

# 基于 Safety Case 的岩洞处置库长期安全分析

尹文成<sup>1,2</sup>, 潘跃龙<sup>1,\*</sup>, 刘羽<sup>1</sup>, 马健<sup>1</sup>, 李同同<sup>1</sup>, 张学岭<sup>1</sup>, 杨林君<sup>1</sup>

1. 中广核工程有限公司 核电安全技术与装备全国重点实验室, 广东 深圳 518116;

2. 中山大学 中法核工程与技术学院, 广东 珠海 519082

**摘要:** 岩洞处置是国际公认的低、中水平放射性废物(LILW)最终处置的技术路线之一。本研究旨在引入国际原子能机构(IAEA)推荐的“安全全过程系统分析(Safety Case)”理念, 将其应用于我国某花岗岩岩洞处置预选场址, 量化评估多重屏障系统在关闭后 100 万年内的长期演化行为, 识别关键风险要素, 为场址选择、设计优化及监管审查提供技术支撑。首先, 基于国际数据库并结合场址特性, 建立本地化的特征-事件-过程(FEPs)筛选体系。其次, 采用自上而下与自下而上相结合的方法, 开发了包含正常演化、扰动、人为侵入及极端假设在内的综合场景框架。最后, 采用 ECOLEGO 程序构建全系统核素迁移模型。模拟计算表明, 在正常演化场景下, 公众年有效剂量峰值仅为  $2.61 \times 10^{-9}$  Sv(约出现在关闭后 19.2 万年), 远低于 GB 13600—2024 规定的 0.25 mSv 限值, 长期剂量主要由 <sup>99</sup>Tc 和 <sup>129</sup>I 贡献。当假设工程屏障在关闭时立即失效, 其对百万年尺度的剂量峰值影响微弱, 表明工程屏障主要在早期(小于 500 年)有效包容 <sup>90</sup>Sr 和 <sup>137</sup>Cs 等短寿命高活度核素。然而, 在岩石圈存在快速通道的扰动场景(旁路场景)下, 公众年有效剂量峰值跃升 4 个数量级(至  $7.61 \times 10^{-5}$  Sv), 峰值出现时间大幅提前至约 625 年, 且高迁移性的 <sup>14</sup>C 成为绝对主导的核素。研究显示该花岗岩场址具备建设低中放废物岩洞处置设施的优良地质与水文条件。多重屏障系统呈现出“工程屏障保短期、地质屏障保长期”的跨时间尺度协同阻滞机制。花岗岩围岩的基质扩散与吸附作用是阻滞长寿命阴离子核素的核心防线。由于地质快速旁路是系统长期安全的最大潜在威胁, “避开并有效阻断快速水力联系通道”是未来岩洞处置工程选址与设计必须坚守的关键红线。

**关键词:** 岩洞处置; 安全全过程系统分析; 特征-事件-过程(FEPs); 场景开发; 花岗岩

中图分类号: TL942

文献标志码: A

文章编号: 0253-9950(2026)02-0179-09

doi: 10.7538/hhx.2026.48.02.0179

## Long-Term Safety Analysis of Rock Cavern Disposal Repository Based on Safety Case

YIN Wencheng<sup>1,2</sup>, PAN Yuelong<sup>1,\*</sup>, LIU Yu<sup>1</sup>, MA Jian<sup>1</sup>, LI Tongtong<sup>1</sup>,  
ZHANG Xueling<sup>1</sup>, YANG Linjun<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Nuclear Power Safety Technology and Equipment,  
China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518116, China;

2. Sino-French Institute of Nuclear Engineering and Technology, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China

**Abstract:** For low- and intermediate-level waste(LILW) containing long-lived radionuclides, rock cavern disposal in stable geological formations is an internationally recognized approach. However, compared to

near-surface disposal, rock cavern disposal involves more complex hydrogeological environments and significantly longer time scales. Traditional single safety assessments struggle to fully demonstrate system robustness and address epistemic uncertainties. Therefore, this study aims to apply the “Safety Case” methodology recommended by the International Atomic Energy Agency(IAEA) to a specific granite candidate site in China. The objective is to quantitatively evaluate the long-term evolutionary behavior of the multi-barrier system over a period of one million years post-closure, identify key risk factors, and provide scientific and technical support for site selection, barrier design optimization, and regulatory review. Researchers established a localized “features, events, and processes” (FEPs) screening system based on international databases and site-specific characteristics. Subsequently, the study developed a comprehensive scenario framework using a combination of top-down system failure analysis and bottom-up FEPs integration. This framework included normal evolution scenarios, disturbed scenarios(e.g., engineered barrier failure, geosphere bypass), human intrusion scenarios, and “what-if” extreme scenarios. Furthermore, the researchers constructed a system-level radionuclide migration model using the ECOLEGO code. To address the heterogeneity of the fractured granite medium, a “dual-continuum” conceptual model was applied. The quantitative simulations indicate that under the normal evolution scenario, the peak annual individual effective dose to the public is  $2.61 \times 10^{-9}$  Sv, which appears at approximately 192 000 years post-closure. This value remains far below the 0.25 mSv dose limit stipulated by the national standard GB 13600—2024. Long-lived nuclides, specifically  $^{99}\text{Tc}$  and  $^{129}\text{I}$ , act as the major contributors to the long-term dose. In disturbed scenarios where engineered barriers fail immediately upon closure, the impact on the million-year peak dose remains negligible. This indicates that engineered barriers primarily serve to contain high-activity, short-lived nuclides(such as  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$ ) during the early post-closure phase(less than 500 years). Conversely, the geosphere bypass scenario reveals a significant risk. If an undetected fast hydraulic pathway exists in the rock matrix, the peak annual effective dose surges by four orders of magnitude to  $7.61 \times 10^{-5}$  Sv, and the peak time shifts drastically forward to around 625 years. Under these bypass conditions, the highly mobile nuclide  $^{14}\text{C}$  becomes the absolute dominant contributor to public exposure. The study validates the long-term safety and suitability of the selected granite site for LILW rock cavern disposal. The multi-barrier system demonstrates a clear cross-timescale synergistic retardation mechanism, which translates to “engineered barriers ensure short-term safety, while geological barriers ensure long-term safety.” The matrix diffusion and physical-chemical adsorption mechanisms within the granite host rock serve as the absolute core defense line for retarding long-lived anionic radionuclides over geological timescales. Finally, the research highlights that undetected geological fast bypasses represent the greatest potential threat to the long-term safety of the disposal system. Consequently, avoiding and effectively blocking fast hydraulic pathways serves as a fundamental constraint and critical red line for future site selection, engineering design, and safety evaluation.

