

小型堆研发及核应急准备进展

曲静原¹, 张琳^{1,2}, 黄挺³

1. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084
2. 环境保护部核电安全监管司, 北京 100035
3. 国核华清(北京)核电技术研发中心有限公司, 北京 100190

摘要 小型核反应堆具有良好的安全特性、模块化建造方式和广泛的应用领域, 已成为国际上重要的核能研发工作。相对于百万千瓦级大型核电站而言, 外部约束条件(应急计划是其中之一)对小型堆的经济性具有更大的影响, 尤其是对需要靠近用户的小型核反应堆(例如供水、供热等)更是如此。作为克服这种约束条件的一个重要策略, 小型核反应堆在设计上追求更高的安全特性。对于需要靠近用户的小型核反应堆(例如供热、供汽等), 将应急计划区限制在厂址范围之内, 对保障小型核反应堆的经济性和增强公众的接受性非常有益。事实上, 许多小型核反应堆都将烟羽应急计划区限制在厂址边界作为重要的设计目标之一。从目前经验看, 完全取消小型核反应堆的场外应急准备的可能性不大, 但考虑其安全特性、简化小型核反应堆的应急准备是国际上的共识。介绍了小型核反应堆的研发现状, 讨论了大型核电机组与小型核反应堆应急计划在理念和实现方式上的差别, 分析了国际上有关小型核反应堆应急准备简化的有关讨论和实践。

关键词 小型核反应堆; 核应急; 应急准备; 应急计划区

中图分类号 TL48

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.35.013

Emergency Preparedness for Small Modular Reactors

QU Jingyuan¹, ZHANG Lin^{1,2}, HUANG Ting³

1. Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China
2. Department of Nuclear Safety Management, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100035, China
3. State Nuclear Power Technology Research & Development Centre, Beijing 100190, China

Abstract Small modular reactors (SMRs) have been an important international R&D activity because of their inherent safety features, modular construction approach and wide application perspectives. Compared with large scale nuclear power plants (e.g. 1000MWe light water reactor units), the economic performance of SMRs will be more sensible to outside constraints. It is especially the case for SMRs located in the very vicinity of the potential users. One of the possible constraints involves nuclear emergency preparedness and response. It would be very beneficial to the economic performance and the public acceptance towards SMRs if the plume emergency planning zones of them could be limited to their site boundaries. In fact, many concepts of SMRs have put this as one of their important design goals. Considering the factors in emergency planning, it would be currently not feasible to eliminate off-site emergency preparedness. However, it has been an international consensus that emergency planning could be simplified. For example, the emergency planning zones for SMRs may be significantly smaller than that for large scale light water nuclear power plants. This paper describes the current status of international R&D activities in the field of SMRs. The concepts and approaches governing the emergency planning in support of large light water reactors and SMRs are discussed. Relevant discussions and practice concerning simplification of emergency preparedness for SMRs are also briefly presented.

Keywords small modular reactor; nuclear emergency; emergency preparedness; emergency planning zone

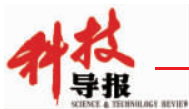
0 引言

大型化是提高核电经济竞争能力的重要手段之一。20世

纪70年代, 核电机组的平均容量达到约1000MWe, 这种大型机组主要用来提供基荷用电。近年来, 国际上对小型模块式

收稿日期: 2013-07-12; 修回日期: 2013-09-05

作者简介: 曲静原, 研究员, 研究方向为核安全与辐射防护, 电子邮箱: qujyuan@tsinghua.edu.cn



反应堆(以下简称“小型堆”)开展了大量的研究,希望这种小型堆能更好地适应工业国家的电力负荷需求,以及满足许多发展中国家的电力需求^[1-3]。

据 IAEA 统计,目前全世界正在运行的中、小型反应堆近 150 台,拥有中、小型反应堆的国家有 31 个,这些中、小型反应堆的总容量超过 60000MWe,累计运行经验达 5000 堆·年以上^[4]。中国有关部门和机构也非常关注小型堆的研究和应用前景,正在开展相关的研究和技术开发工作。

