

革新型核能系统安全研究的 回顾与探讨*



吴宜灿

1 中国科学院核能安全技术研究所 合肥 230031

2 中国科学院中子输运理论与辐射安全重点实验室 合肥 230031

摘要 核能利用从未止步，人类对核安全的认识也在不断加深。在福岛核事故5周年和切尔诺贝利核事故30周年之际，文章针对革新型核能系统，从安全目标、设计理念、安全评价和风险认知4个方面对核安全研究进行了回顾与思考，指出当前存在的问题及面临的挑战，探讨未来发展趋势，并提出“四项革新”的建议：（1）安全目标从技术重返社会；（2）通过革新型反应堆技术，避免无限制复杂化纵深防御来解决安全问题；（3）重视理论引导的安全评价方法，采用系统化评价体系；（4）在政府/工业界/社会之间建立“第三方”并通过其发挥桥梁和纽带作用等。

关键词 安全目标，设计理念，安全评价，风险认知，第三方

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2016.05.010

*资助项目：中科院战略性
先导科技专项（XDA03010
100、XDA03040000），国
家磁约束核聚变能发展研
究专项（ITER“973”、
2014GB112000），国家自
然科学基金重大研究计划
（91026004）

预出版日期：2016年3月30
日

科学界通常把裂变反应堆划分为四代。第一代裂变反应堆是指20世纪50年代建设的原型核电站，证明了核能发电技术的可行性。第二代裂变反应堆是指20世纪70年代至今建设并运行的大部分商业核电站，证明了核能发电的经济竞争力。第三代是指满足《美国用户要求文件》（URD）或《欧洲用户要求文件》（EUR）具有更高安全性的新一代先进核电技术。第四代裂变反应堆是目前正在设计和研发的、在反应堆概念和燃料循环方面有重大创新的反应堆，其主要特征是可防止核扩散、具有更好的经济性、安全性高和废物产生量小^[1]。文中所提革新型核能系统主要指第四代堆、聚变堆或者混合堆系统^[2,3]，是未来核能重要发展方向。

2016年是前苏联切尔诺贝利核事故30周年，也是日本福岛核事故5周年，在此重新唤醒人们对核安全问题的关注和反思，确保核安全是相关方和每位参与者的共同责任。政府监管部门行使核安全监督权，承担监督管理责任，确保安全目标的制定科学合理、切实可行是其

行使职责的基础；设计院、建设与运营单位共同组成的工业界，则更关心如何在确保实现安全目标的同时获得更大的经济利益；社会公众在关心核电发展带来利益的同时，更关注自身所要承担的风险，因此，核能知识的公众化普及对于获得公众的理解和支持尤为重要。

文章立足于核安全研究的发展历程，针对革新型核能系统，主要从安全目标、设计理念、评价方法和风险公众认知4个角度回顾相关研究，并尝试探讨以下4个问题：（1）革新型核能系统需要满足什么样的安全目标；（2）如何确保安全目标实现；（3）如何评价安全目标是否达到；（4）如何使得风险为公众所理解和接受。最后在此基础上提出“四项革新”建议。

1 发展现状

2011年的福岛核事故对核安全基础研究和科技发展产生了重要影响，迫使人类一方面进一步改进现有核安全设计，另一方面重新思考核安全的研究范畴和评价方法^[4]。主要包括：

（1）在核安全设计改进上，扩展了设计基准范畴，提出了设计扩展工况概念（DEC），进一步发展了除氢技术和非能动技术，增强备用电源的可用性，不断完善核事故应急机制，同时积极开展各项先进反应堆设计和研发工作；

（2）在核安全研究范畴上，逐步认识到核安全问题不仅是“技术问题”，而且是“社会问题”，更加强调交叉学科研究，特别是与社会科学的结合^[5]；

（3）在核安全评价方法上，针对多堆风险评价方法、灾害性事件及其叠加情况下的风险评价技术、人因评价技术等，开展了许多基础性研究工作。

与此同时，还应清醒地意识到存在的问题和面临的挑战。

2 问题与挑战

目前我国在建核电机组均采用第三代核电技术。在

“引进→消化→吸收→再创新”的基本思路指引下，我国已走出一条第三代核电技术的自主创新之路。在革新型核能系统方面，实现创新驱动战略引领下的“跨越式发展”是当前主要的问题和挑战。梳理革新型核能系统及其安全技术发展存在的问题，主要包括：

