

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.04.012

后福岛时代核电技术升级和小型堆的发展

席琛, 李航

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 日本福岛核电站事故引发全球关于核电安全性的关注, 核电是否能继续发展为世界提供清洁能源, 其安全性成了一个重要的因素。为了解决能源发展困境和核电安全性的问题, 拥有非能动安全性、高热效率等优势的四代反应堆逐渐进入大众的视野; 同时, 具有安全、灵活、可靠、经济性好等特点的小型堆也应运而生。文章着重介绍第四代反应堆和小型堆的发展对核电领域带来的技术升级。

关键词: 四代反应堆; 小型堆; 核电技术升级

中图分类号: TL41

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)04-0070-04

Nuclear Power Technology and Small Sized Reactors Development in Post-Fukushima Era

XI Chen, LI Hang

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Japan's Fukushima nuclear power plant accident has brought a global concern about the safety of nuclear power. To determine whether nuclear power can be an alternative energy used by human beings, safety has become a valuable factor in consideration. In order to face the situations between energy predicament and nuclear safety, Gen-IV reactors, with the advantages of passive safety and high thermal efficiency, gradually come into the public view. Meanwhile, Small Sized Reactors also arise at the historic moment. Small Sized Reactors are safe, flexible, reliable and economic. This paper mainly introduces the technical upgrading of Gen-IV reactors and Small Sized Reactors.

Key words: small sized reactors; Gen-IV; nuclear power technology upgrade

2011 年发生在日本福岛核电站的放射性物质泄漏事故, 引起了全世界对于核安全的关注。被定义为 7 级核事故的福岛核电站, 是由日本大地震和海啸造成的断电引发冷却水源丧失继而发生氢爆而造成的核泄漏事故。迄今为止, 本次事故的核泄漏污染水平已经超过历史上著名的切尔诺贝利核电站事故。作为导致此次事故发生的首要原因, 核电厂设计中非能动的安全性概念被提了出来。同时, 通过反应堆设计理念来提高核电厂的固有安全性也是核电技术升级的必然要求。

在随后召开的第二届核安全峰会上, 中国再次向世界表明了将继续安全、可持续发展核能的理

念。随着“十三五”的到来, 我国核电建设在政策推动下将进入发展高峰, 国务院印发的《能源发展战略行动计划》^[1]中明确提出到 2020 年的核电发展目标, 发展核电产业已成为国家级战略。随着今年 3 月红沿河核电 5、6 号机组批准建设, 4 月国务院常务会议核准开工建设首台“华龙一号”示范机组, 新一轮核电建设正在全面开启。

我国目前能源结构过度依赖火电且环境问题突出, 在清洁能源时代必将加速转型, 减少对环境的污染。因此, 发展以核电为代表的清洁能源势在必行。据统计, 我国 2014 年核电发电规模仅占发电总量的 2.4%, 远低于全球 14% 左右的平均水平。目前我国在运和在建核电机组容量共计 52 GW 左右, 根据核电发展规划, “十三五”期间将新开工建设 36 GW 装机容量, 到 2020 年我国核电在运和在建装机容量要分别达到 58 GW 和 30 GW 以上。

收稿日期: 2015-11-01

作者简介: 席琛(1984), 女, 安徽蚌埠人, 工程师, 硕士, 主要从事发电设计工作(e-mail)xichen@gedi.com.cn。

后福岛时代, 核电的安全性问题再度受到重视, 核电技术升级被提到新的高度。国家明确的提出对核电项目准入门槛的要求, 对于新建核电机组必须要满足三代核电的高安全标准。目前看来, 未来核电的发展方向, 以具有非能动安全性的四代反应堆和小型堆为首推。

1 四代反应堆

第四代核能系统国际论坛(GIF)在2002年发布的第四代反应堆技术发展路线报告^[2]中提出四代反应堆的几个特点:(1)核废料的可控性, 有效的提高燃料利用率, 有益于环境;(2)在经济性方面具有竞争力;(3)安全性方面得到普遍认可;(4)对于核能和核材料的安全使用。

第四代核能系统国际论坛提出了第四代反应堆中最具有发展前景的6种堆型, 分别为超常高温气冷堆(VHTR)^[3]、超临界水冷堆(SCWR)、熔盐反应堆(MSR)和三种快中子堆^[4]。这6种堆型各有优势, 在热效率、经济优势等方面各有千秋。其中, 快中子堆作为增殖堆, 可使天然铀的利用率提高到60%~70%, 若采用该种堆型, 以目前世界铀资源储量, 可供人类使用1000年以上。

