

Views & Comments

铅冷快堆：未来的机会？

Alessandro Alemberti

Ansaldo Nucleare SpA, Genova 16159, Italy

1. 引言

作为第四代核能系统国际论坛技术路线图中的六个反应堆概念之一，铅冷快堆(LFR)的发展近年来非常引人注目，若干国家也在从事其研发工作[1,2]。LFR的优势在于其系统的内在特性可完全满足第四代核能系统国际论坛(GIF)的目标的要求。该系统的极其重要的特征是具有良好的安全特性，因为安全正成为选择下一代核能系统的关键指标之一。

本文简要介绍了各种正在进行的与LFR相关的研发项目和研究进展。利用液态铅作为冷却剂将彻底改变反应堆的设计方式，并为本文将介绍的创新提供了几种可能性。

2. 为什么选择铅冷快堆？

本节根据近几年的技术发展分析了LFR系统的主要特征。

2.1. 可持续性

LFR可保证能源的长期可持续性供应。LFR利用铀钚混合氧化物(MOX)燃料或更先进的燃料(如氮化铀)进行最初装载，需要依赖现有的针对MOX的轻水反应堆(LWR)技术或开发新的更先进的生产和再生燃料循环。当燃料从反应堆中取出时，对其进行再加工，以对提取出的短寿命裂变产物(需衰变几百年才可达无害水平)进行适当处理(如地质深埋处置)。经再加工后，燃料

被重新送入反应堆，其中添加了常见的天然铀或贫铀，以取代目前LWR中正在使用的浓缩铀。这样，世界上的铀储量的丰度将比现在的技术(仅利用了燃料装载的1%~2%来生成能量)所需的铀储量高50~100倍。由于LFR寿命中所需的铀量减少了，这种能源的开采时间由数百年延长至数千年。这是快中子反应堆系统的共同特点，它为自然资源的充分利用提供了一种新的方式，并极大地减少了长寿命放射性废物的产量。

事实上，核能最重要的问题之一是社会层面的，而且通过目前的技术尚未解决：核设施产生的长寿命放射性废物需要在专门的储藏室中储存成千上万年。快中子反应堆技术有望解决这个问题。如前文所述，来自供应链的废物只包括衰减时间为几百年的裂变碎片，使得对这种放射性废物的处置在经济上更加可行，在管理上也更加可靠。钚和次锕系元素在反应堆内即可被回收，因为反应堆可实现燃料的“闭合循环”。主要的技术依据是：在一段时间后，反应堆内的钚和次锕系元素会达到数量平衡。这样，核反应堆的产物在燃烧时就不会生成这些元素。最终储藏室中只储存裂变产物，这样不仅减小了储藏室自身的大小，同时提高了最终储存的安全性，因为需要消除的衰变热减少了。然而，最明显的效果是放射性废物达到较低天然放射性水平所需的储存时间缩短了：只需要几百年，而不是目前技术所需的成千上万年。

2.2. 安全性

由于采用液态铅作为冷却剂，LFR有较高的安全

性。和其他液体不同，铅不需要增压(液态铅在常压下的沸点为1743 °C)；且运行过程中也不会产生氢气或其他爆炸性气体。使用液态铅可以在一回路中引入衰变热排出系统，这些系统的运行符合基本物理定律而且不需要外部电源。这种系统通常是主动激活且非能动运行的，但对某些设计来说，激活和运行都可以通过非能动的方式实现。这些非能动系统即使在极端事件的情况下也可以确保运行，其最终目标是阻止放射性核素在安全壳外部扩散。因此，即使在极端事故中，预计LFR对安全壳外部的环境也不会产生影响，这极大地增加了这项技术的社会可接受度。

最后，一些正在研发的方案希望将燃料再处理厂与核反应堆建在一起；也就是说，一旦完成燃料的初始装载，现场只需补给天然铀，且只有裂变产物被排出。这样就极大地降低了运输导致的意外污染的可能性，也提高了燃料转移相关的安全等级。在LFR临时系统指导委员会(PSSC)的支持下，GIF的反应堆安全工作组最近发布了一份关于安全的白皮书，可在GIF官方网站上免费下载[3]。

