

马克·希布斯

中国核电的未来



马克·希布斯

中国核电的未来

王岚 / 译



卡内基
国际和平
研究院

本报告的调研工作得到了伊利诺伊州芝加哥市约翰·D·麦克阿瑟和凯瑟琳·T·麦克阿瑟基金会的慷慨资助。

卡内基国际和平研究院2018年版权所有。

卡内基作为一个研究机构，对公共政策问题不持立场；本文仅代表作者的观点，并不代表卡内基及其工作人员或理事的看法。

未经卡内基研究院的书面许可，不得以任何形式或任何方式复制或传播本出版物的任何部分。如有疑问，请直接咨询：

卡内基国际和平研究院出版部

华盛顿特区西北区马萨诸塞大道1779号

邮编：20036

电话：+1 202 483 7600

传真：+1 202 483 1840

网址：CarnegieEndowment.org

该出版物可在CarnegieEndowment.org/pubs免费下载。

目录

作者简介.....	v
术语表.....	vi
缩略语列表.....	ix
概要.....	11
前言.....	13
中国核电选择与闭式核燃料循环.....	18
“三步走”战略：技术选择和挑战.....	33
电力政策与经济.....	61
影响中国决策的其他关键问题.....	75
结论和展望.....	90
注释.....	105
卡内基国际和平研究院.....	131
中国核场址地图.....	132

作者简介

马克·希布斯 (Mark Hibbs) 是卡内基核政策项目的高级研究员，常驻德国柏林和波恩。在2010年加入卡内基之前，他是核能、核贸易和核不扩散领域的编辑和通讯记者。他的作品发表在多家媒体机构的出版物上，包括英国《金融时报》和麦格希公司的普氏能源资讯，他曾担任后者的欧洲区编辑和亚太区编辑。

希布斯的研究集中在国际核贸易和核不扩散管理方面，主要涵盖四个领域：国际核贸易体制、国际原子能机构的决策、核保障监督与核查以及双边核合作协议。

2011年和2015年，希布斯主持了两次研讨会，与会者是核供应国集团的成员国政府，核供应国集团是世界上最主要的多边核贸易控制机制。他还在2011年发表了题为《核供应国集团的未来》的卡内基报告。

希布斯还进行核电政策研究。2012年，希布斯还与詹姆斯·阿克顿合作撰写了关于福岛事故的报告，标题是《为什么福岛事故本可避免？》。自2011年以来，希布斯在卡内基主持了关于中国核能计划的未来和核燃料循环政策的项目。2014年，希布斯撰写了一份关于土耳其对《不扩散核武器条约》和核供应国集团政策的研究报告，该报告作为《土耳其的核未来》项目的一部分。

希布斯还在《纽约时报》《国际先驱者论坛报》《朝鲜日报》《金融时报》《世界报》《每日新闻》《法兰克福汇报》《华盛顿邮报》等多家媒体发表文章和评论。他也经常为“军备控制专家”博客撰稿。

术语表

锕系元素

锕系元素是原子序数为89~103的重金属元素。核反应堆中的铀燃料受辐照后，就会生成这些元素，它们具有放射性，但通常寿命很长，并被认为是核废物的一部分。钚和铀被称为主要锕系元素；其余所有锕系元素被称为次锕系元素，包括镎、镅和锔。

基本负荷

基本负荷是电网在长时间内必须提供的最低功率水平，通常认为是全天候持续所需的功率输出。与其相对应，峰值负荷是指电网在短时间内必须提供的最大功率水平。

增殖比

燃料在反应堆辐照过程中，新产生的易裂变材料与消耗的易裂变材料的数量之比。

燃耗

燃耗是指一定数量的核燃料提供的能量。对于动力反应堆来说，燃耗的常用单位是MWd/t（或GWd/t）。它是度量反应堆燃料消耗程度的指标。

快中子反应堆

快中子反应堆（或快堆）是利用快中子产生裂变链式反应的反应堆。与之相反，热中子反应堆是利用慢化剂（如水或石墨）减缓中子的运动速度的反应堆。

裂变产物

裂变产物是铀燃料在核动力反应堆中受辐照后产生的轻元素，包括碘、铯、锶和氙的同位素。它们具放射性，被认为是核废物的一部分。

吉瓦

1吉瓦（GW）相当于10亿瓦，是测量工业发电厂额定电力的标准单位。1吉瓦的电力足以点亮1000万盏额定功率为100瓦的灯泡。

重金属

重金属是指核燃料中的锕系元素。核燃料的总量通常以吨重金属（MTHM）来表示。

镧系元素

镧系元素是元素周期表第57~71号这15种元素的统称，它们被称为“稀土”金属，其中有些镧系元素是乏燃料的裂变产物。

轻水反应堆

轻水反应堆（LWR）是使用低富集度二氧化铀燃料和轻水（即普通水，而不是含有较多氢同位素氘的重水）的反应堆。轻水是堆芯冷却剂和核裂变链式反应的慢化剂。轻水反应堆是最常用的核动力反应堆。

混合氧化物燃料

混合氧化物（MOX）燃料中含有二氧化铀（UO₂）和二氧化钚（PuO₂）。它既可用于轻水反应堆，也可用于快中子反应堆。快堆使用的MOX燃料中钚的含量一般高于轻水反应堆。

慢化剂

慢化剂用来减缓核裂变反应中产生的快中子的运动速度，使被慢化的快中子应用于热中子反应堆。商用动力反应堆中最常用的慢化剂是轻水。

中子俘获

中子俘获是中子与重核碰撞并被其吸收的核反应。在核反应堆中，铀发生中子俘获，导致铀嬗变成钚。

压水反应堆

压水反应堆（PWR）是一种轻水反应堆（LWR），反应堆中的水被加高压吸收热量，然后进入蒸汽发生器。沸水反应堆与它相反，直接在堆芯产生水蒸汽。

放射性毒性

放射性毒性是衡量放射性核素危害人体健康的尺度，衡量标准包括辐射类型、被人体组织吸收的可能性，以及在身体中停留的时间。

溶剂萃取

溶剂萃取是后处理中将乏燃料中钚和铀分离出来并提纯的工艺。

蒸汽发生器

压水堆中，蒸汽发生器利用高压水的热量沸腾低压水，产生蒸汽，然后将蒸汽输送到涡轮机中进行发电。

超临界水冷反应堆

超临界水冷反应堆是一种概念反应堆，反应堆中的水在极高的温度和压力之下工作，液相和气相区别不再明显。

热中子反应堆

热中子反应堆是使用慢化中子的反应堆。

超铀元素

超铀元素是原子序数高于铀（92）的重元素。

缩略语列表

ADS	加速器驱动次临界系统
CAS	中国科学院
CAEA	中国国家原子能机构
CDFR	中国示范快堆
CEFR	中国实验快堆
CGN	中国广核集团有限公司
CGNPC	中国广核电力股份有限公司
CIAE	中国原子能科学研究院
CNNC	中国核工业集团有限公司
COEX	铀系元素联合萃取
CSGC	中国国家电网有限公司
ERI	国家发展和改革委员会能源研究所
GDP	国内生产总值
GIF	第四代国际论坛
GNEP	“全球核能伙伴关系”计划
GWd/MT	吉瓦天/吨
GWe	吉瓦（电力）
HEU	高浓铀
HLW	高放废物
HTGR	高温气冷反应堆
IAEA	国际原子能机构
IHEP	中国科学院高能物理研究所
INPRO	国际创新反应堆和燃料循环项目
kg	千克
KWh	千瓦时
LBLNL	劳伦斯伯克利国家实验室
LWR	轻水反应堆
MA	次铀系元素
MEP	中国环境保护部
MOX	混合氧化物

MSR	熔盐反应堆
MT	吨
MTU	吨铀
MTHM	吨重金属
MWt	兆瓦（热量）
NDRC	国家发展和改革委员会
NEA	国家能源局
NNSA	国家核安全局
NPT	《不扩散核武器条约》
NSG	核供应国集团
OECD	经济合作与发展组织
P&T	分离和嬗变
PUREX	普雷克斯工艺（铀钍氧化还原提取工艺）
PWR	压水反应堆
R&D	研究与发展
REPU	后处理铀
RMB	人民币
SASAC	国务院国有资产监督管理委员会
SCWR	超临界水冷堆
SO₂	二氧化硫
SOE	国有企业
SNPTC	国家核电技术公司
SPC	国家电网有限公司
SPIC	国家电力投资集团有限公司
TRPO	磷酸三烷基氧化物
UO₂	二氧化铀

概要

中国正努力于2030年成为世界核电技术部署领域的先锋。如果成功的话，中国将在核技术发展、工业能力和核能管理方面处于全球领导地位。由此产生的影响将具有广泛的战略意义，这将影响核安全、核安保、核不扩散、能源生产、国际贸易和减缓气候变化。特别重要的是，中国能否实现工业化转型，从现有核技术转向以快中子反应堆（简称“快堆”）为核心的、回收大量钚燃料的先进系统。

中国电力政策面临的挑战

过去的一个世纪，中国的电力消耗很少。如今，中国14亿人口消耗的电力超过了世界上任何一个国家。尽管人均消费仍仅为西方国家的三分之一，但在政府提倡城市化、扶持更清洁的家电和汽车工业的政策推动下，中国的电力需求将继续增长。如果未来电力需求以自现代化以来历史增长率一半的速度增长，那么中国巨大的电力消耗也将在二十年后翻一番。

为此，中国力求实现电力供应多元化，摆脱以煤炭作为电力生产主要来源的状况。中国政府已经承诺，到本世纪30年代，不断扩大的特大城市的空气将得到净化；但是，中国的煤炭生态平衡却令人遗憾。尽管中国将采取多种不依赖煤炭发电的措施，但中国政府认为，核能是一种重要的基本负荷电力资源，可以利用，并且经济可靠。

中国核电发展的不确定性

中国的核电投入并不一定有高回报。目前为止，在国家政策的激励下，中国的核电行业已经得到了飞速发展，然而这些激励措施在将来可能会遇到压力。电力系统改革正朝着监督和定价更加透明的方向发展，这可能会给核电投资造成不利影响。虽然中国国家主席习近平支持对战略性经济部门实行国家控制，但他也主张进行市场改革，这些改革导致西方核电行业出现了危机。

核工业必须经受住习主席“新常态”的考验。中国经济逐渐放缓，特点是生产资料投资回报逐渐下降，并转化为债务上升和产能过剩。人口、电力负荷状况变化，技术创新，包括全国统一大电网的连通，实现全国性大量电力调配，都可能影响核能投资。

此外还有政治风险。中国公众对核电的支持度摇摆不定，可能支持率较低。自日

本福岛核电厂事故以来，民众的担忧促使中国政府放弃了将来在内陆地区建设中国大部分核电厂的长远规划。如果到本世纪20年代这一政策保持不变，那么中国核电建设部门的发展前景将会暗淡；继续不加限制地在东部沿海地区（中国几乎所有的核电都来自那里）进行核电建设，将会遭遇经济、产能和政治上的阻力。

在习主席的领导下，中国的全球化进程仍将持续，但国家背负的责任越来越大。面对加大核电投资所带来的风险，政治决策和公众文化可能都不支持核电投资无限增加。福岛核事故前，一些可能来自官方的预测称，中国到2050年将拥有400多座核电厂，但现在这个数目已经削减了一半。中国政府所做的风险评估也表示，如果发生严重的核事故，共产党和国家将受到人民的谴责。一位中国规划专家在2016年表示，对于一个在工业安全方面既往表现欠佳的国家，“我们拥有的反应堆越多，我们的责任就越大”。

先进技术的机遇与风险

到目前为止，虽然中国的核发展令人瞩目，但它的发展一直依赖于半个世纪前其他国家发明的技术，中国只是技术复制。在本世纪，中国的目标是使用先进系统取代轻水核电厂，这一系统虽由其他国家开发，但还未被强制投入使用过。

- 如今，中国已准备进行这方面的投资，但所选择的一些技术缺乏扎实的专业领域知识积累；要想成功，就必须实现从研发向商业化部署的过渡。
- 在本世纪30年代之前，一些系统可能还没做好商业部署的准备，因此，中国目前必须继续维持庞大的核研发投资，才能取得成功。
- 中国核工业的技术转型必须依靠国家；中国政府必须做出技术选择，并决定能否根据市场做出经济决策。无论中国成功还是失败，对全球的影响都将是重大的。
- 如果中国只是照搬其他国家过去的经验，那么人们会更加相信，快堆及其燃料循环太危险、太复杂、费用太高，无法用于大规模电力生产。
- 相反，如果中国成功实现了这一宏伟目标，那么在进入22世纪之前，中国的核电态势可能会显著好转。
- 如果是这样的话，中国将会深刻影响全球对管理核电系统相关风险的认识及规则。

前言

中国目前是世界上最大的应用核电技术发电国家。在不到二十年的时间里，中国正在运行的核反应堆数量从3座增加到38座，还有18座正在建设中。目前中国占世界新增核电投资的一半以上。2018年，中国正在运营的核电厂数量仅落后于美国和法国。按照目前的预计，在2030年之前，中国的核电发电量可能超过曾在核电领域领先世界半个多世纪的美国。

根据中国以往在核电方面取得的成功，外国政府和行业的专家普遍预计，未来几十年，中国仍将继续成功地管理和推进核电计划。尤其值得注意的是，在这种发展态势下，中国核电行业的决策很可能对诸多方面产生重大影响，包括全球核电远景、核燃料循环体系架构、核出口竞争、核技术持有国家对贸易伙伴的战略优势，以及国际核治理。

不管未来如何发展，中国都将深刻影响世界其他国家对于核电和核燃料循环的看法。中国的发展目标是从传统的核电反应堆过渡到完整的核燃料循环，包括快中子增殖反应堆、乏燃料后处理和铀燃料回收利用。如果中国不能实现这一目标，将会强化一些国家的惯性思维，即核裂变是一种过渡性的能源技术，可能在本世纪被其他能源所取代；如果中国成功，可能会大大改变人们对核电前景普遍的悲观态度。其他国家可能会在中国的带动下，认为在未来几个世纪核电仍可继续使用，而且工业规模的“铀经济”带来的相关风险，在社会、经济、环境和政治上都是可以接受的。

中国核电行业随时准备进军国际核产品市场。如果中国在核电领域不断取得成功，那么西方核工业面临的挑战将更加严峻。就在不久以前，中国国有企业还被认为是“二级”供应商，而现在他们有可能打入成熟的核电厂出口市场。中国采取的是指令计划型的商业模式，这种商业模式会使中国国有企业与国外私营企业在核领域竞争时占有绝对的优势。如果中国的商业规则更占上风，中国最终可能成为全球领先的核燃料、核电厂和核工程服务供应商。

中国核电企业从事的商业活动，将让中国政府获得战略影响力。中国的核设备、核技术和核材料的成功出口，将为中国开辟道路，复制美国“和平利用原子能”计划的成功，影响中国核合作伙伴和客户的外交、能源和技术政策。中国核企业要扩大核贸易，特别是进军发展中国家，就需要提供资助，这样中国政府才能实现战略利益。

中国核电的触角伸得越长，在全球核治理中就拥有越多的发言权。如果中国在未来几十年成为领先核电大国，那么它就会要求在一些涉及多边技术规则制订的协约和组织中发挥相应的决策作用，包括《不扩散核武器条约》、国际原子能机构和核供应国集团等。如果中国实现了闭式核燃料循环，那么为了体现这一成就，与核安保和核不扩散有关的全球治理机制可能就要做相应调整。

虽然出现了这些进展，但中国这个“核蜂巢”的嗡鸣声并没有逃脱中国国内和国际新闻媒体的注意。然而，新闻媒体每天只关注新合同、核工业伙伴关系、反应堆项目和创记录的电力生产，让外界误以为中国的核电计划将无限扩大和递增，而不会遇到挑战、危机或挫折。

今后几年，中国的核工业可能不会像过去三十年那样仍保持强劲的发展势头。如果出现其他新情况，以下这些情况甚至可能发生，包括：中国电力部门实行广泛的市场改革，而这会威胁到政府对核电行业的补贴和资助；长期的经济放缓，再加上从资本投入到消费产品的更深层次的经济转型；债务高企和全球化导致的风险规避现象；核电投入瓶颈的出现；中国未完成从复制现有核技术，过渡到在未来应用更先进、技术更复杂的创新系统。

无论如何，如果认为中国的核计划将延续自20世纪80年代以来的发展轨迹，那将是错误的。中国的核电系统是在深刻改革之前根据自己的预想建立的，这一改革将中国与全球经济发展联系在一起。目前，中国改革取得了丰硕的成果：财富更多、行业公司化、经济竞争、多样化的增长，以及对环境保护和政治问责更多的期待，都将限制和影响国家的核电决策。要想取得成功，中国领导人将不得不调整长期的核电政策，将改革带来的变化考虑在内。

对西方核工业的挑战

就中国核能产业的规模来看，我们就可以确定地说，中国决策者对这一行业做出的管理决策，将对全球核能系统产生重大影响。20世纪末，法国成熟的核电工业运营了50多座核电反应堆，供应6000万人口总电力消耗的80%。¹相比之下，当中国在几年后将第50座核电反应堆并入国家电网时，中国核电厂的总产量只能满足14亿人口电力需求的5%。²

早在中国将目光投向核电厂出口之前，全球核工业就已开始了整合，目前这一进程仍在持续。自20世纪80年代以来，比利时、德国、意大利、日本、荷兰、瑞典、瑞士、英

国和美国的核电公司都放弃了核工业。法国、美国和日本拥有世界上近四分之三的核反应堆，现在，这些国家的公司的核工程部门都在缩编，未来何去何从，仍是未知数。这些公司正在陷入人员设备利用率低、运营成本增加、专业技术流失以及政治支持减少的困境。美国西屋电气公司（以下简称为“西屋公司”）提供了世界上半以上的动力反应堆技术，2006年被中国选中，为未来中国大量的核电厂提供设计蓝图。2017年3月，西屋公司已向中国转让了大量技术，即将与中国签订新业务，但突然在美国申请破产。西屋公司两个核电厂建设项目的费用超支高达180亿美元，导致背负了近100亿美元的债务。³在此之前，就有消息称，日本领先的核电供应商东芝公司和西屋公司在2016—2017年净亏损达99亿美元。⁴欧洲领先的核供应商法国阿海珐集团自20世纪90年代以来就向中国转让核电技术，2014—2016年累计净亏损75亿欧元。⁵

如果中国的核工业仍沿着既定目标发展，中国核电工业潜在的巨大经济规模和营业额也会给外国竞争对手造成更大的商业压力。在中国国家主席习近平的领导下，中国政府推进了进一步支持和巩固国有企业的计划，其中核工业企业可能会大规模合并。为了借助中国核工业的力量来实现中国政府的战略和外交目标，中国政府命令国有核企业合作设计了全国技术领先的核电反应堆“华龙一号”，并且应政府的要求，中国企业将其出口至国外核电市场。此外，如果未来几十年中国对反应堆的需求放缓，中国设备制造商、工程公司和建筑公司的国内订单量就会出现小幅下滑，中国政府领导人指望通过核电厂出口进行弥补。

中国的政策选择及其战略意义

自20世纪80年代中期以来，中国一直把核电技术的发展放在首位，因为领导人认为核电技术具有战略意义。2016年9月，中国媒体总结中国国家原子能机构核电司司长刘宝华的讲话称，核能“不仅仅是一种能源”，也是中国当前一种具有“其他作用”的技术。他们这样写道：核能是“战略力量的重要基石，是军民融合的载体，也是国际合作中一张‘中国名片’”。⁶

中国把核能作为战略手段，是出于多方面的考虑。核电技术和核武器生产一样，都是建立在核反应堆、铀浓缩和乏燃料后处理的科学和工程研究基础上。事实上，核武器和动力反应堆都是链式反应物理。一个国家拥有先进的动力反应堆核燃料处理技术，就可以生产核爆炸所需的易裂变材料。

一个国家的民用核能应用技术和经验也可以用于核国防计划。成功实施一项核能计划需要巨大的人力和资金资源，一个核电计划从概念的提出到退役，可能需要一个世纪

或更长。核合作和核设备、核技术和核材料的出口，是各国介入和影响其他国家技术和能源决策的工具。一个国家的核电基础设施规模越大，就越有能力影响核安全、核安保、核贸易政策及核不扩散的全球治理标准。

最后，中国打算进一步实行城市化，同时减轻不断扩大的特大城市的空气污染。核能将大大促进中国的这一举措，并使中国在全球减少大气碳排放行动中发挥领导作用。所有这些战略目标都将成为中国当前和未来核电计划决策的考虑因素。

从战略角度看，未来几十年，中国最大的核电挑战将是形成工业规模的燃料循环，有以下两个原因。首先，中国自20世纪80年代以来一直致力于实现从常规动力反应堆，过渡到基于更先进的燃料循环技术的核系统，确保在二十一世纪之后核电前景明朗。其次，中国在这一领域做出的决定将对其他领域产生深远影响。自20世纪60年代以来，法国、德国、日本、英国和美国都曾致力于建立闭式燃料循环，但在很大程度上由于舆论、政治和市场压力而被迫搁置或终止。同样的因素将如何影响中国部署快堆和工业规模的后处理厂，答案尚不明确。

本报告探讨了可能影响中国核能政策制定的内部和外部因素。除了至关重要的长远战略利益外，最重要的内部因素是中国在科技发展、基础设施投资和电力方面的行业政策。最重要的外部因素来自全球化的压力。这两方面的因素可能以两种方式影响中国的核进程：一是让中国自上而下、技术领导治国型的决策模式，更多地接受中国核电利益相关者的影响；二是鼓励和加强市场力量对中国经济的影响，包括对电力部门。

中国如何推进核能发展，决策是复杂的、不明朗的，涉及多个方面和各种利益。中国曾多次对核能相关权力机构的组织框架和管理体系进行改革。可以预见的是，这种体制改革将持续到本世纪中叶，开始的标志是为到2020年实现下一个中央规划目标所做的准备工作。中国的重大决定基本不透明，对于中国政府中哪个核机构最为重要，中国人和外国人持有不同的看法。

到目前为止，中国核电技术的选择和部署决定是由中国政府和中国共产党做出的，公众很少参与。近年来，中国公众越来越关注政府在福利、平等、健康、环境和安全方面的举措，包括核能领域。尽管中国政府加强了核安全监管，但公众的担忧却成倍增加。2013年和2016年，由于当地居民的反对，中国当局取消了建造核燃料循环设施的计划。这些事件预示着公众对核问题的干预可能会更多，但并不能推断中国政府会出于公众的压力推翻继续进行具体的核能投资的决定，特别是如果政府认为这些项目符

合国家战略利益。尽管中国加强了与外部世界的交往，但在习主席的领导下，中国政府的决策变得更加集中、更不透明和更不可测。观察人士不要期望更加全球化的中国必须变得更加透明，或允许公众更多地参与核能事务。

中国将如何发展，首先将由中国政府决定，决策者需要平衡政策目标与参与者和机构利益之间的关系，并且评估风险和机会。本报告考虑了政策选择及其国内和国际的战略意义，包括中国先进核技术的选择、中国电力部门决策、核项目管理和评估、政治风险，以及中国核出口和核治理的前景，进而探讨了2050年之前中国核电的发展前景。

本报告旨在让中国越来越多的核电计划利益相关者以及中国以外更广泛的政策团体，了解中国在未来几年必须做出决策的背景、影响因素、可能的结果以及意义。本报告无意预测中国将如何做出这些决定，或者谁将做出这些决定，也不会预测结果。本报告的资料来源于五年来部分政府规划文件、相关学术研究报告、业内公司的财务报告、相关会议记录和中外新闻媒体报道的汇总和分析，并得益于2011年以来与政府官员、行业高管、经济学家、科学家、顾问、律师、学者和民间社会专家进行的无数次讨论和访谈。这个项目的核心内容来自2014—2016年卡内基国际和平研究院在北京、厦门和柏林举办的三次关于中国核能计划未来的中外专家年度研讨会。

中国核电选择与闭式核燃料循环

国家成就了核电

在中国核电基础建设的三十五年中，高层决策者一直坚信核电的发展符合并有助于实现国家的长远发展目标和价值观。大多数关键的决定最终都是由国家和中国共产党的领导层做出的。参与核电建设的各方，例如公司管理者、核科学家、工程师和规划制定者，提出的方案极大影响了中国核发展方向，但只有得到政府最高层的批准，才能转化为政策。

中国致力于利用核裂变能发电，分为两个重要阶段：第一个阶段是在20世纪70年代末，中国计划启动核电厂建设；第二阶段是在本世纪前十年中期，加速核电厂建设。这两次决定都是由国家的最高领导层与为了特定目标推动中国核电建设的技术官员共同做出的。

中国的核能研究始于20世纪50年代，主要是在与苏联双边合作的基础上进行的。20世纪50年代中期，中苏双方就一系列和平核研究合作项目展开讨论，其中包括磁约束聚变和裂变反应堆。⁷中国科学院按苏联的模式建立，下属的中国核物理研究院从20世纪50年代开始从事军事目的和潜在和平目的利用核能的研究。1955年，中苏核合作讨论的重点已经不是和平利用核能项目，而是中国如何制造核武器。⁸

从20世纪50年代开始，毛泽东批准中国军事研究机构发展核武器，按照他的观点，这样中国就不会再受到帝国主义敌人的核讹诈了。⁹中国当时是第二次世界大战后发展核武器的国家中最贫穷和最落后的国家。就中国有限的核研发资源分配问题，中国官方内部进行了激烈的争论，最终中国军方击败了核电拥护者。¹⁰

1964年，经过六年的努力，中国成为继美国（1945年）、苏联（1949年）、英国（1952年）和法国（1960年）之后，第五个成功制造和引爆核爆炸装置的国家。除了中国外，这些国家在核爆炸试验后，都迅速建造和运行了核裂变反应堆，用来产生可转化为电的热能。

中国第一次核爆炸试验后不久，毛泽东发动了历时十年的文化大革命，引起国内一片政治动乱，滞缓了核电计划的进程。¹¹直到1981年，中国才批准建造第一座核电厂，比四个核武器国中最后开始核电生产的法国晚了18年。¹²

20世纪70年代，中国共产党内部出现了一批提倡现代化和改革的领导者，他们在70年代末掌握了国家的领导权，从此，中国的核电发展之路畅通无阻。邓小平、周恩来等中国其他领导人听取了科学家和电力技术官员的建议，也就是核能将减少中国对煤炭的依赖，扩大人口稠密的沿海地区的电力产能，并使中国赶上核技术遥遥领先的外国。¹³在这种思维的鼓舞下，20世纪80年代和90年代，中国国有企业得到了外国工业合作伙伴的帮助和地方政府的支持，建造了为数不多的几座核电厂。

2005年，中国的核电建设计划突飞猛进。就像二十多年前最初决定建造动力反应堆一样，中国领导人和技术官员的意见再次达成了一致。当时，温家宝总理赞同专家的观点，即应该大力推进核能生产，核电复兴即将在发达国家兴起。而在幕后，高层领导人也越来越多地提倡核能，以应对中国经济增长带来的能源安全和污染问题。

2005年3月，温家宝调整了政府的核电发展政策，将中国的核电发展力度从“适度发展”调整为“积极发展”。这一原则决定迅速纳入中国2006—2010年“十一五”规划的细则，并被纳入新制定的《核电中长期发展规划（2005—2020）》。¹⁴中国设定的目标是将核电产能从2005年的7 GWe扩大到2020年的70 GWe。¹⁵中国还鼓励法国、俄罗斯和美国的竞标中国核电厂设计项目，为未来一系列的核电厂提供技术支持。中国政府最后选择了西屋公司，2006年授权国家核电技术公司与西屋公司签订了合同，首批建造4台机组。国家核电技术公司是国务院（中国政府主要行政机关）设立的负责外国核电厂技术引进的公司。与此同时，最重要的国有核企业——中国核工业集团公司（以下简称为“中核集团”），准备响应政府不断扩大的核能战略，建造多达30座反应堆。

从中国第一座核电厂项目启动到决定加快核电发展的二十年间，中国总理从李鹏换为朱镕基，再到温家宝，期间中国核电的发展情况明确说明，技术官员关于核电的倡议，必须得到上层领导的支持，这是十分重要的。李鹏在1988年当选总理，在此之前，他长期担任电力部门的经理和电力工业部副部长，他毫不动摇地将核能项目放在发展的首位。1998年朱镕基接替李鹏，他并不像李鹏那样支持核能。相反，他把新的投资从核能计划转到其他行业，更倾向于对中国石油行业的建设和电网改善。20世纪90年代末，他暂停了核电厂的建设，长达三年。2003年，温家宝接任总理一职，一改朱镕基的核能政策，加快了核电厂的建设。那些主张核电发展的规划设计者和技术官员使温家宝确信，面临瘫痪的煤炭运输瓶颈导致中国电力短缺，有必要对这一问题做出了断。¹⁶有些部门批评温家宝总理在本世纪开始几年的决策，认为是对短期事件的过度反应，但他们启动了一项应急计划，快速建设中国的核电基础设施。

六年后，日本福岛核电厂发生严重事故后，中国最高领导层再次直接干预了中国核电的发展。这标志着中国第一次因外部核能领域出现的新情况做出了调整自身核电发展计划的决定。中国管理者没有预料到日本三座反应堆的毁坏情况。当时，中国有20多座反应堆正在运行或正在建设中，为此中国领导人立即命令技术官员采取必要措施，确保类似事故不会发生。¹⁷

日本核事故发生的五天后，国务院暂停了对中国新建核电项目的审批工作，并推迟了一些先前批准的核电项目的建设。2012年10月，中国政府内部就核安全问题展开了一场辩论，进而将此问题提交到更加引人注目的全国人民代表大会进行讨论。随后，中国正式宣布2015年前将暂停内陆核电厂建设，在内陆地区建设核电厂，是中国2005年制定的在中国人口密集的沿海地区以外大力推进核电建设计划的一个重要组成部分。

截至2018年，福岛核事故并未影响中国政策的总体方向，但几乎立即促使政府对核电项目的审批采取了更为保守的措施。据一位当时与中国同行进行协商的西方前政府官员称，日本的灾难最初促使中国领导层认真考虑改变温总理在2005年制定的提高中国核电产能的计划，但最终决定不进行改变。¹⁸最后，作为对事故的反应，领导层采取了折中方案：中国政府停止了采用老旧技术的反应堆建设，并规定只有采用新型反应堆的建设项目才能获得批准。由于这些决定，“十三五”规划（2016—2020年）制定的核电厂建设目标可能无法按时实现。

如果“十四五”规划恢复在内陆地区建设核电厂的计划，中国的核电计划可能会继续保持高速发展，并有可能在本世纪20年代某个时候跨过100座反应堆这个门槛。但是，中国政府各部委和业界的一些官员用2005年以来最公开的方式断言，雄心勃勃的核电发展步伐太快、太冒险，应该放慢脚步。¹⁹2011年，国务院决定有选择地暂停核电建设，并对中国所有核电厂的安全状况进行调查。中央的这一决定为他们提供了政治保护。截至2018年，中国政府尚未就未来几十年中国还需建设多少座核电厂达成共识。中国政府机构、研发部门及其咨询机构预计，2050年的核电产能将在150 GWe~500 GWe之间。福岛事故发生前，预测值倾向于在400 GWe~500 GWe之间。福岛事故发生后，预测值大大降低，在150 GWe~200 GWe之间。

稳定的核能政策要素

从一开始，中国政府就打算为核电活动建立一个稳定的组织架构和管理体系。过去的四十年，中国政府为了平衡各方面的利益，包括学术研究机构、核武器科学家、军方、矿业部门、电力工业、中国政府的规划者和共产党，曾建立、重组，并在某些情

况下解散了一系列部委、委员会、跨机构“领导小组”和国有企业。

目前，国务院是决定中国核电未来发展方向最重要的权力机构，但其附属机构的利益目标却与它截然不同。近二十年来，国家在国务院下设了多个负责核电决策的机构，包括国家能源局，代表若干政府机构和部门，负责政策的执行；国家发展和改革委员会（以下简称为“国家发改委”），负责规划和基础设施发展；国家核安全局，它是中国的核电监管机构，最初是中国环境保护部下属的一个缺乏政治影响力的部门，近十年才被提升到了较高的地位。2010年，中国成立了国家能源委员会，代表二十多个政府部门协调决策。

多年来，中国的核体制结构一直非常不透明，外国政府、甚至相关的中国官员也无法就谁是主管机构达成一致。据一位研究人员称，西方观察家被误导了二十多年，认为核能政策主要是由国家原子能机构决定的。因为曾有一段时间，该机构声称具有多种与政策有关的职能。“事实上，除代表中国参加国际原子能机构外，这些职能或工作均不由中国国家原子能机构承担或执行。”²⁰

无论中国政府如何组织和重组官方核能管理机构，中国核电发展政策中几个具有战略意义的重要目标却一直未变：确保不断发展的中国拥有足够的能源；实现中国能源燃料资源多样化，并实行更有效的管理；集中管理控制工业应用技术的发展进程和方向；减少发电用煤的消耗，减少大气污染。

区域发展和燃料多样化

从一开始，中国核能规划就一直朝着一个目标前进，即减轻中国电力产业对燃煤的依赖，改善中国能源资源分配的不平衡。

中国拥有世界煤炭储量的10%以上，但其他矿物燃料资源却很少。几十年来，中国很大一部分电力来源都依赖燃煤。²¹中国近四分之三的煤炭储量位于中国的北部和西北部，远离中国电力负荷中心的东部沿海。1975—2000年，中国燃煤电厂的发电量在中国总发电量的占比从56%稳步上升到78%。²²中国核科学家在现代化运动之初就预见到了这一趋势，认为核能发电可以减缓从中国内地向逐渐城市化的沿海地区输送越来越多的煤炭资源的困境。周恩来很早就对这个问题提出改变建议，他在1970年2月说：“从长远来看，核能是解决上海和东部地区电力短缺的唯一办法。”²³

周恩来的这一言论是由上海严重的电力短缺引起的。三十五年后，中国沿海又爆发了

一次电力危机，同样是由煤炭供应不足引发的，促使时任总理温家宝提出加强核电建设。当时的一个关键人物——中国国务院副总理曾培炎向温总理强调，除非采取措施加强煤电之外的电力生产，否则电力短缺将变得更加严重。这意味着中国必须同时扩大核电和水力发电。曾培炎认为，扩大东部沿海的核电生产是必要的，因为中国的大部分煤炭资源都在北方，大部分水力资源都在西南地区，为此中国必须拿出一半的铁路运输能力和三分之一的河流运输能力向沿海城市供应燃煤，以供发电使用。曾的言论得到了核电行业的支持。²⁴

技术与产业政策

同时，中国领导人也对毫无限制地发展核电产生的政治风险持警惕态度。20世纪70年代末及以后，中国的政策制定者曾讨论过核电发展之路：是自力更生地发展核电基础设施（这意味着进展将会很慢），还是通过与已经掌握了中国所需的关键技术和专业知识的外国政府和行业的合作，快速发展核电工业。那些提倡依靠自主技术的人包括中国核武器计划的专家，他们希望发展利润更高的工业项目。他们也觉得1959年苏联决定不向中国提供核武器设计是一种背叛。²⁵最终，中国在20世纪80年代开始了一个折中的双轨发展的方案，一方面试图从外国技术转让中获益，另一方面也要保护中国的行业利益。

这种双轨方案也促使中国组建了两家最重要的国有核企业：第一家是中核集团，于1988年从中国前核工业部分离。中核集团不满国外对中国核电发展的影响，率先在上海地区建设核电厂。第二家公司是中广核电力控股有限公司（以下简称为“中广核电力公司”），成立于1994年，应中国政府决策者的命令而成立，目的是作为中核集团的竞争对手，与外国公司（尤其是法国的公司）一起促进核电的发展。

中广核电力公司借助法国的技术在广东大亚湾建立了一座核电厂。在这个项目期间和之后，广东的管理人员和政府的目标是，与法国核工业合作，扩大核电建设，保障中国东南部快速增长的财富和电力需求。20世纪90年代，由于中国政府官员的担忧，中广核电力公司的核电建设受到影响。1997年香港回归，作为一个交换条件，英国要求保留香港的决策自由。中国政府担心这种决策自由会波及到毗邻的广东。²⁶这种国外与本土、中央与地方的紧张关系和争执，滞缓了20世纪90年代中国核电的发展。

但是，到20世纪末，中国政府圆满解决了这些问题。从此以后，中国政府愿意承担可能遗留的风险，即随着广东和其它地方建设更多核电厂，那些日益富裕的和全球化的核电项目执行者更有能力向中国政府索要自主权或破坏中国政府的稳定。本世纪前十

年之初，中国决定将中国的核电部门向更多的资本开放，但同时又规定，电力生产投资必须经中国政府批准。此外，中国政府还指导正在进行的中国核电工业部门的重组工作，从实际上确保中核集团及其子公司拥有几乎所有即将组建的重要公司（包括竞争对手中广核电力公司）的股份，而这些公司将以越来越深入的技术、越来越广的地缘范围承接中国核工业的业务。²⁷

从核电发展计划实施以来，中国领导人就确保中国政府能够通过国有企业牢牢控制核电未来的发展方向，只是细节工作仍需要有着不同利益的国有企业高管去处理。国务院先后成立了中核集团和中广核电力公司，这是在中央控制下更广泛的战略经济活动重组过程的一部分。中国政府还解散了以前的国防部和工业部，建立了负责航空、航天、武器生产、船舶建造和核能的国有企业。在组建第一家国有核企业时，国务院赋予中核集团的任务是建造和设计核电厂，生产核燃料、同位素和军用核硬件，并管理核废物。随着核电计划的扩大，中国在20世纪90年代建立了更多的国有企业，包括中广核电力公司。

国务院的决定启动了中国公司化的进程，这在某些领域深刻地改变了国家与中国核工业之间的关系。中国领导人曾打算下放中国军工系统的管理权力、让军工系统“军转民”，实现盈利。事实上，他们的决定产生了意想不到的后果：国家意图放开经济竞争，同时保持对关键战略部门的严格政治控制，这两者之间是相互矛盾的。鉴于国家旨在保护其在所设立的公司中的利益，“国有企业与行政管理上级之间”就一直存在讨价还价的关系。²⁸随着时间的推移，各家核公司最终建立起了并行的决策结构，与因改革而摆脱中国政府紧箍咒的地方政府发展关系。中国的这些变化促使国有核企业形成了自身特殊的利益，这与国家利益迥然不同，目的是限制财务问责和监督，并促进过度就业和行业保护。²⁹

从1985年起，中国在广东启动了建造少量核电反应堆的项目。法国公司按照合约，协助中国积极推进核电厂建设、设备生产和操作的本土化进程。此外，法方还开展了一项全面的人才培养方案，为中广核电力公司接管广东核电厂各方面的管理做准备。³⁰中国对美国的合作伙伴施压，签订了类似的协议，要求西屋公司将核电反应堆设计技术转让给中国。中国还与俄罗斯和加拿大的合作伙伴签订了更加严格的本土化协议，开展类似的人才培养合作。

在过去二十年的发展过程中，中国的核技术选择政策与大多数其他核电国家一样，几乎完全集中在轻水反应堆（简称“轻水堆”）上。轻水堆被认为是最安全的核反应

堆，符合世界反应堆发展趋势。2005年左右，世界范围内运行的轻水堆共有400座，已积累了大量的操作经验，安全问题越来越少。因此，中国把获得这项技术的自主知识产权放在了首位。

电力及其增长

本世纪2005年左右，中国做出了大力加快核电厂建设的决定，部分是出于对更大范围的能源安全的担忧。决策者仍然相信，中国以资本投资为主导的经济增长模式若要继续确保经济高速增长，前提是有与经济增长相适应的、不断增长的基础电力供应的支撑。

