



中国电机工程学会
CHINESE SOCIETY FOR ELECTRICAL ENGINEERING

核能发电专业发展报告

核能发电分会宣讲

2019年11月26日 北京

一、前言

二、核能发电技术研究最新进展

三、核能发电技术学科发展趋势及展望

四、创新发展机制分析与建议

五、小结

(一) 编制团队

序号	姓名	任职
1	汪映荣	国核示范电站有限责任公司 董事长、党委书记/中国电机工程学会核能发电分会秘书长
2	苗富足	原上海核工程研究设计院 副院长
3	董玉杰	清华大学核研院 副院长
4	王雪林	山东大学物理学院 副院长
5	时振刚	清华大学核研院研究室 主任
6	杨 波	上海核工程研究设计院堆芯设计所 所长
7	雷梅芳	中国核能行业协会 专家
8	毛正雄	国核示范电站有限责任公司设备管理与采购部 高级主任工程师
9	吴爱民	山东核电有生产计划处 副处长
10	王其胜	国核示范电站有限责任公司运行部 主任工程师
11	张雨佳	中国电机工程学会核能发电分会 秘书处秘书

（二）报告综述

1. 本报告重点介绍了核能发电技术最新研究进展，包括压水堆核电技术、重水堆核电技术、高温气冷堆核电技术、快堆核电技术、小型模块化堆核电技术、熔盐堆核电技术、核聚变技术。
2. 通过各技术方向基本情况介绍、国内外核电技术研究情况比较，提出世界和我国核电发展的八个趋势，及各技术方向我国未来五年或更长时期内新的发展战略。
3. 结合各技术方向国内外的差距，以及国内现有技术发展现状和不足，分析出我国核电发展的驱动力，及影响我国核电技术发展的六个主要因素，并最终提出了七条适合我国国情的核能发电技术中长期发展建议。

(三) 核能发电技术发展历程



(四) 核能发电发展形势

1. 核能发电是我国能源战略的重要选择，是满足我国能源发展需要、解决我国环境污染问题、实现温室气体减排目标的重要途径。
2. 安全发展核电，对保障国家能源安全、保障电力供应、调整能源结构、保护生态环境、带动产业发展、促进科技进步和增强综合国力具有重要意义。
3. 当前国内外核电科技创新呈现出新的发展趋势，总体上朝着“更严格的安全标准、更智能的应用技术、更灵活的用户需求”方向发展，用户场景由单一的“电力供应”为主向“清洁能源、综合利用、多功能化”等领域拓展，供应产品也由以“电”为主向“热、电、水、汽、氢”等多用途方向延伸，并将增殖和嬗变的能力作为重要的衡量指标。
4. 总体上，国内外核电技术是朝着“先进化、智能化、小型化、多功能化”的方向发展。



(五) 核电发展的方针政策

1. 2007年,我国提出了坚持发展百万千瓦级先进压水堆核电技术路线,实施热中子反应堆-快中子反应堆-受控核聚变“三步走”的核电技术发展战略。
2. 2011年3月日本福岛核事故后,我国国务院提出了“安全高效发展核电”的要求。
3. 党的十九大提出,要推进绿色发展,推动能源生产和消费革命,构建清洁低碳、安全高效的能源体系。
4. 《能源发展“十三五”规划》提出“深入实施核电重大科技专项”,“加快论证并推动大型商用乏燃料后处理厂建设”,“适时启动智能小型堆、商业快堆、60万千瓦级高温气冷堆等自主创新示范项目,推进核能综合利用”等具体措施。
5. 《能源发展战略行动计划(2014—2020年)》明确提出到2020年,我国核电装机容量要达到5800万千瓦,在建容量达3000万千瓦以上。

(六) 核能发电发展现状

1. 截止2018年底，全球在运核电机组454台。其中核电装机容量最高的是美国，我国排名世界第三。
2. 经过40多年的发展，我国核电正在实现由“跟跑”、“并跑”向全球“领跑”的转变。
3. 满足第三代核电安全性能要求、拥有完全自主知识产权的“华龙一号”于2015年5月7日在福建福清核电厂正式开工建设，目前进展顺利。
4. 国家重大科技专项“国和一号”（CAP1400）示范工程也正按照国家部署开展相关工作，“国和一号”是我国拥有自主知识产权、功率更大、安全性更高的非能动三代核电先进压水堆。

(六) 核能发电发展现状

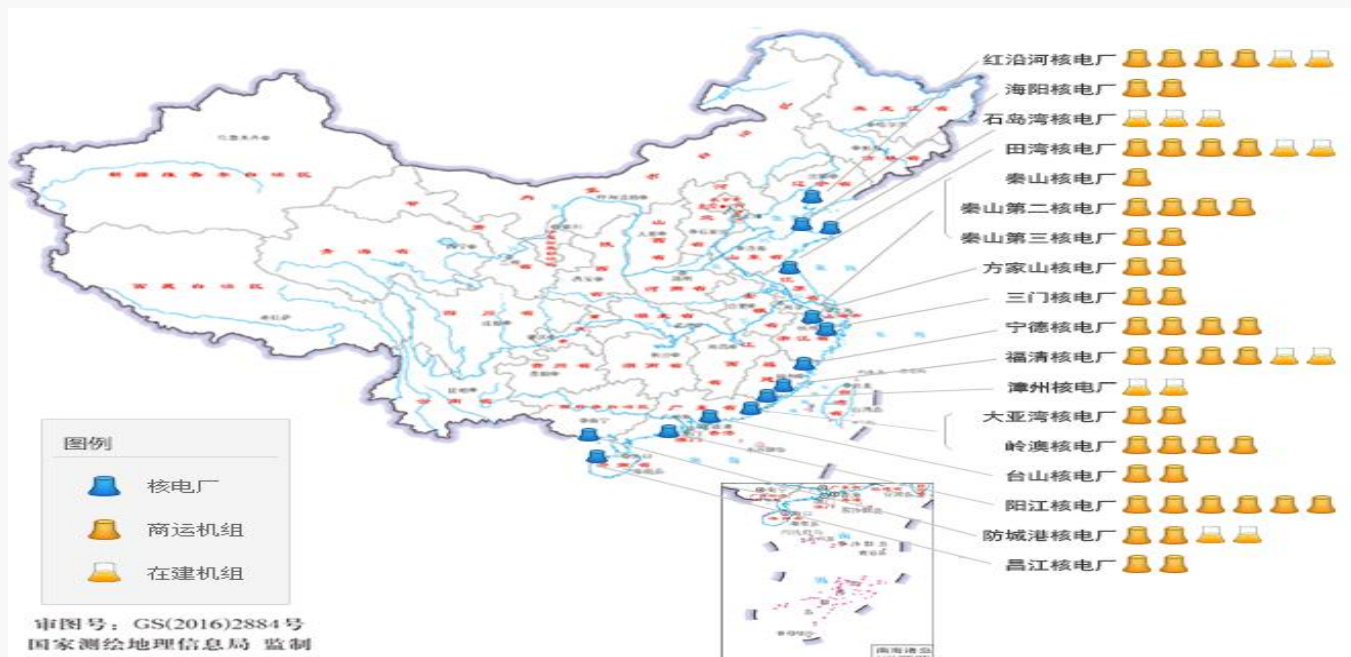
5. 在先进核能系统方面，我国还积极推动快堆、高温气冷堆、浮动堆、熔盐堆、热核聚变装置等研发。我国实验快堆已于2011年7月并网发电；示范快堆工程于2017年12月29日土建开工；高温气冷堆示范工程于2012年年底开工建设；热核聚变装置、小堆研发也取得了积极进展。
6. 我国核电装备自主化、国产化水平不断提升，工程建设能力国际领先，成为全球少数几个拥有完整核电工业体系的国家之一。但少量核电核心技术、零部件、基础材料仍依赖进口，一定程度上受制于人，需要强化创新驱动，聚焦解决卡脖子的关键技术。

(六) 核能发电发展现状

7. 2018年，是我国核能领域成果丰硕的一年。新投产7台核电机组，AP1000和EPR全球首堆相继在我国建成投产，600MWe钠冷快堆建设进展顺利、低温供热堆示范项目积极推进、铅冷快堆研发取得成果、钍基熔盐堆研发进展顺利。
8. 截至2019年上半年，我国大陆在运核电机组达到47台，装机容量4873万千瓦，排名世界第三，在建机组11台，排名世界第一。
9. 核电在我国能源生产和消费中的作用不断凸显，但我国核电装机占电力总装机的比重仅为2.35%，远低于全世界10.6%的平均水平。

