

中国核能行业协会先进核能制造经验交流会

SMR所需的典型创新制造暨小型模块化钍基熔盐堆研究设施建造构想

李志军

中国科学院上海应用物理研究所

2022年8月23日，武威

 中国科学院先进核能创新研究院

 中国科学院上海应用物理研究所
Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences

汇报提纲

 **中科院上海应用物理研究所介绍**

 **小型模块堆介绍**

 **小型模块堆建造变革性技术**

 **用在熔盐堆新技术和后续发展技术**

汇报提纲

 **中科院上海应用物理研究所介绍**

 **小型模块堆介绍**

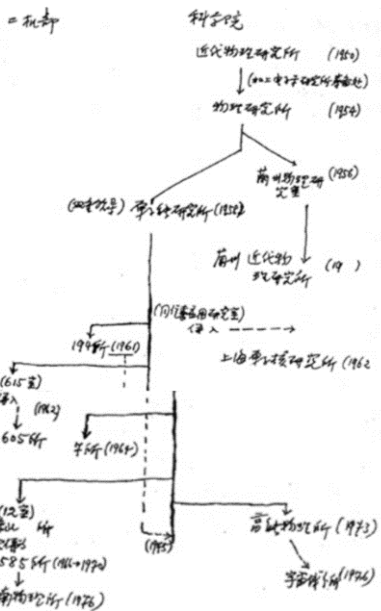
 **小型模块堆建造变革性技术**

 **用在熔盐堆新技术和后续发展技术**

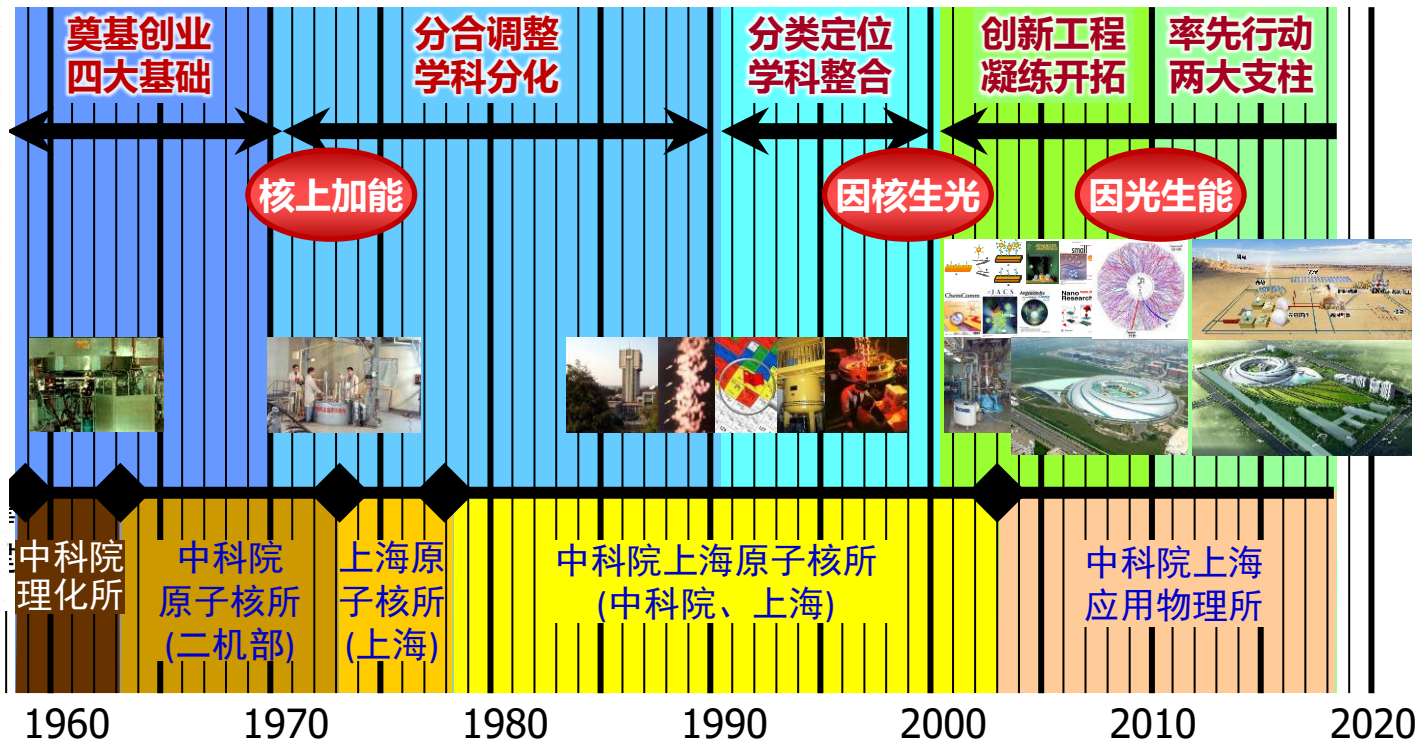
中科院上海应用物理研究所

- 成立于1959年，原名中国科学院上海原子核研究所，2003年因建设“上海光源”国家大科学装置而改为现名
- 是中国核学会—辐射研究与应用分会理事长单位
- 是上海市核学会理事长单位
- 辐射防护学会—粒子加速器辐射防护分会理事长单位
- 与中国核学会共同主办《核技术》、《Nuclear Science and Techniques》、《辐射研究与辐射工艺学报》，上海市核学会协办。

上海应用物理研究所六十年发展历程



钱三强先生画的
“老母鸡下蛋”
图



上海应用物理研究所六十年发展历程



上海应物所共有在职职工703人。其中科技人员453人、科技支撑人员175人，包括研究员及正高级工程技术人员79人、副研究员及高级工程技术人员192人。上海应物所是1981年国务院学位委员会批准的博士、硕士学位授予权单位之一，现设有物理学、核科学与技术等2个专业一级学科博士研究生培养点，无机化学专业二级学科博士研究生培养点，粒子物理与原子核物理、光学、核技术及应用、核能科学与工程、无机化学、高分子化学与物理、生物物理学、信号与信息处理、光学工程、电磁场与微波技术等14个专业二级学科硕士研究生培养点，共有在学研究生487人。

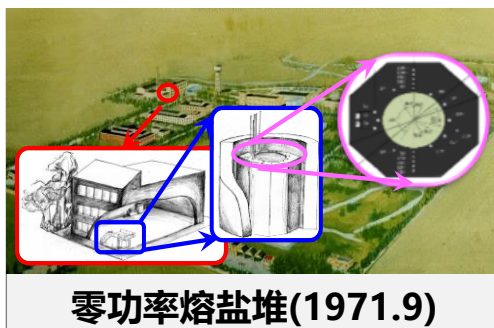
早期钍基熔盐堆研发尝试

中国核电起源于“728”工程，最初目标是**钍基熔盐堆**

- 1971年应物所建成零功率熔盐堆，并开展钍燃料进堆实验；但因技术水平所限，零功率熔盐堆至1971年底关闭。
- 1973年国家批准“728”工程改为300MW压水堆，1982年命名为秦山核电厂，1991年首次并网发电成功。
- 1974年，“728”工程队伍约300人划出应物所（原名原子核所）成立了上海核工程研究设计院。

应物所曾引领中国钍铀燃料循环研究

- 60年代末，开展Thorex流程研究，提取6克铀-233。
- 70年代初，开展“钍元件后处理工艺热验证实验”



早期钍基熔盐堆研发尝试

1991年12月6日 星期一

科技日报

专稿特稿

·7·



泰山之巅，拱门湖畔，历史在这里驻足，我国自行设计、建造的第一座核电站——秦山核电站，即将并网发电。这是多少人、多少年的夙愿，谁知道，为了这辉煌的一瞬，又有多少人的故事，20多年，星移斗转，斗转星移，让我们拂去历史的尘埃……

1970年2月8日，大年初三，正当人们欢庆春节的时候，上海原子核研究所负责分管业务的党委委员吴刚副突然接到通知，叫他马上到市里开会，会议内容却没有通知。他茫然地步入会议室，看见在座的有上海市科技、教育和工作战线主要业务的负责同志。主持会议的是上海市科技规划委员会主任曹志，由他介绍“今后召开设计论证会议”。