（1）革新型反应堆安全特性利用与应用扩展不足。

同传统反应堆相比，革新型反应堆在安全性、经济性、废物最小化以及防核扩散等方面有重大改进，应充分利用这些安全特性并积极拓展其应用领域，改变核能产品单一的现状，满足除发电以外的多样化需求。

（2）核安全评价方法学研究缺少突破性进展与自主化工具。若将传统核安全评价方法应用于革新型反应堆，就会发现它们具有完全不同的设计特点。为此必须在方法学上，发展适用于革新型反应堆的理论而非经验化、系统化的核安全评价方法。同时，核安全作为国家安全的重要组成部分，自主发展核安全评价相关软件工具不仅能够确保国家战略安全和信息安全，而且对于实施核电“走出去”战略具有重要意义。

（3）核安全监管科学发展滞后与“第三方”评价不足。2015年曝出的“德国大众汽车排放作弊”事件，*Nature*杂志刊文提出应将监管作为一门科学来进行发展，并提出了监管科学（Regulatory Science）的概念^[6]。我国核能的发展逐步形成了政府、运营单位和设计院组成的“铁三角”^[7]，政府作为“裁判员”，运营单位和设计院构成的工业界作为“运动员”。“裁判员”和“运动员”主导着政策制定和核能发展，公众在其中处于比较被动的角色。因此在政府、工业界和公众之间迫切需要“背靠核能，面向公众”的“第三方”。

（4）风险沟通机制亟待完善，核安全文化尚未建立。虽然我国民用核安全保持着良好的运行纪录，但是“欲思其利，必虑其害；欲思其成，必虑其败”，必须足够重视核事故应急相关工作，包括计算机仿真与事故应急决策支持技术发展、核应急设备研发、快速响应能力的核应急队伍建设与人员培训等。核安全文化是核安

全的最后一道屏障, 需要结合中国传统文化以及习近平总书记提出的“理性、协调、并进”的中国核安全观, 逐步构建适合于我国国情的核安全文化, 且使之“内化于心, 外化于行”。

3 发展建议

3.1 理念革新: 安全目标从技术重返社会

早期辐射安全目标多为定性描述, 即不明显增加个人风险和社会风险。三哩岛事故后, 美国核管会(NRC)发布的《核电安全目标政策声明》提出了“两个千分之一”概念: 紧邻核电厂的个人或居民急性死亡风险不超过其他原因导致急性死亡的千分之一; 因核电厂运行导致癌症死亡的风险不超过其他原因致癌风险总和的千分之一^[8]。

随着概率安全分析(PSA)方法的建立, 技术安全目标由此增加了基于PSA的定量指标——概率安全目标, 包括堆芯损伤频率(CDF)和放射性早期大规模释放频率(LERF)。其中, 第二代反应堆的CDF为小于 10^{-4} /(堆·年), LERF为小于 10^{-5} /(堆·年); 第三代反应堆安全目标为CDF小于 10^{-5} /(堆·年), LERF小于 10^{-6} /(堆·年)。

严格地说, 这样的定量概率安全目标是在美国当时的厂址、环境和人口条件下从两个“千分之一”推导出来的, 但目前大多数其他国家只是简单地引用了这个概率安全目标, 缺乏充分的指导意义^[8]。此外, 这一安全目标的实施在很大程度上依赖于PSA技术的成熟和完善, PSA分析结果中的不确定性始终是一个重要挑战^[9]。更重要的是, 此安全目标仅考虑了对公众的保护, 却未考虑对环境和社会的可持续发展的影响^[10]。

针对革新型核能系统, 除存在上述问题外, 以CDF等概率值作为安全目标是缺乏普适性的。“堆芯损伤”仅是基于压水堆技术对“两个千分之一”目标的推演, 对于革新型反应堆不具指导意义。比如熔盐堆不存在堆芯或者不存在堆芯熔化概念; 铅冷堆的堆芯熔化现象同

