

CO₂ 地质封存与高放射性核废物 地中处置的地质环境影响对比

石 晖¹ 刘兰翠² 李 琦¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北武汉 430071;

2. 环境保护部环境规划院气候变化与环境政策研究中心, 北京 100012)

摘要 高放核废物的地中处置(HLW)与CO₂的捕集与封存(CCS)在环境问题方面有一定的相似性。文章从物理性质、封存机理、环境影响角度,就CO₂和HLW地质处置的环境问题进行对比研究,旨在为CCS的环境风险管理提供思路。通过对比分析得出,泄漏的CO₂在地层和空气中的扩散能力较强,对人体健康、水体质量等都有一定的影响,但危害程度比较浅,持续时间也比较短;而泄漏哪怕极少的核素,其放射性和毒性都会对人体健康和环境安全造成很严重的威胁。因此,同样剂量泄漏的背景下,CO₂的环境影响没有HLW的环境影响严重,CO₂地质封存可以从核废物地中处置的环境管理中借鉴经验。

关键词 CO₂; 地质封存; 核废物; 地中处置; 环境影响问题对比

中图分类号 TE321

文献标识码 A

文章编号 1002-2105(2015)05增-0203-05

在中国目前高速发展的社会经济背景下,二氧化碳和核废物的处置问题是制约我国经济可持续发展、环境保护和国民安全的重大问题。本文从物理性质、封存机理、环境影响这几个角度对CO₂地质封存技术和高放核废物地中处置技术进行了比较深入的探讨。区别于以往文章^[1]从经济、政策、技术等方面进行比较宏观对比分析的研究,本文单纯着重从环境问题产生和发展的地质过程这一角度对两者进行详细的对比,从地质机理的角度探讨两者在环境问题方面的相似之处,旨在能够更加科学有针对性地利用高放核废物地中处置的现有经验,为CO₂地质封存的选址评价和环境风险评价提供合理的指导。

1 CO₂的地质封存(CCS)

CO₂主要是从静态的大型排放点源,如燃煤发电厂等排放的混合气体中捕获的。经过一系列的分离提纯之后,得到的气体主要成分是CO₂,另外还含有少量的H₂S和NO_x等杂质^[2]。超临界CO₂是指温度和压力均高于其临界值(T=31.1℃,p=7.38MPa)的CO₂流体。在超临界状态下,CO₂具有类似液体的高密度和接近气体的低粘度^[3]。储存在800m以下地层中的CO₂基本都是超临界流体的形式存在的^[4]。

1.1 CO₂地质封存的机理及泄漏通道

注入地层中的CO₂流体在注入压力和浮力的作用下会向着远离注入井各个方向流动。CO₂注入岩层孔隙,地层压力当然增加,有可能会引发一系列的问题^[5]:①使盖层中原有的微裂缝进一步扩张或者产生新的裂缝;②突破盖层的毛细压力;③活化断层,甚至诱发地震;④与周围水体之间的压力关系发生变化,从而导致原有地下水循环体系发生改变;⑤注入产生的压力还有可能会使原有的盐水进入地下淡水饮用水源,从而导致水质恶化;⑥由于地应力的变化,导致地表不均匀沉降。

注入的CO₂接触到地下水体就会形成碳酸,具有腐蚀性,和地层岩石中的矿物发生地球化学反应,从而会改变储盖层的渗透率、连通性等特征。在某些情况下,有可能会浸出周围岩体中的重金属元素或者其他污染物质,造成有毒重金属的迁移;如果注入区域周围有地下水饮用水资源存在,有可能受到污染。

超临界或者气态的CO₂在地下岩层中都具有浮力,因此,有可能通过未被检测出来的断层、裂缝或者封闭性不良的井筒,向上流动造成泄漏。CO₂还有可能溶解在地下水中,然后随着地下水系统的流动循环而被带到近地表,发生泄漏。另外,CO₂还有可能通过地质构造直接逃逸到海