以前中国东部沿海地区冬季一直存在煤荒和电荒的现象，20世纪70年代曾推动了中国的第一轮核电投资；本世纪前十年早期，促使中国领导人对此做出了过度反应。在做出增加核电建设的决定后不到一年，中国决策者则预测，中国将很快出现电力过剩问题。³¹然而，领导层一如既往地將电力过剩问题视为经济的短期调整，并仍然充满信心地认为，中国经济以及电力需求仍将像过去十年一样持续增长。1996年，时任总理李鹏在全国人大会议上宣布，中国已“提前五年实现”了1980年提出的到2000年国内生产总值（GDP）翻两番的目标。³²“十五”规划（2001—2005）提出的下一个目标是，GDP将以每年7%的速度增长，“十一五”规划（2006—2011）预期增速为9%。事实上，中国都超额完成目标。

随着中国经济的快速增长，中国的能源资源处于紧张状态。中国决策者制定了降低中国GDP的综合能耗强度的目标，“十一五”规划要求减少能耗强度20%。但他们也谨慎地预计，随着中国变得越来越富裕，并且继续城市化，GDP的电耗强度下降幅度可能远远不够。中国电力部门聘请的经济学家预计，电力消耗、城市化和GDP之间会长期存在密切关联，这也是西方工业经济体的历史经验。³³

中国的数据证实了他们的预计。中国城市人口的比例从1980年的19%上升到2000年的36%，2015年上升到56%。同期，中国人均用电量从1980年的281 kWh增加到2000年的993 kWh，2015年增加到约4000 kWh。³⁴在中国核电发展的最初二十年里，中国电力需求的增长率与GDP的增长率非常接近。到1995年，中国超过美国，成为世界上最大的电力消费国。在邓小平提出改革后的大部分时间里，中国的电力消耗每年增长约10%。1980—2014年，中国工业的发电量实际上增长了23倍，从60 GWe增加到1360 GWe，平均每年增长9%。³⁵

应该说，2005年中国积极的核电发展政策考虑到了经济增长、人口增长和能源燃料安全。在政府内部，那些坚信中国需要更多核电的技术官员曾千方百计地防止持谨慎态度的国家发改委决策者，干扰温家宝的“积极”核电发展战略。国家发改委的一些技术官员曾强烈建议，有必要建立一个专门的政府机构，对国家能源政策进行战略评估和协调。于是，2008年组建了国家能源局，最初工作人员不足100人。中国政府的资料显示，国家能源局最初没有任何实权，但后来承担国家发改委制定未来电力规划目标的任务。现在，国家发改委通常遵循国家能源局的建议。³⁶

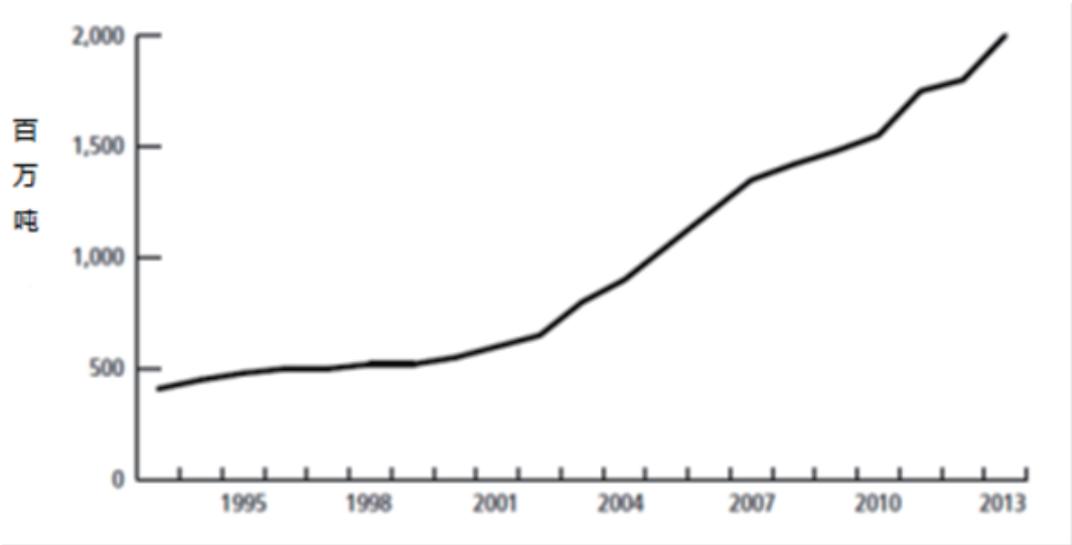
环保政策

从20世纪70年代开始，中国的现代化改革者提倡发展核电。他们认为，核电与煤炭不同，不会污染空气。由于经济的失控性增长，燃煤发电厂排放的颗粒不断增长，导致中国空气污染严重。为此，技术官员和政治领导人决定加速中国的核电计划，他们一致认为，核电应该会减少微粒排放，只是或多或少的问题。在接下来的二十年中，中国领导人开始更加关注日益严重的污染问题，并逐渐顺应国际潮流，加强了对温室气体排放威胁的认识。在1999年《京都议定书》谈判期间，中国并没有承诺减少碳排放。但五年后，在《能源中长期发展规划纲要（2004—2020）》中，中国选中核能作为一种要加大投入的无碳能源，为未来核技术“跨越式”发展开了绿灯。³⁷

那些反对燃煤发电污染的核电倡导者认为，必须建设更多的核电厂，才能改变中国的现状。他们的观点是正确的。在中国核电发展的前三十年里，反应堆在中国电力燃料消耗中所占的比例还不到3%。即使在加速核电部署之后，中国仍继续建设了许多燃煤发电厂。2005—2009年这短短五年里，中国增加的燃煤发电能力相当于美国燃煤发电能力的总和。而在2010—2013年间，中国又增加了相当于美国总装机容量50%的发电能力。³⁸目前，中国每年烧掉约40亿吨煤，今后许多年还将继续消耗巨量的煤炭。即使经过十五年强制核电建设和可再生能源技术部署之后，到2020年，中国实际情况还将是三分之二的电力生产仍将依靠燃煤。³⁹

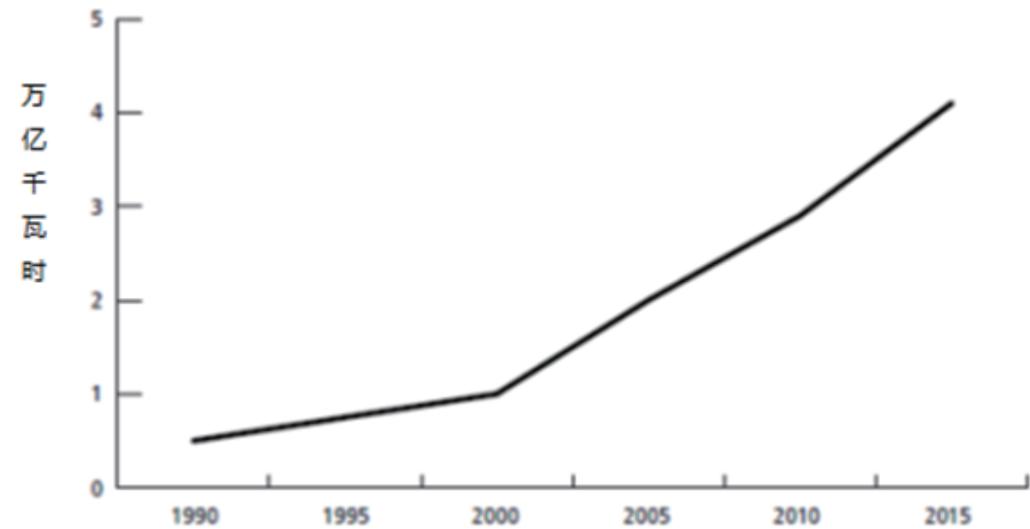
2005年决定加快核电发展之前的五年，中国的燃煤量增加了75%，这导致中国“十五”规划（2000—2005年）中制定的13个污染控制目标中的10个未能实现。当时，中国是世界上最大的大气二氧化硫排放国。2005年，中国二氧化硫和烟尘排放量分别比计划开始时设定的上限高出42%和11%。一年后世界银行公布的数据显示，2005年中国城市的大气颗粒物水平是北美和西欧有可比性城市的4倍。⁴⁰

中国热电煤炭消耗



来源：美国能源信息署 (EIA)

中国燃煤年发电量



来源：美国能源信息署 (EIA)

中国的核燃料循环

从20世纪80年代开始，中国除了建造核反应堆外，还就如何处理核电厂产生的乏燃料和核废物做出了初步决定。从一开始，中国就仿照外国核计划制定了远见卓识的能源资源管理和技术发展计划。

目前，与世界上几乎所有的动力反应堆一样，中国建造的所有核电反应堆都是热堆，利用位于堆芯的慢化剂（通常是水）把中子速度降低。几乎所有的热动力反应堆都是轻水堆，中国所有的轻水堆都是压水反应堆（简称“压水堆”），是最常见的轻水堆类型。通过慢化反应堆中的中子，增加了中子与堆芯中核素的碰撞概率，使之发生裂变反应，从而产生热、放射性裂变产物以及大量的重超铀元素。利用热产生蒸汽，驱动发电机发电。反应堆在运行过程中，燃料中参与链式反应的同位素的浓度耗尽后，将含有裂变产物和超铀物质的高放射性燃料组件或乏燃料组件从反应堆芯中取出，放入充满水的池中，令燃料组件释放余热，并逐渐降低放射性。乏燃料从反应堆堆芯取出时，温度和放射性都极高，因此在取出后的数年，需要采取主动冷却措施。

和其他国家一样，中国也通过两个基本方法处理这些反应堆的乏燃料。一是将乏燃料无限期地贮存在反应堆所在地的水池中和空气冷却的干桶中，或者集中贮存在几座核电厂共同使用的贮存设施中，最后安放在地质处置库中。还有一种方法是，乏燃料贮存几年后，将部分或全部乏燃料从贮存设备中取出，运到后处理厂进行分解和溶解，然后将各种成分，例如铀、钚、其他超铀元素以及裂变产物等分离回收。钚和铀可再利用，制造新的燃料。从乏燃料后处理中获得的其余所有物质作为核废物收集和储存，并安放在在地质处置库中。

自上世纪50年代，世界上贮存了来自400多座动力反应堆的大约有30万吨重金属（MTHM）的乏燃料，大部分贮存在反应堆所在地。⁴¹约90%都储存在水池中，其余的储存在干桶中。每年，全球乏燃料库存约增加1.2万MTHM。到2030年，可能还会产生40万MTHM的乏燃料。⁴²

每年，只有一小部分乏燃料进行了后处理；最近几年，每年大约有3000 MTHM，但目前这个数量所有减少。⁴³动力反应堆乏燃料后处理流程是：切割燃料组件，使二氧化铀燃料的棒束裸露出来；然后用热硝酸溶解燃料；使溶解的燃料元件与未溶解的燃料包壳残渣和一些废裂变产物分离；利用有机溶剂从溶解燃料元件中萃取出核物质。理想情况下，回收这些核物质，特别是铀和钚。对分离出来的废物残渣单独进行浓缩，然后与固体介质（如固化玻璃）混合，经过存放，最后永久放置在地质处置库中。回收

的铀和钚可以作为反应堆燃料再循环利用。

法国等少数国家，从反应堆乏燃料中回收核材料已是一项成熟的技术。过去二十多年来，法国已经后处理了2.6万MTHM二氧化铀乏燃料。他们将从乏燃料中萃取的钚与铀结合，形成混合氧化物（MOX）燃料进行回收利用，法国22座轻水堆和全世界40座反应堆都使用这种燃料，节省了约17%的天然铀。⁴⁴

大多数国家的政府和工业部门在启动核电计划时，并没有就乏燃料的长期管理启动针对性的投资或采取具体的行动。中国也不例外。20世纪70年代末，中国政府对首座核电站建设翘首以盼，但并没有制定乏燃料管理计划，只是将乏燃料贮存在反应堆场址所在地。几十年来，中国的核电反应堆越来越多，产生的乏燃料一直贮存在核电站的水池中。

当第一批核电站还在处于计划阶段，中国政府领导人只是模糊地意识到，产生的乏燃料必须得到数百乃至数千年的精心管理。到了20世纪80年代中期，邓小平领导的改革继续深入，局面发生了很大变化。中国的主要核技术官员，已经让领导层相信核能技术对中国的长远未来至关重要，这些官员中的大多数在二十年前曾是中国核武器发展的主力军。除了经邓小平批准建造几座压水堆核电站外，这些官员还勾画了这样的蓝图：发展快中子增殖反应堆，对中国不断增加的乏燃料库存进行后处理，用回收的钚作为燃料，为中国提供潜在的无限能源。

后处理

1986年，为了加速中国的技术发展，在中国战略武器计划的主要科学家和技术官员的支持下，邓小平启动了国家高技术研究发展计划，即“863”计划。⁴⁵这个研发项目资助了两个试点项目，即当时的钚铀燃料循环的后处理项目和快堆开发项目。⁴⁶这两个项目为中国建设闭式燃料循环打下了基础。

1987年，在筹备建设中国首批两座核电站——浙江秦山一号核电站和拥有两座反应堆的广东大亚湾核电站的同时，中国政府表示，像日本、俄罗斯和其他核电技术领先的 国家一样，中国将对乏燃料进行后处理而不再是处置，从后处理中回收钚和铀，并将它们用作反应堆的核燃料。中国能源局核电司通知国际原子能机构，中国将在20世纪90年代中期建立一座后处理中间试验厂，然后在本世纪初再建立一座工业规模的后处理厂，贮存秦山、大亚湾和将来中国核电站产生的乏燃料。中国东海岸核电站的乏燃料在进行后处理之前，将在核电站的水池中储存3~5年。随后，乏燃料将运往中国西

北部中央处置库的后处理中间试验厂进行后处理。⁴⁷

中国建造后处理厂的计划与先进核国家的理论十分相似。所有先进的核国家都认为，从长远来看，新的铀燃料将越来越昂贵；借助放射性同位素分离这一新技术，对乏燃料进行的后处理，将会限制核废物的数量，并可以最大限度地回收核材料，最终将实现核废物更安全的管理。因此，能源部官员告诉国际原子能机构，中国将对乏燃料进行后处理，原因有以下四点：1) 从乏燃料中回收铀和钚，用作核燃料（未经后处理，“核资源就没有得到充分利用”）；2) 中国铀矿开采、加工、浓缩成本高；3) 因为“高放废物玻璃固化体的最终处置更加安全”；4) 利用以后从后处理废液中回收的其他超铀元素，包括镅、镎、钷“以及一些有价值的裂变产物，如钷和铯，满足各种需求。”⁴⁸

中国继续设计和建设后处理中间试验厂，根据中国专家的说法，2010年12月完工并调试成功，比20世纪80年代最初预计的时间晚了十五年。处置装置建在中国西部偏远地区甘肃酒泉的404工厂，2004年开始逐步调试，历时七年。延期原因有以下三个方面：行政方面的问题，苏联解体后与俄罗斯同行合作遇到阻碍，以及工厂在建设过程中遇到了质量控制问题。⁴⁹自20世纪50年代以来，中国原子能科学研究院一直是中国核材料科学的主导机构。2005年，该机构的官员曾预测，温家宝总理加快核电站建设的决定会导致燃料循环研究进一步推后，因为中国将优先进行基于压水堆的核电站建设。⁵⁰中国专家在后处理厂调试完成后称，此项目的成功，得益于20世纪50年代末为中国核武器计划建立的三座钚分离后处理厂二十年来的研发和运行经验。该处理厂直到20世纪80年代才退役。⁵¹

过去二十年来，这后处理中间试验厂项目成为一些技术创新的试验平台，这些技术创新超越了20世纪50年代已退役的军用燃料后处理厂采用的旧技术。从2004年开始，该中间试验厂演示了中国设计的用于切割乏燃料棒的剪切机。此外，还测试了用于溶解乏燃料的工艺化学设备，控制了压力、温度、进料速率、分离（包括离心分离）速度等关键参数，计算了系统中核材料的质量平衡，测试了分离用的工艺化学设备的性能测量了钚和铀的回收率、去污率和净化率。⁵²

后处理中间试验厂选择的溶剂萃取和提纯技术，与中国军工后处理厂不同。按照计划，中国利用该中间试验厂积累后处理设施的设计和建造经验，培训操作人员，并从经过中国材料测试反应堆（MTR）辐照的乏燃料中回收了高浓铀，并且回收了将来用于动力反应堆的材料。据中国专家称，核工业部早在二十五年前就计划在中间试验厂投产后不久进行这些活动。⁵³

公开资料表明，后处理中间试验厂最初的设想是在运行寿期内分离至少数吨钚，用作核燃料。比如，该工厂首端的一个水池贮存区，能容纳通用高功率研究堆产生的500 MTHM 轻水堆乏燃料和50 MTHM 材料测试反应堆乏燃料。⁵⁴大多数非官方资料估计，假设工厂按常规运行回收钚和铀，按照乏燃料贮存区的规模，设计处理能力应为每年50 MTHM。⁵⁵然而，在运行最初的某一阶段，该中间试验厂不再打算定期或持续进行的核燃料回收生产。2016年初，一位接触该项目的中国科学家表示，50 MTHM将是该工厂整个寿期最大的乏燃料后处理量。其他专家在2016年末和2017年表示，该中间试验厂的累积寿期后处理量可能远低于50 MTHM，甚至不到其一半，这取决于该中间试验厂是否会进行改造。如果是这样的话，可能将会对该中间试验厂进行一些升级改造，解决核材料库存估算极高的不确定性问题。⁵⁶这种极高的不确定性可能是测量和工艺工程问题共同造成的。中国专家的这些声明与中国每年向国际原子能机构报告的民用钚库存状况的数据相符。这些数据表明，该中间试验厂不经常运行，很少处理乏燃料，而且工厂可能在2014年无限期停止运行。⁵⁷

快中子反应堆

1987年，核工业部向国际原子能机构报告说，后处理中间试验厂的一个重要目标是回收钚，然后合成为含钚和铀的燃料，即混合氧化物（或MOX）燃料，供未来的快中子增殖反应堆使用。⁵⁸

中国的轻水堆以低浓铀为燃料，使用水冷却燃料，并减缓（或慢化）反应堆堆芯燃料释放的中子，增加它们引发放热裂变反应的概率。而快堆不通过水或其他物质来慢化中子，因此这些中子仍是高能或“快”中子。若要利用快中子，反应堆的燃料必须是高浓度的易裂变材料，高浓铀和钚都可以用作快堆燃料。如果堆芯中的燃料外围是一个由铀-238同位素组成材料组成的“再生区”，那么这种贫化铀就能捕获燃料释放的快中子，铀-238就会转化为钚-239。这样，快堆就可以“增殖”大量的钚，而钚反过来又可以作为燃料，供更多的增殖反应堆使用。世界上大多数快堆都是用液态钠冷却的，这种液态钠可以有效地将裂变能产生的热量，传输到涡轮发电机系统进行发电。

中国建立快堆的决定，同样是追随了20世纪50年代初发达核电国家的决定。20世纪80年代末，中国开始建造第一批轻水堆时，法国、德国、印度、苏联、英国和美国已经开始了雄心勃勃的快中子增殖反应堆开发和建设项目，目的是为今后从轻水堆向更先进、更复杂的技术过渡指明道路。其中有几个国家同时准备为未来的快堆生产MOX燃料。

1986年，中国政府批准后处理中间试验厂项目列入“863”计划，与此同时，中国还启动了一个试验性的快中子增殖反应堆项目。

20世纪60年代，中国热衷于快堆的研究人员建立了一个试验性的钠回路循环，即含有热液态钠的模拟快堆回路，并建造了使用铀燃料的零功率装置。该装置在1970年6月达到了临界状态，尽管那时中国正处在政治动乱当中。20世纪70年代，中国国防核计划的技术官员说服邓小平和其他领导人，与后处理项目一起发展增殖反应堆，因为铀的供应有限，铀加工成本过高。其他国家的增殖反应堆倡导者也提出了同样的观点，他们认为核能发电将迅速扩大到在全球，美国将建立一个铀垄断联盟来控制全球核燃料供应。

中国的技术官员认为，核能技术属于对中国具有战略意义的技术，因此有资格获得“863”计划的支持。为了强调他们的主张，核科学家为核技术的发展制定了一个“三步走”的长期构想。他们预测，中国（以及世界上）目前以轻水堆为基础的核电设备，将被以回收的钚和铀为燃料的快中子增殖反应堆系统取代，而这个核电系统继而也将被一个更加先进的、以核聚变能源为基础的系统取代。⁵⁹其他国家的增殖反应堆拥护者也提出了类似的设想，尤其是印度。⁶⁰

1986年，中国将快堆发展纳入“863”计划，并建造了大约20个实验钠回路，其中两个是从意大利废弃的快堆项目引进的。中国原子能科学研究所和北京核工程研究设计院着手设计中国实验快堆。1997年，中国与俄罗斯开展了快堆双边合作，在俄罗斯的协助下，中国实验快堆的初步设计工作已经完成。

中国实验快堆是快中子增殖反应堆计划的核心部分，设计的额定功率为20 MWe。与后处理中间试验厂的情况一样，中国与俄罗斯的快堆试点合作项目也遇到了难题，严重滞后。经过长达二十年的建设、详细工程设计和设备采购，中国实验快堆终于在2010年7月达到临界，并于2011年7月并网。当时中国原子能科学研究所宣布，相比目前的轻水堆，中国实验快堆将使铀燃料的利用率提高60%。⁶¹

与后处理中间试验厂一样，中国实验快堆项目的目的是掌握技术，以便以后进行工业规模的部署。中国建设中国实验快堆的目的是积累与燃料和材料的辐照、安全和可靠性有关的经验，获得运行数据；提供设计反馈；获取设备研发的数据和经验；为将来闭式燃料循环流程步骤的实验室规模的试验提供经验。⁶²与后处理中间试验厂一样，中国实验快堆自投产以来由于一些技术障碍，如工厂回路堵塞，一直没有正常运行。

战略意义

文化大革命结束后，中国新一届领导人为了追赶西方国家，将核电作为实现现代化和经济发展的众多工具之一。他们把重点放在了核电的短期效益上——可靠的电力供应和更清洁的空气。负责中国核国防计划的官员同意了中国政府的计划，缩小核军事工业综合体的规模，加强和平利用核能工作。作为回报，政府给核军事工业综合体提供了利润可观的商业机会。

从20世纪80年代开始，出于对建设更多核电厂前景的展望，中国领导层在决策时开始更多地考虑战略和国家安全问题，核能发电和后处理技术被认为具有战略意义。中国的核研发部门支持这一观点，理由是用于武器生产的钚可以提供无限的电力供应，使中国的实力能够赶上先进技术国家，尤其是苏联和美国。

20世纪80年代末，中国核军事工业综合体合并。但是，随着经济改革的推进，国有企业、中国政府部门和各省政府的利益浮上台面。中国政府对国有企业与外国企业的合作持怀疑态度，并且这种态度一直持续到20世纪90年代末才结束，那时中国政府圆满地解决了中央与地方的矛盾，支持快速发展的沿海地区。

20世纪80年代以来，战略思维主导着中国核燃料循环技术和基础设施发展规划。三十年来，中国一直把重点放在快堆和后处理试点项目上，目的是培养一批专家，赶上外国先进核技术。虽然花费的时间比预期的长，但中国在此期间的战略技术投资只占常规动力反应堆技术巨大投资的一小部分。

“三步走”战略：技术选择和挑战

2005年，中国核研发规划官员制定了中国核能计划“三步走”的发展战略。这是整个21世纪第二个十年中国核能发展政策的一个官方参考点，最近几年国务院常务委员会制定政策时也参考这一战略。⁶³该发展战略在《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020）》中首次公开提出，要求到2020年中国集中力量发展压水堆，从2020年到2050年开始从压水堆过渡到快中子增殖反应堆，然后从本世纪中期开始，在利用热堆和快堆发电的同时，发展核聚变反应堆。⁶⁴

中国还制定了《核能中长期发展规划（2005—2020）》。考虑到上述发展战略，该规划既包含了“三步走”战略，也体现了时任总理温家宝在2005年作出要加快核电厂建设的决定。该规划最后指出，中国如果要减少污染并生产足够的电力，2050年前就必须大力发展核裂变能生产。

具体来说，到2020年中国核电装机容量必须达到40 GWe（随后提高到70 GWe，然后降低到58 GWe），占中国总装机容量的4%。该文件明确指出，中国新建的反应堆大部分将是压水堆，这将导致乏燃料库存大大增加，并造成铀资源的长期枯竭。考虑到铀将变得越来越稀缺和昂贵，中国将运行中国实验快堆，并建设更大的快堆，包括在2025年前建成功率达1000 MWe~1500 MWe的快堆。到2050年，中国压水堆和快堆的核电装机容量最低将达120 GWe（占中国预计发电量的10%），最高达360 GWe（占发电量的30%）。⁶⁵在21世纪20年代，中国将建造一座核聚变试验堆，然后在2040—2050年建造一座初级聚变动力反应堆；之后过渡到第三阶段，即在21世纪下半叶，聚变反应堆将作为快堆的补充。

未来的后处理厂和快堆

20世纪80年代，核电研发计划的科学家敦促政府将后处理和快堆纳入“863”计划，同时还提出了一些与上述“三步走”战略相应的工业化建设的后续项目。中国已经建立了一座实验快堆和一座后处理中间试验厂，2016年和2017年中国进一步决定，支持在本世纪20年代和30年代建造工业规模的后处理厂和发电快堆。

快堆

在建成中国实验快堆后，中国开始就第二座快堆的规模展开了讨论：是建造额定功率600 MWe还是1000 MWe或更高的反应堆？中国在快堆方面的经验相对缺乏，而且

尚不确定与曾在该项目中作出巨大贡献的俄罗斯的合作前景，这些问题都影响着中国的决策。

自本世纪初以来，中国和俄罗斯一直在讨论在中国东部沿海的福建省建造一座或两座俄罗斯BN-800快堆。2009年10月，中国原子能科学研究院、中核集团和俄罗斯供应商原子能技术出口公司签署了一项协议。⁶⁶但是该协议没有执行，原因不明。根据中国方面的解释，中国核工业发电设备的额定功率是600 MWe，不容易与俄罗斯的800 MWe反应堆配套。⁶⁷

因此，2017年中国决定在福建霞浦建造一座600 MWe快堆，计划2018年前开工建设，2023年完成。至少可以说，这是一项雄心勃勃的计划，目标是在中国建造首座先进动力反应堆。2017年中，霞浦工地上到处都是准备施工的工作人员。⁶⁸ 2017年12月，中国正式宣布开工建设。⁶⁹

近年来，关于中俄的这个合作项目，一直没有权威的公开信息。一些媒体猜测，中核集团将与美国原子能科学研究院和美国TerraPower公司合作，采用TerraPower的设计，在福建建造一座600 MWe的快堆。⁷⁰

TerraPower的概念是美国阿贡国家实验室根据进行了几十年的快堆研发经验而设计的，需要金属燃料作为反应堆燃料；中国原子能科学研究院在与俄罗斯合作建设中国实验快堆时，研究重点却是未来的氧化物燃料。尽管如此，一些媒体报道称，中国原子能科学研究院仍将负责TerraPower概念堆的燃料开发。

但是，中国原子能科学研究院和中核集团却优先考虑的是福建使用氧化物燃料的600 MWe增殖反应堆，称为中国示范快堆或CFR-600。他们向政府推荐这个项目，论证了设备设计和制造、发电、系统可靠性、经济性以及技术标准和规范的制订。⁷¹CFR-600概念设计于2014年完工，但详细设计直到2017年才完成。⁷²一些公开资料表明，该项目大部分是由中核集团负责的，参与者包括中国长江电力公司、华能核电开发有限公司和一个投资公司——霞浦国有资产投资经营有限公司。⁷³

近年来，中国原子能科学研究院提议，继600 MWe反应堆后，在2030年前后陆续建设一系列商用增殖反应堆，首先从CCFR-B快堆开始，或从另一个用来论证嬗变技术的CCFR-T快堆开始。无论哪个方案，都要求到2050年建造多座“高增殖”快堆，以便在2050—2100年“取代化石燃料”。⁷⁴ 2017年12月中国宣布开始在霞浦建设600 MWe快

堆时透露，2020年中国政府可能批准建设一座更大的反应堆，额定功率为1000 GWe~1200 MWe。这意味着，机组可能在2028年开始建造，反应堆计划在2034年投入运行。⁷⁵一些媒体推测，600 MWe的TerraPower装置可能在CFR-600之后建造。

过去的十年中，中国原子能科学研究院预计，根据电力需求增长预期和对非碳排放电力资源的需要，中国可能会在较长一段时期内建造快堆，发电量预计在70GWe~200 GWe之间，而到2050年，预计总核电发电量达到400 GWe。⁷⁶中国原子能科学研究院对快堆建设的一些短期预计同样表现出令人震惊的乐观态度，预计到2050年，中国核电发电量将达250 GWe，其中快堆发电量占20%。⁷⁷根据中国原子能科学研究院对增殖反应堆的设想，到本世纪末，中国建造快堆速度将加快，到22世纪下半叶，中国将有100多台机组投入使用，从而实现“用核能取代化石燃料”的目标。然而，中国政府至今没有批准任何一项这样的计划。

当中国在20世纪80年代中期开始考虑建造增殖反应堆时，许多国家，例如法国、德国、日本、苏联、英国和美国，已经在二十或三十年前启动了快堆项目，并在十年或更长的时间里运行了实验快堆或试点快堆。到20世纪80年代，这些国家已准备建造额定功率为300 MWe~1200 MWe的工业化快堆，以论证利用该技术进行发电的可靠性和经济性。

中国实施快堆项目是为了获得前苏联4种快堆——BR-5、BOR-60、BN-350和BN-600的设计和运行经验。中国这样做的风险不大，潜在的好处也相当可观，因为中国最初的目标只局限于获得足够的技术，成功建造一座额定功率为20 MWe的小型实验反应堆。该项目复制其他国家的技术，吸取他们的经验教训，最重要的是，中国可以借此跻身先进核电国家，拥有能够提供未来几乎源源不断的核燃料供应的技术。

如今，快堆的决策环境与三十年前大不相同。过去三十年，上述国家都没有成功建造工业化的示范快堆，也未能利用以钷为燃料的快堆进行发电。所有这些国家都遇到了技术难题，有时这些问题还导致快堆项目失去了政治支持。最严重的问题是钠火灾、设备和工程难题以及严重的安全隐患。法国、德国、日本、英国和美国政府饱受这些问题的困扰，决定停止审批计划中的快堆建设项目的审批，以及提前关闭已获准运行的反应堆。自20世纪中期以来，阻碍快堆项目的技术问题包括：

- **蒸汽发生器的完整性：**钠与空气反应强烈，与水的反应更强烈，当液体钠泄漏时，快堆会发生破坏性极强的钠火灾。⁷⁸法国、英国和俄罗斯一些早期设计的蒸汽发生器曾发生过泄漏和火灾。泄漏是由蒸汽发生器制造缺陷引起的，或者材料

老化和腐蚀引起设备裂纹，导致泄漏。

- **其他情况的钠泄漏和火灾：**这种泄漏大多都是小泄漏，通过定期检查可以发现。较大的泄漏包括BN-600的4次泄漏，泄漏的钠有300~1000 千克。日本文殊核电反应堆曾发生640 千克钠泄漏，导致了一场严重的火灾，由于钠回路没有排空（钠容器没有完全惰化，而且通风系统也不能正常工作），火势通过扩散的钠气溶胶不断扩大。⁷⁹泄漏原因包括设备设计和建造有误、材料问题、腐蚀和操作失误。⁸⁰
- **设备、材料及工程问题：**设计缺陷、材料不充足和操作流程错误已经导致了几座反应堆出现了大量问题。有些事故是设计缺陷引起换热器和水泵失效造成的。法国核监管机构曾指出堆芯支架结构不完整的问题。有些事故是由于设备浸泡在钠中，无法进行设备检查，导致设备出现维护问题和运行中断。材料的缺点也致使一些长时间接触钠的设备出现裂纹。由于氧化钠气溶胶沉积，德国、法国和英国的反应堆控制棒发生故障。几座反应堆的一些关键设备最初是用钢制造的，这些钢在焊接处容易开裂，导致长时间的维护运行中断，后来替换为其他更坚固的耐腐蚀材料。⁸¹类似问题也影响了轻水堆的发展。只有借助数十年、数百座反应堆的运行经验进行改进，这些问题才能够解决。随着时间的推移，只要反应堆积累足够的运行经验，快堆面临的许多或大部分问题都有可能得到解决。
- **空气和杂质进入钠液：**空气和杂质进入液体钠会形成固体颗粒和其他化合物，这些固体颗粒和化合物会引起二次反应和沉淀，从而可能会导致部件损坏，因此防止杂质进入对于确保部件和系统的使用寿命以及可靠性至关重要。1987—1991年间，法国的SPX、英国的PFR和俄罗斯的BN-600等快堆都出现过杂质进入钠液的情况，导致了长时间的运行中断。如今，钠净化设备已经发展成熟，杂质进入的风险可能会降低。
- **燃料完整性问题：**法国、德国、俄罗斯和英国的一些反应堆曾出现包壳破裂，尤其是在最初运行期间。有些破裂是由于包壳采用不合适的奥氏体钢造成的；其他一些破裂是由于燃料结构几何设计问题引起的。燃料结构不完整会使受辐射的燃料达不到快堆所需的高燃耗水平。最严重的类似问题发生在快堆项目的早期。随着时间的推移，燃料设计更合理，燃料材料更坚固，类似事件会有所减少。但根本问题是，钠冷快堆的燃耗水平是轻水堆的3倍或以上，燃料必须经得起更高的温度。⁸²

各国政府和工业部门都非常重视解决上述问题，以提高未来快堆的安全性、可靠性和性能。有的国家对正在运行的反应堆采取了补救措施。针对上述问题，一个关键的研究领域是快堆蒸汽发生器系统：未来反应堆的蒸汽发生器系统必须配备快速的氢探测

设备，一旦发生泄漏，蒸汽发生器系统必须迅速作出响应，立即停止并令受影响的蒸汽回路减压。未来的蒸汽发生器也可能装配能够抵御极其强烈的钠水反应的保护外壳；钠水反应发生时，安全薄膜也可限制蒸汽发生器压力的增加。现代反应堆使用改进的材料，采用更合理的方法焊接与钠接触的设备，可能会防止钠泄漏。

从20世纪90年代开始，法国和俄罗斯采取了上述一些措施，反应堆的钠水反应事件显著减少。⁸³但挑战依然存在：未来反应堆的一些设备和系统可能设计成双层，这可能造成蒸汽发生器等关键部件的焊接难题。还提出了一些改善系统完整性和安全性的方法，如增加一个反应堆回路（例如，使用熔盐），但这些方法的成本可能会过于高昂。

泄漏和火灾等这些安全隐患促使对先进反应堆系统进行如下改进：改进设备设计；制定钠回路操作规程；采用冗余泄漏检测系统；采取钠回路的应急排空等防火措施；在发生火灾时，隔离含钠区域进行惰化或切断周围空气供应；使用防火表面材料。

根据经验，未来的反应堆设计必须具有如下一些新特性：多样化的安全系统，减少发生普通故障的风险；改进堆芯设计，排除或减少由于堆芯坍塌导致严重事故的可能性；⁸⁴防止主回路气体的积聚；改进钠浸没设备的维修技术，包括使用超声波仪器进行检查。处理有些事故时，有必要完全移除反应堆燃料。其他安全问题包括抗震、防洪措施、严重事故管理、堆芯结构几何稳定性问题和控制棒的可靠性问题。⁸⁵

总体来说，技术可靠性是快堆技术未来商业发展的一大挑战，在中国也是这样。某些快堆的容量因子（一段时间内核电厂实际发电量与无中断满功率运行时额定最大发电量的比率）曾达到50%和75%，只是这样的情形不多，持续时间也不长。快堆如果要与轻水堆进行市场竞争，容量因子必须达到90%的。若要实现这一目标，至关重要的是改进燃料、提高在役反应堆的维护水平、提高部件可靠性和减少涉钠事故。严格来说，大多数钠泄漏和火灾并不是核安全的重大事件，但是导致快堆以低容量因子运行的主要因素。⁸⁶俄罗斯BN-600反应堆的经验表明，未来反应堆的可靠性可能会有所提高：经过三十五年的运行，BN-600过去的发电量相当于全世界19座快堆全部发电量的三分之二。过去的二十年，BN-600的运行容量因子为77%，许可使用寿命长达六十年。⁸⁷由于中国原子能科学研究院与俄罗斯研发机构合作进行增殖堆项目开发，中国充分了解BN-600的运行技术的改进方法。

工业化的反应堆建设能力

自20世纪80年代初以来，在中国政府的帮助下，通过引进外国技术，中国核工业一直

在不断发展，并积极进行本土化。如果中国继续推进包括工业化快堆在内的先进核电设施建设计划，那么中国就有可能在2030年前在国内建造100座核电厂。特别是，考虑到中国在20世纪80年代之前的经济发展水平相对较低，这是一个了不起的壮举，但这并非史无前例。美国在大约相同的时间内建造了100多座核反应堆；在半个世纪的时间里，法国建造了近60座，日本也建造了近60座。

自20世纪80年代以来，中国整合了少数几家大型国有企业组建了核电工业，其中主要有中核集团和中国广核集团有限公司（以下简称为“中广核集团”，前身为中国广东核电集团有限公司）。这些公司，特别是中核集团，都有众多的子公司，在许多其他的公司中拥有股份，这使得它们在中国的核电投资和建设活动中有很大的影响力，在某些情况下，甚至可以直接控制大多数核电投资和建设活动。中核集团和中广核集团都是集核电厂投资、建设和运营一体化的公司。另一家类似的大公司是国家电力投资集团公司，成立于2015年，是当时的国家核电科技有限公司与中国一家领先的电力公司——中国电力投资集团公司合并组建的。到目前为止，这些公司一直是中国核电厂建设的先锋部队。它们建造或正在建造的核电厂几乎都是压水堆。随着时间的推移，中国宣称对压水堆技术拥有知识产权的控制权。中国在利用外国同意分享的技术建造了核电厂，之后对技术进行了修改，并打上了中国知识产权的标签。

20世纪70年代末，中国政府决定投资核电建设，以及2005年左右加快核电厂建设，与此同时，中国重工业已经具备了为一系列多堆核电厂项目制造所需设备的能力。20世纪80年代，中核集团在一些外国行业合作伙伴的帮助下，率先开始投资建设一系列压水堆。为了适应更大机组的技术需求，中国开始扩大基础设施，但遇到了困难，不得不在锻造、部件制造和质量控制方面加大投资。根据2005年加快中国核电建设步伐的决定，五家经过挑选的国有电力工程公司和重型设备制造公司，斥资45亿美元发展核电制造能力。⁸⁸现在，这些公司每年可以生产足够多的关键核设备（反应堆压力容器、堆芯结构和控制棒驱动机构），以及多达27台蒸汽发电机、30台主泵和15台涡轮发电机，每年可装备8~10座新核电厂。⁸⁹

如果中国能够长期地保持这种工业产能，到本世纪中叶之前，将能够满足不断扩大的装机容量的需求，即使以目前最高的预测值也没有问题。对于未来三、四十年中国还会增加多少核电产能，中国的资料和机构提供的预估结果大相径庭。一些中国研究的基准参考认为，如果到2050年中国要达到300 GWe的核电装机容量，就意味着在2050年之前每年增加大约8座反应堆。⁹⁰仅从设备制造企业的现有能力来看，这是可能实现的。在美国，30家电力公司和7家供应商，每年可为5台机组生产符合核电厂设计的各

