

液态金属快中子堆的技术和经济现状

液态金属快中子堆技术近几年又取得重大进展

Simcha Golan, Jean Leduc 和 Hiroshi Nakagawa

日本、西欧国家、苏联和美国，积液态金属快中子堆 (LMFR) 的发展和验证 40 年之经验，正在继续进行下个阶段的 LMFR 工程。本文将简要介绍 LMFR 目前的技术发展水平、经济可行性的各种最新预测，以及不同的人对于部署 LMFR 电厂的一些看法。

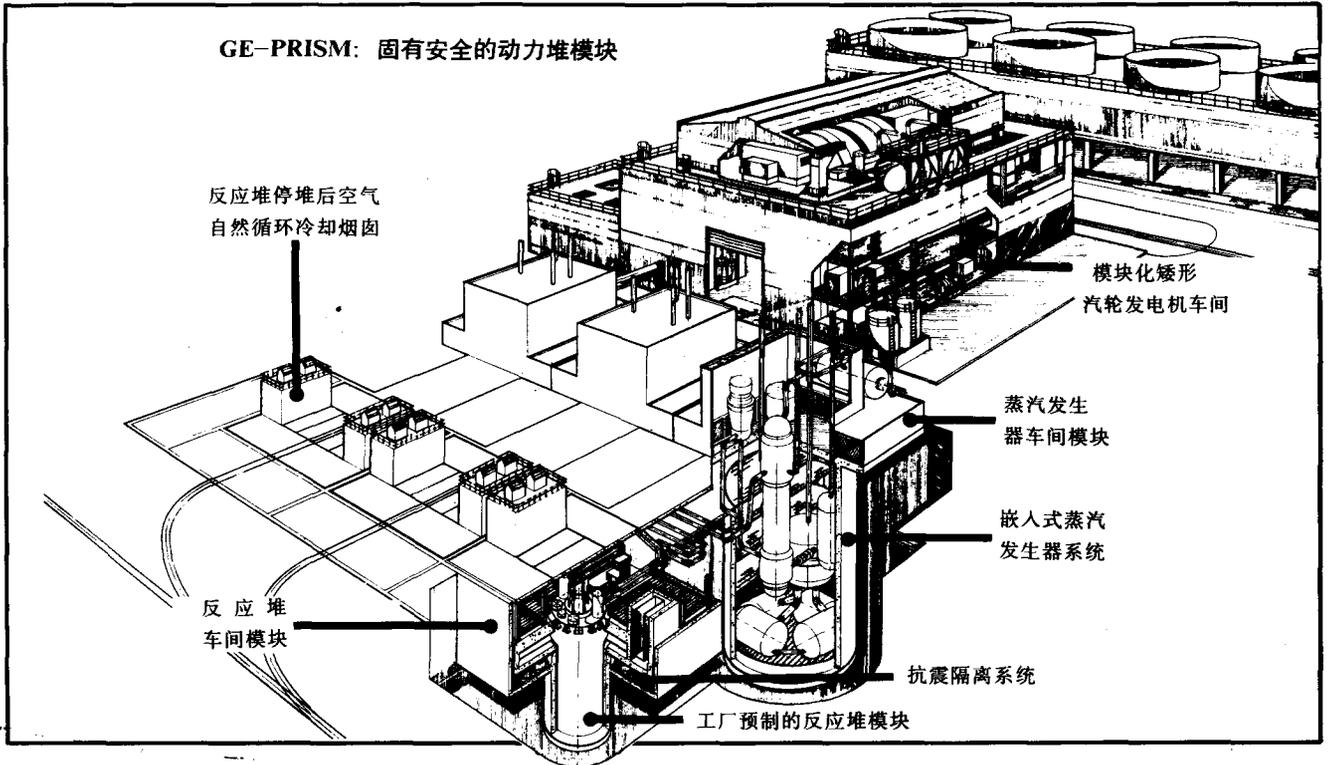
目前的技术发展水平

实验性和中等规模的 LMFR 核电机组，总共积累了大约 200 堆年的运行经验。这些经验证明，钠冷快中子堆是可靠的，与现有轻水堆 (LWR) 一样容易操纵，而且容易维修，操作人员在维修时受到的照射剂量较低。此外，这种堆产生和需要处理的常规放射性废物极少。从法国的 250 MWe 凤凰快堆 (15 年)、联合王国的 250 MWe PFR (16 年)、苏联的 BN-350 型堆 (16 年) 和美国的 400 MWth FFTF (10 年) 等原型快堆中取得的经验是特别宝贵的。所有这 4 座原型堆直到最近还在非常可靠地运行着。此外，苏联的 BN-600 型堆至今已运行约 9 年，是唯一的一座商用发电快堆，法国的 1250 MWe 超凤凰快堆，是世界上最大的一座 LMFR，于 1986 年 12 月达到满功率。由于外燃料贮存箱泄漏，这座超凤凰堆曾于 1987 年 5 月停堆，经过成功的修理和改变操纵程序后，已于 1989 年 1 月重新启动。

Golan 先生是美国柏克德公司研究和发部核动力系统部经理。Leduc 先生是法国诺瓦通公司的战略和国际部经理，Nakagawa 先生是日本原子力发电公司工程发部执行经理。

