

邢继：“华龙一号”是安全标准最高的核电站

本报记者 郑蔚

“我们正签核电协议，福岛核事故发生了”

邢继对 2011 年 3 月 11 日这一天的记忆特别深刻。

他说，这是所有核电行业从业人员的都忘不了的一天。这一天，改写了全世界关于核电安全的标准。

那天下午，日本时间 14 时 46 分，日本遭遇了里氏 9.0 级大地震。地震发生时，福岛第一核电站 6 台机组中的 1、2、3 号机组正运行发电，4、5、6 号机组在停堆检修。地震导致核电站所有的厂外供电丧失，3 个正在运行的反应堆自动停堆。按设计要求，厂内应急柴油发电机自动启动，一切尚在可控状态。

但地震发生 46 分钟后，令人恐怖的灾难发生了：地震引发的海啸卷起了超过 14 米的海浪，抵达日本东北海岸。海啸以不可阻挡之势淹没了福岛第一核电站按照防护最大 5.5 米海浪建造的防御设施，涌入的海水侵袭了所有的核电机组。应急柴油发电机电源、直流供电系统均遭遇灭顶之灾，核电厂顷刻之间丧失了所有的交直流电源。

“福岛第一核电站被海啸袭击的当天，我正在北京参加引进美国西屋公司 AP1000 核电技术的签约仪式。正在签约时，得知日本发生大地震的消息。签约现场都是我们核电行业的人，立即就开始担心日本核电站的安危。当时还不知道地震引发的海啸究竟有多严重、造成的危害有多大，于是大家就不停打电话了解相关信息，非常急切地想知道当地核电站的受灾情况。”邢继回忆说。

而福岛正无法抗拒地走向恐怖的深渊：由于电力完全丧失，外部救援无法实施，1、2、3、4 号机组的堆芯迅速升温，锆金属包壳在高温下与水作用产生了大量氢气。次日下午 3 时 36 分，1 号机组燃料厂房发生氢气爆炸；14 日 11 时 01 分，3 号机组燃料厂房又发生氢气爆炸；15 日 6 时，4 号机组燃料厂房发生氢气爆炸，大量放射性物质向周边泄漏。

“福岛核事故从核电站断水导致堆芯熔毁，再到锆-水反应引发氢气爆炸，每一步的恶化都没有超出人们的认识和预计，再现和印证了人们对严重核事故后恶化现象的认知。”邢继说，“它也再次印证了墨菲定律，那些我们原先认为概率很低的事，似乎不可能发生的事，依然可能发生。”

福岛核事故举世震惊，全球原本高速发展的核电快车道几乎同时被踩下了“刹车”。有的西方国家因此宣布从此不再发展核能。中国政府的反应是非常迅速的，3 月 16 日，福岛核事故还没有消息，国务院就召开常务会议立即对我国核电站进行全面的检查，同时全面审查在建核电站，暂停审批新上核电项目。国家核安全局在下达的《福岛核事故后核电站改进通用技术要求》中，提出了更高的安全标准。

“当时，挫折感确实很大。为了 CPI1000 核电项目，我们中核集团奋斗了十多年，已经通过了国家核安全局的严格审定，眼看具有三代特征的 CPI1000 项目要正式开工，福清核电站都已经准备给机组浇筑第一方混凝土了，突然项目被叫停。但即使在这样的非常时刻，我始终认为中国需要核电，国家发展核电的大方向不会改变，改变的只是政府对核安全的要求更高了。”邢继说，“我当时想的是如何尽快地把团队从迷茫失落的氛围中拉出来，按照国家提出的‘建造国际上安全标准最高的核电站’的要求，和同事们一起拿出安全标准更高的设计方案，这就是后来的‘华龙一号’。”

福岛第一核电站从技术等级来说，是第二代核电站，二代核电站的安全标准是必须考虑电站发生可能性较大的事故，这叫“设计基准事故”，而对可能

“11 月 27 日，我国自主三代核电‘华龙一号’全球首堆——中核集团福清核电 5 号机组首次并网成功。这在核电站建设进程中是一个重大节点。”中核集团首席专家、“华龙一号”总设计师、中国核电工程有限公司总工程师邢继昨天告诉记者。