类设备。相比之下，中国目前正在进行的行业标准化和整合，使他们可以完成上述生产目标。

中国还力争在2050年前实现从压水堆到快堆的转变，对此中国加大投资。自20世纪60年代末，中国原子能科学研究院与俄罗斯核工业界合作，一直致力于快堆中子行为和热工水力、钠处理设备、反应堆材料和燃料的研究。中国还为快堆研发建立了30多个实验设施和测试回路，其中许多涉及钠管理的关键领域。目前，中国共有100多家机构参与建设工业化快堆。自2011年以来，中国加快了这项工作，以便实验论证600 MWe及更大机组所需的部件制造工艺以及一些关键和专用设备的设计，这些设备可用于反应堆容器支撑、地震隔离、中子探测、非能动反应堆停堆和钠浸没部件远程检查。⁹¹

由于中国开始建造快堆的时间较晚，而且在工业化反应堆设计、建造和运行方面相对落后，因此中国可以利用早期外国项目的经验。中国实验快堆的设计吸取了以往减少钠火灾项目的经验，配备了较先进的检测报警系统、现代化的应急通风系统、钠灭火设备、石墨灭火器、钢罩和混凝土表面隔离罩。⁹²

中国加入了多边专家组，包括第四代国际论坛、国际原子能机构创新型核反应堆和燃料循环国际项目（INPRO），以及国际原子能机构液态金属快堆技术工作组，以期从经验更丰富国家的先进反应堆开发项目中受益。第四代国际论坛的成立目的是促进包括钠快堆在内的六种反应堆设计的国际合作；INPRO是为了鼓励在反应堆和燃料循环创新方面的一般性合作，包括快堆。然而，他们并不打算开发或共享保密的知识产权，个别成员国继续专注于他们自己独特的、专有的、有时是针对不同国家的具体工程解决方案。

2017年12月，中国启动了一座600 MWe快堆的建设，计划于2023年完工。国外一些经验丰富的快堆工程师认为，中国提出的五年建设计划是不现实的，因为中国没有足够的快堆设计、运行经验和其他资源，不可能在建成中国实验快堆后这么短时间内就迅速建成一个工业化的反应堆。中国其他消息人士认为，鉴于该项目的开创性，政府认为2023年的最后期限是“灵活的”。⁹³中国原子能科学研究院自己也意识到，这个雄心勃勃的时间表（甚至把它作为先进技术的展示），是具有挑战性的，因为在第四代国际论坛解决更先进设备设计的相关技术问题之前，必须要为该反应堆制造关键设备。⁹⁴中国的项目工程师同样警告说，关键部件必须从国外采购，由中国缺乏快堆项目管理经验，并且中国工程师几乎没有所选择的集成泳池式反应堆设计的参考资料，中国实验快堆在实施过程中曾两次超出预算。⁹⁵一些接受本报告采访的专家警告称，中国

越早计划开始建设600 MWe快中子增殖示范堆，他们就越不相信该项目能够如期完成。中国在快堆工程方面的经验有限，如果中国与外国合作实现这个项目，那么项目的管理、监督以及双方必须共同参与决策，这将不可避免地造成延误。

福岛核事故发生后，国务院下令进行一次深入的核电安全审查。当时，专家发现刚刚投入使用的中国实验快堆存在安全设计缺陷。这些缺陷涉及容器问题；长时间断电时衰变热余热没有完全从乏燃料中导出；缺少设计基准事故散热器。另外，专家发现对某些严重事故，防御措施不足。⁹⁶

曾为中国的快堆项目提供了相当多的技术基础和关键设备的俄罗斯仍继续为中国的快堆项目提供帮助。2009年中俄签署的在中国建造BN-800反应堆的协议虽然搁置，⁹⁷但2016年11月签署了一项核合作协议，其中包括共同开发未来的快堆。⁹⁸

中国还与美国合作开发与快堆相关的闭式燃料循环技术。2006年，美国发起“全球核能伙伴关系”计划，这是一个开展先进核能技术合作的多边论坛。同年，中国加入了该计划，2007年，美国和中国达成了一项“双边民用核能合作行动计划”，“为进一步发展先进核燃料循环研究进行合作，以实现核安全和核不扩散的目标”。⁹⁹中美两国成立了一个快堆合作工作组，2010年以后的几年里定期召开会议。作为该计划的一部分，中国与美国国家实验室在堆芯物理、燃料循环建模、快堆金属燃料开发等领域开展了合作。

如前所述，美国TerraPower公司与中核集团和中国原子能科学研究院签署了一个开发快堆项目的合作大纲，该项目的概念设计基于美国以前的技术经验，主要是阿贡国家实验室的研究。美国与中国在这一领域的合作范围受到美国出口管制的限制。¹⁰⁰但是，据非官方媒体报道，美国能源部针对TerraPower项目调整了对敏感技术的出口管制，允许美国向中国转让敏感但不保密的技术。¹⁰¹然而，据美国官员说，出于对安全和不扩散的考虑，美国政府的政治官员有时会阻止美国核工业和政府机构在某些方面向中国快堆项目提供帮助。

后处理

中国宣布要实现工业规模的闭式核燃料循环，这意味着在某个时间点，中国将建造乏燃料后处理设施，利用回收的燃料（铀和钚）制造新燃料，并对后处理和燃料生产过程中产生的剩余废物进行处置。2014年，中国政府阐述了乏燃料管理政策：

中国的乏燃料管理政策是实现乏燃料的后处理，提取和回收铀和钚材料，从而

最大限度地利用资源，减少高放废物的产生，确保乏燃料管理安全和公共安全，降低未来的风险。¹⁰²

2006年，中国选择西屋公司而不是法国阿海珐集团为未来压水堆构筑蓝图，与此同时，中国还朝着实现工业化的后处理厂迈出了一步。当时，中国乏燃料后处理中间试验厂已在酒泉开工建设；随后，中核集团又与阿海珐集团签署了一份备忘录，拟利用阿海珐在法国和日本建造的年处理能力为800 MTHM后处理设施的技术，在中国建设一座后处理厂。

从2006年开始后的十年，双方一直未能就该项目的条款达成一致，于是一些中国专家倾向于使用本土技术建造一座规模较小的后处理厂。双方的分歧主要体现在价格上，另外，法国官员对国家安全表示担忧。¹⁰³美国政府官员公开反对中国建立商业化后处理产业的计划，并谨慎敦促法国停止与中国进行后处理双边合作协议，这份协议可能包括将阿海珐集团的股份出售给中核集团。¹⁰⁴

根据一位中国高级官员的说法，党中央在2014年底正式批准了中核集团的工业化后处理厂建设计划。¹⁰⁵从那时起，中法政府机构和企业之间就后处理项目的细节展开技术讨论，最后一致同意利用阿海珐集团的技术，在众多提议的地点之一建造一座年处理能力为800 MTHM的后处理厂，工程将于2032年前完工，2035年开始全面运行。¹⁰⁶

中国拥有反应堆机构的高级管理人员在2017年11月表示，中国打算进行两项后处理厂建设项目，一个是在国外技术的帮助下建造的年处理能力为800 MTHM的项目，另一个是“独立自主建造的、中等规模的”年处理能力为200 MTHM的后处理厂。他们表示，这两个项目都纳入了2011—2020年的中央规划项目，其中包括“十三五”规划，具体实施还有待国务院常务委员会审议。据这些官员透露，2016年12月，国务院正式决定对这两家工业规模的后处理厂进行必要的投资。

中等规模的后处理厂的地点选在甘肃酒泉以北的金塔区，施工前的现场准备工作于2015年开始。2016年中国官方表示，这座中等规模的后处理厂的设计处理能力为每年200 MTHM，计划2025年完工，比最初预计推后了五年。¹⁰⁷

乏燃料

到目前为止，中国从来没有对核反应堆的乏燃料进行过后处理，这说明中国政府把重点大部分都放在了核电厂建设和运行上。相反，中国采取措施将乏燃料贮存至少二十年，主要是在反应堆场址，这与许多其他国家的核电计划乏燃料管理一样，而且中国

正在使用世界各地应用广泛的传统乏燃料贮存技术。

到2005年为止，中国已累计产生了1100吨乏燃料。到2020年，随着中国反应堆数量的急剧增加，这一数量应该会增加7倍。¹⁰⁸中国几乎所有的反应堆乏燃料都贮存在核电厂。

目前，中国一半以上的核电装机容量都采用法国的标准压水堆技术。这些反应堆的乏燃料贮存在充满水的乏燃料池里，这些水池设计储存量为可以容纳反应堆正常运行大约十年产生的乏燃料。中国也在建造基于美国AP1000设计的压水堆。AP1000的乏燃料也贮存在一个设计容量满足核电厂正常运行十年要求的水池里。¹⁰⁹采用俄罗斯VVER型双机组压水堆技术的中国田湾核电厂也配有乏燃料水池；据报道，自1992年开始运行到2016年，乏燃料水池几乎装满。俄罗斯工业公司打算在田湾核电厂建造更多的VVER型反应堆，届时将扩大乏燃料池的贮存容量。¹¹⁰中国首座自主设计的动力反应堆“秦山一号”拥有足够的贮存能力，可以贮存2025年之前该核电厂产生的所有乏燃料；两台后续机组“秦山一号”二期项目贮存容量足够维持到2022年。¹¹¹中国还扩大了现有反应堆的贮存能力，而且新的压水堆场址贮存能力也能维持二十年。¹¹²

除了越来越多的压水堆外，中国还正在运行秦山三期核电厂。该核电厂配备了两座以天然铀为燃料的CANDU-6（加拿大氘铀）加压重水反应堆。这两座反应堆每年产生大约5000束乏燃料棒。这些乏燃料最初储存在一个容量略低于3.8万束的乏燃料水池里，相当于正常运行七年所产生的乏燃料数量。自2008年以来，中国一直在该核电厂场址建设一系列模块化干式贮存设施，用于乏燃料的长期贮存，每个模块可容纳2.4万束乏燃料棒。中国计划总共建造18个贮存模块，能够贮存至少在2042年之前CANDU堆产生的乏燃料。¹¹³

中国还采取措施将乏燃料贮存在反应堆场址以外。酒泉后处理中间试验厂和金塔中等规模的后处理厂都设计有首端处理设施，在进行后处理前接收和贮存乏燃料。金塔和酒泉的首端处理设施将来可能足以处理几千吨乏燃料，而且如果中国决定从反应堆场址即将装满的贮存池转移更多的乏燃料，这些设施从原则上讲会继续扩大。¹¹⁴

鉴于最近遇到的政治挑战，中国可能正在考虑这样做。福岛核事故后，由于政治因素以及核监管措施越来越严格，中国政府在一定程度上很难征得华东地区地方和省级政府的同意，未来在这些地方建设乏燃料集中贮存区。本世纪的前十年，酒泉的乏燃料湿法贮存容量从500 MTHM增加到760 MTHM，但核监管机构下令延缓启用。由于乏燃料贮存容量不足，核监管机构威胁要暂停大亚湾核电厂的运行。于是将乏燃料从大亚湾

分流到附近的岭澳核电厂，才缓解了当时的紧急情况。¹¹⁵2030年前，中国可能还需要更多的容量来贮存目前正在运行的核电厂产生的乏燃料。¹¹⁶

中国未来乏燃料增长的速度，将取决于现有核电厂的运行时间以及中国新建核电厂的数量。预计中国未来几年将继续增加核电产量，但政府尚未确定2020年“十三五”规划结束后的核电装机容量目标。如果中国到2035年将核电发电量扩大到150 GWe，届时可能会累积约2.14万吨的乏燃料；如果中国将核电产量扩大到450 GWe，到2035年，累积乏燃料则可能达到2.94万吨左右。¹¹⁷相比之下，美国六十多年来运行的核电反应堆多达100座，累计乏燃料贮存量约7万吨；¹¹⁸目前全球核电反应堆乏燃料总量约为30万吨。¹¹⁹

虽然大亚湾没有因为乏燃料贮存能力不足而关闭，但这迫使核电公司不得不考虑未来任何近期贮存瓶颈可能造成的后果，以及中国乏燃料后处理计划的现实需求。在中国决策者看来，积极的后处理计划在理论上会使核电公司和政府得到解脱，不必迫于压力寻找额外的临时贮存地。¹²⁰但是，即便是提供了足够的储存容量，由于燃料将在堆芯中停留更长时间，堆芯热负荷增加，放射性物质含量改变，导致芯内燃料管理也要相应改变，由此带来的物流和回收问题还可能会给一些核电公司带来困扰。大亚湾的高级管理人员私下表示担心，尽管事实证明将乏燃料从大亚湾转移到另一个地点相对简单，但从另一角度来说，可能也会给核电公司带来商业竞争的压力，尤其是来自中核集团的压力。¹²¹

与领土有限的日本、韩国或台湾不同，这些国家和地区的政策制定者面临更大的反应堆乏燃料贮存容量的短期压力。中国是一个疆土广阔的国家，偏远地区众多。至少在本世纪的大部分时间里，中国可以先将乏燃料贮存在反应堆场址和场址以外的燃料水池中，然后进行干式贮存，通过上述方法对所有的反应堆乏燃料进行技术管理。根据其他核电计划的乏燃料贮存经验和许可管理经验，直到在本世纪中叶乃至未来几十年，中国都可以一成不变地通过这种方法，安全可靠地储存核废物。然而，在未来的某个时候，中国将需要制定长远的乏燃料处置政策和工程决策。¹²²

根据中国的核技术发展规划，“乏燃料后处理是闭式燃料循环的关键环节，特别是从先进的热核反应堆过渡到快堆为基础的燃料循环系统，闭式燃料循环技术至关重要”。¹²³如果中国要建立一个工业化的快堆网络，那么每个堆可能都需要数吨的初始钚燃料，其中大部分将装载到堆芯。一旦快堆开始运行，系统通过两种方式完成钚供给：一种是反应堆通过中子捕获，将反应堆堆芯中的驱动装置和再生区组件中的铀

-238转化为钚-239；另一种是对持续运行的热反应堆的乏燃料进行后处理获得钚。每个快堆提供的钚都比运行所需的钚多；最后，每个堆都将产生足够的钚，供新快堆的初始堆芯使用。快堆系统产生额外易裂变材料的速率称为倍增时间。¹²⁴倍增时间与各种变量有关，包括易裂变材料的质量、反应堆的增殖比（增殖同位素产生的钚与消耗的钚的比率）¹²⁵，以及燃料生产和后处理过程中的钚损耗。一些高效的增殖反应堆的倍增时间可能短至五年，而增殖速率相对低效的反应堆，倍增时间可能长达二十年。有些快堆方案打算通过使钚的“燃烧”量大于产生量来减少现有钚库存；中国雄心勃勃的增殖反应堆部署方案，也将需要部署许多后处理厂来满足预计的钚需求。中国专家已经推导出了各种燃烧和增殖钚的理论设想和计算。¹²⁶

在某些设想中，核电理论专家推断，像中国这样的国家，要从一个主要依靠压水堆的核电系统过渡到依靠快堆的系统，可能需要几十年或者好几十年。一个国家能以多快的速度实现这一过渡，将取决于其技术基础、电力需求的增长率和其他因素，特别是提供燃料循环基础设施的能力，包括后处理厂和燃料制造工厂。从理论上讲，如果几个核电生产国共同努力实现全球范围的从轻水堆到快堆的转换，可能需要在半个多世纪内将后处理能力提高7倍。¹²⁷

事实上，到目前为止，还没有任何一个国家的核能计划在任何时候部署过一座以钚为燃料的大型工业化示范快堆，也从来没有尝试过多国联合部署快堆。欧洲和日本在试验和示范快堆相继部署的同时建立了后处理厂，但是提前关闭或没有建造快堆，而后处理厂则被用来为现有热反应堆的MOX燃料供应钚。从这一点来看，中国需要谨慎地根据实际的钚需求确定未来钚的供应计划。

如果中国打算推进乏燃料后处理计划，将仿照其他一些国家的做法，包括美国、法国、德国、意大利、瑞典、瑞士、比利时、荷兰、俄罗斯和日本。世界上大部分的动力反应堆乏燃料都是由法国的后处理设施处理的。20世纪70年代，法国决定加快核电站的建设，同时法国政府控股的阿海珐集团开始进行商用乏燃料后处理生产和MOX燃料制造。从20世纪80年代开始，阿海珐集团在海牙建立后处理厂，目前每年后处理能力为1700吨。截至2005年，全球范围内民用核电产生的27.6万吨乏燃料中，约有9万吨经过了后处理。今天，已完成后处理的反应堆乏燃料大约共有12万吨。¹²⁸

世界上所有的工业化乏燃料后处理厂都是基于“普雷克斯”（PUREX）流程而设计的。该流程利用硝酸溶解乏燃料，并依靠有机化学品从溶液中提取纯铀和纯钚。这一工艺是在第二次世界大战后发展起来的，并于20世纪50年代中期开始为法国、德

国、日本、英国、美国和苏联所用，一直沿用了二十多年。PUREX流程的成功主要有三个原因：由于使用了低成本的有机反应物磷酸三丁酯，铀的回收率较高；支持回收铀的回收利用；与其他工艺相比，该工艺更有效地解决了核废物的管理问题。¹²⁹

20世纪80年代，当中国政府宣布将为未来的动力反应堆乏燃料建造后处理基础设施时，中国也打算使用PUREX技术，并为之设计了后处理中间试验工厂。据中国科学家称，PUREX流程之所以更受青睐，是因为它是很成熟的技术，符合全球行业标准。科学家表示，基于同样的原因，中国也选择了PUREX流程作为正在建设的年处理能力为200 MTHM的后处理厂的技术基础。¹³⁰

然而，如果乏燃料后处理在本世纪还将作为一种产业活动继续发展，那么，出于核不扩散、经济、废物管理和环境保护等因素，到2050年以前或到2050年为止，PUREX流程可能就会被更先进的技术所取代。

从核安保和核不扩散的角度来看，PUREX流程的一个缺点是从乏燃料中仅分离出铀。为了解决这一问题，法国科学家开发了联合萃取锕系元素（COEX）工艺，可以在整个工艺过程中保留铀钚混合物，直至PUREX流程结束，有些情况下还会产生用于制造MOX燃料的铀/钚混合原料。¹³¹尽管COEX工艺或许会遇到技术挑战，新的后处理厂可能还会采用这种或类似的工艺，包括阿海珐集团可能在中国建造的工厂。¹³²

在反应堆技术和动力反应堆燃料的不断改进和技术进步的推动下，中国开始进行比PUREX技术先进的研发工作。PUREX流程最初并不是为了处理更具挑战性的乏燃料类型而设计的，比如钚含量高的燃料、非氧化物棒束和高卸料燃耗（反应堆中单位质量初始燃料所产生的能量）。几十年来，尤其是受市场压力的影响，核行业开始以更经济有效的方式使用资源，全球核工业的反应堆燃料的燃耗水平大大提高。主要出于经济考虑，减少停堆换料次数，减少反应堆加料量，并减少产生给定电力所必需卸出的乏燃料的数量¹³³，反应堆燃耗已从以前的35GWd/MT提高到今天的近50 GWd/MT。¹³⁴将来，一些轻水堆燃料的燃耗水平可能接近90 GWd/MT，这意味着每单位质量的燃料的发电量将是核能发电初期的3倍。¹³⁵

随着燃耗的增加，乏燃料中各种裂变产物的浓度升高，使得后处理更加困难，乏燃料可能因为颗粒堆积而无法溶解。高燃耗燃料的后处理可能需要配备额外的中子屏蔽设施，以适应高溶剂降解率和更高的操作温度；另外，处理高放废物需要不同材料和工艺，必须配备中子屏蔽设施，以应对更高的衰变热、更高的中子输出和更多的重核素

库存。中国核工业和研发部门充分认识到这些趋势。中国的核电公司经常将以燃料燃烧持续增加为借口，敦促政策制定者在进行后处理规划的同时，确保提供足够的临时乏燃料贮存容量。在技术研发方面，中国专家正在研究复杂的分离方案，这些方案在一定程度上与预期的未来燃料战略和技术有关。¹³⁶

分离与嬗变技术

中国专家常说，放射性废物的后处理和快堆部署，关键是废物管理，特别是分离与嬗变技术。

放射性废物如果不经处理，放射性毒性将保持十万多年。分离与嬗变技术能将长寿的锕系元素转变为裂变产物，将长寿的裂变产物转变为寿命短得多的核素，从而使核废物的衰变期缩短为数百年。如果研究取得成功，还将减少高放废物的库存和地质储置库的热负荷¹³⁷，使我们的后代可以卸下管理今天核废物的重担。用中国人的话说，即“对于未来产生的乏燃料，先进的后处理技术不仅能够回收钚和铀，还必须能够管理锕系元素和裂变产物。”¹³⁸

闭式燃料循环技术可以大幅减少乏燃料对人体细胞组织的辐射毒性或危害。钚是乏燃料中长期放射毒性的主要来源，可以通过PUREX流程有效去除。目前，PUREX后处理流程中还有一些有毒的长寿命放射性核素，也必须作为废物处置掉，包括次锕系元素，其中镎、镅和镔的含量最多。从乏燃料中除去钚可使乏燃料的放射性总量减少10倍。如果锕系元素能被分离，然后在快堆中燃烧，那么放射性总量可能会减少100多倍。镎可以通过调节PUREX流程去除，但是不能去除镅和镔。¹³⁹

但是，分离与嬗变技术却面临着极其严峻的核科学难题。锕系元素的回收相当困难，因为在溶剂萃取工艺条件下，这些元素的化学性质非常相似。采用先进的技术，有希望从锕系裂变产物中选择性地分离出镅和镔，也就是从镔中分离出镅。但是这些元素的化学行为相似，使得锕系元素的回收成为先进废物处理工艺研究中最难攻克的难题。¹⁴⁰

为促进分离与嬗变技术研究，除PUREX流程外，还发展了其他许多处理技术，但是，只有当这些技术能够实现产业化应用，同时只有实现快堆技术商业化时，才能应用于核电厂。¹⁴¹科学家希望，集全世界PUREX流程的经验，研究人员能够基于溶剂萃取设计出类似的分离系统，促进分离与嬗变技术工业化。目前，工业化的分离与嬗变系统工程设计正在研究之中。¹⁴²

然而，我们还应该持谨慎的态度，因为半个世纪以来，研究人员一直在积极研究锕系元素分离技术。他们还需要更先进的工程手段，包括先进的光谱技术，需要借助计算机技术，研制出简单经济、适合核电厂使用的处理系统。¹⁴³核电要从分离与嬗变技术研究获益，恐怕还需要二十年或更长时间。¹⁴⁴

中国和先进的后处理技术

中国的分离与嬗变研究始于20世纪80年代初。最近，中国科学家开始研究先进的PUREX流程，部分原因是为了应对高能耗乏燃料带来的挑战。

中国先进PUREX流程研究的一个关键内容，是应用无盐有机反应物对PUREX流程进行改进。在PUREX流程中，溶解的乏燃料中含有钍，可能导致过量的钍积累，致使钍铀分离失败。中国先进PUREX流程研究的一个重点就是钍的行为问题。¹⁴⁵另一个重点是从钍产品中有效分离镎。分离化学的一些研究工作，集中在整体回收所有锕系元素（铀、钍、镎、钷和钷），把短寿命的热发射元素（铯和锶）留在高放废物中。中国一直在研究如何利用三烷基膦氧化物（TRPO），从PUREX后处理流程产生的高放废物中回收所有锕系元素，并且对中国核武器计划产生的高放废物进行了一些回收实验。近年来，中国还设计了锕系元素和镧系元素的分离回收工艺，包括从高放废物中分离回收锶。¹⁴⁶

此外，中国还在研究锕系元素与镧系元素的分离技术，并在实验室中使用专门的有机萃取剂成功实现了分离，¹⁴⁷但是，研究人员发现，萃取剂在强辐射场中会发生降解，这个问题必须得到解决，才能考虑实现该技术的工业化应用。¹⁴⁸中国的TRPO工艺在欧洲试验成功，但存在一些缺陷，比如存在较多工艺步骤，可能阻碍工业化应用；某些裂变产物干扰分离；锕系和镧系混合物中硝酸浓度过高。¹⁴⁹

高温处理技术

实施闭式燃料循环规划的科学家预计，在掌握了PUREX湿法后处理技术后，中国将开发和部署一种名为“高温化学处理”（简称为“高温处理”）的干法后处理技术，为未来的快堆提供再生燃料。自20世纪50年代以来，高温处理技术一直处于发展阶段，最初是由美国和苏联配合各自的快堆项目开发，现在韩国、日本、印度和欧洲也在进行该项技术的研发工作。

在高温处理流程中，乏燃料被切碎、加热，碾成粉末，然后在高温下燃烧，去除易挥发的裂变产物（氦、氙、碘和铯）。将这种粉末转化成金属，放入熔融盐（如氯化锂或氯化钾）电解池中。熔融盐含有金属燃料材料，加电（即电精炼过程）后，在电流

的作用下，金属溶解并分离成不同的成分。纯铀被收集在电解池中的钢阴极上，而超铀材料（钚、镅、镎和钷）和裂变产物（铯、钷和钷）被去除。将收集的纯铀放进铸造炉制成新的燃料。超铀元素和裂变产物可以在地质处置库中进行处置，也可以在铸造炉中进行处理，制造成快堆使用的燃料。

高温处理法的原理简明易懂。金属燃料的导热性和增殖比都优于氧化物燃料，可能会用于未来的快堆，因此高温处理法也许可行。第四代国际论坛计划中支持高温处理计划的人认为，高温处理法对于先进的闭式燃料循环具有独到的优势：反应堆运行、后处理和燃料制造一体化；含有高燃耗快堆燃料的熔盐和液态金属溶剂具有抗辐射能力；减少废物数量；锕系元素自动分离。熔盐的抗辐射能力意味着可以缩短燃料冷却时间。燃料循环过程的一体化可以使设施更紧凑。由于该流程将产生相对不纯的产物成分，因此临界危险可能会降低。¹⁵⁰

高温处理工艺也有潜在的缺点，包括：化学分离时可能会产生纯钚；熔融盐和液态金属会发生侵蚀；商业规模的后处理厂的设备必须能够承受400~1000℃的高温，由此可能会带来材料科学和维护方面的难题；到目前为止，这种流程批量处理能力有限，而且要求高度纯净的环境，将其改造为能够工业化处置乏燃料的工艺，是极其严峻的工程难题。

美国、韩国和俄罗斯在高温处理方面积累大量的经验，相比之下，近年来中国在这方面只进行了一般性研究。迄今为止，中国尚未在专门设计的高温化学研究装置中处置受辐照的核燃料。2006年“全球核能伙伴关系”计划成立后，中美两国开始在高燃耗快堆金属燃料、铀钚燃料铸造技术、高温处理流程建模等领域开展合作。¹⁵¹一些中国专家建议，中国政府应在2030年或2035年之前建立一座乏燃料高温处理设施。¹⁵² 然而，氯化物熔盐中铀的基本参数测量，燃料在熔盐中的溶解模拟，以及熔盐特性研究。中国目前没有任何高温处理装置。¹⁵³ 由于中核集团垄断了中国湿法后处理的研究，2017年有传言称中广核集团可能在韩国寻求高温处理研发合作伙伴，但中广核集团否认了这一说法。¹⁵⁴

其他先进燃料问题

如果中国除压水堆之外，还要建造和运行快堆，那么必须建设专门生产快堆燃料的基础设施和乏燃料后处理基础设施。由于压水堆燃料和乏燃料的放射性和同位素成份与快堆的不同，快堆燃料生产及乏燃料后处理工作，将与中国正在进行的压水堆燃料生产和乏燃料后处理分别进行。如果中国在近期部署一座大型快堆，可能会使用目前可

行的湿法处理技术对乏燃料进行后处理。

MOX燃料生产

轻水堆是通过水将燃料释放出的中子慢化，提高中子引发放热裂变反应的概率。增殖反应堆则不同，依靠快中子自身的能量维持链式反应，因此需要富含裂变物质的燃料。大多数快堆都使用高浓铀或钚作为燃料，通常是金属合金或MOX。俄罗斯的快堆大多使用金属高浓铀燃料，法国和日本已经改用MOX燃料。

目前，世界轻水堆燃料中，MOX燃料约占的5%。到目前为止，全球450座核反应堆中，只有40座使用MOX燃料，总消耗量约2000吨。这些反应堆大部分都在欧洲，每年消耗约10吨钚。与天然铀燃料相比，MOX燃料使用成本较高，因为MOX燃料中的一部分钚可能会衰变为镅（一种会释放伽马射线的中子毒物），这种放射性特征使得MOX燃料管理非常复杂，限制了它在轻水堆中的使用。比利时、法国和英国已经开始进行MOX燃料工业化生产，但是在本世纪20年代，可能只有法国才能生产轻水堆用的MOX燃料，日本或许也会加入进来。俄罗斯将只生产用于快堆的MOX燃料。

原则上，中国可以复制和借鉴这些经验，但还有很长的路要走。中国选择先用俄罗斯提供的高浓铀金属燃料开始运行中国实验快堆，然后装载MOX燃料。中国后续的增殖反应堆也将使用MOX燃料，之后预计将过渡到金属燃料。

2013年，中国的技术顾问向政府部门汇报说，中国建立核电闭式燃料循环的技术基础落后其他国家几十年。¹⁵⁵由于政治原因，中国无法实施2010年与比利时签订的MOX燃料技术引进的双边协议。¹⁵⁶没有比利时的帮助，中国只能依靠2003年安装的实验室设备，包括12个手套箱和国产的设备，将钚钚粉末混合并压成燃料球进行烧结。这座工厂原本计划从2010年开始为中国实验快堆制造MOX燃料。¹⁵⁷截至2017年初，中国还没有向压水堆中装载任何MOX燃料，在中国实验快堆中使用的燃料（如果有的话）也很少。中国MOX燃料生产线规模小，若大批量生产，难以保证MOX燃料性能稳定。¹⁵⁸如果要运行一座使用MOX燃料的600 MWe增殖反应堆，中核集团需要得到许可，建造一座设计产量为20 MT/y的MOX燃料制造工厂。¹⁵⁹

除了要面对MOX燃料技术的挑战外，中国还可能在2030年左右开始实现从氧化物燃料，转向快堆用的金属燃料，建立钚钚铀燃料试点生产设施，并计划十年后初步达到约6 Mt/y的产能。¹⁶⁰借助“全球核能伙伴关系”计划，中国与美国国家实验室在这方面寻求合作。¹⁶¹2016年11月，中国与俄罗斯签署双边核合作协议后，两国有可能合作

开发用于中国快堆项目的金属燃料。原则上，中国也可以与对开发金属核燃料感兴趣的美国公司和实验室开展合作。

快堆乏燃料湿法后处理技术

轻水堆的铀氧化物乏燃料的后处理，与在快堆中受辐照的MOX燃料或金属燃料差别很大。快堆乏燃料中的钚含量占重金属的25~30%，而轻水堆乏燃料中的钚含量不到2%。¹⁶²

快堆乏燃料的后处理面临着许多特殊难题。含有高浓度钚的高燃耗氧化物燃料很难用动力学和热力学方法溶解，而钚的化学性质又干扰溶剂萃取。这种燃料容易形成不溶解的贵金属合金杂质。同样，从粉碎的乏燃料中分离的富含钚的颗粒也可能会乳化，造成临界事故隐患。实验室规模的严重临界事故处理相对简单，而在贮存了大量钚的产业规模的装置中发生严重临界事故，处理起来就复杂得多，燃耗越高，管理就越困难。如果高放废物在最初的处理阶段未能溶解，那么如果颗粒在下游积聚，产生的热量就会损坏工厂设备。另外，金属杂质也会降低化学分离的效率。¹⁶³

与轻水堆乏燃料相比，快堆乏燃料中裂变产物浓度也比较高。这些高浓度的裂变产物大部分可以通过净化工艺去除，但一些高放射性元素却难以去除。最后，对快堆乏燃料进行后处理时，必须谨慎对待溶剂降解程度较高的问题，而且从工艺流程中去除的有机材料可能形成爆炸性硝酸盐化合物。俄罗斯和美国已经发生过这类事故，处理时必须慎之又慎。¹⁶⁴

法国、美国、印度、德国、日本和俄罗斯已经对少量含有高浓度钚的快堆乏燃料进行了后处理。所有这些国家使用的化学处理流程大致相同，只有俄罗斯例外。近十年来，在“全球核能伙伴关系”计划和第四代国际论坛国际项目的推动下，快堆乏燃料后处理技术的研发进展加快，正在进行的研究工作包括开发PUREX技术之外的后处理工艺，其中湿法后处理就是一个新开发的技术。与高温化学后处理技术一样，快堆乏燃料湿法后处理技术面临的主要挑战，也将是成为经济、有效和可靠的工业化工艺。

要实现这一目标，可能需要几十年的努力。到目前为止，中国在快堆乏燃料后处理方面只有很少或没有直接经验。为此，中国可能转而专注于非PUREX快堆后处理系统，尤其是高温化学处理技术。但这项技术也远不能应用于大量乏燃料的后处理。近年来，中国有可能建设一座产能为50 MT/y的MOX乏燃料后处理厂，满足目前在建的600 MWe增殖反应堆的需求。¹⁶⁵

后处理铀的回收利用

除铯外，中国还计划通过对乏燃料进行后处理，回收铀。

轻水堆乏燃料通过后处理可回收铯和铀。从四十年前开始，许多核电国家的反应堆尝试回收利用经后处理的铀。后处理铀的数量一直与后处理乏燃料的数量同步增长。截至2010年左右，全世界的后处理铀总量估计在数万吨左右。¹⁶⁶然而，大部分后处理铀都被贮存起来，回收利用量相对较小，但是在技术上已经证明可作为核反应堆燃料的使用，包括达到工业规模，供轻水堆使用。然而，由于后处理铀中的同位素含有中子毒物并释放出高水平的伽马辐射，将它作为商用反应堆燃料，实际成本会较高，尤其是对计划提高燃料燃耗水平的反应堆运营商来说。因此，大多数国家并不积极回收后处理铀，但是他们认为，如果铀的价格高于后处理铀的处理和贮存成本，那么它将是未来有价值的潜在资源。多年来，反应堆运营商对后处理铀一直采取机会主义的态度：对回收利用后处理铀的兴趣随着对铀供应保障担忧的增加而增加，随着担忧的减少而减少。¹⁶⁷

几十年来，中国在引入乏燃料后处理技术时，没有制定在核电计划中使用后处理铀的具体计划。¹⁶⁸2016年9月，中国几家大型的核电公司与加拿大同行签署了一份谅解备忘录，计划设计、投资并建造一座使用后处理铀燃料的700 MWe动力反应堆。该反应堆的设计是加拿大和其他地方建造的、使用重水慢化冷却的标准压水堆的更先进版本，其中包括2000年初以来在中国运行的两座反应堆。根据加拿大供应商的说法，中国最初将建造两座反应堆，使用从中国四座压水堆的乏燃料中回收的后处理铀。¹⁶⁹中国专家希望这个项目的商业合同，包括这些反应堆系统的技术所有权转让条款。

¹⁷⁰2016年，了解这个项目的中国官员表示，中国的一座或多座快堆最终将使用加拿大生产的后处理铀燃料，直到中国拥有这种快堆乏燃料的工业化后处理技术。¹⁷¹

高放废物处置

无论中国是否选择对压水堆乏燃料进行后处理，都需要处置高放废物。中国的核废物贮存项目与其他国家类似。核废物处置的决策由是中国政府的下属机构制定：国家核安全局是监管机构；中核集团被指定为负责建设和管理核废物贮存库；核工业北京地质研究院，负责与项目有关的研发工作。到目前为止，该项目的构想是：贮存来自军用和民用反应堆产生的乏燃料组件和玻璃固化的后处理废物。基本原理是，将废物货包处置在水平竖井中，竖井与通往贮存库的隧道相连。

2003年，政府调查了几个可能的贮存地点，最终集中全力在甘肃酒泉综合核设施附近的一个名为“北山”的偏远地区，建设一个花岗岩介质的废物地质处置库。

21世纪前十年，中国将2020年作为完成地质处置库的概念设计的目标年。¹⁷²2012年，美国决定放弃尤卡山动力反应堆乏燃料处置项目，而中国将未来高放废物贮存库备选场址扩大到12个。除花岗岩外，可选的地质处置库介质又增加了粘土，预计于2020年确定选址方案。¹⁷³

在选定地点建造地质处置库之前，中国必须完成钻井测试、选址、地质调查、地下水和处置介质放射性核素行为研究等工作，还必须选择地质处置库的缓冲介质——膨润土岩。中国计划在2020年之后¹⁷⁴的某个时候对废物货包进行技术表征，处置技术演示验证，并建立一个地质处置库专用地下实验室。在地质处置库建成并获准容纳乏燃料、经后处理的玻璃化高放废物和其他形式的高放废物之前，预计中国将暂时贮存所有的乏燃料和玻璃固化废物。

其他核电技术

除了快堆和相关的燃料循环技术外，中国还投资开发了其他未来可能用于发电的核技术。这些技术具有多种优点，包括非能动安全特性、部署通用性、废物排放少和冷却剂压力低。对所有这些类型的反应堆，中国都需要研发具体的核燃料管理和处理技术。尤其是，随着新技术的出现并逐渐引起关注，同时中国正在追求的其他核电技术，并由于技术、政治和经济原因而失去了吸引力，如果中国在短期内停止或减缓强制性的快堆和后处理技术的研发工作，21世纪20年代及以后，中国的核技术的重点可能会发生改变，并有可能在其他技术上有所发展。近年来，中国的研发机构和核工业的投资主要包括以下几个方面。

熔盐反应堆

20世纪70年代，中国启动了一项熔盐反应堆研发项目，但多年来进展甚微，因为很快出现了估计难以解决的巨大材料难题。¹⁷⁵从2011年开始，最初参与熔盐反应堆项目的中国科学院又恢复了该领域的研发工作。目前，中国科学院主持了一个由上海应用物理研究所牵头的项目。如果成功的话，在未来二十至三十年，该项目将设计和建造一系列小型实验和试点机组，首先建造一座开放式燃料循环的固体燃料的球床反应堆。更具挑战性的是，中国的目标是开发和部署闭式燃料循环液体燃料反应堆，这种反应堆从钍中增殖铀-233。无论中国的计划如何，负责该项目官员提示说，中国的熔盐反应堆可能要到2035年或更晚才能用于工业规模发电。¹⁷⁶

熔盐反应堆以熔盐为反应堆冷却剂，在大气压下运行（避免了轻水堆系统因压力过高导致的技术和安全问题），但运行温度却高于轻水堆，约700℃。熔盐反应堆有两种设计概念，一种是基于固体燃料，另一种是基于液体燃料，中国对两者都感兴趣。固体燃料的熔盐反应堆需要的燃料球很小，盐的操作相对简单，使用标准不锈钢制成的反应堆设备即可。对于液体燃料的熔盐反应堆，熔盐具有腐蚀性，处理方式复杂。

由于熔盐反应堆的特点和面临的技术挑战，在可预见的将来不可能取代轻水堆。中国科学院转而将研究重点放在了研发小型模块化系统。该系统不需要水冷却，利用涡轮发电机进行发电。¹⁷⁷因此，熔盐反应堆最终可能适合部署在中国中西部欠发达且较干旱的地区，因为在福岛核事故发生后，人们担心这些地区缺水，无法保证轻水堆的安全运行。

中国科学院熔盐反应堆项目负责小组从一个相对简单的球床固体燃料反应堆入手，目前正在研究该反应堆单次燃料循环后产生的废物形式。对于液体燃料熔盐反应堆，还有些尚未解决的问题，非常复杂。这类反应堆获得许可之前，需要做大量工作解决环境污染问题、熔盐反应问题、乏燃料高温热处理问题以及反应堆内熔盐贮存库存的清理问题。中国专家也不确定如何处理闭式燃料循环的液体燃料熔盐反应堆的废物。如果中国在二十年内解决了这些问题，熔盐反应堆可能会影响中国快堆研发方向，前提是必须设计出以轻水堆乏燃料中的铀系元素为燃料的未来熔盐反应堆。但是中国科学家认为，即使设计成功，以钍/铀为燃料的熔盐反应堆设计到2050年也无法取代为数众多的轻水堆，或许也无法与以铀/钚为燃料的快堆相匹敌。熔盐反应堆在核电领域的任何贡献都只能是锦上添花。¹⁷⁸