2.3. 经济性

经验表明，新型先进核能系统建设和运行的总成本很难量化。同时必须注意的一点是，即使一项众所周知的技术(如LWR系统)的施工成本也可能有很大的成本变动，且和最初预算相比可能有明显的增加。显然，在一项新技术的原型堆或示范堆中，正确预测投资的不确定性会更高。但是，对于LFR来说，它的某些特征表明其很可能有良好的经济效益。这些特征和冷却剂的特异性有很大的关系。

(1) 冷却剂的化学惰性可在设计层面上加以利用，以简化反应堆系统。例如，LFR不需要安装复杂且昂贵的中间回路系统就可以将一次冷却剂与最终的二次冷却剂(通常是水)隔离。目前的设计希望将直流蒸汽发生器设置在高压状态下。数值模拟显示二次冷却剂循环性能可提高40%。

(2) 液态铅极高的沸点防止了局部冷却剂沸腾。因此，其他冷却剂由于沸腾引起的安全性挑战在LFR中不会出现，并且冷却剂自身的特性保障了反应堆的固有安全。

(3) 一次冷却剂系统可在接近常压的状态下运行。这样就避免了如在LWR技术中需要引入的昂贵且可能很复杂的系统即可维持适当的压力运行水平。值得注意

的是，系统的常压运行和反应堆的池式设计，实际上消除了冷却剂丧失事故(LOCA)，再次极大地简化了安全措施，进而带来了积极的经济效果。

虽然在确定LFR系统可实现的经济水平的问题上很难得出结论，上述说明有力地证明了该技术在应用中已显示出一些优势，且这些优势都归因于所选冷却剂的基本特性。

2.4. 扩散抑制和物理保护

如上所述，LFR燃料循环设计的原则是不产生钚或次锕系元素。相反地，LFR可通过分离裂变产物来循环利用现有的乏燃料。上文也提到了，有些LFR的设计理念是将燃料后处理设施建在反应堆厂址内，这样反应堆只需补给天然铀，且只有寿命相对较短的裂变产物会被送出反应堆进行储存或处置。设计为长寿命或超长寿命的LFR堆芯在换料周期方面显示出明显的优势。换料周期的延长大大降低了与乏燃料相关的扩散风险。最后，对乏燃料的远程处理为物理保护提供了基础支持，在其他反应堆设计中通常也是如此。

上述内容回答了本节标题提出的问题：“为什么选择铅冷快堆？”，并简要介绍了开发这项全新技术背后的主要原因，该技术可能会改变当前的核能格局。

3. 铅冷快堆研究和发展的需求

过去20年间，人们已经处理了许多LFR设计相关的主要问题并研究出了解决方案。反应堆的抗震性能、蒸汽发生器传热管破裂导致的一次侧增压、冷却剂凝固的风险和其他一些问题一度是研究活动的热点，研究得到了许多可行的且已被证明有效的解决方案。但是仍然存在一个必须详细解决的问题：液态铅对结构材料的腐蚀问题仍然悬而未决，需要进一步研究。

液态铅对材料的腐蚀作用主要是因为材料的主要成分能够溶解于液态铅。镍、铬和铁在液态铅中的溶解度不同，且随着温度的升高而增大。在恒温池里，当液态铅中溶解的元素达到饱和时，溶解停止；然而，在反应堆里，由于冷热池之间存在温差，必须采用专门方法解决溶解度变化带来的问题。

由于镍的溶解度最高，俄罗斯科学家发展了一项技术，采用不含镍的材料，即铁素体-马氏体钢，这种材料可利用液态铅中的溶解氧钝化。该技术利用了钢的保护性氧化层。虽然这种氧化层可被流动的液态铅

冲刷掉，但只要有足够的溶解氧，氧化物就会再次形成，这就是“自我保护”机制。该技术是俄罗斯BREST-OD-300反应堆项目的核心技术，基于过去军用潜艇中铅铋冷却反应堆的技术。该技术是有效的，但必须保证液态铅中溶解氧的浓度在特定范围内；为了解决这个问题，人们已研发出可以补充或除去溶解氧的特殊装置。另外，BREST-OD-300要求使用易形成氧化层的富硅的特殊钢。

为了实现核应用，这种材料也需要进行性能测试，包括中子通量和相应的原子位移(dpa)，是否满足核电站工作条件下的使用要求，以及是否准备好被用于核设施。由于缺少能提供快中子通量试验的反应堆，评价新材料成为一项挑战；为了评估新材料，要达到相应的辐照剂量可能要花费10~20年的时间。