9 月 4 日下午，生态环境部在京向中核集团福建福清核电有限公司颁发福清核电 5 号机组运行许可证。当天下午，福清核电 5 号机组首炉燃料装载正式开始。很快，总计 177 组燃料组件顺利入堆，标志着该机组进入主系统带核调试阶段。

邢继说：“我们将在今年年底前完成核反应堆满负荷 168 小时运行试验。通过‘168 大考’，福清 5 号机组才能完美交付运行。”

“华龙一号”的成功研制，将使我国成为继美、法、俄之后又一个具有自主知识产权的三代核电技术的国家。“华龙一号”将是世界上安全标准最高的核电站之一。”邢继说。

11 月 24 日，邢继获“全国劳动模范”称号。



▲邢继近影。
▲鸟瞰福清核电站。
(均受访者供图)

性较低的“超设计基准事故”，只需在设计时适当考虑，而不是必须考虑。但第三代核电站的安全标准更高，必须考虑概率极低的“超设计基准事故”。

“福岛核事故，确实让整个核电行业警醒了很多。正是历次核事故的惨痛教训，让行业不断探索核电怎么更加安全的理论和方法。”邢继说。

在 2012 年 3 月的核安全峰会上，中国政府宣布“在确保安全的基础上高效发展核电”的核电发展战略。中国核电人有了明确方向：我国仍将大力发展核电，但必须是“更安全的核电”！

“能动+非能动”，打造独特的“纵深防御”

“核电站设计师和火电站设计师最大的区别，就是我们设计时主要的关注点不是发电，而是如何确保核安全。因此，核电站作为投资密集型产业，它一半的投资是用在确保核安全上的。”邢继说，“我们核电站最重要的一个安全理论叫‘纵深防御’，就是对可能的核事故层层设防，只要其中某一个层面能保证安全功能，就能确保核安全的可靠性，避免核事故发生。”

“华龙一号”最大的特征是“能动和非能动相结合的安全系统”，正是这一系统使它成为国际上安全标准最高的核电站之一。邢继介绍说：“福岛核电站的安全设计只有能动安全系统，它必须依靠电力来实现和保障安全；一旦失去电力，整个安全系统就瘫痪了。这种因为相同的原因而导致所有具有相同安全功能的系统全部丧失，我们称之为‘共模故障’。所以我们设计核电站时，必须考虑什么情况可能会导致‘共模故障’，以及怎么防止‘共模故障’的发生。于是就提出了‘冗余设计’，就是只有一套交流电源不够，还要有第二套交

流电源，甚至 2 套直流电源备用；但如果备份电源离得很近，很可能同时被损坏，因此备份系统要保持足够的距离，这叫‘实体隔离’。可一旦‘实体隔离’还不够，所有能动型的交直流电源都丧失了，就必须有不依靠电力就能发挥安全作用的非能动安全措施，这叫‘多样化原则’。”

何为“非能动系统”？就是不依赖电源，而是利用重力、温差、密度差这样的自然驱动力来实现流体的流动和传热等功能的设施。假如“华龙一号”机组遭遇停电事故，安全壳非能动热量导出系统将会启动，3 个冷却水箱总共装有 2700 吨冷却水，将作为安全壳内释热的最后的冷却手段。当反应堆冷却剂系统压力降到一定数值时，水箱将自动向反应堆冷却剂系统注入含硼水以保证堆芯的冷却。

“‘华龙一号’在最主要的三道安全屏障上，都设置了‘能动+非能动’的安全系统。”邢继说，“这三道安全屏障，从内到外，最里层的是核燃料芯块的包壳，铀 235 芯块被金属壳包裹，只要金属管不破损，放射性物质就不会被泄漏；第二道屏障是一回路承压边界，它必须能承受高温高压。一回路的主要构件有反应堆、蒸汽发生器、主管道、主泵、稳压器等等，通过蒸汽发生器把二回路的水加热成蒸汽，从而驱动汽轮机发电。整个反应堆的一回路构成一个封闭系统，其承压的边界就是包容放射性物质的第二道屏障。”