一些国家的快堆的运行已经证实，氧化物燃料和金属燃料的燃耗可超过 100 000 兆瓦日 / 吨 (MWd/t)，而且实验表明，有可能超过 200 000 MWd/t。在类似于商用 LMFR 的工况下，凤凰快堆和 PFR 达到的燃耗大约为 130 000 MWd/t。LMFR 燃料循环的闭合，已在法国、英国和美国以一定规模作过验证。法国制造凤凰和超凤凰快堆燃料的经验，为生产混合氧化物燃料打下了良好的基础。还是在欧洲，最近 15 年来，已成功地对后处理了大约 25 吨乏氧化物燃料，后处理产生的裂变产物废物已进行了玻璃固化，以备长期贮存。美国阿贡国家研究所 (ANL) 在研制三元金属 (U-Pu-Zr) 燃料及相关的后处理工艺方面已取得重大进展。EBR-2 试验性燃料组件的燃耗已超过 185 000 MWd/t。在金属燃料高温处理方面也取得了很大的进展，这种方法可用来收回有价值的燃料组分 (铀和钚) 和除去裂变产物。这种处理方法的一个显著特点，是大部分锕系元素伴随着钚通过该流程，因此脱离废物流。在 EBR-2 现场，装置正在修改，以便在 90 年代中期较大规模地验证这种燃料循环，包括后处理、燃料制造和废物管理。

意识到下面这一点是很重要的：迄今所取得的经验，大部分来自 70 年代中期以前建成的反应堆和 60 年代或更早一些时候开发的工艺技术。近几年来，在 LMFR 工艺技术方面已有了长足的进步，这些新发展只有在下一代快堆电厂中才能发挥作用。下一代设计的若干新技术方向，是这些重要的研究和发展成果以及从运行中电厂中取得的最新经验的反映。关键是要利用 LMFR 有利的内在性质，来增强安全性和最大限度地降低造价。或许下面这三个性质是最重要的：反应堆冷却剂系统基本上是在大气压下工作；反



应堆冷却剂的工作温度离开它的沸点有相当大的距离；以及温度的增高能产生数值很大的负反应性反馈。这些特性连同钠的高温性能、与众多材料的相容性和较高的传热导电性能，不断激励着设计人员生产出更好的 LMFR 产品。

