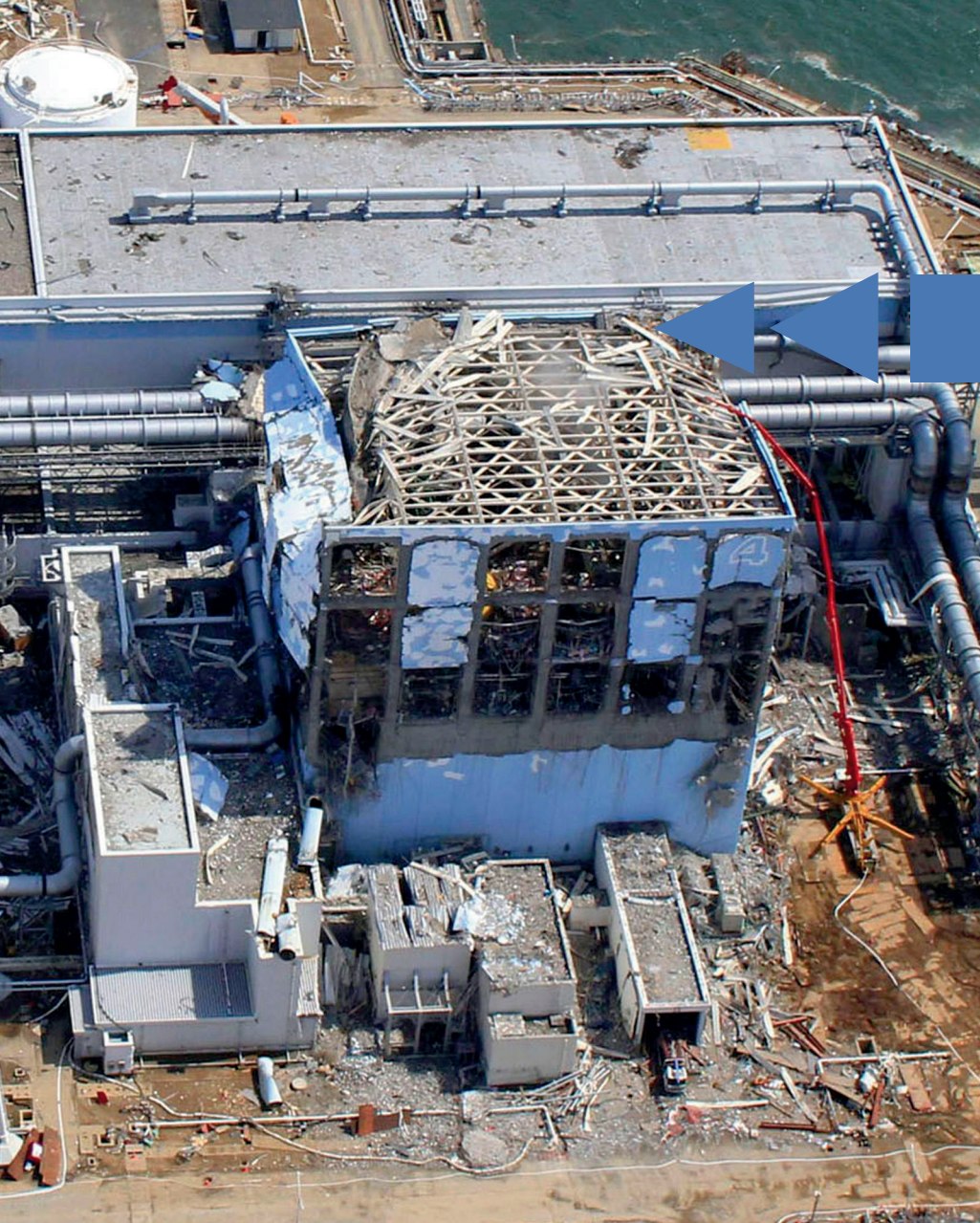


从福岛核事



2011年3月11日，日本发生9级地震并诱发海啸。海啸导致福岛核电站发生放射性物质严重泄漏事故。至今，“核恐惧”的“心理海啸”一浪高过一浪，在全球范围扩展。从西方发达国家的街头反核游行，到中国沿海的食盐抢购，再到每日一报的辐射污染动态，都在不断地加剧着人们对核能安全的担忧和恐惧。人们不禁要问：核能是安全的吗？中国的核电站具有安全保障吗？我们还需要大力发展核电吗？

