他成员国
Asse 矿山	二叠纪岩盐背斜, 德国, 各开采中段均在 490-800m 之间, 采深达 950m	GSF; 原为钾碱和石盐矿, 1965-1978 年用作 LLW 和 ILW 处置论证设施, 至 1997 年仍为研/发设施, 未使用的部分正在回填	法国, 荷兰, 西班牙
Tono	沉积岩, 日本	JNC, 原为有矿 ¹ 山, 1986 停工	瑞士
Kamaishi	花岗岩, 日本	原为铁-铜 ¹ 矿山, 1998 年采空	瑞士
Stripa 矿山	花岗岩, 瑞典, 360-410m	SKB, 原为铁 ¹ 矿山, 1976-1992 年运行	加拿大, 芬兰, 法国, 日本, 西班牙, 瑞士, 英国, 美国
Grimsel 试验场址 (GTS)	花岗岩, 瑞士, 450m	Nagra, 原为水-电项目的工程, 运行至 1983 年	捷克共和国, 法国, 德国, 日本, 西班牙, 瑞典, 美国
Mt. Terri (特里山) 计划	含蛋白石粘土 (硬粘土), 瑞士, 400m	SNHGS, 原为公路隧道, 建于 1995 年	比利时, 法国, 德国, 日本, 西班牙
Olkiluoto 研究隧道	花岗岩 (英闪岩), 芬兰, 60-100m	Posiva, 隧道与 1992 年开始运行的 Olkiluoto LLW 处置库相连。主要进行	瑞典

		芬兰乏燃料处置的相关研究	
Climax	花岗岩, 美国, 420m	DOE, 试验坑道由原有坑道延伸而来, 1978-1983 年进行乏燃料处置试验	
G-Tunnel	凝灰岩, 美国, 大于 300m	DOE, 武器-试验隧道, 1979-1990 年运行	
Amelie	层状岩盐, 法国	ANDRA, 原为钾碱矿, 1986-1992 年运行	
Fanay-Augères	花岗岩, 法国	IPSN, 原为铀矿山, 1980-1990 年运行	
Tournemire 设施	沉积岩 (硬粘土), 法国, 250m	IPSN, 原为铁路隧道及其相邻工事, 运行至 1990 年	德国

有特定目标的普通 URL 比较容易设计成方便相关访问者进入的方式。实际上，在所有处置库项目中促成公众与科技人员的交流、互动也是 URL 重要的功能之一。一般说来应先做出承诺：保证 URL 永远不会成为处置库的一部分，这种承诺会有助于缓解当地居民对建造此类设施的担忧。

表 2 列出了 NEA 各成员国开发的有特定目的普通 URL 的若干基本信息。

一个或若干远景处置库场址一旦确定以后，就可以开发特定场址型 URL 了，这是为了取得该处场址的信息和经验。这种 URL 可以建在设想中的处置库附近或处置库当中，如果该处置库正在开发过程中，URL 也可以部分地或完全

表 2 核能机构成员国专门建造的通用 URLs

URL	主岩，位置，深度	研究机构及演化过程	参与研发的其他成员国
高放处置试验场址地下研究设施 (HADES-URF)	Boom 粘土 (塑性粘土), Mol/Dessel, 比利时, 230m	GIE EURIDICE, 1980 年建造竖井, 运行至 1984 年, 使用年限后延至 1998 年 9 月	法国, 德国, 日本, 西班牙
Whiteshell 地下研究实验室	花岗岩, 加拿大马尼托巴省博内湖, 240-420m	AECL, 运行至 1984 年	法国, 匈牙利, 日本, 瑞典, 英国, 美国
Mizunami 地下研究实验室	花岗岩, 日本	JNC, 钻孔正在钻进中	瑞士
Horonobe 地下研究实验室	沉积岩, 日本	JNC, 2000 年批准建造	
Åspö 硬岩实验室	花岗岩, 瑞典, 深度在 200-450m 之间	SKB, 1995 年运行至今	加拿大, 芬兰, 法国, 德国, 日本, 西班牙, 瑞士, 英国, 美国
Busted Butte	层状凝灰岩, Calico 山建造, 美国内华达州尤卡山, 深度 100m	USDOE, 1998 年开始运行	

建在处置库之内。为 URL 凿通的竖井和入口可以作为处置库的辅助入口，根据总体设计布局，也可以是处置库的主要出入通道。

特定场址 URL 用于确认主岩的适宜性、指导具体场址布局和处置库设计，论证演示各种技术工艺在具体场址条件下的使用情况。除此之外，在特定场址 URL 中可以进行的一般性研发活动较之普通 URL 只多不少。不过，仍有其特别的局限性。因为，特定场址型 URL 中部署的所有研究/开发项目均需以不损害该场址未来的处置安全为前提。特定场址 URL 在其孪生的处置库关闭之前，可以始终保持开放状态以保证工程屏障系统及处置库性能长期监控与验证的便利，也可以在必要的研究项目完成以后

即行关闭。

表 3 列出了 NEA 成员国已有的特定场址 URL 的部分基本信息。

无论开发哪一种类型的 URL,都将在处置库安全预案开发研究以及提高处置战略的置信度方面起到不可替代的重要作用。

URL 的广泛建立

从前面 3 个表可以看到,已有 10 个 NEA 成员国建立了 URL。其中有的国家已从普通 URL 发展到特定场址 URL 阶段。芬兰、法国和日本正在筹划开发另外的 URL。许多国家尽管尚未建立本国的 URL (如荷兰、西班牙、英国和捷克共和国),却已参与过或正在参与不同类型 URL 中的国际合作研究项目。可以说,几乎所有产生

