

美国锡布鲁克核电厂的“混凝土癌症”

所谓的“混凝土癌症”在锡布鲁克（Seabrook）核电厂被发现已超过 15 年。美国核监管委员会（NRC）的文件介绍了 NRC 与该电厂运营方合作，以确保建筑结构持续满足许可证要求。



Seabrook 核电厂是位于新罕布什尔州的单机组电厂

自 2010 年起，运营方和监管机构一直密切关注着碱硅酸反应（俗称“混凝土癌症”）对新纪元（NextEra）能源公司旗下的 Seabrook 核电厂的影响。五年前，该电厂运行许可证有效期更新至 2050 年。近期，NRC 下属的独立机构——反应堆安全保障顾

问委员会（ACRS）核查了电厂现场和 NRC 如何监测电厂部分混凝土中的这种缓慢反应。



碱硅酸反应（ASR）是由含有特定形态二氧化硅骨料驱动的一种化学反应。在碱性环境中，二氧化硅与羟基离子发生反应，在骨料颗粒和水泥砂浆的界面处形成一种凝胶。这种凝胶在吸收周围环境中的水分后会急剧膨胀。凝胶膨胀起初表现为微裂纹，随后可观察到表面的宏观裂纹。视觉上通常表现为所谓的“网格状裂纹”，且裂纹周围有凝胶染色。

该反应过程可能持续数年，但一旦开始，膨胀产生的力会导致表面出现裂纹。ASR 引起的混凝土膨胀和开裂可能影响结构的承载能力以及施加在该结构上的荷载。

美国陶瓷学会指出，核电厂使用的混凝土比细颗粒的骨料混凝土更容易受到 ASR 影响，因其采用了密度高、颗粒更粗的骨料以有效屏蔽辐射。

美国在交通基础设施（如混凝土桥梁）和水坝等其他行业拥有丰富的 ASR 处理经验，因此交通部、联邦公路管理局等部门拥有广泛的相关专业知识。然而，由于在其他行业出现 ASR 后进行了广泛的监测和修复，通常在结构失效前就已修复或停用，因此关于其如何失效的数据有限。更重要的是，已观察到的失效案例大多发生在非钢筋混凝土中。

NextEra 公司于 2010 年 8 月确认，Seabrook 核电厂多个安全级结构的地下墙体混凝土存在 ASR 劣化。Seabrook 核电厂在不知情的情况下使用了具有慢反应活性的骨料，正如 NRC 指出，电厂建设时美国材料与试验协会（ASTM）的标准存在不足。此外，由于当时未预料到会发生 ASR，检查工作也未将其纳入范围。

Seabrook 是迄今为止唯一出现此问题的美国核电厂，NRC 工作人员的审查认为不存在迫在眉睫的安全问题。因为安全裕量至今仍然存在，而且 ASR 发生于局部、进展缓慢、并被持续监测。

Seabrook 核电厂 ASR 时间线：

- 2009–2010 年，检测确认存在 ASR。
- 2013–2016 年，实施大规模测试计划。

- 2014–2015 年，NRC 发现抗震一级结构存在整体结构变形。
- 2019 年 3 月，NRC 批准并颁发了许可证修改请求（LAR）和更新后的运行许可证。
- 2020 年 11 月，当地权益保护组织对 LAR 提出质疑，但原子能安全许可委员会维持了许可决定（略有修改）。
- 目前，当地的工程检查人员持续在 Seabrook 核电厂进行与 ASR 相关的检查。



Seabrook 核电厂许可证更新至 2050 年

2024 年 9 月，反应堆保障咨询委员会（ACRS）与 NRC 工作人员举行会议，更新 Seabrook 核电厂 ASR 的状况。会议讨论了近期的活动，以确保该问题仍属于“非迫在眉睫的安全问题”。

监督与保证

2009 年，在为 NextEra 提交许可证更新申请做准备时，电厂发现了裂纹。

事后判定，当时的 ASTM 标准筛选测试对于检测非常缓慢反应骨料 ASR 的能力有限。因此，NextEra 错误地认为原始的水泥和骨料选择会避免 ASR 发展，故最初未考虑观察到的裂纹可能由 ASR 引起，而是将其定性为收缩裂纹。此后制定了新的测试标准。