(六) 核能发电发展现状

截至目前我国在运及在建核电机组分布图：



一、前言

二、核能发电技术研究最新进展

三、核能发电技术学科发展趋势及展望

四、创新发展机制分析与建议

五、小结

(一) 概述

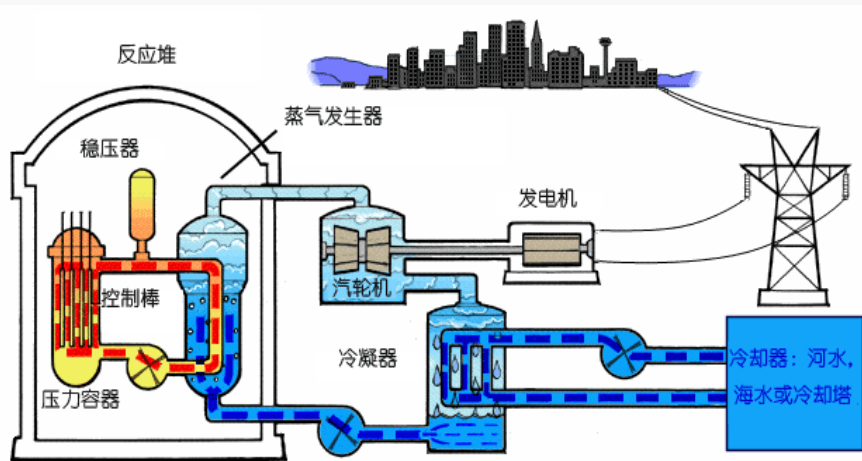
1. 核能发电技术是利用核裂变或核聚变反应所释放的能量进行发电的技术，目前核电站都是采用核裂变发电技术，核聚变发电技术还在研发中。
2. 自1951年美国实验增殖堆1号首次将核能用于发电，至今核电已有60余年发展历史。核电技术也从20世纪50年代的第一代堆型，发展至安全性更高第三代堆型及安全性更高、经济性更好、可持续发展、废物产生量更少、核燃料利用率更高的第四代堆型。
3. 第三代堆、四代堆成为世界发展的主流堆型，三代堆包括美国的AP1000及ABWR、法国的EPR、我国的“华龙一号”及“国和一号”（CAP1400）、俄罗斯的VVER-1200、韩国的APR-1400、日本的APWR等。四代堆方面以钠冷快堆、高温气冷堆被认为是技术研究最为成熟，最具商业应用前景的两种堆型。

(一) 概述

4. 2018年我国先进核电技术取得了一系列成果，具有自主知识产权的三代核电技术的“国和一号”及“华龙一号”多项关键设备研制通过正式验收或取得重要进展；具有四代核电特征的高温气冷堆示范工程的主氦风机及蒸汽发生器交付现场；钠冷快堆工程进展顺利；铅冷快堆研发取得成果；钍基熔盐堆研究进展顺利；在聚变堆研究方面，东方超环（EAST）首次实现了1亿摄氏度的运行。
5. 另外，近年来小型堆引起广泛关注，全球有近50种小堆概念设计。全球多个核电大国正逐步实践和应用小型模块化反应堆技术（SMR），并将其列入本国核能发展战略。
6. 本报告重点介绍压水堆核电技术、重水堆核电技术、高温气冷堆核电技术、快堆核电技术、小型模块化堆核电技术、熔盐堆核电技术、核聚变技术。

(二) 压水堆

1. 压水堆是采用加压轻水作为冷却剂和慢化剂，利用热中子引起链式反应的热中子反应堆，采用稍加浓铀（富集度约3%的U-235）作为核燃料。压水堆冷却剂入口水温一般为280℃，出口水温320℃左右，堆内压力约为15.5MPa。
2. 压水堆的显著特点是结构紧凑，堆芯的功率密度大。这是由于水的慢化能力及载热能力好，比热大，导热系数高，在堆内不易活化，不容易腐蚀不锈钢、锆等结构材料。另一个特点是经济上基建费用低、建设周期短。



(二) 压水堆

3. 作为核电技术的原发国家，美国、法国、俄罗斯等国的核电技术仍然在全球核电市场中占据主导地位。
4. 美国西屋公司AP1000技术中的“固有安全”、“非能动”等设计理念继续引领全球设计。俄罗斯VVER机组在国际市场中非常具有竞争力。法国阿海珐公司的EPR、韩国电力工程公司的韩国先进压水堆（APR1400）均有一定的发展。
5. 我国核电起步比较晚，20世纪70年代，欧美各国由于石油危机开始大量部署压水堆核电站，而中国20世纪90年代才建成第一座商用压水堆核电站。
6. 20世纪90年代后期，中国积极引进国外技术，并开发了自主化的核电机组CPR1000和ACPR1000，单堆功率突破1000MWe，中国核电技术努力追赶世界先进步伐，核电技术实力不断增强，国内核电机组建设也蓬勃发展。

(二) 压水堆

7. 进入21世纪后，面临核电发展的新形势，中国决定完整引进国外三代核电技术，实现跨越式发展。先后引进了AP1000、EPR、VVER-1200等国外三代核电技术。国家电投上海核工院负责AP1000的引进、消化、吸收和再创新工作。中广核负责EPR的引进工作。
8. 近年来，我国核电产业发展取得了举世瞩目的成绩，核电技术研发和工程应用走在世界前列，2018年，AP1000及EPR全球首堆相继在我国投入运行。
9. 具有完全自主知识产权的“华龙一号”和“国和一号”（CAP1400）的建设，标志着我国成为继美国、法国、俄罗斯等核电强国后又一个拥有独立自主三代核电技术和全产业链的国家，就在建规模和发展前景而言我国已成为全球三代核电发展的产业中心。

(二) 压水堆

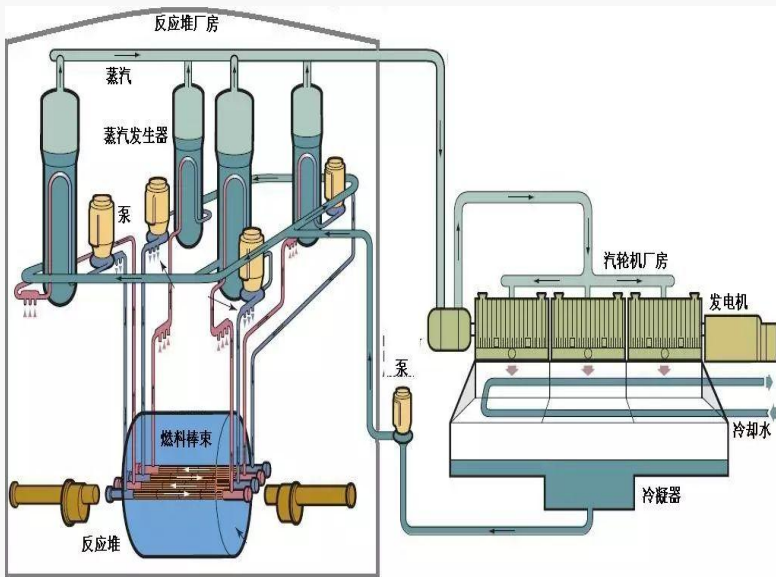
10. “华龙一号”首台套国产化率即可达到85%，经济性与当前国际订单最多的俄罗斯核电技术产品相比有竞争力，与当前主流的三代机型相比具有明显的经济竞争力。
11. 中核集团福清核电站5、6号机组和中广核集团的防城港核电站3、4号机组为“华龙一号”的国内示范项目，巴基斯坦卡拉奇2、3号机组为海外“华龙一号”的示范工程，其中福清5号机组进展比较顺利，有望在2020年建成投产。
12. “国和一号”（CAP1400）型压水堆核电机组是在消化、吸收、全面掌握第三代核电AP1000非能动技术的基础上，通过再创新，开发出具有我国自主知识产权、功率更大、安全性更高的非能动压水堆核电机组，其安全性、经济性和环境相容性达三代核电的世界先进水平。

(二) 压水堆

13. “国和一号”（CAP1400）是《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020）》中16个国家科技重大专项之一，也是我国建设创新型国家的标志性工程。
14. “国和一号”CAP1400已具备走出去的潜力，在“一带一路”建设发展中充满着机会。
15. 三代核电由于因新技术研发及不断提高安全水平等原因而带来造价增加，在经济性竞争方面面临挑战，后续需通过设计固化和优化、设备国产化、建造标准化、建设批量化以减低成本，远期规模化建设后的三代核电项目在单位造价和上网电价能够逐步接近二代改进型核电水平。

