

## 地球周刊 | 科技

一位不惧辐射的超级英雄在一个下午就可以搞定日本福岛第一核电站的勘察任务,我们的英雄将检查一号反应堆的废墟,走过核电站建筑内积水的地面,举起反应堆外安全壳的巨大钢质拱顶,查看压力壳内的核燃料。再潜入反应堆底部查看事故的残骸:一堆变硬的金属包裹着放射性的胶状物质已经通过压力壳上的漏洞渗入下面的安全壳底部。在全面了解状况之后,超级英雄就能拿出清理这堆垃圾的方案。

不幸的是,人类的血肉之躯根本无法靠近压力壳,日本最优秀的核专家也只能大概推断熔化的核燃料到底位于一号反应堆的哪个位置。反应堆建筑上部操作层的辐射太强,人类无法进入;某些区域的辐射已经达到54毫西弗/小时,相当于一名清理人员一年可以接受的总辐射量。然而,工人不仅要拆除1号反应堆的放射性废墟,这座废弃核电站的其他5座反应堆也等待拆卸。

此次拆除项目是我们这个时代最艰巨的工程挑战之一;甚至可能需要40年,耗资150亿美元才能完成。此次任务将动用大批最先进的机器人。

自从2011年3月11日之后,日本从此改变,大海啸淹没了福岛第一核电站,破坏了它的紧急供电系统,导致系列爆炸和多个核反应堆毁坏。大量辐射物质泄漏飘浮到日本东北部上空,落入城镇、森林、农田。核电站工作人员为了阻止更严重的核辐射,不断向反应堆芯注入冷却水。9个月后,东京电力公司(简称东电)才宣布事态终于稳定。

然而,稳定只是一个相对概念;虽然福岛第一核电站的情况没有持续恶化,却留下一个急需处理的灾难现场。受损的反应堆芯继续在释放地狱般的热量,核电站员工必须继续向它们喷水,给它们降温,阻止再次熔毁。但是压力壳和安全壳已经千疮百孔,这些漏洞导致辐射污水流入地下室。东电为了阻止辐射水外泄,只有将这些含有辐射的污水接住,装进大水罐,但这绝非持久之计。为了阻止再次发生事故,所有反应堆都在严密的监控之下。

东电的工作不仅是应对迫在眉睫的威胁。为了安抚愤怒的日本公众,公司必须清理事故现场,将核电站存在的痕迹从那片土地上完全抹掉。核电站的废墟不停地提醒着公众东电的技术和管理失败,东电需要用行动证明它的忏悔。东电官员曾坦白承认,他们还不知道如何在40年的时间里完成任务——安全拆除6座核反应堆。唯一可以肯定的一点是:大量的工作需要交给机器人部队来完成。日本技术最先进的公司正在努力地研发能够胜任这一艰巨任务的新机器人。

更糟糕的是,人类历史上其他两次重大核事故,切尔诺贝利和三里岛灾难,对于福岛核电站的拆除任务没有任何可以借鉴之处。切尔诺贝利的反应堆根本没有拆除;只是被封锁进了混凝土筑造的坟墓。三里岛的反应堆燃料被清除,但担任三里岛清理任务现场指挥的莱克·巴瑞特说,两次任务所面临的挑战完全不是一个等级的。在三里岛,反应堆建筑完好无损,唯一发生熔毁的堆芯也被好好地封闭在压力壳内。“在福岛,建筑被毁,3个堆芯熔毁,部分堆芯残留物掉到压力壳外的地面上。”巴瑞特说,福岛事故史无前例,无可参照。