相对于百万千瓦级的大型核电站而言,外部约束条件(应急计划是其中之一)对小型堆的经济性具有更大的影响,尤其是对需要靠近用户的小型堆(例如供水、供热等)更是如此。作为克服这种约束条件的一个重要策略,小型堆在设计上追求更高的安全特性。事实上,许多小型堆都将烟羽应急计划区限制在厂址边界作为重要的设计目标之一。

1 研发现状

按照美国能源部(DOE)的定义^[4],小型堆指功率不超过 300MWe 的反应堆。小型堆的类型有轻水反应堆、气冷堆、快堆等。小型堆具有多用途特点,在发电、制氢、海水淡化、供热的多个方面可以灵活部署。小型堆普遍采用一体化设计,将堆芯、控制棒、蒸汽发生器、稳压器都集成于反应堆压力容器内,取消了一回路管道,可以从根本上避免一回路大破口事故。小型堆采用模块化制造与安装,反应堆压力容器和安全壳共同构成一个模块,模块可在工厂集中加工制造,在建造地点就地组装。小型堆施工周期短,同一厂址内可以分期分批建设,一次性投资风险较小,在远离主电网地区或发展中国家优势突出^[1-3]。

1.1 美国

美国有多家公司都在开展小型模块堆的研究和开发工作^[5],主要有西屋公司、巴威公司、NuScale Power 公司等。

西屋公司(Westinghouse Electric Corporation)在现有国际革新安全反应堆(International Reactor Innovative and Secure, IRIS)的基础上,正致力于研究一种新型的、具有更强经济竞争性的小型堆。这种小型堆的热功率为 800MW,电功率为 225MW,具有非能动安全特性,并且在事故中可在 7 天无干预情况下保持安全状态。此外,由于其安全壳完全置于地下,所有安全系统都在厂房的保护中,降低了安全系统失效的可能性。西屋公司已经完成这种堆型的概念设计,未来将成为其小型堆的主力堆型。IRIS 的设计于 2001 年完成,2002 年 10 月向美国核管会申请了预申请许可并获批准^[6-8]。IRIS 为压水堆型,采用一体化的反应堆冷却剂系统布置,反应堆压力容器不仅包容了核燃料和控制棒,而且还将冷却剂系统的主要部件容纳在其内部,包括冷却剂泵、蒸汽发生器、稳压器、控制棒驱动机构和中子反射层,是一种新型的一体化小型堆。IRIS 最引人注目之处在于它的“设计保障安全”的设计思想,这对于日渐提高的反应堆安全性要求具有重要意义,同

时也是 IRIS 的显著特点。

2009 年 6 月,巴威公司(B&W)首次公布所开发的一体化小型压水堆 mPower(125MWe)。经过一系列设计修改后,又开发了 160MWe 的 mPower 反应堆,计划于 2013 年底前向核管会提交设计认证申请。mPower 的堆芯和蒸汽发生器位于一体化反应堆压力容器内,安全壳整体位于地下,可存储全寿期全部乏燃料,并配置有非能动安全系统。2010 年 7 月,B&W 公司正式宣布与 Bechtel 公司联合,成立了 Generation mPower 公司,同时宣布在弗吉尼亚州贝德福德郡的先进设计研究中心,将为 mPower 反应堆设计建造实验设备。2011 年 4 月,B&W 公司开始建造实验设备;2011 年 6 月,Generation mPower 公司与田纳西河流域管理局签订意向书,计划在田纳西州克林奇河增殖反应堆厂址,建设 6 个 mPower 反应堆^[9]。

NuScale Power 公司开发了 45MWe 的 NuScale 反应堆^[10]。NuScale 反应堆来源于 DOE 资助的核能创新研究项目 MASLWR(Multi-Application Small Light Water Reactor),该项目于 2003 年完成。2005—2007 年,俄勒冈州立大学对 MASLWR 进行了验证和改进^[11,12]。2007 年,NuScale Power 公司推出了基于 MASLWR 的一体化自然循环多用途模块化小型轻水反应堆 NuScale。NuScale 反应堆非常重视一体化、主回路全功率自然循环、小型模块化和非能动等概念。在安全性方面,NuScale 反应堆尽可能使用非能动技术。例如,全功率堆芯自然循环冷却、安全壳置于地下水池、自然循环余热载出等。2012 年 1 月,NuScale Power 公司向美国核管会(NRC)提交了设计认证申请^[5,13]。