表 3 核能机构成员国开发的场址型 URLs

URL	主岩，位置，深度	研究机构及演化过程	参与研发的其他成员国
ONKALO	花岗岩（英闪岩），芬兰，500m	Posiva,2001 年获得授权，2003 年开始建造	
Meuse/Haute Marne	页岩（硬粘土），Callovo-Oxfordian 泥岩，法国，450-500m	ANDRA，未来处置库场址，2000 年开始建造竖井	日本
Gorleben*	盐丘，德国下萨克森省，900m 以下	BfS,DBE，竖井建造于 1985-1990 年	
Konrad	页岩覆盖下的灰岩，德国，800m	BfS,DBE,原为铁矿，采矿作业于 1980 年结束，现正申请 LLW/ILW 处置库许可证	
Morsleben	盐丘，德国，深度均大于 525m	BfS,DBE，原为岩盐和钾碱矿，1981 年后转用做 LLW 和 ILW 处置库（处置作业至	

		1998 年结束)	
Pécs(Mecsek 山)	硬粘土, Boda 粘土岩 建造, 匈牙利, 1000m	PURAM, 原为铀矿山, 1995 年开工, 1999 年关闭	
废物隔离试验厂 (WIPP)	盐矿(层状), Salado 建造, 美国新墨西哥 州卡尔斯巴德, 655m	USDOE, 运行至 1982 年, 1999 年批准转为超铀 (TRU) 废物处置库	比利时, 加拿大, 法国, 德国, 日本, 瑞典, 英 国
勘探研究设施 (ESF)	熔结凝灰岩, Calico 山建造, 美国内华达 州尤卡山, 300m	USDOE, 原地实验始于 1996 年, 勘探支巷建设工程毕于 1998 年	

注: 根据政府 2000 年 10 月 1 日颁布的命令, 未来处置库场址勘探工作推迟 3-10 年。

长寿命放射性废物的 NEA 成员国都已介入了 URL 的各种研究, 尽管其处置库计划所处的开发阶段并不整齐划一。

现有的全部 URL 运行时间总和或称累计经验已超过 250 年。世界第一个普通 URL, 即德国 Asse 矿山的开发始于 1965 年; 第一个具有特定目的的普通 URL 建于 1984 年, 延生于加拿大; 第一个特定场址型 URL 建于 1980 年, 位于德国的 Konrad 矿山。

URL 的成本

因为工程施工均在地下, 因尔建造 URL 设施是一项耗时较长、投资较大的工作。建造 URL 是有特殊要求的, 因为, 为了控制过分地扰动主岩, 必须采用专门的凿岩技术, 必须遵循专

门针对实验室条件制定的质量保证程序。URL 的建造费用动辄上亿欧元，URL 项目一旦启动，处置计划预算相当大的一部分就会被投入进去。据 Andersson 报告（1999），欧洲 4 个 URL 用于研究与开发的投入年均在 500 万至 1100 万欧元。因此，建设 URL 对于任何一个国家都不是一项轻而易举的决策。事实上，建造 URL 是处置库开发计划中最重头的一项实实在在的研任务。URL 的建设成本尽管较高，却已广泛地建成并投入使用，这一事实本身就已经说明了 URL 对各国处置计划的重要意义。

URL 的其他效用

URL 不仅能够贡献重要的科学技术信息，也有助于使处置库在社会上被广为接受。因为 URL

可以使公众更加信任废物处置的理念，更加信任废物处置设施建造者的执行能力。同时，监管机构可以通过积极参与 URL 项目提高自身的知名度和公开性，从而使社会更加信任其管控处置库的能力和可靠性。从 URL 收集起来的信息还有助于化解实施单位与监管机构，实施单位与广大公众之间的各种争论或误会，如属于“软”范围的难以达成明确决定的理论问题和较易于做出决策的属于“硬”范围的实物性基础问题等。由于上述原因，在别国的 URL 中开展的工作尽管具有同等的技术价值，但这种做法对于本国的处置计划而言，其作用就差多了，因为这些工作的成果相对于国内社会关注的问题或期望的目标未必贴切与恰当。