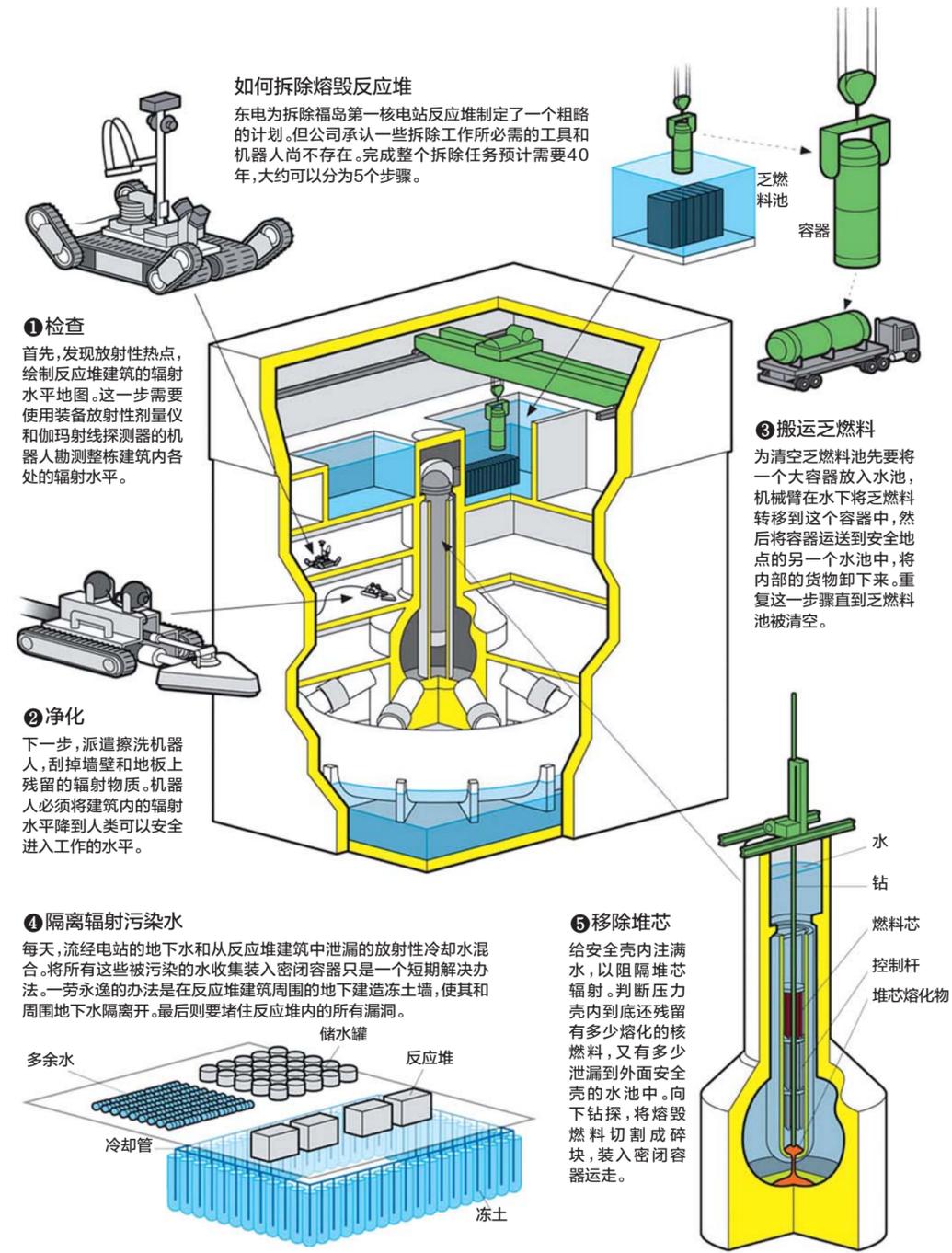
巴瑞特应邀担任福岛清理项目的顾问,他说东电现在只有一个选择:“从外向内逐步推进。”先解决反应堆建筑外圈的问题,然后再处理最艰难的熔毁堆芯问题。在清理工作头三年,东电一直在监控现场,绘制辐射水平地图。下一步是清除放射性残骸,刮掉残存在墙壁和地板上的放射物质。乏燃料必须从反应堆建筑中的水池中取出;漏洞必须填补上。在这一切完成后,工人才能往安全壳内注水,熔化的核燃料才能被安全分解,转移到密闭容器中,运送到其他地方。