(三) 重水堆

1. 重水堆是指用重水 (D_2O) 作慢化剂的反应堆，可分为压力管式和压力壳式。加拿大发展起来的CANDU（坎杜）堆是以天然铀为核燃料、低压重水慢化、加压重水冷却的卧式、压力管式重水堆。
2. CANDU堆的特点是堆芯使用排管容器取代压水堆的压力容器，水平放置排管容器里面装有低温低压的重水慢化剂，排管容器内贯穿有许多根水平压力管，压力管中装有燃料棒束和作为冷却剂的高温、高压重水。



(三) 重水堆

3. 重水堆主要技术特点有：

- a) 以重水作为慢化剂，中子利用率高，故可以直接使用天然铀作为核燃料。
- b) 设有两个独立的非能动停堆系统，均能独立地实现安全停堆。
- c) 不停堆换料，年容量因子高。
- d) 天然铀装料的平衡堆芯后备反应性小，缓发中子寿命长，可减轻事故后果的严重性。
- e) 高温高压的冷却剂与低温低压的慢化剂在实体上是相互隔离的，反应性控制机构及停堆部件处在低温低压的慢化剂中，不会发生弹棒事件。

(三) 重水堆

3. 重水堆主要技术特点有：

- f) 大容量的慢化剂系统独立于冷却剂系统，处于常温常压状态，可用作LOCA甚至失去应急堆芯冷却后的备用热阱。
 - g) 设有喷淋水箱，可以依靠重力对安全壳进行喷淋冷却或对排管容器进行补水，并在全厂失电情况下为蒸发器二次侧提供72小时的非能动补水；
 - h) 反应堆堆腔内大量的轻水可作为除慢化剂外的另一个备用热阱，穹顶高位水箱还可对堆腔进行72小时的非能动补水以缓解严重事故后果。
- #### 4. CANDU重水堆是加拿大唯一的运行堆型。加拿大后来陆续向印度、巴基斯坦、罗马尼亚、韩国、阿根廷和中国出口商用重水堆。

(四) 重水堆

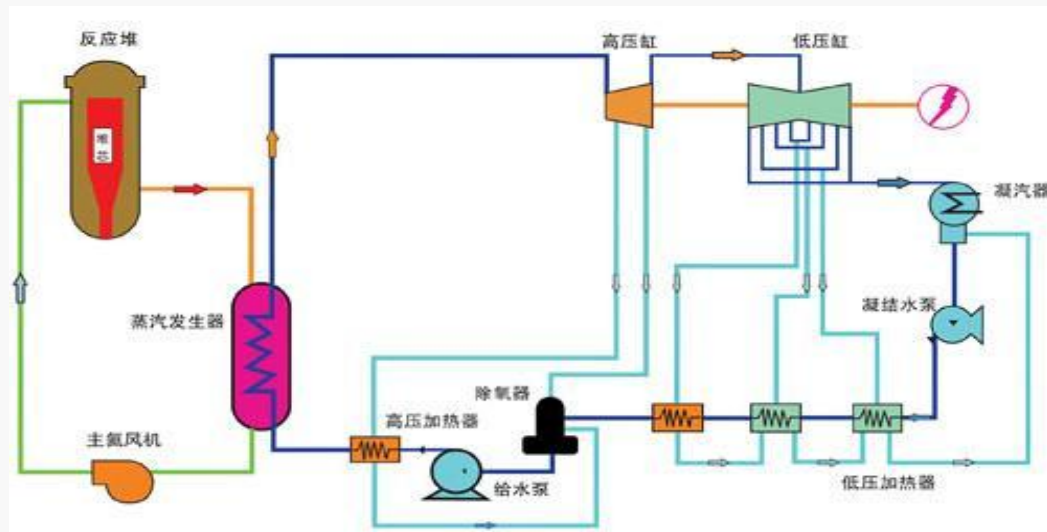
5. 20世纪90 年代我国引进了两台CANDU6 型重水堆核电机组，两台机组分别于2002 年12 月31 日和2003 年7 月24 日投入商业运行，运营业绩优良。
6. 通过这两台重水堆的建造和运营，逐步消化重水堆技术，先后依靠国内技术力量开发了重水堆生产工业和医用钴-60放射源的技术，并联合国内外相关单位开展了重水堆先进燃料和先进燃料重水堆技术开发，取得了重大进展。
7. 工业钴-60放射源已于2010年投入市场，一举打破国外的市场垄断，；2019年4月1日，我国首个医用钴靶件经辐照后顺利出堆，这标志着我国成功掌握了医用钴-60生产技术。
8. 我国暂时还不具备独立设计重水堆核电站的能力，但已与加拿大联合开发了共有知识产权的先进燃料重水堆AFCR，同时具备部分核心的核岛工艺系统的设计能力。

(五) 高温气冷堆

1. 高温气冷堆核电技术是一种采用全陶瓷型包覆颗粒燃料元件，以耐高温的石墨作中子慢化剂、以化学惰性的氦气作为冷却剂的先进热堆核电技术。
2. 由于采用耐高温的包覆颗粒核燃料，并用耐高温石墨作堆芯结构材料，因此允许反应堆冷却剂的出口温度为700~1000℃，甚至更高。
3. 一个反应堆和一台蒸汽发生器构成了一个高温气冷堆反应堆模块。我国高温气冷堆核电站示范工程HTR-PM设计有2个模块，向1台蒸汽轮机供应蒸汽，发电功率为210MWe。
4. 高温气冷堆排除了由于反应堆剩余发热导致堆芯熔化的可能性，具有固有安全性，且反应堆出口温度高，可用于高效发电，也可用于大规模工艺热应用。

(五) 高温气冷堆

5. 冷却剂氦气从反应堆顶部流过堆芯，然后流入蒸汽发生器，冷却后的氦气由布置在蒸汽发生器壳顶部的氦气循环风机加压后通过同轴连接结构的外层流回反应堆，形成一个封闭的反应堆—回路循环。
6. 新燃料元件由顶部装入堆芯，从底部卸料管卸出。卸出的燃料元件如果未达到预定的燃耗深度，则再送回堆内使用。



(五) 高温气冷堆

7. 世界上最早的高温气冷堆是1967年在西德建成并网发电，电功率为15MWe。1988年关闭。
8. 日本原子能研究所于1998年底已经建成30MWt的柱状堆芯高温工程实验堆(HTTR)，于2001年11月达到950℃高温，共花费8.5亿美元。随后日本因福岛事故暂停。
9. 我国的高温堆技术研究起步于20世纪70年代。1986年，10MW高温气冷（HTR-10）被列为国家863计划重点项目。1995年，HTR-10正式开工建设，于2000年建成并首次临界，2003年实现满功率运行并网发电，成为全球首座球床模块式高温气冷堆，确立我国在该领域的世界领先地位。

(五) 高温气冷堆

10. 我国高温堆已经获得或预期将获得一系列重大标志性成果：

- a) 建设并运行世界上第一座具有第四代核能系统安全特性的模块式高温气冷堆核电站。
- b) 形成高温气冷堆核电站的自主设计、制造、建造和运行的能力和经验，在世界上处于领先水平。
- c) 形成和拥有具有中国自主品牌HTR-PM、相关专利与一批专有核心技术，以及相关法律和标准组成的完整的自主知识产权及其保护体系。
- d) 球形燃料元件生产及科研达到世界先进水平。
- e) 建成商业化高温气冷堆研究发展试验平台及技术服务支撑平台。
- f) 为进一步研究与开发氦气直接循环发电、超临界蒸汽发电和高温气冷堆制氢等前沿技术提供基础。

(五) 高温气冷堆

11. 全球首座具有四代特征的高温气冷堆示范工程于2012年12月9日在山东荣成正式开工建设，预计2020年实现并网发电。
12. 规划2030年前实现超高温气冷堆与核能制氢设施联合运行与规模化制氢。
13. 高温堆需要解决核级石墨自主化生产问题。
14. 超高温堆需要解决堆芯和换料装置需要的低热膨胀系数材料，一回路管道、蒸汽发生器等部件所需的耐高温、耐腐蚀不锈钢还需要进一步研发并实现量产。

