

# 我和我的祖国

# 徐铎：耕耘中国快堆的“春耕牛”

本报记者 郑蔚

京郊燕山脚下，静卧着一座核城——中国原子能科学研究院。

这是中国原子能科学的发祥地。上个世纪五十年代末，中国第一座重水反应堆就诞生在这里。

如今，我国第一座实验快堆巍然耸立在核城的西南角。它标志着我国第四代核反应堆建设的第一步已经成功迈过。

领衔建造这座实验快堆的总工程师，是中国工程院

院士、中核集团快堆首席专家、国家能源快堆工程研发(实验)中心学术委员会主任徐铎。他告诉记者，我国是世界上第8个拥有第四代核反应堆——快堆技术的国家。我国快堆工程发展的第二步——示范快堆，作为国家重大核能科技专项，已于2017年12月29日在福建霞浦正式开工。

快堆的意义何在?“首先发展增殖堆的国家将在原子能事业中得到巨大的竞争利益;会建增殖堆的国

家，实际上已永远解决了它的能源问题。”世界著名物理学家、诺贝尔物理学奖获得者费米的话，影响了徐铎一生。

“目前，世界上商业运行的450台核电机组大多是第二代核电站。”徐铎说，“进入新世纪，全世界核能技术领先的国家都在竞相研发第四代核能技术。作为第四代核电站的快堆，是我国发展可持续的清洁能源的必然选择。”

21



徐铎(右一)幸福的一家四口。



徐铎给快堆年轻的科研人员上课。



徐铎院士向比尔·盖茨介绍中国快堆。



## 【人物档案】

徐铎，1937年4月出生江苏扬州。生肖属牛，生日为农历2月26日，民间又称为“春耕牛”。徐铎亦以此为自豪，常以“春耕牛”自勉自励。

1961年，徐铎从清华大学工程物理系毕业，进入二机部北京601所(即中国原子能科学研究院的前身)。1970年，他参加了我国第一个快堆零功率装置——“东风六号”的启动实验。1971年奉命率队从北京迁往四川夹江。1995年12月，他担任国家“863计划”中国实验快堆总工程师。2011年7月，实验快堆成功并网发电。是年，已74岁的他当选为中国工程院院士。2017年，荣获首届全国创新争先奖章。

## “我们为国家建设快堆，是‘替天行道’啊！”

徐铎是中国快堆事业的开拓者和奠基人之一。

但对大多数业外人士来说，快堆，是个全然陌生的概念。

中国实验快堆(CEFR)的全称是“钠冷快中子增殖反应堆”。在实验快堆一楼大厅里，记者见到了一座快堆的模型。

“实验快堆的主容器高12米，直径8米。中间的堆芯装有81盒六角形的燃料组件，每盒组件中有61根燃料棒。每个燃料棒上还有绕丝，以保证导热钠液可以流入。”中国原子能科学研究院总工程师、研究员张东辉介绍说，“如有燃料棒需要更换，快堆还可以实现封闭式换料。”

快堆主控室正面上，中间是2个大屏幕，可显示操纵员关注的系统信息。屏幕两侧的仪表设备，显示着整个快堆200多个子系统的实时工作状态。大厅中央有2排控制台，由值班长和3名操纵员分头负责，可对反应堆、主要分系统和机电设备实施操控。

快堆与第二代、第三代核电站相比，优势究竟何在?

投身快堆研发50年的徐铎院士告诉记者，快堆有两大特点：“一是它能增殖易裂变核燃料。自然界的天然铀，只有铀-235才是易裂变核燃料，但它在铀矿中的丰度只有约0.7%，而不太能裂变的铀-238却在天然铀中占到99.2%以上。在第二代、第三代压水堆中，铀-238是无法发生裂变反应的；而在快堆中，核燃料是铀和钍-232，钍裂变释放的快中子会被装在反应区周围的铀-238吸收，又变成能裂变的铀，且生成的铀比消耗掉的还要多，裂变反应就此循环持续下去，称之为‘链式反应’，快堆也因此称为‘快中子增殖反应堆’。它真正消耗的是占到99.2%以上的铀-238。在快堆的闭式燃料循环系统支持下，它把铀资源的利用率从压水堆的1%左右提高到60%以上。由于利用率的提高，更贫的铀矿也值得开采。如此，就不怕经济可采铀资源的有限性，能保证核电长期应用。”