很多拆除反应堆的必需技术已经以某种形式存在,但它们需要经过改造以适应福岛第一核电站的特殊环境。“这就像是上世纪60年代,我们要把人送上月球。”巴瑞特说,“我们已经掌握了火箭,掌握了必需的物理学知识,但还从未把所有需要的技术拼凑起来。”正如登月计划一样,没有任何保证说明这一史无前例的任务可以完成。但是面对日本公众的愤怒,东电别无选择。

清理第一步:检查。东电派遣机器人进入毁坏的反应堆建筑,找到放射性热点,绘制成地图。首先抵达的是美国制造的背包机器人(PackBot)和战士机器人(Warrior)。它们是从美国的iRobot公司紧急订购的。

# 最艰巨的拆除任务

拆除福岛第一核电站和3座熔化的核反应堆芯需要全新的技术和最先进的机器人,这项浩大的工程可能需要40年时间,耗资150亿美元才能完成,堪称我们这个时代最艰巨的工程挑战之一。



### ① 检查

首先,发现放射性热点,绘制反应堆建筑的辐射水平地图。这一步需要使用装备放射性剂量仪和伽玛射线探测器的机器人勘测整栋建筑内各处的辐射水平。

### ② 净化

下一步,派遣擦抹机器人,刮掉墙壁和地板上残留的辐射物质。机器人必须将建筑内的辐射水平降到人类可以安全进入工作的水平。

### ④ 隔离辐射污水

每天,流经电站的地下水 and 从反应堆建筑中泄漏的放射性冷却水混合。将所有这些被污染的水收集装入密闭容器只是一个短期解决办法。一劳永逸的办法是在反应堆建筑周围的地下建造冻土墙,使其和周围地下水隔离开,最后则要堵住反应堆内的所有漏洞。

多余水

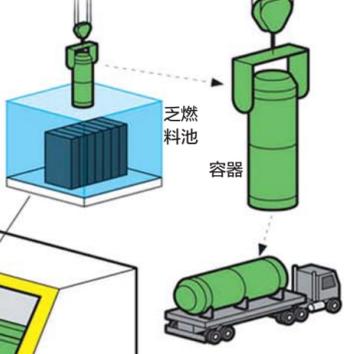
反应堆

冷却管

冻土

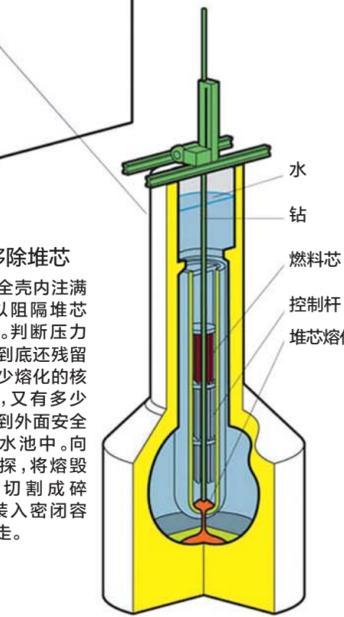
### 如何拆除熔毁反应堆

东电为拆除福岛第一核电站反应堆制定了一个粗略的计划。但公司承认一些拆除工作所必需的工具和机器人尚不存在,完成整个拆除任务预计需要40年,大约可以分为5个步骤。



### ③ 搬运乏燃料

为清空乏燃料池先要将一个大容器放入水池,机械臂在水下将乏燃料转移到这个容器中,然后将容器运送到安全地点的另一个水池中,将内部的货物卸下来。重复这一步骤直到乏燃料池被清空。