**Key words:** rock cavern disposal; Safety Case; features, events, and processes(FEPs); scenario development; granite

放射性废物的安全处置是保障核能可持续发展的重要环节。对于含有一定数量长寿命核素的低、中水平放射性废物<sup>[1]</sup>,利用数十至数百米的稳定岩体作为天然屏障建造岩洞处置库,结合工程屏障系统,实现放射性物质的长期隔离,是国际公认的安全处置技术路线<sup>[2]</sup>。随着我国核电规

模的扩展,推进低、中放废物岩洞处置工程建设的需求已十分迫切。然而,相较于近地表处置,岩洞处置涉及更复杂的水文地质环境和更长的时间尺度,传统的单一“安全评价”难以充分论证系统的稳健性与认知不确定性。

国际原子能机构(IAEA)与经合组织核能署

(OECD/NEA)提出的“安全全过程系统分析”(Safety Case)体系<sup>[3-4]</sup>,强调通过多重证据链、系统化的特征、事件及过程(FEPs)管理及不确定性分析来构建安全信心<sup>[5]</sup>。瑞典低、中放废物最终处置库(Final Repository for Short-Lived Radioactive Waste, SFR)、芬兰核废物处置库 ONKALO 和加拿大 DGR 等成熟处置库均采用此框架<sup>[6-7]</sup>。

国内,部分研究机构已基于甘肃北山、飞凤山等地区开展了深地质处置和近地表处置的地质调查与方法研究<sup>[8]</sup>,关于 Safety Case 的研究多侧

重方法论探讨,针对具体场址环境和国内特定工程设计的全流程应用案例不足<sup>[9]</sup>。表1为 Safety Case 体系的安全评价与常见的安全评价的特征对比。如表1所示,常见的安全评价主要依赖确定论计算,对模型和参数等的长期不确定性和敏感性分析的研究相对薄弱<sup>[10]</sup>,导致分析结果的稳健性受限<sup>[11]</sup>。随着我国低、中放废物岩洞处置示范工程的推进,如何将国际通用的方法论与中国特定的地质条件和工程条件相结合,识别关键风险要素并反馈于工程设计,是当前亟需解决的实际问题。

表1 常见的安全评价与 Safety Case 体系安全评价的特征对比

Table 1 Comparison of Traditional Safety Assessment and Safety Case

维度	常见的安全评价	Safety Case体系的安全评价	建议改进方向
核心目标	验证剂量是否达标	建立对系统安全性的多重信心	强化定性论据与多重屏障的协同效应论述
数据流向	线性:输入→结果	迭代闭环:结果→优化→再评估	强调评价结果对工程设计的反馈机制
呈现形式	静态报告、独立章节	数字化、集成化、可追溯的知识库	探讨FEPs数据库与数值模型的数字化接口
不确定性	关注参数分布范围	区分认知与随机不确定性,关注模型结构风险	引入全局敏感性分析(GSA)和模型偏差讨论
时间尺度	关注合规期(如1000年)	覆盖全演化周期(至百万年)	结合地质演化史论证百万年尺度的稳定性

本工作拟以我国某花岗岩预选场址为研究对象,开展基于 Safety Case 的关闭后长期安全分析。研究重点在于解决 FEPs 筛选的场址适应性问题,通过构建“正常-扰动-极端”分级场景体系,量化评估多重屏障系统的协同演化行为。研究成果旨在为工程选址适宜性评价、工程屏障设计优化及监管审查提供具有实证意义的技术支持。

### 1 分析方法与模型构建

本研究遵循国际 Safety Case 框架(图1<sup>[12]</sup>),结合我国法规要求及岩洞处置预选场址的特征,制定了包含“安全功能分解→FEPs 筛选→场景开发→数值建模→结果分析”的迭代评价流程。