仅此一点就不可小觑。张东辉告诉记者，一座百万千瓦级的压水堆核电站，在其60年寿命周期内需要大约1万吨天然铀用作燃料。根据有关世界能源组织之前公布的数据，地球上无论是石油、天然气、煤炭，还是铀矿的现存量，可开采年份大多在100年以内，而快堆如果能将铀资源的利用率提高60-70倍，这对国家的能源安全是巨大的贡献，还可大大减少二氧化碳的排放。

“快堆的第二个特点是，快堆中的快中子可以把压水堆用过的核燃料中的高放长寿命次锕系核素镅、锔等

当燃料裂变掉，放出热能发电，变废为宝。不仅如此，压水堆用过的燃料中长寿裂变产物如碘-129和铯-99等还可以在快堆中嬗变掉，变成一般的短寿命裂变产物，或变成稳定同位素。所以快堆可使原来需要作地质贮存的高放废物量大大减少，降低地质变动下环境受放射性污染的风险。”

这让记者顿悟，为什么徐院士常对他的学生说，我们发展快堆是“替天行道”。之前的压水堆核电站乏燃料里的钚和锕系核素(MA)要存放300-400万年，才能达到与天然铀同等的低放射水平。而快堆的一般裂变产物，只要300-400年，就能与天然铀的放射水平一样低，极大地降低了其贮存的风险和成本。而且，据专家初步估算，一座焚烧快堆可嬗变掉5-10座相同功率的热堆产生的MA量(即支持比为5-10)。

“快堆是真正的清洁能源，以最小的环境代价帮助人类实现可持续发展。”徐铎笑着说，“国家是天，人民是天，我们发展快堆，真是为国家‘替天行道’啊！”

## “最困难时，总想起周总理特批50公斤铀”

扬州人有句老话：“从小看八十。”徐铎生才3个月，宛平城破，卢沟桥事变爆发，中华民族到了最危险的关头。国难当头，父亲徐铎给他的小儿子起了个名字“铎”。“我父亲后来对我说，当时国家要抗战，但既缺钱又缺粮，所以起了个‘铎’字，既有钱，也有米，就是希望国家能强大。”

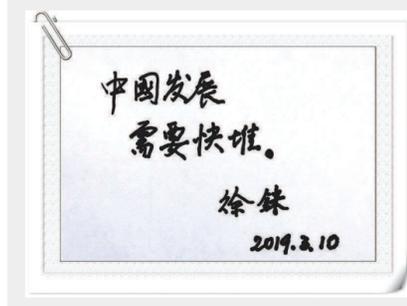
“铎”在化学元素表上排序76号。徐铎化学造诣颇深，抗战爆发前，在上海水利学校当化学老师。他4个子女的名字都以化学元素命名，小儿子取名“铎”，大女儿叫“钋”，小女儿就叫“铀”。“我父亲有3根子的化学试剂和烧杯，但日本兵进攻上海时，一颗炸弹把我父亲的书和仪器都炸掉了。”徐铎说，“于是，父亲携家带口逃到扬州，当中学老师。后来日军又占领了扬州，父亲怕日本人逼他去当汉奸，就在公开场合故意‘手抖’，拿不了试管，于是改当了数学教师。”

但父亲对化学的爱好，还是在徐铎的心中播下了种子。他3岁起就学父亲样，用加了墨汁的水在烧杯里倒来倒去。他清楚地记得，当时买不到雪花膏，父亲就从玉簪花里萃取香精，让孩子们把干净的雪捧进盆里化水，然后再做成雪花膏。

“我父亲是个了不起的人。”徐铎对记者说。1955年他高考时，清华大学希望他去读工程物理系，徐铎以为这是“做工程的”，说没兴趣。还是父亲告诉他：“工程物理是为国家研究核工程的。中国要是没有核武器，就要被人家欺负。”这一句话，



徐铎院士在中国实验快堆主控室。(均受访者供图)



徐铎寄语：“中国发展需要快堆。”

点醒了徐铎。

这一届的清华本科读了6年，1961年，徐铎走进了601所。当时601所汇集了吴有训、钱三强、王淦昌、彭桓武、朱光亚、王承书等一代领军人物，徐铎不仅亲眼他们骑着自行车上下班的身影，还听过他们不少教诲，深受感染。

1965年，徐铎第一次听说了快堆这一国际前沿课题。3年后，他正式进入快堆的科研队伍。“1964年，我国刚爆炸了第一颗原子弹，高浓缩铀十分紧缺，但周恩来总理还是特批了50公斤浓缩铀用于我国第一个快堆零功率装置‘东风六号’的启动实验。”徐铎告诉记者说，“1970年6月29日夜里11点多，零功率装置达到临界。那天正好我值班，大家激动啊……”