### ⑤ 移除堆芯

给安全壳内注满水,以阻隔堆芯辐射。判断压力壳内到底还残留有多少熔化的核燃料,又有多少泄漏到外面安全壳的水池中。向下钻探,将熔毁燃料切割成碎块,装入密闭容器运走。



日本也拥有世界最先进机器人产业,那么,为什么东电没有能够应对核灾难的机器人?东京大学的机器人学教授中村彦给出了一个令人沮丧的解释。2000年,在一家轴处理工厂事故之后,日本政府确实资助了一个核设施专用机器人研究项目。但该项目在一年后就被叫停。“政府声称,这一技术还不成熟,不适合核系统,现有的核系统已经100%安全。”中村解释说,“他们不愿承认这一技术存在发生事故的可能。”

虽然遭到政府的冷遇,一些日本公司依然在从事该领域的研究。在千叶工业大学的机器人学家吉田智明的实验室里,机器人已经学会上下楼梯,在瓦砾废墟上行走。这些小型坦克式的Quince机器人依靠一系列相扣的履带行动,可在崎岖表面移动。

在福岛核事故后,吉田的研究突然重要起来。凭借政府的资助,他在实验室内复制了第一核电站反应堆建筑内的楼梯,检验他的机器人是否能够在这样狭窄弯曲的楼梯上自由行动。他的像体操运动员一样灵巧的机器人证明了自己的实力,在几百次测试后终于获得到东电批准,可以进入事故现场。2011年夏,Quince成为第一款在反应堆建筑内执行调查任务的日本机器人。

Quince安装有照相机和放射性剂量仪用以识别辐射热点。但是这款机器人存在通信问题:核电站巨大的钢铁混凝土建筑干扰了无线通信。因此,Quince只能连接上电缆用于接收操作者的指令,把调查数据传输出去。这一方法的缺陷很快就显示出来。一个Quince机器人的缆线在2号反应堆建筑的第三层因缠绕破损,直到今天,这个孤独的机器人依然乖乖地待在那里,等待着无法送达的命令。

回到吉田的实验室,简陋的上下床铺说明了他的研究生们有多么的刻苦。他们目前正在研究一款改进后的勘测机器人Sakura。为了解决缠绕问题,Sakura不仅能一边走一边释放缆线,在调转方向时还能收紧松弛的电缆。它有防水功能,可以趟过水坑。它还携带一台可以检测伽玛射线的重型照相机。吉田和他的小组在测试机器人的电子设备(CPU、微控制器、传感器)后发现它们可以抗辐射,大概在100次任务后才会出现部件故障。然而,机器人在执行勘测任务后本身会带上危险的辐射,以致工作人员无法靠近。因此,Sakura必须能够照料自己;它能够找到插座,自己插上电源线,完成电池充电。

福岛拆除任务的第二步:净化。这一步完成后,工人们才能进入反应堆建筑,处理更复杂的工作。爆炸导致多个反应堆建筑毁坏,放射性材料随着爆炸冲击波传播到建筑物的各个地方,普通的防护服根本无法阻挡它们所释放的伽玛射线,要抵御如此强度的辐射,工人必须从头到脚完全被厚度相当于手掌宽度的铅质防护板包裹。

事故过后,日本政府公开征集能够胜任净化工作的机器人。几家日本大公司接受了挑战。东芝和日立分别推出了可以用高压水柱和干冰研磨墙壁和地板表面的机器人;这些机器



F 三菱重工奉献的这款机器人MHI-MEISTeR有两只手,能够使用多种工具,包括操纵电钻从混凝土墙壁和地板上采集样本。

人将把放射性材料和表层涂料或混凝土一起刮掉,再用真空装置吸起刮落的碎屑。但是,这些机器人的工作范围受到通信电缆长度的限制,而且它们只能携带重量有限的清洁剂。另一款机器人Raccoon已经开始在2号反应堆建筑的地板上工作,它身后拖着长长的管道,用于补给水和吸走垃圾。

为了给机器人清洁工们开辟出一条道路,另一个种类的机器人专门负责捡起瓦砾残骸,打通障碍物。日立公司的ASTACO-SoRa机器人有两条长臂,可触及2.5米高的物体,每只手可抓举150公斤。在手臂末端可根据任务需要插上夹钳、刀片或电钻。可惜,这款多才多艺的机器人由于不会爬楼梯而只能在一层楼工作。

