

先进堆在发展中国家：来自中国的一个观点

在许多国家，能源需求正推动着核电的发展

钱积惠

在研究了世界核电的现状、未来的发展趋势，和国际原子能机构（IAEA）新倡导的发展中国家核电发展战略之后，便可看出，经济性更好、结构大大简化和更有效地利用非能动安全设施的新一代核电机组的出现，已是一种确定无疑的趋势。这种趋势之所以形成，看来不仅是因为工业化国家内核电市场的竞争和解决公众对核电接受能力问题的需要，还因为要为发展中国家下个世纪的核电站发展创造条件。

统计数据表明，发展中国家能源需求的增长率大大高于工业化国家。鉴于能源资源有限，许多发展中国家提出了依靠和引入核电的计划，并急迫地希望执行这些计划。IAEA 遵循其推广核技术和和平应用的宗旨，一直在努力探索帮助发展中国家部署核电站的途径。从 1983 年开始执行的中小型核动力堆（SMRP）计划就是这些努力的一个体现。

SMRP 计划包括一项广泛的调查，它清晰地勾勒出了引进核电技术的发展中国家的需要和核电的巨大潜在市场，同时也指出了这些国家发展核电的主要困难和制约因素。

IAEA 也一直在努力说服发达国家的供应商们为开拓这个新市场作出努力。但是，直到八十年代初期，工业化国家的核工业界对此几乎没有什么兴趣，他们更关心的是他们国内市场的现实需求和订货。为了适应国内的商业竞争，核电机组的单堆功率变得愈

来愈大。对于功率规模达到 1000 兆瓦电（MWe）甚至更大的核电机组，许多发展中国家根本无法问津。不说别的，单就这些国家的电网容量就是一个很大的制约因素。显然，他们需要的是 SMRP。然而，发展中国家期望得到有确定价格和建造周期的 SMRP 的这种愿望，似乎无人理采。

无可否认，供应商们怀疑发展中国家市场的现实性，这一点或许是不无理由的。发展中国家可能出不起建造核电厂所需的资金，即使按与大型核电厂相同的比投资来计算也是如此，而这一比投资按工业化国家的观点来看是比较低的。然而，事实上如果 SMRP 只是大型核动力堆简单地按比例缩小的翻版，那么，根据规模因子定律，比投资将会高得多，而这显然是无法接受的。

由于工业化国家国内能源消费量的增长率降低，近年来其核电市场并不景气，也由于公众对核电的接受能力问题，供应商们开始把他们的注意力更多地投向发展中国家。1985 年，IAEA 征集到 23 种不同的 SMRP 设计概念。这些设计概念具有不同程度的成熟性和可以在不同的时间内接受订货。那时，虽然各个发达国家对此表现出的兴趣和支持是令人鼓舞的，但基本问题仍然没有解决。

先进堆的出现

发展中国家之所以重视先进堆，有多方面的原因：

- 发展中国家极感兴趣的先进堆是这样一种类型：它们基于成熟的技术，只是采用了诸如非能动安

钱积惠先生是中华人民共和国西南反应堆工程研究设计院院长，1984—1987 年期间，曾任中国常驻 IAEA 代表团的科技顾问。

全原理、小型模块化结构等新设计概念，同时，又不需要更加高级或新的技术。这些先进堆的主要特点是简单和易于建造、运行和维护。

• 利用了新的设计概念以后，这些先进堆也许不再遵循通常那种有关比投资的规模因子定律。中小型核机组的比投资也许不会比大型核机组的高。如果一套 600 MWe 核机组的比投资可以做到和 1000 MWe 核机组几乎相同，那总投资与功率规模之间就会存在着线性关系。如果这样一个目标能达到，这可以说是核能领域的一个历史性转折点，同时也是发展中国家一个福音。