鉴于存在上述限制条件，欧洲的研究者选择使用已经通过验证的材料，如用于钠冷快堆的材料；这种材料在某些方面已经符合要求，如在快中子通量下有较高的dpa。目前，针对奥氏体钢的抗腐蚀性的研发工作正在沿着若干方向开展，以期能够达到理想的效果。以下几种方式有望成功。

(1) 对于包壳材料，可采用不同的涂层工艺开发出特殊涂层。

(2) 美国钢铁协会(AISI)开发的316L钢在温度低于400℃时并不会被腐蚀，因此可用于多种部件。

(3) 形成氧化铝保护层的奥氏体(AFA)钢是最近研发出来的一种具有发展前景的材料。这种钢在低氧浓度下和流动的液态铅中会形成稳定的氧化铝保护层。

(4) 其他方法试图通过改变冷却剂自身的化学组成来降低冷却剂的腐蚀性。

总之，目前关于上述问题的解决方案的研究方向有很多，其目的都是寻找一种安全可靠的解决方案来应对腐蚀的影响。其中有几个研究方向已取得令人满意的效果，这不仅支持了进一步的探索研究，而且增强了即将找到可能的解决方案的信心。

4. 过去的经验和世界各地正在进行的项目

1942年，美国首次提出了利用液态重金属作为反应堆的冷却剂。但是，在进行了一些非常初步的测试后，研究者遇到了一些困难，主要与结构材料的腐蚀性和LFR较长的燃料倍增时间相关。随着一些测试结果在20世纪50年代被公布，美国的努力止步了[4]。

与之相反，俄罗斯科学家和工业界积极开展了与液

态重金属应用有关的研发活动，并获得了十分有意义且令人关注的进展。20世纪50年代，液态重金属技术开始应用于军事，铅铋共晶体(LBE)作为一种冷却剂被用于船舶推进系统中的核反应堆。当时解决材料腐蚀问题的主要方式是使用氧化物钝化技术，如上文所述。

1963年，第一艘带有LBE冷却反应堆的核动力潜艇投入使用。20世纪70年代，几艘“阿尔法级”(北大西洋公约组织(NATO)代号)也称“Lira级”(苏维埃社会主义共和国联盟(USSR)代号)攻击核潜艇投入使用。总体来说，通过上述反应堆和两个陆地技术原型反应堆的运行过程，俄罗斯科学家积累了80堆年的经验和反馈资料。在此期间遇到了很多问题，如蒸汽发生器漏水、生成固体氧化物导致的堆芯流道阻塞、冷却剂凝固和钍的产生。从这些早期的经验中得到的教训促使俄罗斯科学家找到了与LBE应用相关的问题的解决方案。

在欧洲，最早关于LBE和铅冷却剂的研究始于1995年，且与加速器驱动次临界洁净核能系统(ADS)概念的发展相关，随后又进行了临界反应堆的概念设计。自那时起，欧洲就建成了许多核设施，而且至今仍在运行。

在GIF内部，关于LFR概念的活动始于2006年。欧洲共同体、俄罗斯、日本和韩国已经签署了一份合作谅解备忘录(MoU)，并在此基础上开展了合作。美国和中国也作为观察员参与了该MoU的活动。

目前，与LFR技术发展有关的几个项目正在多个国家开展。以下是这些项目的简要介绍。

4.1. 俄罗斯

俄罗斯在LFR发展方面显然是最先进的国家，过去从潜艇推进系统中获得的经验目前正被用于两个关键项目的开发。

SVBR-100是一种100 MW_e的LBE冷却反应堆，其设计理念直接源自潜艇反应堆。其设计正处于进展期，预计会得到民营和政府合作伙伴的资助。

BREST-OD-300是300 MW_e的铅冷却反应堆，完全由政府提供资金，预计于2016年至2017年开工建设。该设计将LBE冷却系统研发的技术进行了适当修改后用于纯铅冷却剂。基于可持续性和安全性考虑，设计者采用了一种非常特别的用于非能动余热排出的系统。该项目也预计在反应堆厂址内建一个燃料后处理厂，以在实际运行过程中尽量避免燃料的运输。关于BREST-OD-300的发展与特征的一些基本信息请见参考文献[5]。