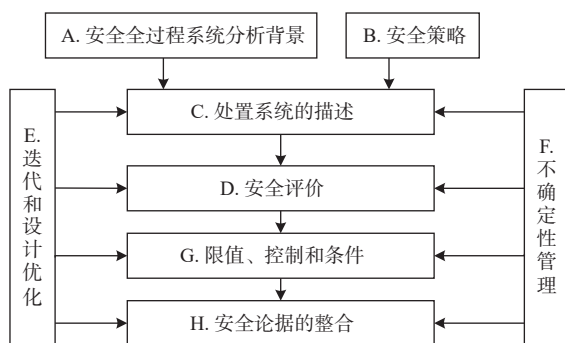


图1 安全全过程系统分析的组成<sup>[12]</sup>

Fig. 1 Elements of the Safety Case<sup>[12]</sup>

#### 1.1 评价对象与评价指标

岩洞处置库预选场址位于地下约 200 m 微风化花岗岩中,采用长隧道岩洞设计,一期工程的设计容量为  $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。结合国际经验和实际场址条件<sup>[13]</sup>,确定处置系统的核心安全功能为:

(1) 物理包容:通过废物固化体与高完整性容器等限制核素的早期释放;

(2) 延迟滞留:利用工程屏障(如混凝土、膨润土回填材料)及围岩矿物对核素的吸附等相互作用延迟核素的迁移<sup>[14-15]</sup>;

(3) 地质隔离:利用稳定地质体(花岗岩)限制地下水流速并提供长距离迁移通道,与生物圈实现长期物理隔离。

场址整体处于地质构造稳定区,围岩渗透系数主要分布在  $10^{-12} \sim 10^{-9} \text{ m/s}$ ,属低渗透性岩体。场址水文地质条件良好,属于相对独立的水文单元,地下水主要沿裂隙网络缓慢流动。场址水文地质示意图示于图2。从图2可以看出,场址处于相对独立的地下水流系统中,降水入渗后主要沿裂隙向两侧排泄,这为后续水文地质概念模型的边界条件设定与流场概化提供了依据。

该设施主要接收核电厂运行和退役期间产生的低放水泥固化体废物和高完整性容器废物。

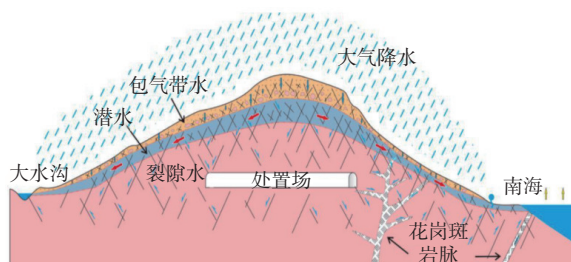


图2 岩洞处置预选场址水文地质示意图

Fig. 2 Hydrogeological schematic of candidate site for rock cavern disposal

根据废物源项特征,重点关注的放射性核素包括 $^3\text{H}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{63}\text{Ni}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{99}\text{Tc}$ 及 $^{129}\text{I}$ 。处置隧洞底部与侧面回填混凝土及膨润土,顶部空间回填膨润土和碎石,对废物包处置容器间隙填充水泥砂浆,隧洞两端设封堵结构。

依据《放射性固体废物岩洞处置安全规定》(GB 13600—2024)<sup>[16]</sup>,处置库通过各种途径向环境释放的放射性核素对公众中关键人群组的成员造成的年有效剂量不超过0.25 mSv。为体现保守性,本研究设定剂量评价指标为对公众中关键人群组的成员造成的年有效剂量不超过0.01 mSv(正常场景)和1 mSv(扰动场景)。评价时间尺度覆盖设施关闭后100万年,为长期安全管理和政策决策提供参考。

## 1.2 FEPs识别与筛选

FEPs筛选是建立概念模型的基础。本研究

基于OECD/NEA国际FEPs数据库及瑞典、芬兰、加拿大等处置库分析案例,结合花岗岩预选场址特性,采用关联映射及针对性筛选的方法,构建了项目FEPs清单。

(1) 建立概念模型的基础:映射国内外成熟处置库FEPs清单,并依据预选场址的具体地质与气候条件进行“本地化”物理适用性剔除与保留。例如,鉴于该场址位于我国华南沿海构造稳定地块,无历史冰川记录且处于非火山活动带,明确剔除了“冰川剥蚀”与“火山活动”等FEPs;相反,针对其临海地质特征,针对性地保留并细化了“海水入侵”与“地壳隆起/沉降”等与滨海环境密切相关的过程。

(2) 工程适应性筛选:针对该项目采用的混凝土衬砌与高完整性容器(HIC)的组合设计,在工程屏障演化中特别纳入并细化了“混凝土降解产生高碱性羽流(影响围岩吸附截留)”及“金属腐蚀/微生物降解产气导致局部超压”等精细化过程。