这是在一次向领导汇报工作的会上，当谈到上海能源缺乏，全市工业需用电力160亿度，近400万千瓦，而实际装机容量只有200万千瓦，发电120亿度，耗电三分之二时，周总理说，上海工业生产占全国的四分之一，但你们既没有石油，也没有煤炭，从长远观点看，要解决这个问题，你们自己解决，你们自己研究，你们自己设计，我们支持你们干！这个轰动全国的消息！

核能，作为一种新型能源，一经出现就以极快的速度向前发展。从1954年世界上出现第一座核电站起，到1970年的短短16年间，世界上已先后建成了200多个利用核反应堆发电的电站，总装机容量达2亿千瓦！而所有这些核电站技术，都对设计提出了更高的要求。难道我国对开发这种新能源束手无策，无动于衷吗？

许说，我们上海科技界几年前就有搞核电站的想法，但害怕投资大，技术要求高，一直不敢向中央正式提出来。现在周总理指示我们要搞，这是中央正式关心的。我们只好把这项任务定为“728工程”，希望北京同志立即组织专家，抓紧调查研究，提出具体方案……

全国解放后，上海在发展战略科学过程中，始终起着举足轻重的作用。这是上海的光荣，现在周总理又把核电站的任务交给了上海，使得许多同志重新振奋起来。原子核科学是一个非常神秘而诱人的学科。本世纪初，当人们开始探索核能时，人们用自己所能有的设备进行了大量的研究工作，取得了许多新的认识。首先是居里夫妇在周科萨的指引下，两次上书法国总统拿破仑，要求国家对核能的研究。后来就造成了具有空前声势的第一号原子弹。然后由美国首先利用的时期，又成了人类最有影响的能源。科学的发展，总是沿着前人的脚印，向着未知的领域前进。我国在原子核物理方面的研究，起步较晚，在前进道路上问题很多，选择什么“型号”？设计多大规模？厂址建在哪里？……

从1970年2月到6月，上海市的科技系统、大专院校、工业战线的领导、专家、学者和技术工

人们，开展了对核电站的方案设计和经济技术论证的大讨论。核工业部（原二机部）也两次派专家小组来上海与核工业战线进行决策咨询。经过上海原子核研究所、交通大学、复旦大学等40多个单位专家、学者的几十次研讨，到4月底，论证的同志对新建核反应堆集中到3个“准方案”上，即：高温气冷堆、石墨气冷堆和高压气冷堆熔盐堆等电站方案。5月，针对我国核燃料供应并不充裕和为了在核电站总方案上统一思想，上级领导提出了对“728工程”核电站的设计原则，以战略发电为主要目的，开辟新的核燃料来源，不与军用核燃料“争口粮”；先搞小型的实验电站，为将来建大的作准备。

又经过两个月的研讨，争论，在3个电站总方案中，选择了“石墨气冷堆”熔盐堆“核电站”方案。这当时美国正在研究的最先进的“堆型”方案，它的长处是：结构简单，又可提高发电效率（比其他“堆型”提高10—20%），用水量少，便于设备小型化，反应堆功率为2.5万千瓦，并决定在原有“三小”电站总原则下，以战略发电，为了验证总方案中的物理设计的可行性，同时，决定承担主要设计和验证任务的上海原子核研究所建立一个以测试基本物理参数、测量重中子倍增及分布、核燃料增殖系数等关键数据的“熔盐堆临界装置”。

7月的朝阳，红似烈火，在绿荫覆盖的上海原子核研究所的西北角，一场大“国”际反应堆装置基本建设的热战打响了。别看你那是一群文弱书生，大着胆子在中空云卷，但是他们穿着雄心，有的戴着新帽子，个个跃跃欲试。在他们当中有曾经被“批判”过的专家、权威，有刚被“解放”的领导骨干，虽然就每个人来说，内心都有一种说不出的冤屈。但此时此刻，他们的心胸都感到无比的宽广和自豪！他们推推搡搡，推推搡搡，没有加进谁，也没有谁，就象平静的日夜排演地干着！有些技术工人为了他高度集中的思想，集体“脱岗”，不但不怕影响生产，而且积极为科研人员工作生产严寒实验装置，外面是37摄氏度高温，里面却是冷得像11不到一会功夫，热烘烘的人竟成了一个黑色巨人。

他们在3个月里，用血和汗浇灌了一个破旧的房子里几十吨级和几吨级地，她来的经过改造后一个400平方米的简陋办公室的新“阵地”！房屋里所有的设备都有故障，在他们努力之下，我国第一个原子能大型试验装置——“熔盐堆临界装置”终于在这里建设成功，送到了上级领导部门的面前！

1970年12月18日，周总理在百忙之中听取了上海“728核工程”领导小组的报告。他再次说：“为什么叫你们上海搞核能？你们搞的是‘熔盐堆’，发展起来条件最好，你们上海的科技力量强，工人的技术水平高，困难大的问题也属。你们要各方面团结协作，把我国第一座核电站搞上去。”他特别指示搞电站技术专家，要为后人让路。他特别提出了搞核电站要“安全、适用、经济、自

力更生”的方针，并指示国防科委对“728工程”提出改进意见。

1971年初，祖国北方大雪纷飞，银装素裹，在横贯我国东西的铁路线上，只见一列列专列向西奔驰，日夜兼程，奔驰而去……这不什么重要领导人的著作专列，而是一节很特殊的黑铁罐子车厢。车厢的尽头是一名科研人员，车厢中间敞开门，里面正坐着一名科研人员，正在做着重量测定，正在测定能量的“源”，它们应该是这列专列最宝贵的“主人”！

为此，科研人员们重新评估了我国国内目前的工业基础情况，重新研究了当时可以收集到的国外经验，在大家的共同努力下，一个新型的堆方案诞生了。那就是采用国际先进技术、最通用、最安全的压水堆核电站。1974年，他们一方面在处理好“熔盐堆”的设计、工艺试验装置的条件下，一方面组织了50万千瓦压水堆方案的设计和施工。此后，压水堆核电站体许多关键部件和部件，国外对我们是绝对保密的，但实际是一个不值钱的部分，它由它分离的核燃料棒不能运出，也不能卖，必须由两个弹性支撑将其固定在两个刚性支撑点上，同时它应能常成深埋状态，还要深埋的。这些设备终于在1979年9月28日将它试制成功了！

4 堆临界装置 通过对中子通量分布试验证明，由于材料纯度等一系列原因，如核燃料对堆临界条件的反应比设计预期的多，大大超过了工艺设计中允许的水平；中子和吸收的中子损失也太多；从熔盐中提取铀—233核燃料几乎没有希望！而下厂分片包干设计关键设备制造，又使得总体平衡、协调难以进行……总之在实践中，一系列矛盾都暴露出来了。许多问题成了实践中难以克服的困难。试验证明采用世界上最先进的“熔盐堆”的技术要求太高，目前国内科技工业技术水平远未达到，如不改变方案，周总理对“728工程”制定的“安全、适用、经济、自力更生”的方针就很难实现。怎么办？

科学实验并不总是按照人们的愿望发展的。需要科学的方案，需要进行新的科学实验。设计人员和试验攻关人员都非常焦急：为了继续进行科学实验，上级领导部门加强了整个工程的领导。核工业部决定派欧阳予同志前住参加技术领导工作，“99工程”总工程师刘永福同志都参加指导技术工作。他们一起着手改变“728工程”的设计方案。经上级有关部门的同意，1972年4月，“728工程”决定进一步缩小力量，另选堆型方案。

大家总结出两年多来的经验主要是：不能脱离本国的科技和工业基础条件去一味追求先进堆型；在试验设计中，必须强调总体协调，我国国内必须强调实事求是；堆型方案必须综合国内外的工业基础情况，重新研究，借鉴了当时可以收集到的国外经验，在大家的共同努力下，一个新型的堆方案诞生了。那就是采用国际先进技术、最通用、最安全的压水堆核电站。

1974年，他们一方面在处理好“熔盐堆”的设计、工艺试验装置的条件下，一方面组织了50万千瓦压水堆方案的设计和施工。此后，压水堆核电站体许多关键部件和部件，国外对我们是绝对保密的，但实际是一个不值钱的部分，它由它分离的核燃料棒不能运出，也不能卖，必须由两个弹性支撑将其固定在两个刚性支撑点上，同时它应能常成深埋状态，还要深埋的。这些设备终于在1979年9月28日将它试制成功了！