先进堆由于重视非能动安全设施因而其安全性得到增强，这对于工业化国家来说也许是缓解公众接受能力问题的关键。而这样一种安全性的增强对发展中国家来说或许意义更大，因为他们的技术和管理基础都相对地要差一些。人们有理由对目前这一代核电厂担心，因为它们对建造、运行和维护的要求实在太高。即使此类核电厂能够在发展中国家中广泛地建造和运营，恶性事故的发生概率也可能会增加。一旦真的发生事故，就会在全世界范围内危及核能的持续发展。对于核电厂来说，真是“一处出事，如同处处出事”。

发展中国家显然在期待着新型先进堆的早日出现和商用化。人们有理由期望，下一个世纪，采用先进堆的中小型核电厂将会被众多的发展中国家所接受。

中国的核电发展

在过去的几十年中，中国电力工业发展迅速。34年中（1952—1986年），发电装机容量增长了60多倍，相应的年平均增长率为12.9%。即使这样的增长速度，每年还缺电 45×10^9 到 50×10^9 kWh，或者说缺少12 GWe的装机容量。根据预测，发电装机容量每年至少应增加9 GWe，到本世纪末，总装机容量应达到230 GWe。其中煤电将占140 GWe；因此每年用于火力发电的煤将超过 4×10^8 吨（t）。到2000年，煤的年产量计划要超过 13×10^8 t，但那时每年也只能有 3×10^8 t煤可用于发电。即使考虑了水力发电装机容量的增长，到本世纪末，中国的电力短缺将会愈加严重。

一直到80年代初，在中国还有人怀疑发展核电的必要性。现在，现实已使他们转变了观念。水力资源分布不均、燃煤电厂的污染、严重的交通运输问

题、煤炭产量的巨大缺口，以及东南沿海工业发达地区日益增长的能源需求无法得到满足等等这一系列事实，已使中国能源界和当局认识到中国必须发展核电。然而，迅速发展核电的希望只能寄托在先进堆上。

中国的核电计划要求到本世纪末有6—7 GWe核电装机容量投入运行。已经作出决定，PWR将作为主力堆型来部署。作为第一步，将建造一批600 MWe的PWR，采用标准化的设计，并逐步提高国产化的比重以减少电站的基本投资。出于经济方面的原因，中国主管当局指望将来向1000 MWe的PWR过渡，但这仍是讨论中的课题。

尽管发生了三里岛和切尔诺贝利的恶性事故，中国主管当局已公开声明，中国发展核电的决心不变。中国不怀疑现代核电技术对核安全的保障，也没有像西方国家那么多的反核情绪。但是，如果作深一层的剖析，那就会看出核安全问题也将给中国核电的发展加上相当沉重的包袱。中国的决策者充分认识到核安全的重要性，认为这是对中国人民和国际社会负责的问题，始终强调要积累经验，强调与外国合作的必要性，以及强调中央的集中统一管理。原则上已作出了这样的决定，中国不能像发展其他急需的工业那样放开手脚地发展核电事业。这是一种可以理解的和明智的政策。

如此强调核安全而导致的最重要结果将是对核电经济性产生全面影响。因为当今的核电厂采用了越来越复杂的专设安全设施和保护系统，核电厂的建造、运行、维护和管理变得越来越严格和繁琐。此外，还要为发生概率极小的恶性事故提供非常详尽的应急计划及应急准备。这使得现有的这些核电厂的造价大大提高。在中国，燃煤电厂的基本投资相当低，而核电厂基本投资的增高似乎到了难以接受的程度。这是妨碍着决策者下决心大踏步发展核电的一个关键问题。我国有些经济学家曾指出，如果核电厂的基本投资可以控制在现有的同等规模燃煤电厂的基本投资（按中国的条件计）的两倍以下，则中国的核电就能够有较大的发展。