1.2 俄罗斯

俄罗斯国家原子能公司(ROS ATOM)开发的小型模块化铅铋快堆 SVBR-100,采用铅铋共晶合金冷却,热功率为 280MW,电功率为 101MW,设计运行寿期 60 年,换料周期 7~8 年。2009 年,俄罗斯国家原子能公司和 En+集团共同出资成立 AKME 工程公司,目标是实现 SVBR-100 小型快堆技术的商业化。AKME 的计划是在 2017 年年底之前完成设计研发工作,并建成 100MWe 示范电厂。

除 SVBR-100 外,俄罗斯小型压水堆 KLT-40 是用于破冰船上的反应堆,也用于偏远地区的电力供应,它具有 30~35MWe 的发电容量以及 20MW 供热能力^[9]。

1.3 其他国家

日本原子能机构(JAEA)开发的 MRX 是一体化压水堆(50~300MWt),用于海上推进动力或地区电力供应(30MWe)。MRX 的设计寿命是 60 年,换料周期为 3 年^[9]。

韩国的小型压水堆 SMART 的热功率为 330MW,设计用于发电或供热。SMART 的设计寿命是 60 年,换料周期为 3 年^[9]。

法国原子能技术公司(AREVA TA)开发了 NP-300 型压水堆,用于供热和海水淡化的出口市场。可以建成 100~300MWe 的电厂或产量达到 50000m³/d 的海水淡化厂^[9]。

此外,中国和有关国家也在积极研发小型堆。

2 核应急准备

2.1 应急计划区

核设施的应急准备和应急响应涉及众多因素,其中应急计划区(Emergency Planning Zone, EPZ)的尺度是决定核设施应急准备工作性质和范围的重要基础,也是决定应急响应效能的重要前提。

1978年,美国NRC和EPA在联合发表的NUREG-0396报告中,详细阐述了应急计划区划分的原则和技术基础,并在此基础上形成了应急计划区的划分方法和技术准则^[14]。NUREG-0396所阐述的应急计划区的划分原则和方法是国际上的代表性方法,也是中国相关法规标准所采用的原则和方法^[15]。

NUREG-0396报告认为,制定计划的距离与主要照射途径密切相关。因此,按照不同的照射途径可以建立两种类型的应急计划区,即烟羽应急计划区和食入应急计划区。通过对设计基准失水事故(DBA-LOCA)和堆芯熔化事故谱的后果进行了评价,并且在此基础上,根据应急计划区划分的技术准则以及相应的防护行动指南值(PAG),确定了16km的烟羽EPZ和80km的食入EPZ。

图1给出了对烟羽EPZ的计算结果^[16]。可以看到,在距事故反应堆16km处,堆芯熔化事故产生的全身剂量在70%的情况下不会超过10mSv,这说明大多数严重事故序列在该距离处产生的预期剂量不会超过相应的PAG,满足美国烟羽EPZ划分准则中对大多数严重事故的要求。在核电站附近距离内,堆芯熔化事故可以导致非常严重的后果,但是超过较大剂量(如2Sv)的条件概率在距反应堆16km处很小(在0.01~0.001之间),并且随距离增加大幅度下降,即在16km以外一般不会产生对生命立即有威胁的剂量,这满足美国烟羽EPZ划分准则中对最严重事故的要求。

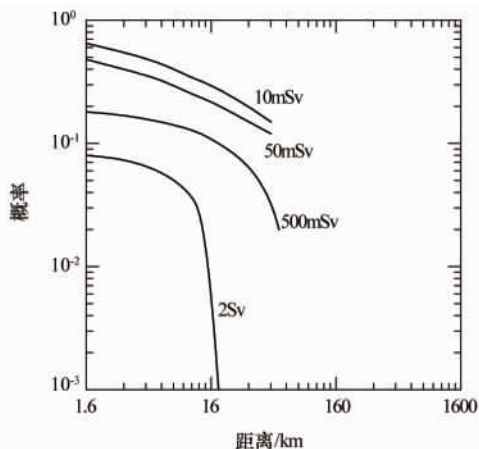


图1 堆芯熔化事故情况下全身剂量超过指定剂量的条件概率
Fig. 1 Conditional probability of exceeding the specified whole body dose during the core-melt accidents