“第三道屏障就是反应堆厂房的安全壳，它是一个预应力混凝土结构，可以承受前两道屏障失控引发的高温高压，包容从前两道安全屏障里泄漏的放射性物质。在安全壳的设计上，还考虑了应对各种自然灾害和极端事件，所以设计成大容量的双层安全壳，内壳是主安全壳，应对反应堆、一回路出现的问题；外壳是次安全壳，有 1.8 米厚，用来抵御外部突发事件的破坏力。比如，能抗住大飞机撞击，甚至航油的燃烧，以及龙卷风、台风的侵袭。内壳和外壳之间，还形成负压，以保证即使内壳受损，放射性物质也不会从内壳中泄漏到环境中去。”

正是这三道实体屏障与其他安全系统的共同作用，构成了“华龙一号”的“纵深防御”体系。

“华龙一号”的运行经济性也颇为出色。相比国内在运核电机组，“华龙一号”177 组的堆芯设计，可将发电功率提高 5%~10%，并可将换料周期从原来的 12 个月延长至 18 个月，大大降低了机组的运行成本。“华龙一号”整个核机组的寿命，也从过去二代核电站的 40 年提高到了 60 年。

邢继强调说：“核电站三代和二代的区别，发电效能提高高在其次，主要是在安全性上。”

“华龙一号”综合系统总设计师魏峰告诉记者，三代核电站的安全性明显优于二代核电站：福岛核电站的安全等级是 1x10⁻⁵，事故的概率是十万分之一。而“华龙一号”堆芯的损坏概率为 1x10⁻⁶，即百万分之一；放射性物质外泄概率为 1x10⁻⁷，即千万分之一，要比福岛核电站低 2 至 3 个数量级。

“华龙一号”的安全设计也区别于欧美一些二代核电站。欧洲有的三代核电站只建了冗余的能动系统，而没有设置非能动系统；美国的三代核电站是以非能动系统为主，只设了少量的能动系统，唯有“华龙一号”在安全系统设计中兼顾了能动系统和非能动系统。

“至善至真，才是大国工匠的标准”

福清在福州的南翼，依山面海。福清核电站向海而建。采用“华龙一号”技术建造的福清 5 号、6 号机组的主厂房高达 72 米，外壳直径为 48 米。远远望去，巍峨的穹顶或映着蓝天白云，或衬着南海落日，气势十分壮观。

在四川南充长大的邢继，从小向往着大海。1983 年高考时，老师建议擅长绘画的他去考美院，从来干预他兴趣爱好的父母却一致期望他去学

理工科。

“家父是天津大学毕业的，家母毕业于北师大，都从事石油教育。他们这一代人，刻骨铭心的就是‘服从祖国需要’。记得家父说过，油田到哪里，油田学校就搬到哪里，我们的家也就搬到哪里。我们家先是到玉门，再到四川。实业报国，是我父母这代人心中根深蒂固的理念，所以他们一定要我学理工科。而我那时也特别喜欢国防军工，所以高考填的志愿是哈尔滨船舶工程学院船舶工程专业，最后被该校核动力装置专业录取。”邢继说。

哈尔滨船舶工程学院前身是哈军工，首任校长是陈赓大将。邢继入学报到当天，才知道学校的所有作息安排：起床、吃饭、上课、熄灯，都是吹军号的。这让渴望投入国防军工事业的邢继既兴奋又好奇。当时，中国还没有一座核电站，他所知的“核”也仅限于“中国有了原子弹”，对核工业可谓一无所知。踏进大学，核的神秘大门才渐渐向他打开，他不仅知道了核潜艇，而且还知道了世界上曾有国家对中国进行“核讹诈”。

“那时我们专业连统一的部编教材都没有，教材全是学校老师自己编写的。有位老教授叫杜泽，对核动力装置特别有研究，我们非常敬佩他。”邢继说，“我们的母校可以说影响了我的一生。毛主席曾给哈军工题过‘工学’两字，根据这两字的内涵，后来形成了我们的校训，‘大工至善，大学至真’。做工程的，必须至善至真。至善至真，才是大国工匠的标准啊。”

1987 年，邢继毕业后进入了核二院，开始了核电生涯。但当时国内只有秦山一期一座在建核电站，他只能去参与火电厂的设计。秦山二期上马后，当时的总师倪武英指名调邢继去参与秦山二期建设，“倪总特别严谨，是他教会了我怎么当总师。”邢继说，“即使我当了总师之后，已退休的倪总依然给我写信，告诉我作为总师要注意些什么。我特别感动。”