压水堆差异巨大, 熔融物漂浮可冷却, 同时保持低压维持放射性包容; 对聚变堆而言, 存在等离子“堆芯”及核包层, 其“堆芯”的概念与裂变堆完全不同。

回顾核安全目标的确定过程可以看出, 其经历了从社会到技术的发展。核安全目标从最开始就是保护人类和环境, 着眼于社会风险, 因此不应以CDF、LERF等技术上的中间准则作为核安全目标的唯一考量, 核安全目标应从技术重回社会。目前国内外已有了一些初步实践, 如2002年第四代核能系统论坛(GIF)建议在第四代堆的安全目标中消除场外应急的需求^[1], 2007年国际原子能机构(IAEA)在提出的“技术中立”中建议采用社会风险作为指标^[11], 2011年我国核安全规划中也提出了“从设计上实际消除大规模放射性释放的可能性”的要求^[12]。虽然这些探索在具体实践上仍未达成共识, 但将核安全的社会性作为安全目标的重要组成的思路是一致的, 也是未来的发展方向。

为此, 需要对革新型核能系统安全进行理念革新, 即人类对核能的安全期望来源于社会, 发展于技术, 最终服务于社会, 安全目标要从技术重返社会。

3.2 技术革新: 摆脱“纵深防御”无限复杂化

核能系统的发展长期以来一直将“纵深防御”(Defense-In-Depth, DID)作为最基本的安全哲学理念。DID理念自20世纪40年代由美国杜邦公司化学工程师提出以来, 一直被认为是基于当时认知下的优秀工程思想^[13]。但长期以来运行经验反馈, 尤其是三次核事故, 使得DID的层级不断加深, 且不堪重负。DID已由最初的三层逐步扩展到五层, 以满足不断提高的安全目标。可以说, 整个反应堆安全的发展过程就是DID逐步加深的过程。

这个特点在福岛事故之后表现尤为突出。各个国家、组织提出的安全加强手段就是加强第四、五层DID的具体表现^[14-16]。如: 在IAEA和西欧核管会(WENRA)最新的DID分层中, 将第四层进行了拆分, 强调各层之间的独立性; 关于设计基准和工况划分的更改, 强调设计扩展工况作为设计基准进行考虑, 并

加强实际消除工况的应对,要求针对极低频率的工况提供附加安全措施;此外加强对极端外部灾害考虑,消除陡边效应(cliff edge effect)。

安全目标的提高扩大了DID的范围,继而需要通过增加防御手段和系统来实现。可是无限制增强DID未必带来最终的安全:一方面,无限制增加DID,意味着建造成本增加,竞争力下降,没有核电更妄谈核安全;另一方面,陷入“复杂的系统→复杂的安全问题→为解决这些安全问题设置新的复杂系统→系统更复杂”的怪圈^[17],堕入“推舟于陆也,劳而无功”的困境。究其原因,DID的实质是对复杂系统认知不足的一种工程妥协。

实际上,先进反应堆发展初期就已经意识到这个问题。最早阐述先进压水堆的两篇经典文件:1986年NRC发布的有关先进核电厂的政策声明^[18]以及1992年URD文件^[19],均明确提出核电系统简单化的目标。尽管如此,却依然走在系统不断复杂化的道路上。根本原因是采用了高温高压水作为冷却剂,进而带来两方面重大安全挑战。

(1) 冷却剂丧失事故(LOCA)。LOCA事故直接导致堆芯冷却剂丧失,自20世纪60年代以来被认为是最大可信事故,花费巨额经费进行实验研究。

(2) 安全壳失效事故。水作冷却剂可能导致氢气爆炸、燃料与冷却剂的相互作用(蒸汽爆炸)、高压熔融物喷射等现象,进而可能造成安全壳的多种模式失效,且失效概率高。

这些挑战的存在,使得压水堆在安全目标不断提升的情况下,不得不加大纵深防御的考虑范围,从而使防御手段和系统复杂度迅速增加。

面对上述困境,解决途径主要有两条。

(1) 采用非能动技术,简化设计。非能动技术,实质上是利用自然法则给设计“瘦身”,依靠重力、自然对流、蒸发、冷凝等自然现象,简化设计,减少人为干预,降低人为失误风险,在提高安全性同时节省成本。