福岛核电站发生了什么

若想明确地回答这些问题，我们有必要回顾一下日本福岛核电站到底发生了什么。

2011年3月11日下午14时46分，伴随着9级强震，北日本地区电网系统遭到严重破坏，造成日本东北地区大面积停电。地处重灾区的福岛第一核电站正在运行的1~3号反应堆机组因地震和断电立即采取应急措施——终止反应堆内部的核裂变反应。但是，反应堆内部还有大量的放射性裂变产物，它们依旧会以衰变的方式释放出能量。这部分衰变热功率在25兆~45兆瓦之间，相当于3万~5万个电炉同时在燃烧。如果不利用冷却水迅速将这部分热量转移出去，反应堆芯温度会迅速升高，很快被融毁。所以，反应堆停止运行后依旧需要长期冷却。

外部电网断电之后，作为应急电源的柴油发电机组自动启动，维持反应堆的循环水冷却系统正常运行。然而，地震引发的次生灾害——海啸随之而来。震后不到1小时，高达10米的海浪到达福岛海岸，而福岛核电站的防波堤不

足6.5米。洪水冲进核电厂，迅速淹没了设在岸边的应急柴油发电机组，使发电机组停止工作。此时，作为第三套应急电源的蓄电池自动接入。然而，1号机组的电池组在1小时后耗尽，3号机组的电池组在3.5小时也耗尽，两个机组的冷却系统彻底瘫痪。2号机组的水泵阀门在3天后失灵，冷却系统也停止运行。至此1~3号机组先后处于无冷却状态。随后，反应堆芯容器内液面下降，燃料棒露出水面，暴露在水蒸气中。

裸露的燃料棒得不到有效冷却，温度迅速上升。当裸露部分超过总长度三分之二时，燃料棒的温度可达到900摄氏度以上，锆合金包壳材料（核燃料的第一层保护屏障）将出现膨胀乃至破裂，燃料棒内部的核燃料和裂变产物将会泄漏出来。当裸露的长度达到总长度的四分之三时，燃料棒温度可达1200摄氏度以上。此时，锆合金将与水蒸气发生化学反应，放出大量氢气，而且这一反应放出的热量会进一步加热燃料棒。当温度达到1800摄氏度时，包壳材料开始融化。当温度达到2500摄氏度时，燃料棒将

事故看 核电的安全问题

文/王铁山

会融毁、坍塌到堆芯底部。到2 700摄氏度时,作为燃料的铀会与包壳材料的锆形成高温熔融状态。

粗略估计,在事故中,1号机组可能放出300千克氢气,2、3号机组可能放出300~1 000千克氢气。这部分氢气会通过冷凝水池进入到压力容器(核燃料的第二层保护屏障)和安全壳(核燃料的第三层保护屏障)中间。安全壳设计耐压为4~5个大气压,但是,事故中其内部压力达到8个大气压以上,必须马上减压,以免发生爆炸,形成严重的放射性泄漏。此时,唯一可能的就是采取旁路放气的办法泄压。因此,带有少量气体放射性物质的氢气、水蒸气混合气体被排放到反应堆上部的工作区内。由于氢在空气中的浓度超过4%就会发生爆炸,因此,1~3号机组先后发生氢气爆炸,将建筑的上半部分屋顶和墙壁炸飞,同时,带有放射性的气体进入环境中,形成了放射性污染。值得庆幸的是,反应堆下部的建筑结构非常坚固,爆炸没有对下部建筑产生破坏,压力容器和安全壳未出现严重破损,绝大多数放射性物质依旧被屏蔽在反应堆内部。

地震发生时,4~6号机组正处于停堆维修状态,乏燃料存放在储存池内,但是依旧需要冷却。同样因为缺乏动力,乏燃料储存池内的水温在衰变热能的作用下快速上升,达到沸腾状态。随着水蒸气的蒸发,液面下降,燃料棒露出,重复着和堆芯燃料棒损毁相似的过程。尤其严重的

是,乏燃料储存池不是封闭的压力容器,产生的气体很容易外泄,而且融毁的固体放射性物质很容易被释放到外部空间中,因此,更容易形成大量放射性物质泄漏,具有更大的危险性。4号机组同样发生了氢气爆炸,爆炸后周围放射性物质辐射量有所上升。