(3) 筛选结果:最终通过专家研判与层次分析法(AHP)辅助,充分评估FEPs的重要性和相关性,确定了约100项关键FEPs作为模型输入。

## 1.3 综合场景开发策略

场景(Scenario)是处置系统随时间发生的变化过程和事件的假设序列,反映处置系统可能的演化路径,是概念模型的核心输入。图3为综合

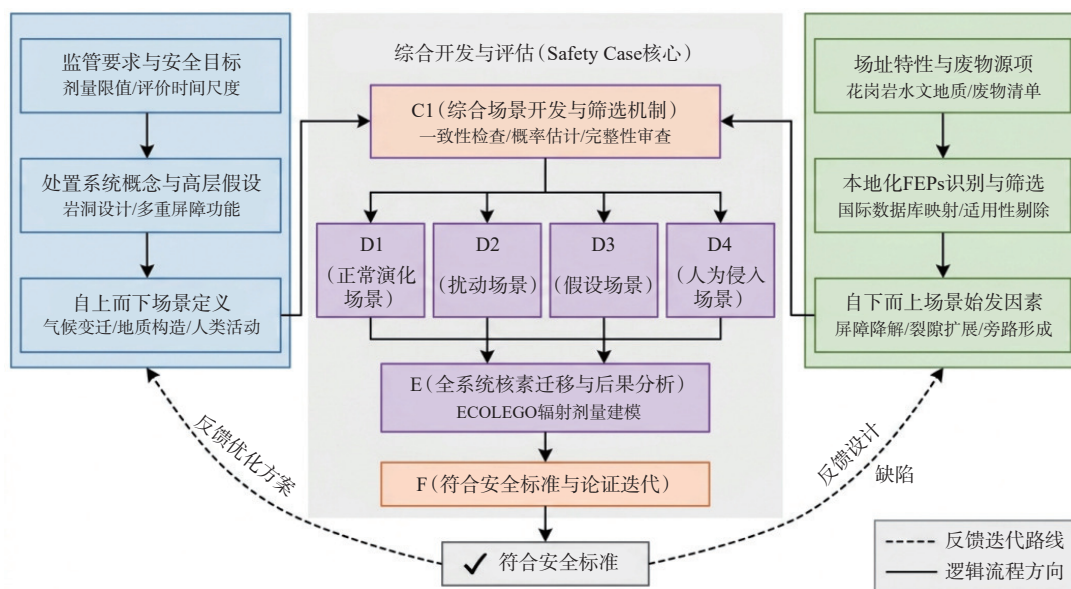


图3 综合场景开发流程

Fig. 3 Process of comprehensive scenario development

场景开发流程。如图3所示,本研究在筛选后的FEPs基础上,采用“自上而下”的系统失效分析与“自下而上”的FEPs组合相结合的方法,构建了四类场景。

(1)正常演化场景:假设气候及地质环境稳定,处置系统的预期演化过程,如废物衰变、容器腐蚀、工程屏障随时间缓慢失效及地下水缓慢渗流等。

(2)扰动场景:考虑可能发生的自然或工程扰动,如气候波动、岩体裂隙扩展、回填材料失效。

(3)假设场景:夸张地假设或放大某一层屏障受损的影响,用于体现或评价一个或多个屏障的特性和坚稳性,如大规模地震、地下水位异常上升等。

(4)人为侵入场景:模拟未来可能的人类入侵或其他人类行动对处置系统的影响,如未来人类无意钻探等行为。

最终形成的“场景树”可为后续数值模拟与剂量风险分析提供指导。

### 1.4 模型构建与计算工具

安全评价模型是将场景转化为量化结果的关键工具,包括概念模型、数学模型与计算模型三个层次(图4)。如图4所示,处置安全评价模型链清晰地涵盖了从近场工程屏障到远场天然地质屏障、再到地表生物圈的多级耦合过程。本研究采用库室模型软件ECOLEGO进行全系统模拟。针对花岗岩裂隙介质的非均质性,采用“双重连续介质”概念模型,将裂隙水流视为快速通道、岩石基质微孔隙视为滞留区,通过对流-弥散

方程耦合基质扩散项进行数学描述,其中涵盖了放射性衰变、吸附、沉淀、配位等关键机制<sup>[17-18]</sup>。

主导裂隙中核素迁移的控制方程一般表示为:

$$R_f \frac{\partial C_f}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C_f}{\partial x^2} - v \frac{\partial C_f}{\partial x} - \lambda R_f C_f + \frac{2D_e}{b} \frac{\partial C_m}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (1)$$

岩石基质内部微孔隙的扩散方程为:

$$R_m \frac{\partial C_m}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 C_m}{\partial z^2} - \lambda R_m C_m \quad (2)$$

式中:  $C_f$ 和 $C_m$ 分别为核素在主导裂隙水和基质孔隙水中的浓度;  $v$ 为裂隙中地下水实际流速;  $D_L$ 为纵向弥散系数;  $\lambda$ 为核素衰变常数;  $R_f$ 和 $R_m$ 分别为裂隙和岩石基质的阻滞系数(体现吸附等化学滞留机制);  $D_e$ 为有效扩散系数;  $D_a$ 为表观扩散系数;  $b$ 为裂隙水动力学有效宽度;  $x$ 为沿裂隙地下水流动方向的距离;  $z$ 为垂直于裂隙表面的向基质内部延伸的距离。通过上述偏微分方程组的多场耦合计算,分析屏障系统对长期安全的贡献。

## 2 场址应用与结果分析

在完成FEPs筛选与场景开发后,本研究针对处置系统在未来百万年内的不同演化路径,设定了4大类共计14个具体计算算例,各项算例的假设条件及目的列于表2。

具体而言:“正常演化场景(NS系列)”用于评估系统在预期状态下的长期性能,并分别考虑了内陆地表水体(大水沟)与海洋水体(南海)作为最终接纳水体时对公众受照途径的影响;“扰动场景(AS系列)”侧重于评估不确定性事件的

