

下一代工具使经历严重事故的核反应堆退役更快、更有效

文/Nayana Jayarajan

在日本发生有记录以来最强烈地震的几天里，福岛第一核电站1至4号机组显然将永久关闭。2011年3月11日，地震引发的巨大海啸波冲破了日本的沿岸防线，包括核电站周边地区，造成了大范围破坏。洪水摧毁应急发电机，导致三台机组的核燃料过热，堆芯部分熔化。核电站还经历了几次氢气爆炸，爆炸破坏了厂房，并导致放射性物质释放。超过15万人被迫从福岛县撤离，当局设立了一个禁区。然而，即使海啸后的直接危机已基本解决，但这座严重受损设施退役所带来的挑战才刚刚开始。

经历严重事故的核设施的退役是一项复杂工作，与计划关闭后的退役相比，往往需要采用特定方案、技术和做法。这使得在进行所有作业的同时保证辐射安全成为一项重大挑战。例如，在受损反应堆退役过程中，最棘手的工作之一就是清除乏燃料和破损燃料。

在福岛第一核电站事故中，一些核燃料熔化并掉落到1号、2号和3号反应堆机组安全壳底部。安全壳厂房内辐射水平较高，限制了工作人员进入反应堆附近区域。营运者面临一个重大挑战：他们如何在不知晓破损燃料确切位置的情况下清除这些燃料？

宇宙射线 μ 子成像由此登场。这项技术60多年前首次采用，此后一直用于从火山和古埃及金字塔内部情况成像到货运集装箱中核材料检测等各种应用。 μ 子跟踪装置在天然存在的

高能亚原子粒子穿过材料时对其检测和跟踪，然后利用轨迹变化确定材料密度。铀和钚等核材料的密度非常大，因此，利用这种技术相对容易识别。

宇宙射线 μ 子成像在福岛第一核电站用于估计反应堆堆芯中燃料碎片的位置和状况。2015年，日本专家开发了一种改进技术，可以追踪小到30厘米的碎片。这项技术曾用于确定福岛第一核电站1号机组反应堆中破损燃料状况，这是退役的一个重要先决条件。

在利用技术创新应对事故后退役和恢复工作中的独特且未预见的挑战方面，这个例子只是众多例子中的一个。

“事故的后果往往不可预测，现有的组织和技术基础设施以及可用技术也许不适于或不足以满足事故后的需要。通常情况下，受损核设施退役时，会在个案的基础上制定技术方案和开发相关设备，”曾共同领导过一个旨在记录和分析受损核设施退役和治理项目即“管理受损核设施退役和治理国际项目”的原子能机构退役专家Vladimir Michal说，“在许多情况下，像宇宙射线 μ 子成像一样，这些技术在退役甚至其他行业中都有着更广泛的应用。”

另一个值得注意的例子是，2016年至2019年期间，在乌克兰切尔诺贝利核电站4号机组反应堆厂房上方建造了一个新的安全封隔“罩”。建造的目的是为了取代1986年灾难后修建的

“为帮助尽量减少场址工作人员受到的辐射照射，并系统地推进福岛第一核电站的退役工作，携带辐射测量/可视化工具的遥控机器人成为研究发展的一个优先领域。”