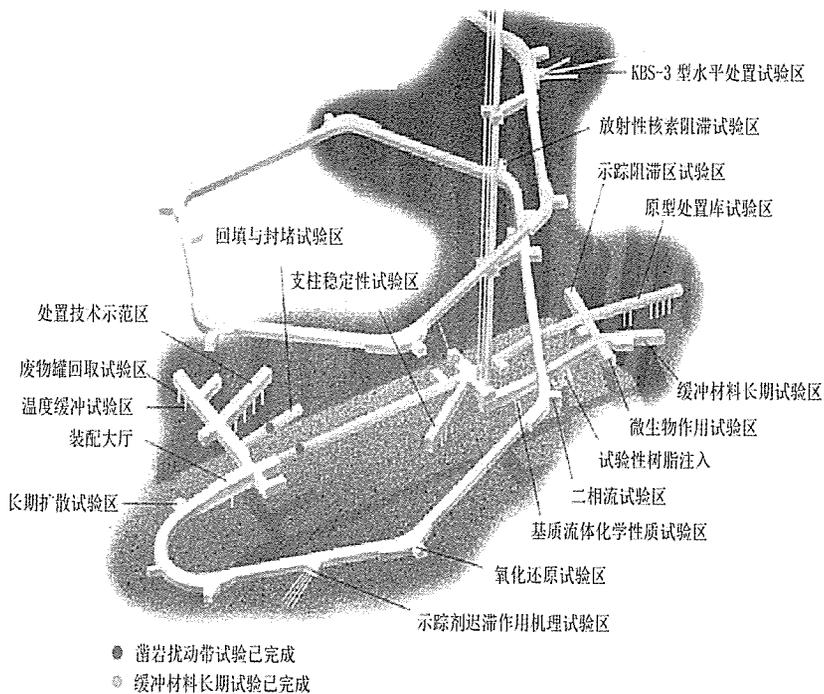


图 1: Äspö 地下实验室各类试验区的分布

3、URL 的贡献

一种非 URL 莫属的重要功能是可以提供一条进入真实处置库条件下的地质环境的通道。这条通道是开发现场特性评价所需方法和设备的必由之路，也是工作人员获取和积累实践经验的必由之路。这条能进入地下现场的通道使得影响处置库性能的地质圈性质及条件的特性评价研究成为可能。URL 是一种试验设施，可用以开发建模数据库，还可用以在实际条件下开发、验证处置库建造、废物码放、回填及封存等施工技术。这些技术和经验可以转用于真正的处置库中。URL 还可以提供非技术的或称为“外围”的功能。其中最主要的是首先在科技界，然后在广大的公众当中，就 URL 中论证过

的处置技术建立最广泛的信任。最后，URL 为参与国际合作、共享各种研究成果提供了重要的机遇。

URL 研究内容的变化

URL 中开展的研究项目，其类型和数量是随时间的推移而变化的。在 25-30 年以前，在首批 URL 的研究工作启动之时，许多核废物处置库所需的高端技术都是初具雏形。首先要做的是开发各种设备和测试方法，基建工程可行性研究和收集基础性的地质数据。今天，这类活动已不那么紧迫和重要了，因为现在已经掌握了这方面大量的信息。现在的努力方向应该是将其他场址上开发出来的装备和技术进行优化与完善，使之更适应每个指定场址的具体条

件。

URL 中开展的研究，其内容还应与不断迭次进行的安全评价研究的需求及成果相适应，因此，目前 URL 研究关注的方向是减少安全案例中的不确定性，提高其置信度。例如：进行各种测试以甄别不同的备用概念模型或者提高对某种具体作用过程的科学认识。此外，与工程屏障系统相关的全尺寸验证试验以及长期的大尺度示踪剂试验也受到越来越多的重视。

URL 内的研究工作实例

在 URL 内已开展的研究工作实例见于表 4，其大致分类如下：

——地下特性评价所用方法、设备、经验以及监控技术的开发

表 4 URLs 可提供的技术信息

目标	实例
<p>地下特性评价方法与设备的开发及不同方法的可靠性测试</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 通风试验, 跨孔液压试验与地震试验, 钻孔雷达, 巷道试验验证 (Stripa); • URL 内的伸缩仪开发 (加拿大); • 岩盐中卤水渗透率试验设备与方法的开发 (WIPP); • 卤水迁移试验 (Asse)
<p>地面特性评价方法的可靠性测定</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 深钻孔渗透率测试结果与现场渗透率测试数据的比较 (WIPP); • 预-掘进扰动预测与巷道内实测结果的比较 (Äspö)
<p>场址勘探策略的实施并随信息量的积累使这些策略能够适用于地下系统</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 裂隙填图与液压测试, 以选取实际废物处置钻孔的位置 (Olkiluoto 研究隧道); • 各种地球物理方法的实施 (Grimsel, Tournemire 和 Stripa)
<p>未来可能导致放射性核素在岩石中迁移的各种天然作用的概念模型与数学模型之开发和</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 放射性核素迟滞 (慢化) 研究 (Grimsel); • 不饱和带迁移试验 (尤卡山);

测试	<ul style="list-style-type: none"> • 溶质迁移与扩散试验 (加拿大 URL); • 极限气体压力试验 (WIPP); • 示踪剂滞留研究 (Äspö)
普岩作业对局部系统扰动影响的定量评价	<ul style="list-style-type: none"> • 普岩破坏带试验 (Äspö, Grimsel 和 WIPP); • 处置平巷和处置钻孔周围的扰动带研究 (Oikiluoto 研究隧道)

续表 4

目标	实例
<p>凿岩技术的进一步开发与测试</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 塑性粘土岩中开凿巷道技术可行性论证 (HADES); • 平巷钻进机与爆破凿岩技术的比较 (Åspö, Grimsel); • 深孔钻进技术论证 (Asse); • 处置工艺性能研究 (Olkiluoto)
<p>放射性废物就位 (码放) 的诱发效应模拟 (发热、核素释放、力学作用等)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 废物对粘土的热效应和辐照效应研究 (HADES); • 试验性处置的热效应模拟 (Asse); • 热源体测试 (Stripa, 尤卡山, WIPP, Grimsel); • 热- (梯度) 构造反应测试 (WIPP); • 热-机-水综合测试 (加拿大 URL)
<p>与各种长期作用、运行期后、腐蚀、地质力学稳定性等有关的试验</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 粘土岩中处置的概念论证 (HADES); • 热-水-机耦合作用实验 (Kamaishi); • 不同材料的界面反应测试 (WIPP); • 回填及其他材料的性状测试 (Asse); • 热-机-水综合测试 (加拿大 URL)