## 清

乏燃料棒是拆除工作的第三步。每栋反应堆建筑内都有几百个乏燃料组件,它们被放置在顶层的水池中。这些没有防护的水池在装满水的状况下是完全安全的。它们在福岛第一核电站事故中成为公众恐惧的焦点。2011年3月15日,4号反应堆建筑内发生爆炸后,很多专家担心爆炸可能对乏燃料池造成损坏,导致漏水。调查很快发现4号反应堆的水池是满的,然而在此之前,由于美国核管理委员会的主席声称水池已经干涸,因而引发一场国际恐慌。4号反应堆乏燃料池成为东电最紧迫的拆除目标,不仅因为它确实存在的危险,也因为它让人们回忆起事故最初那段令人恐怖的日子。

清理乏燃料池的工作开始于2013年11月。东电工人使用新安装的类似起重机的机器将一个有着厚厚防护壁的容器放入水池中,接着,长长的机械臂将泡在水里的乏燃料组件搬运进容器,这一切都必须在水下完成。容器在装满乏燃料后被吊到一辆卡车上,运送到更为安全的地点保存。4号反应堆水池中装有1533个乏燃料组件,将它们全部搬运到安全地点预计需要1年时间。其他几个反应堆,包括受损严重的1、2、3号反应堆和没有受损的5、6号堆,也要完成同样的乏燃料池清理工作。

控制并隔离四处流动的放射性污染水是第四个步骤。每天,约400吨地下水流入福岛第一核电站破損建筑的地下室,它们与从反应堆压力壳中泄漏出来的带放射性的冷却水混合在一起。东电对这些水进行处理,清除其中的污染元素,但是处理之后的水并不能保证绝对安全,向海洋倾倒入这些的计划遭到当地渔民的强烈反对。为了储存累积的污水,东电安装了1000多个巨大的储水罐,这些水必需随时处于严密监视之下,以防泄漏。

东电计划在2014年建造一座地下冰墙,将泄漏的反应堆与周围地下水隔离开。首先,他们将管道间隔3-5英尺插入反应堆建筑周围的地下,然后,将冷却剂(氯化钙盐水)注入管道,让冷却剂循环不断地流过制盐土。管道周围的土壤冻结,形成一圈隔离地下水的“冰墙”。

然而,日本公众迟早会提出最艰难问题:那些储存起来的辐射污水最终能否倒入大海?三里岛事故清理项目指挥巴瑞特曾公开宣称,这些处理过的水是安全的,只含有微量的氚(一种氢的放射同位素),相比其他放射性元素,氚很快就会被身体排泄,因此相对不那么危险。巴瑞特认为,经过太平洋海水的稀释后,危险可以忽略不计。但另一方面,他又说:“释放这些水是一个敏感问题,将引发公关灾难。”另一种方案是学习三里岛的做法,慢慢地通过蒸发的方式处理掉这些水,但这个过程可能要花费几年时间。

东电还必须堵住反应堆压力壳上的漏洞,允许反应堆放射性冷却水流出。无数的漏



E 日立公司的ASTACO-SoRa机器人负责给清洁机器人开辟道路。它有两条长臂,可触及2.5米高的物体,每只手可抓举150公斤。在手臂末端可根据任务需要插上夹钳、刀片或电钻。可惜,这款多才多艺的机器人由于不会爬楼梯而只能在一层楼工作。

洞据说位于抑压池上,这是位于安全壳外的圆状结构,装有水,正常运行中用于调节温度和压力壳内的压力。东电负责第一核电站拆除工作的研发经理铃木俊一解释说,他站在优先考虑的问题之一就是研究能够找到抑压池漏洞所在的技术。