为了遏制事故进一步恶化,东京电力公司先后利用移动水泵向反应堆堆芯、安全壳乃至整个建筑内注入海水。这是不得已而为之的应急措施,但是,同时又产生了大量高浓度放射性废液。这些废水若存放不当将会产生次生灾害,为当前和后续的事故处理制造了障碍。

目前福岛的核事故仍在不断演变之中。核燃料的发热量会随着时间衰减,随着外部电源接入,反应堆冷却水循环系统已恢复,事故进入可控制阶段。但放射性物质泄漏造成的环境、生态、社会灾害还将持续很久,其结果目前还无法预测。2011年4月12日,日本决定将福岛核电站事故等级提高至最高级7级。

核电站有哪些安全保障

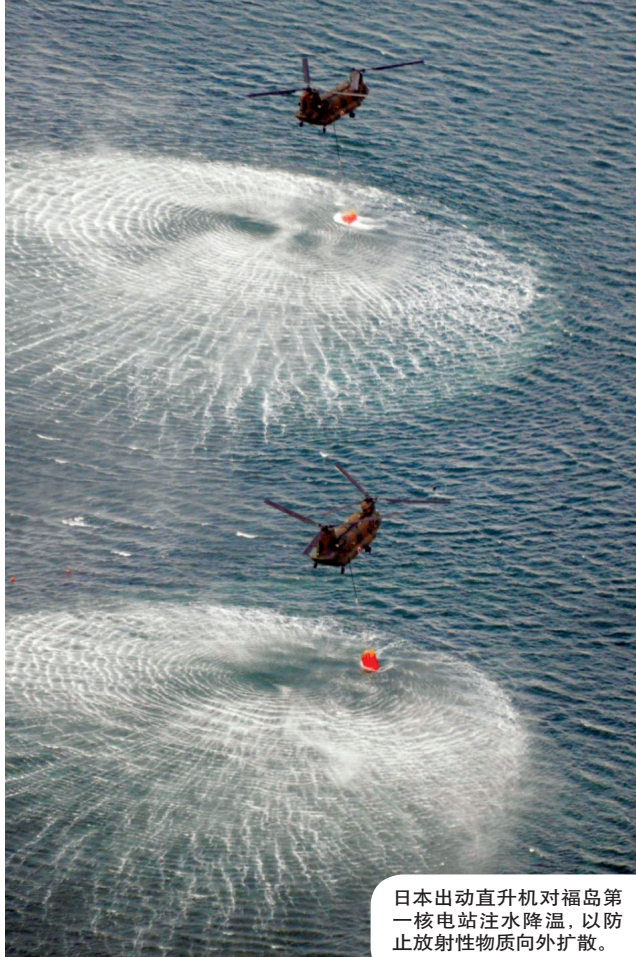
核电站一旦发生事故,对人类和环境的危害就会很大,因此,其安全性要求远高于其他发电方式。

核电站在建设中最先面临的是选址问题,也就是说建在哪里更安全、经济、高效。核电站必须建在地质稳定的区域,避免地震、山洪、海啸等地质灾害。而日本处在地震带上,火山活动频繁,地质环境对于建核电站非常不利。

由于核电站存在发生事故的潜在危险,所以应该建在人烟稀少、物产不丰、远离大工业和城市的地方。这样万一发生事故,造成的损失、对社会和周围环境的影响相对较小。然而,日本国土面积小,人口密度大,却建立了55座反应堆,因此,其核电站难以远离城市和工农业发达区域。福岛县本身是日本人口密度较小的区域,但是与其相邻的却是工业、经济非常发达,人口密度很大的区域。因此,此次核事故的社会影响极大。

核电站在运行过程中会产生大量低浓度放射性废液。最简便的方式是将其排放到深海中,进一步稀释到环境允许的放射性强度以下。这也是为什么大量核电站建在海岸边的原因。但是,离海近并不意味着直接建在海滩上,更不应该建在低洼处。福岛核电站其实建在人造海滩上,而且地基高度不够,因此没有阻挡住海啸的冲击,造成了严重的事故。这给我们上了很好的一堂课。