工程屏障系统（可行性）论证

- 钻孔封闭与缓冲材质试验 (Stripa);
- 英尺工程屏障试验 (Grimsel);
- HLW 罐处置孔封闭试验 (Asse);
- 缓冲剂与容器材料试验 (加拿大 URL);
- 小比例尺封闭性能测试 (WIPP);
- 处置库封闭试验 (HADES)

在 URL 中对地下环境进行特性评价需要的设备和方法与地面调查常用的设备方法差别很大。每一个处置计划都有各自独特的关注点，因而必须开展某种程度的改良和创新。URL 为开发和测试处置库特性评价所必需的器具提供了机会，更重要的是，通过这些工作，技术人员可以娴熟地了解和使用这些器具，从而打造出一支支高效的团队。

URL 还为开发和测试处置库周围需要的各种监控系统提供了机会。

在地下特性评价中提高能力积累经验的另一个重要方面是可以同时开发和测试质量保证（QA）手段。经过检验的有效质保程序或方法是申请许可证的关键的基础资料。

——确认地面场址特性评价方法的可靠性

在 URL 建筑施工开始之前，地面场址特性评价方法提供的数据首先是用来开发场址的概念模型，其次是数值模型。此后在 URL 的掘进工程作业中，可以对依据这些模型所做的预测进行检测，如是否存在裂隙带。还可以将地表测得的特性评价参数（如钻孔测量和地表地球物理测量结果）与 URL 中测得的同类参数加以关联、比较。通过这一途径，就可以区别出哪些地面方法及/或模型能够成功地预测地下环境（可用的），哪些不能（不可用），然后将可用的方法用于处置库选址和特性评价研究。准确预测地下环境的能力对于能否寻找到可接受的处置库场址，具有至关重要的意义。

——为性能评价和处置库设计提供数据

普通 URL 和特定场址型 URL 均可以用来收集特性评价数据以补地面调查及实验室试验数据之不足。这些数据可以在出入井巷和竖井的任何深度上采集，其信息量远远大于未来处置库部位单个中段所能提供的信息量。这些数据可用于开发，测试处置库及地质圈性能的各类模型，有助于拓展不同方法对处理所测的特性评价参数值的灵敏度的认识。URL 数据的另一个作用（价值）是，它所反映的真正处置库环境（“近场”）比钻孔数据反映的环境更有代表性。在 URL 中进行的各种试验比在钻孔中试验测试的岩石体积要大得多，因而可以开发更高，更精确的模型，并更多地关注不均一性，

减少不确定性。在某些岩石建造中，只有在 URL 中才能有效地进行孔隙水取样。

就特定场址型 URL 而言，从地下观察更好地了解岩性变化，重要构造以及其他不均一性特征，更是处置库最终设计的关键。除此而外，在处置库建造开始之前，设立一定的监控手段并确定基准条件，只有在特定场址型 URL 中才能实现。

——测试和开发概念模型和数学模型

URL 提供的环境平台可用于试验和开发不同详细程度的一系列模型。其中包括用于处置库设计与布局优化的各种模型，如地球化学模型、热响应模型和水文地质流场模型；还包括安全评价中使用的各类模型，如溶质迁移模型

以及污染物迁移模型等。

——处置库建造、运行、关闭及废物回取的方法、设备的开发与经验的积累。

URL 可以为处置库建造、运行、废物码放、工程屏障建造、回填与封闭等作业的技术工艺的开发、示范和质量保证提供真实的条件。例如，任何处置库的设计和建造方案都必须与具体场址所特有的不均一性相适应。而建造 URL 恰恰可以确认或判断为之采用的各种方法的可行性。URL 中，还可以对 SKB 和 Posiva 提出的“随遇而安”的设计方案（即根据巷道地质条件进行巷道设计）进行测试。这种设计的特点是在岩石和井巷没有开挖之前、不确定平硐和废物罐的确切位置。如果在整体处置计划中，

需要考虑处置决定的“可逆性”，则 URL 还可以提供开发、试验和论证废物回取之设备及方法的机会。

作为工程屏障，处置库的建设与废物包装可能使用各种性质的材料；而主岩则处在包括各种可能的热场在内的有代表性的现场环境之中；URL 为研究这些材料与主岩之间的相互作用提供了条件。在 URL 中还可以对各种掘进方法导致的地质力学效应进行评价。同时，随着评价与论证工作的深入，处置库开发与运行中必须遵循的质量保证措施也可以得到开发与检验的机会。工作人员则能够通过这些活动获得宝贵的经验。

URL 对于监管机构的益处

除了为实施单位提供一系列效益之外，URL 还可以为监管机关提供许多益处。参与 URL 开发计划，监管机构就有可能针对以后的处置库项目同实施单位和广大公众开展更广泛更深入的沟通。认清 URL 在分阶段开发的处置库计划中可能拥有的地位以及参与 URL 计划的成果讨论，都可以使监管机构更全面地了解下一阶段开发工作能够取得的成果。不过，监管机构必须谨慎从事，在与公众展开公开、透明的对话时，切勿丧失自己的独立性。