“作为总师，‘能动+非能动’的安全系统是不是您的创意？”记者问他。

“这不是我个人的创意，是我国几代核电科研人员在学习和探索中逐渐形成的，是集体智慧的结晶。”邢继坦诚地说，“从 1999 年起，中核集团就启动了百万千瓦级压水堆核电站的概念设计，最早提出了 CNP1000，后来又发展为 CP1000 和 ACP1000；同时，中广核也自主研发了采用 157 组燃料组件的三代核电品牌 ACRP1000。2013 年 4 月，国家能源局主持召开了自主创新三代核电技术合作协调会，中核集团和中广核同意将 ACP1000 和 ACRP1000 融合，联合开发‘华龙一号’。”

2014 年 8 月 22 日，国家能源局和国家核安全局联合专家评审通过了‘华龙一号’总体技术方案。

2015 年 5 月 7 日，中国自主三代核电技术“华龙一号”首堆示范工程——中核集团福清核电站 5 号机组正式开工建设。计划建设周期 72 个月，目前有望提前完成。

自主创新是立足世界之本

文汇报：公众最关心的还是核电站的安全，“华龙一号”怎么防止发生福岛核电站类似的氢气爆炸事故？

邢继：在我们的多项“能动+非能动”安全措施中，有一个非能动安全壳消氢系统，装了几十台非能动氢气复合器。一旦发生事故，可以通过催化复合来消除氢气，限制安全壳内的氢气浓度在燃烧和爆炸限值以下。所以我们说不会发生氢气爆炸事故，是有扎实措施的。而且由于我们的“能动+非能动”设计理念，“华龙一号”机组可满足“事故后 72 小时电厂自治要求”。一旦发生事故，“能动+非能动”安全系统会运行，预防堆芯熔毁，保证压力容器完整性，消除氢气爆燃及爆炸风险。

文汇报：核能利用对我国经济社会发展的重要意义是什么？为什么我国必须发展核电产业？

邢继：中国已向世界做出了 2030 年二氧化碳排放达到峰值，非化石能源比重达到 20% 的庄严承诺。截至十二五末，我国能源消费结构中煤炭占比 64%，非化石能源占比 12%，其中核电仅为 2% 左右。能源结构的不合理导致环保问题日益突出，我国能源结构亟待调整。核电作为清洁能源和非化石能源的主力能源，在治理雾霾方面具有重要作用。一台百万千瓦核机组与一般同等规模燃煤电厂相比，每年可减排二氧化碳约 600 万吨，环保效应非常明显。

核电产业是高科技战略产业，是一个国家核心竞争力的重要体现和标志。“华龙一号”包含 6 万多台套设备，涉及设备供应商 5300 多家，对我国高端装备制造业的整体转型升级意义也十分重大。

文汇报：“华龙一号”走出去的情况如何？

邢继：核电“走出去”已成为国家战略。有了“华龙一号”，中国核电走出去将从“借船出海”走向“造船出海”，于国、于民、于能源发展，都意义重大。目前，中核集团已出口 3 台“华龙一号”，有 2 台已开工建设。据测算，我们每出口 1 台核电机组相当于出口 30 万辆汽车，能拉动装备和设计超过百亿元人民币，全寿命周期超过千亿元人民币。

文汇报：“华龙一号”的成功，给了我们什么启示？

邢继：真正的核心技术只能靠我们自己创造。尤其在当前百年一遇的世界大变局下，没有核心技术，就会受制于人。自主创新是立足世界之本，我们必须有这个底线思维。“华龙一号”获得了 743 件专利、120 项软件著作权。我们团队曾去法国一个上世纪 70 年代建设的实验基地参观，很震撼，他们的研究基地占据了整整一个山谷，山谷两边全是实验装置。正是因为他们们在基础研究上投入了大量的人力、物力和财力，核电技术世界领先。法国的能源消费中，核电已占 70%。所以无论是基础研究，还是重大项目研究，我们一定不能急功近利，更不能轻言放弃，必须目光长远地稳扎稳打、步步推进。从我们“华龙一号”的研发团队来说，我认为 6 个字很重要：坚守、协同、奉献。核电是最复杂的能源系统，我们坚守自主创新，永不放弃，才能“使命必达”。



▶“华龙一号”核岛内景。
▶“华龙一号”核电站汽轮机房。

制图：邢千里