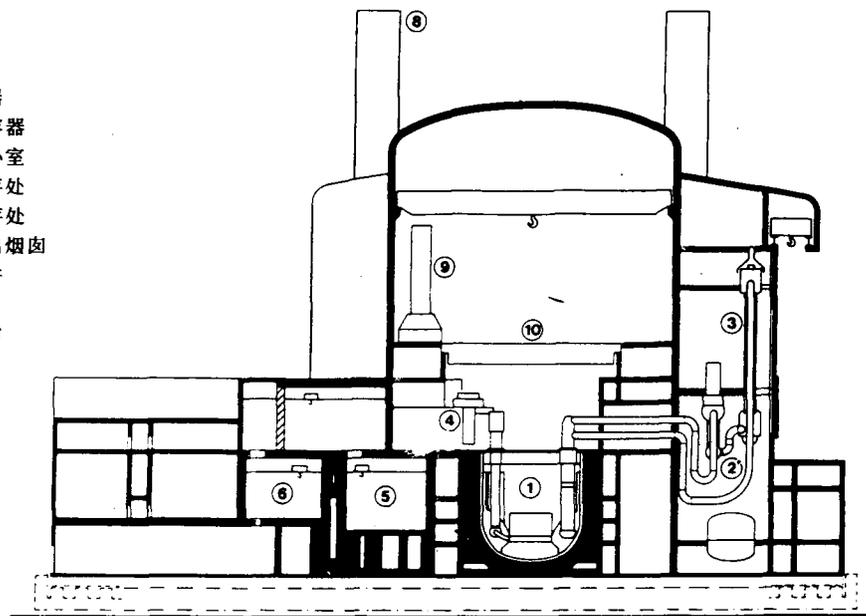
经过了一轮竞争以后，美国最近决定把精力集中于以三元金属合金为燃料的小型（471 MWth，等效电功率 155 MWe）模块反应堆上。模块堆允许更多地在车间内预先进行组装，更加经济地组织批量生产，使用更加简单和非能动的安全设施，更容易逐步增加发电容量。采用金属合金还可使堆芯设计能对事故作出良好的响应，能够在燃料再循环中采用紧凑的火法冶金流程，这样的燃料循环会有利于在采用 LMFR 的早期就实现经济的燃料循环闭合。相反，日本、苏联、印度和欧洲的一些国家，目前仍然遵循较为传统的路线，目的在于发展采用铀、钚氧化物混合燃料的大型（800—1500 MWe）单堆，他们认为大型反应堆在建造和运行方面有明显的规模经济性。从超凤凰快堆的建造和初步运行取得的经验表明，未来的大型单堆电厂的造价有可能大大下降。混合氧化物燃料工艺已经搞得比较好，并可以利用 LWR 燃料的制造和后处理经验。因此，在如何使 LMFR 工业走向商业化的问题上，目前有几种可供选择的途

径。尽管具体的设计各不相同，但其基本原理是相同的，从而为国际合作打下了基础。

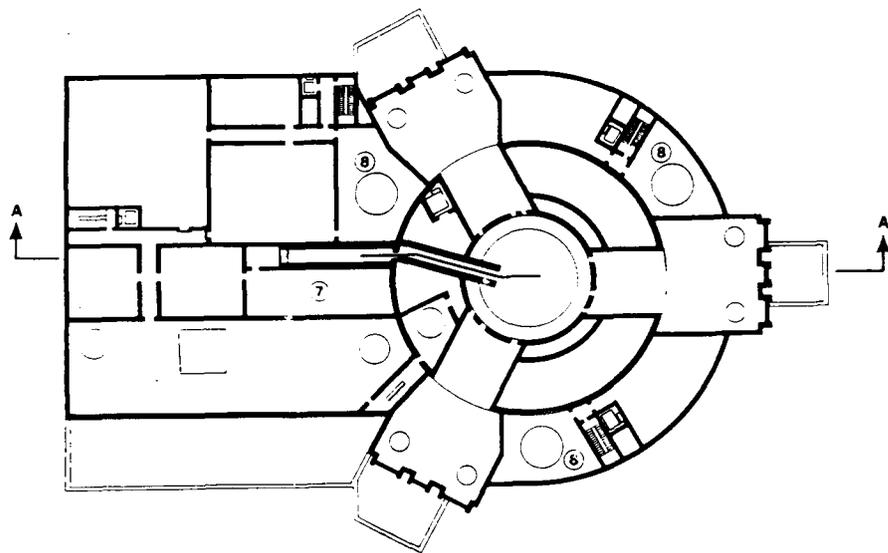
美国。美国的主攻方向，是在通用电气公司的领导下开发中等规模的发电单元（PRISM），可以积木式地用它们建成较大额定功率的电厂。每一发电单元由与一台 465 MWe 汽轮发电机相连的 3 个 471 MWth 反应堆模块组成。（见附图。）这种电厂有许多独创之处，值得注意的例子有：紧凑的反应堆模块可以陆路运送；采用三元金属燃料与火法冶金后处理工艺；反应堆的热响应特性和反应性响应特性带来的固有停堆和稳定运行能力，甚至在发生极不可能发生的事故的情况下亦如此；非动热的衰变热导出系统；反应堆的抗震隔离系统提供了较高的抗震安全裕量，从而使标准电厂的选址有了更大的灵活性；安全壳由反应堆容器外围的一个保护性容器和一个带有许多焊接密封贯穿件的反应堆封盖组成；采用电磁式而不是机械式的一回路泵；取消了依靠电源的辅助冷却系统和安全级应急柴油发电机；采用积木式施工法及大量采用工厂预组零件；把电厂中与安全有关部分和常规部分分开建造；以及标准设计已得到管理部门的认定，这种标准设计以事先在全尺寸原型模块上针对范围广泛的正常和非正常事件所做的大量试验为基础。