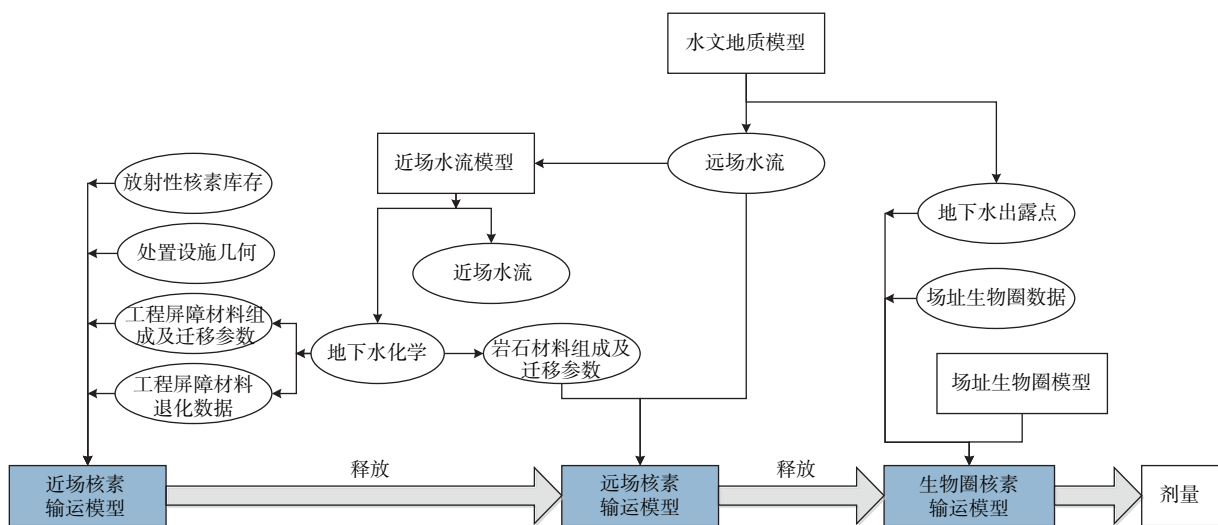


图4 处置安全评价模型链

Fig. 4 Model chain for safety assessment of disposal facility

表2 主要场景与算例说明

Table 2 Description of main scenarios and corresponding calculation cases

序号	场景类别	场景名称	描述	算例	算例代码
1	正常演化	正常场景	处置系统部件维持预期安全功能。工程屏障随时间演变正常失效。地下水经过岩石裂隙系统逐渐渗入扰动区,穿过上方和周围工程屏障材料进入洞室,浸泡废物包。放射性核素溶于水后从废物包释放,随地下水经过底部和周围工程屏障和岩石圈迁移进入生物圈	北侧大水沟水体利用	NS1
				南海水体利用	NS2
2	扰动	工程屏障提前阻水失效	处置场底部和周围工程屏障阻水功能失效的时间比正常场景提前。其他假设与正常场景保持一致	HIC关闭后 100年失效,其他混凝土屏障缓慢失效,至关闭后100年完全失效	AS1
				HIC关闭后 200年失效,其他混凝土屏障关闭时立即失效	AS2
				HIC关闭后 100年失效,其他混凝土屏障关闭时立即失效	AS3
				HIC关闭后立即失效,其他混凝土屏障关闭时立即失效	AS4
3	扰动	岩石圈快速通道	由于勘察偏差或其他原因导致有潜在的岩石圈地下水快速通道未被探测到		AS5
4	人为侵入	处置场边界打井	人员在处置场边界打井取水,饮入可能带有放射性核素的水	打井位置与处置场距离100米	HS1
				打井位置与处置场距离400米	HS2
5	人为侵入	处置场上方钻孔	人员在处置场上方进行钻孔勘察,对操作人员造成单次急性照射,以及考虑岩芯洒落对公众造成的外照射和吸入照射		HS3
6	假设	工程屏障无吸附作用	核素在工程屏障中的迁移过程不考虑屏障对核素的吸附作用。该场景可以说明工程屏障材料吸附作用的重要性	混凝土无吸附	WS1
				膨润土无吸附	WS2
				混凝土、膨润土同时无吸附	WS3
7	假设	岩石圈无吸附作用	核素在岩石圈中的迁移过程不考虑屏障对核素的吸附作用。其他与正常场景保持一致。该场景可以说明岩石吸附作用的重要性		WS4

冲击,包括模拟工程屏障(如HIC与混凝土)在不同时段的提前阻水失效,以及地质勘查遗漏的快速导水通道对系统整体屏障能力的削弱程度;“人为侵入场景(HS系列)”考察了未来人类无意在处置场边界打井或正上方钻孔等破坏物理隔离的特定风险;“假设场景(WS系列)”则采用极端保守假设(即What-if场景),人为忽略工程屏障或天然地质屏障的核素吸附功能,旨在通过敏感性分析,反向验证并量化各重屏障在延迟滞留关键核素方面的核心安全功能及贡献度。