日本出动直升机对福岛第一核电站注水降温，以防止放射性物质向外扩散。

核电站使用的反应堆有多种类型。不同类型的反应堆有不同的安全防护设计，但是，任何一种反应堆都应该具备3种能力：

一是紧急停堆能力，能在最短的时间内迅速终止反应堆内的链式裂变反应。福岛核电站的反应堆在地震后数秒钟即自动插入控制棒，停止了裂变反应，非常成功地实现了停堆的目的。

二是停堆后的低功率维持能力。裂变反应被终止后，依旧有大量的裂变产物不断地以衰变方式放出射线，变成热量。必须把这一部分热量迅速转移到外部，以避免堆芯温度增高、融毁，造成严重事故。福岛核电站的反应堆停堆后，外部电源被切断，备用的柴油发电机组立即启动，保证了冷却水的循环，使反应堆处于稳定状态。然而，在海啸来临之后，柴油发电机组被淹，停止了工作，随后备用电池组耗尽，使得维持运行能力被破坏，导致了后续一系列事故的发生。

三是事故发生后的防泄漏能力，主要体现在反应堆结构上的多重屏蔽措施。福岛核电站的反应堆是沸水堆，设计有燃料包壳、堆芯压力容器、安全壳和厂房4道安全屏障。它们在事故发生、发展过程中起到了一定的作用，但是

核事故的分级与应对措施

事故等级		影响	应对措施	案例
7级	特大核事故	大量核污染物被泄漏到广泛的区域，造成巨大的健康、环境和社会影响。形成的灾害可能持续数十年、数百年。	尽可能组织抢救、抢修，建立大范围的隔离区，并尽快组织隔离区内的居民撤离，不要食用、饮用来自隔离区的食物和水。	1986年前苏联切尔诺贝利核事故，2011年日本福岛核事故。
6级	重大核事故	一定数量的核污染物泄漏到工厂之外，产生了较严重的环境和社会影响，需要立即采取措施来挽救各种损失。	在组织应急抢救、抢修的同时，迅速建立隔离区，组织居民撤离受辐射区域，不能食用、饮用来自隔离区的食品和水，并启动全球监测和预警系统。	1957年苏联车里亚宾斯克核泄漏事故。
5级	具有一定场外风险的核事故	核装置发生了严重的损坏，有限的核污染物泄漏到外部环境中，需要采取一定措施来挽救损失。	马上启动所有应急措施，组织人员抢救、抢修，迅速撤离在受辐射影响范围内的无关人员，不能食用、饮用来自辐射区域的食物和水，随时监测环境和人员的放射性沾污情况。	1979年美国三里岛核事故，另外3起分别发生在加拿大、英国(1957年)和巴西(1987年)。
4级	无明显场外风险的核事故	发生了严重的内部核泄漏，反应堆严重受损，工作人员受到严重辐照，同时有少量放射性物质泄漏到外部空间，周围测量到明显高于正常标准的放射性辐射。但是没有形成厂区外的环境、公众威胁。	立即停止运行，组织抢修、抢救，控制放射性物质泄漏，同时，建立警戒区，疏散周边居民。	
3级	严重核事件	除了造成较严重的内部放射性污染外，有1名以上工作人员受到过量辐射，可能致病，但不会致死。同时，外部放射剂量在允许的范围之内。	马上停止运行，同时采取应急抢救措施。	
2级	核事件	内部产生了放射性污染物扩散，工作人员受到了过量辐射(>50mSv/年)，存在严重违反安全规则操作的情况。	马上启动安全应急措施，甚至停止运行。	
1级	操作异常事件	内部操作违反安全准则，但对外部没有造成任何影响。	及时启动应急措施，终止事故。	2010年11月16日，中国大亚湾核电站发生一次1级异常事件。
0级	操作偏离事件	操作超出了正常状态，不会酿成安全事故，只需及时纠正偏差即可恢复正常工作状态。		

没有完全阻止放射性泄漏。

反应堆的整体建筑必须具有很好的防震、防水能力和密闭性，以防止自然灾害（地震、泥石流、洪水等）和外部打击（轰炸和其他人为破坏）来临时，反应堆发生结构性损伤和内部的放射性液体、气体外泄。福岛核电站在9级大地震中没有发生建筑物损伤，说明其建筑质量非常好，如果没有出现无法冷却的问题，事故是可以避免的。

从某种角度来说，核电犹如飞机，事故率很低，但一旦出现事故就可能是恶性事故，影响巨大，损失惨重。而火电、水电等犹如火车、汽车，虽然事故率较高，但每次事故的影响较小，损失也较小。我们绝不会因为飞机的恶性事故率高而不发展航空交通，相反应该进一步提高飞行的安全性。这点同样适用于核电。