(2) 通过采用革新型反应堆技术,善用反应堆自身

安全特性。以铅基反应堆为例,铅或铅铋具有高沸点、高密度、化学性质不活泼、对I、Cs滞留能力强等特点,从而带来可常压运行、安全裕量大、无LOCA事故、堆芯熔融后漂浮可冷却、无氢爆、放射性释放小等安全优势^[20-24]。利用安全特性本身就可加强DID中的重要环节,同时可减少额外的、不必要的手段。此外,革新型反应堆采用先进的设计理念,实现安全的“built-in, not added on”^[25]。“added on”作为传统的做法,指早期的核电厂采用系统安全分析工具对相对成熟的设计进行安全评价,然后通过增加额外的设计进行修补。而“built-in”则是指安全评价在早期介入设计,及早发现设计漏洞,提出并开发新的安全规程和设计改进,早“发现”早“治疗”。

为此,需要进行技术革新,即不能无限制复杂化DID来解决安全问题,革新型反应堆技术才是最终出路。同时积极利用革新型反应堆安全特性,拓展革新型反应堆在海水淡化、高温制氢、区域供热以及空间电源等方面的应用,同时充分发挥在模块化、分布式能源建设方面的优势。

3.3 方法革新:系统化安全评价方法

目前用于压水堆安全分析的确证论方法,是利用已有长期运行经验逐步“堆砌”而成的,是一种实证主义的方式。基于此已经形成了一套基本通用的设计基准、保守假设和验收准则,并在各国的评审标准中都会有明确体现,如我国1989年发布的《HAD102-01核电厂设计总的安全准则》的附录II中就明确列出了“典型的假设始发事件清单”,并认为“可视作汇编特定核电厂的假设始发事件清单时的起点”。

但若将目光移至革新型反应堆,就会发现它们具有完全不同的设计特点。例如聚变堆面临高能中子、大量中低放废料、极为复杂结构、极端服役环境、放射性氚等安全挑战^[26],而完全无临界的风险,导致压水堆已有设计基准、保守假设和验收准则是完全不适用的。同时由于缺乏运行经验,利用“堆砌”方法同样也不可行。

基于压水堆实证主义形成的安全评价方法,在革新

型核能系统上已不再适用。因此,已有一些研究试图通过补充理论化的方式形成新的方法体系,代表成果有:技术中立框架(TNF)、风险指引绩效依赖(Risk-informed Performance-based)执照申请方法、技术中立安全需求(TNSR)等^[27]。同时,GIF在总结全世界经验的基础上,提出了理论化而非经验化的、适用于革新性反应堆的ISAM(Integrated Safety Assessment Methodology)^[28],集成了多角度的见解,旨在早期指导设计。

为此,先进反应堆的安全评价应进行方法革新,即不能只采用类似压水堆的实证主义,必须重视理论引导,采用系统化评价体系。

3.4 措施革新:建立并发挥“第三方”作用

目前政府、营运单位和设计院构成了中国核能产业的“铁三角”^[7]。政府和工业界(含营运单位和设计院)主导着政策制定和核能发展,公众在其中处于比较被动的角色。福岛核事故之后,公众参与的呼声越来越高。人类也逐渐认识到核安全不仅是技术问题,而且是社会问题。不能忽略目前“铁三角”之外社会公众的存在,政府、工业界(包括运营单位和设计院)和公众应重构核能产业“新铁三角”。

我国核安全的公众沟通工作相对滞后。2015年8月中科院核能安全技术所开展一项社会调查表明:在2600余份的有效调查问卷中,60%的受众表示核安全使用方面未被充分告知。由此可见,过去的“铁三角”与公众之间存在着巨大的鸿沟。在新“铁三角”尚未有效建立之际,有必要通过引入“第三方”机构使其成为“铁三角”与公众之间的润滑剂。

调查还显示,在与社会沟通信任度方面,工业界排名在政府及官媒、国际核能组织、环保组织和科学家之后,仅有不超过15%的信任度,此结果与经济合作与发展组织(OECD)的调查结果中核电运营者的信任度11%类似,均属较低水平。因此,工业界亟需通过“第三方”提高其社会公信力。

另外,政府和公众之间由于视角不同、标准不一,存

在对立。调查显示,有72%的公众支持新建核电厂,但是只有不超过36%的公众支持在家乡建设。因此“建在谁家边上”,仅由政府决策是不行的,必须扩大公众的参与面,需要由“第三方”搭建政府和公众之间的“桥梁”。