图1表明,16km的烟羽EPZ能够基本覆盖严重确定性效应可能发生的距离范围,但对于随机性效应而言,在这个距离范围只能覆盖一定的条件概率。显然,如果提高随机性效应的覆盖条件概率,烟羽EPZ的范围将远远超出16km,所产生的代价将是非常大的。因此,对于大型压水堆(至少针对目前大多数在运大型核电机组)而言,在场外建立EPZ是必然的,同时由于代价的限制,烟羽EPZ限于覆盖严重确定性效应和高随机性效应风险的有限距离范围^[16]。

相对于大型核电机组而言,小型堆具有更好的安全特性,同时其功率水平远低于前者,由此决定了其EPZ小于前者。在美国,核管会(NRC)要求所有商业核电站都必须建立16km半径的烟羽EPZ和80km半径的食入EPZ。同时,对于气冷堆和250MW以下热功率水平的反应堆,EPZ尺度可通过具体论证确定^[17]。

实际上,将烟羽EPZ限制在厂址边界内是许多小型堆的重要设计目标之一。DOE提出的模块式高温气冷堆(MHTGR)设计就是一个典型的代表,这个设计的技术目标之一是将烟羽EPZ限制在禁区边界(EAB)以内^[18]。

图2给出了MHTGR审评基准事件(LBE)后果与TLRC的比较^[16],计算结果表明^[17],MHTGR所有设计基准事件(DBE)和应急计划基准事件(EPBE)在EAB处的全身剂量无论均值还是保守值(95%气象条件下的剂量)均不超过10mSv,而且能够满足顶层要求准则(TLRC)中的其他相关要求。

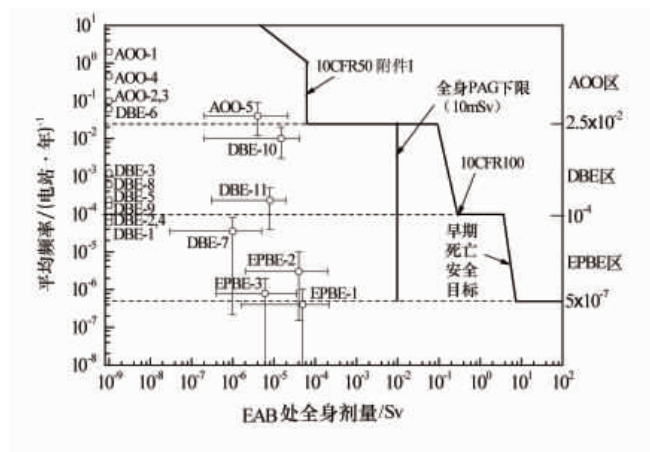


图2 MHTGR 审评基准事件后果与 TLRC 的比较
Fig. 2 Consequences of the LBEs for MHTGR compared with TLRC

NRC认为,小型堆的应急计划应考虑小型堆源项较小和非能动安全特性。作为初步考虑,NRC对小型堆的应急计划区提出了按照事故释放可能导致的场外剂量水平,将小型堆的应急计划区划分为若干类别的建议。例如,对于烟羽EPZ,可按表1的方式考虑烟羽EPZ的尺度^[19]。

需要指出的是,除技术测算之外,公众接受性和政府部门的立场也是决定应急计划区尺度的重要因素。

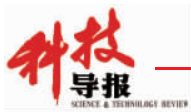


表 1 小型堆烟羽应急计划区

Table 1 Plume EPZ of small modular reactors

EPZ 类别	剂量限值/mSv	EPZ 区域/km
I	厂址边界处预期剂量<10	厂址边界
II	厂址边界处预期剂量≥10 3.2km 处预期剂量<10	3.2
III	3.2km 处预期剂量≥10 8km 处预期剂量<10	8.0
IV	8km 处预期剂量≥10	16

2.2 应急计划的简化

相对于大型轻水堆,小型堆源项较小、非能动安全特性以及事故进程较为缓慢等特性,都有利于小型堆应急计划的

简化。NRC 认为,如果反应堆在任何可信事故发生后的 36h 内,其辐射后果都不会超过美国环境保护部 EPA 规定的 PAG,则应急计划中可以不必要对早期通告、隐蔽和撤离行动等进行提前计划和规定。