—日本原子力开发机构执行主任Kentaro Funaki

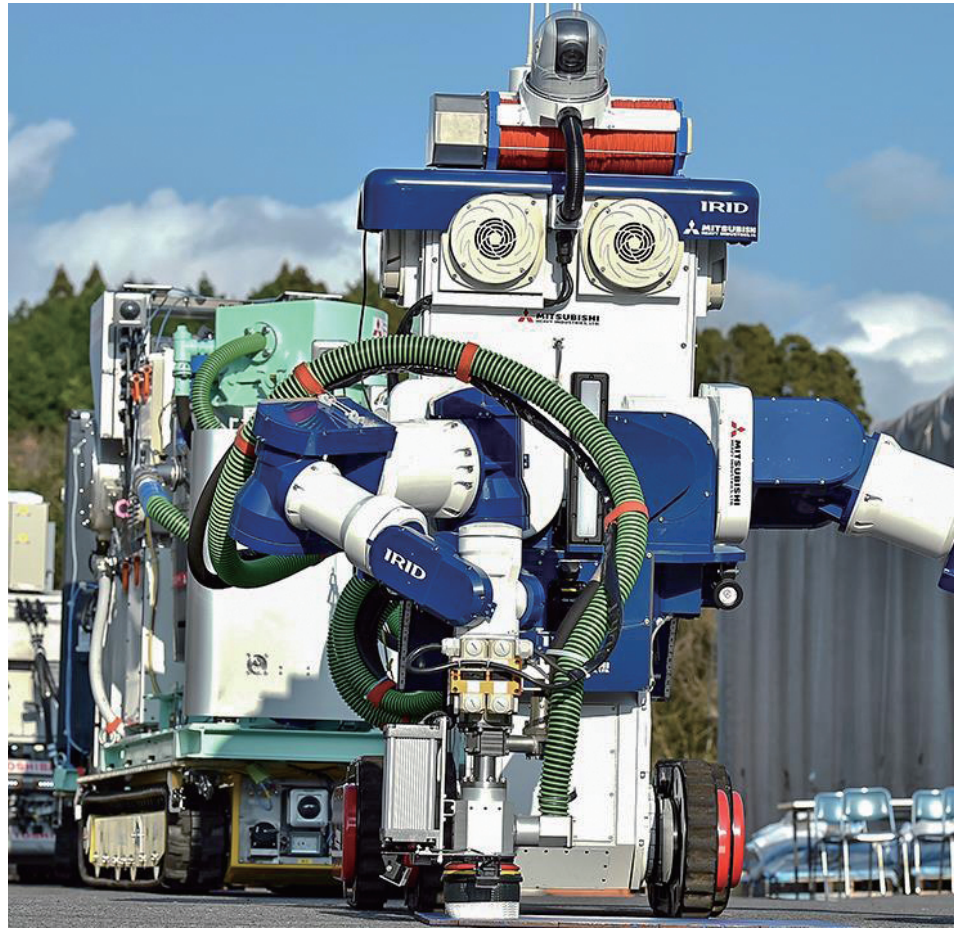
临时掩蔽设施，这是世界上最大的陆基可移动结构，设计寿命为一百年，能够抵御严重的龙卷风。新的封隔结构建在受损4号机组以西约180米的地方。建造和随后的定位均使用了最先进的土木工程技术。

国家专业化企业切尔诺贝利核电站公司代理总经理Valeriy Seyda表示：“新安全封隔设施不仅能防止放射性物质释放，还有助于未来的退役工作。”安全封隔结构旨在防止放射性污染物释放，保护反应堆的内部结构，并为退役提供便利。为了后一个目的，封隔结构包括两台最先进的遥控起重机。它们悬挂在屋顶下方，设计用于4号机组最终退役，同时保护工作人员和环境。

在福岛第一核电站，建造地下冻土墙这种成熟的工程技术被用来防止地下水流入现场并与反应堆厂房内已经被污染的水混合。1500米长的冻土墙通过冻结土壤而建，这样它就不会被地下水渗透，从而减少需要处理的污染水总量。

先进的远程操作和机器人技术现在能够使退役工作在高辐射水平地区进行。例如，在福岛第一核电站，机器人被用于监测和测量、开展调查、去污以及为清除燃料碎片做准备。

日本原子力开发机构执行主任Kentaro Funaki表示：“为帮助尽量减少场址工作人员受到的辐射照射，并系统地推进福岛第一核电站的退役工作，携带辐射测量/可视化工具的遥控机器人成为研究和发展的一个优先领域。”Funaki强调国际联合项目是政府资助的一系列研究和发项目的一个关键领域。他说，“正在进行广泛努力，以便在福岛第一核电站1号和



2号机组附近实现放射性热点的三维可视化。通过整合国家和国际联合研究项目的成果，我们已经取得了巨大成功，未来还将继续开展这方面的工作。”

特别是由于辐射的存在以及设备运行的精准条件方面的不确定性，在核环境中使用非核技术带来了诸多挑战，包括巨大的开发成本。然而，布线和其他关键部件方面的进步，以及抗辐射设备的开发，使得有可能在这些具有挑战性的环境中安全、有效地应用机器人技术。此外，激光技术使得能够对此类人类通常无法进入的环境的内部进行扫描，同时保护工作人员的健康和安全。Michal表示：“这些进步极大地提高了安全、有效地拆除遭受严重核事故的设施的可能性，即使在极具挑战性的情况下亦是如此。”

福岛第一核电站部署去污机器人支持退役活动。

（图/日本国际核退役研究所）