收稿日期:2015-03-21

作者简介:石晖,硕士生,主要研究方向为CO₂地质利用与封存研究的环境地质风险评价。

通讯作者:李琦,博士,研究员,博导,主要研究方向为酸气回注、CO₂地质利用与封存。

基金项目:中国清洁发展机制基金赠款项目(编号:2012087);环保部CCUS环境风险管理试点研究项目(编号:2014A128);中欧煤炭利用近零排放合作项目(编号:2013-11)。

洋或大气中^[5]。

总的来说,CO₂地质封存的主要环境问题是,由于地层压力的变化和CO₂的腐蚀性,其有可能通过人为泄漏通道、地质构造泄漏通道以及跨越盖层和水力圈闭泄漏通道发生泄漏。

1.2 CO₂地质封存的环境影响

CO₂的泄漏可以分为两种情景:第一种情景,由于井筒密封性能失效导致的CO₂突然快速的释放。与这种释放有关的灾害主要影响发生地附近的工人或者前来处理井喷的人员,泄漏的量与注入的总量相比很少,对土壤、地下水资源等不会产生太大的影响,但对空气和人群健康会产生暂时性的影响。第二种情景,通过未被发现的断层、断裂或者地下水系统发生缓慢泄漏。主要影响饮用水资源和生态系统,因为CO₂是通过地下水或者岩石土壤进行从下至上的缓慢泄漏的,CO₂聚集在地面以下的区域。可能导致地下水的污染、土壤的酸化、土壤中氧的置换、近地表生物群落的损失。如果在无风的低洼地区、蓄水池底部或者地下室等封闭区域发生泄漏,一旦没有及时监测到该泄漏现象,将极有可能对人和动物造成伤害。

CO₂泄漏有可能影响地下水水质、动植物健康,另外还有土壤酸化、生物多样性和种群组成变化以及人和动物的窒息等风险。CO₂浓度升高会导致pH值、微生物分布、营养供应改变,从而改变生物化学进程,影响地下水水质,酸化溶解周围岩体中矿物质,造成重金属元素迁移。CO₂对微量元素迁移的作用是一个常见地质作用,尽管它以非常慢的速率发生在非常大的时间尺度内。多位科学家都曾提出重金属通过CO₂泄漏而发生迁移这一观点^[6]。

2 高放核废物的地中处置

核废物是含有放射性核素或被放射性核素所污染,其放射性核素的浓度或活度大于监管机构确定的清洁解控水平并且预期不再使用的物质^[7]。放射性废料来源有很多种,其中最主要包括核燃料及核武器的再加工^[6]。这里我们考虑的主要是核燃料循环中产生的放射性废物。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,已有较成熟技术对低、中放废物进行最终安全处置^[8]。高放射性废物的突出特点是,对人体和生态系统危害非常大,并且其危害不能通过物理化学或者生物手段进行消除,只能对其进行足够长时间的隔离,经过放射性核素的自然衰变后,最终达到无害化水平。目前主要的处理思路是深部地中处置,由于封存的高放核废物毒性大、放射性强、危害大、衰变周期长,必须长期与自然环境隔离,因而要求处置库的寿命至少要达到1万年^[9]。

2.1 放射性核素的物理性质

放射性核素是能够自发地从不稳定的原子核内部放出粒子或射线(如α射线、β射线、γ射线等),同时释放出能量,最终衰变形成稳定的元素。过量的射线对人体是有很大危害的,有些会增加人罹患癌症的风险,导致婴儿基因变异,物种发生基因异常。放射性核素本身就有毒性,比如铀是毒性很强的重金属元素。

2.2 HLW地中处置的机理及泄漏通道

高放核废物主要来源于核电站后期化学处理过程和乏燃料。其一般处理过程是,先将核反应堆所产生的含有铀、钚、镉、铯等放射性核素的乏燃料进行高浓度强酸化处理,将其中的铀和钚进行回收利用。再将剩余的酸性液体用氢氧化钠稀释中和放入铁箱中存放衰变放热直到其温度降低到一定程度,然后进行固化分装,最后运送到处置场地进行地中处置^[10]。除丹麦拟采用深钻孔储存外,世界各国均拟优先考虑深部地下洞室储存^[11],储存场地一般位于地下500m左右的岩洞内。将固化体储存在废物罐里,放置到建设好的地下钢筋水泥巷道中,最后用膨润土作为缓冲回填材料封闭巷道,等到工程结束之后,封闭场地,将高放核废物永久封存在这样一个“多重屏障系统”中^[12]。