DOE 对 MHTGR 的分析表明,该反应堆在任何情况下燃料的最高温度都不会超过可能发生燃料失效的临界温度,而且在事故发生 36h 后的燃料温度要比 60~100h 后的最高温度的计算值低很多。这意味着 MHTGR 事故发生到放射性释放之间的延迟时间很长(36h 以上),比目前的 LWR 长很多,这可以为场外应急响应行动提供足够长的计划和准备时间^[8]。考虑上述辐射剂量计算结果以及放射性释放的时间特性,DOE 认为 MHTGR 可以在技术上将烟羽 EPZ 缩小到厂址 EAB 处,相对于大型轻水堆,应急计划可以适当简化^[8](表 2)。

表 2 MHTGR 场外应急计划建议与轻水堆应急计划要求

Table 2 Suggestions for MHTGR offsite emergency planning and requirements for LWR emergency planning

序号	LWR 场外应急计划要求	MHTGR 应急计划建议
1	16km 烟羽 EPZ 和 80km 食入 EPZ	80km 食入 EPZ
2	15min 内通知公众	无
3	烟羽及食入 EPZ 的预期剂量评价能力	食入 EPZ 预期剂量评价能力
4	烟羽及食入 EPZ 场外监测	食入 EPZ 的场外监测
5	医学服务安排	无
6	主要和备用通讯	同左
7	培训要求	监测设备方面的培训
8	每 2 年演习一次和定期的烟羽及食入 EPZ 演习	食入 EPZ 演习

从表 2 可以看出,所建议 MHTGR 场外应急计划主要涉及食入 EPZ 和相关的应急监测,取消了烟羽 EPZ 和公众紧急通告等方面的内容。对于目前在运的大型核电站,恰恰后者是应急准备与应急响应的主要内容。

3 结论

小型堆,特别是对于需要靠近用户的小型堆(例如供热、供汽等),将应急计划区限制在厂址范围之内,对于保障小型堆的经济性和增强公众的接受性是非常有益的。从目前经验来看,完全取消小型堆的场外应急准备的可能性不大,但考虑小型堆的安全特性,简化小型堆的应急准备是国际上的共识,也是现实可行的。

参考文献 (References)

[1] International Atomic Energy Agency. Innovative small and medium sized reactors: Design features, safety approaches and R&D trends [R]. IAEA-TECDOC-1451, Vienna: IAEA, 2004.
 [2] International Atomic Energy Agency. Design and development status of small and medium reactor systems 1995[R]. IAEA-TECDOC-881, Vienna: IAEA, 1995.
 [3] International Atomic Energy Agency. Small and medium sized reactors: Status and prospects [C]. IAEA International Seminar Cairo, Egypt, May

27-31, 2001.
 [4] Office of Nuclear Energy, US Department of Energy. Small modular reactors[EB/OL]. [2013-08-31]. <http://energy.gov/ne/nuclear-reactor-technologies/small-modular-nuclear-reactors>.
 [5] Magruder S. Status of SMR reviews and issues in the United States[R]. Washington DC: USA Nuclear Regulatory Commission, 2012.
 [6] LaBar M P. The gas turbine-modular reactor: A promising option for near term deployment[C]. ICAPP'02: 2002 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, Hollywood, FL, USA, June 9-13, 2002.
 [7] Barroso A C O, Baptista Filho B D, Arone I D, et al. IRIS Pressurizer design[R]. ICAPP'03: 2003 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, Córdoba, Spain, May 4-7, 2003: 3227.
 [8] Carellia M D, Conway L E, Oriani L, et al. The design and safety features of the IRIS reactor [J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 230 (1-3): 151-167.
 [9] B&W Company. Generation mPower and TVA Sign Letter of Intent for B&W mPower™ Reactor Project [EB/OL]. 2011-06-16 [2013-08-31]. http://www.babcock.com/news_and_events/2011/20110616a.html.
 [10] Reyes J N. NuScale technology overview [C]. Pre-Application Meeting, Rockville, MD, USA, June 2, 2010.
 [11] Modro S M, Fisher J, Weaver K, et al. Generation-IV multi-application small light water reactor (MASLWR)[C]. ICONE 10: Tenth International Conference on Nuclear Energy, Arlington, VA, USA, April 14-18, 2002.
 [12] Reyes J N, Groome J, Woods B G, et al. Testing of the multi-application