EFR 第一个协调一致的设计

- 1 一回路
- 2 二回路
- 3 蒸汽发生器
- 4 燃料运送容器
- 5 燃料运送小室
- 6 乏燃料贮存处
- 7 新燃料贮存处
- 8 衰变热导出烟囱
- 9 放射性部件运送容器
- 10 可旋转平台



A-A 剖面



欧洲。欧洲的主攻方向，是在欧洲快中子堆电力公司集团 (EUFRUG) 的领导下开发 1500 MWe 核动力堆 (EFR)，这种堆应能满足联合王国、法国和德意志联邦共和国对安全和经济的要求。EFR 设计以欧洲各国以前的设计 (例如 CDFR、SNR-2 和超凤凰-2) 为基础，由 EFR 联合公司 (法国昂萨尔多公司、比利时核子公司、西德国际反应堆建造公司、英国核工程民用建筑公司和法国诺瓦通公司) 组织实施。该设计表明，其造价可以大大降低，因此在经济

上可与欧洲当代的 LWR 核电厂相竞争。(见附图。) 在 EFR 对经济潜力起作用的一些特点中，值得注意的例子有：高燃耗 (超过 150 000 MWd/t) 的混合氧化物燃料；单堆功率为 3600 MWth 的池式堆，热传输部件容量大 (3 台一回路泵，6 台中间热交换器，和 3 条或 6 条二次环路)；由反应堆容器和封盖组成的紧凑的一次安全壳，和起二次安全壳作用的钢筋混凝土圆柱形反应堆厂房；简单而直接的反应堆余热导出系统；6 台直流、直管、铁素体钢蒸汽发生



法国超凤凰快增殖堆的控制室。
(来源: CEA)

计在一系列中第 n 座 EFR 电厂的造价, 将降低到只比等效的先进 LWR 电厂的造价高出 25%。另一方面, 由于使用高燃耗燃料, 预计 EFR 燃料循环费用会明显地低于甚至是用适度价格的铀作燃料的 LWR 的燃料循环费用, 因而当 LMFR 成批生产时, 最后的结果是总发电成本将与 LWR 的接近。