有的同志为搞设计，搞设计就免不了下乡下家亲戚家。没有时间陪家里孩子，过程中就免不了乡里乡亲的看望。在“728工程”中，他承担了50万千瓦压水堆方案的设计和施工。此后，压水堆核电站体许多关键部件和部件，国外对我们是绝对保密的，但实际是一个不值钱的部分，它由它分离的核燃料棒不能运出，也不能卖，必须由两个弹性支撑将其固定在两个刚性支撑点上，同时它应能常成深埋状态，还要深埋的。这些设备终于在1979年9月28日将它试制成功了！

有的同志为搞设计，搞设计就免不了下乡下家亲戚家。没有时间陪家里孩子，过程中就免不了乡里乡亲的看望。在“728工程”中，他承担了50万千瓦压水堆方案的设计和施工。此后，压水堆核电站体许多关键部件和部件，国外对我们是绝对保密的，但实际是一个不值钱的部分，它由它分离的核燃料棒不能运出，也不能卖，必须由两个弹性支撑将其固定在两个刚性支撑点上，同时它应能常成深埋状态，还要深埋的。这些设备终于在1979年9月28日将它试制成功了！

有的同志为搞设计，搞设计就免不了下乡下家亲戚家。没有时间陪家里孩子，过程中就免不了乡里乡亲的看望。在“728工程”中，他承担了50万千瓦压水堆方案的设计和施工。此后，压水堆核电站体许多关键部件和部件，国外对我们是绝对保密的，但实际是一个不值钱的部分，它由它分离的核燃料棒不能运出，也不能卖，必须由两个弹性支撑将其固定在两个刚性支撑点上，同时它应能常成深埋状态，还要深埋的。这些设备终于在1979年9月28日将它试制成功了！

有的同志为搞设计，搞设计就免不了下乡下家亲戚家。没有时间陪家里孩子，过程中就免不了乡里乡亲的看望。在“728工程”中，他承担了50万千瓦压水堆方案的设计和施工。此后，压水堆核电站体许多关键部件和部件，国外对我们是绝对保密的，但实际是一个不值钱的部分，它由它分离的核燃料棒不能运出，也不能卖，必须由两个弹性支撑将其固定在两个刚性支撑点上，同时它应能常成深埋状态，还要深埋的。这些设备终于在1979年9月28日将它试制成功了！

有的同志为搞设计，搞设计就免不了下乡下家亲戚家。没有时间陪家里孩子，过程中就免不了乡里乡亲的看望。在“728工程”中，他承担了50万千瓦压水堆方案的设计和施工。此后，压水堆核电站体许多关键部件和部件，国外对我们是绝对保密的，但实际是一个不值钱的部分，它由它分离的核燃料棒不能运出，也不能卖，必须由两个弹性支撑将其固定在两个刚性支撑点上，同时它应能常成深埋状态，还要深埋的。这些设备终于在1979年9月28日将它试制成功了！

有的同志为搞设计，搞设计就免不了下乡下家亲戚家。没有时间陪家里孩子，过程中就免不了乡里乡亲的看望。在“728工程”中，他承担了50万千瓦压水堆方案的设计和施工。此后，压水堆核电站体许多关键部件和部件，国外对我们是绝对保密的，但实际是一个不值钱的部分，它由它分离的核燃料棒不能运出，也不能卖，必须由两个弹性支撑将其固定在两个刚性支撑点上，同时它应能常成深埋状态，还要深埋的。这些设备终于在1979年9月28日将它试制成功了！

应物所曾引领中国钍铀燃料循环研究

● 60年代末，开展Thorex流程研究，提取6克铀-233。

● 70年代初，开展“钍元件后处理工艺热验证实验”

Advertisement for a science award ceremony. Text includes: '世上无难事，只要肯登攀' (Nothing is difficult if you are willing to put in the effort), '中国科学院上海原子核研究所' (Institute of Atomic Energy, Chinese Academy of Sciences), '你单位负责研制的钍铀燃料循环研究成果' (Achievements in Thorium-Uranium Fuel Cycle Research by your unit), and '荣获上海市重大科学技术成果奖' (Won the Major Scientific and Technological Achievement Award of Shanghai Municipality). The award is for '钍铀燃料循环研究成果' (Achievements in Thorium-Uranium Fuel Cycle Research).

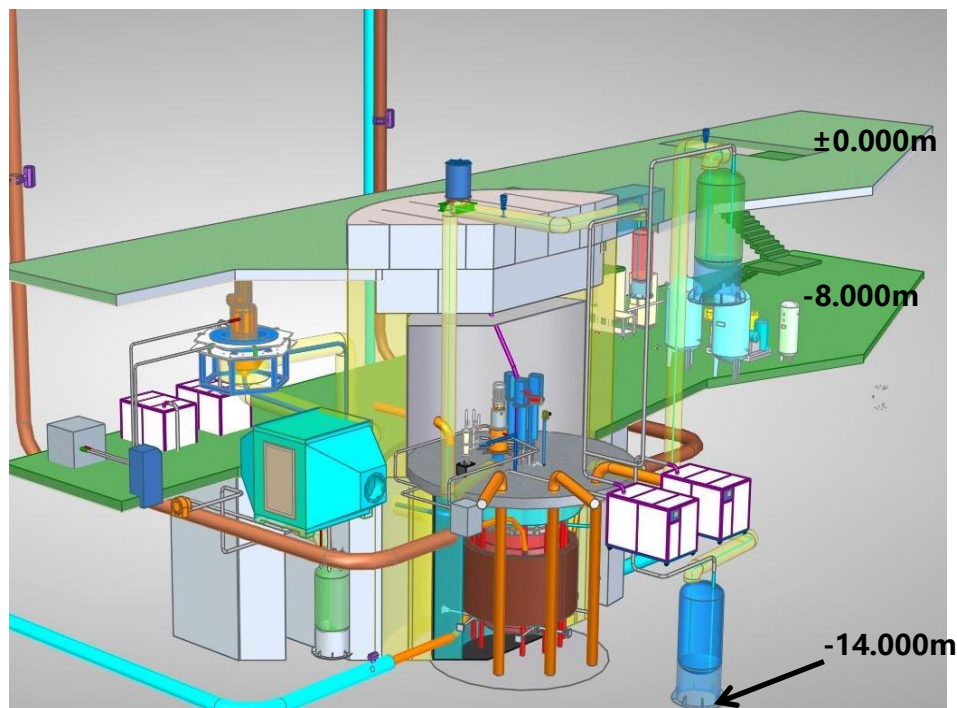
上海市科学技术委员会 上海市重大科学技术成果奖 一九七九年十二月

纪念秦山核电站发电，1991年解放日报全版介绍728的由来

2MWt液态燃料钍基熔盐实验堆(TMSR-LF1)

实验堆建设进展

反应堆类型	一体式，钍基液态燃料熔盐堆
功率	2MW
堆出口温度	650 °C



汇报提纲

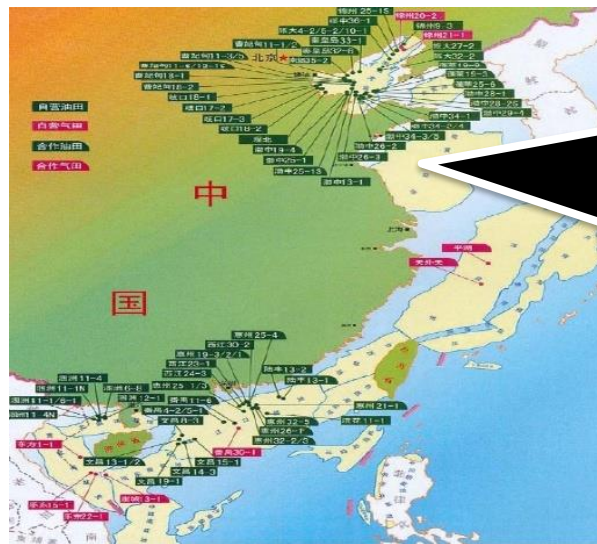
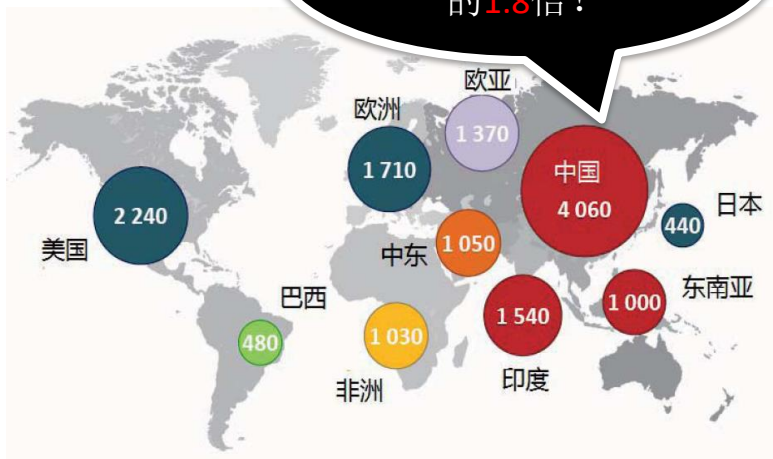
 **小型模块堆介绍**