URL 计划，特别是处置库开发早期的普通 URL 计划，在监管上的一个重要作用是：它可以提供与监管当局直接有关的信息。监管当局

可借以对拟议中的处置方案的整体可行性进行评价。从系统设计以及系统检验与实施中必须遵循的战略方面来看,URL 也是一项研发计划。这一研发计划是在真实的地下现场条件下展开的,它比在其他地方开展的研发计划更具说服力。

URL 还可以是监管机构开发、测试它自己的处置库评价模型的工具。根据 URL 提供的信息,监管机构可以对处置库进行独立的安全评价,可以判别出实施单位的安全评价工作中的关键领域。这类实践不仅可以获得宝贵的经验,对于参加处置库监管评价的工作人员也是一种很好的锻炼。

URL 有助于建立对处置库计划的信心

URL 在建立置信心方面拥有一系列功能。

URL 可以建立对倡议中的废物管理计划的信心。不仅是指处置方案的效验，也包括该方案实施可行性方面的信心。因为 URL 不仅可以提供重要的数据和经验，也是处置计划中必须由众多工作团队分头攻关的各方面研究成果的“集成器”。监管机构积极、高调地参与 URL 计划可以提高自身的知名度和可信度，从而提高全社会对该机构监管处置库能力和把握性的信赖程度。URL 计划因为允许学术界，其他国家废物管理机构以及其他学术权威的参与和互动，有助于在一般技术性团体中建立信心。URL 还可以用来对广大公众和决策者中的非技术人员展

示和论证整个处置方案中的各方面成果，如处置库建造与运行方面的各种技术、废物就位、回填与封闭技术以及监控系统的设置等。从这个意义上讲URL计划也可以看作一个真正处置库从选址、特性评价、建造、运行直到最后关闭的一次公开的“彩排”。

URL可以用来演示真正处置库设施是什么模样，都有哪些功能，使公众看得见正在进行的工作，与现场工作人员直接交谈，从研究人员口中获取可信赖的答疑解惑，就地下进行中的研究获得通俗的介绍。如此，必将提高对整个处置计划的信赖程度。此外，通过URL的选址和建造，实施单位还可以借机开发完善公众互动的程序方法，并同将来可能参与处置库开

发计划的团体和个人发展工作关系。

URL 可以吸引国际合作

URL 可以成为吸引其他国际废物管理计划参与合作的磁石（参见第 5 章）。开放 URL，吸引国际合作、共同开发，可以使众多国家的高端专业人才聚拢在一起，形成的研究能力绝非一国之力可以比拟。而且，国际合作，共同开发还可以获得更雄厚的资金支持，在 URL 内开展更具价值的研究。这也绝非一国之力可以负担的。

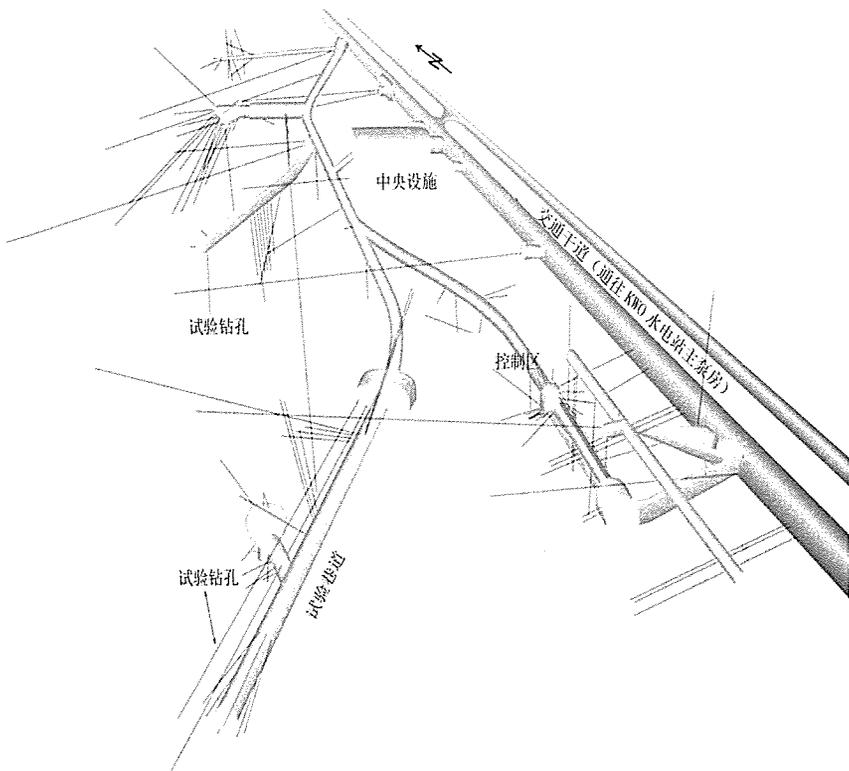


图 2: 瑞士 Grimsel 矿山巷道

4、URL 的战略作用与时间选择

URL 在处置库计划的各个阶段都可以起到重要的作用，这种作用可能贯穿于处置库开发的始终，甚至持续到处置库关闭之后。在国际范围内，长期以来逐渐出现了这样一种趋势，即从开发普通 URL（包括专门建造的设施）转向开发在某种特定岩石类型中的 URL（根据各国具体地质情况选定的岩类）、以未来处置库场址为目标的 URL 以及最终为检验或测试处置库设施或者按处置库 1:1 的比例开发的 URL。但就各国而言，采用的战略或许不尽相同，但都要回答两类问题：一是关于国家对 URL 的需求，二是关于 URL 开发的时间选择。