(六) 快堆

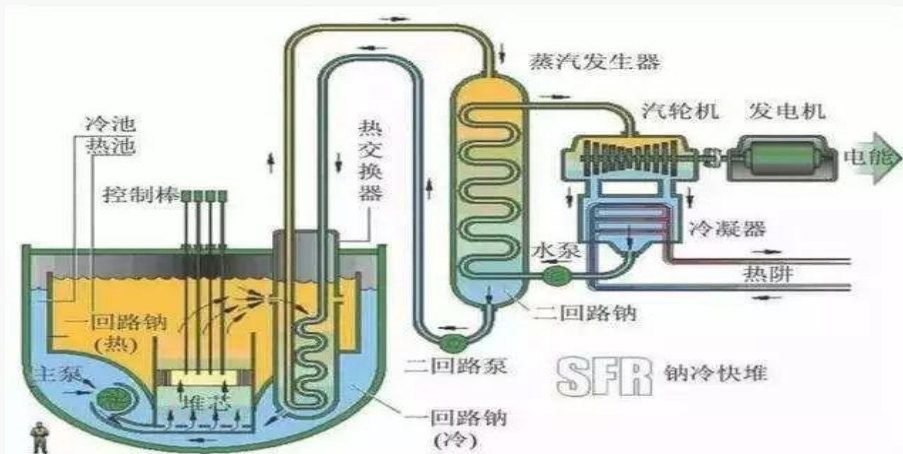
1. 快堆是利用快中子引起核裂变并维持链式反应的反应堆。
2. 与压水堆等利用热中子的堆型相比，快堆的优势在于能够对核燃料进行增殖，从而大幅提高对铀资源的利用率。
3. 同时，快堆能够有效嬗变轻水堆产生的长寿命放射性废物，从而大大减少核废料的体积，缩短需要地质储存的时间，减轻环境压力。
4. 此外，快堆具有较好的非能动安全性。近年来，出于核能可持续发展的考虑，快堆发展再次在国际范围内得到更为广泛的重视。

(六) 快堆

5. 快堆主要包括气冷快堆和液态金属快堆。气冷快堆是一种使用氦气作为冷却剂的快堆。液态金属快堆中目前开发较多的主要是钠冷快堆和铅或铅铋冷却快堆。钠冷快堆和铅基冷却快堆均采用氧化物燃料或金属燃料。根据技术发展成熟度，本报告主要介绍钠冷快堆和铅基冷却快堆。
6. 钠冷快堆是以液态金属钠为冷却剂，主要由快中子引起核裂变并维持链式反应。
7. 钠冷快堆主要优点有：高温高效率、铀资源的利用率高、良好的核废料嬗变能力、固有安全性。
8. 钠冷快堆因其在固有安全性、可增殖核燃料以及嬗变长寿命放射性废物等方面的优势，被第四代核能系统国际论坛（GIF）列为最具发展前景的堆型之一，也是6种堆型中研发进展最快、最接近满足商业核电厂需要的堆型。

(六) 快堆

9. 钠冷快堆一般包括三个热传输回路。一回路由多个环路组成，每个环路上由主泵和中间热交换器等组成一次钠循环系统。二回路也由多个环路组成，每个环路包括二次钠泵、蒸汽发生器组(通常由1台蒸发器和1台过热器组成)、钠缓冲罐、中间热交换器、钠分配器和连接管道等。
10. 三回路即水-蒸汽回路由蒸汽发生器和汽轮发电机组，给水泵，主蒸汽管道等构成，与压水堆不同，这里的蒸汽为过热蒸汽，而不是饱和蒸汽。



(六) 快堆

11. 从1946年美国建成世界上第一座快堆（25kW热功率Clementine）起，到目前为止全世界总共建成过23座钠冷快堆，积累了约400多堆年的运行经验。
12. 美国发展快堆技术最早，计划建立统一的燃料处理中心（CFTC）和一座先进的600MWe钠冷嬗变快堆（ABR）。美国基于其核电站乏燃料已积累5万多吨的现状，发展快堆不是为了燃料的增殖，而是焚烧和嬗变高放废物。
13. 俄罗斯是发展快堆最早的国家之一，也是目前运行快堆数目最多的国家。600MWe的原型快堆电站BN-600已运行38年，80万千瓦的BN-800型反应堆于2016年10月31日正式投入商业运行，是全球在运的最大的钠冷反应堆。
14. 法国的钠冷快堆技术最为先进，曾建成1200MW的超凤凰（Super Phenix）商用示范快堆，目前正在进行第四代反应堆（GEN-IV）的快堆技术研发。

(六) 快堆

15. 我国快堆实施“实验堆—示范堆—商用堆”“三步走”发展战略。在2020年到2025年之间实现钠冷快堆的试验示范，2030年到2050年之间建成商业快堆，初步实现先进核燃料循环系统。
16. 1995年12月，我国20MWe实验快堆工程立项，2014年12月实现满功率。是目前世界上为数不多的具备发电功能的实验快堆。
17. 我国600MWe示范快堆工程于2017年12月29日开工建设，计划于2023年建成。
18. 我国开展铅基反应堆技术研究已有30多年的历史。中科院在战略先导科技专项“未来先进核裂变能（ADS）”的支持下，进行了铅基反应堆技术的系统性研究。建成了世界上规模最大、参数水平最高的液态铅合金技术综合实验平台，形成了具有自主知识产权的铅基堆技术体系，整体达到国际领先水平。

(七) 小型模块化堆

1. 小型模块化反应堆通常指采用模块化设计的电功率在300MWe以下的反应堆。
2. 小型模块化反应堆可以克服当前大型先进轻水堆技术和第四代核能技术中建造反应堆所需大量初始投资、投资者面临重大财务风险、反应堆大小与电网或需求不匹配、技术不成熟等障碍，是当今核能利用研究与新型市场竞争热点。
3. 根据IAEA 2017年统计，全世界当前共有近50种小堆概念设计，技术成熟度不同，其中以小型压水堆技术最为成熟。
4. 小型模块化反应堆通常采用模块化设计与加工制造，能够实现快速批量制造，有效缩短建造工期；通常采用经过验证的成熟技术，并汲取核工业发展中重要经验反馈，使用增强安全设计特性，可以避免新型技术带来的风险。

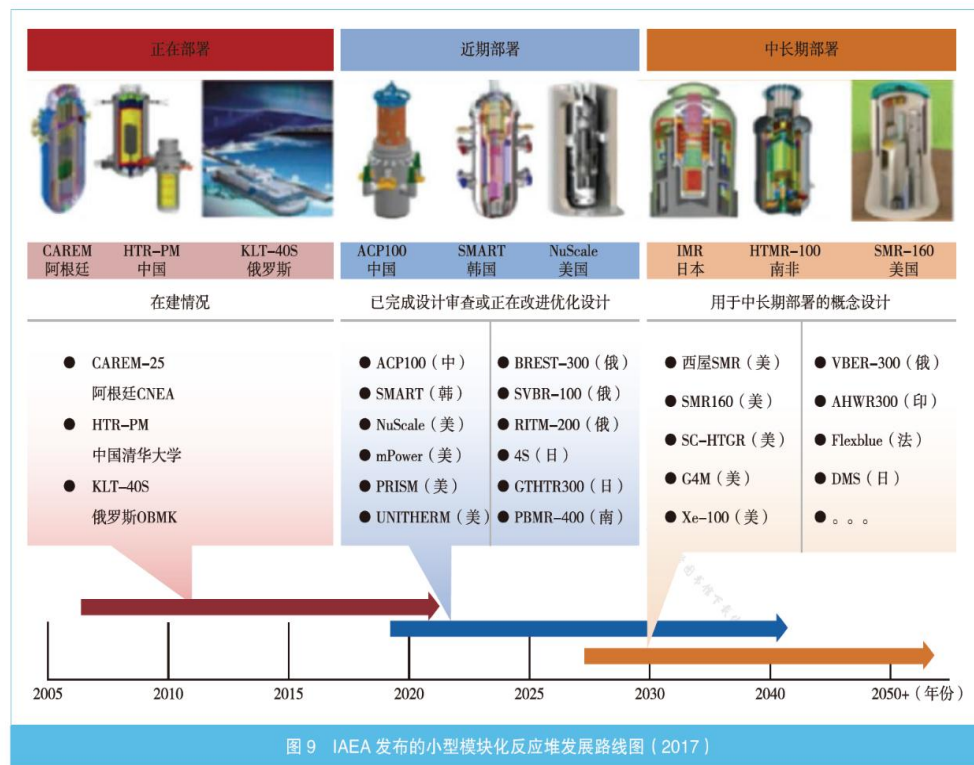
(七) 小型模块化堆

5. 小型模块化堆具备多场景应用能力，能够在陆上和海上多种厂址条件下灵活布置，实现偏远地区供电、城市供热、海水淡化、海上核动力平台、离岸海岛的综合供能等多样化应用需求。