 **小型模块堆建造变革性技术**

 **用在熔盐堆新技术和后续发展技术**

能源问题，迫在眉睫

IEA预计2035年我国能源需求将是美国的1.8倍！



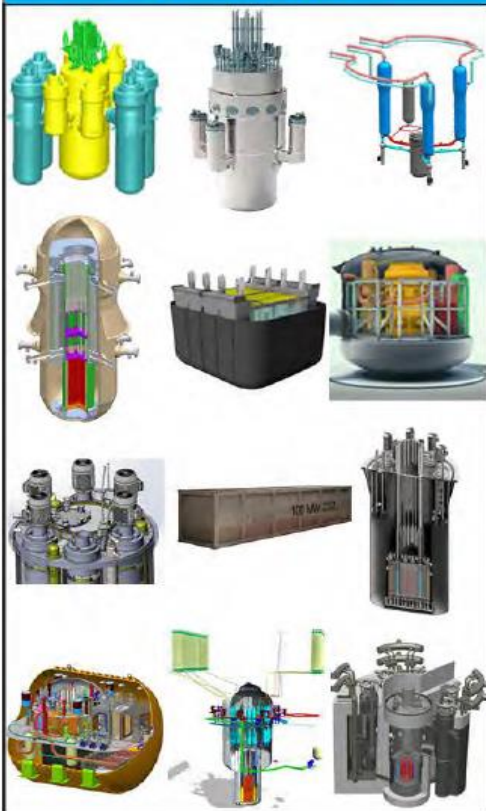
中国海上石油分布广泛，需要配套开发，成为“海洋强国”！

内陆干旱地区、偏远岛屿的能源供给问题！



用小型模块化堆，解决上述问题！

Europe, United Kingdom and Russian Federation



Asia



North America and South America



Africa



300-450																																																																																																				
---------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

陆基水堆

300-450																																																																																																				
---------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

海基水堆

300-450																																																																																																				
---------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

高温气冷堆

300-450																																																																																																				
---------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

快中子堆

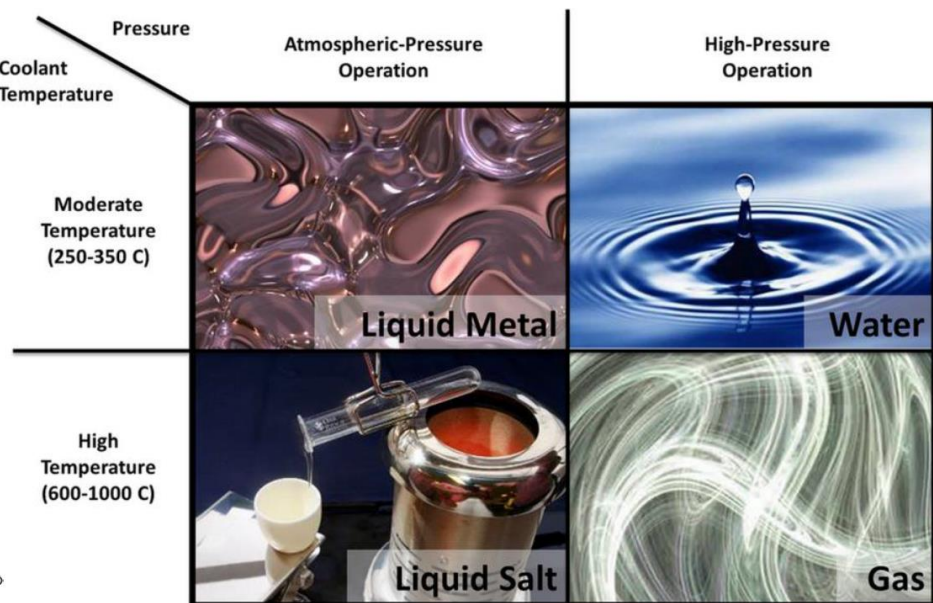
300-450																																																																																																				
---------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

熔盐堆

300-450																																																																																																				
---------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