逐阶段进行处置库开发与 URL 的作用

一座地质处置设施从规划、技术开发与相关研究、选址、建造、许可证申请、运行直到最后关闭一般需要数十年的周期。这一开发过程应采用分步走的方式来进行。这样，在每个步骤或阶段中都可以积累大量的经验和信息。通过评估这些经验和信息的充分程度，就可以判断原有的计划是应予肯定还是需要修正，能否转入下一阶段的开发工作。尤需注意的是，这些经验与信息需结合安全预案做通盘考虑，唯此方能就设施的最终安全获得合理的保障，方能通过监管审查和获得社会认可。这是每个阶段都适用的程序。

在各国的处置计划中，关于分阶段战略的

详细规定是不同的，而且各国采用的标准或限制条件也不尽相同，例如废物管理政策，不同组织机构的责任，境内地质条件以及研/发预算等方面肯定是各不相同的。因此，各国开发 URL 的计划也会有所不同，这取决于是否有别国经验可资借鉴（包括参与其他国家 URL 计划开展共同研究）、选址手段（包括是否评估选择另一种地质条件）以及在地质有利的地段可供开发 URL 的机会会有多少（因必须考虑获取 URL 开发许可证的难度）等。

处置库开发计划大致的阶段划分以及各阶段必须进行的 URL 方面的研究工作可规列如下：

- 概念开发

- 调查、研究相关地质环境范围内的一

般特性与各种作用过程，以开发岩石及水文地质响应模型，污染物迁移模型及总体处置库性能模型；

——挖掘技术，回填材料与封堵材料技术参数以及监控技术的初步开发和测试。

- 选址与场址特性评价

——测试场址特性评价技术以确认其在野外条件下的能力和精度；

——具体主岩或场址的特性评价；

——开发各种场址模型并测试其对岩石开挖的响应；

——挖掘技术、材料技术参数及监控技术的进一步改进。

- 处置库开发

——废物处置（码放就位）及回取方法的开发；

——监控技术的改进与测试；

——废物操作设备的测试；

——废物就位，回填与封闭等作业试验。

● 处置库运行与关闭

——各种技术与手段的不断改进；

——废物罐埋放后的监控。

各国 URL 开发的不同策略

在每个国家的废物处置计划中，都可以通过本国 URL 研究开发和与别国 URL 中的联合开发经验相结合的方式来达到上述要求。因此，并不是所有国家都必须开发有专门目标的普通 URL，而是说大多数国家可能开发一个或若干

通用 URL 以调查适合本国情况的特定岩石类型，而且所有主要国家的处置库开发计划都以特定场址型 URL 开发为先导。各个国家的处置库开发计划都必须回答以下问题：

废物处置的需求有多么迫切？

有些国家，因为数十年乃至更长的时间内不需要考虑废物的最终处置，势将延迟 URL 建造的时间。在这种情况下，跟随其他国家的开发步伐可能更为有利；或许，参与外国 URL 项目的共同开发，这样可以在本国需要 URL 之际，尽可能多地分享知识和经验。因此，即使眼下并无迫切需求，普通 URL 项目也能够带来开发技术经验方面的好处，并且有助于使社会和国民认同地下处置的理念。

另一方面，如果废物处置已成为当务之急，那么立即着手开发适宜于某种具体主岩类型的 URL 或者，如果已经确定了场址，开发特定场址型 URL，均可谓正其时也。

处置概念的开发与测试是否需要 URL？

在决定按照某一具体的处置概念建造处置库之前，必须通过建造 URL 以及在其中开展的一系列实验来开发，测试并论证这种概念。

参与别国 URL 的各种研究工作能否得到想要的信息？

已经拥有 URL 的国家，大部分乐于向外国同行提供合作研究的机会。假如在现有的 URL 中得到的信息和经验能够转用于某一具体的处置库概念（如同一主岩类型的处置库），那么在

别国现有的 URL 中开展研究工作，在本国的 URL 建好之前，应是费用和时间上都很划算的选择。

为满足研究与测试需要，地下工程是否最有效的途径？

处置库开发需要的某些研究和测试工作离开地下真实的环境是办不到的。其中包括一些特别的技术（如渗透率试验或者废物码放就位）、还有若干自然作用的调查以及各种地下作业经验的取得。随着时间的推移，这类信息和经验可能越来越多地来自其他 URL（除非没有建在相同岩类中的 URL），这将有助于推动一些小型的或进展较慢的处置计划。但是在处置库建成之前，充分认识地下环境，取得地下作业经验

的需求绝不可能完全消失。

现有地下设施能否用作成本低廉的普通 URL？

现有地下工程（如矿井、隧道）可以视为低成本的技术、设备开发设施或用来积累经验，这些都有助于将来的处置库开发。尽管这些地下工程与专门开凿的设施在功能和作用方面不一定完全吻合，却能够在某些领域取得迅速进展。