NextEra 指出了导致 ASR 问题的几个原因，以及为何直到许可证更新审查时才被发现。原因之一是初始建设时的混凝土混合物在不知情的情况下使用了易受 ASR 影响的骨料，并且后来还认识到地下水化学成分对 Seabrook 混凝土结构的侵蚀性。

NextEra 的结论是，受影响的结构仍可运行，但存在劣化且不符合许可证条件，因为当前的许可基准最初未考虑 ASR。

ASR 许可证条件摘要

- 评估膨胀行为，确认其与大型测试项目结果具有可比性，并核查未来膨胀的安全裕度
- 使用 Seabrook 核电厂现场数据验证混凝土模量与膨胀的相关性，该相关性用于计算仪器预装区的通厚度膨胀

- 每六个月对控制式应变仪进行一次体积膨胀检查
- 若结构评估显示钢筋应力可能超过屈服强度，需制定监测方案以确保钢筋不发生失效或屈服，若已发生则能及时检测
- 若 ASR 膨胀速率显著超过每年 0.2 毫米/米（0.02%）的通厚度膨胀，NextEra 将开展工程评估，重点论证六个月监测周期是否持续适用

2012 年，NRC 加强了监管，以确保在 NextEra 制定纠正措施期间，结构功能保持完整。该公司在德克萨斯大学奥斯汀分校弗格森结构工程实验室开展了一项大规模测试方案，使用旨在复制 Seabrook 核电厂钢筋混凝土墙的混凝土试样。除其他外，这有助于确定测量和跟踪 Seabrook 墙体类似结构中 ASR 进展的最佳方法。



在德克萨斯大学奥斯汀分校弗格森结构工程实验室开展的大型测试项目，为确定测量和跟踪 Seabrook 核电厂墙体类似结构中 ASR 发展的最佳方法提供了重要依据。

测试结果被用于制定在 ACRS 会议上被称为“防护栏”的指标，包括膨胀限值和监测技术，并通过许可证修改并入了 Seabrook 核电厂当前的许可基准。

这意味着，只要 Seabrook 核电厂的膨胀保持在确定的限值内，就可以继续使用原始设计方程和材料属性来确定受影响混凝土的承载能力。如果超出这些限值，并不意味着结构必然失效，但意味着超出了测试方案的边界，Seabrook 核电厂必须重新检查结构并证明其可运行性。这因结构而异，但据称为德克萨斯测试计划所确定的膨胀速率留出了相当大的裕量。委员会一名成员评论说：“你不是按照设计基准极限进行检查。你的检查是为了能够发出警报并启动一个应对流程。”

ACRS 会议获悉，现场的 NRC 工作人员利用监测数据查看当前膨胀水平，并结合研究和直接检查（这意味着在 2022 至 2024 年间，检查人员总计进行了五周的现场巡查）。根据湿度和温度的变化，裂纹尺寸会轻微开合。测试方案表明，在测试的限值内，结构承载能力没有降低，因此结构可以承受更大的裕量和膨胀。

检查人员必须区分 ASR 和其他类型的开裂（如冻融开裂），并考虑是否存在多种效应共同作用。

NRC 驻厂监督员每天对电厂状态进行现场监督，审查纠正行动报告，并对电厂所有可进入区域进行巡查，检查建筑变形和不太明显的 ASR 迹象。

自 2022 年 NRC 工作人员与 ACRS 那次会议以来，NRC 工作人员与 NRC 监督员团队已开展了五周的现场检查，并且是“每天都在关注这些事情”。

正在采取的行动

会议获悉，ASR 影响了 Seabrook 核电厂的 28 处结构（具体数量取决于结构定义，因为有些结构由更小的结构组成）。

其中 6 处已超出原许可基准范围（尽管该混凝土设计规范方程已根据包含 ASR 荷载的许可证修改而修订），必须采取纠正措施，使其重新符合许可基准要求。

这可能需要对 6 处结构中的 4 处进行进一步分析。它们是：厂用水冷却塔、主辅助厂房、安全壳构筑物 and 余热排出系统管廊。需要特别分析的一个例子来自厂用水冷却塔，其水位以下用于监测 ASR 的区域通道受限。这需要对 ASR 膨胀水平进行保守假设，从而增加了结构内的荷载需求。支持基本假设的特别监测数据可能减少荷载需求，使其重新符合要求。