中国的核电站安全吗 ▶▶

我国正处于核能高速发展的时期，在建核电站12个，另有25个正在筹建之中，是目前世界上在建、筹建核电站最多的国家。我国的核电站主要采用第二代改进型压水堆，并引进了美国西屋公司设计的第三代反应堆（AP1000）。借鉴了前苏联切尔诺贝利、美国三哩岛等重大核事故的经验教训，新一代反应堆在工作原理和安全措施上均有很大改进。比如，我国常用的压水堆采用二回路蒸汽循环推动汽轮机发电的方式，避免了带有放射性物质的蒸汽污染汽轮机和其他设备，便于检修。同时，增加了安全壳的强度，并设置了安全壳内除氦系统。最重要的是，新的反应堆在建筑顶部设计了大型水箱，即使在外动力缺失的情况下，也能够利用重力自动将冷却水注入堆芯，保证反应堆停堆后的安全。

中国目前运行和在建的核电站都处在地质稳定、没发生过巨大海啸的沿海地区，发生类似福岛核电站这种由自然灾害诱发的次生核事故的可能性很小。但另一方面，目前已建、在建和筹建的核电站均在沿海经济发达地区，从国家战略安全考虑，一旦遭到战争、恐怖袭击等人为破坏，后果不堪设想。因此，将来核电发展应该考虑向内地转移。我国的国土辽阔，有足够的地方符合核电站的理想选址要求。特别是在广袤的西部、北部地区，人烟稀少，地域开阔，靠近核燃料生产基地和核废料处理基地，应该作为重点发展地区。

我国已选择了“压水堆——快中子增殖堆——聚变堆”的核能发展道路。在保证压水堆安全、稳定运行的同时，还计划利用快中子增殖堆燃烧压水堆产生的乏燃料，在提高核燃料的利用率的同时，减少核废物。如果最终能够实现利用聚变堆发电，将可避免裂变产物泄漏造成的核灾害，使核电变得更清洁、更安全。

核能在造福于人类的同时，也可能会带来灾害。日本福岛核事故给人们敲响了警钟。我们应该从中吸取经验和教训，除弊兴利，完善我国核能发展战略，提升我国核电



历史上的严重核事故

■ 切尔诺贝利核电站爆炸事故

1986年4月26日，前苏联乌克兰共和国切尔诺贝利核电站4号反应堆发生爆炸。由于该反应堆没有设置安全壳，爆炸使得大量放射性物质进入大气。事故导致31人当场死亡，数万人由于被放射性物质沾污而死亡或患重病。这是人类历史上第一起7级核事故，形成的放射性污染大约相当于广岛原子弹爆炸形成的污染的100倍。该事故至今仍在环境、社会、经济和政治领域产生巨大影响。

■ 前苏联车里亚宾斯克核泄漏事故

1957年9月29日，前苏联车里亚宾斯克的玛雅卡核废料处理厂的一个核废料储存罐冷却系统发生故障，放射性衰变能使得液体蒸发，核废料干化沉积在储存罐的底部，失控的化学反应引起了爆炸，近1米厚的混凝土罐盖被炸裂，约有2000万居里的放射性废物泄漏到长105千米、宽8~9千米的区域内。约200人因受核辐射死于癌症，隔离区内的人员全部撤离。

■ 美国三哩岛核事故

1979年3月28日，美国宾夕法尼亚州三哩岛压水堆核电厂2号堆发生堆芯熔毁和放射性物质外逸的事故。在事故中，主要的工程安全设施都自动启动，而且反应堆的几道安全屏障均发挥了作用，将绝大部分放射性物质阻挡在反应堆安全壳内。事故未造成人员伤亡，仅有在场的3名工作人员受到大剂量辐照，但没有超出一年的允许照射剂量。核电厂周边环境放射性本底只增加了约10%，没有形成严重的环境灾害。但是，该事故带来的社会影响很大。美国各大城市 and 核电厂周边地区的居民举行了声势浩大的游行。美国政府被迫决定停止建设新的核电站。

运行安全保障标准，进一步发展我国的核电事业，为国民经济的发展提供更清洁、更安全、更经济的新能源。□

（王铁山，兰州大学核科学与技术学院教授，博士生导师，中国核物理学会反应堆物理与核材料专业委员会委员。）