在处置库开挖建造过程中,抽取地下水等会对地下介质场产生影响。由于孔隙水压力的降低以及施工扰动的影响,地下介质场的原岩应力会发生变化,造成围岩变形,这种变形在今后可能会影响到岩体孔隙率、地下水流动、热量传递以及核素迁移等^[13]。场地关闭,处置库进入运行阶段之后,高放核废物的存在相当于在地下介质场中埋进了一个热源。热源的存在改变了地下介质场的温度分布,而温度的变化通过影响流体黏度、流体密度、流体相态而影响到流体的运移形态,也使一些物质的化学性质发生变化,从而直接影响到核素迁移;另外温度变化在岩石中形成所谓的热应力^[14],造成裂隙的张开与闭合,影响到地下应力场。

场地关闭之后,地下水位将会在几年之内缓慢地恢复到原来的位置,在此过程中,地下水将会缓慢地进入处置库,浸透回填材料。鉴于没有任何一种人为材料能够保持强度和密封性几万年甚至几十万年,地下水终究会腐蚀容器,浸出固化体中的放射性核素。并且随着地下水系统的循环,将放射性核素带出处置库,使其有机会进入生物圈,对人类造成危害。如果处置库周围的地下水是有利用价值的或者通过地质循环系统能够与有价值的地下水资源沟通,也就污染了地下水^[15]。

2.3 高放核废物地中处置的环境影响

2.3.1 环境影响的方式

处置库中的核素可能因为两种原因进入生物圈:①由

隔离失效引起:比如人类的直接介入;各种地质灾害如地震、火山爆发、断层活动、滑坡等重大事故^②由于地下水的作用引起:废物固化体的包装是有一定的使用年限的,在放射性核素的热能、辐射能以及地下水流的分解腐蚀作用之下,其机能会在不远的未来失效。这样一来,地下水能够直接接触固体废弃物,并对其进行分解,将放射性核素浸出。

由隔离失效导致的核素返回生物圈一般可通过选择相对稳定的处置场址来解决。相比而言,放射性核素随着地下水循环进入生物圈的风险性要更大一些。主要的环境承灾体是生物圈。放射性辐射会直接或者通过水体、土壤、动植物等介质对人体健康产生影响。总的来说,高放核废物地中处置的主要环境问题是,由于开挖扰动、辐射放热以及处置库失效等原因,核素被地下水浸出,放射性核素会在地下水循环的作用下,进入生物圈和水圈,对生态系统和人类健康造成危害。

2.3.2 放射性对人体及生物的影响

2004年世界卫生组织根据欧盟标准给出居民饮用水天然放射性的有效剂量的推荐值应低于0.1 mSv/a。我国2005年规定居民饮用水总 α -放射性剂量低于0.5 Bq/L (GB 8537-2005)^[16]。

地下掩体中的放射性核素难免会有一些量的泄漏,但是这种泄漏一定是十分缓慢的并且发生在很遥远的将来,工程掩体和周围岩体可以有效的限制大部分核素的迁移,只有极少数的会到达近地表环境中,而且由于运移过程中的扩散,泄漏核素的浓度得到极大的稀释,另外,在那个时候,由于放射性元素的衰变,泄漏的危害会有相当大程度上的减轻,因此最终对人体造成影响核辐射当量是很少的。根据IAEA的规定,个体每年从一个关闭的核废物地中处置点吸收的核辐射剂量当量的水平不应达到0.3mSv,这远远低于某些地区的自然背景值,并且在很多国家和地区,对放射性当量的要求比0.3mSv还要更加严格。因此,如果能够达到安全性和设计要求,高放核废物的地中处置是很安全的,毕竟有很多同样毒性和危害性很大的污染物的处理现状和监管力度要远远糟糕于核废物的,却没有引起足够的重视。