## 2.1 正常演化场景评价结果

计算结果显示,在正常演化场景下,核素通过地下水迁移至地表造成的公众年有效剂量极低。

### 1) 核素释放特征

废物释放速率高峰多在关闭后100~200年内完成, $^3\text{H}$ 和 $^{14}\text{C}$ 释放最显著; $^{14}\text{C}$ 释放周期长达

数万年。近场释放峰值集中在关闭后1000年内, $^3\text{H}$ 占主导,随后 $^{14}\text{C}$ 逐渐主导。远场释放在NS1中以 $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{129}\text{I}$ 为主,峰值分别出现在关闭后约19万年、7万年、68万年;NS2远场释放可忽略。

### 2) 地表水活度浓度

$^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{99}\text{Tc}$ 和 $^{129}\text{I}$ 在地表水活度浓度中占主导,但浓度远低于饮用水标准,对公众健康风险可忽略。

### 3) 公众年有效剂量与途径

处置库关闭后100万年内,对公众关键人群组的成员造成的年有效剂量的峰值分别为 $2.61 \times 10^{-6}$  mSv(NS1算例)和 $1.09 \times 10^{-11}$  mSv(NS2算例),主要贡献受照途径分别为食入农产品(NS1算例)和食入海产品(NS2算例)。两个算例的年有效剂量的峰值均远低于评价指标0.01 mSv。剂量主要贡献核素均为 $^{99}\text{Tc}$ ,其余核素贡献在长时间周期

内不显著。

4) 与其他处置场结果的对比

相比于国内某些典型的近地表处置场, 本研究评估的岩洞处置场在造成的公众年有效剂量峰值上显著降低(低约1至2个数量级), 且峰值出现时间大幅延后(由万年以内推迟至近20万年)。具体剂量结果对比详见表3。造成这种差异的本质原因在于: 近地表处置主要依赖工程屏

障, 核素一旦穿透或伴随屏障退化即可较快到达地表生物圈; 而深部岩洞处置拥有数百米的微风化花岗岩作为天然地质屏障, 其复杂的裂隙网络显著延长了地下水的物理迁移路径, 更为关键的是, 围岩发达的基质微孔隙扩散和物理化学吸附作用, 对长寿命核素(如<sup>99</sup>Tc、<sup>129</sup>I)起到了较强的滞留和迟滞效果, 从而在百万年尺度上展现出良好的天然屏障优势。

表3 剂量结果与国内处置场结果对比

Table 3 Comparison of dose results with other domestic disposal facilities

处置场	年有效剂量峰值/Sv	峰值出现时间/a	关键核素	主要受照途径	备注
本研究中岩洞处置场	$2.61 \times 10^{-9}$	约19.2万年	<sup>99</sup> Tc	食入农产品(98.94%)	年有效剂量峰值主要由 <sup>99</sup> Tc贡献, 其余核素贡献可忽略
国内西北某近地表处置场	$2.84 \times 10^{-8}$	约4900年	<sup>99</sup> Tc	食入	近地表单元格处置, 年有效剂量峰值出现早, 剂量相对高
国内东北某近地表处置场	$8.71 \times 10^{-7}$	约19.9万年	<sup>239</sup> Pu	食入海产品	峰值出现时间相当, 主要剂量贡献的关键核素不同

2.2 扰动场景评价结果

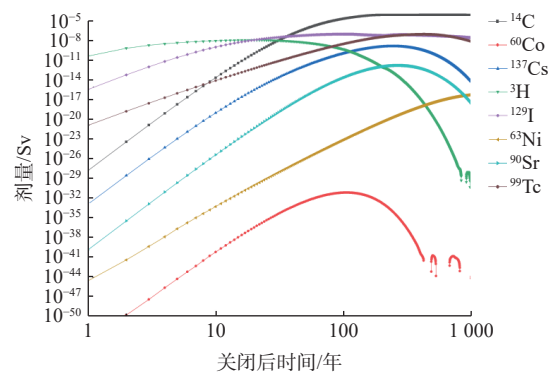
为分析工程屏障阻水性能对处置场长期安全的影响, 设置了四个工程屏障提前阻水失效算例(AS1—AS4)。结果表明, 屏障失效发生的时间对于年有效剂量峰值出现时间与峰值大小的影响十分有限。当假设处置场关闭时 HIC 容器及所有工程屏障立即失效(AS4), 年有效剂量峰值也仅为  $2.49 \times 10^{-6}$  mSv, 出现在约 19.8 万年后, 远低于剂量评价指标。

核素贡献分析结果显示, 在四个算例中, 处置场关闭后长期年有效剂量峰值均由<sup>99</sup>Tc主导, 占比约达100%, 短寿命核素贡献较小。<sup>3</sup>H在关闭后前百年占主导地位, 但剂量极低(AS4中为  $3.83 \times 10^{-33}$  Sv), 随后迅速被<sup>99</sup>Tc超过并持续保持主导地位。<sup>129</sup>I在关闭后约10万年开始对剂量贡献逐渐增加, 但在100万年模拟期内仍未出现峰值。因此, 工程屏障阻水提前失效在长期尺度上对公众年有效剂量的影响总体有限。

此外, 图5的交通隧道端口旁路迁移场景算例(AS5)结果显示: 年有效剂量峰值出现在关闭后约625年, 峰值为  $7.61 \times 10^{-5}$  Sv, 比正常场景NS2计算结果高9个数量级, 但仍远低于剂量控制值  $1 \times 10^{-3}$  Sv。