中国的先进堆计划

1986年，中国西南反应堆工程研究设计院（SWCR）制定了先进压水堆研究规划，组织了专门的研究组调研此类反应堆的先进技术的现状和发

展趋势，并对中国的 600 MWe 先进压水堆核电站 (AC-600) 进行概念设计。对 AC-600 有下列七项主要要求：

- AC-600 的基本投资比中国即将建造的秦山二期工程 600 MWe 标准压水堆核电站 (ST-600) 下降约 20 %。

- 可利用率大于 85 %。
- 电厂建造时间为 4—5 年。
- 电站设计寿命达 60 年。
- 燃料循环周期为 18 个月。
- 电站人员职业受照剂量为 50—100 雷姆/年。
- 堆芯熔化几率低于 1.5×10^{-6} / 堆·年。

为达到上述目标，计划把先进堆芯、非能动安全系统和简化作为三大研究重点，并在 AC-600 设计中采取如下主要技术措施：

- 采用中子谱移控制，使燃料循环周期至少增加 13 %，减小堆芯的最大过剩反应性从而有利于反应堆的安全性。

- 堆芯燃料元件线功率密度为 12.26 千瓦/米，比 ST-600 小 25 %。

- 采用 Gd_2O_3 作可燃毒物，进一步减小堆芯最大过剩反应性和临界硼浓度，加大堆芯的负温度系数。这样不但可以提高反应堆的固有安全性，而且还能进一步简化系统和部件。

- 采用由 80 % 的不锈钢加 20 % 的水组成的径向中子反射层和内径为 4.3 米的更大的反应堆压力容器，以减少中子对压力容器壁的影响，使设计寿命延长到 60 年。

- 两台倒立的全密封电机主冷却剂泵将分别与两台蒸汽发生器整体组装。由于减小了一回路的阻力和加大了蒸汽发生器与堆芯之间的垂直距离，因而 25 % 的反应堆额定功率有可能被自然循环冷却带走。

- 一个容积为 25 m³ 的应急给水箱以及一台传热面积为 750 m² 应急空气冷却器，与每条环路的蒸汽发生器二回路侧相连，以形成非能动的余热应急导出系统。在全厂发生断电事故时，一回路用 50 % 的额定流量，二回路用 3.5 % 的额定流量进行自然循环冷

却，就能导出堆芯衰变热。

- 发生失冷事故时，两台容积为 40 m³ 的补给水箱和两台水容积为 40 m³ 的安全注入水箱，将自动把硼水注入反应堆而不需要启动任何能动水泵。AC-600 仍然备有能动的低压安全注入和再循环系统，以便更可靠地履行堆芯应急冷却系统的安全功能。

- 采用非能动安全壳冷却系统，以提供能从安全壳中长期地导出热量的有效手段。

上述技术措施的实施将导致系统和部件的极大简化。例如，与 ST-600 相比，AC-600 的专设安全系统的阀门数将减少约 70 %，测量仪表减少约 50 %，泵减少约 80 %。因此预计 AC-600 的基本投资至少可降低 15 %。

据初步分析，AC-600 和 ST-600 相比，总投资额也许能降低约 25 %。AC-600 是一个鲜明的例证，表明系统的简化、部件的减少和利用自然定律，可以使电厂建造更容易、运行更简单和系统更加可靠。根据计算，AC-600 的堆芯熔化概率比 ST-600 小 100 倍，从而大大地提高了 AC-600 的安全裕量。

有关 AC-600 概念设计的初步结果是令人鼓舞的。这一计划已得到中国各主管部门的广泛支持，将要纳入下一个国家核电发展五年计划加以进一步开发。如果 AC-600 的比投资能降低到低于或接近目前 1000 MWe 级压水堆电站的水平，那 AC-600 就极有希望成为中国在相当长一段时期内建设的主力堆型。

中国对先进堆的出现寄予很大的希望。如果采用基于非能动安全原理的先进堆，就可能使核电不仅更安全，而且使系统更简单，建造周期更短，从而大大降低基本投资。这样一种先进技术的突破，将对中国的核电发展产生巨大的影响。正因为如此，中国的核电专家们正密切注视着世界先进堆的发展趋势，特别是美国的 AP-600 和模块式高温气冷堆。在政府的支持下，已制定了计划和组织了研究队伍。中国已经参加并将继续参加这方面的各种国际合作活动和交流。