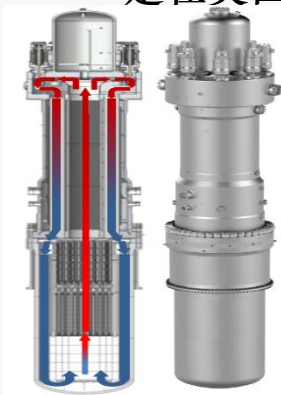
(七) 小型模块化堆

6. 根据IAEA 2017年统计，全世界当前共有近50种小堆概念设计，技术成熟度不同，其中以小型压水堆技术最为成熟。



(七) 小型模块化堆

7. 已开展工程建设的小堆技术有俄罗斯的KLT-40S、阿根廷的CAREM和中国的HTR-PM。完成研发并具备工程应用条件的技术包括韩国的SMART、中国的ACP100、ACPR50S等。其中，中国的ACP100小堆计划2019年年底在海南昌江开工建设，ACPR50S已经开始主设备招标工作。
8. 美国是小型模块化反应堆研发的重要推动者，mPower是在美国巴威公司（Babcock & Wilcox）早年开发的小型一体化反应堆。
9. mPower最突出的特点是采用内置的一次通过式蒸汽发生器、稳压器和控制棒驱动机构。



(七) 小型模块化堆

10. 国外其他小型模块化反应堆主要有：美国的NuScale、W-SMR、SMR160；俄罗斯的船舶动力堆ABV-6E、浮动式小型模块化堆KLT-40S（已建成）、用于新一代破冰船RITM-200；韩国的一体化模块式先进反应堆SMART（可发电并可用于海水淡化）；阿根廷CAREM。
11. 我国小堆技术发展迅速，多种堆型取得积极的研发进展。
12. 陆上多用途小堆方面，中核的ACP100 已经完成初步设计，通过了国家核安全局的设计审查和IAEA 通用设计审查，首堆厂址也已初步选定。国家电投的CAP150/200已经完成方案设计，正在开展初步设计，这两种堆型与ACP100 一起入选了IAEA 的小堆创新发展的路线图。中广核的ACPR100 正在方案设计的固化中。

(七) 小型模块化堆

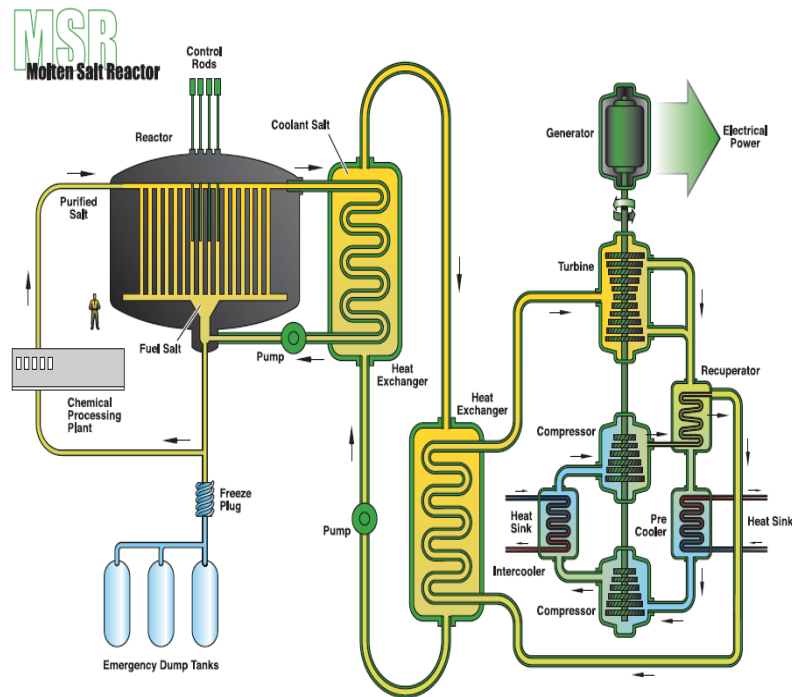
13. 海上小堆方面，中广核的ACPR50S被纳入了IAEA的小堆创新发展的路线图，正在初步设计的进一步完善中，实验堆主体工程进入工程实施阶段；中核的ACP100S已经完成初步设计和关键技术攻关；国家电投的CAP50S和CAP10S进入初步设计。国家电投与相关船舶设计制造运营单位合作完成海洋核动力平台初步可行性研究报告。
14. 低温供热堆方面，中核启动了“燕龙”低温供热堆“演示验证—示范工程—商业推广”三步走发展战略的第一步——泳池式轻水堆（49-2堆）安全供热满168小时试验演示，并成立了核能供热技术研究中心。中广核与清华大学正在积极推进NRH200-II的工程应用，在河北推进的示范项目厂址论证等前期工作。国家电投的HAPPY200 概念设计已经通过内部评审，技术方案正在进一步完善中。

(八) 熔盐堆

1. 熔盐堆MSR(Molten-Salt Reactor)是以熔盐作为冷却剂的反应堆。
2. 熔盐具有高温、低压、高化学稳定性、高热容等非常理想的反应堆热量传输特性，可建成常压、紧凑、轻量化和低成本的反应堆。
3. 熔盐堆运行只需少量的水，即使在干旱地区也能够高效发电。
4. 熔盐堆输出温度可达700℃以上，既可用于发电，也可用于工业生产和高温制氢、吸收二氧化碳制甲醇等，缓解气候问题和环境污染问题，实现核能综合利用。
5. 熔盐堆的最大特点是采用溶解在氟化锂、氟化钠等氟化盐中的钍或铀的液态融合物作为燃料，无需专门制作固体燃料组件。

(八) 熔盐堆

6. 熔盐堆堆芯流出的高温燃料熔盐通过一次侧热交换器将热量传给二次侧冷却剂熔盐，再通过二次侧热交换器传给三回路的氦气进行发电或制氢。由此可见，熔盐堆整个堆芯的高温燃料熔盐既是载热剂，又是核反应的热源，是完全不同于其它固体燃料的一种全新核反应堆燃料利用技术。



(八) 熔盐堆

7. 熔盐堆的液体燃料决定了其工作原理与常规固体燃料反应堆的工作原理有所不同，含有裂变和可转换材料的燃料熔盐在堆芯发生裂变反应释放热量，并被自身吸收、带走，不需另外的冷却剂。
8. 熔盐堆具有固有安全性。采用高温熔盐作核燃料，兼作载热剂，不需专门制作燃料组件，从设计上避免了严重事故。
9. 熔盐堆可不需要特别处理而直接利用铀、钍和钚等所有核燃料，也可利用其它反应堆的乏燃料，还可利用核武器拆解获得的钚。由于熔盐堆不使用或使用少量的浓缩铀，并产生极少的可以制造核武器的钚，所以可有效地防止核扩散。
10. 熔盐堆可以采用布雷顿循环，发电效率高达45 %~50%，并可产生高温工艺热，用于大规模制氢等。

(八) 熔盐堆

11. 美国橡树岭国家实验室在熔盐堆方面开展了深入而全面的研究，20世纪40~50年代，基于美国空军“核能推进飞行器”需求，曾开展2.5MWt的实验熔盐堆ARE的设计建造。1964年又完成了10MW熔盐堆实验装置MSRE的建造，奠定了世界上熔盐堆技术的基础。
12. 目前，世界上还没有正在运营中的熔盐反应堆。美国、加拿大、英国、俄罗斯、日本均处于熔盐堆开发的早期阶段。
13. 20 世纪 70 年代初，我国也曾选择钍基熔盐堆作为发展民用核能的起步点，上海“728 工程”于 1971 年建成了零功率冷态熔盐堆并达到临界，但限于当时的科技、工业和经济水平，“728 工程”转为建设轻水反应堆。

(八) 熔盐堆

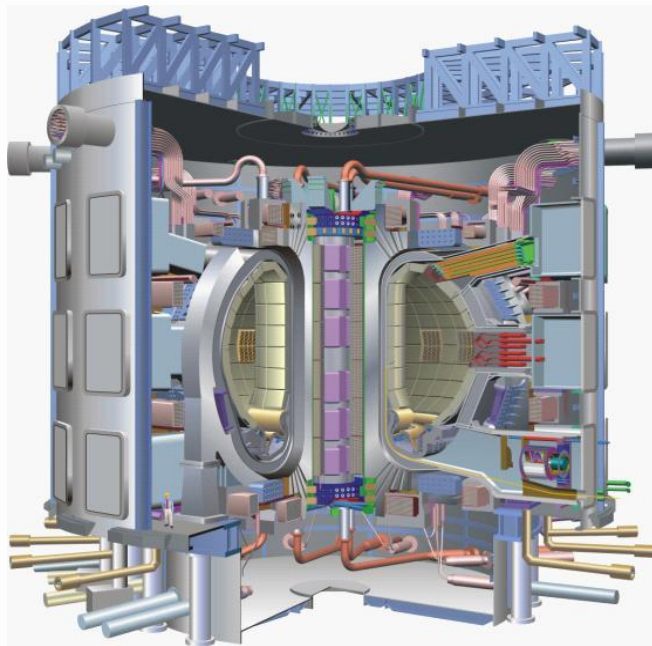
14. 2011年中国重启钍基熔盐堆研究，目前我国已系统掌握了钍基熔盐堆的系列关键技术，已经可以建造出体积非常小的熔盐堆，并将通过2017年在甘肃开始建设的2MWt钍基熔盐实验堆来证明这一技术的可行性。
15. 熔盐堆存在运行温度高、熔盐腐蚀性强和后处理技术不成熟等特点，还有一些关键技术难点需要解决。