3 环境问题的对比研究

从储存物质的物理性质、储存机理及泄漏通道、主要的环境影响这几个角度来进行对比分析^[1]。

3.1 CO₂和核废物的性质及其来源

CO₂是空气的基本成分,高浓度的CO₂具有窒息风险、空气污染风险、土壤/水质酸化风险、植被损害风险。

核废物泄漏带来的是放射性危害,包括放射性暴露对人身体的直接损害和通过个体摄入的空气和食物等造成的放射性以及毒性危害。放射性对人体的伤害取决于很多因素,比如暴露剂量、暴露时间以及暴露个体的年龄和身体情况等。国际辐射防护委员会(ICRP)目前正在着手建立一个放射性对相关动植物物种影响的评价框架,旨在对放射性暴露地区进行环境保护。

3.2 储存机理

CO₂是以超临界流体的形式直接注入到渗透性良好的储层中的,而核废物则是被放置在抗腐蚀的多层容器中,然后掩埋在由钢筋水泥建成的地下约500m深度的巷道中的。CCS的环境评价着重于CO₂在地层中的运移性质,以及泄漏通道的可能性、安全性分析^[17];而核废物地中处置的环境评价就着重于放射性核素随地下水的迁移。

3.3 环境影响

CCS风险有以下几个特点:在地层中或者是泄漏至地表之后,其扩散能力比较强,扩散范围比较大;CO₂有窒息风险,但是由于空气流通,经过一段时间之后,原来浓度过大的区域又能恢复到正常的浓度水平,人类和动物仍然可以回到原来的家园生活,对经济、文化以及生态的影响都比较小。而核素只能依靠地下水的流动扩散运移;某一区域一旦被放射性核素污染,就很难通过生物或者物理化学的方法将其清除干净,人群需要全部撤离,动植物也很难再在这样的地区正常生活繁衍,对经济、文化尤其是生态有毁灭性的打击。

总的来说,CO₂地质封存和核废物地中处置的相似之处有:废弃物都可以经由地下水循环被带至生物圈;封存地点的选址原则相似:都对周围地下水循环状况、断层活性、盖层完整性、盖层延展范围等有严格的要求。差异则主要体现在:CO₂可以以流体或者气体的形式通过断层等泄漏通道自主扩散至近地表,而核素则必须依赖流体介质;放射性核素可以为动植物等吸收,进而为人体所吸收,对人体造成永久的放射性伤害;CO₂地质封存对人体的影响受到空间范围影响,且是短期的、可治愈的,见表1。

4 结 语

CO₂以流体的形式注入到储层中,利用低渗透性盖层的封闭性将其保存在地层中。高放核废物地中处置是将固化的高放核废物存入特制的容器,放置到已开挖好的地下处置库中。两者在封存机理上有比较大的差异,CO₂流体与地层矿物以及地下流体直接接触,发生各种物理和化学反应,作用的范围非常广;虽然高放核废物地下处置库的放热和辐射等等也会改变周围岩石和地下流体的性质,