虽然“零功率”并不是绝对没有功率，只是功率低于100瓦，但就是这小小一步，却让快堆就像中子一样在他的心中不断地裂变增殖，再也停不下来了。

成功的路上总是遍布荆棘，国家和个人都是如此。1971年，一道调令，将快堆的300多名研究人员全部从京郊房山调往四川夹江，一去16年。“这16年，是我科研生涯中最艰难的日子。”徐铎坦诚道。

当时正值“文革动乱”，科研也没有了项目。老专家戴传曾悄悄叮嘱徐铎说，“你千万别把快堆的事情放掉，在那里要多多跟踪了解国外的快堆是怎么发展起来的。”

这一句话拨云见日，让在夹江的山沟沟里难得见到太阳的徐铎心中豁然开朗。夹江虽然没有食堂，所幸还有

个图书馆，这是科技信息的泉眼，为徐铎连接起了北京和世界。山里木头多，别人无所事事买木头打家具，他却拉着核燃料元件组的同事整天钻图书馆研究快堆的文献。在那里，徐铎他们竟然还进行了快堆最初的理论设计和工程设计，做了一个快堆的简易模型。

让徐铎最痛心的，不是夹江生活条件的艰苦，而是一大批同事因各种原因离开。最初的300多人只剩下108人。80年代初，徐铎自己也曾有一个可以去竞聘国际原子能机构的职位的好机会，但他没有动心。他对同事和家人说：“我们这么大一个国家怎么能没有快堆呢?在我国科研经费匮乏、高浓缩铀十分紧缺的时候，周总理曾特批50公斤高浓缩铀给我们做实验。每当想起这段往事，我总感到心里沉甸甸的。如果不取得像样的研究成果，我是不会离开的。”

正是这份沉甸甸的责任感，托起了中国的快堆。1986年的春天，徐铎奉召来到北京，参与国家“863”高技术项目的申报。当徐铎代表快堆项目汇报时，他从理论设计到工程设计，厚积薄发地娓娓道来，赢得了一致公认的好评，快堆因此列入了“863”国家科研计划，终于上马了。

1987年，徐铎和他快堆组的成员正式从夹江班师回朝。

## “我们必须保证建设的是绝对安全的快堆”

建设快堆虽然列入了国家“863”

计划，但并不意味发展从此一马平川。1997年，正当实验快堆进入初步设计的时候，一则“法国超凤凰快堆电站寿终正寝”的消息，引发了一些人的质疑：“你们怎么敢在首都北京建快堆，万一出了核事故怎么办?”

每当遇到质疑和诘难，徐铎就从上到下、八方奔走地去解释解释，做快堆的“科普”工作。

其实，这个问题徐铎他们何尝没有想过。徐铎说：“快堆的安全性，一直是我们首要解决的核心问题。早在夹江的时候，我们就在研究快堆的安全性，如遇到意外情况，堆芯会不会烧穿?在不同的环境下，放射性会不会泄露出来?我们的结论是，快堆在安全性上也是核能领域的‘优生’，而且我们采用的钠冷快堆，又是技术最成熟的堆型。”

纵观世界核能发展中的意外事故，无外乎三种类型：反应堆不能停堆；堆芯的热量无法有效地从堆内导出；从反应堆中泄露出的放射性物质没能包容在电站内部，进入了电站之外的公共空间。

徐铎说，“对这三种事故的预防，正是快堆比其他堆型更优之处：首先，在钠冷快堆中，我们将反应堆设计为负反馈的堆芯，依靠自身的温度参数变化能‘自动’降低反应堆功率。快堆控制棒组件里所装棒束落下行程比压水堆要短，并且由于快中子反应原理决定，一旦只要有1个棒束落下就能对全堆造成停堆效果。我们的快堆设计了3套停堆系统来保障反应堆能够成功停堆，其中有1套是非能动停堆系统。”

他边给记者画一张实验快堆的结构示意图，边指点讲解：“我们的实验快堆采用‘钠-钠-水’三回路设计。位于核岛的一回路为一体化池式结构，池中装满了两三百吨钠液。金属钠在常温下是固体的，但加热到98℃就会融化，变成液体。为什么我们不用水来导热，而用钠来导热?因为水的导热率只有0.577，而钠的导热率是71.2，钠的导热率是水的100多倍。正因为钠的导热率如此之高，所以它会把堆芯中的热量迅速导出，不仅可将核岛的热功率最大化地转化为电功率，而且可同时有效地控制温度，不会因堆芯无法散热而烧坏。”

