

10 突破钍基熔盐堆核能系统核心技术，建成原型系统

中科院“钍基熔盐堆核能系统（TMSR）”战略性先导科技专项的科技目标是研发钍基熔盐堆（四代堆），实现我国丰富的钍资源高效利用与核能综合利用。液态燃料熔盐堆适合钍铀循环，固态燃料熔盐堆则适合核能制氢、节能减排等核能综合利用。固态堆是以熔盐堆技术为基础，集成了其他先进堆型的成熟技术，可以在15—20年内实现应用，液态堆研发时间约为30年左右；两种堆型的关键材料与设备、反应堆物理、热工水力基本相同，获得液态堆技术必先掌握固态堆技术。专项采取的发展战略是固态堆和液态堆同时部署、相继发展。近期目标是建成10MW固态燃料熔盐实验堆（世界首堆）和2MW液态燃料熔盐实验堆并实现钍铀循环实验验证。

关键技术和原型系统是实验堆的技术基石，专项进行了系统的研究，并在如下方面取得重要进展。

（1）建立钍铀循环、堆本体工程设计、系列高温熔盐回路、安全与许可等四个原型系统。提出基于液态熔盐堆的钍铀循环方案设计，初步确定后处理流程并实现工艺段冷态贯通；系统地建立熔盐堆设计方法，并完成10MW固态燃料熔盐实验堆工程初步设计；研制成功高温熔盐泵、换热器、流量计等关键设备，并建成世界第一个工程规模的氟盐回路实验装置；完成实验堆的Ⅱ类堆论证并获得国家核安全局批复，在国际上首次成功开展熔盐自然循环实验，验证了TMSR的固有安全性。

（2）取得七项核心技术突破。首创绿色环保的高丰度锂-7和核纯钍的萃取离心分离技术；发展了具有国际先进水平的高纯度氟盐制备与检测技术；发展了国产高温镍基合金-GH3535的批量生产、加工和焊接工艺；研发成功液态熔盐堆用高致密细颗粒核石墨；发展了氟盐腐蚀控制技术，实验结果居国际前列；发展了基于氟盐体系的干法分离技术；掌握国际最新的熔盐堆氟控制关键技术。在此基础上，实现关键新材料中试规模制备。

专项开展了广泛而卓有成效的国际合作。与美国核

学会和机械工程学会开展固态燃料熔盐堆安全标准和高温反应堆材料加工标准制定的技术合作，与美国橡树岭国家实验室、麻省理工学院分别签订了熔盐堆技术合作研究协议；中美熔盐堆合作列入“中美战略与经济对话成果清单”。成为国际四代堆论坛——熔盐堆技术委员会观察员。

近年来，钍基熔盐堆的研发在世界范围内日益受到重视。专项依托中科院上海应用物理所，在院内近10个研究所参与下，“从无到有”组建了几百人的科技队伍，建成了配套齐全的（冷）实验研究基地。实现原型系统与关键技术的系统突破，为建设实验堆奠定了坚实的科学技术基础。专项已经成为国际钍基熔盐堆研发的一个领跑者。



大型熔盐实验回路与关键设备样机



高纯氟化熔盐、镍基合金与核石墨等 TMSR 关键材料

专家点评

2011年1月，中科院在上海应用物理所（SINAP）启动了钍基熔盐堆（TMSR）专项。之后SINAP取得了飞快进展，建立了发展和部署现代熔盐堆（MSR）的科技基础。2014年11月，我作为国际专家组成员，对TMSR进行了评审。我们的结论是SINAP项目居世界领先。

50年前，人们开始研究熔盐在核反应堆中应用。然后遇到重大技术挑战。基于当时的技术条件，水冷堆被证明更容易示范并放大。70年代初，中美两国均停了MSR研究。一旦解决关键技术问题，熔盐具有非常理想的反应堆热量传输特性。与水和氦气相比，熔盐具有高温低压的特性，可避免使用沉重而昂贵的压力容器。与金属钠相比，熔盐具有高化学稳定性和热容，可建成紧凑、轻量化和低成本的反应堆。熔盐具有很高的平均输出温度，即使在干旱地区也能够高效发电。铯元素在熔盐中的化学形态使其不会在事故中变成气体。而在水冷堆事故中，铯会形成活跃的形态，极易扩散。铯-137的释放是福岛和切尔诺贝利长期区域污染的主要原因。MSR不会发生造成长期区域污染的事故。当使用液态熔盐燃料时，MSR可利用钍铀中的大部分能量（水冷堆仅利用1%能量）并产生极少废物。这是比尔盖茨的泰拉能源公司现在研究新型MSR的主要原因。

过去50年的技术进步促使研究者重新审视MSR技术。现今反应堆采用非能动安全（一种在反应堆停堆后能够不依赖于电力排出热量、防止燃料熔毁的技术），例如AP1000。类似的，材料、反应堆物理和先进计算模拟等方面的技术也取得了长足的进步。SINAP建成了世界级的上海光源。我们专家组的结论是，SINAP同样好地解决了MSR的关键技术问题，能在世界上第一个实现MSR科学示范和前期商业示范。一个重要的例子是成功示范了环保的锂-7富集技术。MSR技术的成功发展和商用带来的收益是可转化的。SINAP通过成功的国际合作极大促进了MSR技术发展，例如与美国橡树岭国家实验室合作。中科院TMSR计划在解决关键科学和技术问题上采取了正确的方法，将继续成功引领世界MSR发展。

评议人介绍

Per Peterson 美国著名核能科学家，加州伯克利大学教授，前核工程系主任，现任工程学院执行院长。美国核学会会士，国家研究委员会成员，奥巴马政府未来

核能蓝带委员会成员（唯一核能科学家），并在多个国际学术机构任职。致力于先进裂变核能研究，2002年与他人共同提出氟盐冷却高温堆的新概念。