(九) 聚变堆

1. 核聚变是轻核（一般是氢的同位素氘和氚）聚合成较重的原子核并释放出巨大能量的过程，聚变反应可释放出大量的能量，聚变产物是比较稳定的氦。
2. 由于核聚变的固有安全性、环境优越性、燃料资源丰富性，因此聚变能被认为是人类最理想的清洁能源之一。
3. 20世纪50年代初，人类就实现了核聚变反应。人类要把聚变时释放出的巨大能量用于社会生产和人类生活，必须对剧烈的核聚变反应加以控制，这就是受控核聚变。
4. 根据对高温等离子体的不同约束方式，受控核聚变可分为磁约束（MCF）和惯性约束（ICF）两种。

(九) 聚变堆

5. 磁约束聚变是指用特殊形态的磁场把氘、氚等轻原子核和自由电子组成的处于热核反应状态的超高温等离子体约束在有限的体积内，使它受控制地发生大量的原子核聚变反应，释放出能量，主要有托卡马克、磁镜、仿星器等不同类型。当前国际磁约束聚变能开发的主流路径是托卡马克类型。



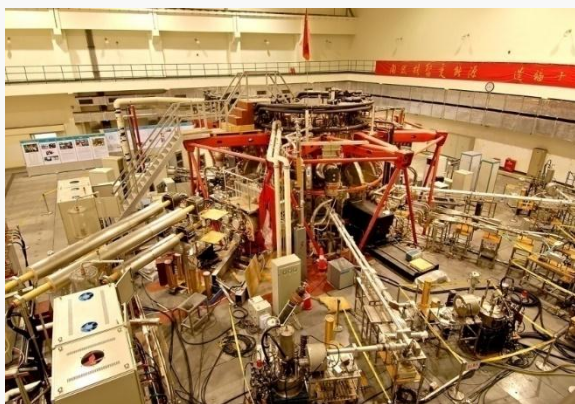
国际热核聚变实验堆(ITER)

(九) 聚变堆

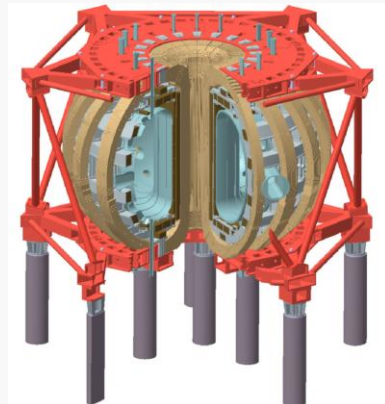
6. 国际热核聚变实验堆 (ITER) 位于法国南部卡达拉奇, 设计聚变总功率达到50万 kW, 是一个电站规模的实验反应堆。
7. 参加ITER计划的七方包括中国、欧盟、印度、日本、韩国、俄罗斯和美国。
8. ITER计划的目标是在和平利用聚变能的基础上, 探索磁约束聚变在科学和工程技术上的可行性。其作用和任务: 用具有电站规模的实验堆证明氘氚等离子体的受控点火和持续燃烧, 验证聚变反应堆系统的工程可行性, 综合测试聚变发电所需的高热流和核部件, 实现稳态运行, 从而为建造聚变能示范电站奠定坚实的科学基础和必要的技术基础。

(九) 聚变堆

9. 我国的受控核聚变研究起始于1950年代，几乎与国际上的进展同步。
10. 我国现在运行的托卡马克核聚变实验装置是“中国环流器二号A (HL-2A)”装置，正在建设“中国环流器二号M (HL-2M)”新的核聚变实验装置。



A (HL-2A)



M(HL-2M)

(九) 聚变堆

11. 中国科学院等离子体物理研究所正在运行的实验先进超导托卡马克 (EAST) 核聚变实验装置, 又名东方超环, 是世界上第一个“全超导非圆截面托卡马克装置”。
12. 近年来, EAST一直走在国际竞争最前列, 在高性能、稳态、长脉冲等离子体研究方面成绩傲人。2018年11月12日, 中科院等离子体物理研究所发布消息: EAST近期实现了等离子体中心电子温度达到1亿摄氏度等多项重大突破, 获得的实验参数接近未来聚变堆稳态运行模式所需要的物理条件, 朝着未来聚变堆实验运行迈出了关键一步。



EAST装置

(九) 聚变堆

13. 与先进的ITER实验堆相比，我国正在运行的H-2A、EAST以及在建的HL-2M托卡马克实验装置，无论在规模上还是在运行参数上都有一定的差距。但通过成功设计、建造和运行EAST和HL-2A/2M装置，我国磁约束核聚变研究的部分领域已经进入国际前沿。
14. 实现核聚变能发电需要经历六个发展阶段，分别是：原理性探索、规模化实验、核聚变点火、反应堆工程物理实验、示范堆（DEMO）和商用核聚变电厂。
15. 我国已经走过了前两个阶段，当前正处于第三阶段“核聚变点火”（氘氘燃烧实验），并部分启动了第四阶段“反应堆工程物理实验”的研究内容。预计到2050年前后，我国将有能力和有条件着手建设中国核聚变原型电厂。

- 一、前言
- 二、核能发电技术研究最新进展
- 三、核能发电技术学科发展趋势及展望
- 四、创新发展机制分析与建议
- 五、小结

（一）发展趋势

当前世界核能总的发展路线是：现有核电机组在确保安全的前提下延长使用寿命→新建第三代压水堆机组→开发第四代核能系统→核聚变堆。

我国核电发展执行“热堆-快堆-聚变堆”三步走的方针。快堆是满足第四代反应堆燃料增殖要求的、使用快中子能谱以及能充分利用天然铀资源的堆型。聚变堆可以解决人类的能源问题，并且不会产生放射性废物，是目前科技发展的追求目标。

结合国内外的核电技术走向和市场需求，本报告提出世界和我国核电后续发展八个方面的发展趋势：

1. 核电安全性有更高的要求。核电站的安全问题是核电发展的根本保障，福岛事故再次敲响了安全警钟，核电安全更加受到关注，IAEA和NRC等机构提出了更高的安全要求；我国也明确国内新建核电厂采用三代核电技术路线，满足最高安全标准；并提出了实际消除大量放射性物质释放的要求。进一步提升核电站设计与运行安全水平，是核电技术最重要的研究与发展方向。
2. 深化三代核电技术，提高核电经济性。在市场经济条件下，在满足安全法规要求，解决了工程可行性及运行维修可实现性之后，经济性起决定作用。通过优化机组性能、实现标准设计，提高设备制造能力、构建三代核电供货商体系，提高施工管理与运行维护水平等方式，降低核电站设计、制造、建造和运行成本，进一步提高核电经济竞争力。

3. 核电共性技术科技创新持续发展。开展覆盖核电厂全寿期的先进技术研究，包括数字化电厂平台研发、先进燃料设计、乏燃料贮存技术等，保证核电技术的可持续发展。如数字化电厂是通过对电厂物理和工作对象的全生命周期量化、分析、控制和决策，提高电厂价值的理论和方法，其可应用于核电厂生命周期的各个阶段，包括设计研发、制造、建造、安装、调试、运维、退役等。
4. 核电型号技术发展呈现多元化发展趋势。从市场需求和电网能力角度，系列化型号开发（同一技术体系、不同电厂容量）已成为核电发展的重要战略选择；小型非能动反应堆概念逐渐受到国际核电市场的青睐，其固有安全性更容易提升，用途更为广泛。

5. 发展智慧核能。开展大数据中心基础平台和应用开发平台研究，形成基于数字化电厂的核电全生命周期数据协同和业务协同体系，实现数字化研发、数字化/智能化设计、数字化验证、数字化/智能化建造、数字化/智能化运维，实现核电智能化运行和辅助决策。
6. 延寿。核电站延寿就是指当核电站到达设计运行寿期或运行执照许可运行期限后，通过核安全监管部门的评审，申请运行许可证延续，继续保持核电站的运行。核电机组延寿，经济性考量是最主要的原因，新建一座核电站费用动则上百亿元，但是通过延寿可以使核电站再运行10~30年，而花费的费用却少的多。根据2009年的统计，美国132台核电机组中，NRC已经批准其中74台机组寿期从40年延长到60年。