4.2. 欧洲

在欧洲，最初的研发仅限于ADS概念，其目的是在通过嬗变处理前几代反应堆放射性废物的同时产生能量。在这一系列行动后，大量获欧盟委员会(EC)支持的项目开始启动，其中最重要的一些项目包括PDS-XADS、EUROTRANS、ELSY、LEADER、MATTER、SILER、HELMNET、MAXSIMA和MYRTHE。有兴趣的读者可在网上很容易地找到有关这些项目的更多信息。

继这些最初的努力之后，研发活动集中于一种工业规模的参考电站——欧洲铅冷快堆(ELFR)，其规模为600 MW_e。(基于之前在ELSY项目中开展的一项概念设计)；另一个关注点是一种更小的示范堆，被称为欧洲先进铅冷示范快堆(ALFRED)，其规模为125 MW_e。这两种概念设计均在LEADER项目的框架内进行，且在参考文献[6]中有详细介绍。

目前的活动聚焦于ALFRED，这是欧洲最早实现的LFR。罗马尼亚在核研究中心规划了一处ALFRED厂址，位于Mioveni。一个由安萨尔多核能公司(意大利)、欧洲核能机构(ENEA)(意大利)、皮特什蒂核研究所(ICN)(罗马尼亚)和雷兹核研究所(CV-REZ)(捷克共和国)作为主要参与者构成的联盟于2013年成立。该联盟的主要目标是推进铅冷技术的发展，以启动示范堆项目的建设。目前的工作计划包括2023年之前的研发活动，之后是反应堆的建设。然而，这样的计划强烈依赖于资金的可用性，若无法保证提供充足的资金，则计划进程可能会被严重推迟。

与此同时，SCK·CEN在开展高科技应用多功能混合动力研究反应堆(MYRRHA)的设计，这是一种LBE冷却的ADS，可被用作辐照实验装置，也可为快中子反应堆燃料或材料的评估提供支持。显然，MYRRHA和ALFRED之间有着强烈的相关性，许多欧洲的机构同时参与了这两个项目的研发。这两个项目的成员根据不同的情况接受新的国际参与者。

4.3. 日本

在日本，尤其是在发生了福岛核事故后，LFR相关的研发工作转向了基础研究。一些概念设计仍然处于分析阶段，而关于铅和LBE的材料及材料兼容性的基础研究正在开展。然而，日本通过参与GIF仍然活跃于LFR发展领域，且根据以往的事故经验和教训，正在提供关于安全性原则和应用的非常重要的信息。日本的发展情况可在参考文献[7]中了解。

4.4. 韩国

韩国于2015年12月签署了GIF-LFR MoU，通过国立首尔大学(SNU)的研究活动和URANUS反应堆[8]的开发参与GIF LFR的活动，其中URANUS是以氧化铀为燃料的小型模块式LBE冷却反应堆。该反应堆位于地下，堆芯寿命较长(燃料周期为20年)，特点是具有非能动安全系统。该反应堆采用一次侧的全自然循环，SNU通过经济合作与发展组织核能机构(OECD-NEA)发起了一项国际水平的基准测试活动，以验证系统计算机编码功能对这一反应堆设计重要组成部分的预测。SNU也致力于设计具有钷燃烧能力的PEACER-300反应堆，该反应堆可在自身的封闭燃料循环中重复利用所有的次锕系元素。

4.5. 美国

虽然美国是首批尝试使用液态重金属作为核反应堆冷却剂的国家之一，但目前其开展的项目十分有限，预计未来会有所增加。从设计的角度来看，美国开展了两个主要项目：SSTAR[9]和GEN4。两者的目的都是开发小尺寸和具有极长的堆芯寿命的小型模块反应堆。

从研发的角度看，随着利用结构材料和多层耐腐蚀材料的共挤压技术的开发，在腐蚀性问题取得了一些引人关注的进展。自LFR PSSC活动开始以来，美国在GIF中十分活跃。虽然只是观察员的地位，但美国代表们非常积极地参与了小组活动，为未来的发展提供了重要指导。另外，美国西屋电气公司最近表示出对小型模块式LFR开发的兴趣。