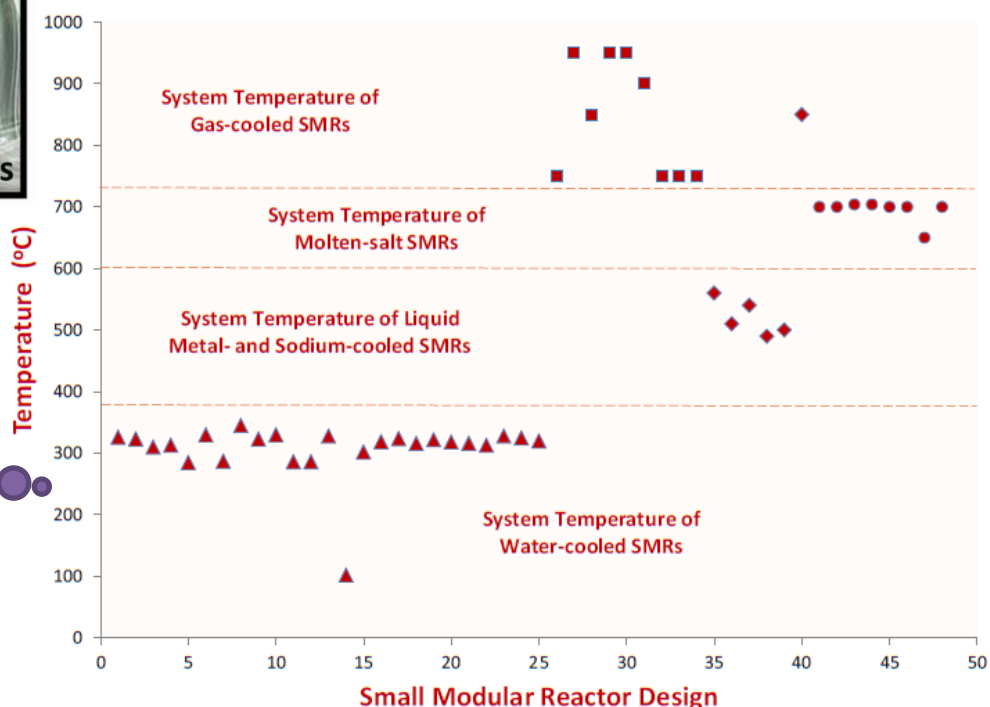
微堆

近期小模块化堆的出口温度设计

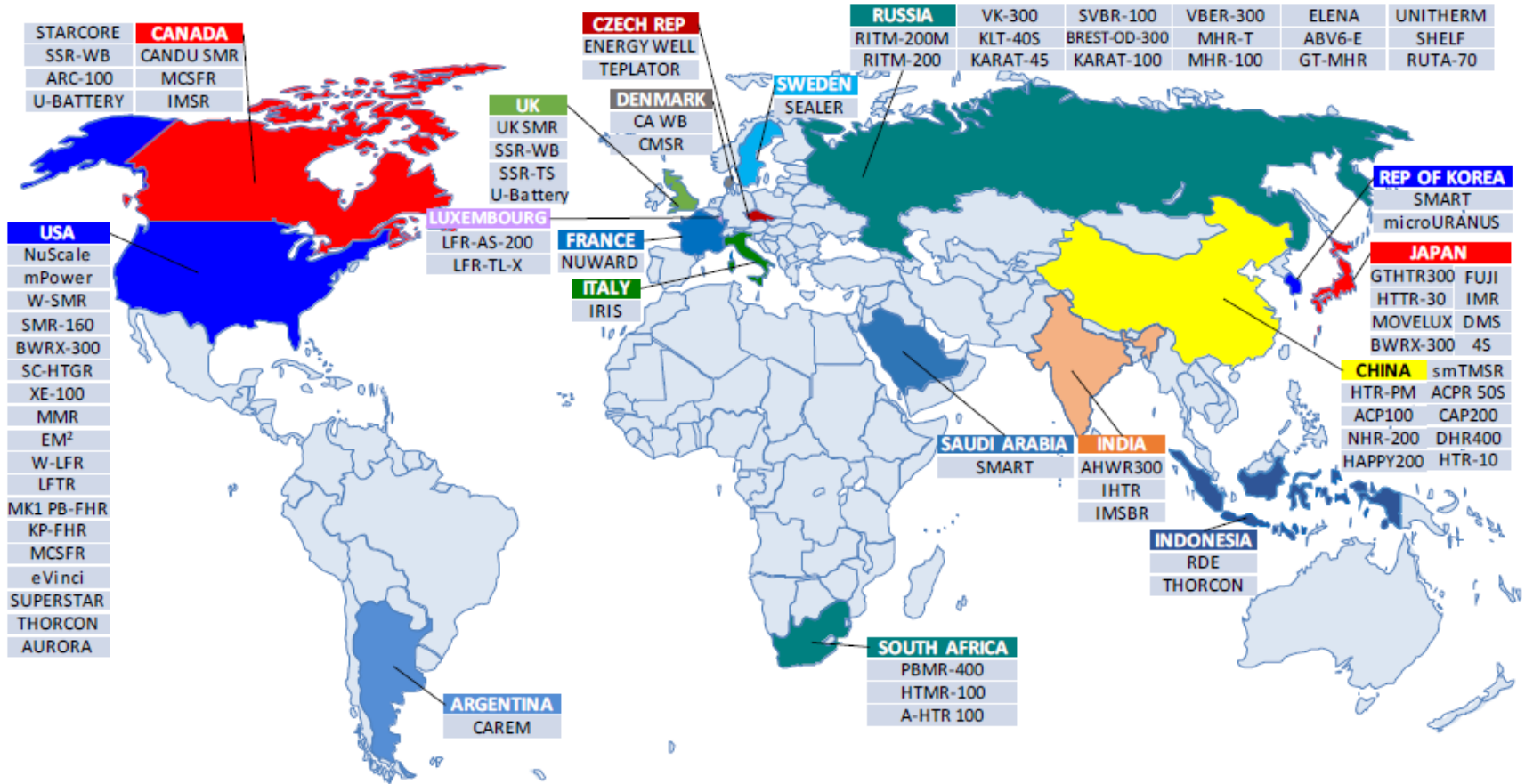


冷却介质的特征

小模块化堆出口温度



小型模块化堆发展国家分布



小型模块化堆发展参与的企业、高校和研究所

Europe, United Kingdom, Russian Federation

Asia

Africa

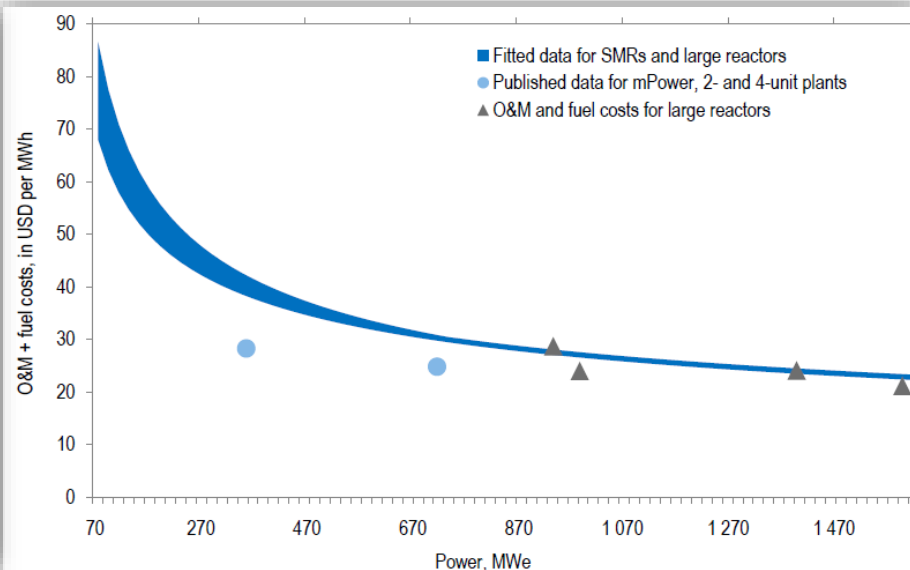
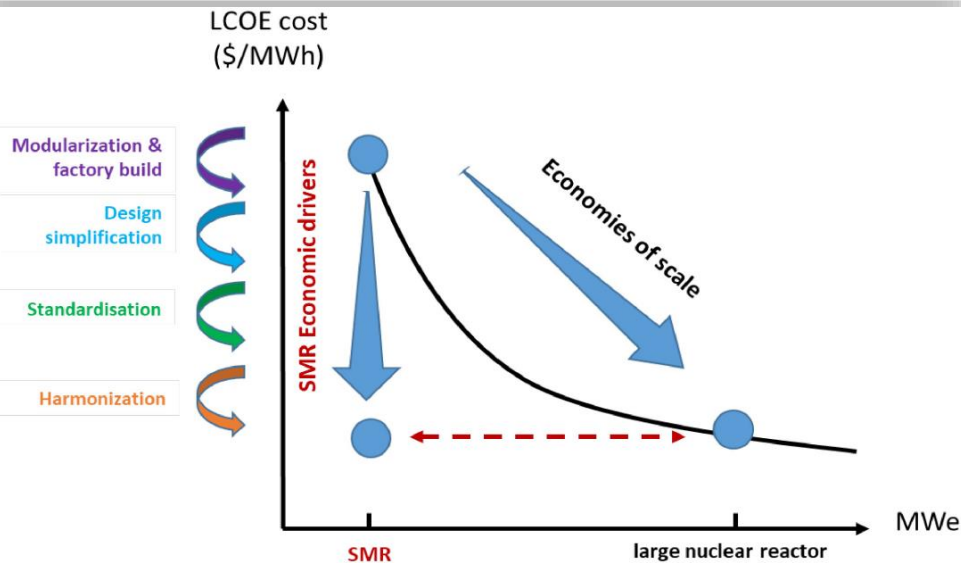
North America, Latin America

小型模块化堆占地小，建筑美



RITM-200 plant layout





ACP100 一回路主设备与二代改进机组相比，从每千瓦投资看，ACP100 各设备单位投资基本是二代改进型百万千瓦机组的 6 倍以上，因此，核岛一回路设备费用较高是 ACP100 造价较高的主要原因，设备投资较高使得 ACP100 建设投资中核岛工程投资占比高达 68.92%，而 M310 建设投资中核岛工程投资占比仅 53.26%。

核电要发挥更大的作用，需要将造价降至每千瓦2000美元（以2020年美元计）。核电建设项目按时、按预算完成，延长运行寿期均可实现降低成本，也可通过建筑工程**模块化、标准化，以及保持相同的堆型设计来缩短建设周期**，从而降低造价。

小型模块化堆发展趋势

技术特点：

集成设计

堆芯的缩小能够支持集成设计。

固有安全性

堆芯的缩小使得功率输出更低，同时得到了更高的表面积-体积比，这将提高非能动安全系统在正常运行工况和异常运行工况下的效率。

堆芯装载量更低

更少的堆芯装载量拥有厂内外优势。

灵活性增强

通过固有的设计特征以及多机组机组的运行优化，实现负荷跟踪模式的增强。

模块化和可制造性得到改进

建造过程能够采用更宏大的模块化方案以及新的制造技术。

经济驱动因素：

简化设计

堆芯装载量减少能够增强非能动机制并提升设计集成度，其独特的物理特性能够简化SMR系统设计。

标准化

设计标准化及其随后的可重复性是降低大型反应堆成本的有效方法。

模块化和工厂制造

模块化是一种通过将装置分成可工厂制造、运输和现场组装的模块来简化施工的方式。数字化的制造链可以进一步降低成本和缩短时间。

汇报提纲

 **小型模块堆介绍**

 **小型模块堆建造变革性技术**

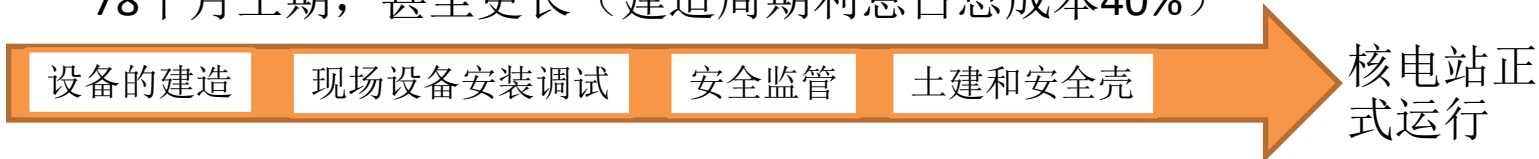
 **用在熔盐堆新技术和后续发展技术**

小型模块化堆建造—工厂化制造

三代核电建设周期:

78个月工期，甚至更长（建造周期利息占总成本40%）

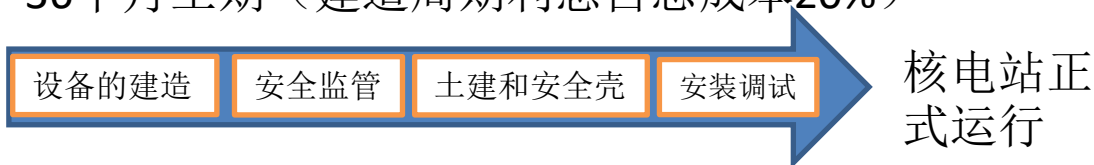
第一灌混
凝土浇筑



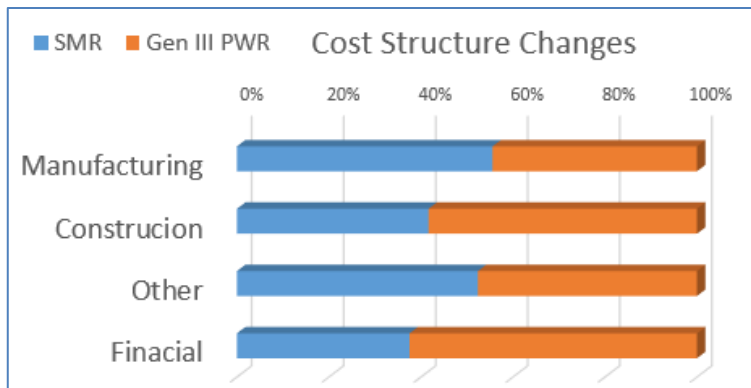
模块化堆建设周期:

36个月工期（建造周期利息占总成本20%）

第一灌混
凝土浇筑



造价对比:



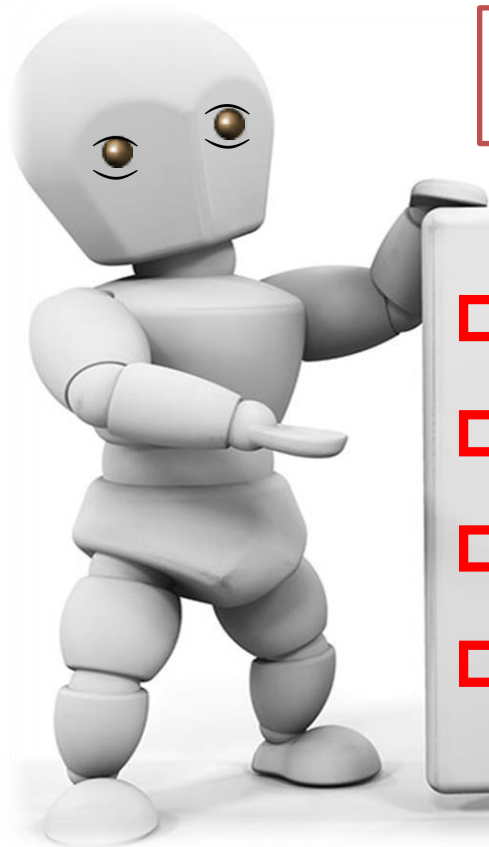
➤ 模块化：飞机脉动线建设思路

- 模块化设计经验，采用合理的工艺系统集成模块、机械设备模块、电气设备模块、土建结构模块；
- 采用模块化制造、模块化运输、现场快速装配，可大幅缩短工期，进一步提高核级设备的质量

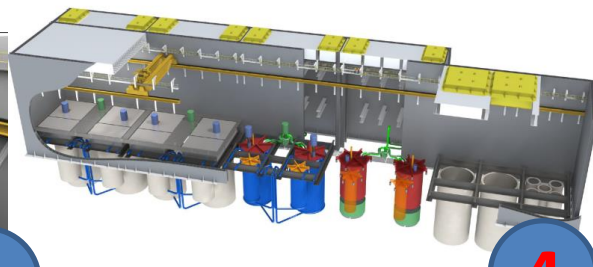
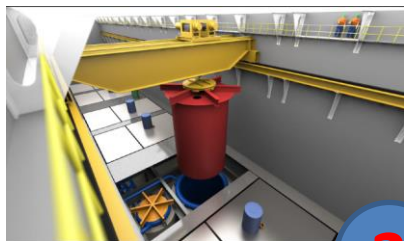
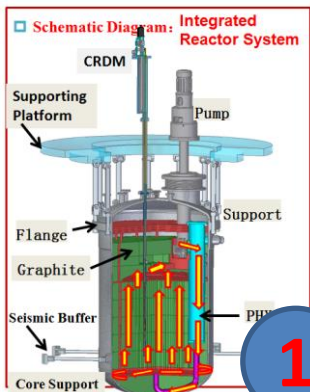
设计先进性决定经济性,工厂化程度实现经济性。

优势：可大幅缩短工期，进一步提高核级设备的质量。

- 模块化制造 (1)
- 模块化运输 (2)
- 现场快速装配 (3)
- 模块集成 (4)