六种堆型分别有如下特点。

1.1 超常高温气冷堆(VHTR)

超常高温反应堆(VHTR)目前主要应用领域为发电和制氢, 同时在化学、石油和钢铁行业也有应用。VHTR出口温度可达1000℃, 可以通过热化学反应进行高效的制氢生产流程。VHTR的技术核心是TRISO包覆颗粒燃料, 石墨作为核心架构, 氦作为冷却剂。VHTR采用中心布局的燃料排列方式和较低的功率密度, 保证了可以以自然的方式去除衰变热, 提高了反应堆的固有安全性。不难看出, VHTR具有安全性高, 热效率高, 运行维护费用低等优势。未来, 模块化结构是高温气冷堆的进一步发展的趋势。

1.2 超临界水冷堆(SCWR)

超临界水冷堆(SCWR)是高温、高压的轻水反应堆, 是六种第四代反应堆中唯一一个以轻水做冷却剂的反应堆。SCWR运行在水的临界点(374℃、22.1MPa)以上, 是超临界水电技术和轻水堆技术的融合和发展。相比现役的轻水堆34%~36%的热效率, SCWR的热效率可达到44%以上。由于介质

不存在相变, 可以采用直接循环。冷却剂需求量大大减少, 相关设备的需求也大幅度减少, SCWR体积比目前的水冷反应堆明显缩小。而且, 由于不存在相变, 堆芯传热问题得到了很好的解决, 固有安全性大大提高。结构简单、安全性高以及经济性好使得SCWR在四代堆的发展中具有极大的竞争力。

1.3 熔盐反应堆(MSR)

熔盐反应堆(MSR)的燃料是处于熔融状态下的溶有易裂变材料熔盐, 且熔盐直接流入热交换器进行热量交换。因此, MSR堆芯结构简单。而且, 由于MSR可以有效的利用中子, 产生增殖效应, 因而具有很高的经济性。

1.4 气冷快堆(GFR)

气冷快堆(GFR)的系统是一个封闭的燃料循环系统, 利用高温氦气冷却快中子。它结合了快堆的优点, 通过燃料多重处理和长寿命锕系元素的裂变, 可以提供为长期可持续使用的铀资源, 以及实现废物最小化; 同时堆芯出口冷却剂的高温可以用于生产氢气、发电以及供热。

1.5 钠冷快堆(SFR)

钠冷快堆(SFR)是用液态钠作为冷却剂, 燃料采用闭式循环的方式, 能有效地控制锕系元素和铀238之间转换。具有燃料资源利用率高和热效率高等优点。单个SFR反应堆的功率可以从50MWe到300MWe, 模块化SFR反应堆功率可以到达1500MWe。

1.6 铅冷快堆(LFR)

铅冷快堆(LFR)的特点是在快中子能谱区域, 高温条件下, 由熔化的铅作冷却剂, 具有很好的热力学性质。LFR用途广泛, 包括制氢、发电和供热。除了燃料利用率高和经济性好等优势, 固有安全性和非能动安全性高的特点也使得LFR的发展前景更加广阔。目前世界范围内快堆的发展情况见表1。

表1 快堆发展情况一览表(截止2014年12月)

Table 1 Fast Reactors Data (up to December 2014)

建设情况	数量
在运行	6
试运行	2
在建	4

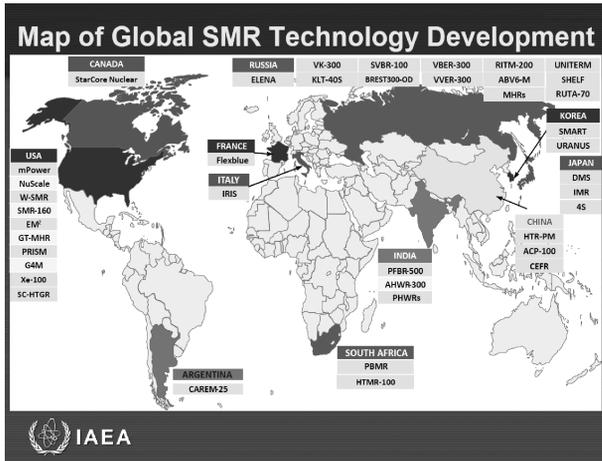
注: 表格中数据来源与IAEA公布文章 Support for Innovative Fast Reactor Technology Development and Deployment^[4]。