因此,在政府、工业界和公众之间迫切需要“背靠核能,面向公众”的“第三方”。“第三方”具备如下特点:利益无关,不受各方金钱左右;观点独立,不受外界压力影响;科学专业,有强大的技术后援力量;持续广泛,能够服务于核安全的方方面面。“第三方”不仅能够作为政府的技术后援和智库,而且还能够担当起工业界和公众之间的认知桥梁,增强工业界的公信力。

为此,需要对整个安全构架进行“措施革新”,随着对安全目标的关注重新回到社会,在政府、工业界和社会之间应建立“第三方”并通过其发挥桥梁和纽带作用。

致谢: 本工作得到中科院战略性先导科技专项、国家磁约束核聚变能发展研究专项和国家自然科学基金重大研究计划等资助,以及裂变/聚变设计研究(FDS)团队其他成员的协助,在此表示感谢。

参考文献

- 1 Wu Y, FDS Team. Conceptual design activities of FDS series fusion power plants in China. *Fusion Engineering and Design*, 2006, (81): 2713-2718.
- 2 Wu Y, Jiang J, Wang M, et al. A fusion-driven subcritical system concept based on viable technologies. *Nuclear Fusion*, 2011, 51(10): 532-542.
- 3 吴宜灿. 福岛核电站事故的影响与思考. *中国科学院院刊*, 2011, 26(3): 271-277.
- 4 Sugiyama M, Sakata I, Shiroyama H, et al. Five years on from Fukushima. *Nature Comments*, 2016, 531(7592): 29-31.
- 5 Editorials. Testing times. *Nature: This Week*, 2015-10-01.
- 6 He Guizhen, Arthur P.J. Mol, Zhang Lei, et al. Public participation and trust in nuclear power development in China.

- Renewable and Sustainable Energy Review, 2013, 23: 1-11.
- 7 NRC. Safety goals for the operation of nuclear power plants; Policy Statement, republication. 51FR30028, 1986.
- 8 曲静原, 薛大知. 核安全目标制定与评估中的若干问题. 辐射防护通讯, 2005, 25 (6): 10-14.
- 9 汤博. 关于核电厂安全目标的确定问题. 核安全, 2007, (2): 8-11.
- 10 IAEA. Proposal for a technology-neutral safety approach for new reactor designs. IAEA-TECDOC-1570, 2007.
- 11 环境保护部 (国家核安全局). 核安全与放射性污染防治“十二五”规划及2020年远景目标. 2011.
- 12 Keller W, Modarres M. A historical overview of probabilistic risk assessment development and its use in the nuclear power industry: a tribute to the late professor Norman Carl Rasmussen. Reliability Engineering and System Safety, 2005, (89): 271-285.
- 13 IAEA. Considerations on the application of the IAEA safety requirements draft. 2014.
- 14 RHWG, WENRA. Safety of new NPP designs. 2013.
- 15 柴国早. 后福岛时代对我国核电安全理念及要求的重新审视与思考. 环境保护, 2015, 43 (7): 21-24.
- 16 汤博. 第二代改进型核电厂安全水平的综合评估. 核安全, 2007, (4): 1-26.
- 17 NRC. Regulation of advanced nuclear power plants; Statement of Policy. 51FR24643, 1986.
- 18 EPRI. Advanced light water reactor utility requirement document. 1992.
- 19 吴宜灿, 王明煌, 黄群英, 等. 铅基反应堆研究现状与发展前景. 核科学与工程, 2015, 35 (2): 213-221.
- 20 吴宜灿, 柏云清, 宋勇, 等. 中国铅基研究反应堆概念设计研究. 核科学与工程, 2014, 34 (2): 201-208.
- 21 Wu Y, Bai Y, Song Y, et al. Development strategy and conceptual design of China lead-based research reactor. Annals Nuclear Energy, 2016, (87): 511-516.
- 22 Wu Y, FDS Team. Conceptual design activities of FDS series fusion power plants in China. Fusion Engineering and Design, 2006, 81 (23-24): 2713-2718.
- 23 Alemberti A, Frogheri ML, Hermsmeyer S, et al. Lead-cooled fast reactor (LFR) risk and safety assessment white paper, 2014.
- 24 GIF. Basis for the safety approach for design and assessment of generation IV nuclear systems, Revision 1, 2008.
- 25 Wu Y, FDS Team. Conceptual design of the China fusion power plant FDS-II. Fusion Engineering and Design, 2008, 83 (10-12): 1683-1689.
- 26 Sang Kyu Ahn, Nam Chul Cho, Inn Seock Kim. New insights on risk-informed performance-based approaches to technology-neutral regulatory framework for generation IV reactors. Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Gyeongju, Korea, May 29-30, 2008.
- 27 Risk and safety working group, GIF. An integrated safety assessment methodology (ISAM) for generation IV nuclear systems. Version 1.1, 2011.