- 模块化和工厂制造
- 设计结构简单
- 标准化
- 一致化



高端装备总装产业—脉动式总装线



脉动总装线定义

不像汽车总装线连续移动式装配线，是模块式移动总装，典型特征是产品移动时不进行装配作业，装配作业进行时产品不移动，既提高了生产效率，也有效地实现了批量生产的目标。

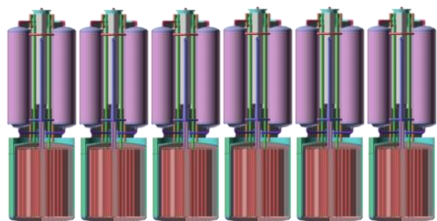
脉动总装线特点

- 模块化装配
- 脉动总装线
- 数字化装配
- 精益装配

脉动总装线价值

- 大规模生产和高度专业化分工的装配线改为模块化和柔性化
- 脉动装配作业采用标准化工作
- 减少装配周期20%，降低成本10%

脉动生产线总装核电站模块化核心装备



脉动总装生产线



陆地运输/海路运输

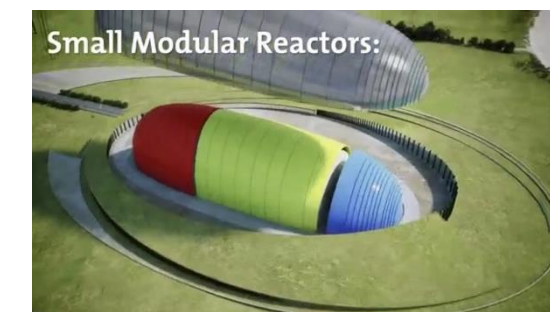
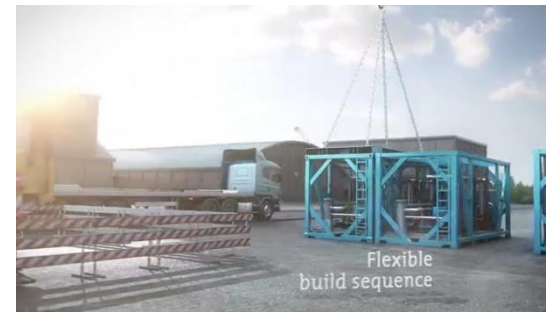
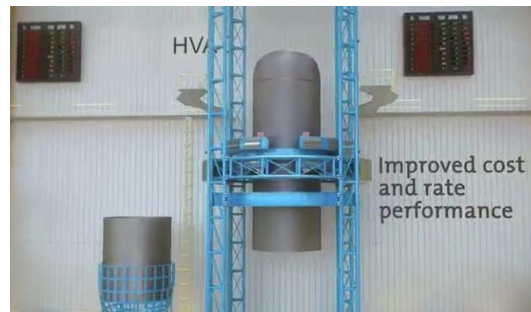
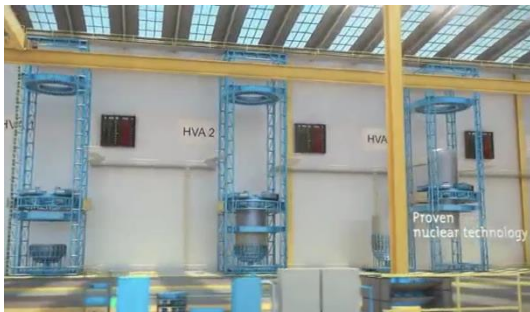
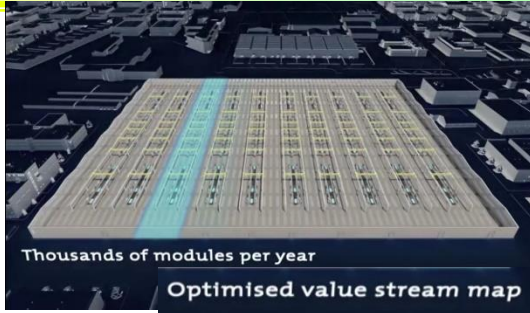


核电站现场组装

- 脉动总装生产线以优化和平衡的装配流程，按设定节拍进行站式、标准化装配作业，缩短装配周期，降低制造成本，完成精益制造



小型模块堆标准产线



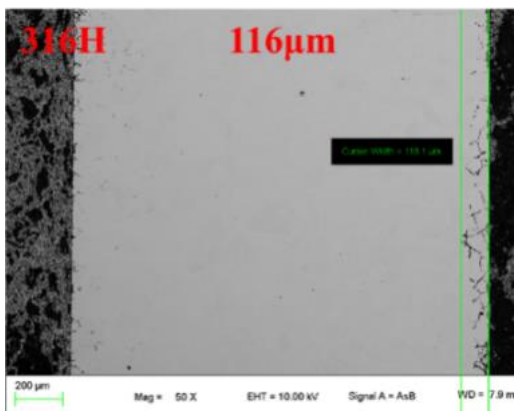
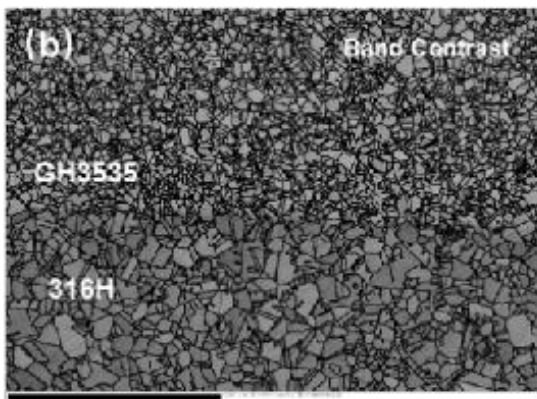
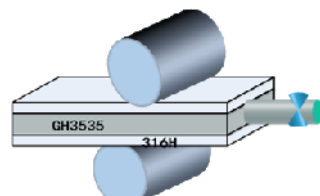
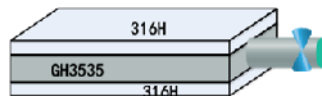
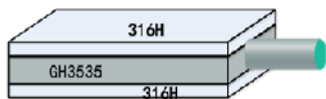
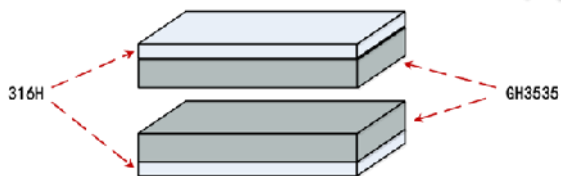
汇报提纲

 **小型模块堆介绍**

 **小型模块堆建造变革性技术**

 **用在熔盐堆新技术和后续发展技术**

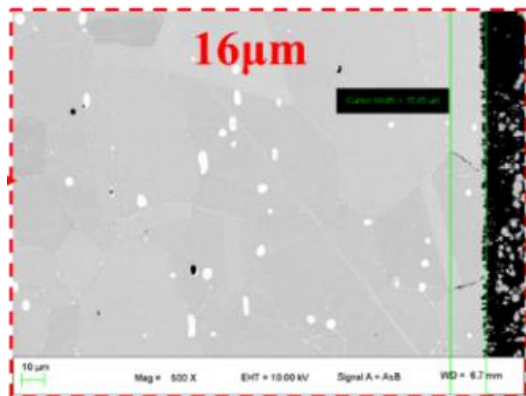
双金属复合轧制技术



不同材料界面无缝连接过渡

基层腐蚀

复合板熔盐罐



复合板轧制

复层腐蚀

复合板蒙皮堆内构件

力学+耐腐蚀性能+低成本

近终形环轧技术

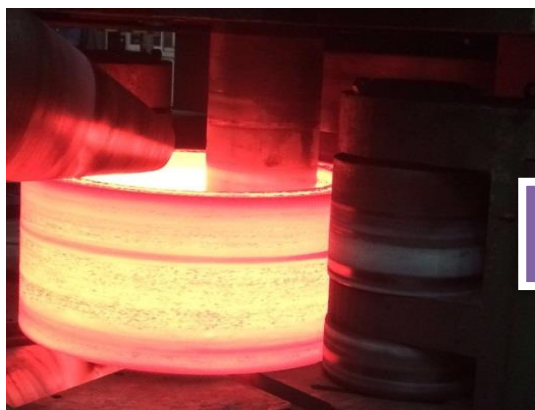
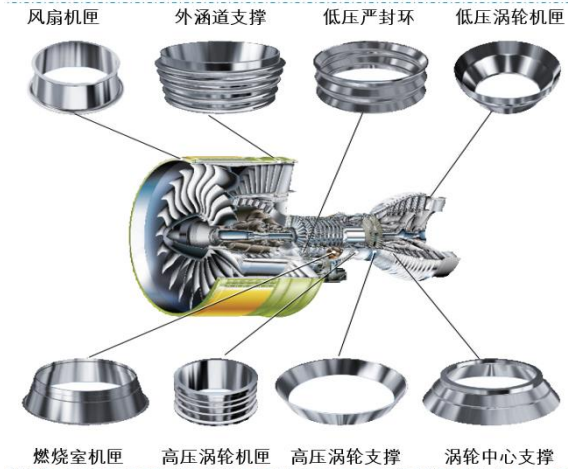


环轧原理



- 高成材率
- 无纵焊缝
- 高安全性

航天、航空、风电



2015年镍基合金环轧件



2016年主容器解剖件
 $\phi 3.5\text{m}$



2018年环轧件 $\phi 2\text{m}$, 高度
大于1100mm

构筑技术

构筑技术：借鉴建筑学原理，将多块均质化板坯通过表面加工、清洁处理、堆垛成形和真空封装后，在高温下施以多向锻造为特点的锻焊工艺，充分愈合界面，实现界面与基体完全一致的无痕连接。