表1 CCS和HLW地中处置对比

	CCS	HLW	主要差异
物化性质	常温常压下为无色无味的无毒气体;能够溶解于水体,并使水体呈酸性;高浓度对动植物以及人类有危害;	在储藏室中以固化物的形式存在;毒性大、放射性强,危害大,衰变周期长	核废物毒性大,且具有放射性
主要来源	静态的CO ₂ 排放点源,如燃煤发电厂、水泥钢铁厂等;CO ₂ 的捕集和提纯需要建立大型的基础设施,并且捕集的过程需要消耗大量的能源	乏燃料和核武器的再加工;核废物的捕集过程相对工作量比较小,但核废物运输过程的风险要远大于CO ₂	CO ₂ 的捕集工作量巨大且耗能巨大,该阶段耗能约占整个CCS总耗能的1/3;核废物耗能相对较小,但运输过程风险大
储存机理	CO ₂ 是以超临界流体的状态分布在具有一定渗透性的储层中的	核废物是以固化物的状态被放置在人工修建的透水性极差的人工储藏室中的	在储层中的状态不同
泄漏通道	以流体或者气体的形式通过断层等泄漏通道扩散至近地表;主要的泄漏通道有废弃井、注入井、未被发现的断层裂隙或者跨越盖层和水力圈闭逃逸	经由地下水循环被带至生物圈;处置室的开挖对场地扰动比较大,而且其放热量巨大,初始应力场可能会产生比较大的改变,产生孔隙等	注入的CO ₂ 流动性较强,对储层产生压力;放射性核素相对被动,只有待处置室被浸透之后,溶解于地下水中,经由地下水循环,但处置室的开挖扰动大
环境影响	能以气体的形式泄漏到大气中;泄漏扩散能力强,危害范围广;暂时性危害,可恢复	通过溶解于地下水中,被带入生物圈发生泄漏;扩散能力不强;但危害严重,一旦污染就会造成永久性危害,不能恢复	CO ₂ 造成的是暂时性危害;核废料则会产生永久性严重危害
公众敏感程度	近几年来,随着温室效应的日益严重和人类对自然环境关注的增多,人们对于CO ₂ 减排的问题越来越关注	高放核废料因其严重的放射性危害,始终是公众敏感话题	公众对高放核废物的敏感程度远远高于CO ₂ ,但近年来国际社会也越来越关注CO ₂ 的问题

但其作用范围相对地层中的CO₂来说,要小很多,因此CCS对其封存场地大范围内盖层的完整性要求是高于HLW地中处置的。

CCS主要的环境问题在于CO₂的泄漏,因此在选址时对封存场地周围的地下水流通情况进行详细的调查研究;HLW主要的环境问题则是核素的迁移,核素的迁移必须依赖流体介质,对高放核废物地中处置而言,地下水的交互性以及储层周围的渗透率是首要的考虑因素。

CO₂扩散能力比较强,一旦泄漏到地表,其影响范围比较大,对人和动物有窒息的危害,其特点可以归结为作用范围广,危害比较严重,不过属于暂时性的危害;而核废料的作用范围比较窄,但某一区域一旦被核素污染,在很长的一段时间之内都难以消除干净,人和动物都难以在此处生存繁衍,因此其特点可以归结为作用范围窄,但危害十分严重,而且是永久性的危害。

另外从法律监管的角度,高放核废物的地中处置的现有法规对CO₂地质封存法规的建立有很好的借鉴意义。《放射性污染防治法》支配着从源头到最终处置全过程中的放射性污染管理,包括运输过程。现有的这部中国法律包含了用于选址、监测、应急响应、以及公共教育,所有这些对于CO₂地质封存项目都有非常重要的参考意义^[24]。

就单个的技术环节来看,CO₂地质封存的某些技术环节已经达到了大规模工业化利用的成熟水平,但是,作为一个长流程的复杂项目,CO₂地质封存还需要很多经验积累,在工艺流程和质量控制以及法律监管方面,需要从高放核废物地中处置中借鉴一些已成熟的经验。

总的来说,由于两者环境问题等方面有一定的相似性,在地质封存的选址、环境的监测控制、全流程运行和监管法律法规的制定方面,CO₂地质封存可以从高放核废物的地中处置中借鉴经验。CCS和HLW环境问题的对比研究,对还在制定中的CO₂地质封存的环境风险评估指南具有一定的指导意义。

(编辑:刘照胜)

参考文献

- [1] West J M, Shaw R P, Pearce J M. Environmental Issues in the Geological Disposal of Carbon Dioxide and Radioactive Waste [M] // Toth F L. Geological Disposal of Carbon Dioxide and Radioactive Waste: A Comparative Assessment. 2011: 81-102.
- [2] Xie H, Li X, Fang Z, et al. China's Carbon Geological Utilization and Storage: Current Status and Perspective [J]. Acta Geotechnica, 2013, 9(1): 7-27.
- [3] 何涛,胡红旗,陈鸣才,等. 超临界CO₂-高分子化学中的绿色介质[J]. 功能高分子学报, 2003, 16(2): 281-286.