三、核能发电技术学科发展趋势及展望

⑩56

7. 核电退役。目前全世界已有约120座核电站关闭。核电站的退役常采取三种形式：一是核电站停止运行后立即拆除，并清除反应堆的放射性物质；二是将反应堆封存几十年，待其放射性自然衰减后再拆除；三是在反应堆外建造一个混凝土外壳，将反应堆长期罩起来。核设施退役一般包含5个步骤：建筑物、系统、设备去污；系统、设备拆除；建（构）筑物拆毁；场址环境整治；场址移交、封存监护。
8. 结合世界核电发展需求，我国政府也逐步将核电“走出去”上升为国家战略，通过核电技术“走出去”，带动国内相关装备制造业与技术服务高附加值产品出口。“华龙一号”已签订了两台机组的出口合同，并签订了多台机组的出口框架协议。作为压水堆专项成果，我国自主核电品牌CAP1400在土耳其市场已经取得了阶段性进展，土耳其方面已经签署企业合作备忘录并进入排他性协商期。因此，核电产业自主化和技术国际竞争力也应成为国内核电发展的重点方向。

(二) 发展展望

1、压水堆核电技术

(1) 增强安全性

1) 非能动安全能力增强。通过非能动技术的运用，核电厂的安全性能得到了很大程度的提升。进一步增强非能动安全能力是后续发展的重要方向，最新的第四代核能技术路线图(OECD) 强调了长期非能动安全性。

2) 严重事故缓解增强。对严重事故开展研究的终极目的是在发生核事故甚至演变为严重事故时，确保作为三层保护中最后一层屏障的安全壳的完整性，确保在这里卡住事故的进度，不让事故继续演变，从而消除放射性大规模释放的可能性。目前针对严重事故缓解的措施主要有：长期冷却的多样化；开发完善严重事故缓解导则SAMG；强化堆芯熔融物滞留能力等。

(二) 发展展望

1、压水堆核电技术

(2) 提高先进性

1) 采用一体化技术。主要体现在小型反应堆，代表型号有美国巴威公司的 mPower、西屋公司的W-SMR及美国纽斯凯尔电力公司的 NuScale，这些小堆与当前环路式压水堆相比，将冷却剂泵、控制棒驱动机构、稳压器、蒸发器与压力容器相结合，实现一体化，降低了始发事件数（尤其是LOCA）和堆芯损伤频率，增强了安全水平，降低了中子对压力容器的影响，延长了压力容器的寿命。

2) 进一步简化设计。简化包括系统部件的简化、人员操作的简化、人因工程的简化等，主要体现在简化核电系统，比如简化堆芯冷却系统及支持系统、简化辅助系统和BOP等，可以达到降低造价、简化运行和降低人因事件概率的目的。

(二) 发展展望

1、压水堆核电技术

(2) 提高先进性

3) 优化安全壳设计。安全壳的功能扩展是要可靠地包容放射性物质，增强抵御外部事件能力，分为钢制安全壳和预应力混凝土安全壳。

4) 乏燃料储存技术。目前乏燃料的处理方式分为一次通过或者再循环，而再循环处理的能力有限。目前世界乏燃料主要采用水池贮存，部分采用干式贮存，干式贮存有可能成为以后较长时间内的安全有效的解决途径，需要重点关注的技术有：非能动传热技术、临界安全技术、辐射安全技术、设备试验验证技术以及基础材料开发。

5) 退役技术。商用核电站在永久停堆之后，为了解除法规上要求的部分或全部放射性安全管制，必须采取一系列措施，从而使厂址可以无需安保措施便可自由用作他途。

(二) 发展展望

1、压水堆核电技术

(3) 开发新型燃料

燃料研发的热点是事故容错燃料（ATF，EATF）的发展。相较于传统的UO₂-Zr合金燃料，事故容错燃料能够在反应堆正常运行工况下维持或提高燃料性能，并在事故发生后相当长的一段时间内维持堆芯完整性，提供足够的时间裕量来采取事故应对措施，防止或者减轻在事故工况下的后果。

ATF的研发和应用，将从根本上提高燃料和反应堆对严重事故的抵抗能力，有效缓解严重事故后果，显著提高电厂的安全性能，并形成新的核电安全标准。另一方面，由于ATF从本质上消除了反应堆在事故工况下的氢气产生来源，可简化新建核电厂的安全及辅助系统，有效提高核电的经济性。

(二) 发展展望

2、重水堆核电技术

先进燃料重水堆（AFCR）已经完成了技术方案的开发，还需继续进行中期研发以及结合厂址开展概念设计、详细设计等，在此过程中，需要解决如下主要技术问题：

（1）回收铀燃料制造。回收铀燃料的成分各不相同，在制造成燃料时必须进行充分混合，保证其核特性的稳定，以免在换料时对堆芯造成冲击，也有利于在燃料在堆芯中的跟踪监测。

（2）先进燃料重水堆的设计。现已完成了总体概念设计，可结合厂址进行初步设计。部分系统和设备需要进行试验验证，另外需重点开展DCS适用性分析、设备国产化相关研究。

（3）钍燃料应用基础研究。重水堆一直被认为是钍资源核能利用的突破口。

(二) 发展展望

3、高温气冷堆核电技术

(1) 发展商业化多模块高温气冷堆核电站。在重大专项高温气冷堆示范工程基础上，研发和推广后续商业化多模块高温气冷堆核电站。目前，清华大学已发布60万千瓦多模块高温气冷堆核电站总体技术方案，2018年下半年完成标准设计，长周期设备具备采购条件。计划2030年实现60万千瓦高温气冷堆批量化部署。

(2) 实现超高温气冷堆核能制氢。突破超高温气冷堆核能制氢工程化技术，实现规模化的高温气冷堆制氢。计划2020年前后完成现有高温气冷堆超高温运行技术论证，实现核能高温制氢工程化技术中试；2030年前实现超高温气冷堆与核能制氢设施联合运行与规模化制氢。

(二) 发展展望

4、快堆核电技术

(1) 坚定我国快堆发展技术路线，自主开发包括钠冷/铅冷快堆技术在内的闭式燃料循环技术。

(2) 增强反应堆的固有安全性，如将钠空泡效应设计得尽量小、增大自然循环流量等非能动安全技术的研发和应用；开展严重事故理论及实验研究，增强反应堆抵御严重事故风险的能力；降低钠泄漏概率，以降低发生钠水反应及钠火的风险。

(3) 通过自主设计、建造示范快堆工程，全面掌握快堆设计与建造技术，为提高快堆经济竞争能力奠定技术基础。

(4) 重视国际合作的开展，积极发展双边及多边国际合作，降低研发成本，共享科研成果，缩短研发周期。

(二) 发展展望

5、小型模块化堆核电技术

(1) 反应堆设计进一步向模块化、非能动、一体化方向发展，并从设计上实际消除大规模放射性释放以及实现废物最小化。小型模块化堆的高安全性、环境友好性使其可以部署在更加接近居住环境的区域。

(2) 鉴于我国国情，小型模块化反应堆作为单纯发电用途可能不具备经济竞争力，然而小型模块化反应堆可满足我国北方城市集中供热、沿海缺水城市海水淡化的需求，可满足我国海洋大国的发展战略和海洋经济开发中的能源和淡水需求。

(3) 针对特定市场，发展陆基多用途小型模块化反应堆和开发海洋小型模块化反应堆在我国仍具有实际工程应用价值，应积极开拓小型模块化堆在太空探索、海洋开发、供热、工业用汽、海水淡化、制氢等各种场景的下的用途。

(二) 发展展望

6、熔盐堆核电技术

- (1) 我国钍基熔盐堆采用实验堆-研究堆-示范堆-商用堆的研发技术路线图。
- (2) 计划将于2020年左右，建成2MWt钍基熔盐实验堆，成为国际上唯一运行的液态燃料熔盐堆。
- (3) 2030年左右率先建成百MW级电功率小型模块钍基熔盐示范堆。
- (4) 2040年左右建成百吨级钍基乏燃料盐干法批处理示范装置和在线固态裂变产物分离示范装置，钍燃料贡献率约80%，实现钍基核燃料循环和高效利用。