中国科学院的研究小组设想，在熔盐反应堆的熔盐中加入钍，通过中子俘获增殖铀-233，产生并回收的可裂变铀将通过在线高温后处理进行分离。通过在线高温后处理技术分离铀钍是相当困难的，原因有许多方面，包括化学、抗辐射性、致密性、反应堆慢化剂排除、与熔盐载体的相容性以及不扩散。¹⁷⁹对于中国的熔盐反应堆项目，高温后处理方案在技术上还有待概念化。¹⁸⁰

加速器驱动次临界系统和钍

中国还有意开发一种加速器驱动次临界系统，利用强大的粒子加速器使铀系元素发生嬗变，并在钍再生区中生成铀-233，钍再生区通过裂变产生电力。加速器驱动次临界系统的原理是，粒子加速器通过轰击靶件产生高能中子，这些高能中子与其他靶件，如铀系元素，发生反应。

1999年，经过三年（1996—1999年）的初步研究，加速器驱动次临界系统被纳入中国国家基础研究计划（即“973”计划）。中国原子能科学研究院与中国科学院高能物理研究所开展了一项为期五年的加速器驱动次临界系统物理与技术研究项目，并搭建了实验平台。2011年，中国科学院高能物理研究所的一位科学家称，中国“仍在加速器驱动次临界系统关键部件的基础研究和预研阶段”。¹⁸¹他说，中国将实行一个“三步走”项目：首先，经十年的努力，构建一个高能加速器和相关测试设备；然后，到2035年，建设一个加速器驱动次临界系统样机和一座30 MWe反应堆，进行初始嬗变试验；最后，在2050年之前建成一座“由10 MWe电子束加速器驱动的800 MWe全尺寸工业化示范反应堆”。他说，实现这一目标“将需要三十年时间”。¹⁸²

最近，该项目的时间表已缩短到在2032年之前完成示范设施的建设，包括一座额定功率超过1000 MWt、可以进行发电和处理乏燃料和高放废物的反应堆。该项目面临的挑战极其严峻，任务艰巨，包括靶件、反应堆再生区、废物分离、加速器工程以及确保工业化系统的可靠性。2016年3月，中国科学院与中广核集团签约，将在这一领域开展合作。中广核集团的目的是挑战中核集团在中国核废物处置领域的垄断地位。¹⁸³

据中国科学院的科学家介绍，中国目前正在努力实现的加速器驱动次临界系统研究目标，世界上“还没有现成模型”。¹⁸⁴中国并不是唯一开展利用加速器驱动次临界系统发电应用的国家，但是到目前为止，在工业应用方面的研究成果还很有限。建造和运行一个相当于商业规模核电反应堆的加速器驱动次临界系统，需要强大的束流强度，现有的加速器设计和正在运行的加速器的束流强度仅为它的一小部分。¹⁸⁵其他国家的加速器驱动次临界系统研究已经进行了几十年，并且研究仍在继续。挪威拥有大量的钍资源，一直在进行钍铀燃料的电力应用研究。2008年挪威得出结论，未来几十年，包括加速器驱动次临界系统在内的钍基燃料循环技术很可能实现工业化应用，但警告称，必须投入大量资金（数十亿美元），以克服经济上的不利因素和技术挑战。¹⁸⁶

其他类型的快堆设计

作为中国科学院加速器驱动次临界系统项目的一部分，中国正在进行铅冷却快堆的研究。中国科学院提出将该类型反应堆作为中国加速器驱动次临界系统的参考反应堆。研究分三个阶段进行：1）2020年左右，设计一座10 MWt的研究堆；2）本世纪20年代，研制一座100 MWt实验堆；3）本世纪30年代末，建成一座1000 MWt示范堆。到目前为止，中国的铅冷却反应堆并未得到与钠冷快堆同样的重视。

2006年，美国的TerraPower公司曾启动了一项计划，要求许可建造一种被称为“行波

反应堆”的装置。该反应堆的最初设计是令堆芯中的高浓铀燃料像“行波”一样从上到下发生裂变，在此期间，所有燃料将留在堆芯；经过几十年的裂变，最后燃料被移至贮存库进行处置。这一概念的目的在于，常规反应堆（包括快堆）的乏燃料是钚的一个重要来源，钚可能被挪为它用，生产核武器，而行波堆概念可以解决这个问题。2010年，由于在美国难以得到许可，并且难以找一个合适的地方建造所需的基础设施来证明反应堆设计是可行的，该公司将注意力转到中国，意图与中国行业公司和政府合作，在中国建立一个项目，并得到了美国政府的支持。

从那以后，经过与中国核工业部门的讨论，TerraPower公司开始对行波反应堆概念进行重大修改，以适应当前技术的局限性，包括材料要求、美国技术保密要求，以及中国核电企业的工程偏好。¹⁸⁷2015年，TerraPower公司和中核集团签署了合作建设一座反应堆的项目大纲，开始与中国快堆项目合作。根据协议，中国原子能科学研究院负责一座600 MWe泳池式动力反应堆燃料和堆芯的研制，中核集团负责反应堆的建筑工程和工程设计。¹⁸⁸

这是一座钠冷快堆，通过燃料组件驱动装置，使反应堆开始运行，这一组件驱动装置中含有浓缩铀，在驱动装置的作用下与堆芯周围再生区中的铀-238反应生成钚。该反应堆每年将关闭一至两周，以更换燃料组件，优化运行环境和安全环境。反应堆堆芯每十年将更换一次。从堆芯中取出的受辐照燃料将重新封装在包壳中，供另外三座反应堆重复使用。根据TerraPower公司的说法，该概念反应堆产生的乏燃料将比轻水堆少，而且乏燃料将在贮存库中处置，而不是进行后处理。¹⁸⁹TerraPower公司说，根据设计，反应堆系统使用贫铀或天然铀，但原理上未来也可以使用压水堆乏燃料。¹⁹⁰

该项目借鉴了美国快堆技术发展的经验。一些美国专家说，如果要在短期内推行该项目，由于没有国际设计审查标准，许可可能会遇到阻碍。如前所述，自2015年以来的一些非官方报道推测，TerraPower项目将选址在福建霞浦，在CFR-600之后建造。¹⁹¹

高温气冷反应堆

1986年，中国的“863”计划开始支持高温气冷反应堆的发电和高温工艺热应用研究。2012年，清华大学在引进德国技术（包括球形燃料组件生产技术）的基础上，在北京北部地区开始运行一座小型高温试验反应堆——HTR-10。之后，中国计划实施一个雄心勃勃的项目，建立20座更大的模块化反应堆，示范高温气冷反应堆大规模发电应用的可行性。

自2012年，中国开始在山东省石岛湾建造双机组的高温气冷反应堆核电站。每台机组额定功率为250 MWt，总功率为211 MWe。该项目由技术持有者清华大学、总承包商中核能源和投资者华能集团共同承建。华能集团放弃了在山东建设20座高温气冷反应堆机组的计划，转而计划新建一座6机组核电站，额定发电量为655 MWe。熟悉中国高温气冷反应堆项目的官员在2017年表示，与压水堆的建设成本相比，这个20台机组的项目不受欢迎。华能集团目前正在山东建设一座压水堆。

与熔盐反应堆一样，高温气冷反应堆仍然是一种小规模应用技术，技术发展过程中存在如何扩大规模的难题。即使成功，在未来二十年或更长的时间里，可能也不会对中国的电力生产作出重大贡献。如果中国决定只支持包括闭式燃料循环在内的核电系统，那么高温气冷反应堆的进一步发展可能会受到阻碍。¹⁹²到目前为止，中国还没有针对高温气冷反应堆乏燃料的后处理计划。高温气冷反应堆乏燃料的化学后处理在技术上是可行的，但目前还没有研发出工业规模的技术。

其他水冷反应堆

在“973”计划的资助下，中国许多大学和工业研发机构正在研制一种超临界水冷堆，该反应堆的运行压力超过水的临界压力。如果建造成功，它的热效率将超过现有轻水堆，并且核电站设计简单，因为水的流速较低，而且不需要蒸汽相关设备（蒸汽发生器、蒸汽干燥器或冷却剂再循环系统）。该项目的工程设计将依靠中国已经掌握的超临界燃煤电厂的先进技术。中国正积极参与第四代国际论坛项目的这项研究，目标是在本世纪20年代建成一座1000 MWe反应堆。超临界水冷堆的燃料循环方式将与中国的轻水堆相同。

与其他正在研究的反应堆相比，超临界水冷堆的一个优势在于它是一种水冷和水慢化反应堆，因此是从轻水堆直接演化过来的。但这一概念在安全系统设计和鉴定、燃料包壳材料和传热技术方面还面临挑战，部分是由于反应堆运行温度和压力较高。

此外，中国仍在继续研究和发展压水堆，同时稳步提高压水堆的建造和运行能力。虽然中国政府的决策者支持和鼓励研发快堆，但这并未阻止中国核工业公司继续将重点放在压水堆上。为了达到每年建造10座压水堆的能力，这些公司投入了大量的资金，期待中国领导人允许他们在未来几十年继续建造压水堆。到目前为止，中国政府还没有宣布2020年以后新建压水堆项目的具体目标，但“十三五”规划规定了在2020年之前启动更多反应堆建设的准备工作，并在“十四五”规划中提出建设最先8座反应堆的额外准备工作。¹⁹³尽管快堆的倡导者雄心勃勃地希望在本世纪中叶开始逐步淘汰压水

堆，利用快堆发电，但工业部门以外的官员对此表示反对，他们希望中国继续支持建设压水堆，因为中国的核工程部门对这种堆型最为了解。中国一些核电公司的高级管理人员在2017年表示，不管快堆系统如何发展，他们相信压水堆在本世纪仍将是中国主要的动力反应堆技术。

近年来，中国政府鼓励中核集团和中广核集团联合设计一座1000 MWe压水堆，以便中国可以从本世纪20年代开始出口。该反应堆名为“华龙一号”或HPR-1000，融入了两家外国（主要是法国）公司自20世纪90年代以来相继独立建造的两种不同类型的压水堆技术。随着西屋公司难以在中国推行AP1000型压水堆，“华龙一号”或其更大版本，有可能在本世纪20年代的某个时候成为中国的标准压水堆。

最后，中国正在发展特殊用途的中小规模反应堆（以下简称为“小型堆”），主要用于船舶、近海和偏远陆地地区。其中包括一个125 MWe的压水堆设计，中国计划将它用于一座100 MWe浮动式核电厂。¹⁹⁴小型堆（包括高温气冷反应堆），在中国可能更受欢迎，为未来以核能和可再生能源为基础的协同混合动力系统发电，取代燃煤发电，并在干旱地区的部署。这种装置可以在工厂里制造，然后运往指定地点安装。

可控核聚变反应堆

根据中国提出的“三步走”核电发展战略，在完成压水堆和快堆工业化部署后，中国将从本世纪20年代开始部署核聚变反应堆，开启核能发展第三阶段（2050—2100年）的序幕。

核聚变发电厂的电能来自于氢的两种同位素（氘和氚）的原子核聚变，通过原子核聚变形成氦，并释放中子和大量的能量，从而实现发电。两种基本方法可以实现聚变：磁聚变和惯性约束聚变。磁聚变是将注入“磁笼”的氢气加热到1亿摄氏度左右，并通过磁场维持聚变反应。惯性约束聚变试图用激光熔烧核材料。这两种途径都是中国目前正在研究的方向。

中国的核磁聚变能研究始于1958年，但后来转而致力于制造核武器，这项工作被搁置一旁。1964年中国成功试验了核裂变爆炸装置，很快就向发展核聚变武器迈进，具备了生产和使用聚变能材料的能力，主要是锂-6、氘和氘化锂-6，并在1967年成功试爆了一枚热核武器。¹⁹⁵

1973年以后，磁聚变项目重新走上正轨。从那时起，中国大力扩展该项目，众多研究

机构参与进来。¹⁹⁶资金主要通过中国科学院、教育部和中国军工采购单位提供。自2008年以来，军工采购单位开始隶属于中国工业和信息化部。¹⁹⁷

近二十年来，中国建立了包括几座托卡马克装置在内的磁聚变设施，托卡马克是大型磁约束装置，用来容纳热等离子体并产生聚变能。目前，中国加入了国际ITER计划，参与论证热核聚变反应堆系统的工程可行性和产生等离子体可能性。ITER的目标是在2025年左右完成这个项目。一位中国核聚变科学家表示，加入ITER项目对中国具有“战略意义”，因为它“将中国的核聚变技术提升到国际水平”，“为中国自主研发核聚变示范核电厂奠定了基础”。

中国计划首先将在2035年前，建造并运行一座500 MWt的实验聚变反应堆。然后，根据ITER计划，从2036年至2050年，中国将有两种选择：建造1 GW聚变裂变示范堆，然后“将聚变能源商业化”，或者建造1GW磁约束聚变示范堆，用于能源应用。¹⁹⁸ITER的时间表与中国核能发展“三步走”规划的时间表是一致的。科学家表示，在本世纪下半叶，磁性聚变不仅能成功产生核裂变能量，而且在2020—2050年之间设计和运行的实验和示范反应堆将增殖核裂变材料，并对裂变核电厂产生的高放废物进行嬗变。¹⁹⁹

可控聚变发电面临的技术挑战和投资要求非常严峻。为此，中国科学院的一些科学家在2005年对中国政府决定资助一个磁聚变研究项目的决定明确提出反对，因为还有一些问题尚未解决，其中包括还没有找到一种能够抵抗中子轰击、并约束中子以及放射性尘埃和氦气产生的放射性材料；大型核聚变发电反应堆中的设备会受到极端的机械应力和高温的影响。

此外，中国多所大学（其中一所参与中国核武器计划）还在进行惯性约束聚变的研究，目的是利用高强度激光，最终产生可用于工业和商业的聚变能，包括发电。中国研究人员研制了一组高强度激光驱动器来压缩靶件，计划在2020年左右实现点火演示。²⁰⁰如果研究成功，中国将成为少数几个正在进行惯性约束聚变重大研究项目的国家。目前已有几个国家进行了靶点火演示，但还没有一个国家达到工业和商业可行性论证所必须的高能量增益。惯性约束聚变反应堆面临的技术和经济挑战相当严峻，建造工业规模的发电用惯性约束聚变反应堆可能至少还需要几十年的时间。利用脉冲激光器驱动聚变反应堆发电，反应堆的设计和运行也许困难重重，因为这要求激光器必须真正实现连续可靠的激光发射，这对电力产生至关重要。

战略要点

2005年中国大幅加快核电计划时，提出了一个长期的战略构想，即中国当前的核技术将被两个先进的核系统取代：快堆和核聚变反应堆。中国在未来几个世纪继续生产核电。

当时中国计划发展的几项核技术，大多数达不到世界先进水平。此后，中国不仅将部署压水堆列为优先目标，而且加大扶持快堆、核聚变、其他类型的裂变反应堆和后处理技术的研发，以赶超国外核计划。

在此之前，其他国家曾努力实现快堆商业化，但由于技术和经济上的困难而搁浅，这也可能打击了中国发展快堆的信心。尽管中国可以借鉴20世纪90年代后期国际快堆研发取得的技术成果，但中国在燃料加工和制造等领域的技术水平仍处于相对初级的阶段。

中国核部署规划核电目标的完成情况好坏参半。中国按时完成了许多压水堆项目，却削减了2005年开始加速实施的产能计划。中国没有兑现快堆、先进燃料开发和后处理的中长期规划时间表，尽管这些时间表最初制定时也似乎是模糊的，或者用中国决策者的话说是“灵活的”。中国未能实现预期的部署时间表，可能反映出缺乏政治上的一贯支持、资金不足和技术困难。展望未来中国的发展，值得关注的是，中国在许多核电发展目标领域还缺乏经验。

20世纪80年代中国提出了核电发展计划，2005年又制定了发展时间表。在即将到来的2020年，中国核电将处于技术发展的十字路口。中国必须解决如下这些问题：

- 中国应该用什么标准来决定是否以及如何资助先进的核技术发展项目？闭式燃料循环技术，包括分离与嬗变和高温处理，可能对中国核电长期发展至关重要，但在未来二十年或更长时间内，实现工业规模部署可能还不成熟。对于这种情况，中国应该在未来闭式燃料循环项目中投入多少资金？
- 中国支持先进核技术的决定是否会影响对压水堆发展和安全的专注，从而导致压水堆基础设施在本世纪下半叶面临风险？
- 中国是否准备在关键领域经验相对匮乏的情况下，强行推动先进核技术产业项目的步伐？中国成功复制了现有压水堆技术，是否意味着中国将在先进技术上实现创新发展？
- 本世纪20年代，中国将如何与外国政府和行业合作，发展先进的核技术？迄今为

止，中国的快堆发展项目是以中核集团为中心、以俄罗斯技术为基础；那么，中国近期决定与美国合作，部署一座工业原型快堆，这对快堆项目的未来意味着什么？

- 中国目前已经在经济上和政治上支持了一些先进的核电技术的发展，中国将如何从这些技术中选择出最有前途的技术？选择依据是什么？中国将如何决策和组织这些技术从研发向工业规模和商业化部署的转变？

电力政策与经济

核电的未来难以预测。许多国家的电力部门最初都青睐核电投资，但后来都不再鼓励发展核电。鉴于目前的发展形式，到本世纪中叶，世界核工业能否在经济上具有可行性，尚不确定。相对于其他电力技术，核电更需要政府、投资者和公众长期支持，要安全持续地使用核能。核电事业的资本成本不断上升，从某种程度上来说，为了回收成本，未来核电厂的使用寿命将设计为六十年或更长，一个核电项目从规划、许可审批，到退役和废物管理将需要庞大的财务支出，这些支出将促使生命周期延长至一个世纪甚至更久。

总而言之，人们对核电未来越不确定，越表明人们对核电风险的担忧，政府和工业部门可能会反对更先进、成本更高的核技术投资，尤其是那些需要长时间研发和工业示范才能投入使用的技术；特别是，如果决策者并不确信这些投入能否带来技术上可靠、可进一步发展、商业上有利可图的资产，那么他们更不会同意进行投资。

世界上大多数核电厂在建成时，政府都认为电力供应、传输和分配具有天然的垄断性，因为新的参与方会因固定成本相对较高而缺乏竞争力。他们认为，电力投资的资本成本普遍较高，老牌供应商具有平均成本低、电力生产经济规模化的优势，这对新的参与方来说是不可逾越的障碍，会阻止他们与处于垄断地位的老牌供应商竞争。电力行业的公司之所以投资核电，是因为投资成本体现在费率基础上，由消费者承担。

自20世纪90年代以来，许多政府解除了对电力行业的控制，鼓励竞争。这有时意味着，相比于其他电力来源，必须抬高核电价格，才能使核电厂运营商获利；而且，对于大多数市场来说，这意味着新的核电投资将比其他技术投资更为昂贵。此外，一些政府还采取政策措施，补贴非核发电技术的发展和部署。

令人印象深刻的是，中国迅速地吸收了外国成功的先进技术，建造了最初的轻水堆，然后按照紧张的建设时间表几乎没有延误地进行了技术复制。然而，中国将在本世纪以多快的速度推进上一章讨论的先进核技术？中国实验快堆试点项目需要近二十五年的时间。欧洲、日本和俄罗斯的快堆项目专家在2015年5月和2016年6月的研讨会上警告说，根据以往的经验，中国商业示范快堆的设计、建造和运行不可能毫无延误、按期完成。²⁰¹更坦白地讲，这些专家是在强调：目前支持快堆研发的多边国际努力面临重重困难，将快堆研发项目的成果转化为商业上可行的核系统，是一个巨大的难题。²⁰²

在此背景下，对政策制定者和投资者来说，重要的是要考虑中国的经济和电力政策环境是否会无限期支持核电，中国是否会冒着各种风险，支持部署可能需要更大的财政投入和政治承诺的更先进核电系统。

中国2005年前的核经济

从20世纪70年代末开始，中国计划在电力能源组合中引入核电，因为中国多项研究的结果表明，核电投资被证明是物有所值。他们认为，与其他能源相比，核电具有成本竞争力。²⁰³从中国开始实施核电计划起，中国政府就像在十年前或二十年前决定支持核电的其他国家的政府一样，牢牢控制着电力部门，所有投资和大多数定价决策都由政府掌控。

当时，一些持怀疑态度的人认为，较高的核电厂成本投资会阻碍中国投资可再生能源，而且核电也将无法与占中国电力供应约四分之三的廉价煤炭资源竞争。²⁰⁴但中国政府决定建设少量核电厂，是考虑到文化大革命后中国改革过程中出现的政治、能源安全和技术政策，与成本无关。

随着邓小平经济现代化带来的经济高增长，中国政府开始对中国的电力行业进行改革，刺激电力生产，包括允许外国资本注资中国核电项目，并且中国也进行力度更大的投资。20世纪80年代和90年代，中国能否负担得起核电并不那么重要，因为大多数核电厂都是根据合同由外国供应商提供设备和服务建造的，项目资金是由外国政府代表公司支付。事实上，从1980年到1996年，中国政府的电力投资比例从60%下降到0.2%，而外国电力投资比例从零增加到12%。²⁰⁵中国沿海地区的经济以惊人的速度增长，促进了投资多元化，生产分散化，尤其是广东省的政治和行业领导急于挑战中央的决策专权。²⁰⁶

本世纪初，受煤炭供应瓶颈的影响，以及电力需求的持续增长，中国领导人决定加大核电厂投资力度，更加重视核电的经济利益。中国政府认为，煤炭短缺及其引起的煤炭价格上涨和中国煤炭进口的增长，将是一种长期的发展趋势，因此决策者预测，未来核电将比燃煤发电更具竞争力。²⁰⁷随着煤炭价格的上升和煤炭进口的增长，国有电力公司债台高筑，营业亏损，但他们成功游说政府允许他们投资核电，并得到了中国政府的批准。中国政府在2005年决定加快核电发展时，中国出现了核淘金热：作为正在进行的电力部门改革的一部分，一些国有企业从国家能源部独立，把赌注押在政府决策者作出的关于电力需求增长的长期预测上，国有企业与地方和省级政府共同合作，试图从全国各地核电厂项目获利。²⁰⁸

中国对核电的支持

在接下来的十年里，中国建造的核电厂产生了丰厚的利润。从2002年到2012年，中国的两家核电企业——中广核集团和中核集团，年资产回报率为7.1%，是当时火电企业的两倍多。²⁰⁹这减缓了这些企业的政府股东对项目风险的担忧，政府预计，核电项目位于人口稠密且经济增长迅速的沿海地区，靠近电力市场，在电力市场竞争中可以与煤炭和可再生能源相抗衡。而且，各省反对跨省销售电力，国家电网公司长距离的电力传输也面临艰巨的任务，这些因素都为中国东部沿海地区的核电投资项目提供了更坚实的保障。

无论过去还是现在，中国核电投资的盈利都得益于各省和中国政府领导人的支持。他们以各种方式为核电项目提供帮助，其中最重要的有：

获取信息并影响决策

允许投资核电行业的企业数量是极其有限的；所有投资核电的企业都是受国家控制的国有企业。中国最有权力的组织——中国共产党参与所有国有企业高层人事的决策。电力行业的国有企业高级管理人员可以当选为中央和省级政府的官员，他们“保持与企业的联系，可以提供内部消息并为企业说话”。²¹⁰中国几乎所有的政府高级官员都是共产党党员，受共产党的纪律约束。国有企业中，党组织与企业管理结构并存，党委书记可能比总经理还拥有更大的权力。²¹¹共产党参与企业管理可以影响企业的发展，有利于赢得地方和省级行业和政府的支持，包括在国务院和其他监管机构正式批准之前做好审批前基础准备工作，确保项目建设获得支持。许多甚至大部分的中国核电建设项目，可能都从这种方式中获益。²¹²总的来讲，从过去几十年直到最近，中国法律制度不太完善和公民的社会参与度相对较低，能源问题决策缺乏问责制和透明度。²¹³这种现象实际上意味着能源定价和调度取决于临时的危机管理决策，不透明的政治影响和人际关系可能是关键的决定因素。²¹⁴即便如此，自上世纪90年代末以来，中国电力行业（包括国有核企业）逐步实行企业化，的确在一定程度上使中国共产党和政府和指导企业核资产的管理和投资决策时面临挑战。近年来，中国国有核电企业的领导人也比以前更加鼓励发展新的管理文化，将企业利益与国家和共产党利益区别开来。

财政补贴

国有电力企业直到最近才开始承担向政府支付股息的义务。政策性银行，例如中国国家开发银行，以优惠的国家补贴利率向国有电力企业提供贷款，尤其是向中核集团提供贷款。²¹⁵更概括地说，国家制定了有利于国有企业的存款利率的调控政策，要求国有银行以低贴现率为核电项目提供融资，从而使核电享有明显和巨大的融资成本优势。²¹⁶

优惠的定价

中国政府为核电提供最有效的潜在财政补贴，也许是为向电网输送核电的企业提供优惠的价格条件。中国电力生产商的销售价格是由中央规划机构——国家发改委控制的，后者为每一种能源设定了不同的上网电价：核电、太阳能、风电、水电和煤炭。自中国政府采取这一措施以来，2016年和2017年，政府为核电标杆生产企业核定的标杆电价为0.43 RMB/kWh，一直高于燃煤或水利发电的电价，这在一定程度上反映了核电厂较高的资本成本。²¹⁷这种优惠的税率对中国核工业的福利有多大？2015年，一位中国核工业高级管理人员表示：“我们非常关注政府的这项政策。如果政府把这个政策从我们这里拿走，我们企业的未来就遇到很多麻烦。”²¹⁸

电力部门改革与核电

中国的电力改革大约开始于五十年前，而且一直没有停止，很可能会继续下去。中国电力行业改革越深入、越有效，未来核政策决策中的经济和成本考量就会越多。

电力市场改革

随着20世纪80年代和90年代政府对电力行业实行权力下放政策，中国政府开始进行电力行业商业化改革，并拆解电力部门。中国在本世纪初采取的许多措施，对于那些正在解除电力系统的西方国家的政府官员和企业高管来说，似乎都很熟悉。

2003年，中国政府的一个庞大的规划机构——中国国家计划委员会，更名为中国国家发展和改革委员会。国家发改委组建了中国的能源局，后来升级为一个副部级单位——国家能源局。国家成立了环境保护部，然后又设立了国有资产监督管理委员会（以下简称为“国资委”），承担电力行业中国有企业的中国政府股东角色。中国政府还试图建立一个电力行业监管委员会。

与此同时，中国领导层采取措施，推进电力系统市场化。这一过程从2002年开始，当时中国政府解散了庞大的中国国家电力公司，该公司拥有中国大部分输配电基础设施，并在中国发电量中占有很大份额。解散后，中国成立了两家电网管理公司以及五家国有电力公司。电网管理公司与电力公司相互独立。五家新成立的国有电力企业是从原国家电力公司分离出来的，发电量在五年内达到中国总量的近一半。²¹⁹2005年，中国政府决定加速核电厂的建设，电力系统的市场化进一步加快。国有电力企业向政府施压，要求政府允许他们通过债券市场为即将进行的核电投资筹集资金，以实现中国政府提出的更高的反应堆建设目标。电力企业特别倾向于投资核电厂，主要有两个原因：

一是从2005年左右开始，随着煤炭行业改革，国内煤炭价格开始跟随国际市场持续上涨；二是缺乏煤炭价格与火电上网价格挂钩的有效机制。²²⁰在这种情况下，行业公司必定会开始向政府施压，要求对定价制度进行更根本的改革，这只是时间问题。现在，这一改革仍处于初级阶段，而且在主张中国市场化的人看来，还有很长的路要走。在本世纪最初的十年，中国核电行业规模尚且太小，无法对国家定价产生影响，但是，随着越来越多的反应堆建成，这种情况发生了变化。自2005年以来，国家发改委保证提高核电企业电力上网销售价格，使核电公司从中获利。

今后几年，在习近平的领导下，电力改革的两个重要议程可能会对核电行业产生深远影响：一是中国政府决心长期引入市场机制，二是中国雄心勃勃地为电力系统脱碳而努力。2014年习近平在“推动我国能源生产和消费革命”的讲话中强有力地表明了这两个愿望，他表示，中国将减少浪费，鼓励对非化石能源的投资，扩大市场力量的作用，改革能源部门的规章制度和管理。²²¹国家发改委将来的电价改革，将核电包括在内，将是这两项举措的核心。

环保政策驱动核电增长

目前已证实，中国部署核能发电技术的初衷是拓展煤炭资源以外的电力能源。中国作出电力行业脱碳的决定，是对世界各国环境专家的响应。他们确信，必须大幅减少大气中二氧化碳的排放量，以避免全球气候恶化。中国的做法强化了这一观点。但是，直到现在，减少空气污染颗粒一直是中国的根本环保政策，也是促进核电发展的动力。

2009年中国宣布，到2020年，计划二氧化碳排放强度（单位GDP的二氧化碳平均排放量）比2005年下降40%~45%，非化石燃料在一次能源生产中的比重提高到15%。²²²2016年，中国正式签署了在巴黎联合国气候变化大会上达成的关于减少碳排放、限制可能出现的全球气温上升的协定。为此，中国将减缓气候变化的承诺的期限从2020年延长到2030年，同意将二氧化碳排放强度降低60%~65%，将非化石能源占能源生产的比重提高到20%，这意味着中国的二氧化碳排放将在2030年达到峰值。这些目标也反映在中国“十三五”规划（2016—2020年）的气候政策目标中。²²³根据从2011年到2020年的五年规划，中国一直在积极扩大对风能、太阳能和核能发电能力的投资。如果目标得以实现，中国风电装机容量将从2010年的31 GWe增加到2020年的200 GWe，太阳能装机容量将从2010年的1 GWe增加到2020年的70 GWe；到2020年，核电装机容量将增加到58 GWe，在建核电装机容量将增加30 GWe。

国家发改委没有具体说明2020年以后的规划目标，具体目标还在支持（或不支持）具

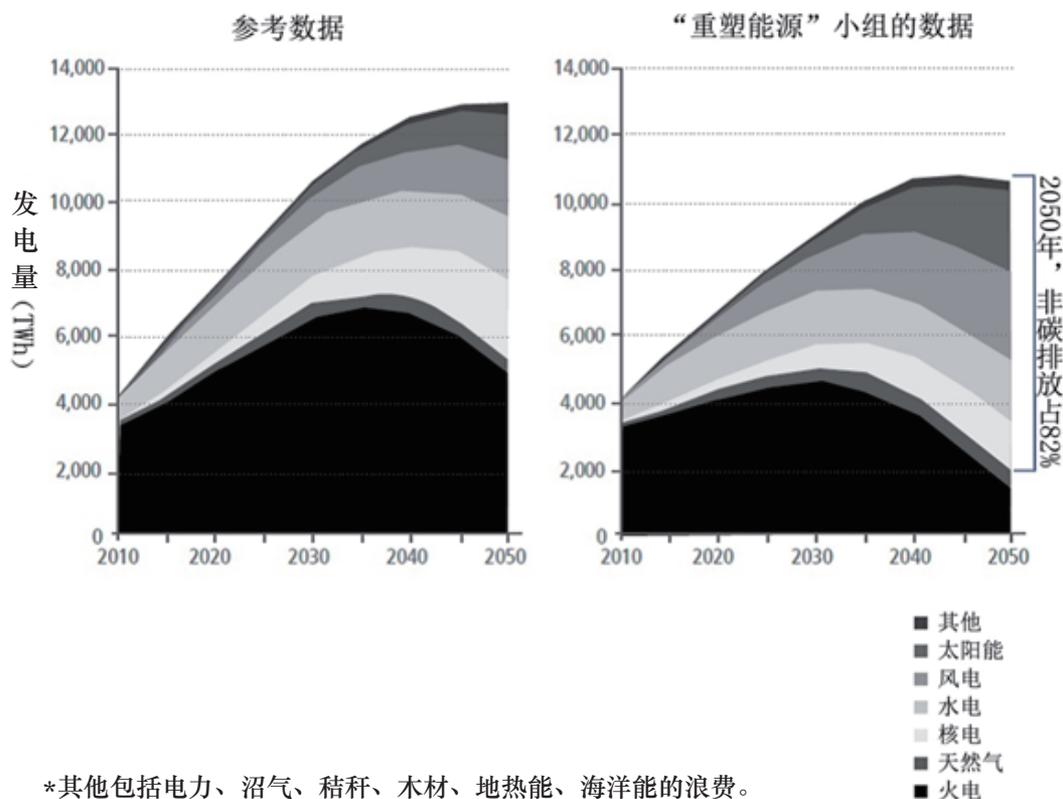
体电力技术部署的参与者和观察员的猜测和想像中。未来五年规划中核电占比将取决于：对经济增长的预期、政府减少碳排放的目标和承诺，以及一些包括电力储存和碳封存、发电等技术的发展等等。这还将取决于电力系统的结构，特别是中国的电力需求是否会永远一如既往地包括基本负荷（很大一部分由核电厂提供），以及未来超高压输电设施在中国电网的使用程度。

特别是，在福岛核事故之前，中国一些类似官方机构估计到2050年中国核电装机容量高达400 GWe~500 GWe。这一预测与美国劳伦斯伯克利国家实验室的科学家在本世纪前十年的后期，与国家发改委的研究人员合作预测中国未来的电力需求和温室气体排时使用的估值相符。²²⁴

除非出现不可预见的发展局面，中国政府的决策者和研究机构认为，到2050年，中国电力系统的发展没有理由会促成某种阻止核电的进一步增长的决定。但在本世纪的第二个十年，核电装机容量的增长速度总体大幅走低。这在一定程度上反映了中国政府对2011年日本发生严重核事故的谨慎态度，以及自2014年以来习近平和其他中国官员对中国经济和电力需求增长放缓的预期。中国把这种状态称为“新常态”。

中国政治经济界当前和未来的“新常态”和环保问题，并不意味着中国将在本世纪中叶放弃核电。值得注意的是，一个对核能持批评态度、倡导积极能源效率政策和可再生能源建设的非政府研究机构，对中国未来电力组成所做的一个计算机模拟预计，在中国积极进行碳减排的形势下，若要最大化减少碳排放量，中国会继续增加核电装机容量，到2050年预计达到约180 GWe。这个估值还不到福岛核事故前一些乐观估计的一半，但仍是“十三五”规划中装机容量的两倍（到2025年），也是美国目前核电装机容量的近两倍。

预计到2050年中国的电力资源



*其他包括电力、沼气、秸秆、木材、地热能、海洋能的浪费。

资料来源：洛基山研究所，《重塑能源：中国》。

上图是该研究机构的研究人员对中国未来电力生产的预计，他们认为，在2050年中国总发电量中，对于气候有利的非碳排放能源将占82%，其中核能将是一个重要组成部分。这一预测是非常乐观的，而且据《重塑能源：中国》的作者称，要实现这个目标，必须累计投资5.2万亿美元（35万亿人民币），这个数字是相当可观的。²²⁵但在2050年之前，实际情况可能与这些预测有所不同，至少从脱碳的观点来看，若干因素会对中国核电发展产生不利影响，这些因素包括：中国劳动力的能力；中国是否大量投资廉价天然气；中国是否会继续以支持资本投资和建设的传统增长模式发展经济；技术壁垒是否会阻碍低碳技术的进一步发展；政治家和决策者如何在中国电力规划体系中平衡已广为使用的可再生能源；国有企业是否会进行改革。²²⁶

左上图反映的是中国更传统的参考数据和国家发改委能源研究所与劳伦斯伯克利国家实验室合作研究得出的数据，资源节约度相对较低，煤炭和核能发电占比较多。事实

上，这些专家预计2050年发电量的上限与下限，与国际原子能机构等组织机构最近所做的预测相符。²²⁷一些研究人员估计，要达到这些目标，到2030年，中国电网可能会增加1000 GWe~2000 GWe的发电量；同时，为了实现中国2016年制定的缓解气候变化的目标，在新增的发电量中，非化石能源发电量必须达到900 GWe，超过了“十三五”规划预计的投资。如果是这样，与劳伦斯伯克利国家实验室合作的中国研究人员表示，大多数新增的非化石能源发电量“将来自可再生能源和/或核能”。²²⁸更概括地讲，中国将会继续补充新的核电能力，一位中国电力规划的官员在2016年说，“只要中国致力于脱碳，国家发改委和能源局就可以预计，可再生能源在中国电力生产的占有率将限制在20%~30%之间”。²²⁹

人口和地理因素对中国核电发展未来也至关重要。到目前为止，中国所有的核电厂都建在人口稠密的东部沿海地区。然而，2015年研究人员得出结论，这些高收入地区的人均电力消耗正在趋于平稳，他们警告说：“人均电力消费与经济发展之间的关系发展到一个新的阶段，除了几个能源开采省份，大多数中国省份的人均电力需求仅保持温和增长状态，在最发达地区甚至停滞不前。”²³⁰根据中国核工业官员2015年的说法，我们之所以预测核电发电量将继续扩大到100 GWe以上，是因为我们预计之前计划在中国内陆地区建设核电厂的项目将会实施。²³¹但在福岛核事故之后，中国政府一直不愿实施本世纪初制定的这些计划。如果中国内陆核电项目不投入运行，那么到2050年，中国核电装机容量超过100 MWe~150 MWe的目标将不会实现。

如果近期对未来电力需求的预期是准确的，加上中国的国家碳减排目标和对《巴黎协定》的承诺，我们或许就有理由认为仅在2020—2030年之间，中国核电装机容量将增加几百吉瓦。但实际上，容量增加将受到诸多因素的制约，包括在“新常态”下未来电力需求的发展，以及可能存在的相关政治因素。

如果中国在未来几年优先增加非化石能源的发电量，那么当其他非排放技术遇到困难时，中国可能会考虑提高核能发电量。自2010年以来，中国对风力发电设备投资过度，风电装机容量以每年60%的速度增长，从而导致先进风电投入被迫大幅削减。间歇性电力的大量增长，也使政府的调度和定价系统面临严峻挑战。中国的调度和定价系统是针对固定配额和固定价格而设计的，与供求无关。供电系统中不断增加的电力流动，使中国的调度和定价机制的压力越来越大。²³²另外，习近平在2015年和2016年宣布，政府计划引入竞争性调度，这种压力可能会更加沉重。²³³

政策制定者在考虑中国核电行业的未来前景时，还有一个不容忽视的因素，即中国煤

炭行业的规模和影响力。中国有3万个煤矿，600万工人。尽管政府努力削减煤炭产量，但从2000年至2014年，煤炭产量却从10亿短吨增加到近40亿短吨。地方和省级官员支持煤炭行业，他们经常无视中央政府的指示，推迟执行政府下达的关闭煤矿的命令，而且一旦煤炭价格上涨，煤矿往往会重新开工。不仅如此，尽管产能过剩，他们仍继续投资新的煤炭项目，对政府削减煤炭产量的命令置若罔闻。整个煤电供应链都面临压力：煤矿、发电厂、工程建筑公司。地方煤炭工人的抗议活动也是家常便饭，由此造成潜在的社会动荡，可能会削弱中国政府逐步淘汰煤炭行业的决心。而另一方面，大概有7亿城市居民却希望政府和共产党能够保证清洁的空气。到2030年左右，或许在2030年之后，煤炭排放将达到顶峰，那时中国政府将面临这一两难境地的政治挑战。

未来的核成本

中国用核电替代燃煤发电的决定将更难贯彻下去，因为中国的核电成本高昂。在煤炭工业发达的地区，燃煤发电企业享有的成本优势比核电竞争对手大得多。燃煤发电量过剩的地区，基本负荷电价优惠，如山西0.3538元/千瓦时、内蒙0.2937元/千瓦时。这些价格分别比政府核定的标杆价格还低20%和33%。²³⁴