- [4] Spilimbergo S, Kikic I. Thermodynamics of Solutions of CO₂ with Effects of Pressure and Temperature [M]//Balaban M O, Ferrentino G. Dense Phase Carbon Dioxide. Wiley - Blackwell, 2012: 5 - 35.
- [5] Li Q, Liu X, Du L, et al. Review of Mechanical Properties Related Problems for Acid Gas Injection [M]//Wu Y, Carroll J C, Li Q. Gas Injection for Disposal and Enhanced Recovery. New York: Wiley, 2014: 275 - 292.
- [6] 罗上庚. 核废物的安全和环境影响[J]. 安全与环境学报, 2001, 1(2): 16 - 20.
- [7] Pusch R. Geological Storage of Highly Radioactive Waste [M]. Berlin: Springer, 2008.
- [8] Liu L, Li Q, Zhang J, et al. Toward a Framework of Environmental Risk Management for CO₂ Geological Storage in China: Gaps and Suggestions for Future Regulations [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2014: 10 - 1007.
- [9] Witherspoon P A, Bodvarsson G S. Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation: Third Worldwide Review [G]. DOE. Berkeley, CA, USA: LBNL, 2001.
- [10] 滕伟锋, 王晓东, 李玲利. 核废料固化基材的研究现状[J]. 中国建材科技, 2011(5): 55 - 58.
- [11] 罗嗣海, 钱七虎, 周文斌, 等. 高放废物深地质处置及其研究概况[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 831 - 838.
- [12] 王驹, 陈伟明, 苏锐, 等. 高放废物地质处置及其若干关键科学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 25(4): 801 - 812.
- [13] 沈珍瑶, 程金茹. 高放射性核废物深地质处置的环境问题[J]. 地质通报, 2002, 21(3): 163 - 165.
- [14] 赵彦东, 赵文奎, 柯尊乾, 等. 温度对深井岩石力学性质的影响[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2010, 12(2): 71 - 73.
- [15] Alexander W R, Mckinley L. Deep Geological Disposal of Radioactive Waste [G]. Oxford: Elsevier, 2007.
- [16] 张智, 郑素华, 张茜, 等. 临汾市居民饮用水及去离子饮用水中总天然 α -放射性剂量评估[J]. 山西师范大学学报: 自然科学版, 2012, 26(3): 44 - 47.
- [17] Li Q, Liu G, Liu X, et al. Application of a Health, Safety, and Environmental Screening and Ranking Framework to the Shenhua CCS Project [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013, 17: 504 - 514.
- [18] Seligsohn D, Liu Y, Forbes S, et al. CCS in China: Toward an Environmental Health, and Safety Regulatory Framework [R]. World Resources Institute, 2010.

A Comparative Study of Geo-environmental Impacts of CO₂ Geological Storage and High Level Nuclear Waste Geo-Disposal

SHI Hui¹ LIU Lan-cui² LI Qi¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Center for Climate and Environmental Policy, Chinese Academy for Environmental Planning, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100012, China)

Abstract As a geological disposal engineering, CCS is similar with the geological disposal of high-level radioactive waste (HLW) in the aspect of technology and environmental problems. In an effort to provide some new ideas for the environmental risk management of CCS, this paper presented a contrastive analysis of the environmental problems of CCS and HLW from the aspects of physical property, disposal mechanism and environmental impacts. Through the comparative analysis, it is concluded that high-level CO₂ may cause irritation to mucous membranes and respiratory tract, lead to suffocation, acidize soil and water, affect the survival of flora and fauna, and even cause damage to the ecosystem. The diffusivity capacity of CO₂ is more powerful than radionuclide, however, the harmful level of CO₂ is smaller than radionuclide, and the duration is shorter than radionuclide. Even if few radionuclide will result in severe damage to the human health and environmental security. Hence, CCS can learn some experiences and lessons from the environmental management of HLW.

Key words carbon dioxide; geological disposal; high-level radioactive waste; comparative analysis