2 小型堆

小型堆, 国际原子能机构(IAEA)的定义是电功

率在 300 MWe 以下的模块化反应堆。小堆是一种便携式核反应堆,被称为“傻瓜堆”,可以迁移,具有很高的安全性。因其具有安全、灵活、可靠、经济性好等优点,而日益受到核技术先进国家的重视^[5]。

小堆设计类型包括水冷堆、高温气冷反应堆、液态金属快中子堆和熔盐反应堆。目前全球有超过 45 个小堆的设计开发应用。图 1 显示了小堆技术在全球的发展情况。



注:图片引自 IAEA 网站 Small and Medium Sized Reactors (SMRs) Development, Assessment and Deployment^[6]

图 1 小堆技术在全球的发展

Fig. 1 Development of Global SMR Technology

从图 1 中可以看出,美国和俄罗斯拥有最多的小堆类型和数量。中国、日本、印度三国紧随其后。单以水冷堆为例,表 2 为正在开发中的中、小型水冷堆一览表。

小型堆之所以受到这么多国家的重视和开发,与小型堆自身的特点是分不开的。小型堆的特点及优势主要集中在以下几个方面。

2.1 体积小 + 模块化

小型堆的体积小主要体现在小堆设计理念上,采用一体化的布置方式:蒸汽发生器置于反应堆压力容器的内部,无需设置一回路主蒸汽管道系统;主泵放在反应堆压力容器上部,通过短管相连,也大大减少了管道设计。

小型堆模块化设计的目的是减少施工时间,提高施工质量和可靠性,相比现役核电站的施工时间可以缩短 5~8 年的施工时间成本^[6]。

2.2 用途广泛

小堆具有实现高效率和高经济性的热电联产、

表 2 在开发的中、小型堆一览表(水冷堆)

Table 2 List of Small and Medium-sized Reactor Designs Under Development and Deployment (Water-cooled SMRs)

反应堆型号	反应堆容量 / MWe	国家
CAREM - 25	27	阿根廷
ACP100	100	中国
Flexblue	160	法国
IRIS	335	国际联盟
DMS	300	日本
IMR	350	日本
SMART	100	韩国
KLT - 40S	35	俄罗斯
VVER - 300	325	俄罗斯
ABV - 6M	6	俄罗斯
RITM - 200	50	俄罗斯
VVER300	300	俄罗斯
VK - 300	250	俄罗斯
UNITHERM	6.6	俄罗斯
RUTA - 70	70	俄罗斯
mPower	180	美国
NuScale	50 ~ 160	美国
Westinghouse SMR	225	美国
SMR - 160	160 ~ 525	美国
Elena	3.3	俄罗斯

注:数据引自 IAEA 公布文章 Small and Medium Sized Reactors (SMRs) Development, Assessment and Deployment^[6]。

汽电联产以及水电联产的能力,可以满足不同用户的需求。例如:俄罗斯 KLT - 40S 型小堆不仅可以给破冰船提供动力,也可用于偏远地区供电。由此可见,小型堆的发展不仅可以解决很多地区由于基础设施不完善带来的供电问题,同时也为发电形式的灵活性提供了选择。

在非电应用领域,小型堆主要应用在供热、海水淡化、氢气生产、煤炭液化和其他工艺热应用领域。目前,法国 NP - 300、韩国 SMART 均为设计用于供热和海水淡化目的小型堆。

2.3 投资小 + 滚动发展

小堆独特的模块化设计,使得业主可以灵活配置装机容量。电厂可以根据自身的情况选择不同个数的模块,每个模块的发电能力最大是 10 MW,从而满足用户的个性化需求。

从经济性上讲,由于模块化的设计,各个模块之间不会互相影响,使得业主可以采用滚动发展的模式进行核电的投资建设,解决了核电建设中初始资金投入较大的难题。逐步增加电站装机

的容量、分步投入建设资金、滚动发展的模式降低了核电厂对于资金的受限程度,有利于小堆的推广和普及。

2.4 安全性高

小型堆的设计中对自身固有安全性的设计,以及非能动安全系统使得小型堆的安全性达到甚至超过了三代压水堆的水平。例如非能动的余热排出系统和较低的堆芯功率密度使得小型堆在固有安全性上大大提高。同时,由于一体化设计的理念,小型堆电厂的系统大大简化,提高了电厂的安全级别。