近年来，GDP增速和电力需求增速放缓，核电成本相对较高，煤炭和可再生能源带来的政治压力增大，这些因素共同导致核电行业出现减产，导致中国核电厂的负荷系数降低，政府迫使核电厂以负荷跟踪模式运行反应堆，从而使核电生产成本增加。²³⁵未来几年，这种成本压力可能还会增加，特别是如果中国向电网增加发电量的速率远远高于目前和预测的电力需求增长速率的话。²³⁶如果这种现状持续下去，核工业和政府市场改革者之间的矛盾肯定会加大，特别是在政府如何优先分配可再生能源、核电和水力发电资源的问题上。

中国核电经济远远不像官方所报道的那样，中国核电装机容量不断增长，屡创新高。2017年3月中国媒体披露的数据显示，中国核电厂设备利用率下降，将对核电经济构成潜在威胁。据中国核电企业高级管理人员称，中国一座核电厂必须每年运行约7000小时，才够偿还项目贷款。从2015年开始，在一些核电发电量曾稳步提高的地区，核电厂的利用率已经下降到每年5000小时。²³⁷

此外，随着超高压输电线路的普及，本已低廉的燃煤电价将来可能更加便宜，因为传输费用将会下降至每2000千米（大约1242英里）只有0.10~0.15元/千瓦时。高度企业化的中国国家电网公司正以创记录的投资额推进中国超高压输电线路建设，仅2016年

一年，这个全球最大、现金最充裕的输配电公司就拨出约860亿美元（约合人民币5430亿元）用于这项新的投资。²³⁸

在过去十年的大部分时间里，拥有大多数中国核电厂的东部沿海地区的燃煤电厂，一直在以接近核电运行价的高电价发电。但是，随着越来越多的电力，从遥远的矿区燃煤电厂和中国环保法青睐的间歇性能源发电厂输送到沿海地区，东部沿海地区核电价格的压力可能会加大。而且，如果中国政府的决策者和实力强大的中国国家电网有限公司打破遍及全国、阻碍跨省电力销售和传输的政治壁垒，核电投资可能会被迫搁浅。

近期，一些地方和地区的核电产量下降，这一趋势是否会波及全国，将取决于国家如何平衡不同电力公司向国家电网出售电力的价格。在温家宝开启核电建设热潮的十多年后，目前，或许今后几年，核电的潜在投资者再也不会想当然地认为，中国新建的核电厂将会拿到“印制钞票”的许可证。

中国越想追赶西方，经济就越会因基本要素投入成本增高而失去竞争优势。当今中国电力成本比美国高30%，这在很大程度上是由于低效的调度能力、过度建设、缺乏透明度的定价和有选择性的保护主义。²³⁹鉴于中国核能发电一直比燃煤发电昂贵，如果中国政府有意保护经济的国际竞争优势，就必须想办法控制甚至降低核电成本。

除非政府出于长远的战略考虑，愿意承担核电生产的昂贵费用，否则，对于是否将投资方向从压水堆调整到一次到位的或机组级数更少的商用快堆及其燃料循环设施，政府和国有企业在作出任何投资决定时，成本必将是一个考虑因素。

中国高温气冷反应堆项目的经历表明，即使政府已经作出支持这类技术投资的决定，但决定并非一成不变。过去十年间，中国启动了在山东省石岛湾核电厂建设10座105 MWe的双机组核电厂的项目，共计20座反应堆。和快堆一样，1986年中央规划部门指定高温气冷反应堆为战略技术，但在2018年首台机组完工后，此项目却被要求暂停。根据该项目联合研究小组负责人的说法，项目在实施过程中发现，机组的发电成本（部分是基于项目成本推算的）将比中国的压水堆核电厂的发电成本高出25%。²⁴⁰于是，投资者现在正计划在此建造一座大型压水堆取而代之。而高温气冷反应堆项目将进行重新设计，以降低建造和采购成本。预计下一个高温气冷反应堆项目将是额定功率655MWe，由6个模块组成，与一台涡轮发电机相连，目的是获得更大的规模效益。²⁴¹即使对于1986年以来政府出于战略原因一直青睐的反应堆型号，相对成本也影响国有投资者的决策。

快堆成本

中国高温气冷反应堆项目的经验教训应该可以推广到其他核投资项目。与中国的压水堆相比，原型快堆或示范快堆的工程设计、申请许可、采购安装的成本将更高，因为它是独一无二的。运行成本取决于可靠性；对于一个崭新的工业原型快堆或示范快堆，运行情况如何，很难预测。轻水堆有累计约1.4万年商业运行经验的数据库，供潜在投资者参考；相比之下，世界上的快堆累计经验总共只有几百年。²⁴²日本、英国和美国的242座示范堆曾长时间关闭，而法国第一座工业规模的快堆十年间的使用率仅为7%。²⁴³另一方面，法国的凤凰原型堆和俄罗斯的BN-600这两座反应堆最终也只分别连续运行了151天和165天。后来，法国又研制了一座商业规模的快堆，虽然1996年实现了全年成功运行，发电量超过了此前九年运行期间的总发电量，但该项目遭到法国政府的极力反对，因而勒令关闭。²⁴⁴要使未来的原型快堆或示范快堆成功运行，可能必须运行足够长的时间，积累运行经验，才能从中受益。投资者需要有足够的耐心。

法国的快堆在经历了半个世纪的发展之后，国家电力公司——法国电力集团决定，对于先前出现的影响快堆可靠运行的一些具体问题，包括气溶胶沉积、腐蚀以及钠安全壳的完整性等，如果没有采取适当的补救措施，将不会投资建设商用快堆。法国对一些以前运行的快堆进行了工程改造，使它们的可用系数有时可以达到50%~80%。但据法国快堆项目的一位资深专家说：“要想与其他发电系统竞争，可靠性系数必须高于90%。必须通过材料创新，解决换料停堆、设备维护和在役检查中存在的问题，延长部件寿命……先进材料的工业化应用必须确保基本不会发生钠泄漏事件；必须重新设计回路和设备，使它们可以在极短或几天的时间内及时修理或更换。”²⁴⁵

同样，日本专家根据日本快堆项目的经验得出结论：未来的反应堆必须解决装机容量因素、资本成本和燃料成本问题。为了降低成本，核电厂的使用寿命必须从四十年延长到六十年；必须简化反应堆系统；必须采用先进的规范和标准进行施工；维修周期必须缩短；必须增加燃料的燃耗；检查和换料停堆之间的运行周期必须延长到两年。²⁴⁶

中国核工业高级管理人员表示，他们预计如果快堆的投资和运营成本超过压水堆，政府将支付额外的费用。²⁴⁷根据中国在实验快堆成本管理方面的经验，核工业还预计示范增殖反应堆的建造和发电费用将高于压水堆。笔者在2015年和2016年咨询了来自西欧、日本、俄罗斯、美国的快堆专家，他们也得出了同样结论。大多数专家一致认为，总体来看，任何新型示范快堆的相关成本都将高于压水堆。²⁴⁸中国的资料同样表示，三峡水电项目的投资者可能愿意支持福建的示范快堆建设项目，政府可能会提前

向他保证，这个独特的具有战略意义的项目将会得到政府补贴，并且通过电力销售中有效的上网电价补贴政策，对快堆发电给予高于所有其他核电的上网电价补贴。但是在习近平的领导下，国家发改委决策者力图减少中国定价体系中存在的市场扭曲现象。

根据中国原子能科学研究院的数据，中国实验快堆耗资3.87亿美元（约合25亿元人民币）。如果真是这样的话，尽管按照今天的核电厂成本来说，这也相当划算，但几乎是二十五年前预算的4倍，当时该项目启动时的预算为1.06亿美元（约合6.8亿元人民币）。中国原子能科学研究院指责该项目缺乏设计、工程和施工经验，尤其是泳池式反应堆，是造成费用超标的主要原因。中国原子能科学研究院不得不对主要部件进行耗资巨大的设计更改，而且在他们看来，中国政府也没有给予该项目充分的支持；采购费用占项目成本的39%，低于中国压水堆的采购占比（尽管由于采购份额较低，项目的价格低于压水堆）。²⁴⁹中国原子能科学研究院从意大利购买了已停止的快堆项目中的设备，为了与实验快堆项目设计相匹配，又对项目进行了修改；而且苏联解体后，由于政治动荡，俄罗斯合作伙伴的设备供应被推迟。这些事件都增加了中国实验快堆的成本。²⁵⁰中国原子能科学研究院为了降低成本，对600 MWe快堆进行一系列改进，包括工程设计程序和堆芯设计、燃料燃耗、蒸汽发生器、总热效率和建筑材料的高效使用等，所有这些问题都使中国实验快堆的成本大大增加。²⁵¹

后处理成本

与未来快堆的成本构成相比，使用PUREX化学流程的乏燃料批量后处理厂的投资成本和运行成本研究已历时多年，成本估算经验成熟，特别是这种乏燃料后处理技术已用了几十年。²⁵² 2013年，中国官员告诉作者，媒体报道称，法国供应商阿海珐集团提出以200亿欧元左右的价格在中国建造一座800 MTHM/年的后处理厂，这则报道是可信的。²⁵³2007年日本核工业称，阿海珐集团在日本建造一座类似的后处理厂，现已几乎完工，造价为2.2万亿日元，与这个价格相符。²⁵⁴

关于中国在金塔建造的200 MTHM/年后处理厂的成本，没有公开的数据，但可以认为，费用将大大低于阿海珐集团提供建造的处理厂，因为与实验快堆项目一样，该项目中很大一部分的工程设计、施工和采购都将由国内提供。²⁵⁵以这个项目为借口，中国可能会说服阿海珐集团把800 MTHM/年的后处理厂的价格降低大约50亿欧元。²⁵⁶

2015年和2016年，中国的高级管理人员告诉笔者，在决定建造和运行一座用于后处理大量压水堆乏燃料的工业化设施之前，当时中国最大的两个反应堆所有者——中广核集团和中核集团，尚未就如何推进该项目达成协议。由于中核集团被授权全面负责中

国工业化核燃料循环后端的发展和管理，国家电投集团和中广核集团的官员表示担心，他们在商业上将处于不利地位，并且中核集团会在后处理服务方面“收取过高费用”。²⁵⁷中核集团在其他一些民用和国防核业务中利润较低，可能打算用后处理的垄断收入来弥补上述利润亏空。²⁵⁸政府和中核集团可以通过几种渠道为后处理厂的投资筹集资金，包括直接融资、软贷款以及求助于乏燃料管理基金。中国向所有运行的反应堆征收0.26元/千瓦时（约合0.38美分/千瓦时）的税，这些税收的一部分用作乏燃料管理基金。中广核集团不满中核集团在后处理行业的垄断地位，在2013年曾向国家发改委表示，该基金的收入不足以支付后处理的费用。²⁵⁹

根据目前和以往后处理项目的数据，外部研究人员普遍认为，中国乏燃料后处理的成本将超过干式贮存的成本。²⁶⁰哈佛大学的研究人员估计，根据资本成本、利息、退役、产能因数和运行情况的预测，乏燃料后处理厂的燃料处理成本在1000美元~5600美元/千克之间。²⁶¹中国对此回应称，这个较低的数字更接近2013年之前中国官方的数据，中国官方曾估算政府和中核集团为大型后处理厂项目所做的融资额及其利率。²⁶²中国官员表示，哈佛大学研究给出的较高的数字更符合西方核电计划对较高生产要素成本的预期，比如他们研究用到的历史参考数据。无论如何，如果中国选择投资一个工业化闭式核燃料循环项目，除了上述的压水堆乏燃料湿法后处理费用外，还将面对钚燃料（MOX燃料和金属燃料）的生产和废物管理费用，包括处置，铀采购、转化和浓缩，二氧化铀燃料制造，干法贮存乏燃料等，以及比压水堆燃料制造和乏燃料后处理费用高得多的快堆相关费用。

研究人员得出的结论是，采用闭式燃料循环系统，中国的核电成本会更高，这与自20世纪90年代以来针对其他核计划进行的一系列经济研究结果一致。根据这些研究中的假设，核燃料后处理和回收的成本份额可能为14~66%。²⁶³对大多数核电国家来说，由于潜在成本相当高，投资者和政府不愿意投资工业化的闭式核燃料循环系统。考虑到与乏燃料管理的成本要素在总平准化发电成本中相对份额较低。根据经济合作与发展组织（以下简称为“经合组织”）核能署的估算，可能在2%到4%之间。中国可能相信，投资带来的战略利益将补偿这些高成本支出。²⁶⁴

战略要点

经济因素在中国核电计划的作用越来越重要。未来，中国经济与其他发达核国家越相似，经济因素在决策中就越重要。

与许多其他核电国家一样，最初，核电的高成本并没有使中国感到畏惧，因为中国的

电力行业最初是一个整体，并且最初的核电厂由外国供应商及其政府提供资金。政府对核电的支持符合中国的政策目标——技术发展、能源安全和减少污染，并不考虑成本因素。

核电成本作为决策的一个因素始于本世纪初。在此之前，中国政府实行电力行业改革，同时加快了核电厂的部署，并促使电力行业企业化发展，以便为电力投资筹集更多资金。

如今，中国核电行业面临的难题是中国政府的电力政策目标相互矛盾，既要提高市场透明度，又要保持中国政府的控制。中国政府将输配电和电力生产解绑之后，国有核电企业需要政府的保护，才能以适当的价格向电网出售电力，从而保证足够的电力收入，以便偿还日益增长的债务。这些特权是中国核电行业的生命线。如果中国领导层继续放开市场，让市场决定新增核电发电量的投资和降低成本，那么这条生命线就会受到威胁。

中国增长模式的转变、国家电网的统一、边际电力需求的下降以及公司化的国有核企业的决策偏离了国家战略利益，这些因素都可能给核电上网的优惠电价造成下行压力。对中国核电来说，最糟糕的经济局面是，由于“新常态”持续存在，电力改革继续进行，国家又没有适当的补救措施，核电厂投资进退两难。

预计本世纪20年代的经济的发展，将不利于中国向更先进的核技术和闭式核燃料循环转型。中国越是迫使电力部门降低整体系统成本，国家就越有可能迫于压力，为假想的非商业战略利益买单并提供补贴。

影响中国决策的其他关键问题

核能决策在很大程度上是对本报告前三章所讨论的技术和工业资源的管理。除此之外，还有其他几个具有战略意义的问题，也是决策的重要考虑因素，这不仅关系到中国核计划的技术方向，还关系到中国将来在国际贸易和全球核治理方面所处的地位和作用。

能源安全

从一开始，从事中国核电事业的技术官员和政治领导人就想当然地认为，国家有义务提供充足和可靠的能源供应。从20世纪80年代开始，中国的决策者就被提醒，根据外国核计划的传统经验，除非中国开始进行闭式核燃料循环研究，否则中国的铀资源将耗尽。2007年，在中国总理温家宝大幅加快反应堆建设步伐的三年后，中国原子能科学研究所的专家指出，中国应进行从压水堆向快堆的根本转变，他们建议，到2050年快堆占中国核电装机容量的80%。中国原子能科学研究所的一位资深科学家说，如果中国继续只依赖压水堆发电，六十年后，中国的铀需求将达世界铀资源一半。²⁶⁵

中国应该对能源安全感到担忧。过去三十年来，中国经济持续高速增长，中国的经济发展越来越依赖于可靠且不断增长的能源供应。随着中国人均GDP从1980年的约100美元增长到2017年的约7000美元，同期中国人均能源消耗也从600千克油当量增长到2000千克油当量。电力行业的发展也是如此。1990年，中国消耗的电力仅为美国的五分之一；而到2013年，中国的用电量已比世界排名第二的美国高25%，居世界首位。²⁶⁶

近年来，中国领导人、能源专家和媒体都把能源安全作为国家政策关注的焦点。他们把大部分注意力都集中在中国的石油供应上，石油占中国一次能源消费总量的20%。经过几十年的自给自足，中国现在是石油净进口国，石油的需求量越来越大，目前中国60%的石油需求依赖进口。一些专家预测，到2030年，这一数字可能会增加到75%左右。同样，中国天然气进口量也不断增长，中国对此也同样担忧。²⁶⁷

对外国石油和天然气资源日益增加的依赖提高了中国对能源安全的认识，但这些燃料在中国几乎不用于发电。对电力行业来说，更重要的是，按照传统的预计，中国将需要越来越多的铀，才能在本世纪末之前实现脱碳；而且，进入22世纪，铀将成为主要的电力燃料。正如化石燃料的情况一样，国内铀供应有限，中国预计在中短期内，将依靠外部资源来满足未来的大部分铀需求。

从中国核电计划开始，到2005年左右加快核电厂建设之前，中国的铀需求量一直与国内铀产量大体相同。2005年之后，中国的铀赤字（即年需求量超过开采和加工的量）稳步增长，2016年的需求量约为2600吨。²⁶⁸预计中国的铀需求量将继续稳步增长，在2020年可能达1.01万~1.2万吨，2030年达1.23万~1.62万吨，2035年达1.44万~1.62万吨。²⁶⁹中国希望通过三个渠道来满足需求：国内生产、海外资源和市场采购。国内生产量可能只满足最小份额的增长需求，更多的需要通过对外投资，开发海外铀资源，其中最大一部分可能要从公开市场购买。²⁷⁰在短期内，中国预计将从哈萨克斯坦和纳米比亚进口越来越多的铀。此外，中国公司还在其他国家进行投资并签订了合同。

考虑到未来铀需求不断增长，中国从2000年以来一直在储备铀。截至2015年，中国铀库存接近8.5万吨，相当于全球每年铀需求总量的140%，或者相当于当时中国十年左右的需求量。²⁷¹这也就是说，中国购买了世界市场上大约四分之一的铀。²⁷²如果在未来几十年里，中国将核电发电量扩大到150 GWe，并且所有的反应堆都使用新的铀燃料，²⁷³中国的铀需求量可能会增加到每年2.5万吨，根据国际工业组织世界核协会的数据，这相当于目前世界年产量（约6.2万吨）的40%。

世界铀产量能否在本世纪20年代和30年代扩大，满足中国明显增长的铀需求？根据经合组织和国际原子能机构对全球铀市场的追踪调查，很可能答案是肯定的。到2035年，全球核电不太可能实现高速增长，预计全球核电装机容量达683 GWe，铀年需求量为10.5万吨，几乎是目前产量的两倍。他们认为，目前全球的资源基础“绰绰有余”，足以满足到2035年的需求。

如果中国的核电厂继续无限期地储存铀，以满足未来十年的需求，那么他们将需要积累约25万吨的铀库存，才能满足150 GWe的核电装机容量。这一库存量将是世界最低年产量的3倍多，足以满足国际原子能机构预计的到2035年全球核电增长的最低水平（装机容量418 GWe）的需要，或者说，可以满足国际原子能机构预计的核电高增长所需的世界铀年产量的两倍左右。这种积累速度还意味着，中国每年的铀购买量将是目前的两倍。

世界是否能生产出足够的铀来满足中国这样的库存，尚有待讨论。从中国政府和行业的角度来看，中国未来的铀安全将取决于中国领导人对中国自主发展程度的看法。如果中国采取更宽松的国际核合作政策，中国“将从高库存战略转向放心的低库存”。²⁷⁴其他专家认为，中国目前的铀储备计划严格来说可能不是出于本意，而是福

岛核事故后中国反应堆建设放缓的结果，以及是将经常账户盈余商品化的国家政策，以取代持有美国国债。不管怎样，如果最终中国的核电发展顺应国际潮流，铀储备将会下降。中国海关数据显示，过去十年中国铀进口的趋势线呈上升趋势，每年超过20亿美元，但到2016年可能已经稳定下来。²⁷⁵

据经合组织/国际原子能机构称，如果2017年全球铀需求水平无限期保持不变，目前的全球铀资源将足以满足未来160年的需求。除此之外，如果“开发当前所有常规资源基础”，包括推测储量，“这个数字将扩大到240年以上”，但前提是“铀需求和市场价格显著提高”，刺激更多的铀勘探和资源开发。²⁷⁶ 总而言之，从历史上看，铀勘探和铀生产的支出与传统铀资源基础的规模成正比，铀产业部门相信现在这个趋势仍将保持不变。这意味着，随着铀生产投资的增加，越来越多的铀资源将被开发出来。过去十年，中国是全球铀市场非常重要的参与者，这一地位将使中国具有市场影响力，使其能够在相对有利的商业条件下利用优势获取大量铀。

核武器核不扩散和核安保

中国是《不扩散核武器条约》的缔约国，是该条约承认的五个合法拥有核武器的国家之一。中国在1964年首次引爆了核爆炸装置，比条约规定的1968年1月1日的最后期限提前了四年。

中国是《不扩散核武器条约》中五个有核武器国家中最后一个发展核电基础设施的国家。多年来，不管在何种情况下，中国政府的各个机构都管理着中国核武器和核电相关事业的发展，许多行业公司（包括国有企业），都积极参与军用和民用核计划。

核能技术是一种军民两用技术：中国政府启动核电计划，部分是为了缩小中国军队的规模。今天，中国的核研发机构、行业企业、学院和大学培养的专家既可以为民用核企业工作，也可以受雇于军用核企业。随着中国在电力技术方面的投资越来越大，中国的政治和经济实力也不断增长，中国政府希望中国拥有足够的核专家来管理和进一步发展核武器资产。与其他有核武器国家一样，中国在核材料生产、加工和管理方面的投资，特别是在先进的核燃料循环系统和后处理、铀浓缩和其他同位素分离技术方面的投资，都可能会间接和直接地有助于中国的核防御。

与《不扩散核武器条约》其他有核武器国家一样，中国没有义务对任何核材料和核活动实施国际原子能机构的保障监督²⁷⁷。然而，《不扩散核武器条约》明确规定中国有

义务不向其他国家扩散核武器，必须与其他缔约国一样，保障核材料的安全，确保不会丢失、被盗或转移到中国以外，用于非和平目的。

除《不扩散核武器条约》外，中国还与澳大利亚、加拿大、法国、英国、美国等多个国家签署了专门的双边协议，承担了与核不扩散和核安保有关的义务。签署这些协议的目的是为了促进核合作，包括商业活动。这些双边协议规定，中国不得将外国提供的核设备、信息、材料或技术用于任何军事目的；促进双边核查；未经事先同意，不得将出口管制物品转让给第三方。这些协议可能包含与国家安全的额外义务，可能对中国的核电和核燃料循环发展产生影响。²⁷⁸

法国政府在跨部门审议阿海珐集团向中国出售后处理厂的应用时，考虑到了该项业务可能带来的核扩散风险。据参与审议的人士说，审议的结论是阿海珐集团不应向中国出口使用PUREX技术的后处理厂；工厂设施不应建立在酒泉404工厂等军事基地；应对该设施实行国际原子能机构的保障监督。²⁷⁹欧洲委员会已进行预先准备，对阿海珐集团在中国建造的后处理厂的设计进行保障监督。

尽管通过发展后处理技术，中国可能会获得一些知识和经验，有助于中国的核防御，但是美国政府官员在2016年告诉笔者，如果不对后处理厂进行国际原子能机构的保障监督，美国并不担心中国会用阿海珐集团提供给中国的后处理技术或设备，为中国核武器计划生产钚燃料。²⁸⁰美国在2015年续签与中国和平核合作的双边协议时，也表明了同样观点。美国同意了一项新条款，规定中国可以提前获得批准，在没有国际原子能机构保障监督的情况下在中国开展美国的乏燃料后处理业务。

与此同时，美国政府官员公开要求中国不要对中国的乏燃料进行后处理，而且据欧洲同行说，他们还要求法国终止与中国进行的关于出售阿海珐后处理厂的双边谈判。²⁸¹一些美国官员声称，中国对核反应堆乏燃料进行后处理，会鼓励其他国家（尤其是日本和韩国）从乏燃料中分离钚。²⁸²

目前尚不清楚，如果中国对核电反应堆乏燃料进行后处理，是否会引发一场区域性的“钚竞争”。日本和韩国的燃料循环发展政策与中国类似，只是时间更长。没有证据表明，中国的核活动已促使日本或韩国就核燃料循环的未来发展做出决定。日本从1977年开始对核电反应堆乏燃料进行后处理，而且1989年阿海珐集团开始在日本建造一座大型后处理厂。韩国在1997年启动了一项高温处理技术的研发项目，从反应堆乏

燃料中回收利用核材料。自启动核武器计划以来，中国并没有利用核电事业为核防御提供核爆炸材料。

将来，中国可能会超越其他先进核国家，有效地利用快堆、后处理、核燃料回收等技术，实现工业化的闭式核燃料循环。这样的话，全球核电态势可能就需重新评估，敏感技术研发和其他核活动可能就会重新兴起，从而导致对核扩散的担忧加剧，包括拥有先进核燃料循环技术的国家向没有这些技术的国家转让核产品，以及一些国家可能的防范行为。自2004年以来，中国一直是核供应国集团的成员国。核供应国集团由48个国家组成，负责监管全球核贸易。核供应国集团指导方针中包括的具体条款，要求成员国必须限制敏感核燃料循环技术的转让。

如果中国开始工业规模的核燃料循环研发，管理大量的钚就是一项物流难题，由此会加剧对核安保的担忧。这些因素已经在中国的决策中有所体现。20世纪80年代，中国核专家曾设想在中国西部偏远地区建造一座工业规模的后处理厂，此前那里已经在进行敏感的国防核活动。最近，中国的观点发生了变化。2001年9月11日美国发生恐怖袭击，再加上对中国西部分裂主义暴力活动的担忧，中国政府开始系统评估核材料运输所面临的恐怖威胁。今天，考虑到大量核燃料在沿海核电站和内陆偏远处理厂之间的往返运输面临的物流和安保方面的挑战，中国正考虑在离核电站最近的几个地点之一进行乏燃料后处理。

与其他先进核电计划相比，关于中国境内核材料运输的公开信息很少，因此，对于未来规模更大的核电计划和更复杂的核燃料循环可能带来的安保挑战，观察人士很难做出评估。中国的国外铀供应商表示，他们没有得到直接信息，不知道一旦中国接手铀监管，铀将在哪里、以何种方式，以及是否被交付给指定的最终用户；他们还说，并非中国进口的所有铀都要遵守和平利用承诺。²⁸³中国已经制定了许多规章制度，并已采取进一步行动，保障民用核计划的核材料安保。²⁸⁴中国政府宣称，包括在核安全峰会上也表示，正在减少核安保风险，中国的行为似乎也证明了这一点。

如果中国计划推行工业规模的快堆和钚回收利用项目，所需的安保投资将远远超过中国政府目前保障低浓铀和未经后处理的乏燃料所需的投资。像其他已部署后处理厂和快堆的《不扩散核武器条约》有核武器国家一样，中国应能够为闭式核燃料循环提供充分的实物保护和其他核安保措施，特别是如果中国能够固化敏感核材料，并尽量减少移动。核材料在中国境内分布得越广，在加工和运输过程中接触到的人越多，被盗用的风险就越大。

战略技术政策

在邓小平领导下，中国进行了现代化改革，目标是在科学技术领域赶上工业化国家。过去四十年来，中国一直把核能视为发展的关键领域。中国越富裕，政府在核电领域的投资就越多。从20世纪80年代中期开始，中国将先进的核反应堆和核燃料处理设施列为重点战略投资目标。

1986年，中国政府启动了国家高技术研究发展计划（即“863计划”），鼓励军事技术民用化，核能被定为一项“重要”或“关键”技术。政府决定开发一种快堆，即后来的中国实验快堆。二十年后，温家宝决定加快核建设，与此同时，中国颁布了一项为期十五年的《国家中长期科学和技术发展规划纲要》。实际上是重新包装了“863”计划。该计划包括三个“巨大的核项目”——开发先进的压水堆、高温气冷反应堆和一个“大型商业乏燃料后处理示范项目，以实现闭式燃料循环”。²⁸⁵

与此同时，政府设立了一项基础科学研究资助项目，即“973”计划，为25万名科学家提供服务。2000年，该项目开始资助加速器驱动系统研究，2007年又投入了更多的研发资金，用于乏燃料材料的分离和嬗变研究。“973”计划还资助了两种超临界水冷概念反应堆：一个是八家研究机构、大学和行业公司参与的混合能谱反应堆设计；另一个是1000 MWe反应堆的设计。²⁸⁶

2005年，中国政府还为为期十五年的《核电中长期发展计划》起草了具体的研究和发 展指示。2014年11月，国务院发布了《能源发展战略行动计划（2014—2020）》，宣布政府对包括CAP-1400压水堆在内的大型压水堆项目和中核集团和中广核开发的“华龙一号”压水堆项目提供资金支持。CAP-1400压水堆是中国在AP1000的基础上自主研发的压水堆。AP1000反应堆是由西屋公司设计，2008年开始在中国建造。该计划还包括为高温气冷反应堆和快堆研发提供资金。这个还指示强调，在本世纪20年代，“压水堆将成为中国主要的反应堆，但不是唯一的反应堆类型”。²⁸⁷

从一开始，中国对核技术的支持工作就由中国科学院牵头。中国科学院既是核研究项目的学术机构，也是智库、组织者和资助者。2011年，中国科学院承接了“973”计划中的加速器驱动次临界系统项目，其中包括5亿美元的预算，用于分离和嬗变技术示范项目的第一阶段研究。分离和嬗变技术示范项目计划分三期，计划2032年完成。中国科学院还主持铅冷反应堆的研究，并且于2011年负责上海应用物理研究所的一个长期计划，开发钍基熔盐反应堆。

但是，向大型核科学项目投资是一回事，而能否取得成功是另一回事。中国实验快堆遇到的问题表明，政府对快堆开发的承诺并不是一成不变的，有时甚至前后不一。2016年，政府决定停止在石岛湾部署系列高温气冷反应堆的计划。政府认为，高温气冷反应堆技术商业化，可能没有充分考虑到电力企业的经济需求，而这些发电企业将来才是这个项目的主要投资者。

2015年，政府要求中国科学院对闭式燃料循环的研发情况进行评估，结果中国科学院提出了这项研究中出现的一系列问题。尽管20世纪80年代以来一些理想主义者预测，中国能够实现闭式燃料循环，但中国科学院的结论是，中国在后处理发展方面“落后印度二十五年”；缺乏开展后处理示范项目的“统一领导”；分散和不协调的乏燃料库存管理不利于项目发展；未能培养出一批专家骨干，尤其是年轻的专家。中国拥有这方面专业知识和管理知识的人分散在中核集团的各个部门、军事组织和大学。与工业部门相比，中国研究机构专家的薪酬也不尽人意。²⁸⁸

毛泽东时代之后，提倡现代化改革的人就曾讨论过，中国的核发展是应该依赖自主研发的技术，还是依靠与国外合作。四十年过去了，这个问题似乎还没有定论。的确，中国非常成功地掌握了外国公司转让给中国的压水堆技术，但是现在，中国的核电发展方针则是在行业和政府部门的共同努力下创新发展先进技术，并实现部署。特别是，政府制定的研发项目的目标是减少对外国技术的依赖，支持中国的进口替代政策。因此，中国科学院又将这个问题提了出来，并要求政府“主持召开国家级科学研讨会，讨论从外国公司购买昂贵的后处理设施的可行性”，并考虑“整体技术引进的策略”。²⁸⁹

中国发布的2006—2020年核能研发计划强调“自主创新”，这使得一些专家认定，“提倡加强自主研发的战略科技政策的人显然占了上风”。²⁹⁰但是，随着该计划接近尾声，人们开始怀疑中国能否自上而下地在政府的领导下开展核创新，并成功实现工业化和商业化。文化大革命之前的许多年，中国的工业发展一直受到指令型经济体制的制约，研发工作与生产功能分离，缺乏科技创新。²⁹¹最近几年，在习主席的领导下，国家要求研发机构（如中国科学院），更多地注重国家资助项目的实际研究成果。不只中国科学院一家研究机构对此作出了回应，他们指出了一些国家指导的、高度集中的研发方案中存在的问题，“特别是在项目启动和设计方面”。²⁹²尤其是，对于没有经过工应用验证的技术，项目风险难以预测，而且在某些领域，可能高于已部署技术的风险。如果决策者要求中国的未来核发展更多地建立在这种技术上，不能确定越来越公司化的核企业，是否会简单地执行中国政府和共产党的发展策略，除非他们确信政

府会替他们承担成本和风险。但中国“新常态”（包括债务上升和增长放缓）的现实表明，未来几年，国有企业可能无法指望中国政府承担企业管理失败的风险。

这些问题现在正困扰着制定研发规划的官员。2020年，为期十五年的技术规划蓝图即将走到终点，中国正期待着那些规划者指出一条未来核发展的道路。在此之前，习主席已经下令，中国将成立一个新整合的组织，取代现有的研发计划，特别是“863”和“973”计划，“统一对重大项目进行规划和评估”。这个组织将通过五个渠道管理“国家科技重大专项”，其中一个将负责核技术的研发。²⁹³

核安全

多年来，在中国核能发展的过程中，核安全问题一直不是政府和行业决策的关键考虑因素。美国三哩岛核电厂发生的严重事故使国际核电厂发展一度受挫，但并没有对中国产生影响，中国在毫无争议的情况下建成了第一座核电厂“秦山一号”。同样，切尔诺贝利核事故也没有阻止中国继续部署基于苏联设计的核电技术。

2011年3月，日本福岛第一核电厂的三座反应堆熔毁时，中国的反应却大不相同。中国政府立即意识到这会对中国核计划产生重大影响。

中国曾想当然地认为，日本能够防止或有效减少日本核电厂发生核事故，并确保不会发生严重的堆芯损坏事故，造成场外影响。日本是世界上技术设备最先进、经验最丰富的核电国家之一，但也没能防止核事故。那么，中国的经验远不如日本，是否更容易发生严重事故，包括治理缺陷导致的核事故？中国的领导人立即对此产生了疑问。中国的核安全文化可能潜藏着未知的弱点，这个预测可能大大震惊了中国的政治领导层，因为仅仅几年之前，他们曾下令加大中国核电发展，目标是在2011年（日本福岛核事故发生的时候）建设比日本多3~4倍的核电厂。

福岛核事故发生几周后，国务院下令进行核安全审查，暂停新核电厂的建设，然后将政府2020年的核电装机容量目标从70 GWe降至58 GWe，只允许新建30座反应堆。²⁹⁴ 工业界和研发机构曾预计，中国将在2050年前将核电发电量扩大到400 GWe~500 GWe。但从福岛核事故后，国家能源局和国家发改委不再想当然地相信他们。2012年，中国业界和政府官员公开警告称，在福岛核事故发生前中国预期将无限期强行扩大核电生产，这一风险太大。也就在这一年，核安全问题开始出现在中国政府的核规划宣传中。“稳健发展，安全发展”成为中国的官方口号。²⁹⁵ 在有些情况下，中国非核工业出现的事故也促使中国进行核安全检查，因为他们从侧面暴露了中国的安全文化确实存在令人遗憾的缺陷。²⁹⁶

中国曾选出了15个内陆地区作为未来核电厂的场址。但是，福岛核事故后，批评人士对选址的合理性提出了担忧。为此，中国政府直接作出政策回应，至少在2020年之前，不会批准在上述地区任何一处建设核反应堆。中国主要担心，核电厂发生严重事故会导致河流和地下水的污染。国家核安全局的技术支持组织正在对此进行调查，但由于缺乏基准，这一问题可能难以决断。中国核工业协会的一些高级管理人员曾劝说政府在上述地区建造核电厂，但后来他们承认，一些提议的内陆场址目前缺乏基础设施和资源。一些中国工业专家说，他们主张在内陆地区只建设新型反应堆，这种反应堆比中国大多数压水堆更安全。在政府机构的内部讨论中，支持用这种新型反应堆替代压水堆的人士声称，这种堆型的设计本质上比压水堆更安全。如果让几乎不了解核问题的公众来讨论这个问题，可能产生误导和反作用。

本世纪初，外国政府和行业公司也曾质疑，中国的核监管和安全机制是否能跟上中国政府反应堆建设加快的步伐。2010年，国际原子能机构对中国核监管体系进行了同行评审，敦促中国向国家核安全局提供更多资金和人员，确保核政策和法规“跟上中国核计划的发展步伐”。²⁹⁷当时，西方国家政府认为国家核安全局没有实际的行政权力，担心他们没有能力强制实施有关设备和工艺的质量标准，因为它在人员、资金和影响力方面远不如国有核企业。²⁹⁸外国核监管机构一致认为，如果国家核安全局没有与中国工业发展相匹配的监查能力，中国核电厂发生严重核事故的可能性将会增加。

总而言之，中国的核电计划仍在不断扩大，但目前面临的核安全挑战是必须在各个领域和各个层面建立强有力的核安全文化，从规划蓝图到反应堆运行。这一挑战十分严峻。比如，2015年国家核安全管理局对一系列核电反应堆的调查报告指出，反应堆关键安全设备在设计、生产、材料以及焊接检查监督方面存在缺陷（包括压力边界），这些缺陷表明，如果中国计划在今后二十多年间每年新建数座反应堆，那么就必须全面深入地培养中国的核安全文化。国家核安全管理局确认并记录了这些失败原因：监督薄弱、生产缺陷、设备测试不全面、质量保证不健全、检验结果分析欠缺、缺乏工艺管控、人员技术水平不足、未能对照设计规范对已安装的设备进行检查、未能给厂区一线作业人员提供最新的设计数据、缺乏经验反馈等。²⁹⁹

福岛核事故发生后，中国政府提高了国家核安全局的权利职能，并确保了更多的资金和人员。六年后即2016年，国际原子能机构再次到中国进行同行评审，他们注意到了中国的进步。中国大部分核电行业都是建立在外国提供的技术之上的，中国采纳了这些国家在核电方面的安全法规。国际原子能机构专家还表示，中国正在努力达到国际原子能机构的基本安全规则。³⁰⁰尽管国家核安全局指出中国核电厂在某些特定领域

存在系统的安全文化问题，但迄今为止从未报道过国际原子能机构制定的核安全等级（0~7级）二级或以上的核事件。这表明，与世界上其他许多核电国家不同，中国从未经历过真正的核安全问题。

2013年9月，全国人民代表大会要求颁布《中华人民共和国核安全法》。国家核安全局支持对中国民用核电计划建立法律监管。³⁰¹2017年9月，这一法律生效。³⁰²外国安全专家告诉笔者，在此之前，他们发现国家核安全局曾出于安全原因成功干预并阻止颁发许可证，并阻止核电厂运营。只有有效立法并得到实施，中国的核监管体制才能免受到自上而下、武断的政治和行政上的制约。

2010年，国际原子能机构评审员敦促中国加快制定政策，更好地规范核废物管理和燃料循环；2016年，他们重新提出了这一建议。外国政府资料显示，中国已计划投入大量资金，为未来核燃料循环培养大量人力资源，涉及的领域包括培训、安全和监管。

一些外国专家曾担心，特别是在中国核电发展的前二十年，中国实行依靠不同的外国技术、发展“精品”核电厂这种渐进式核电发展战略，会让缺乏经验和人手不足的监管机构不堪重负。部分出于这个原因，从本世纪初开始，中国开始只专注一种压水堆设计，目标是最终实现核电计划标准化。预计未来几年，甚至几十年，中国建造的大部分核电厂将采用少数几种非常熟悉的技术，包括政府下令中核集团和中广核集团联合开发的“华龙一号”压水堆。“华龙一号”也许是西屋公司设计的AP1000压水堆的中国版本，只是规模更大。但是，如果中国要推进工业化的闭式燃料循环和快堆，那么国家核安全局将需要专业知识来许可和监管这些设施和活动。因此，同行评审员建议，中国在制定未来核燃料循环产业中心计划的同时，应培养燃料循环监管专业技能。

质量保证和监管能力问题也很重要，特别是，如果中国继续将核电计划扩大到远超过100 GWe的水平，这个问题就更加突出。实行核安全标准化将减轻中国的监管负担，但中国使用一种设计建造的核电厂越多，它就越需要防范系统和设备出现共因故障，导致多台机组可能出现耗资巨大的重要安全问题。法国的核电计划出现过这些问题，共同的特点是许多电厂的标准化程度很高。中国安全专家目前正在研究如何筛选出共因故障，并查找设计漏洞。³⁰³2016年国家核安全局的报告表明，中国专家更加关注这个问题，因为中国的核电计划已经开始出现共因问题。³⁰⁴