整个废物处置计划的进度是否足以保证各种 URL 研究工作进展的连续性？

假如 URL 中的技术开发和经验的积累与其连续的实际运用的机会之间时隔太久，那么宝贵的经验和有经验的人员就可能流失。因此，

最好是在 URL 工程开工之前就做好从开始 URL 工程到处置库建设竣工的所有研究工作的周密计划。

特定场址型 URL 开发的时间选择

在决定特定场址型 URL 开发的时间时应考虑一系列技术和管理方面的问题：

某些必要的信息是否只能来自特定场址型 URL？

在处置库计划的若干节点上，如性能评价建模，工程设计等，需要一些特别详细的信息，而这些信息只有处置库场址的地下工程才能提供。如果所有必要的先决条件均已齐备，缺少上述信息将使处置库计划陷于停顿，若如此，则应下决心建造特定场址型 URL。

系统扰动之前是否已收集全部必要数据？

URL（或处置库）的开凿会对周围的地质环境造成深远的影响。因此，在凿岩作业开始之前，必须确立基准水文地质条件（主要是承压水头），全部完成必须在无扰动系统中进行的所有试验项目。从水力试验以及其他研究中必须收集到充足的数据，才能保证开挖响应预测模型的开发。

技术的、后勤的和监管方面的先决条件是否已经具备？

在若干可以建造 URL 的地区中，至少有一个已经调查清楚，了解了凿岩作业将对主岩性质产生怎样的影响。这就需要建立地面监控系统（并按上文所述，各项基准条件已经摸清）；

要求准备好各种监控设备，在地下空间开放后的第一时间内，尽快安装就位；还需要事先规划好所需的技术力量及其他后勤细节。

除技术和后勤方面的前提条件以外，开发工作的不同方面（如竖井建设，平巷建设、通风系统等）还可能需要单独的监管要求或者批准授权。为避免虚耗时日，浪费资金，所有监管要求必须事先进行充分讨论，以使其适应预定的工作进度，同技术和后勤要求相协调。

URL 计划能否证明已完全具备了建造处置库的能力？

URL 的作用之一是证明或展示选址、建造、运行及关闭处置库的所有能力已经具备。有些国家的法规可能要求在建造处置库之前必须先

建造 URL。一旦 URL 项目能够证明所有必需的能力都力都已齐备，地下工程便可以启动了。

URL 将来的作用

迄今为止，只有一座长寿命废物处置库投入了运营（美国 WIPP），所以，URL 在处置库开始运行以后还将具有什么作用，从经验上看，尚不完全明朗。但可以肯定地说，URL 将来仍会起到十分重要的作用，哪怕是在处置库关闭以后。例如：在特定场址 URL 中处置模拟废物与处置库中处置真正的废物可以同时并举。在处置库整个运行期间以及在此期间之外，还可以在 URL 中对废物罐、回填材料和其他工程屏障材料的性能用各种手段，包括一些破坏性的手段进行验证，而在真正的处置库中，这些工

作是不可能的，或者说是可望而不可及的。如果设计目标中包括废物回取的可行性，那么，URL 中处置的模拟废物还可以用作改进方法、设备和积累经验的试验平台。同样，在地质圈性能方面，如水入渗速度和开挖扰动带的发育等问题，可以在 URL 中进行数十年的监测，以验证或修正安全分析中的各项假设条件。

还有一种可能的做法，是在某一处置库中开发若干试验性处置设施。其中，部分待处置废物先进行试验性处置。这部分废物处置之初须接受更严密的监测。经过一段时间的监测，也许能够确认实际处置运行可以开始了，也许根据监测结果，必须对码放就位方案及/或回填技术进行某些变更。

5、国际合作

开发与运营URL所需要的支出和分享现成知识与经验的可能性使得参与地下研究方面的国际合作成为十分诱人的选择。国际合作可以促进思想交流、增加科研创造力、提高研究质量。若干研究机构的共同需求可以强化达成研究工作的里程碑和确保不超经费预算。参加过URL国际合作的国家列于表1至表3。参与URL国际合作研究的好处包括以下方面：

招徕能人荟萃

国际合作项目可以使不同国度的、最富能力与经验的科技人员汇聚起来。这是一种“群英会”，参与者得以相互传经送宝，使研究迅速深入。

增加接触，加速技术传递

参与 URL 国际合作项目可以得到的直接收益是增加国际间的、学科间的接触，便于技术的交流。这对处置库开发的方方面面都是十分有益的，如场址特性评价和性能评价。

低成本高产出

参与国际合作项目的所有单位都可以分享全部研究成果，而无需自行承担全部费用。URL 的东道国也可以获得其他参与国提供的成果。这些成果既具有一般性的意义，同时也是东道国自己 URL 中的特定场址数据。非东道国可以通过观摹别人的研究实例取得实战经验，提高自身的技术与管理能力。当本国的处置库开发计划发展到 URL 阶段时，所有这些经验和能力

都将使开发研究更加有效。在 URL 中就某些试验开展国际合作，如结晶岩封堵方案的测试，还可以避免投资浩大的重复研究。

国际认同和提高信心

URL 对国际开放有助于得到国际上的认同，提高东道国处置计划的可信度。向外部专家开放、启用同行审查机制以及向广大公众通报研究成果等都有助于东道国建立对处置计划的信心。这一系列主动的举措无疑是在告诉公众、技术专家和其他利益相关者，对于所有紧要的问题及其解决途径，国际上早已有了合作解决的办法。