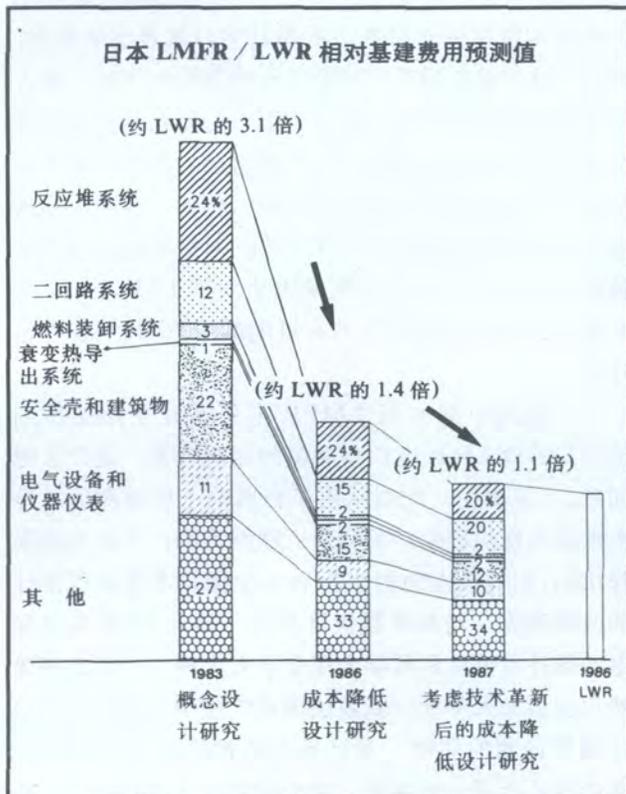
最近在美国和日本独立进行的研究得出的结果是类似的, 甚至更加令人鼓舞一点。日本的一些电力公司在有经验的美国供应商的合作下, 开发了一种涉及

范围很广的计算机辅助的费用估算方法, 并且一直在使用这种方法, 把最近的先进 LMFR 设计同以 LWR 经验为基础的成本校准值进行连贯的相互比较。(见本页左下图, 该图汇集了日本的一些最新研究揭示的基建费用变化趋势。) 这些研究成果表明, LMFR/LWR 基建费用之比有可能达到 1.1 左右, 即使按现时铀价计算, 金属燃料的燃料费用之比明显低于 1.0、氧化物燃料的相应值大约为 1.0。美国对标准化 1400 MWe (三套 PRISM 发电单元) LMFR 电厂的费用预测指出, LMFR/LMR 的基建费用和总发电成本的相应比值都接近 1。按照目前的成本定义, 要在美国条件下分辨出 LMFR 和 LWR 之间是否存在明显的成本差异是不可能的。(见第 35 页附图。) 不过, 未来铀价格如果上升, 就会对 LMFR 有利。日本和美国的研究预测, 当未来的 LMFR 电厂按标准化商用电厂翻版时, 经济上是可以与 LWR 电厂相竞争的。

值得注意的是, LMFR 对 LWR 的这些相对经济比较反映的是各自国家的经验和预测的情况, 并未考虑这些国家之间的 LWR 绝对基建费用方面的巨大差别。LMFR 在法国的竞争难度也许比其他国家更大一些, 因为他们的 LWR 成本低。因此, 法国 LMFR 的基建费用比 LWR 高出 25%, 并不意味着其绝对数字一定比美国或日本的 LMFR 预测值高。