另一个更难解决的设备问题是假冒伪劣部件。这个问题在本世纪初首次由外国政府向国家核安全局提出。这些国家的核工业正与中国的核企业合作，他们对腐败问题

和缺乏质量保证感到担忧。一座核电厂平均包含大约3000个核标准级阀门、250个泵、70.8千米长的管道、482.8千米长的电缆和9万个电子元件。³⁰⁵考虑到中国对这些普通的工业产品成品缺乏有力的质量保证制度，公司和监管人员必须杜绝使用伪劣、不合格甚至假冒的设备，避免引起或促成重大安全事故。近年来，国家核安全局曾发现核电厂在安装时使用了假冒部件。³⁰⁶如果不严格执行这个制度，很有可能会导致事故，因为中国的一座现代核电厂的设备来自大约5000家不同的供应商。中国是一个工业安全既往表现欠佳的国家，加上政府鼓励本土技术输入，而制造业又靠低成本赢得竞争优势，因此保证不断扩大核电计划的安全，这可能比其他任何国家都困难。

中国核电计划的持续扩张，迫使决策者建立核安全能力和效率的考核标准。如果中国在2050年及以后建造数百座核反应堆，监管机构和政治领导人可能必须根据对中国核安全能力的评估，判断国家能承担多大的安全风险，以及建设多少座核电厂会导致无法接受的安全风险。

核出口与国际核贸易

从20世纪50年代中期开始，美国启动了“和平利用原子能”的长期计划，其中包括与几十个国家开展双边和平利用核能的合作，并鼓励美国核领域公司向美国政府的外国伙伴出售核产品。“和平利用原子能”计划是美国政府牵制共产主义和对抗苏联影响的战略行动的一部分。更概括地说，它的目的是在全球范围内扩大影响力，而且根据美国国家安全委员会的一份备忘录称，通过外交和商业手段，通过传播核技术，“加强美国在世界上的领导地位”。³⁰⁷

这个计划给美国带来了相当可观的利益。“和平利用原子能”计划兑现了它的承诺，“让潜在的受益者对美国的技术感兴趣”。³⁰⁸美国核工业供应商在三十年间向50多个国家出口了核反应堆和足够多的核产品。现在，全球450座核反应堆中，大约有四分之三采用的技术最初是由美国公司及其合作伙伴发明并申请专利的。美国工业公司和外国公司之间建立的合作和商业关系为美国政府打开了一扇窗，让美国政府得以了解盟国和其他受益于美国技术、设备和核材料的政府的战略决策。通过这些关系，整个20世纪后半叶在美国的领导下，世界建立了核不扩散、核贸易、核安全和核安保等多边协议。美国极大地影响了所有这些领域全球准则的形成。

今后的几十年，中国可能在国际核贸易等一些关键领域，承担起全球核领导的责任。随着中国核发展步伐加快，中国政府积极要求外国公司和政府将核反应堆、燃料生产和工程服务的知识产权转让给中国，同时严格执行基于进口替代和中国技术零和置换外

国技术的国民经济发展政策。上世纪90年代和本世纪初，中核集团向当时唯一的外国核反应堆客户巴基斯坦出口核反应堆，并宣布中国拥有该反应堆的知识产权，美国和法国的官员及其行业公司似乎对这一说法感到不满。³⁰⁹然而，就像上个世纪的法国和日本一样，今天的中国在很大程度上已经成功地摆脱了外国对核反应堆出口自由的限制，而且中国现在正在向外国客户提供中国品牌的核设备，包括核电厂交钥匙工程。中国竭力获取外国知识产权的行为，曾导致美国指控中国军方人员和公司员工从事间谍活动。³¹⁰

本世纪10年代末，或许今后几年，中国摆脱外国对反应堆出口限制的关键，很可能是“华龙一号”反应堆（也被称为HPR-1000）。“华龙一号”是中国政府下令中广核集团和中核集团合作建造、并将在海外销售的压水堆，设计基于两种过去国外技术的压水堆型号，结合了中国最新的工程改进。中国现在宣称拥有这种反应堆“完全独立”的知识产权。³¹¹作为全面双边协议的一部分，中国计划在本世纪20年代在英国建造“华龙一号”。与此同时，中国也可以将其出口到其他国家。³¹²

除了与英国的这项引人注目的核电厂销售协议外，中国还与阿尔及利亚、阿根廷、伊朗、约旦、肯尼亚、罗马尼亚、沙特阿拉伯、南非和土耳其等国缔结了核合作协议。由于必须满足技术许可要求，中国向拥有先进核电计划的国家出口核产品可能会受到阻碍，但中国供应商具有低利率贷款的优势。总之，中国不断增长的核技术储备使中国供应商可以建立起稳固的供应链，并开发出可以迅速应用于新项目的专业技术。与中国相反，过去二十年，美国和欧洲核电公司的专业技能已经丧失；由于工期长期延误和成本的大幅超支，他们在中国以外国家的核电厂建设项目已经被迫停止。中国正在建设的核电厂的隔夜价约为3500美元/千瓦时，而欧洲约为5500美元/千瓦时。分析人士预计，今后几十年，相对于西方竞争对手，中国工业仍将保持这一竞争优势。³¹³与此同时，由于在中国以外的国家缺乏业务、能力丧失以及金融和电力行业解除管制后核项目风险增加，西屋公司和阿海珐集团这两家西方核工业巨头也因财务危机陷入困境。

中国企业已投资数十亿美元发展建造核电厂的能力。今后几年，这些企业可能会受到“新常态”的考验。本世纪20年代和30年代，如果中国新建核电厂的增长速度低于十年前的预期，那么中国的核出口将会按照习近平制定的规划，出售更多高价值资本产品，包括参与“一带一路”倡议，以电力系统、交通线路和港口基础设施等战略性出口为支撑，将中国的政治影响力传播到东南欧、东南亚和中亚以及更广阔的中东地区。³¹⁴

相比最终投资造价昂贵的国内先进反应堆和闭式燃料循环基础设施，出口压水堆也会减轻中国核企业的负担。通过核出口，中国也可能会尝试建设一个地区性核燃料循环体系，以中国为支点，通过在海外建造核电厂并向其出租铀燃料，回收乏燃料，并对乏燃料进行后处理，获得国内反应堆生产所需的燃料。如果这个体系能够发挥作用，不受到严格的法律和物流瓶颈，或者没有遇到技术难题和政治反对，作为核燃料供应的担保人和保管人，特别是如果中国同意保留后处理产生的乏燃料废物，中国在该体系成员国之间的影响力将会提高。早在2006年，中国官员就考虑过在准备引入核电技术的周边国家中，建立这种体系的方案。到目前为止，中国的周边国家还没有建造核电厂的坚定计划，他们也越来越担心，在中国旁边他们的行动自由是否有保障。因此，本世纪的前十年，该方案的希望已经变得渺茫。就算今后几年中国有理由这样做，前面的道路也很艰难：20世纪80和90年代，中国大陆和台湾之间以及中国与德国工业之间，关于在中国领土贮存或处理外国核废物或乏燃料的问题进行过讨论。事实证明这个问题很棘手，部分是因为中国认为自身具有更大的优势。³¹⁵

从历史上看，很少有已部署核电技术的国家，成功地出口了核电厂。中国必须克服巨大的挑战是巨大的，包括监督、质量控制、错误纠正、安全文化领导、符合国际标准以及假冒设备问题。如果外国核项目的时间进度难以保证，那么中国承包商可能会因为压力过大而走捷径。

公众接受度和政策风险

中国的核能计划是由中央政府和执政的共产党牢牢管控的，负责资金、组织、监督、管理、高层领导任命、技术开发和选择、投资以及与国外的所有联系。与其他先进的核电计划相比，中国领导人在更大程度上强有力地影响着中国核政策的制定和实施。核决策是一个复杂的、相互作用过程，无论是正式的还是非正式的，涉及政府内既得利益部门、行政管理和规划部门、国有企业、党组织及其领导人、官方学术和科学组织以及军队。在中国几乎所有涉及核电的历史中，坦率地说，人民从来没有发表过什么意见，也没有人问过他们有什么意见。

20世纪80年代和90年代中国启动核电建设时，民众曾签名请愿，反对核电建设。中国政府对此置之不理，并逮捕了抗议者。³¹⁶自那以后，中国没有披露过任何重大的核安全事件或事故，在多年的核电建设过程中，中国也没有发生过公开的核动荡。随着中国空气质量恶化，政府认为，扩大核电生产能够减少污染。特别是在生活富裕、信息密集的东部沿海城市地区，附近的核电厂正在取代燃煤发电机组，中国城市居民似乎普遍认同这一观点，但也倾向于限制当地核电能力的扩大。³¹⁷

福岛核事故和全球化在中国的持续影响，渐渐改变了中国民众对核电相对平和的态度。福岛事故发生后，中国民众似乎对核电发展有了不同的看法，也更愿意介入核电设施的选址。福岛事故发生后不久，中国城市出现了因为辐射恐慌导致抢购碘盐的热潮，中国当局不得不立即平息这种恐慌。³¹⁸2013年，江门市政府宣布将在江门建造核燃料处理综合设施，随后该市爆发了抗议活动。该设施本来计划在2020年前完工，规模足以提供中国核电厂所需浓缩铀燃料的一半。为此，中国国有核电企业可能会选择在其他地方建造燃料加工工厂。2016年8月，江苏省连云港市宣布该市为阿海珉集团后处理厂的落脚地，遭到示威者的强烈反对。据中国媒体称，示威者与警察之间发生了暴力冲突。³¹⁹

据中国和西方政府官员称，这两起抗议活动都是在省级和地方城市的领导与中国政府和核工业关起门来，就项目审批条款进行谈判之后发生的。抗议者称，当局没有事先通知公众这些项目，他们很少或根本没有机会发表评论或参与决策。在这两起事件中，一些抗议者都提到要求了解福岛核事故后的辐射和环境危险，并对其表示担忧。

虽然中国公众对核电风险的看法总体来说可能不会改变，但公众的接受程度至少在两个方面对中国核电计划的未来至关重要。首先，中国核电能否持续扩大，直接取决于能否在众多提议的内陆地区建设核电厂。从2006年开始政府计划加快核电发展，曾要求在这些地区建设核电设施，但由于安全和环境方面的反对，计划一直被推迟，而且至少要到2020年。同时，中国允许在指定的内陆地区进行一些“授权准备”的工作，希望以就业和投资这些利益来说服当地群众支持“十四五”规划中的建设项目的政治审批。其次，如果中国公众了解投资核电厂与投资核材料处理厂会产生不同影响，一方面可为当地群众带来有价值的电力和福利，另一方面关系到放射性废物且存在风险，这可能会威胁到中国实现闭式核燃料循环的雄心。中国领导人普遍意识到这一潜在挑战：日本核事故发生一年后，国家发改委在规划过程中引入了风险评估机制，用来评估未来大型基础设施项目的相关社会和政治风险。³²⁰

与西方国家不同的是，中国反对核电建设的地区可能集中在农村，而不是相对富裕、信息和基础设施密集的城市。对辐射的恐惧在中国农村地区可能很普遍，当地居民怀疑国家会动用土地征用权来损害他们的利益。相反，中国城市居民则希望通过核电来净化空气。如果国家电网将来利用超高压线路将偏远地区产生的核电输送到大城市，偏远地区的居民可能会反对，认为他们承担了所有核电设施的风险，而富裕的城市居民却坐享其成。日本的核电厂建设也因为这些原因遭到过反对。³²¹中国曾就是否应该在内陆地区修建核电厂展开过讨论。沿海地区的居民抱怨说，没有办法在现有场址增加反应堆，“因为我们已经生产了太多的核电”。³²²

2017年8月中国工程院发布的一份政府调查报告称，“只有40%的中国公众支持核电的发展”。³²³如果真是这样，中国需要改变公众对核能发展的怀疑或反对态度，中国政府就必须采取敏感和积极政治措施。2014年和2015年，笔者参加了有关中国核电公众接受度的讨论，外国行业高管和监管机构曾微妙地提出，他们担忧内陆核电场址的风险状况与沿海场址不同，一些中国专家对此进行了驳斥。他们还指责香港的反华政治，导致2013年中国东南部地区发生了反对核电厂建设的抗议。³²⁴2015年卡内基研讨会期间，中国专家解释说，中国政府意识到，中国半干旱的内陆压水堆场址基础设施薄弱，安全论证可能要面临技术挑战。他们又说，中国的行业和监管机构将应对更大的难题，他们必须向公众解释剩余风险概念，因为公众对核问题知之甚少，而且公众只“期望得到肯定或否定的答案”。³²⁵

战略要点

在中国核计划发展的进程中，除了技术选择和经济问题外，中国还必须考虑许多问题。

- **能源安全：**中国预计，中国的核电生产将持续数百年。为此，长期以来中国一直认为，必须实现闭式核燃料循环，确保燃料不会耗尽。由于铀耗尽的时间越来越近，中国必须评估全球铀市场的可靠性和可持续性。
- **核武器、核不扩散与核安保：**二十年来，中国一直在世界核不扩散与核安保体系之内。部署更多先进技术，将使中国在这一领域的责任更大，地位更高。中国被外界视为极简主义者和功利主义者。中国要承担全球领导者的角色，就必须做出更多的承诺。中国是有核武器国家，未来对闭式燃料循环相关技术的投资，也可能被认为有利于中国的核防御。
- **科学与技术政策：**特别需要指出的是，鉴于中国的工业保护主义、公司化和风险最小化的发展趋势，中国是否会成为先进核技术转型的世界领导者，仍有待观察。
- **核安全：**中国面临诸多挑战，包括历史上薄弱的工业安全文化，以及核电增长使监管能力负担加重。如果不采取有效措施推广核安全文化，中国的核反应堆越多，风险更大。
- **核出口：**经过几十年积极的知识产权和进口替代政策，中国有望成为全球核设备和核服务的主要供应商。虽然不能保证中国能够担当全球核规则制定的领导者，但这将有助于中国实现这一目标。
- **公众接受度和政治风险：**福岛核事故可能对中国产生深远影响，包括：赋予监管机构权力；强化风险规避；在信息透明、公平和中央与地方决策权等方面，官民政治关系紧张加剧。

结论和展望

预测中国的未来是徒劳的。一些当代作者声称，中国很快就会垮掉，相反，另一些人则认为，中国将主宰世界。³²⁶研究中国核电系统的分析人士对这两种假设都不感兴趣，但根据本报告提供的信息，可以推测出两种截然不同的中国核电计划前景。

如果中国的核电计划沿着中国战略专家和科学家三十年前指明的道路发展，或许到2050年中国将运行数百座核反应堆，实现从压水堆向更先进核电系统的转变，并可能演示验证一座工业规模的闭式燃料循环系统。政府可能与利益方达成不透明的妥协，先进技术昂贵的成本由中国的各级纳税人承担。由于中国在全球规则制定中的主导地位，中国可能成为世界上最大的核出口国之一，而且可能已经在监督设施方面投入了大量的资金，管理核活动，保证不会发生严重的核安全、核安保或核扩散事故。到2030年，积极发展核电和可再生能源之后，中国大城市的空气质量可能已经好转，而且中国可能会继续投资核电技术，并信心满满地认为在今后的数百年内都可以依赖核能发电。

截然相反的观点是，到2050年，以及缺乏有效的成本管理，以及未能克服更有前途、更复杂的核技术的商业开发中出现的经济、技术和政治挑战，中国可能打算逐步淘汰约100座老化的压水堆。由于替代发电技术和存储技术的突破，中国的核电厂可能面临淘汰的威胁。随着时间的推移，在本世纪第一个和第二个十年间引领中国大规模核电厂投资浪潮的企业，可能不会继续承担核电持续投资所需的债务，尤其是如果中国对电力的需求像许多西方国家一样接近零增长水平的话。核电领域的人力资源可能会越来越多地转移到其他领域，从而导致核电厂利用率低、核安全问题出现、公众信任缺失、监管力度加大、企业和政府怕担风险等。

谁都不敢断言这两种情景的可能性，也许可能出现的是可能性不高的情况，因为存在着巨大的未知因素。按照第一种设想，中国若要取得成功，就必须克服巨大的技术障碍，取得不可预测的重大科学和工程突破。未来三十年，中国必须有效地控制进出核组织的资金，并确保成本是可以管理、可以预测和相对有利的。中国必须在公众建立足够的信任和信心，使领导层的决策与预期的战略目标相符。如果中国未能如此，本世纪下半叶的核能计划可能无法持续。第二种设想在以下条件下很可能不会成为现实：如果国家调整经济政策，保护核资产；如果技术创新未使中国基本负荷电力需求大大减少；（也许是决定性的一个假设）如果中国的电力政策受到了以下残酷现实的

影响——发电量占中国电力总量一半的燃煤电厂每千瓦时生命周期碳排放量达到核电厂的70倍。

文化大革命后，中国的新一代领导人制定了短期和长期的目标。在短期内，他们希望实现国家现代化，摆脱贫困；从长远来看，他们寻求强国战略。中国将核能作为短期发展计划的一部分，将核投资从军事转向民用经济，并将核电作为东部沿海人口密集地区污染性燃煤发电的补充。对于长期发展规划，中国的研发机构宣布核电发展是国家的战略重点，尽管当时很少有人能够完全理解其中的含义。

二十年之后，也就是2050年左右，由于中国经济和电力需求不断无限增长，中国政府过于夸大了核电发展的必要性。技术官员接受了外国合作伙伴的逻辑，认为全球核电复兴即将到来。他们预计，以资本货物投资为推动的中国经济发展模式将继续以每年10%左右的速度增长；而且从20世纪80年代和90年的发展结果来看，中国未来电力需求预计还将迅速增长。似乎有理由相信，未来半个世纪核电还将继续发展。中国向核电转型，增强了消除大气污染、发展知识产权、实现核电出口以及扩大电力供应的战略雄心和任务。

在这些预期的指引下，中国投入了大量的人力和物资，复制外国已经发展完善的压水堆系统。在这些投资的资助下，中国很可能在2030年前成为世界上最大的核电生产国之一。根据中国过去三十年核电发展的巨大成就可以推测，到本世纪30年代，核电在中国电力供应中的比重将从目前的4.5%上升到10%；核电将有助于将大气颗粒物排放降低到西方国家的水平，证明中国在减缓气候变化方面走在世界前列；中国可能成为全球民用核产品重要供应商，也许还是最重要的供应商，包括建造成本相对较低的现代动力反应堆。占中国绝大部分电力来源的燃煤电力行业的脱碳，以及14亿人口呼吸的清洁空气，仅这两项非常艰巨的任务，就可能确保中国未来几十年将产生越来越多的核电。中国建设和积累了越来越多的基础设施、经验和人力资本，有理由相信核电计划有可能继续扩大，直至本世纪下半叶，甚至更长时间。

国内的制约因素和风险

中国能否成功实现核电发展目标，在很大程度上取决于如何认知和管控风险，以及如何应对制约因素。不久前，中国才在核决策中认真考虑了制约核电发展的一些因素。

中国正在投资发展几项先进的核电技术和燃料循环技术，并可能计划将其中一项或几项技术朝着商业化部署的方向发展。但是，中国许多未来的技术方案仍可能规模较

小，不会有战略突破，除非国家和企业愿意冒着风险，不断地给予巨大的投资。截至2017年底，中国仍然没有像西欧、日本和俄罗斯之前的承诺那样，对先进反应堆或后处理厂进行相应的投资。中国政府在2016年和2017年做出的决定表明，中国很可能对这些项目提供补贴，但是如果继续推行并扩大这些项目，可能会与其他体制利益和政府政策目标产生冲突，包括中国电力部门。

与过去不同，未来几十年，支持核电的决策可能会遇到不同的、更大的阻碍。可能制约中国核电持续发展的因素包括：

- **增长趋势：**多年来，中国的GDP一直以每年10%或接近10%的速率增长，未来可能会稳定在较低水平。经济增速时期，电力需求平均每年以约9%的速度增长，今后可能会逐渐下降到经合组织国家的中等或较低水平。³²⁷今后几年，中国经济发展的驱动因素可能会从电力密集型的资本货物生产转向服务和消费支出。以资本货物为基础的经济模式使中国经济迎头赶上，但一些经济学家警告称，这种模式将造成债务积累超过了财富积累。如果出现这种转型，并伴随着中国电力系统负荷状况的改变，对核电能力扩大的影响可能将是深远的。“十二五”规划以来，习近平赞同中国增长模式需要调整的观点，特别是在2013年世界银行和国务院联合报告提倡中国“绿色发展”和中国与国际经济体系更深层次的整合之后，习近平更加强了这一观点。³²⁸
- **人口因素：**中国核电的未来增长将取决于没有社会保障的中国老龄化人口是否会投资和消费，工资和生产要素成本的上升是否会降低中国的竞争力。城市化的不断发展可能会增加电力需求。中国的核基础设施是由人数相对较少的工程师和技术官员建立起来的，四十年来，他们几乎没有承担公众责任。然而在此期间，中国的财富增长了30倍，富裕起来的人民可能要求中国领导人提高政绩的合法性。
- **国有企业：**中国有100多家国有企业，都集中在核电等战略性行业。自20世纪90年代以来，这些企业使中国的债务增加到GDP的3倍。所有国有核企业的资产负债率都达到或超过股东——国资委设定的上限。与此同时，中国政府想通过力度更大的企业整合来鼓励盈利。³²⁹而在中国经济的其他领域，这种做法已经导致企业出现监管不力、内部冲突、沟通不畅和运营效率低下等不良状况。³³⁰《中国制造2025》提出了十大战略产业，中国决定将核电设备产业列入其中，这可能会限制创新，鼓励保护主义，并导致与保护本国战略核工业的外国政府发生贸易冲突。³³¹一些经济学家认为，中国应该停止给国有企业划拨资金，除此之外，还要削减低息贷款，因为国有企业将这些贷款投资于产能过剩的项目，其中包括发电项目。³³²

- **体制政策冲突：**中国核电决策大体上是自上而下的，但政府机构和企业之间存在着大量的内部摩擦，随着更多利益方之间为争夺微薄的收入和资源而竞争加剧，这种摩擦可能会更多。³³³核企业的公司化可能会导致企业与政府在未来技术开发和选择、乏燃料管理、投资政策和风险承担方面发生冲突。中国政府内部关于电力政策的基本方向问题也存在许多矛盾。自1998—2003年朱镕基担任总理以来，中国领导人既支持电力行业按市场规律管理，也赞同极权式的规则制度。尽管核电行业想要政府保持目前的补贴并继续给予支持（对于先进的核技术，希望得到更大力度的支持），但决策者从习近平那里得到启示，似乎要致力于在中国创建这样一个电力市场——电价由消费者决定，最终由投资决定。
- **规避风险：**中国核能行业协会曾向政府汇报说，只要中国政府批准在内陆建设核设施，就能在2030年前建成六座核反应堆，并实现150 Gwe的核电装机容量。对于政府在中国内陆建设核反应堆的决定，外界已期待很久，但是自福岛核事故发生以来，这个决定目前已成为一条政治红线。更多的中国公众第一次参与了关于核电的讨论，而且讨论方式也与西方国家的观察人士在美国和苏联发生严重事故后经常看到的现象相同。一些中国官员和专家曾经敦促政府放缓核电发展速度，并吸取因监管不当导致严重的工业事故的教训。³³⁴但是，在内陆地区建设核电设施所涉及的安全问题，不仅仅是压水堆的水管理问题，还包括内陆地区的基础设施、物流和安全文化是否足以支持核电建设。³³⁵核工业向中央政府施压要求批准内陆核电厂建设，但中央的其他官员却表达了不同意见，他们认为习近平正在努力加强和扩大中央的政治控制，这最终将使中国更加具有风险规避意识。

风险管理是未来核电计划决策的核心。十年前，中国计划内陆地区建造反应堆的数量将占中国所有反应堆的四分之三。中国的核计划如果真的像当初设计的那样继续扩大，政府必须确定在这些地区扩建核项目可能遇到什么样的风险。暂且不考虑习近平加强中央控制可能造成的影响，如果政府和国有企业不愿承担新建项目可能产生风险，中国则不会着手向先进核技术和闭式燃料循环转型。

自习近平执政以来，一直努力将国家和共产党的影响扩大到社会和经济领域，他似乎准备让政府担负更大的责任，从而承担更大的风险。一些政府官员对政府承担更多责任表示担忧，部分原因是如果出现非常严重的核问题，中国的政治稳定最终可能会受到威胁。据密切观察中国核发展的人士称，风险规避目前是中国核领域的官员的常态，而不是例外情况。对此现象，他们给出了几个可能的解释：中国政府官员出现了

一种从众的工作作风，而且越来越复杂；毛泽东时代可怕的社会实验的后遗症；官员担心，在习近平的领导下，如果出现风险，他们的上级可能会以腐败的罪名来惩罚他们的所作所为；担心有争议的项目可能会阻止中国房地产价格的稳步上涨。

决策者知道，如果中国发生严重核事故，中国公众将要向共产党问责。出于这种考虑，领导层可能会暂不考虑部署那些可能存在更大技术、经济和政治风险的技术。

这些因素对今后几年中国的核发展意味着什么？

中国的核电厂建设部门是根据过去对核电扩容的较高预期组建的，因此，中国核工业基础设施已做好充分准备，到本世纪中叶实现中国核电装机容量超过150 Gwe的目标，甚至可能更多。但目前，由于上述事态发展以及福岛核事故的连锁反应，这个预期值已普遍下调，大多数人认为，2050年中国核电能力预期仅是十年前乐观人士预测的一半。除非中国领导层严格执行削弱中国煤炭行业主导地位的政策，并在可再生能源和核能之间找到有效的平衡，否则未来核电能力的增长可能会放缓。

国内生产总值下降，电力需求增长放缓，电力企业以折扣价向大宗客户直接销售电力，以及发电量投资过剩，这些因素目前正困扰着中国电力行业的发展前景。³³⁶本世纪前十年，政府曾下令削减可再生能源发电，致使这些企业减产，现在核电企业也面临同样的威胁，一些核电厂被迫以投资项目实现盈亏平衡所必须达到60%左右的产能运行。³³⁷今后，电力行业还将为上网电价和输电配电的规定和政府讨价还价。到目前为止，政府采取的支持核电的政策，已为投资者带来了每年平均7%的利润。习近平虽然加强了核电企业，但这可能会削弱所需的改革力度。³³⁸

核电公司还将向政府寻求保护，使其免受燃煤电厂的威胁。新建的高效燃煤电厂每年获得高达15%的利润。³³⁹而且，地方政府也威胁要输送廉价的燃煤电力，以迫使核电公司以低于上网电价的价格出售电力。虽然中央决策者已下令输电部门优先上网核电，但国务院的政治领导层似乎更倾向于可再生能源发电。³⁴⁰

出于对上网电价可能下降的担忧，核电投资者将警告中央，如果政府不继续或进一步减轻核电公司的压力，他们的核电厂可能会变成搁浅资产。中国核工业及其担心高成本、空气污染和气候变化的支持者，与市场理论家、受中央保护的、有影响力的可再生能源行业，以及根深蒂固的强大的化石燃料行业之间的这种斗争，对西方的观察家来说已司空见惯。而在中国国内，一些核电企业高管和官员也在盘算，如果政府要进

一步推进电力改革，政府就必须采取措施，保证基本负荷电力由核电提供，为核电站的建设和运行提供直接的财政补贴，并征收碳排放税，这样才能拯救中国的核电行业。

如果中国经济和电力行业普遍出现“新常态”，可能会影响对更先进核技术的投资，中国核电投资者和核电企业就会倾向于采取保守措施，只维持压水堆的基础设施。如果是这样的话，到本世纪中叶，中国的核电系统可能会像目前北美和西欧核电计划一样出现的问题也一样，只是规模更大。随着中国核电企业的公司化发展，企业高管可能会不愿意冒险实施没有经过商业化验证、技术上有较大风险的项目。

中国未来核电发展的预测最大的未知数是，中国未来几十年将需要多少电力，以及政策制定者和电力行业是否会允许核能占电力需求的比重越来越大。尽管中国的“新常态”是政策制定者和分析人士的近期关注目标，但中国核电行业一位高管在2017年11月自信地预测，如果中国的电力需求以每年5%的速度无限增长，中国对电力的需求“在二十年内会翻倍”。

战略雄心

三十年来，中国政府的核决策者一直将核能视为一项战略技术。如果中国核企业高管和核技术官员出现保守主义和风险规避倾向并占主导，那么就会与核决策者产生矛盾。

目前中美两国对核能未来的普遍看法有很大的不同。许多美国人认为，核电是一种过渡技术，在本世纪内有可能转向其他技术，甚至可能是尚未发明的技术。相反，中国专家却认定，核电将从传统反应堆发展到增殖反应堆，最后到核聚变反应堆，并将持续数百年。他们保守地认为，核能一种可用且可靠的能源，原则上可以取代目前占中国发电量四分之三左右的煤炭在中国的重要地位，而且也可能有助于扩大中国在世界范围内的影响力。

本世纪前十年的末尾将是中国核电发展的十字路口，因为中国正在努力并很可能成为世界上核电发电量最大的国家，并且成为全球核技术领域的先锋。中国必须决定未来计划生产多少核电，选择何种技术，如何评估和管理核电持续发展的相关风险，以及如何管理经济以适应核电投资。

先进的核电国家一直希望发展超越轻水堆的技术，并部署快堆。从20世纪80年代到现

在，尽管非常谨慎，中国却一直紧跟它们的脚步。中国认为，随着人口的增长以及经济发展和城市化，中国将需要多的电力。而且，现有常规核燃料供应肯定会耗尽，面对这种局面，快堆可以将铀转化为钚，提供越来越多的核燃料。

理论上讲，这种反应堆可能会产生过量的钚燃料，能够轻松地满足中国到本世纪末的大部分电力需求。在一些中国研发专家看来，如今压水堆已是强弩之末。随着安全冗余系统的增加，压水堆系统的成本可能会越来越高，进而影响创新投入，导致压水堆技术陈旧。到2200年，中国可能会利用增殖反应堆替代压水堆，满足对核能的全部需求，通过稍微改进钚生产，满足未来很长一段时间内的能源需求。³⁴¹

但是，实际上，中国要实现这一目标，必须克服巨大的障碍。2013年，法国权威核能专家Bernard Bigot在国际原子能机构在巴黎举行的一个快堆大会上表示，与中国复制和应用了二十五年之久的压水堆不同，先进核系统的技术“在得到演示验证之前是不能引进的”。³⁴²半个多世纪以来，许多国家都试图以较低的成本和持续的高容量运行工业规模的快堆，但都没有成功。法国能源部长同样在会上警告，如果这些国家继续尝试，他们仍会失败，除非他们能降低事故风险，获得更多的公众认可，并改进技术和设计。

中国现在准备着手建造一座工业规模的快堆，同时建设一座后处理厂，生产足够的钚燃料，使反应堆或许在本世纪30年代的某个时候实现平衡状态运行。中国的核技术规划人员要求这两座设施在本世纪20年代中期之前完工。

鉴于中国有限的经验和其他国家以往的经历，这一时间表是雄心勃勃的。法国先后建造了两座增殖反应堆，运行了二十多年，才投入运行一座更大机组，进行发电的演示验证。在日本启用工业规模的快堆之前，曾建造了一座试验反应堆，运行了十七年，最终运行功率达到中国实验快堆的两倍。在此期间法国和日本分别建立了工业化的后处理能力。俄罗斯的快堆项目可以说是世界上最成功的，也花了三十年时间，运行了一座工业规模的600 MWe快堆；在此之前，苏联工程师先后建造和运行了6座临界设施和反应堆，其中包括一座300 MWe原型堆。

中国虽然顺利部署了一系列现代化的压水堆技术，但最近在建设更先进的压水堆时，却一再推迟工期。决策者可能会决定用更多的时间，完成复杂且独特的燃料循环项目。按照大家的说法，中国研发官员近年来提出的关于快堆开发的一些预测和设想是无法实现的。

然而，我们不应该因为其它国家的快堆项目没能实现工业规模，就认为中国也会失败。中国可能最终会掌握这些必要的技术，在2030年前的某个时候开始运行工业化规模的快堆，建造和运行一座后处理厂，生产运行快堆所需的钚，并学习如何制造燃料。如果中国取得成功，那么将赶上并很可能超过其他国家在20世纪后半叶在闭式核燃料循环方面取得的有限进展。此外，如果中国能够研制出金属钚燃料并在工业规模高温处理快堆乏燃料方面取得突破，除此之外演示验证快堆可以经济有效地运行并产生大量电力，在运行过程中可以生产并安全有效地使用大量的钚作为快堆燃料，那么中国的进步会超过所有国家。但是，技术和经济方面的挑战是严峻的，包括工业规模的系统的发展，而且所花的时间可能要比一些中国规划者宣称的要长得多。

中国能够实现闭式燃料循环吗？

2013年，在习近平执政两年后，中国原子能科学研究院张东辉副总工程师告诉国际原子能机构的专家，中国的快堆部署将取决于具体情况。一个是成本应该低于燃煤电厂，即使假设政府目前对核电投资和核电厂提供援助，这个要求也难达到。与日本和韩国的同行一样，中国核电行业的高管也含蓄地表示，如果中国建造后处理厂和增殖反应堆，政府必须支付更多的建设和发电费用。这可能意味着，中国政府不应降低核电的承购电价，而应提高电价支持力度。这或许违反了在习近平领导下的中央计划官员和研究人员的主张，他们力图消除扭曲市场的例外情况。³⁴³

早在新常态出现之前，中国决策者在推进核燃料循环计划，就表现得非常谨慎。过去三十年间，中国通过部署常规核技术，逐步稳妥地承担了燃料循环风险，但直到本世纪10年代末，中国还没有做好相应的准备去承担比以往要大得多的风险。

决策者明白，如果以下一种或几种情况发生，中国的核电系统就无法成功实现以钚为燃料的快堆转型：

- 快堆反复出现技术问题，导致反应堆利用率降低、成本上升或出现政治或者公众接受度问题。
- 工业规模的快堆乏燃料后处理和高温处理以及快堆燃料制造，在技术上和物流上遇到难题，耗时长，费用极其高昂。
- 其他领域出现了比先进核电系统更具优势的技术突破，受到决策者的青睐。

尤其是，如果提倡快堆技术的官员和专家强制要求加快未来自主研发和应用的步伐，中国的快堆项目可能会像上世纪80和90年代外国快堆项目一样，遇到同样的障碍。到目前为止，据报道中国实验快堆还没有出现任何严重的钠泄漏或火灾，这可能是由于采用了改进措施，包括俄罗斯对BN-600反应堆的改进措施。然而，对于用于发电的大型

反应堆，面临的挑战要比实验快堆大得多。事实上，俄罗斯官员对这份报告提出了质疑，他们警告中国同行，不要低估快堆的钚管理问题。几十年来，俄罗斯的增殖堆项目使用的是铀而不是钚，因为以前由于钚燃料短缺和燃料制造问题，他们付出了惨痛的代价。一位专家表示，如果中国需要数吨钚来实现一座大型快堆的平衡运行，“中国还需要很长一段时间，才能拥有足够的分离钚和燃料制造能力”。

工业化应用的后处理和快堆技术是在半个世纪前开发的，对这些技术在工程上的难题已有深入了解。最缺乏经验的方面是快堆乏燃料的后处理（一般来说，是能耗高、钚含量高的乏燃料）以及未来高温处理技术的发展，中国和其他一些国家希望在未来的快堆燃料循环中使用这些技术。同时，中国政府可能也必须决定是否在快堆中使用MOX燃料，以及使用多长时间，特别是考虑到中国相对缺乏经验，以及中国长期以来一直在发展金属燃料和高温处理技术。

毫无疑问，中国政府肯定意识到，如果中国没有开发出新技术，而用过去的技术解决上述工程问题（包括发电），弊端是显而易见的。除了快堆，中国目前还投资于其他核技术和能源技术。那些可能引起电力变革的核技术和非核技术创新，包括电池电力存储技术，需要很长的投产准备阶段，可能要到本世纪30年代或以后才能被应用。但是，如果其中任何一项技术取得重大突破，投资者可能会转移兴趣点，尤其是如果快堆和后处理技术研发推迟的话。如果中国的电力系统越来越重视分布式发电，那么电力规划者可能会把核电重点从大型反应堆转向小型模块化反应堆。

中国计划在本世纪部署快堆和后处理厂，主要有两个重要理由：首先是能源安全，他们预估未来几十年铀资源将枯竭；其次，这些技术对废物管理来说明显利大于弊。随着距离2020年越来越近，对于上述两个理由的正当性，中国都还不能持绝对肯定态度。

张东辉告诉巴黎的国际原子能机构研究小组，若要部署快堆，铀必须“足够昂贵”。³⁴⁴参与卡内基研讨会的其他中国专家也认同这一观点。³⁴⁵尽管中国预计未来几个世纪都将需要核电，大多数分析师也认为，至少在几十年里，市场基本因素应该不会导致铀价大幅上涨；而且即使铀价上涨，也可能使得供应量增加；如果是这样，燃料安全问题本身不会使中国匆忙部署快堆和后处理厂。

中国政府支持后处理和快堆，还有一个原因是他们认为，减少乏燃料的放射性毒性是非常有益的，因为未经后处理的乏燃料必须经过十多万年，放射性毒性才能达到天然

铀的水平。从长远来看，更大的好处是，经过500年，未经后处理的乏燃料中的大多数放射性元素都已衰变，剩余的放射性毒性主要取决于钚和镅的同位素。如果埋在地下，它们的溶解度和迁移性应该很低。1000年后，放射性毒性仅为乏燃料初始排放水平的1.5%，乏燃料释放的热量只相当于成人释放的热量。³⁴⁶

2010年和2016年，国际原子能机构对中国核监管安全监督体系进行了两次同行评审，评审人员敦促中国更加重视核废物、乏燃料和燃料循环管理。国际原子能机构的这一评定与中国科学院2015年的一项审查结果一致，他们认为，中国在燃料循环方面远远落后于其他国家，核安全监管技术零散分布在中国各个核机构。

自20世纪80年代以来，中国政府一直采取支持闭式核燃料循环的政策，对所有正在从事未来可能部署的核能系统研究的核研发机构和行业企业，中国政府已阐明了这一点。一名研发官员2017年曾说道：“他们告诉我们，如果我们的反应堆概念不包括乏燃料后处理技术，就不可能被采纳。”因此，习近平希望尽快通过《中国国家原子能法》草案，这也不足为怪，该法案明确规定中国的乏燃料后处理是一项国策。在讨论这项法律草案时，有人建议，后处理实行的前提，应以实际需要以及现有技术的成熟程度和经济性。如果这一提议被接受，那么《原子能法》可能不会马上下令核电公司对乏燃料应进行后处理，而是允许他们“等等看”，直到各个相关方面一致认为，关于后处理管理的法律条款已经完善。

市场影响及其他不确定因素

一些先进核能国家曾试图单枪匹马地建造商业化的钚燃料快堆，但均未成功。之后，他们成立两个多边合作组织——第四代核能系统国际论坛和创新型核反应堆和燃料循环国际项目，合作发展先进核能系统。在卡内基研讨会期间，日本和欧洲等老牌增殖堆项目国家都不鼓励中国单独进行闭式燃料循环研究。其中一位专家表示，1997年法国停止了工业规模的增殖反应堆项目，“随后日本又独自开始了这个项目，由于缺乏合作，都未能成功”。³⁴⁷