6、结论

开发地下研究实验室和/或参与别国的地下研发活动是推动放射性废物深地质处置工作的重要步骤。URL 可以为处置设施的选址、设计、基础工程支撑乃至安全评价提供重要的，有时甚至是关键性的技术支持和信心。地质处置库的特性评价、建造与运行中所必需的某些信息和经验只有进入地下真实的环境中才能获得。同样，在设施设计、主岩适宜性的工程可行性评价中的信心也只能通过地下验证才能建立。所有这些因素在建立处置库的安全预案时是非常重要的。

URL 既可以是普通地下实验室，绝不会存放任何废物、仅供研究之用；也可以建在特定

的场址上，这类 URL 最初用于科学调查和其他各种工作，然后转用于处置库建造和运行。对于多学科（如地质、水文和工程学）综合研究、技术队伍的建设以及实践经验的积累，URL 提供的机会是无与伦比的，而这些对于未来的处置库开发均具有不可估量的价值。在展示处置概念和处置计划技术可行性方面，在帮助广大公众确信处置库计划拥有坚实的基础并且是由值得信赖的工作团队以负责任的方式实施等方面，URL 提供的机会也是无可替代的。

URL 有益于促进国际合作。国际合作提供的相当于一个大型的高端人才会所，使不同国家、不同学科的专家汇聚一堂，增加接触、扩大交流，有利于处置库开发各个领域的研发；

国际合作还能提供低投入、高产出的科研机制，因为各种试验的费用可由若干参与合作的国家来分担；国际合作更容易取得广泛的国际认同、技术认同，便于提高废物监管机构和地质处置可行性方面的信心。

URL 内开展的工作内容是随时间推移而变化的。在最初的一批 URL 中，优先开展的研究工作包括设备、测试方法及试验的开发，这是为提高对一些关键作用的认识；还包括基础工程可行性研究以及采集基础地质数据。现在的研究趋势则大多侧重于对其他场址上开发的技术和装备实施最优化，使之适应每个特定场址的具体条件；开发模型验证所需的数据库；减少安全预案研究中的不确定性，提高对安全预

案的信心等。同时，与工程屏障系统有关的全尺寸验证试验也受到越来越多的重视。

在未来处置库运行期间以及处置库关闭以后，URL 仍将起到重要作用。在处置库开始处置真正的废物时，URL 可以作为模拟处置库，平行开展模拟废物的处置。在处置库整个运行期间乃至关闭以后，于 URL 之内，仍然可以就废物罐、回填材料及其他工程屏障材料的性能，采用各种手段，包括破坏性手段进行验证，而这种验证试验在处置库中是不可能的，或者只能想象一下而已。如果废物回取也成为处置作业的选项之一，那么 URL 还可以用作方法、设备开发和经验积累的平台。同样，关于地质圈性能的许多问题，均可以利用 URL 进行数十年

的监测，以便有机会检验或修正安全分析中所做的假设。

URLs 在提高公众信任程度方面的作用将是不可估量的。通过向公众开放 URL，公众可以亲眼看到各种技术工艺的开发和应用状况，会见参与项目研究的科技人员和工程人员并与之对话，直接提出质疑以及自己关切的问题，亲身体验深地质环境所提供的隔离程度（或水平）。这就能够建立对处置库计划的信心，提高公众的接受水平，这是多少资料，文献都无法办到的。因此，可以说，对于任何一个成功的处置库计划，URL 都是必不可少的条件之一。

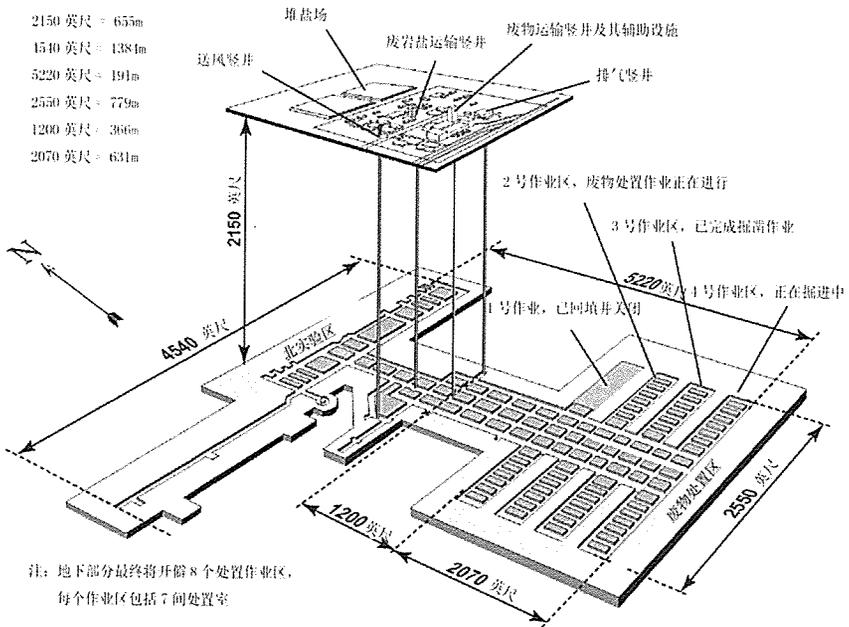


图 3: WIPP 设施及其地面部分与地下部分之关联示意图