4.6. 中国

中国的LFR活动一般由中国科学院核能安全技术研究所(INEST)主持。自这些活动开展以来，INEST致力于开发一种用于发电和核废料嬗变的ADS。中国铅基研究反应堆(CLEAR)项目计划先建成一座CLEAR-I(10 MW)反应堆，然后再向CLEAR-II(100 MW)和CLEAR-III(1000 MW)推进[10]。CLEAR-I计划采用临界和亚临界双模式运行。项目开发的首个阶段使用了LBE冷却剂，后续开发阶段计划使用纯铅冷却剂。同时，液态铅锂包层是最有前景的聚变堆包层，由于液态铅锂与铅或铅铋具有相似特性，上述项目的开发也将有助于正在开展的聚变堆铅锂包层项目的推进。

虽然INEST仅作为观察员参与了第四代LFR的活动，但CLEAR项目的参与人员数量大大增加，使得该项目在中国的未来发展更加乐观。KYLIN系列液态LBE

实验回路已建成，可进行结构材料腐蚀试验、热工水力测试和安全试验。为了验证和测试铅基反应堆的关键部件和综合运行技术，正在建设铅合金冷却非核反应堆CLEAR-S、零功率铅基核反应堆CLEAR-0、铅基数字(虚拟)反应堆CLEAR-V和强流氦气中子发生器HINEG。

5. 结论

自第四代核能系统活动开始以来，LFR显示了其能够满足GIF的所有目标的巨大潜力。由于前期经验以及液态铅和LBE冷却剂对材料的腐蚀问题，第四代反应堆活动曾主要关注钠冷快堆。但近年来在应对方法和材料技术方面的新进展表明，流动的液态铅的腐蚀问题已经能够被克服，而且由于铅冷却剂在安全方面具有明显优势，研究者和开发者重新对其产生兴趣，世界各地的几个项目进展都很迅速。LFR的技术优势及其与第四代核能系统目标的匹配性是获得充足资金支持的重要基础，在不远的将来会将核能利用推向新高度。

致谢

笔者向第四代LFR系统指导委员会的所有参与者表

示感谢，感谢大家在小组中进行的有用讨论和在GIF合作活动中的信息交流。

References

- [1] US DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee, Generation IV International Forum. A technology roadmap for Generation IV nuclear energy systems. USA: US DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee, Generation IV International Forum; 2002. Report No.: GIF-002-00.
- [2] GIF Policy Group. Technology roadmap update for Generation IV nuclear energy systems. USA: The OECD Nuclear Energy Agency for the Generation IV International Forum; 2014 Jan.
- [3] Alemberti A, Froggheri ML, Hermsmeyer S, Smirno LAV, Takahashi M, Smith CF, et al. Lead-cooled fast reactor (LFR) risk and safety assessment white paper, revision 8 [Internet]. [cited 2014 Apr]. Available from: https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2014-11/rswg_lfr_white_paper_final_8.0.pdf.
- [4] Weeks JR. Lead, bismuth, tin and their alloys as nuclear coolants. Nucl Eng Des 1971;15:363–72.
- [5] Smirnov VS. Lead-cooled fast reactor BREST—project status and prospects [presentation]. In: International Workshop on Innovative Nuclear Reactors Cooled by Heavy Liquid Metals: Status and Perspectives; 2012 Apr 17–20; Pisa, Italy; 2012.
- [6] Alemberti A, Froggheri M, Mansani L. The lead fast reactor: demonstrator (AL-FRED) and ELFR design [presentation]. In: International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios (FR13); 2013 Mar 4–7; Paris, France; 2013.
- [7] Takahashi M. National status on LFR development in Japan [presentation]. In: 11th LFR Prov. SSC Meeting; 2012 Apr 16; Pisa, Italy; 2012.
- [8] Choi S, Hwang IS, Cho JH, Shim CB. URANUS: Korean lead-bismuth cooled small modular fast reactor activities. In: Proceedings of ASME 2011 Small Modular Reactors Symposium; 2011 Sep 28–30; Washington, DC, USA. ASME Digital Collection; 2011. p. 107–12.
- [9] Smith CF, Halsey WG, Brown NW, Sienicki JJ, Moiseyev A, Wade DC. SSTAR: the US lead-cooled fast reactor (LFR). J Nucl Mater 2008;376(3):255–9.
- [10] Wu YC, Bai YQ, Song Y, Huang QY, Zhao ZM, Hu LQ. Development strategy and conceptual design of China lead-based research reactor. Ann Nucl Energy 2016;87(Part 2):511–6.