因此，中国决策者会仔细留意法国和俄罗斯在未来几年的发展，这两个国家当时在工业化先进燃料循环研究处于领先地位。法国工业界打算对阿海珐集团位于海牙的后处理设施进行翻新，但由于耗资巨大，还没有最终敲定，这或许是一个信号。同样，如果俄罗斯的快堆项目能够成功实现里程碑式的进展，也就是2019年BN-800的MOX利用率达100%，克拉斯诺亚尔斯克的新后处理厂正式投入运行以及2029年进行工业化的闭式燃料循环演示验证，中国可能会受到鼓舞，继续按既定规划发展。

对每一个拥有了核电计划的国家来说，国家的作用至关重要。三十年来，中国也不例外。2005年温家宝总理决定加快核电投资后不久，政府为应对国际金融危机，向中国核电行业提供了价值5亿美元的一揽子援助。现在，领导层“自称”将强化市场导向的作用。2013年，在中国共产党第十八届三中全会上，习近平提出了“改革60条”，呼吁“使市场在资源配置中起决定性作用”，企业将为获得资本而竞争，而“政府将重新肩负起宏观经济管理者和市场监管者的职责”。³⁴⁸这可能意味着中国将继续进行改革，这从而可能动摇核电发展计划。

但这种情况可能不会发生。“改革60条”计划也指出，政策执行者必须“坚持公有制主体地位，发挥国有经济主导作用，不断增强国有经济活力、控制力、影响力”。因此，预计中国不会严格按照市场模式的蓝图来调整经济决策。中国可能会选择采取适当的措施，一方面在电力供应系统建立市场机制，另一方面，在未来政策中对核电特殊照顾来保护核资产，解决两者之间矛盾。一些中国核工业官员在敦促中国政府继续向核电企业提供国家援助时认为，中国的核电上网电价补贴应该被当作一种征收碳税的方式。到目前为止，经济因素没有从根本上影响中国核燃料循环的战略规划，而且也许像其他国家的政府当初所做的那样，中国政府愿意支付最初演示验证项目的费用，或许还愿意支付未来大规模核燃料循环产业中心的费用。

尤其是，如果中国核研发的倡导者执意要求推进他们的计划，市场压力可能反而会促使中国决定加快后处理厂和快堆部署，即使铀的价格低廉，快堆项目耗资巨大，因为中国将来的政治决策环境会越来越倾向于反对这些投资。2016年，中国研发项目的一位资深专家表示：“我们现在必须实现闭式燃料循环，因为随着时间的推移，会越来越困难，再过几年，就没有希望了。”³⁴⁹可以预计，全球化和公司化的发展可能会阻止中国实现闭式燃料循环。2014年，一位一直与中国同行讨论双边合作问题的美国高级政府官员也对这一看法表示认同，他说：“随着我们举行的会议越来越多，我们越感到他们的核计划在几年后可能跟我们的一样”，更坚定地专注于压水堆，而企业董事会和政府机构内部几乎没兴趣承担更多的技术或项目风险。

参加卡内基研讨会的俄罗斯、西欧、日本和美国的行业专家一致认为，工业化的闭式核燃料循环设施的建设成本高得可怕。其中一位专家认为，“根本不可能留给市场解决”。这些专家说，现在在西方国家和日本，让核电厂业主和运营商自己投资建造快堆和相关的燃料循环装置来发电，这简直不可想象。对于更加注重战略效益的中国，经济因素也许不可能影响决策，但投资搁浅一定会是决策者的考虑因素，而且他们可能会寻求一个解决方案，允许中国在短期内继续推进和保护核燃料循环技术，同时避免

草率使用可能过时的技术。“如果未来快堆技术的发展规划不明朗，使用PUREX流程的后处理厂的投资可能会是浪费，因为我们不知道未来还会出现什么其他技术。”³⁵⁰

对中国来说，保护未来核燃料循环投资的最终结果是，接受这样一种可能性：未来数百年中国将需要核能的基本假设也许是错误的。正如一位熟悉中国核燃料循环项目的法国政府核电官员在2017年9月所说：“未来十到二十年，电力存储技术会发生巨大变革。如果是这样的话，那么到2050年，我们所有的电力将来自可再生能源和电池。”在未来技术发展很不确定的情况下，如果这种观点盛行，那么中国从现在到本世纪20年代作出的关于封闭核燃料循环的决定可能不会只是“是”或“否”。尽管一些技术和工业能力的风险可能减少，但中国可能还会选择在2030年之后继续进行更深入和更广泛的研发项目，包括快堆开发和后处理技术。“若投资进行十五至二十年的核燃料循环研发，中国将掌握更多技术。”³⁵¹再过二十年左右，对于核聚变能源、先进裂变能源燃料技术以及关键的非核技术发展前景的判断，更广泛地说，对全球核电风险状况和经济环境的前景的评估，我们可能要比今天更有把握。

中国之外的战略意义

中国对未来核电计划的决定对境外也会产生影响，对其他国家的能源、外交、工业和技术政策，甚至可能影响他们的战略联盟。

核电未来及核燃料循环

今后至少十年，中国将成为世界核电投资的一大焦点。如果中国经济普遍出现新常态，如果新核电站部署并没有按着积极减少燃煤的政策目标发展，中国的核电投资可能会与北美、欧洲和亚太地区的其他国家一样，在十年或二十年之后达到饱和，但中国的投资数额将达到创纪录的水平。

从本世纪中叶开始，中国将面临选择新技术、淘汰老化的压水堆核电厂的问题，这取决于未来三十年能否成功引进替代发电技术，也取决于中国电力系统的架构，包括中国是否将无限期地需要大量的基本负荷电力。如果中国成功地示范验证了先进核技术，包括燃料循环，那么可能会极大地改变全球对核电未来的预期，其他国家可能会加快对核能的投资，包括小型研发或之前的研发。

如果中国没有成功，也就是说，项目没有取得进展，这可能说明中国政府、特别是企业没有实现他们的承诺，就像其他国家一样。中国的失败将使人们更加相信，以钚为

燃料的快堆过于昂贵。不管正在积极从事闭式核燃料循环研究的其他国家（例如法国、印度和俄罗斯）结果怎样，中国的失败将使其他国家工业化快堆项目的政治可持续性前景变得渺茫。

如果中国发生严重核事故，将使全球对核电信心产生巨大的政治影响和负面影响。假若中国领导层用非常长远的看法看待核事故，那么，一场严重的核事故可能会使他们认定：一个拥有100多座反应堆的核电计划太大了，因而不能失败。经过一段时间，中国继续部署核技术，很可能会不断评估风险。一位中国规划专家告诉笔者：“我们拥有的反应堆越多，我们的责任就越大。在某种程度上，这是一个简单的概率加法。”

核出口和战略影响

直到最近，人们才看到，现在的中国正在坚定地、雄心勃勃地转型为核电厂供应商国家。中国政府正在整合国有企业，打造全国领先的核出口产品。中国公司能够以优惠的资金、低廉的价格和丰富的供应链来吸引顾客，对法国、日本、韩国和美国的核工业提出了挑战。特别是，如果中国在先进的燃料循环技术方面取得进展，那么核工业不仅可以提供核燃料，而且还可以提供铀转化和浓缩、物流、工程、调试、运行、建设、乏燃料和废物管理等服务。至少在二十年的时间里，中国企业将享有比西方企业更低的生产要素成本，不仅如此，西方企业还面临专业技能流失、融资限制加大，以及对透明度要求更高的挑战。

然而，在本世纪20年代甚至更长远一些，中国供应商必须克服特定风险。如果它们的债务水平依然严峻，冒险行为将受到限制，得到政府的支持可能会遇到阻碍。一些中国规划人员和管理人员预计，中国将放缓国内新增核电速度，计划通过出口进行补偿。如果全球新核电厂的需求未能实现大幅增长，中国的核电厂建设企业将像它们的外国竞争对手一样，面临产能闲置和技术流失的危险。如果把外国公司赶出核电市场，随着竞争的减少，中国企业可能会出现透明度减弱、创新不足、管理不善的问题，中国因此也得不到好处。如果潜在客户认为除了中国供应商而别无选择，他们就会拒绝核电；而且受到威胁的外国公司及其政府可能也会向世界贸易组织或在其他场合提出不满。

如果中国，或许还有俄罗斯，在核材料、核技术和核设备供应方面达到世界领先水平，则可能会像美国成功实施“和平利用原子能”计划一样，将影响力扩大到客户国家的外交、能源和技术决策过程。随着中国核电计划的深入和经验不断积累，除了核

电厂之外，中国可能还会提供培训、研究反应堆、监管和非电力技术的援助。强有力的核电外交和商业活动，将有助于中国政府实现扩大中国在世界影响力的目标。出于这一点考虑，中国已将核技术纳入“一带一路”倡议，目标是扩大在南美、非洲和中东等这些中国政府认定具有战略意义的地区的核合作。目前，中国主要的国有核电企业已提前按照不同国家，将世界市场划分为几个部分，作为自己未来的势力范围。

全球核治理

中国核计划的规模越大，技术越先进，出口的产品越多，中国在多边核规则制定组织和协议中的话语权就越大，其中包括国际原子能机构、《不扩散核武器条约》、核安全、核安保和核援助方面的国际公约、第四代反应堆国际论坛和核供应国集团。如果中国能够成功地实现闭式核燃料循环，可能会在全球核材料和核废物治理方面谋求改变，这势必会影响核安保、核不扩散、透明度和核安全。中国也许会利用核外交力量，为核设备、核建设和核管理制定中国的标准和规范，并挑战美国和其他国家的工业界和政府制定的各种规范。在与核贸易附庸国签订双边协议时，与西方国家相比，中国可能更不愿意承担的义务超出多边协议规定的最低共同义务，而且中国可能会在核贸易体制中采取一种更为投机的核治理方式。

如果中国开始对动力反应堆乏燃料进行后处理的话，除了有限的几个已建立先进核计划并且具备快堆和钚燃料经验的国家外，其他国家似乎不会启动后处理项目。如果中国能够证明先进的核燃料循环技术可以实现工业规模的持续生产，技术有所提升，那么可能会有更多国家开始着手敏感的核活动。其他有核武器国家可能会首先开始行动，但一些国家可能会为了保护自己，开展与核燃料循环相关的一些研究活动。国际社会，包括中国在内，必须制定必要的规则，确保在闭式燃料循环中产生的核材料得到妥善管理，不会造成核扩散和核安保的风险。一些国家已经运行了工业规模的快堆和后处理厂，并没有导致核技术的横向扩散。因此，中国和其他国家有可能实现这一目标，但这还要取决于政策制定者如何权衡核扩散和安全风险与能源生产和技术发展带来的好处之间的关系。

目前，全世界的核供应国都许诺，对敏感的燃料循环技术转让采取极其克制的态度。如果中国成功地实现了闭式核燃料循环，先进核国家就应更加严格执行这一承诺，并努力在全球范围内达成共识，限制全球快堆和后处理厂部署，并对其进行治理。目前，全球有几个关于先进核电和核燃料循环系统发展的多边合作项目，这些项目也应该支持核供应国的上述行动。假如全球的核电生产也在扩大，那么中国将来可能会成为核燃料循环多边贸易活动的中心，这可能包括中国会对动力反应堆的乏燃料进行后处理，并

回收利用核材料，同时向拥有压水堆的核电国家出售新燃料。中国和其他先进核国家可能都会同意限制向其他国家转让快堆和后处理技术，但美国一直持有的民用“坏经济”对全球来讲弊大于利的观点势必会在多种场合受到质疑，包括在双边和多边核外交活动中。

注释

- 1 “法国核电历史” [法语], 阿尔肯能源创业基金会, 2016年1月11日, <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/histoire-de-lelectronucleaire-en-france>。
- 2 大卫·比略, “中国促进核能发展”, 《自然》, 2011年3月29日, <http://www.nature.com/news/2011/110329/full/news.2011.194.html>。
- 3 马克·希布斯, “美国核工业有前途吗?”, 卡内基国际和平研究院, 2017年8月10日, <http://carnegieendowment.org/2017/08/10/does-u.s.-nuclear-industry-have-future-pub-72797>。
- 4 丹娜·卡德威乐, 乔娜森·索伯, “西屋申请破产对核电的打击”, 《纽约时报》, 2017年3月29日, https://www.nytimes.com/2017/03/29/business/westinghouse-toshiba-nuclear-bankruptcy.html?_r=0。
- 5 迈克·斯托瑟德, “阿海珐宣布2016年净亏损6.65亿欧元”, 英国《金融时报》, 2017年3月1日, <https://www.ft.com/content/e38738f3-a4b5-3b90-9c2b-4ec975a60157>。
- 6 刘丽丽, “核电管理办法” [中文], 新浪出版社, 2016年12月9日, <http://www.china5e.com/news/news-971094-1.html>。
- 7 毛里和子, “浅析中苏同盟: 1957—1959年的政治进程”, 北约与华沙条约组织历史研究项目, 2005年6月, <http://www.php.isn.ethz.ch/lory1.ethz.ch/publications/areastudies/documents/sinosov/Mori.pdf>; 王元西, 李建刚, 吴宜刚, “中国核聚变研究的能源需求与可能策略”, 国际原子能机构, http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P_1356_CD_web/Papers/Wan%20Paper%20EP%20I-4.pdf。
- 8 约翰·威尔逊·刘易斯, 薛立太。《中国正在制造炸弹》, 斯坦福: 斯坦福大学出版社, 1988年, 第65-72页。
- 9 同上, 第35-2页。
- 10 徐义冲, 《中国核能政治》(英国贝辛斯托克: 英国麦克米伦出版社, 2010), 第16-22页。
- 11 文化大革命并没有使中国政府停止所有与高科技发展有关的项目。1970年, 中国成功地发射了第一颗太空卫星。参见: 魏春娟, 魏南西, 戴瑞尔·E·布洛克编辑的《科学与毛主席的文化大革命: 现代中国的科学与技术》(普利茅斯, 英国: 列克星敦图书公司, 2013), 第824页。

- 12 约翰·威尔逊·刘易斯，薛立太。《中国正在制造炸弹》，第104-36页。
- 13 徐义冲，《中国核能政治》：第20-4页，第26-7页。
- 14 同上，第60-4页。
- 15 侯建超等，“中国核电发展的政府政策与未来展望”，《电力工程学报》，第37卷，第3期（2011年9月）。日本福岛第一核电站发生事故后，到2020年达到70 GWe的目标降至58 GWe。
- 16 马克·希布斯，“核电需求低于预期，中国可能放弃核电计划”，《原子核物理周刊》，1999年3月4日；凯文·普拉特，“中国的核电计划失去动力”，《基督教科学箴言报》，2000年7月21日，<http://www.csmonitor.com/2000/0721/p7s1.html>；同时参见徐义冲，《中国核能政治》，第51页。
- 17 作者与中国政府官员的谈话记录，2013年7月。
- 18 作者与西方政府官员的谈话记录，2017年2月。
- 19 作者与中国国企官员的谈话记录，2014年5月。
- 20 徐义冲，《中国核能政治》：82-3。
- 21 Kevin Jianjun Tu, Sabine Johnson-Reiser, “对中国煤炭进口增长的理解”，卡内基国际和平研究院，2012年6月，http://carnegieendowment.org/files/china_coal.pdf，第3页；《中国产业地图》编委会，《中国能源产业地图》（新加坡：世界科学出版公司，2011年），第7页。
- 22 “煤源电力生产（中国，1971—2014年）”，世界银行，<http://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.COAL.ZS?locations=CN>。
- 23 蔡建平，“中国核电计划的进展”，上海核工程研究设计院，1996年，http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/29/024/29024315.pdf，第67页。
- 24 作者与法国核工业主管的谈话，北京，2005年；“中国官员不希望朱镕基批准新的压水堆项目”，《原子核物理周刊》，2002年4月4日第12-13期；国外厂商预期中国在2001年将建造4—6座压水堆，《原子核物理周刊》，2000年3月30日，4-6；Ann MacLachlan 和马克·希布斯，“中国工业重组可能持续”，《原子核物理周刊》，2005年1月6日，11-1。另参见：蔡，“中国核电计划的进展”，第68页。
- 25 约翰·威尔逊·刘易斯，薛立太，《中国正在制造炸弹》，60-5。
- 26 作者与西方政府官员谈话记录，伦敦，1998；北京，2000年。
- 27 马克·希布斯，“中核集团与国务院就中国核电计划的发展方向展开争论”，《原子核物理周刊》，2005年6月16日，第14页。
- 28 赵建民，布鲁斯·迪克森，《反思中国：战略、社会和安全》，伦敦：劳特利奇出版社，2001年，第11页。

- 29 同上，第21页。
- 30 国际原子能机构，《新核电计划的劳动力规划》（维也纳：国际原子能机构，2011年），http://www.pub.iaea.org/MTC/publications/PDF/Pub1477_web.pdf，第53 - 62页。
- 31 Richard McGregor，“中国到2006年将面临电力过剩”，英国《金融时报》，2005年8月9日，<http://www.ft.com/cms/s/0/4f3b629a-090c-11da-880b-00000e2511c8.html>。
- 32 李鹏，“国民经济和社会发展“九五”规划纲要（1996—2000年）”，《回顾‘九五’规划》，1996年3月5日，<http://www.china.org.cn/95e/95-english1/2.htm>。
- 33 胡肇光，谭先东，徐肇源。《我国2050年经济发展与电力需求探讨》（北京：中国电力出版社），第3-6页。
- 34 《电力消耗（中国，1971—2014年）》，世界银行，<http://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.ELEC.KH.PC?locations=CN>。
- 35 何刚，蒋林，亚历山大·袁，“中国经济再平衡与电力需求”，劳伦斯伯克利国家实验室，2015年11月，<https://china.lbl.gov/sites/all/files/lbnl-1003799.pdf>。
- 36 马克·希布斯，“中国工业可能持续重组”，《原子核物理周刊》，2005年1月6日，第11页。一位外国核电行业高管告诉作者，国家能源局成立时，中国核电专家“不知道它的职责是什么”，因为其他机构，尤其是国家发改委，负责项目许可审批和电力定价等重要事项。最终，国家能源局承担了国家发改委此前的核规划任务。2017年7月北京市政府官员表示，国家能源局目前负责制定核能规划目标。
- 37 新能源与核能技术研究所，“核能发展战略”，《2004年中国能源展望》，北京：清华大学出版社，第36页。
- 38 据一个了解化石燃料开采行业的研究机构称，近年来，中国国家电网以每十天新建一个燃煤电厂的速度不断扩大：“美国加快关闭燃煤电厂，而中国和日本正在建设能源研究所”，2015年4月23日。<http://instituteeforenergyresearch.org/analysis/as-u-s-shutters-coal-plants-china-and-japan-are-building-them/>。
- 39 徐晓杰，《中国能源2020年展望》，中国科学院，<https://www.eia.gov/conference/2014/pdf/presentations/xu.pdf>。
- 40 国家环境保护总局/世界银行，《中国污染成本：物质损失的经济估算》（北京：世界银行/国家环境保护总局，2007年2月），http://siteresources.worldbank.org/INTEAPREGTOPENVIRONMENT/Resources/China_Cost_of_Pollution.pdf。

- 41 “乏核燃料现状”，澳大利亚核协会，2015年3月，<http://www.nuclearaustralia.org.au/wp-content/uploads/2015/04/ANA-Information-Sheet-20150331-Spent-Nuclear-Fuel.pdf>。
- 42 Christophe Poinsot, Bernard Boullis, Stephane Bourg, “回收在先进核燃料循环中的作用”，《乏核燃料的再加工与再循环》，罗宾·泰勒编。（英国剑桥：伍德海德出版社/爱思维叶出版社，2015年），第35页。
- 43 同上。特别是，由于德国实施逐步淘汰核能的政策，加上福岛核电站后日本大多数核电站自2011年以来无限期停工，预计到2020年，全球乏燃料后处理的数量将会下降。
- 44 “燃料循环不同阶段产生的物质和核废物管理的透明度的建议，”核安全透明度和信息高级委员会，2010年7月，http://www.hctisn.fr/IMG/pdf/hctisn_rapport_cycle_cle31BE65.pdf。
- 45 “国家高新技术研究发展计划（‘863’计划）”，中国科技部，<http://www.most.gov.cn/eng/programmes1/>。
- 46 D. Zhang, 《第四代核反应堆手册》中的“第四代的概念：中国”，Igor Piore编，英国剑桥：伍德海德出版社，2016年），第373-408页。
- 47 姜云清等，“中国核电厂乏燃料后处理的准备”，《核电性能与安全》，第5卷：《核燃料循环》（维也纳：国际原子能机构，1987年），第639期，http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/20/037/20037987.pdf?r=1。
- 48 同上，第640页。
- 49 作者与西方政府和中国行业官员的谈话，北京，2005年；马克·希布斯，“中国的钚分离计划至少比预定计划推迟三年”，《核燃料》，2000年5月1日，第3页。
- 50 马克·希布斯，“中国增殖反应堆临界延迟至2008年”，《原子核物理周刊》，2005年8月18日，第6页。
- 51 作者与中国核燃料循环专家的谈话，2011年，2015年和2016年。
- 52 同上；张天祥等，“中国核电反应堆乏燃料后处理装置的主动调试流程”，《中国科学》，第56卷，第23期（2011年8月）：第2页，411 - 15。
- 53 叶国安、闫泰红，“中国闭式核燃料循环的发展”，《乏燃料后处理与回收》，北京：清华大学出版社，2004年；泰勒编。534 - 5；张，等，“主动调试流程。”
- 54 参见：例如刘学刚，“中国核能发展与乏燃料管理规划”，NAPSNet专题报告，2012年10月16日，<http://nautilus.org/napsnet/napsnet-special-reports/chinas-nuclear-energy-development-and-spent-fuel-management-plans/>；周云，“中国乏燃料管理：当前实践与未来策略”，美国马里兰大学公共政策学院

- 国际安全研究中心，2011年3月，https://www.files.ethz.ch/isn/127378/china_spent_fuel_management_and_reprocessing_draftfeb_2011.pdf。
- 55 “核电计划中的钚分离”，国际易裂变材料小组，2011年，<http://fissilematerials.org/library/rr14.pdf>，第19 - 29页；1988年，有消息说，根据俄罗斯公布的资料，未来的核电厂的乏燃料产量为100千克/天：Jason Puckett，《中华人民共和国核电厂状况》，美国能源部，1991年，<http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/5823192>。
- 56 作者与中国和外国专家的谈话记录，2015年和2016年。
- 57 2015年，中国报道2014年的民用分离钚库存增加了约11千克；2015年回收钚没有增加：《中国关于钚管理政策的来函》，国际原子能机构，2016年9月19日，<https://www.iaea.org/sites/default/files/infcirc549a7-15.pdf>；《中国关于钚管理政策的来函》，国际原子能机构，2015年8月28日，<https://www.iaea.org/sites/default/files/infcirc549a7-14.pdf>。
- 58 姜云清等，“中国核电厂乏燃料后处理的准备”，第641页。
- 59 徐铄，“中国快堆技术的发展、现状与展望”，《工程科学》，2007年7月18日；徐铄，“中国快堆技术发展现状”，国际原子能机构快堆技术工作组第三十五届年会，2002年4月22-26日，http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/046/33046593.pdf；徐铄，“可持续供应核电的中国快堆技术的发展”（中国国际核研讨会，2010年11月23-25日，北京），《新气候》<https://bravenewclimate.files.wordpress.com/2011/11/fast-reactors-xu.pdf>。
- 60 Rahul Tongia, V. S. Arunachalam，“印度的核增殖堆：技术、可行性和技术选择”，卡内基梅隆大学，1997年12月15日，http://www.contrib.andrew.cmu.edu/~tongia/breeder_Report.pdf。
- 61 61 新华社，“中国核电取得进展”，《中国日报》，2012年10月31日，http://usa.chinadaily.com.cn/china/2012-10/31/content_15862248.htm。
- 62 张东辉，“中国快堆发展战略”（国际快堆及相关燃料循环大会，巴黎，2013年1月25日），国际原子能机构，<https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2013/2013-03-04-03-07-CF-NPTD/5.zhang.pdf>。
- 63 国务院常务委员会定期举行会议，并指导国务院的工作，由国务院总理、几位副总理、几位国务委员组成：《国务院组织机构图》，国务院，中华人民共和国，2014年8月28日http://english.gov.cn/state_council/2014/09/03/content_281474985533579.htm。

- 64 丛伟科, “中国核工业”, 国际原子能机构, 2009年, http://www-pub.iaea.org/mctd/meetings/PDFplus/2009/cn175/URAM2009/Session%201/8_33_Cong_China.pdf。
- 65 袁西, 建刚, 易灿, “能源需求”。
- 66 “中国推迟购买俄罗斯的快堆”, IPFM (博客), 国际易裂变材料小组, 2012年5月18日, http://fissilematerials.org/blog/2012/05/china_delays_purchase_of_.html。
- 67 作者与中国核电专家和高管的谈话记录, 2015年5月和2017年8月。
- 68 作者与中国核企业高管的谈话记录, 2017年5月。
- 69 “中国开始建造试验快堆”, 《世界核新闻》, 2017年12月29日, <http://www.world-nuclear-news.org/NN-China-begins-building-pilot-fast-reactor-2912174.html>。
- 70 TerraPower公司和中国没有公开披露他们的意图, 非官方媒体在本世纪前十年的推测: Alvin Ybanez, “2017年开始建设快速核反应堆”, 易八达网站, 2015年8月17日, <http://www.webcitation.org/6dNWyI16E>; 2015年, 中国原子能科学研究院讨论了反应堆建设提议: 张东辉, “中国核能与快堆发展” (快堆技术工作组第48次会议, 5月24-30日, 奥布宁斯克), 国际原子能机构, https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2015/2015-05-25-05-29-NPTDS/Country/4_Nuclear_energy_and_Fast_Reactor_development_in_China.pdf。
- 71 张东辉, “中国核能与快堆发展”; 张东辉, “中国快堆发展战略” (国际快堆及相关燃料循环大会, 2013年1月25日, 法国), 国际原子能机构, https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2013/2013-03-04-03-07-CF-NPTD/5_zhang.pdf; CFR是“中国示范快堆”的简称。在本世纪最初的十年里, 中国官员将第二座增殖反应堆称为中国示范快堆或中国原型快堆, 暗示该反应堆建成后, 还将建设第三座反应堆, 预计将是商用反应堆。最近, 将该项目指定为示范反应堆, 可能意味着中国原子能科学研究院打算不建设原型堆, 直接从中国实验快堆“跃进”到可行的商业化反应堆, 但缩写“CFR”似乎会说明这个问题还没解决, 或有待决定。
- 72 马克·希布斯, 《反思中国快堆》, “军备控制专家”博客, 2017年2月17日, <http://www.armscontrolwonk.com/archive/1202830/rethinking-chinas-fast-reactor>; 一些官员说, 中国曾考虑将其他项目中的一些特点融入600 Mwe增殖反应堆之中, 例如美国通用电气日立公司的“棱镜”快堆的设计元素, 该反应堆只有一台蒸汽发生器。

- 73 福建省投资开发集团有限责任公司网站, <http://www.fidc.com.cn>。
- 74 Igor Piore, 《第四代核反应堆手册》(英国剑桥: 伍德每德出版社, 2016年), 374 - 89。
- 75 “中国开始建造试验快堆”, 《世界核新闻》。
- 76 张, “中国快堆发展战略”。
- 77 徐銖, “中国可持续核电供应的现状与展望”(2005年国际会议, 日本筑波, 2005年10月9日)。
- 78 钠水反应比钠与空气(氧)反应更危险, 因为钠水反应中, 氢气或高反应性的羟基自由基首先分解出来, 然后氢气与氧反应, 也与羟基自由基反应。钠很活泼, 容易与羟基自由基发生反应, 生成氢氧化钠和氧化钠。因此, 钠必须在惰性环境中处理。
- 79 文殊反应堆的钠泄漏事件是由于热偶密封包装密封失效导致钠泄漏。这一事件说明, 尽管快堆系统的压力很低, 但由于钠具有强大表面张力, 有可能从设备上的小孔和裂缝中渗漏出来, 造成危险。
- 80 纯熔融钠比水(轻水堆的冷却剂和慢化剂)腐蚀性小得多, 而且与结构不锈钢接触不会造成腐蚀。然而, 如果熔融钠与水发生反应, 会产生一种极具腐蚀性的化合物。
- 81 特别是, 熔焊不当会破坏专用钢的整体性能, 使其在高温下容易失效。因此要保持焊缝处的材料性能, 需要特殊的技术。
- 82 在轻水堆中, 为了限制反应堆锆合金包壳的中子吸收截面, 需要限制包壳压力。在钠快堆中, 由于冗余反应性高, 可以使用更坚固的燃耗更高的包壳材料。过去, 用奥氏体不锈钢作快堆包层, 遇到很多难题。现在, 大多数快堆项目似乎都选择一种叫做HT9的材料。将来, 快堆包壳可能使用先进的弥散强化合金。
- 83 Joel Guidez, “世界钠冷快堆技术恢复”, 《凤凰原型堆: 经验的回归》(巴黎: 法国原子能委员会, 2012年), 294 - 5。
- 84 关于这个问题, 还有待对成本和安全进行研究和讨论。关键要考虑的因素是堆芯熔毁、堆芯损伤以及为抓取事故中熔化的包壳而设计的“取芯爪”的性能。与轻水堆不同, 大多数或所有钠冷快堆的取芯爪都被设计在反应堆容器内。因此, 反应堆装置是固定的, 而不只是一个可以移动的容器, 安全问题还应包括反应堆装置不会因安放位置不当而失效。外部取芯爪成本较高, 一般不予采用, 尤其是中国钟爱的泳池式反应堆。
- 85 通过先进设计可以解决堆芯的稳定性和控制棒安装问题, 比如采用较高的负反应性温度系数控制堆芯温度。

- 86 J. F. Sauvage, “RNR-Na原型堆: 过去、现在和未来”, RGN 3 (2013年5-6月): <https://rgn.publications.sfen.org/articles/rgn/abs/2013/03/rgn20133p50/rgn20133p50.html>, 第10页; 亦见: Caroline Peachey, “凤凰原型堆的经验”, 国际核工程, 2010年1月8日, <http://www.neimagazine.com/features/featurelearning-from-ph-nix/>。
- 87 Guidez, “世界钠冷快堆技术恢复”, 第293页; 作者与美国和俄罗斯的快堆国家实验室官员的谈话记录, 莫斯科和北京, 2015年, 芝加哥, 2016年。
- 88 卡内基研究院中国核领域专家的讲话, 北京, 2014年4月。
- 89 中国核能行业协会副理事长赵成昆的公开讲话, 2015年4月13日, 东京。
- 90 Yun Zhou, “中国当前的燃料管理和未来管理方案”, 哈佛大学贝尔佛中心, 2010年7月, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=D47A384B2039A14DCC06D387F2A88AE1?doi=10.1.1.651.446&rep=repl&type=pdf>。
- 91 徐铄, 中国快堆技术的研究与发展活动, 《核工程与技术》, 第39卷, 第3期(2007年7月): <https://www.kns.org/jknsfile/v39/JK0390187.pdf>, 187 - 92。
- 92 Du Hai-ou, “钠火灾防犯系统”, 《中国原子能科学研究院年报》(北京: 中国原子能科学研究院, 2006年), 第10页。
- 93 卡内基研讨会上的外国行业和政府专家的观点, 2014年, 北京; 2015年, 厦门; 2016年, 柏林。2010年2月, 在哈佛大学/清华大学举办的卡内基研讨会上, 西方国家政府核实验室的一位高级专家告诉中国专家, 在他看来, 中国原子能科学研究院计划在中国实验快堆投产后立即在五年内建成工业规模的发电快堆, “这个计划似乎注定失败”。
- 94 徐, “中国快堆技术研究与发展”。
- 95 杨鸿一, “中国快堆的经济问题”(关于提高快堆及相关的燃料循环设施经济特性的技术会议, 2013年12月9日), 国际原子能机构, <https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2013/2013-09-11-09-13-TM-NPTD/7.yang.pdf>。
- 96 任丽霞, “中国实验快堆严重事故分析及技术缺陷”(防止和减少钠冷快堆严重事故国际研讨会, 日本敦贺, 2012年6月11-13日), 日本原子能机构, http://www.jaea.go.jp/04/turuga/internationalworkshop/presentationPDF/201206131110Lixia%20Ren_China.pdf。
- 97 Arnaud Lefevre, “中俄核合作”, Dynatom, 2013年2月, <http://dynatom.org/wp-content/uploads/2015/01/Sino.-Russian-Nuclear-Cooperation-February-2013.pdf>。

- 98 希布斯，“反思中国快堆”。
- 99 Chungnin C. Wong，“中美先进燃料循环研究合作概况”，美国能源部，2010年7月1日，<http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1123279>。
- 100 作者与美国政府官员的谈话记录，维也纳，2016年9月。至少到本世纪初，美国政府严格限制了面向中国的技术转让范围：马克·希布斯，“美国继续加大与中国核合作的限制”，《原子核物理周刊》，2004年4月1日。
- 101 据非官方资料显示，在2013年11月，中核集团的两位主管都敦促美国能源部长欧内斯特·莫尼兹放宽美国“第810条出口管制”规定的关于出口的限制，允许对中国出口TerraPower反应堆技术。2015年，美国政府满足了这一要求。美国第810条规定做了如下修改：“修订后第810条规定：对外国原子能活动提供援助”，美国能源部，2015年2月20日，<http://www.webcitation.org/6dNWPYOAE>。
- 102 《关于乏燃料管理和放射性废物管理安全的联合公约》第三个报告，国家核安全管理局，2014年9月，http://nnsa.mep.gov.cn/gjhz_9050/gjgybg/201512/P020151223562288196956.pdf，第9页。
- 103 根据欧洲官员2010年的说法，法国政府和阿海珐集团不同意在中国建造后处理厂，除非后处理厂的设施受到国际原子能机构的保障监督，以及后处理厂的技术不是使用可以分离钚产品的PUREX流程，而且后处理厂不能建在从事军事核活动的地区。2010年，中国官员告诉作者，中国没有理由必须为国际原子能机构的保障监督活动提供方便和支付费用，因为中国和法国一样，是《不扩散核武器条约》的缔约国。中国要建造使用PUREX流程的后处理厂，是因为熟知这种技术，并且中国本身已进行了工业规模的示范；作者与欧洲及中国核官员的谈话记录，2010年。
- 104 作者与西方政府官员的谈话记录，2016年4月和5月。
- 105 作者与中国核企业高管的谈话记录，2015年。
- 106 同上。
- 107 作者与中国及外国政府官员的谈话记录，2016年7、8、9月。
- 108 赵云，“中国当前的乏燃料管理”，第15页。
- 109 刘学刚，“中国乏燃料管理”，鸚鵡螺安全与可持续性研究所，2014年8月5日，<https://nautilus.org/napsnet/napsnet-special-reports/spent-nuclear-fuel-management-in-china/>。
- 110 作者与俄罗斯核企业高管的谈话记录，2016年5月。
- 111 赵云，“中国当前的乏燃料管理”。
- 112 同上。
- 113 刘学刚，“中国乏燃料管理”。
- 114 作者与中国及外国政府官员的谈话记录，2015年和2016年。

- 115 Robert Forrest, Chaim Braun, “中国乏燃料管理：临时贮存的模型框架,” 《核不扩散评论》, 第24卷, 第1、2期(2017年): 第38页。
- 116 作者与中国核企业高管和专家的谈话记录, 2015年和2016年, 及外国政府官员的谈话记录, 2015年。
- 117 赵云, “中国当前的乏燃料管理”, 第15页。
- 118 T. A. Todd, “美国闭式核燃料循环的发展”, 《乏燃料的后处理和回收利用》, 泰勒编, 第524页。
- 119 Harold Feiveson 等编, 《核反应堆乏燃料管理》(普林斯顿: 国际易裂变材料小组, 2011年9月), <http://fissilematerials.org/library/rr10.pdf>, 第3页。
- 120 “中国的乏燃料贮存和运输——挑战与建议”, 中国广核电力股份有限公司, 2015年11月, [http://china.aveva.com/home/liblocal/docs/China%20offer/2nd%20Back%20End%20Seminar%20in%20Beijing%202015/\(丁怀博_En\).pdf](http://china.aveva.com/home/liblocal/docs/China%20offer/2nd%20Back%20End%20Seminar%20in%20Beijing%202015/(丁怀博_En).pdf)。又见: Forrest and Braun, “中国乏燃料管理”, 第43页。他们预计, 如果中国推迟到2035年进行后处理, 中国就必须再增加600 MTHM的乏燃料临时贮存能力。
- 121 “中国的乏燃料贮存和运输”, 中国广核电力股份有限公司。
- 122 Harold Feiveson等编, 《核反应堆乏燃料管理》, 第12页7。
- 123 叶国安, 闫泰红, “中国闭式核燃料循环的发展”, 第532页。
- 124 M. Salvatores, “全球核能预测情境: 快堆的作用”(国际原子能机构教育和培训研讨会/快堆技术的研讨会, 阿根廷国家原子能委员会, 阿根廷: 巴里洛切, 2012年10月1 -5日), 国际原子能机构, https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2012/2012-10-01-10-05-WS-NPTD/1.1_Salvatores_global_scenarios.pdf。
- 125 V. Romanello等, “可持续核燃料循环和世界地区问题”, 《可持续发展》, 第4卷(2012年): 第1页, 214 - 38。
- 126 作者与中国核实验室官员的谈话记录, 北京, 2010年。
- 127 Romanello等人, “可持续性核燃料循环”, 第1页, 第225页。
- 128 这篇文章指出, 到2020年, 全球民用乏燃料废物总量为45万吨, 其中在全球范围内乏燃料后处理总量可能为12万吨, 参见“乏燃料和高放废物的贮存和处置”, 国际原子能机构, 2006年, https://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC50/GC50InfDocuments/English/gc50inf-3-att5_en.pdf。
- 129 129 Kenneth L. Nash and Mikael Nilsson, “乏燃料的后处理和回收利用介绍”, 《乏燃料的后处理和回收利用》, 泰勒编泰勒编, 第12 - 13页。
- 130 作者与中国核实验室官员的谈话记录, 北京, 2015年。
- 131 Francois Drain等, “联合萃取锕系元素工艺: 科技创新与工业经验的结合”, 废

- 物管理研讨会，2008年，<http://www.wmsym.org/archives/2008/pdfs/8220.pdf>。
- 132 技术文献指出了潜在的技术难题，例如将铀和钚减少到所期望的氧化状态、制造球形燃料的质量保证，以及可能的临界管理问题；参见Mark J. Sarsfield，“乏燃料湿法后处理的混合铀系草酸盐的共同沉淀和转化”，《乏燃料的后处理和回收利用》，泰勒编，第343页。
- 133 经济合作与发展组织核能署（以下简称为“经合组织核能署”），《核燃料循环可持续性发展趋势》（巴黎：经合组织，2011年），第89页。
- 134 经合组织核能署，《轻水堆的超高燃料》（巴黎：经合组织，2006），第17页，第19-21页。
- 135 经合组织核能署，《核燃料循环可持续性发展趋势》，第90页。
- 136 “中国的乏燃料贮存和运输”，中国广核电力股份有限公司。
- 137 无论处置库中是否含有乏燃料或玻璃固化高放废物，短期内热负荷增加实质上是发电导致的。如果铯和锶被分离并贮存约100年，处置库中的热负荷将会有大大减少。如果次铀系元素能在核燃料循环中分离并保留，并在快堆中燃烧，那么热负荷将会长期减少，长期的放射性毒性也会大大减少。对于放射性毒性是否是处置库的一个重要问题，专家目前还没有达成共识。许多专家认为，好的存储库设计只受热负荷限制的影响。此外，实现镓分离才能最大限度地减少长期热负荷。镓是可以用作快堆的燃料，含有重要的燃料价值（大约是轻水堆钚燃料的1/10）。其他次铀系燃料的燃料价值非常有限，而且作为燃料也有问题。一些专家认为这些次铀系元素应该被分离和处置。裂变产物的嬗变更具争议性。
- 138 叶国安，闫泰红，“中国闭式核燃料循环的发展”，第532页。
- 139 Giuseppe Modolo，等，“乏燃料后处理中的次铀系元素分离”，《乏燃料的后处理和回收利用》，泰勒编，第247页。
- 140 一些镧系元素存在中子毒性，而且乏燃料中镧系元素含量相对较高（是铯和锶的50倍），再加上燃料生产过程中进行分离时需要隔离镧系元素，这些问题使分离和嬗变更加困难；参见：Jean-Paul Glatz，等，“先进乏燃料后处理技术面临的挑战”，《乏燃料的后处理和回收利用》，泰勒编，第53页。
- 141 L. G. Williams，“先进燃料循环中乏燃料后处理和回收利用的安全问题”，参见：《乏燃料的后处理和回收利用》，泰勒编，第88页。
- 142 G. Modolo，次铀系元素《次铀系元素的分离》，第278页。
- 143 Bruce A. Moyer et al.，“乏燃料后处理中次铀系元素的分离：美国最近的进展”，参见：《乏燃料的后处理和回收利用》，泰勒编，第308页。
- 144 经合组织核能署，《核燃料循环可持续性发展趋势》，第112页。
- 145 145 liu fang 等人，“含U(VI)硝酸溶液中的甲基胍还原Tc(VII)和 APOR工艺