中国自主研发的 ACP100 模块式小型堆^[7],可以满足最高的安全标准。采用完全非能动的设计,在不依赖外部电源的条件下,实现 14 天不需要外部干预。一体化的设计,避免了反应堆 LOCA 事故的发生。同时,核岛全部位于地下,既可以有效抗击外部事件,也保证了即使在地震情况下也不会发生冷却剂大量流失的事故。

反观日本福岛核电站发生的核泄漏事故,造成堆芯融毁重要原因就是地震和海啸导致核电厂失去了外部电源。由于福岛核电站属于二代反应堆,并没有采用非能动设计,堆芯冷却必须依赖外部电源。而断电后堆芯余热长期无法排出,就会发生堆芯融化,反应堆超临界,进而发生爆炸,造成了核泄漏事故。

ACP100 小型堆的完全非能动安全系统、固有安全性、以及核岛埋地的设计,都很好的把出现堆芯融毁这种严重事故的可能性降到了最低,从根本上避免了类似福岛核电站泄漏事故的再次发生,也为人类能够安全、清洁、高效的利用核能打开了一扇大门。

3 结论

综上所述,四代反应堆和小堆具有的非能动安全性、高经济性等特点,以及小堆特有的灵活特性,既满足了后福岛时代对于核电安全性的高要求,又解决了世界对于能源的需求问题。从目前的发展现状看来,国际原子能机构以及世界各国都对四代反应堆和小堆的应用和推广有着浓厚的兴趣和强烈的意愿。从我国社会经济建设的 yêu求,以及核能技术自身发展的需求来看,发展四代反应堆和小型堆核能系统也都具备较为广阔的

市场前景。

上世纪的切尔诺贝利事故,使得核电发展进入了长达 10 年的冰冻期。但本世纪的后福岛时代,中国核电并没有因噎废食,而是在国家层面的推动和引导下,积极探寻核电技术的升级与创新。

在小型堆领域,日前,我国自主开发的多用途模块式小型反应堆 ACP100 的示范工程技术经济报告评审会在京召开。专家组充分肯定了《ACP100 示范工程技术经济报告》,一致同意报告通过审查。这标志着我国 ACP100 技术由研发阶段向工程阶段转化迈出了重要一步。

在四代反应堆领域,山东石岛湾核电站的高温气冷堆示范工程于 2012 年正式开工。模块化设计,非能动余热排出系统,使得石岛湾高温气冷堆有着更高的安全性以及在热电联产、高温工艺等广阔的应用前景。福建霞浦快堆核电示范工程也预计于 2017 年底投入建设^[8],这也将是中国乃至世界在快堆发展领域的一个里程碑。

后福岛时代,结合了安全与高效等优势的四代反应堆和小堆的发展定会在核电史上翻开一页璀璨的新篇章。

参考文献:

- [1] 国务院. 能源发展战略行动计划(2014-2020) [L]. 2014-06-07.
- [2] US DOE&GIF. A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems [EB/OL]. https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_40473/a-technology-roadmap-for-generation-iv-nuclear-energy-systems.
- [3] IAEA. Support for Demonstration of Modular High Temperature Gas Cooled Reactors (HTGRs) [EB/OL]. <https://www.iaea.org/NuclearPower/GCR/index.html>.
- [4] IAEA. Support for Innovative Fast Reactor Technology Development and Deployment [EB/OL]. <https://www.iaea.org/NuclearPower/FR/index.html>.
- [5] IAEA. Innovative Small and Medium Sized Reactors: Design Features, Safety Approaches, and R&D Trends [R]. 2005.
- [6] IAEA. Small and Medium Sized Reactors (SMRs) Development, Assessment and Deployment [EB/OL]. <https://www.iaea.org/NuclearPower/SMR/index.html>.
- [7] 中核集团. 图解 ACP100 小型反应堆技术 [EB/OL]. http://www.cpn.com.cn/zdgc/201504/t20150421_796758.html.
- [8] 北极星电力网新闻中心. 中国首个快堆核电站计划 2017 年于福建霞浦开工 [EB/OL]. [2015-08-26]. <http://news.bjx.com.cn/html/20150825/656391.shtml>.