如图5所示, 在关闭后的前1000年内, 不同核素对总剂量的贡献呈现出显著的时间动态演

化特征。在关闭后的最初几十年, 高活度、高迁移率的短寿命核素(如<sup>3</sup>H)率先随快速水流释放, 在极早期剂量中占据一定比例, 但随后因其快速放射性衰变而使得贡献度快速下降。在约100年后, <sup>14</sup>C的贡献开始急剧上升并迅速主导总剂量(峰值年占比高达99.87%)。由于<sup>14</sup>C具有较长半衰期, 且在快速通道中受到的围岩吸附阻滞极其微弱, 它能够以极高的活度浓度到达地表生物圈。相比之下, <sup>99</sup>Tc和<sup>129</sup>I等极长寿命核素受限于初始库存量和早期释放速率, 其释放曲线在此期间虽处



为清晰展示在极低辐射水平下各核素活度贡献随时间跨越数个数量级的动态演化规律, 纵坐标采用对数化处理

图5 算例AS5处置场关闭后1000年内年有效剂量主要核素贡献随时间变化曲线

Fig. 5 Time-dependent contribution of radionuclides to total dose for scenario AS5 within 1000 years post-closure

于爬升阶段,但在前1000年内并未形成主导;而 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 等强吸附性中短寿命核素已被局部近场有效截留,几乎未对远场剂量产生实质性贡献。该场景的动态分析说明,如果地下水存在绕过围岩基质的迁移旁路,不仅会使早期剂量峰值时间大幅提前,且会导致公众受照的主要危险源从长寿命阴离子核素转变为具备高迁移能力的 $^{14}\text{C}$ 。

### 2.3 假设场景评价结果

工程屏障无吸附作用算例WS3的结果显示:当混凝土与膨润土均无吸附作用时,剂量峰值约为 $2.74 \times 10^{-9}$  Sv,比NS1峰值增加约4.98%,峰值出现时间约为关闭后19.9万年(表4)。说明工程屏障的吸附作用对局部迁移速率有调节作用,但对整体长期安全的贡献相对有限。

岩石圈无吸附作用算例WS4结果显示:处置场关闭后约355年出现总剂量峰值 $4.75 \times 10^{-12}$  Sv,

虽仍远低于剂量控制值,但相较正常场景下关闭1000年内的总剂量峰值 $5.61 \times 10^{-34}$  Sv有明显增加。且WS4的主要受照途径为饮水(占比86.7%),其次为食入农产品(占比12.7%),显示岩石吸附失效可能会改变公众主要受照途径。在该算例中, $^{129}\text{I}$ 在剂量峰值年贡献占比达99.5%。可见,岩石圈吸附作用在长期核素迁移阻滞中具有关键作用。一旦失去该功能,长寿命核素(特别是 $^{129}\text{I}$ 和 $^{14}\text{C}$ )的迁移控制能力将明显下降,剂量峰值出现时间提前,总剂量增大,凸显了地质屏障在处置安全体系中的核心地位。

综合正常演化、扰动以及各项假设场景的计算数据,各场景下核素释放造成的峰值剂量、出现时间及主要贡献核素情况汇总于表4。从表4可以清晰地看出不同地质条件与屏障失效模式对长期安全影响的显著差异。

表4 不同场景下的剂量评价结果汇总

Table 4 Summary of peak dose results and key radionuclides for different evaluation scenarios

算例	场景描述	年有效剂量峰值/Sv	出现时间/a	主要贡献核素	备注
NS1	正常演化(大水沟方向)	$2.61 \times 10^{-9}$	$1.92 \times 10^5$	$^{99}\text{Tc}$	安全,远低于限值
AS4	工程屏障立即失效	$2.49 \times 10^{-9}$	$1.99 \times 10^5$	$^{99}\text{Tc}$	影响微弱
AS5	岩石圈存在快速通道	$7.61 \times 10^{-5}$	625	$^{14}\text{C}$	风险显著增加,需工程规避
WS3	工程屏障(混凝土、膨润土同时无吸附)	$2.74 \times 10^{-9}$	$1.99 \times 10^5$	$^{99}\text{Tc}$	影响微弱
WS4	岩石圈无吸附	$4.75 \times 10^{-12}$	355	$^{129}\text{I}$	验证了基质扩散的重要性

## 2.4 分析讨论

### 2.4.1 工程屏障与地质屏障的功能定位

对比算例NS1与AS4(表4)发现,即使假设工程屏障(HIC容器、回填混凝土)在关闭时刻立即失效,对百万年尺度的年有效剂量峰值影响微弱。这表明在关闭后长期内,工程屏障的主要作用在于运行期及关闭后早期(<500年)对短寿命高活度核素(如 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ )的包容。对于 $^{99}\text{Tc}$ 等长寿命核素,长期安全主要依赖于地质屏障的天然阻滞。因此,工程设计应重点关注混凝土在早期的抗裂性能。

### 2.4.2 “岩石圈旁路”风险的警示

算例AS5模拟了岩石圈存在未被探测到的快速导水断层(旁路,表4)。表4结果显示,年有效剂量跃升了4个数量级,且峰值出现时间从约19万年提前至600多年,主要贡献核素变为迁移性较强的 $^{14}\text{C}$ 。这一发现对场址勘查提出了明确要求:应采用高精度的物探和钻孔水文试验,排