实验快堆堆芯下方是低浓钠液，堆芯的出口温度是530℃。二回路的蒸汽温度是480℃，这些都远远低于钠在常温下的沸点881.4℃。因此，一回路内只需要保护气体氩气有微弱正压即可，这点微

压对堆容器是非常安全的。

实验快堆还采用了不依赖外部电源和人工操纵的非能动余热导出系统，其热交换器和空冷器连接，完全依靠自然对流和自然空气循环导出余热，从根本上解决了余热排出难题。

日本福岛核电站大事故的原因，就是因为海啸破坏了电力供应，导致无法启动水泵用水给核堆降温，最终堆芯熔化烧穿，引发高温蒸汽爆炸，令放射性物质溢出扩散。而实验快堆的非能动余热导出系统因不需要电力和人工干预，可从根本上避免类似事故的发生。

参与设计的俄罗斯专家原本将这非能动余热导出系统设置在二回路的管道上。而徐铎根据“以我为主，中外合作”方针，坚持将非能动余热导出系统直接建在主容器的回路内，一旦发生故障，不必再人工一个个打开阀门，可确保系统立即自主启动响应。

仅此，双方专家就在谈判桌上各执一词，互不相让。历经3次谈判，俄方才接受了徐铎的设计方案。实验证明，这一创新不仅可行，而且使安全性更为可靠。张东辉说，“徐院士的方案使我国快堆成为世界上第一个唯一采用此方式排出事故余热的快堆。因此与世界上已建快堆相比，它是最安全的一座快堆。”

在全体快堆人的努力下，2010年7月21日快堆首次临界；2011年7月21日快堆并网发电，标志着我国成为世界上第8个拥有快堆技术的国家；2014年12月18日，快堆实现了满功率72小时运行。该堆热功率为65万千瓦，电功率20万千瓦。

“我们的快堆是一个低压系统，即使在最严重的事故情况下，安全壳内的压力升高也很小，使得比较容易把放射性物质包容在安全壳内，不会扩散到厂区以外。”徐铎说，“在正常情况下，我们的快堆每年最大放射性为0.05毫西弗，仅为国际0.25毫西弗的五分之一。”

徐铎反复强调，实验快堆的建成是全体设计者和建设者的功劳。该课题研究共获奖91项，其中国家科技进步奖3项，已获专利80余项。

张东辉告诉记者，截至到2018年年底，我国投入商业运行的核电机组共44台，装机容量44.6万千瓦，我国核电的年发电量为67914.20亿度，仅占全国发电总量的4.22%，大大低于全球发电总量中核电占比10%的平均水平，这说明我国发展核电的空间巨大。

## 记者手记

## 从心底里喜欢这春雨

在中国原子能科学研究院的中心花园里，矗立着钱三强和王淦昌这两位老院长的塑像，早春的阳光洒在塑像和翠柏上。

60多年来，共有60多位两院院士在此建功立业。他们似群星闪耀，令人肃然起敬。

耄耋之年的徐老，一头银发，精神矍铄，面色红润，身板笔挺，语言幽默，略带江南口音。聊得兴起时，声嘶力竭；要紧之处，迅速地在笔记本上查出关键数据，思路清晰。那笔记本上的字体，清秀端庄，真是字如其人。

告别徐老和他夫人，见那辆从四川夹江带回北京的“永久”牌载重自行车，依然停在他家门外的墙边。车身上那张黄色的牌照“京房山0078009”，格外醒目。掐指算来，徐老骑着它风里来雨里去，已有46个春夏。

徐老来上班，按规定院里要派车的，但他坚持骑自行车。这让我们很担心，因为从生活区到工作区路窄车多，已发生过多起交通事故。”张东辉告诉记者。

“他们都反对我骑自行车。”徐老笑着说，“我从80岁以后就不骑车了，要出门买东西我就推着自行车去。”

记者本想请徐老拍一张推着自行车的照片，不料天上渐渐沥沥下起雨来。

春雨来了。这一夜，北京胡同里的柳树被这雨丝滋润着。翌日一早，枝条上就萌出了一排排嫩芽。“春耕牛”，从心底里喜欢这春雨呢。