- 中U/Pu分离阶段铈的行为”，《Energy Procedia》期刊第39卷（2013年）：
http://ac.els-cdn.com/S1876619612001106/1-s2.0-S1876619612001106-main.pdf?_tid=b9b4cd44-c545-11e6-a1e5-00000aacb362&acdnat=1482081574_1c7e0f3553d487ca01beb41e7cfa5c74, 358 - 64。
- 146 叶国安, 贺辉, 林茹姗, 周文斌, “中国铀系元素分离的研究与发展”, 《化学能源》第7卷(2012年): http://ac.els-cdn.com/S1876619612001106/1-s2.0-S1876619612001106-main.pdf?_tid=8b13b252-c3ce-11e6-8204-00000aacb35d&acdnat=1481920434_eb2670113ef6baf101b-176b209a16aec, 215 - 21。
- 147 叶国安, 闫泰红, “中国闭式核燃料循环的发展”, 第544页。
- 148 同上, 542 - 4; Song C. L. 等, “中国高放废物的超铀元素分离”, 《中国核科技报告》(北京: 原子能出版社, 1994年)。
- 149 “第二部分: 技术分离和总结”, 经合组织核能署, <https://www.oecd-nea.org/trw/docs/neastatus99/Part2.pdf>, 第123页。
- 150 R. G. Lewin, M. T. Harrison, “国际乏燃料高温处理电精炼技术的发展”, 参见: 《乏燃料的后处理和回收利用》, 泰勒编, 第375页。
- 151 C. Channy Wong, 等, “中美先进燃料循环研究合作综述”, 第八届国际核热工水力学、运行与安全专题会议, 上海, 2010年10月10-14日, <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1123279>。
- 152 作者与中国核实验室官员的谈话记录, 北京, 2010年。
- 153 叶国安, 闫泰红, “中国闭式核燃料循环的发展”, 第544页。
- 154 作者与中国核企业高管的谈话记录, 2017年9月和11月。
- 155 “核燃料循环技术发展战略”, 《中国科学院院刊》, 第29卷, 第3期(2015): 167 - 9, http://english.cas.cn/bcas/2015_3/201509/P020150930641510858892.pdf。
- 156 2010年10月, 中国和比利时签订了双边核合作协议; 协议包括一份比利时核工业备忘录, 向中国提供MOX燃料技术, 仿照当时比利时现有的MOX燃料制造厂, 在中国建设一个年产35吨的MOX燃料加工厂。中国之所以寻求比利时的援助, 是因为过去几十年, 比利时在MOX燃料技术方面一直处于领先地位, 但在2005年却决定关闭MOX工厂。中国打算在酒泉404军用核燃料工厂建造这座MOX燃料制造厂, 旁边是乏燃料后处理试点厂。2012年, 这个合资项目终止了。据欧洲核燃料工业高级管理人员说, 和法国阿海珐集团在中国建立后处理厂时一样, 比利时出于同样的顾虑, 不同意中国提出的在酒泉军事区建立MOX设施。协议失效后, 中国在酒泉建设了一座实验室规模的后处理厂, 使用自主技术和设备, 每年生产500千克的MOX燃料。根据中核集团的数据, 这个产量足以满足2015年之前中国实验快堆的MOX燃料。参见“俄罗斯为中国快

- 堆提供高浓铀燃料”，IPFM（博客），国际易裂变材料小组，2013年10月20日，http://fissilematerials.org/blog/2013/10/russia_to_supply_heu_fuel_1.html。
- 157 鲁导刚，徐銛，“中国实验快堆的设计与建设进展”（GENES4/ANP2003，日本京都，2003年9月15-19日），巴西核与能源研究所，<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/genes4/2003/papers/1231-final.pdf>。
- 158 中国专家告诉作者，从2011年到2017年，中国实验快堆中使用了少量的MOX燃料；到2017年初，反应堆堆芯中已停止使用MOX燃料。
- 159 消息人士告诉作者，未来的中国实验快堆将由81个燃料组件组成，每个燃料组件包含大约140千克的MOX燃料。关于中国实验快堆的MOX燃料中铀的含量，中国不同的资料数据差别很大。
- 160 张，“中国快堆发展战略”。
- 161 Wong，等，“中美先进燃料循环研究合作综述”。
- 162 R. Natarajan，“快堆乏燃料后处理”，参见：《乏燃料的后处理和回收利用》，泰勒编，第222页。
- 163 Chris J. Maher，“乏燃料后处理中前端技术的现状和未来发展，”见：《乏燃料的后处理和回收利用》，泰勒编，103 - 5。
- 164 Natarajan，“乏快堆核燃料的后处理”，第229页，第237页。
- 165 张，“中国快堆发展战略”。
- 166 国际原子能机构，《后处理铀的管理：现状和未来展望》（维也纳：国际原子能机构，2007年2月），http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1529_web.pdf；国际原子能机构，《后处理铀的使用：技术委员会会议文集》（维也纳：国际原子能机构，2007年8月），http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TE_1630_CD/pdf/teea-tecdoc-1630.pdf。
- 167 国际原子能机构，后处理铀的管理，第86页。
- 168 同上，第55页。
- 169 “SNC-Lavalin与中核集团和上海电力公司合资经营的原则与协议”，新闻稿，snc-lavalin，2016年9月22日，<http://www.snclavalin.com/en/news/2016/snc-lavalin-signs-agreement-principle-joint-venture-china-national-nuclear-corporation-shanghai-electric-company>。
- 170 作者与中国核专家的谈话记录，北京，2016年。
- 171 作者与加拿大核官员的谈话记录，维也纳和伦敦，2016年1-3月。
- 172 王菊，等，“中国高放废物的深度地质处置”，《中国岩石力学与工程杂志》第25号，第4期（2006年4月）：649-58。
- 173 刘春丽，“中国高放废物处置的巨大进步”（2014年废物管理大会，美国凤凰城，

- 2014年3月2日至6日），<http://www.wmsym.org/archives/2014/文件/1406.pdf>。
- 174 同上。
- 175 作者与中国核专家的谈话记录，2015年。
- 176 作者与中国核专家的谈话记录，厦门，2015年。
- 177 在这种反应堆中，二回路盐可用于产生可驱动热空气的热空气，即布雷顿循环涡轮机；在这种情况下，设备的平衡基本上是一个稍微改进的天然气涡轮机。这个涡轮机不需要冷却水。这种设计有可能用于脱盐。除了中国，美国和俄罗斯还开发了固体燃料熔盐反应堆设计。
- 178 同上。
- 179 J. Uhlir, 等, “钍燃料熔盐反应堆高温处理技术的发展”, (先进核电厂国际会议上的发言, 芝加哥, 2012年7月)。
- 180 作者与中国核专家的谈话记录, 2015年。
- 181 陈和兴, 《中国大型研究设施的发展》, (北京: 中国科学出版社, 2011年), 第38页。
- 182 同上。
- 183 C. F. Yu, 中广核寻求后端技术, 《核情报周刊》, 2016年11月28日, 第4 - 5页。
- 184 李志辉, 等, 加速器驱动次临界系统的物理设计, 《物理评论》第16页 (2013年): <http://journals.aps.org/prab/pdf/10.1103/PhysRevSTAB.16.080101>。
- 185 “加速器驱动核能,” 世界核协会, 2017年4月。<http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/accelerator-driven-nuclear-energy.aspx>。
- 186 钍报告委员会, 《钍能源》, 奥斯陆: 石油和能源部研究理事会, 2008年), 第1-6页, 106-8, [https://www.regjeringen.no/globalassets/upload/OED/rapporter/thoriumreport 2008.pdf](https://www.regjeringen.no/globalassets/upload/OED/rapporter/thoriumreport%202008.pdf)。
- 187 Lee McIntire, “TWR原型堆发展的下一步措施”, TerraPower公司, 23, 2015年9月23日, <http://terrapower.com/news/taking-the-next-steps-for-twr-prototype-development>。
- 188 作者与中国核专家的谈话记录, 2015年和2016年。
- 189 Tyler Ellis 等, “行波反应堆” (ICAAP 2010年会议文集, 圣地亚哥, 2101年6月13 - 17日), 斯坦福大学, <http://large.stanford.edu/courses/2016/ph241/yun1/docs/10189.pdf>。
- 190 John Gilleland, 等, “行波堆: 设计与开发”, 《工程》, 第2卷第1期 (2016年3月): 第88 - 96页, http://ac.els-cdn.com/S2095809916301527/1-s2.0-S2095809916301527-main.pdf?_tid=d9a07d98-842a-11e7-9693-00000aacb35e&acdnat

- =1503070703_1d9bcc79bec246b7c63e547715388548; 反应堆能否使用高温处理法处置乏燃料, 将取决于反应堆对燃料中高放射性核裂变产物的耐受性(作者与美国核实验室专家的谈话, 2017年8月)。
- 191 非官方媒体猜测, TerraPower反应堆将建在福建霞浦: “霞浦核电站”[德语], Nucleopedia, 最后一次修改, 2018年2月25日, [http:// de.nucleopedia.org/wiki/Kernkraftwerk_Xiapu](http://de.nucleopedia.org/wiki/Kernkraftwerk_Xiapu)。
 - 192 作者与中国核研究与发展官员的谈话记录, 2017年3月。
 - 193 “中国制定2017年核电计划”, 世界核新闻, 2017年3月2日, <http://www.world-nuclear-news.org/NP-China-sets-out-nuclear-plans-for-2017-0203174.html>。
 - 194 徐斌, “中国集团研制的ACP-100小型模块化反应堆(SMR): 技术特点和进展”(第13届INPRO小型模块化反应堆全球部署存在的法律和制度问题论坛, 国际原子能机构, 2016年10月18日至21日), 国际原子能机构, https://www.iaea.org/INPRO/13th_Dialogue_Forum/011_CNNC_s_ACP100_SMR-Technique_Features_and_Progress_in_China.pdf。
 - 195 约翰·威尔逊·刘易斯, 薛立太。《中国正在制造炸弹》, 第199-201页。
 - 196 “中国雄心勃勃的聚变能之路”, 21世纪科学与技术(2011年春): 第47-56页, http://www.21stcenturysciencetech.com/Articles_2011/Spring-2011/China_Fusion.pdf。
 - 197 万远希, 等, “中国的能源需求与核聚变研究策略”, (国际原子能机构第2届第一代裂变核电厂技术大会第二次会议文集: 设计和技术), 国际原子能机构, [http://www-pub.iaea.org/MTCO/publications/PDF/P_1356_CD_web/Papers/Wan%20 Paper%20EP%20I-4.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCO/publications/PDF/P_1356_CD_web/Papers/Wan%20Paper%20EP%20I-4.pdf)。
 - 198 陈和兴, 《中国大型研究设施的发展》, 第40页。
 - 199 万远希, 等, “中国的能源需求与核聚变研究策略”。
 - 200 He X. T., “中国国家惯性聚变项目进展”, EPJ 会议网站, 59 (2013): http://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2013/20/epjconf_ifsa2011_01009.pdf。
 - 201 卡内基研讨会上两个专家的讲话: “中国核电的未来技术选择,” 厦门, 2015年5月22-23日; “中国和世界核电的未来: 后处理和快堆;” 柏林, 2016年5月31日-6月1日。
 - 202 从2008年到2011年, 国际创新核反应堆和燃料循环项目(INPRO)研发了一个分析框架, 用于评估从目前部署的核电反应堆到未来发电用的快堆和封闭燃料循环的转变情况包括由个别国家独立部署的情况、少数国家联合部署的情况和由多边计划协作部署的情况; 框架考虑了反应堆、核燃料加工、运输和物流以及核废物管理等问

- 题；见“国际创新核反应堆和燃料循环项目，”国家原子能机构，2017年1月1日，<http://www.iaea.org/INPRO/>。经合组织核能署也从战略角度分析了快堆和闭式燃料循环的商业化问题，参见经合组织，由热堆到快堆核系统转型引起的战略和政策问题（巴黎：经合组织，2009）。
- 203 徐义冲，《中国核能政治》：100-06。
- 204 “中国的核电热潮可能很快就会破灭”，《新科学家杂志》，1985年2月14日。
- 205 徐义冲，《中国核能政治》，第112页。
- 206 马克·希布斯，“中国的核障碍在广东是政治，在山东是经济”《原子核物理周刊》，第12页，1999年5月20日。
- 207 徐义冲，《中国核能政治》，第103页。
- 208 马克·希布斯，“中国电力公司考虑在70多个地区建设新反应堆”，《原子核物理周刊》，2009年4月30日。
- 209 Ryan Rutkowski，《中国核电经济学》，彼得森国际经济研究所，2013年10月25日，<https://piie.com/blogs/china-economic-watch/economics-nuclear-power-china>。
- 210 Philip Andrews-Speed，《中国的能源治理：向低碳经济过渡》（纽约：Palgrave Macmillan出版社，2012年），第173页。
- 211 同上，第125页。
- 212 作者与中国核专家的谈话记录，2015年和2016年。
- 213 Andrews-Speed，《中国的能源治理》，130 - 3。
- 214 作者与中国电力规划专家的谈话记录，2016年。
- 215 作者与中国企业高管和政府官员的谈话记录，2012年和2015年；Andrews-Speed，《中国的能源治理》，第90页。
- 216 Rutkowski，《中国核电经济学》。中国核电厂的贴现率为5%，运营成本与燃煤电厂相当；如果贴现率提高到10%，燃煤电厂的运营成本只有核电厂的1/8。
- 217 一则援引中国核能行业协会的资料[徐玉明，“福岛核事故后中国核电的发展”，2013年5月]显示，即将建成的AP1000的上网电价为0.45元/千瓦时或更高，略高于中国核电平均水平，如果后续机组的资本成本较低，上网电价将降至0.42元/千瓦时：参见《核电经济》，世界核协会，2017年11月，<http://www.world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx>。
- 218 作者与中国企业官员的谈话记录，2016年。
- 219 Andrews-Speed，《中国能源治理》，第67页。
- 220 一些来自中国的资料显示，国家发改委此时不愿上调工业用电价格，而工业用电占

- 中国发电量的70%。
- 221 新华社, “习近平强调能源领域改革的工作”, 《中国日报》, 2014年6月14日, http://china.org.cn/business/2014-06/14/content_32663506.htm。
- 222 Deborah Seligsohn, “中国国务院公布40~45%碳强度目标”, “洞见(博客)”, 世界资源研究所, 2009年11月26日, <http://www.wri.org/blog/2009/11/china%E2%80%99s-state-council-unveils-40-45-carbon-intensity-target>。
- 223 “中国立法机关批准气候变化《巴黎协定》”, 新华网, 2016年9月3日, http://news.xinhuanet.com/english/2016-09/03/c_135656703.htm。
- 224 南周, 等, “2050年中国能源和碳排放展望”, 劳伦斯伯克利国家实验室, 2011年4月, <https://china.lbl.gov/sites/all/files/lbl-4472e-energy-2050april-2011.pdf>, 第53页。
- 225 能源研究所, 劳伦斯伯克利国家实验室和洛基山研究所, 《重塑能源: 中国》, 洛基山研究所, <https://rmi.org/insights/reports/reinventing-fire-china/>。
- 226 洛基山研究所于2015年9月介绍了这项研究的结果: “为清洁空气和改善城市气候, 实现中国电力部门的去碳化。” , 威尔逊中心, 2015年9月29日, <https://www.wilsoncenter.org/event/decarbonizing-chinas-power-sector-for-cleaner-air-and-climate-smart-cities>。
- 227 何刚, 蒋林, 亚历山大·袁, “中国经济再平衡与电力需求”, 2。
- 228 同上, 第12页。
- 229 作者与中国电力规划专家的谈话记录, 2016年。
- 230 何刚, 蒋林, 亚历山大·袁, “中国经济再平衡与电力需求”, 第11页。
- 231 作者与中国企业管的谈话记, 2016年。
- 232 作者与中国电力规划研究官员的谈话记录, 2016年。
- 233 Emma Richardson, “挡在中国可再生能源整合前的长城”, 澳大利亚能源委员会, 2016年8月11日, <https://www.energycouncil.com.au/analysis/china-s-struggle-to-integrate-renewables/>。
- 234 Thomas Rawski, “中国电力行业的成长、升级和过剩成本”(待发表, 匹兹堡大学经济系, 2017年), 第16 - 18页。
- 235 C. F. Yu, “中国电力表面增长下的担忧”, 《核情报周刊》, 2016年1月29日, 第7页; C. F. Yu, “北京起草规定, 将反应堆置于负荷跟随模式”, 《核情报周刊》, 2016年8月19日, 第3页。
- 236 Kimfeng Wong, “煤炭因核能和可再生能源失去了较多的市场份额”, 《核情报周刊》, 2016年2月19日, 第6页。
- 237 中国核能行业协会, “2016年中国核电运行情况报告” [中文], 2017年2月3日, 中

- 国电力, http://www.chinapower.com.cn/informationzxbg/20170203/79658_4.html。
- 238 John A. Mathews and Hao Tan, “中国电力行业持续绿色转型: 2016年的数据”, 《亚太杂志》, 15, 第10卷第4期(2007年5月15日): <https://apjpf.org/-John-A--Mathews--Hao-Tan/5038/article.pdf>。
- 239 Thomas Rawski, “中国电力行业的增长、升级和超额成本”。
- 240 作者与中国核研发官员的谈话记录, 2017年3月; 与中国核工业高管的谈话记录, 2016年。
- 241 作者与中国核电企业高管的谈话记录, 2016年9月。
- 242 Sauvage, “RNR-Na原型堆”, 第4页。
- 243 Thomas B. Cochran, 等, “快堆计划: 历史与当前状态”, 国际易裂变材料小组, 2010年, <http://fissilematerials.org/library/rr08.pdf>, 第10页。
- 244 Arthur Jobert和Claire le Renard, “原型堆框架: 法国的快堆(1950—1990年代)”, 《科学与技术研究》, 第2期(2014年): 21 - 2。
- 245 Sauvage, “RNR-Na原型堆”。
- 246 H. Ohshima和S. Kubo, “钠冷快堆”, 日本原子能机构, 2012年2月, <https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2012/2012-02-27-29-TM-FR/8-S.Kubo.pdf>。
- 247 作者与中国核企业高管的谈话记录, 2016年。
- 248 柏林卡内基研讨会参加者, 2016年5月; 美国快堆国家实验室专家, 2016年。
- 249 杨, “中国快堆的经济问题”。
- 250 作者与中国核研究与发展官员的谈话记录, 2015年。
- 251 杨, “中国快堆的经济问题”。
- 252 Matthew Bunn, Hui Zhang, Li Kang, 《中国后处理的成本》, 原子管理项目, 哈佛大学贝尔弗科学与国际事务中心, 2016年1月, <http://www.belfercenter.org/sites/default/files/legacy/files/The%20Cost%20of%20Reprocessing.pdf>。
- 253 Phil Chaffee, “阿海珐与中核集团对话的背后”, 《核情报周刊》, 2016年5月6日, 第8页。
- 254 Bunn, Zhang, Kang, 《中国后处理的成本》, 第45页。
- 255 作者与中国官员的谈话记录, 2012年。
- 256 “阿海珐表示很快就会对中国后处理厂作出决定”, 路透社, 2017年5月18日, <https://www.reuters.com/article/us-china-nuclear-areva/areva-says-decision-on-china-nuclear-reprocessing-plant-expected-soon-idUSKCN18E0QK>。

- 257 阿海珐的外国客户也对后处理费用表示了类似的担忧，因为他们的国家法律规定，合同必须包括后处理服务。事实上，后处理是垄断行业。
- 258 C. F. Yu, “中国的三大企业推动燃料生产发展”，《核情报周刊》，2016年8月18号，第3页。
- 259 C. F. Yu, “中广核寻求后端技术”，《核情报周刊》），2016年11月28日，第4 - 5页。
- 260 Bunn, Zhang, Kang, 《中国后处理的成本》，第55页。四十多年来，中国一个年产量800MTHM 的后处理厂，资本和运营的总成本估计在270亿美元到800亿美元之间。相比之下，干法贮存的成本仅为64亿美元。
- 261 Bunn, Zhang, Kang, 《中国后处理的成本》，第59页。哈佛大学的这个估算是针对年产量为800 MTHM的后处理厂。
- 262 作者与中国核专家的谈话记录，2015年和2016年。
- 263 经合组织核能署，《核燃料循环后端的经济学》（巴黎：经合组织，2013年），www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2013/7061-ebenfc.pdf，第107页。
- 264 同上，第141页。
- 265 徐銖，“中国快堆技术发展：现状与展望”，《工程科学》，第5卷，第4期（2007年12月）：第76-83页。
- 266 许一忠，《电力之弦：中国国家电网有限公司的政治学》（牛津：牛津大学出版社，2017年），25 - 7。
- 267 张弛，《中国能源外交的国内动力》（新加坡：世界科学出版社，2016年），90 - 8。
- 268 经合组织核能署和国际原子能机构，《2016年铀动态：资源，产量及需求》（巴黎：经合组织和国际原子能机构，2017年），第207页，<https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2016/7301-uranium-2016.pdf>，207。经合组织和国际原子能机构在2016—2017年把这些估算称为“预计算”。行业分析师在2018年2月告诉作者，2000年中国的需求可能会低于10100吨铀，经合组织/国际原子能机构给出的2035年低估值，是针对中国核电装机容量约80 Gwe的水平而估算的。这个水平表示，从现在到2035年，中国核电产能扩张的速度明显减少。另外，经合组织/国际原子能机构估计中国2020年的铀需求在6400~9680吨铀之间（同上，第99页）。
- 269 同上。
- 270 Tamara Patton Schell, “中国铀治理”，斯德哥尔摩国际和平研究院和丹麦国际研究所，2014年，http://pure.diis.dk/ws/files/104212/DIIS_Report_2014_3_final1703web_pdf.pdf，第9页。
- 271 经合组织核能署/国际原子能机构，《2016年的铀动态》，第120页。

- 272 Ian Hiscock, “丝绸之路黄饼贸易及其对中国库存的影响”, CRU国际有限公司, 2016年2月18日, <https://www.crugroup.com/knowledge-and-insights/insights/silk-road-yellowcake-trade-and-its-impact-on-chinese-stockpiles/>。
- 273 同上。
- 274 同上。这些分析师预测, 中国可能会继续大举增加库存, 直到2005年左右, 然后开始减少。到本世纪30年代, 中国可能会保存三年的需求, 这是美国、欧洲和亚太其他地区目前的水平。
- 275 Kevin Pang, “2015年中国的黄饼进口下降了10%”, 《核情报周刊》, 2016年1月9日, 第4页。
- 276 经合组织核能署/国际原子能机构, 《2016年的轴动态》。
- 277 根据《欧洲原子条约》, 法国和英国有义务实施欧洲原子保障措施; 原则上, 条约成员国家的所有核材料都由欧洲委员会保管。
- 278 所有这些条件都包括在当前的中美民用核合作双边协议中: “中美核合作协议综述”, 外交事务委员会联合听证会, 美国众议院, 第114次国会, 2015年7月16日, <http://docs.house.gov/meetings/FA/FA05/20150716/103718/HHRG-114-FA05-Transcript-20150716.pdf>。
- 279 作者与欧盟和法国官员的谈话记录, 2010年。这些资料给出了法国和阿海珐集团不向中国提供PUREX流程后处理厂的国家安全理由, 因为该工厂将建在中国军事基地相反, Bunn, Zhang和Kang的《中国后处理的成本》引用中国的资料指出, 中国不会允许外国后处理厂建在中国的军事基地, 以免外国获取中国核武器计划相关的机密信息。一位中国专家在2016年告诉作者, 这座年产200万吨的后处理厂没有选址在酒泉, 因为他们认为存在地震风险; 2016年, 西方政府官员驳斥了这种说法; 他们还表示, 与法国对待阿海珐后处理厂的态度一样, 比利时反对中国将比利时核工业提供的钚燃料加工设备部署在酒泉军事基地。
- 280 作者与西方政府官员的谈话记录, 2016年。
- 281 作者与欧洲政府官员的谈话记录, 2016年。
- 282 美联社, “美国官员批评东亚的核后处理计划”, 《南华早报》, 2016年3月8日, <http://www.scmp.com/news/asia/east-asia/article/1927023/us-official-criticises-east-asia-plans-nuclear-reprocessing>。
- 283 马克·希布斯, Tamara Patton Schell, Cindy Vestergaard, “中国的防扩散机遇”, 丹麦国际问题研究所, 2014年3月14日, <https://www.diis.dk/en/research/chinas-non-proliferation-opportunity>。
- 284 张辉和张拓生, “保护中国的核未来”, 哈佛大学贝尔弗科学与国际事务中心, 2014年3月, <https://www.belfercenter.org/sites/default/files/legacy/>

- files/securingchinasnuclearfutureenglish.pdf, 第27 - 52页。
- 285 联合国教育、科学及文化组织 (UNESCO), 《联合国教科文组织科学报告: 迈向2030年》(巴黎: 联合国教科文组织, 2015年11月), 第639页。
- 286 潘伟民, 戴建平, “基于线性加速器的加速器驱动次临界系统”, 《加速器科学与技术综述》, 第8卷: 能源和安全领域的加速器应用, 亚历山大.W.周, 周伟仁, 编(新加坡: 世界科学出版社, 2015年), 第58-60页。
- 287 D. Zhang, “第四代反应堆的概念”, 《第四代核反应堆手册》, Igor L. Pioro编。英国剑桥: 伍德海德出版社, 2016年), 第374页。
- 288 “核燃料循环技术发展战略”, 《中国科学院院刊》, 第29卷, 第3期(2015): 167-9。
- 289 同上。
- 290 Cong Cao, Richard P. Suttmeier, Denis Fred Simon, “中国十五年科技规划纲要”, 《今日物理》, 2006年12月, 第38-43页, <https://pdfs.semanticscholar.org/8eb4/9bfcd640b13fa06f2415ea9aa4643067147.pdf>。
- 291 Valerie J. Karplus, “中国能源领域的创新”, 斯坦福大学能源和可持续发展计划, 2007年3月, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.394.2919&rep=rep1&type=pdf>, 第30页。
- 292 经合组织, 《经合组织对全球创新政策的评论: 中国(2008年)》(巴黎: 经合组织, 2008年8月), 489 - 90, http://www.keepeek.com/Digital-Asset-Management/oecd/science-and-technology/oecd-reviews-of-innovation-policy-china-2008_9789264039827-en#.Wa2U5MfUBFI。
- 293 David Cyranoski, “中国竞争资金的根本性改革”, 《自然》(博客), 2014年10月23日, <http://blogs.nature.com/news/2014/10/fundamental-overhaul-of-chinas-competitive-funding.html>。
- 294 D. Zhang, “第四代反应堆的概念”, 《第四代核反应堆手册》, Igor Pioro编(英国剑桥: 伍德海德出版社, 2016年), 第374页。
- 295 同上。
- 296 “天津发生剧烈爆炸后, 中国开始在全国范围内进行核安全检查”, 《南华早报》, 2015年9月15日, <http://www.scmp.com/news/china/policies-politics/article/1858284/china-begins-nationwide-nuclear-safety-checks-after>。
- 297 “国际核安全专家总结国际原子能机构对中国监管体系的同行评审”, 国际原子能机构, 2010年7月30日, <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/international-nuclear-safety-experts-conclude-iaea-peer-review-chinas-regulatory-system>。

- 298 作者与美国政府官员的谈话记录，2010年。
- 299 “2015年国家核安全局报告” [中文]，国家核安全局，2015年，http://nnsa.mep.gov.cn/ywdh/ywjyfk/201508/t20150814_308166.html。
- 300 作者与西方政府核监管主席的谈话记录，2017年2月。
- 301 “中国核反应堆数量将位居世界第二，中国正在考虑制定核安全法”，《环球时报》，2016年11月30日，<http://www.globaltimes.cn/content/1021164.shtml>。
- 302 “中国立法机关通过核安全法”，《路透社》，2017年9月1日，<https://www.reuters.com/article/us-china-nuclearpower/chinas-legislature-passes-nuclear-safety-law-idUSKCN1BC4ER>。
- 303 宋明海，“新核电厂设计常见失效原因分析之我见”，国际原子能机构，无日期，<https://nucleus.iaea.org/sites/gsan/act/psafornewnpps/Papers/P11%20-%20Insights%20of%20Common%20Cause%20Failure%20Analysis%20for%20New%20Nuclear%20Power%20Plants-Song%20Minghai.pdf>。
- 304 “2016年国家核安全局报告” [中文]，国家核安全局，2016年，http://nnsa.mep.gov.cn/ywdh/ywjyfk/201508/t20150814_308166.html。
- 305 “国际核增长刺激美国经济”，杜克能源核信息中心，2012年12月12日，<https://nuclear.duke-energy.com/2012/12/12/international-nuclear-growth-spurs-u-s-economy>。
- 306 “全球化竞争”，核能研究所，<https://www.nei.org/advocacy/compete-globally>。
- 307 国家安全委员会，“和平利用原子能”，NSC 5507/2，1955年3月12日，美国国会，<https://history.state.gov/historicaldocuments/frus1955-57v20/d14>；Peter R. Lavoy，“和平利用原子能计划的深远影响”，军备控制协会，2003年12月1日，https://www.armscontrol.org/act/2003_12/Lavoy。
- 308 Lavoy，“和平利用原子能计划的深远影响”。
- 309 马克·希布斯，“电力循环：中国向巴基斯坦提供核反应堆”，《简氏情报评论》，2014年1月，50-3。
- 310 Stephen Stapczynski，“美国的阴谋指控使中国的核电领先地位受到关注”，《彭博社》，2016年3月15日，<https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-04-15/u-s-conspiracy-charges-put-spotlight-on-china-nuclear-champion>；David Voreacos, David McLaughlin，“美国联邦调查局档案显示，中国公司向美国专家施压以获取核机密”，《彭博社》，2016年8月25日。<https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-08-25/fbi-files-say-china-firm-pushed-u-s-experts-for-nuclear-secrets>。

- 311 “自主研发的第三代反应堆‘华龙一号’技术通过国家评审”，中广核集团信息发布会，2014年8月22日，<https://en.cgnpc.com.cn/n1305391/n1305406/c1041512/content.html>；“中国最大的两家核公司将组建合资公司出口‘华龙一号’反应堆”，《路透社》，2015年10月22日，<http://uk.reuters.com/article/uk-china-nuclear-idUKKCN0SG16220151022>。
- 312 Graham Ruddick, Tom Phillips, “中国四年后才能对布拉德韦尔核电厂作出决定”，《卫报》，2016年9月16日，<https://www.theguardian.com/uk-news/2016/sep/16/china-must-wait-four-years-for-decision-on-bradwell-nuclear-plant>。
- 313 “电力规模的发电厂法资本成本估算”，美国能源部能源信息管理局，2016年11月19日，https://www.eia.gov/outlooks/capitalcost/pdf/updated_capcost.pdf；另见：“核电经济学”，世界核协会，2017年8月，<http://www.world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx>。
- 314 Jeremy Kang Deng, “中国计划如何执行核电‘一带一路’？”，LinkedIn，2016年1月7日，<https://www.linkedin.com/pulse/how-china-planning-execute-one-belt-road-nuclear-jeremy-kang-deng>。
- 315 20世纪90年代，中国曾与台湾接触，提出将台湾的核废物运往中国大陆处理的非正式提议，以化解台湾因当地反对在台湾处置核废物而引发的政治危机。中国大陆方面曾表示，转移条件是台湾必须承认台湾主权受到限制，台湾拒绝了中国大陆的提议。（作者与台湾核企业高管和政府官员的谈话记录，台北，2001年）。
- 316 Jinxin Zhu, Gail Krantzberg, “中国内陆核电厂规划变更的政策分析”，《环境系统研究》，第3卷，第1期，（2014年）：<https://environmentalsystemsresearch.springeropen.com/articles/10.1186/2193-2697-3-10>。
- 317 政策研究人员、国务院和全国人大代表在2014年北京举行的第一次卡内基研讨会上的发言；另见周凌义和戴义新，“公众对雾霾看法如何影响其接受拥堵收费政策？”；《可持续发展》，第9卷，第9期（2017年9月）。
- 318 美联社，“中国发生恐慌——日本核威胁导致中国抢购食盐”，《卫报》，2011年3月17日，<https://www.theguardian.com/world/2011/mar/17/chinese-panic-buy-salt-japan>。
- 319 Yin Yijun and Fan Yiyong, “连云港反核废物抗议活动演变为暴力冲突”，六音博客，2016年8月9日。<http://www.sixthtone.com/news/violent-crackdown-doesnt-deter-nuclear-waste-protest>。

- 320 Hiroshi Onitsuka, 《沉迷核电：日本的州与地方关系与核依赖的恶性循环》，《亚太杂志》，第10卷，第2期（1970年1月）：<http://apjjf.org/-Hiroshi-Onitsuka/3676/article.pdf>。
- 321 同上。
- 322 “中国和世界核电的未来：政策背景”，卡内基研讨会，北京，2014年8月25-26日。
- 323 “关于核电未来的联合建议”，中国工程院、法国国家技术研究院和法国科学院，2017年8月31日，第62页。
- 324 同上。
- 325 “未来中国核电技术的选择”，卡内基研讨会，厦门，2015年5月22-23日。
- 326 Gordon C. Chang, 《中国即将崩溃》（纽约，兰登书屋，2001年）；马丁·雅克，《当中国统治世界：西方世界的终结和全球新秩序的诞生》（纽约：企鹅出版社，2009年）。
- 327 David Shambaugh, 《中国的未来》（英国剑桥：政体出版社，2016），第31页，第40页。
- 328 同上，第23页；张明，王文文，“中国电力消费与经济增长脱钩的分析”，《南部非洲能源杂志》24日，第2期（2013年5月）：<http://www.scielo.org.za/pdf/jesa/v24n2/07.pdf>。
- 329 C. F. Yu, “中核集团与中核建集团合并，标志着中国核工业进入新时代”，《核情报周刊》，2017年3月24日，第3页；C. F. Yu, “中核集团与中广核集团联合组建华龙合资公司”，2016年1月8日，第5页。
- 330 Wendy Leutert, “中国国有企业改革面临的挑战”，布鲁克林研究所，2016年12月，<https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2016/07/Wendy-Leutert-Challenges-ahead-in-Chinas-reform-of-stateowned-enterprises.pdf>，第83-99页。
- 331 Michael Martina, “欧盟商业组织抨击北京的‘中国制造’计划”，《路透社》，2017年3月7日，<https://www.reuters.com/article/us-china-eu-business/eu-business-group-slams-beijings-made-in-china-plan-idUSKBN16E0A2>。
- 332 Michael Pettis, “改革对经济增长的影响”，中国财经市场（博客），卡内基国际和平研究院，2014年1月29日，<http://carnegieendowment.org/2014/01/29/impact-of-reform-on-growth-pub-54358>。
- 333 日本和韩国的政府和行业可能会在世界贸易组织，因中国准备进入全球核电设备市场而向中国发起挑战（作者与日本和韩国政府官员的谈话记录，纽约，2011年；首尔，2014年）。
- 334 Kevin Jianjun Tu, David Livingston, “温州核事故显示出中国核电计划的危险

- 性”，詹姆斯顿基金会，2011年7月29日，<https://jamestown.org/program/wenzhou-crash-shows-the-dangers-of-chinas-nuclear-power-ambitions/>。
- 335 卡内基研究院中国核专家的讲话，北京，2014年4月。
- 336 据国家能源局统计，2015年中国电力消费增长0.5%，新增装机容量增长24.2%（Phil Chaffee，“核电需求下降的现实考验”，《核情报周刊》，2016年6月10日，第3页）。
- 337 “未来中国核电技术的选择，卡内基研讨会，厦门，2015年5月22-23日。
- 338 2016年，所有大型国有核电企业的债务与资产比率都达到或超过国资委75%的上限：国家电力投资公司（SPI）为84%，中广核集团为75%，中核集团为79%。（C. F. Yu，“SPI关注香港证券交易”，《核情报周刊》，2016年2月26日，第6页）。中国核工业建设集团有限公司（CNEC）在2017年与中国核工业集团公司）合并前的最后五年里，负债率超过87%。（C. F. Yu，“CNEC上市面临挑战”，《核情报周刊》，2016年5月27日，第4页。）
- 339 Chaffee，“核电需求下降的现实考验”。
- 340 C. F. Yu，“电力市场解放——核电面临更多挑战？”《核情报周刊》，2016年6月24日，第6页；C. F. Yu，“2016年令人失望，但有望取得进展”，《核情报周刊》，2017年1月6日，第6页。
- 341 Romanello等人，“可持续性核燃料循环”，第1页，224 - 5。
- 342 Bernard Bigot 在快堆和相关燃料循环国际会议上的发言，巴黎，2013年3月4日。
- 343 作者与中国核电企业高管的谈话记录，北京，2015年和2016年。
- 344 张，“中国快堆发展战略”。
- 345 中国核专家在“中国与世界的核电未来：后处理与快堆”卡内基研讨会上的发言，柏林，2016年5月31日至6月1日。
- 346 核燃料循环皇家委员会，《核燃料循环皇家委员会年终报告》（阿德莱德：南澳大利亚政府，2016年5月），https://yoursay.sa.gov.au/system/NFCRC_Final_Report_Web.pdf，第82页。
- 347 “中国与世界的核电未来：后处理与快堆”，卡内基研讨会，柏林，2016年5月31日至6月1日。
- 348 Andrew J. Nathan，“中国：高层斗争”，《纽约书评》，2017年2月9日，<http://www.nybooks.com/articles/2017/02/09/china-struggle-at-the-top/>，第36页。
- 349 作者与中国核研发官员的谈话记录，2015年。
- 350 C. F. Yu，“中广核寻求后端技术”，《核情报周刊》，2016年11月28日，第4 - 5页。

351 “中国与世界的核电未来：后处理与快堆”，卡内基研讨会，柏林，2016年5月31日至6月1日。

卡内基国际和平研究院

卡内基国际和平研究院是一个全球性的、别具特色的政策研究网络，在俄罗斯、中国、欧洲、中东、印度和美国分别设有研究中心。100多年来，我们通过剖析和推广新的政策理念、与政府、商界和社会团体的决策者直接接洽和合作，履行促进和平事业的使命。下属各个中心通力合作，围绕双边、地区和全球问题，呈现各国观点，使世人受益良多。

卡内基核政策项目是一个国际知名的资讯来源，提供核行业、核不扩散、核安保及核裁军等领域的专业知识和政策分析。在美国、俄罗斯、中国、东北亚、南亚和中东的核政策问题的研究领域，其国际化的研究团队始终站在最前沿。

北京 贝鲁特 布鲁塞尔 莫斯科 新德里 华盛顿

全球智库



卡内基
国际和平
研究院

CarnegieEndowment.org