除处置单元周边的导水断层;在施工阶段,若遭遇较大裂隙,应进行全方位的注浆封堵,将存在“地质旁路”的可能性降至最低。

## 3 结论

针对我国中低放废物岩洞处置的迫切需求,本研究将Safety Case方法体系应用于我国某花岗岩岩洞处置场的长期安全评价中。通过构建本地化的FEPs清单、多层级场景树以及全系统核素迁移数值模型,得出以下主要研究结论。

(1) 验证了该花岗岩场址的长期安全性与适宜性。计算结果表明,在正常演化及大多数预期扰动场景(如工程屏障提前阻水失效)下,核素通过地下水迁移对公众造成的最大年有效剂量约为 $2.61 \times 10^{-6}$  mSv,远低于我国相关法规规定的0.25 mSv限值。即使在极端假设场景下,处置库系统依然表现出极强的稳健性,证实该场址具备建设低、中放废物处置设施的优良地质与水文条件。

(2) 揭示了多重屏障系统的跨时间尺度协同阻滞机制。长期演化分析显示, 多重屏障系统呈现出“工程屏障保短期、地质屏障保长期”的协同规律。高完整性容器和缓冲回填材料有效包容了 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 等短寿命高活度核素; 而对于 $^{99}\text{Tc}$ 和 $^{129}\text{I}$ 等关键长寿命阴离子核素, 花岗岩围岩的基质扩散和物理化学吸附作用是保障百万年尺度下辐射安全的核心防线。

(3) 明确了“地质快速旁路”是对处置系统长期安全的最大潜在威胁。扰动场景(AS5)的模拟深刻表明, 一旦岩石圈中存在未被探测或封堵的快速导水断层, 将导致围岩基质扩散的滞留功能失效。这使得年有效剂量峰值出现时间从十万年级别大幅前移至数百年级别, 且剂量贡献关键核素转变为高迁移能力的 $^{14}\text{C}$ 。该结论从安全全过程系统分析的角度, 确立了“避开并有效阻断快速水力联系通道”是未来岩洞处置场设计、建设与评价应该坚守的关键红线。

#### 参考文献:

- [1] 陈式,等.放射性废物安全通论[M].北京:中国原子能出版社,2006:84-89.
- [2] Chapman N, Hooper A. The disposal of radioactive wastes underground[J]. *Proc Geol Assoc*, 2012, 123(1): 46-63.
- [3] IAEA&NEA. Geological disposal of radioactive waste: WS-R-4[R]. Vienna: IAEA&NEA, 2006.
- [4] OECD/NEA. Disposal of radioactive waste: review of safety assessment methods[R]. France: OECD/NEA, 1991.
- [5] Vahlund F. Long-term safety of the extended SFR: methodology and conclusions from the SR-PSU project[J]. *MRS Adv*, 2016, 61(1): 4075-4080.
- [6] Garisto F. Sixth case study: features, events and processes[R]. Toronto, Ontario, Canada: Nuclear Waste Management Organization(NWMO), 2017.
- [7] OECD/NEA. Safety assessment of radioactive waste repositories[R]//Proceedings of the Paris 1989 Symposium, France: OECD/NEA, 1990.
- [8] IAEA. The safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste: No. SSG-23 [R]. Vienna: IAEA, 2012.
- [9] 凌辉.高放废物地质处置安全要求及评价模式探讨[J].*世界核地质科学*,2022,39(4):712-720.
- [10] 李书坤,王志明,郭择德,等.低中水平放射性废物浅地层处置安全评价方法研究[J].*辐射防护*,2000,20(2):2-20.
- [11] El-Ghonemy H, Watts L, Fowler L. Treatment of uncertainty and developing conceptual models for environmental risk assessments and radioactive waste disposal safety cases[J]. *Environ Int*, 2005, 31(1): 89-97.
- [12] 邱国华,李金凤,刘森林,等.放射性废物处置安全全过程系统分析及有关问题的探讨[J].*辐射防护*,2018,38(2):95-100.
- [13] IAEA. Safety indicators for the safety assessment of radioactive waste disposal: sixth report of working group on the principles and criteria for radioactive waste disposal[R]. Vienna: IAEA, 2003.
- [14] 李红,李宇轩,马宾.放射性废物处置条件下水泥基材料的吸附机制、长期演化及安全启示[J].*核化学与放射化学*,2025,47(6):609-623.
- [15] 祖甘霖,周锦浩,王阳,等.放射性核素在处置库屏障材料上吸附行为国内研究进展[J].*核化学与放射化学*,2025,47(6):595-608.
- [16] 王旭宏,潘跃龙,杨球玉,等.放射性固体废物岩洞处置安全规定:GB 13600—2024[S].北京:国家标准化管理委员会, 2024.
- [17] 周舵,王波,陈曦,等.Pu和Tc在北山新场花岗岩及其裂隙填充物中的扩散行为[J].*核化学与放射化学*,2025,47(6): 635-642.
- [18] 蒋巧,王彦惠,成建峰,等. $\text{Sr}^{2+}$ 在阳江花岗岩上的吸附行为[J].*核化学与放射化学*,2023,45(3):250-258.