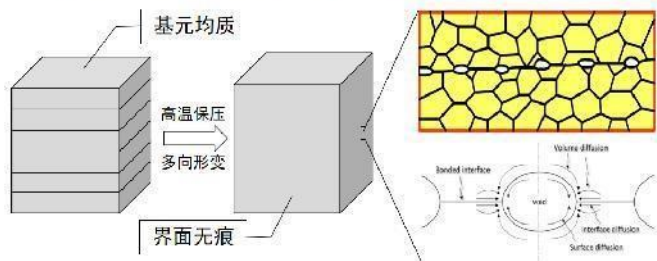
真空自耗+锻造
性能优异、最大10t

电炉冶炼+模铸
性能差、成材率低

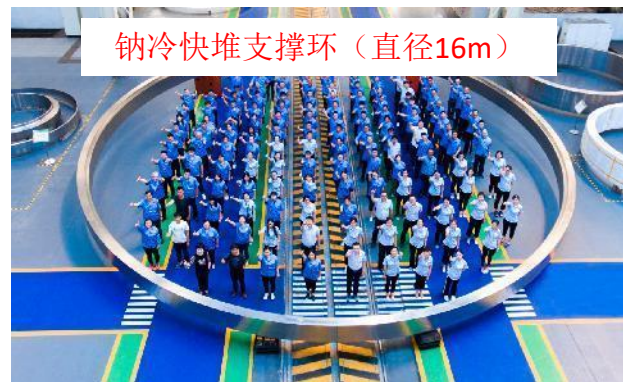
难以满足
高端大锻件的需求



金属构筑需要重点解决构筑基元和界面消除问题，实现构筑后的均质化。



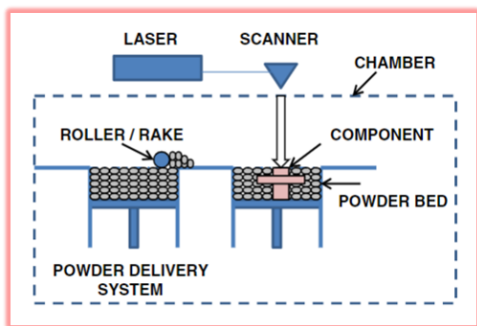
- ◆ 若干合金均质化构筑基元制备
- ◆ 表面状态对界面结合的影响规律
- ◆ 多场耦合作用下的界面愈合机理
- ◆ 界面氧化膜分解和组织均匀化机制



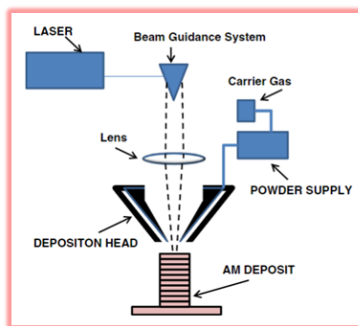
化整为零，以小制大

特殊部件增材制造

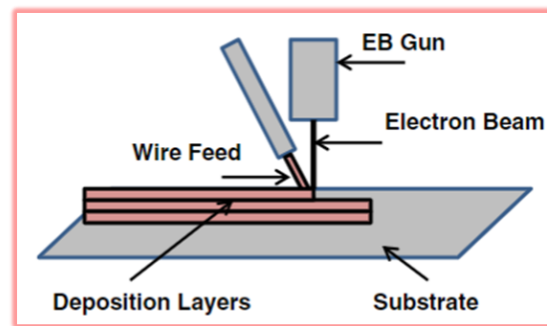
常见金属3D打印技术对比



粉末床聚变PBF



定向能沉积（粉末）DED-powder



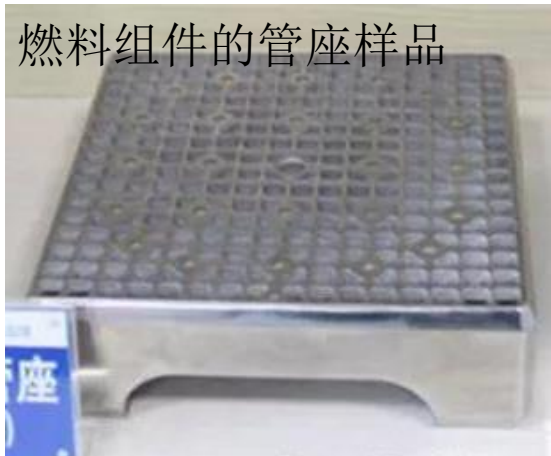
定向能沉积（丝材）DED-wire

类别	典型技术	能量源	进料尺寸 (μm)	层厚 (μm)	打印速率 (cm ³ /hour)	表面质量 (μm)	残余应力	制造尺寸 (mm) (依据典型产商)	成本	后处理
PBE	选区激光熔化SLM	激光	~100	20-90	Up to 113	Ra 9/12	高	300*350*300	中	应力释放+热等静压
	电子束熔化EBM	电子束	~200	100	55-80	Ra 25-35	中	200*200*350	高	烧结处理
DED-powder	激光近净成形LENS	激光	200-400	800-1000	100-300	Ra 40-60	很低	900*1500*900	中	表面处理
DED-wire	电弧增材制造WAAM	电弧	1000-2000	4800	600	Ra 20-26	高	不受限	低	表面处理
	送丝激光增材制造WLAM	激光	200	500-2000	200-500	Ra 30-32	高	受限	中	表面处理
	电子束熔丝沉积EBF3	电子束	1000-2000	500-2000	400-550	Ra 30-35	中	762*483*508	高	表面处理

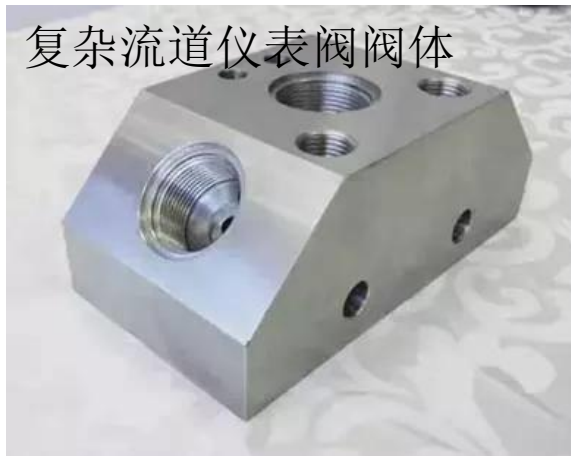
资料来源: Review on the evolution and technology of State-of-the-Art metal additive manufacturing processes
Metal Additive Manufacturing: A Review

增材制造技术在核能领域的发展应用

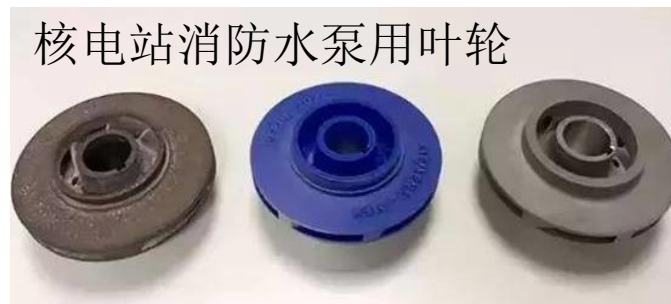
燃料组件的管座样品



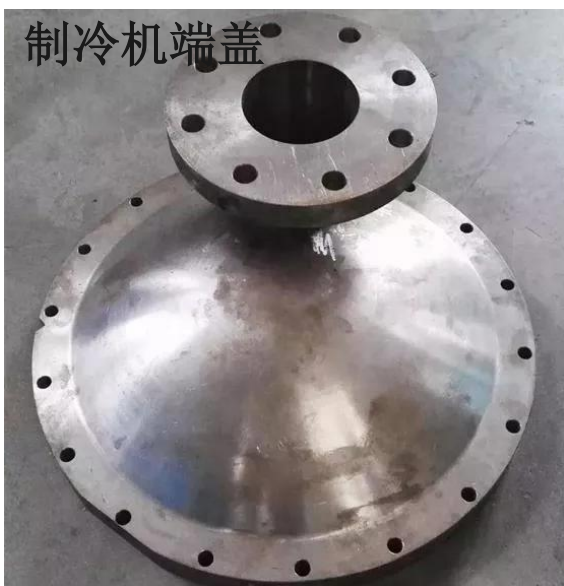
复杂流道仪表阀阀体



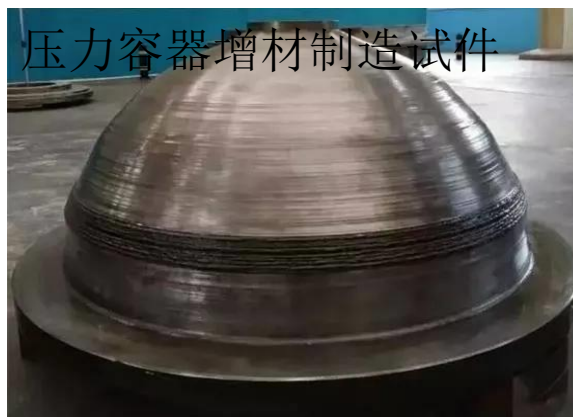
核电站消防水泵用叶轮



制冷机端盖



压力容器增材制造试件



热交换器



燃料组件