(二) 发展展望

7、核聚变技术

(1) 为尽快促使聚变能源在中国的早日利用，我国确定的聚变能开发的战略步骤为：聚变能技术-聚变能工程-聚变能商用三个阶段。

(2) 以建立接近堆芯级稳态等离子体实验平台，吸收消化、开发与储备后ITER聚变堆关键技术，设计并筹备建设200~500MW的中国聚变工程实验堆 CFETR等为近期目标（2010~2020年）。

(3) 以建设、研究、运行聚变堆为中期目标（2020~2035年）。

(4) 以发展聚变电站为长远目标（2035~2050年）。

(4) 我国计划在2050年实现核聚变商业化，完成人类终极能源。

一、前言

二、核能发电技术研究最新进展

三、核能发电技术学科发展趋势及展望

四、创新发展机制分析与建议

五、小结

（一）发展驱动力分析

在全球低碳发展趋势下，掌握先进核能发电技术是一个国家核心竞争力的标志，发展自主知识产权的核能发电技术符合我国的国家安全和能源战略，其驱动力主要来自如下四个方面：

1. 国家能源安全的需要。发展核电是实现我国能源安全供应和供给侧结构改革的重要保证，实现能源结构的多元化和低碳化，是全球各国能源安全的战略选择。我国60%以上的石油和30%以上的天然气需要通过国际市场来供应，能源对外依存度居高不下。为实现能源结构多元化，需要降低对单一能源品种的依赖，各能源品种需要齐头并进。核电相较于水电、光伏和风电等，具有电力输出可控、受自然条件约束少等优点。发展三代核电可以为我国能源结构调整提供支撑。

(一) 发展驱动力分析

2. 积极应对气候变化、兑现减排承诺和绿色低碳发展的重要选择。我国一直是全球应对气候变化事业的积极参与者。根据《巴黎协定》，我国承诺到2030年非化石能源占一次能源消费总量的比重到20%，核能作为清洁能源，是优化能源结构，应对气候变化、改善大气环境，达成减排目标不可或缺的选择途径，是兑现国际减排承诺的重要手段，发展核电对实现绿色低碳发展具有不可替代的作用。核能是目前人类掌握的能量密度最高的能源获取方式，核能相比太阳能、风能、水能等可再生能源具有连续性好、土地占用少、材料消耗少、碳排放低等显著优点。核能具有温室气体排放量少的优点，作为绿色能源支柱，积极发展核电是中国的长期重大战略选择。

(一) 发展驱动力分析

3. 提升国力的需要。我国面临的国际形势比较复杂，国际竞争日趋激烈。核工业一直是我国的战略性产业之一。作为民用核能事业的主体，核电是现代高科技密集的代表，其发展不但有助于大幅提升我国科技自主创新能力，扩大我国在核燃料循环、核电装备、核技术应用等高新技术领域的产业规模，同时还能有效带动其它高技术产业整体发展，促进传统产业的改造升级。积极推进核电建设、推动核电出口，是贯彻落实“创新、协调、绿色、开放、共享”五大发展理念，推进“一带一路”倡议和“走出去”战略的良好实践，对于满足经济社会发展不断增长的能源需求，实现能源、经济和生态环境协调发展，提升我国国际影响力、综合经济实力和持续发展水平具有十分重要的意义。

（一）发展驱动力分析

4. 促进军民融合发展。发展核电是我国军民深度融合发展的重要领域。核电是国内民用核能技术的主要载体，通过技术的引进、消化、吸收和再创新，自主化核电可以在强军战略、军民融合、以民促军中扮演重要角色。以发展核电为契机促进核能领域军民融合发展，助力中华民族伟大复兴和我国两个百年奋斗目标的实现。

（二）影响发展的因素分析

我国的核能发展总体上看是积极和乐观的，但是危机和挑战也逐步逼近。核电经济性是最大的挑战。虽然还有市场发展空间，但是随着可再生能源的成熟和降价，核能发展空间受到挤压。虽然核能技术从跟跑发展到并跑、领跑阶段，但是在关键技术和核心材料等领域还受制于人，在基础科研、新技术和新概念开发方面还有一定差距。影响我国核电发展的主要因素有：

1. 公众接受度。社会群体事件在核电相关项目前期工作阶段时有发生；信息公开、透明工作处理不当可能引发社会不稳定事件；受境内外恶意势力利用而发生群体事件不容忽视；核电厂与当地群众由于各类经济纠纷而发生群体事件。

(二) 影响发展的因素分析

2. 核电安全性。核电营运单位核安全文化建设参差不齐，自满情绪及利益驱动对核安全的潜在不利影响需求需要警惕；我国核应急能力建设仍然存在薄弱环节；核安全科技创新能力不强、科研成果转换缓慢。
3. 核电经济性。相对于风电、光伏等新能源，核电竞争力减弱，核电消纳风险已经显现；在建机组经济性不确定因素较多。
4. 放射性废物处理处置。我国中低放固体废物安全处置的压力将越来越大，高放废物的最终处置是核电发展必须面对和解决的问题。

（二）影响发展的因素分析

5. 核电“走出去”面临压力和挑战。核电“走出去”面临技术先进性和安全性方面更高要求、融资成本偏高、核安全监管合作与监管能力建设有待加强、核电“走出去”面临着较大知识产权纠纷压力等问题。
6. 厂址资源。内陆核电厂址开发利用面临困境，沿海厂址有限，核电厂址开发标准与保护政策需进一步完善。

（三）发展战略及建议

基于我国能源安全需要、核安全发展需要以及环境安全需要，针对我国核能发电的中长期发展战略方向提出如下建议：

1. 进一步提升压水堆核电技术的更新换代和国产化，做大做强三代压水堆核电站技术，实现产业化、规模化，并做好人员储备。
2. 加快第四代快堆技术及其闭式燃料循环技术的发展，为实现三代压水堆技术向第四代快堆技术的平稳过渡奠定技术基础，实现压水堆-快堆-闭式燃料循环技术的工业化验证。
3. 加快小型化模块堆发展，目前小型压水堆和池式供热堆技术已趋成熟，具备建设示范工程的基础，建议加快示范落地。同时，推动浮动核能平台建设，开拓海洋资源。

(三) 发展战略及建议

4. 加强先进核燃料技术的研发，通过先进核燃料研发，严重事故机理研究，完善先进理念的安全系统、设置完善的严重事故预防和缓解措施、增强对外部事件的防御能力应用，实施核废物最小化。完成乏燃料的中间贮存，商业规模的后处理厂关键技术取得突破及开工建设。
5. 利用信息化、智能控制和智能制造等技术，基于大数据云平台而设计、建造、运维新一代核电机组，实现电站高度智能化控制及动态管理。
6. 结合世界核电发展需求，将核电“走出去”上升为国家战略，通过核电技术“走出去”，带动国内相关装备制造业与技术服务高附加值产品出口。
7. 以信息公开和公众参与为着眼点，增强公众对核安全的信心。

- 一、前言
- 二、核能发电技术研究最新进展
- 三、核能发电技术学科发展趋势及展望
- 四、创新发展机制分析与建议
- 五、小结

1. 我国核电虽然起步较晚，但经过40余年的发展，取得了举世瞩目的成就，不仅建成了一批技术先进、安全性好、运行业绩优良的核电厂，实现了从二代核电向三代核电的技术跨越，而且形成了核电发展完整的产业链和保障体系。
2. 我国经济总量将持续扩大，能源刚性需求将长期存在，发展核能是优化我国能源结构、建设美丽中国、应对全球气候变化的战略选择。
3. 作为目前唯一可以大规模替代化石能源的低碳能源，核电将与风电、光伏发电等清洁能源形成互为补充、协同发展的局面。另外，核能在工业供热、大规模制氢、海水淡化、边远地区能源供应等方面都具有很大的发展潜力。

4. 有必要稳妥推进核能产业的可持续发展，进一步提升压水堆核电技术的更新换代和国产化，做大做强三代压水堆核电技术；加快第四代快堆技术及其闭式燃料循环技术的发展，实现三代压水堆技术向第四代快堆技术的平稳过渡，实现压水堆-快堆-闭式燃料循环技术的工业化验证。
5. 作为核能技术利用的重要补充，稳固发展高温气冷堆的应用开发，并开展对钍基熔盐堆研究拓展资源利用、探索铅铋快堆等反应堆小型化的开发。
6. 支持先进核能技术的发展，在压水堆-快堆-聚变堆的三步走战略下，进一步支持聚变能技术研究，以推动早期实现聚变能利用。跟踪和支持国际上较为先进的超临界水堆、ADS嬗变系统以及熔盐堆等前沿核能技术的研究。



汇报完毕，谢谢！