“有人提出用水下机器人。”铃木说,“但只凭借这些机器人找到泄漏的位置很难。”他指出,抑压池和周围的舱室现在都装满了水,要找到漏洞并不容易;这不比寻找水管上的漏洞,漏水的地方一目了然。在日立、三菱和东芝提供的机器人中有一款可以在浑浊的水下爬行,并用超声波感应器寻找抑压池壁上的漏洞。

如果这款机器人实际证明没有用处,东电也许会选择一种更粗暴的方式——往抑压池及相连的管道中注入混凝土。铃木说:“如果能够在安全壳和抑压池之间形成一道严密的隔离,那么那些漏洞将无关紧要。”无论用哪种方法,东电希望在3年之内堵住所有漏洞。这是完成最艰巨的最后一步的必要条件。

## 拆

除3个受损的堆芯是整个浩大工程的最后一步。只要熔化的燃料依然在1、2、3号反应堆内发光,福岛第一核电站将依然是日本持续的噩梦。只有当燃料被安全打包运走之后,这段恐怖的记忆才会逐渐消退。但是这绝非容易的任务:东电估计,拆除3个熔毁的堆芯需要20年甚至更长时间。

首先,工人将给安全壳内注满水,让水有效地隔离内部燃料释放的辐射。接着,水下机器人将对压力壳内燃料组件的状况进行勘测;这些机器人可能借鉴石油工业用于检查深海油井的技术。然后,将钻头插入压力壳的底部,把熔毁的燃料组件切割成碎块。其他机器将切碎的辐射垃圾打捞起来,装入防辐射容器运走。

反应堆的设计增加了这一任务的难度。控制杆穿透压力壳的底部,每个插入点都是薄弱环节。专家认为,1号反应堆中的多数燃料,2、3号堆中的部分燃料已经通过这些管道漏进了下面的安全壳。要拿到那些漏到下层(35米下)的燃料,东电的工人必须钻透钢制的压力壳,避开四周密布的管道和电缆。

铃木说,在设计燃料处理的工具之前,东电必须更详尽地了解堆芯熔化物的性质。公司不能简单地照搬处理三里岛堆芯所用的工具。“在三里岛,堆芯依然完好地保存在压力壳中。”铃木说,“而我们的堆芯已经穿透压力壳,这说明它熔化了不锈钢。因此,我们的堆芯熔化物肯定更坚硬。”熔化的燃料可能有着坚硬的外壳,内部却是密度接近岩浆的物质。东电正在电脑模型的帮助下,计划在实验室中复制一批堆芯熔化物用于研究其性质。

堆芯熔化物被切碎装入密闭容器后,将立刻被运到某个尚未确定地点的储藏设施。在之后的几十年,它的放射性将逐渐衰败,同时消去的还有日本公众对这次事故的记忆。可惜这些可怕的堆芯熔化物无法在博物馆展出,旁边的注释可以这样写:“人类是如此的聪明,甚至可以制造出我们无法控制的机器。这些从工业恐怖现场采集的金属残骸证明了,我们人类同样也具有纠正自己错误的勇气和坚韧。”

南都供博原载: <http://spectrum.ieee.org/energy/nuclear/dismantling-fukushima-the-worlds-toughest-demolition-project> 原作:Eliza Strickland 编译:宇

## 福岛的机器人



A 2011年夏,Quince成为第一款在反应堆建筑内执行检测任务的日本机器人,它安装有照相机和放射性剂量仪用以识别辐射热点。



B 日立公司的这款机器人可以用于冰块对地板或墙壁表面进行研磨,将放射性物质和涂料、混凝土一起刮掉,并用真空装置将碎屑吸走。



C 另一款机器人Raccoon已经开始在2号反应堆建筑的地板上工作,它身后拖着长长的管道,用于补给水和吸走垃圾。



D 东芝公司研发了这款4足机器人,它能够在崎岖的表面行走,可绕过障碍,上下楼梯。除了装备有照相机和放射性剂量仪,它还携带有一个小型陪伴机器人,专门用于勘测狭小的地方。公司还计划给这款四足机器人添加手臂,让它能够安装防护罩、堵塞漏洞、搬运瓦砾。