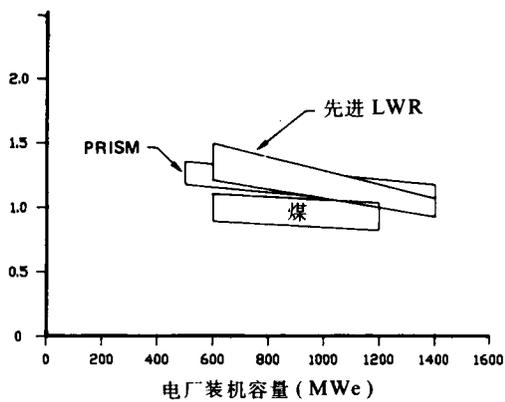
商业性推广应用

日本目前的看法是, 在他们开始使多机组 LMFR 商业化 (也许要到 2030 年) 以前, 也许要连续再建一二座验证性电厂。欧洲人则认为, 2010

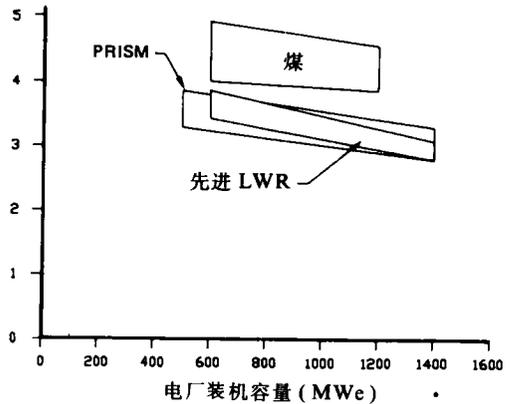


按美国条件估算的 LMFR (PRISM) 经济竞争性

相对隔夜(overnight)基建费用(美元/kWe)



相对的母线电价(美厘/kW·h)



年后就有可能开始用 LMFR 替代退役的 LWR，可以与到那时可供应用的先进 LWR 相竞争。这就意味着在今后十几年内将建成一座经济的验证性电厂，例如 EFR。美国如同欧洲和日本一样，有关商业性推广应用 LMFR 的时间表的决策过程，涉及许多可变因素，例如：电力需求、价格适度的核燃料与化石燃料的可利用资源、多种核替代方案，以及燃烧化石燃料所造成的环境问题等。因此，预测确实需要 LMFR 的具体时间，即使不是不可能也是十分困难的。从下面几种不同的观点也可以看出这个问题的重要性：

第一种观点认为，为了开发和验证这种独一无二的工艺技术，全世界已经投入了大量资金（以 1988 年美元计超过 300 亿美元），并认为这种工艺技术的潜在价值是能为本世纪末下世纪初提供一种可行的能源方案，为未来能源供应可能出现的任何动荡保了险。因为使这种工艺技术商业化还需要的费用不算特别高，所以这种观点认为，完成这种工艺的开发工作是有经济意义的。

第二种观点认为对全球能源的关心是由下列因素驱使的：发展中国家预计会出现的人口激增（到 2025 年可能增加 15 亿以上），各地人们期望不断发展经济，以及对酸雨和“温室效应”等环境问题越来越大的忧虑。为了有利于发展中国家的经济发展而又不过分损害全球环境，工业国应该放慢化石燃料和低成本铀资源的消耗速度，把这些资源省下来用于发展中国家买得起的和易于操作的化石燃料电厂和核电

厂。这意味着，为了把低成本铀资源节省下来供发展中国家使用，尽管刚开始时成本稍高一些，工业国也应该考虑早些推广应用 LMFR 电厂。

第三种观点与 LWR 和 LMFR 之间的共生关系有关。在大多数情况下，新 LMFR 电厂刚启用时的堆芯必须用从 LWR 乏燃料中提取的钚作燃料。一座 LWR 电厂在其寿期内产生的钚，足以供应半座 LMFR 的电厂所需的燃料。因此，根据预计的 2010 年时全世界 LWR 的装机容量，所产生的钚应该足以供应 200 GWe LMFR 所需的燃料。对于钚的“贮存”和利用来说，没有比建造 LMFR 电厂这种方法更好的了。把钚返回 LMFR 电厂，还能使伴随的极长寿命超铀废物，特别是镅-237 和其他微量锕系元素“烧掉”，从而使高放废物的必要隔离时间，可以从几万年减少到几百年，也就是只需隔离裂变产物。由于人们对极长寿命核电厂废物的安全处置越来越关注，因此全世界对 LMFR 的这一附加重要使命越来越感兴趣。

所有这些观点明显地表明，我们应该保持发展和验证 LMFR 的势头，至少持续到商业上有生命力的 LMFR 标准设计全部通过许可证审批并得到验证为止。应该使这些成熟的设计在下世纪初实际推广应用。LMFR 是唯一被证实能提供实际上无限的新易裂变材料的一种工艺技术，消耗的是世界能充分供应的贫化铀、低品位天然铀和钍资源，它能为下个世纪乃至以后许多世纪日益增加的核动力需求供应充足的核燃料。