- small light water reactor (MASLWR) passive safety systems[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237(18): 1999-2005.
- [13] Subki M H. Update on SMR technology status and IAEA programme on common technology and issues for SMRs[C]. INPRO Dialogue Forum on NE Innovations: CUC for SMR, October 10-14, 2011.
- [14] Collins H E, Grimes B K, Galpin F. Planning basis for the development of state and local government radiological emergency response plans in support of light water nuclear power plants[R]. NUREG-0396/EPA 520/1-78-016, Washington DC: USA Nuclear Regulatory Commission/US Environmental Protection Agency, 1978.
- [15] 国家标准化管理委员会. GB/T 17680-2008 核电厂应急计划与准备准则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 17680-2008 Criteria for emergency planning and preparedness for nuclear power plants-Part 1: The dividing of emergency planning zone[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [16] 黄挺. 核电站应急计划区划分方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
Huang Ting. Research on Method of Dividing Emergency Planning Zone in Support of Nuclear Power Plants [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [17] US Nuclear Regulatory Commission. Appendix E to Part 50: Emergency Planning and Preparedness for Production and Utilization Facilities[S]/NRC Regulations: Title 10 Code of Federal Regulations. Washington DC: USA Nuclear Regulatory Commission, 1975.
- [18] US Department of Energy. Emergency planning bases for the standard modular high-temperature gas-cooled reactor, Rev 1 [R]. DOE-HTGR-87-001, Washington DC: US Department of Energy, 1987.
- [19] US Nuclear Regulatory Commission. Development of an emergency planning and preparedness framework for small modular reactors [R]. SECY-11-0152, Washington DC: USA Nuclear Regulatory Commission, 2011.

(责任编辑 朱宇)

·学术动态·



中国科协举办“把握新科技革命机遇支撑创新驱动发展”报告会

2013年11月18日,中国科协党组理论学习中心组在中国科技馆举办“把握新科技革命机遇,支撑创新驱动发展”专题报告会。报告会由中国科协常务副主席、书记处第一书记、党组书记申维辰主持,特邀中国科学院院长、党组书记白春礼院士作专题报告。中国科协机关、直属事业单位及所属学会、协会、研究会相关同志700余人参加报告会。

白春礼在报告中解读了关于新科技革命的2个总体判断、6个新趋势、5个新特征。一个判断是科技革命源于现代化进程强大的需求驱动,另一个判断是科技革命源于知识与技术体系内在矛盾驱动。在基本科学问题、能源与资源领域、信息网络领域、先进材料和制造领域、农业领域和人口健康领域6个方面正孕育着重大的创新突破,将会成为新科技革命的突破口。5个新特征是:1)领域前沿不断拓展,学科间交叉、融合、会聚频繁,新兴学科及前沿领域不断涌现;2)基础研究、应用研究、高技术研发边界日益模糊并相互促进融合,目标导向的基础研究与应用研发结合更加紧密,产学研合作更加深入;3)转移转化研究、工程示范、企业孵化、风险投资、高技术园区等倍受重视,成果应用转化的周期越来越短;4)全球科技竞争日趋激烈,人才、创新要素在全球范围内加速流动配置,国际科技合作更加广泛,知识共享和知识产权保护越来越受关注;5)科技创新组织模式正在发生重大变化,网络和信息科技提供了强大的工具和平台,使创新无处不在、无时不在、无所不在,呈现出专业化、个性化、社会化、网络化、集群化、泛在化的新特征。

白春礼在报告中指出,党的十八大提出实施创新驱动发展战略,使得我们必须判断科技发展态势,把握新形势下的科技革命机遇,找准新科技革命的突破口,支撑国家创新驱动发展战略。严峻的国际形势不仅要求我们在战略与政策中更加重视在新能源、新材料、信息网络、生物医药、节能环保、低碳技术、绿色经济等重要领域加强投入,更要通过科技创新来优化就业结构、驱动可持续发展和提升国家竞争力。加快从跟踪模仿向自主创新为主转变是新时期我国科技发展的重大战略任务。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/15187987.html>。