Review and Discussion on Nuclear Safety Research of Innovative Nuclear Energy System

Wu Yican

(1 Institute of Nuclear Energy Safety Technology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2 Key Laboratory of Neutronics and Radiation Safety, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract It is known that the evolution of the public perception of nuclear safety is continuing with the development of nuclear energy. As a commemoration of the 30th anniversary of Chernobyl nuclear disaster and also the 5th anniversary of Fukushima nuclear disaster, in

this paper the history of nuclear safety R&D was reviewed for the innovative nuclear energy systems, mainly concentrating on four aspects including safety goal, safety criteria, safety assessment, and risk perception. On this basis, the key challenges were summarized as well as the development trend. Furthermore, “four innovations” were proposed for the nuclear safety R&D in the future: “innovation of safety goal” ensuring the safety goal to be society-based rather than technology-based; “innovation of safety design” implementing the innovative reactor technology for inherent safety rather than only increasing the complexity of defense in depth; “innovation of safety assessment” relying on the theoretical guidance and systematic assessment; and “innovation of risk perception” establishing the “third party” evaluation system to interact among government, industry, and society.

Keywords safety goal, safety criteria, safety assessment, risk perception, third-party

吴宜灿 中科院核能安全技术所所长，研究员，博士生导师，中科院中子输运理论与辐射安全重点实验室主任，FDS团队负责人。长期从事核能科学与工程、辐射医学物理及应用、计算机仿真与软件工程等多学科交叉研究。主持国际热核聚变实验堆（ITER）国际合作计划重大专项、国家“863”、“973”计划、中科院战略性先导科技专项等项目20余项。在学术刊物和国际会议上累计发表学术论文200余篇、国际学术会议邀请报告30余次。曾获国家能源科技进步奖一等奖和中国核能行业协会科学技术奖一等奖等10余项、国家发明专利30余项。兼任国际能源署（IEA）聚变能环境安全与经济合作协议执委会主席、国际原子能机构（IAEA）顾问专家、ITER核安全专家组成员、中国辐射防护学会副理事长等学术职务。E-mail: yican.wu@fds.org.cn

Wu Yican The leader of FDS Team, the director of Institute of Nuclear Energy Safety Technology (INEST), Chinese Academy of Sciences and the director of Key Laboratory of Neutronics and Radiation Safety, Chinese Academy of Sciences. His research involves nuclear science and engineering, medical physics and application, computer simulation and software engineering, and other interdisciplinary research. As the leader/chief-scientist of projects, he was/is in charge of more than 20 domestic or international scientific research projects, such as the projects under the national “863” (High-Tech) and “973” (Basic Research) program of China, the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, and the international cooperation program of International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER). He has published more than 200 papers in academic journals and international conferences. He gave invited talks at international conferences for more than 30 times and did more than 30 patented inventions. He won more than 10 important science and technology awards, such as the First Prize of Science and Technology Progress Award for National Energy, the First Prize of Science and Technology Award of China Nuclear Energy Association, etc.. He holds a number of important positions or works as expert member in domestic or international organizations, such as the International Atomic Energy Agency (IAEA), Ministry of Science and Technology of China, National Energy Bureau, Chinese Nuclear Society and China Society of Radiation Protection, etc.. He is also currently serving as the Executive Committee (ExCo) Chair of International Energy Agency (IEA) Implementing Agreement on Environmental, Safety and Economic Aspects of Fusion Power, ExCo Vice Chair of IEA Implementing Agreement on Nuclear Technology of Fusion Reactor, and also a member of Working Group on Licensing for Design Review of International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) Organization and China’s Coordinator for Generation-IV International Forum. E-mail: yican.wu@fds.org.cn