在重新分析不可行的情况下，则需要进行物理改造。有两处结构——控制和柴油发电机厂房和应急给水泵房——计划进行物理改造。



NRC 工作人员表示，ASR 无法被“修复”（指消除 ASR 并停止膨胀），那需要完全更换该区域。相反，“修复”指的是各种类型的加固，例如穿墙或角部支撑，或增加厚金属板以抵抗结构中的竖向膨胀。修复完成后，对 ASR 膨胀的监测仍会继续。

ACRS 会议还听取了 C-10 研究与教育基金会的意见，该组织由 Seabrook 核电厂 10 英里（16 公里）半径内（即应急计划撤离区）的民众组成。

该组织曾在 2014 年寻求就 ASR 进行立法，但于 2019 年被拒绝。该组织担心相关措施是“静态且相对不可变更的，因为它们与许可证更新捆绑在一起。”

一位与 C-10 合作的专家表示，动态分析依赖过时的模型。他特别担忧关于 ASR 不会降低抗剪强度的假设，指出抗剪强度是应对地震荷载所必需的。他还表示，需要更好地了解 ASR 引

起的内部微裂纹及其对气密性的影响，呼吁建立更严格的检查制度（目前是 15 年一次）。

该组织还对涉及 ASR 许可证修改和许可证条件的违规行为表示担忧。工作人员此前曾表示，NRC 已确认了三项问题，NRC 将其描述为“安全意义非常低”，但强调了“需要持续关注”的事实。

例如，安全壳构筑物曾出现变形并向应急给水泵房方向位移，直至两者接触并失去“地震间隙”。

另一起安全壳内部结构问题可追溯到 2021 年，是在 Seabrook 核电厂秋季换料大修期间发现。NRC 监督员发现安全壳内部结构的反应堆堆腔区域存在开裂和剥落，该区域在运行时通常是上锁的高辐射区因而无法进入。有视觉迹象表明墙的另一侧存在 ASR。作为临时测试，许可证持有者应用了合理的 ASR 载荷，并得出结论认为结构仍能承受 ASR 的影响。随后的根本原因分析要求开发有限元模型。2024 年 3 月，NRC 工作人员得以至现场审查根本原因研究及已完成的结构评估。

NextEra 希望了解其在 containment 内部结构中观察到的损坏情况，包括反应堆腔坑内的剥落和开裂，以及 containment 内部结构其他区域的损坏。

C-10 组织要求 NRC 公开关于此问题的更多数据，称没有这些数据，“任何对 ASR 影响的评估都是不完整且可能是误导性的”。保持 ASR 方面的专业知识对民众和 NRC 来说都很重要。

C-10 希望了解 NRC 和 NextEra 计划如何保留和扩展其对 ASR 问题的技术理解，暗示早期的理解相对简单。自 2022 年最后一次听取有关该问题的简报以来，ACRS 也发生了变化。

NRC 工作人员还注意到了这个问题以及需要确保有在岗人员“必须了解现场存在的 ASR 劣化机制及其影响如何在整个结构中体现”。他们强调了包括加入土木与结构工程部门的新员工参与的现场访问，目的是为了让它们尽快了解 ASR，进行“知识传递”。

事实上，由于 Seabrook 是美国唯一需要管理 ASR 的核反应堆，因此长期保留系统性的知识是一项挑战。NRC 和电厂运营方必须拿出像管理 ASR 一样的谨慎态度，持续关注专业知识和技能。

对外合作部 张灵宇 供稿

摘自国际核工程杂志