

德国高温气冷堆核电技术发展情况及相关政策

王敬华

(科技部中国农村技术开发中心, 北京 100045)

摘 要: 20 世纪 80 年代末, 德国先后关闭了其建设的两座高温气冷反应堆, 并于 2011 年宣布放弃核能, 实施能源转型战略。本文简要阐述了德国放弃该技术的过程和原因, 对德国近年来核电技术的研究重点及趋势进行了分析, 并对德国放弃核能而发展可再生能源的政策进行了综述, 认为虽然德国近年来新能源发展取得了显著成效, 但同时也面临许多现实问题的巨大挑战。

关键词: 德国; 高温气冷堆; 核电; 科技政策

中图分类号: G327.516 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3772/j.issn.1009-8623.2015.06.001

1 20 世纪 80 年代末, 德国放弃了高温气冷堆核电技术

德国从 60 年代开始建设核电厂, 前后共建成 36 座, 现已关闭了 27 座。其中大多数核电厂为压水堆 (PWR) 和沸水堆 (BWR), 有 2 座为高温气冷堆。目前还在运行的 9 座反应堆中有 7 座压水堆和 2 座沸水堆。

1.1 两座球床高温气冷堆于 20 世纪 80 年代末先后关闭

德国是较早研发和建设球床高温气冷堆试验站和示范站的国家, 于 1967 年建成了世界第一座电功率为 15 兆瓦的球床高温气冷堆试验站 AVR (45 MWth、15 MWe), 该堆的氦气 (He) 冷却剂出口温度高达 990℃, 原则上适用于高温裂解水的工艺热之需。随后 1985 年德国建了一座示范电站, 利用钍作燃料的高温气冷堆 THTR 300 (750 MWth、300 MWe), 出口氦气温度 750℃。由于技术问题出现了一系列事故, 1988 至 1989 年间, 德国相继关闭了这两座球床高温气冷堆反应堆, 相关实验项目也随之停止。AVR 共运行 21 年, 累计发电 1.7 TWh (即 17 亿千瓦时); THTR 300

机组关闭时, 仅折合运行了 423 天, 即 1.2 个满功率年。1981 年德国电站联盟 (KWU) 和国际原子能公司 (Interatom) 首先提出球床模块式高温气冷堆的概念, 是一种国际公认的具有重大创新性的新一代先进反应堆。西门子公司设计了一座 80 MWe 的 HTR-modul 型反应堆, 并在 1989 年获得执照, 但由于种种原因没有建成。

1.2 由于技术问题引发了事故是关闭的主要原因

AVR 反应堆在运行中出现了一系列的问题, 例如 1973 年放射性氚泄漏量大幅增加; 1976 年因燃料温度不稳定、局部温度高于最高额定温度, 使回路受到严重的放射性同位素 (主要是铯-137 及锶-90) 污染; 1978 年蒸汽发生器泄漏, 反应器进水, 并出现了后续操作失误; 1982 年 120 升油从氦气循环中流入主冷却回路; 1984 年发现, 由于设计错误, 反应堆堆芯中的进料装置不对称, 导致荷载不平衡; 1986 年反应堆燃料球卡住、破损, 造成辐射外泄; 1987 年安全壳的排水阀漏水导致辐射外泄。由于 AVR 产生了消极的后果, THTR 300 没有采用其运行经验, 加之仓促上马, 导致从设计、施工到管理运行都存在着缺陷, 自建成后就问题不断。该反应堆缺乏足够的保护措施来对付空气进入

作者简介: 王敬华 (1976—), 男, 副研究员, 主要研究方向为科技政策与管理。

收稿日期: 2014-12-22

引发堆芯起火的外部影响；此外，当有水进入堆芯后，可能产生正的空泡反应性系数，这两者都作为设计基准事故在以后的球床高温气冷堆设计中予以考虑^[1]。

1.3 民众对高温气冷堆事故的抗议，加速了反应堆的关闭

1986年 AVR 反应堆燃料球卡住、破损，造成辐射外泄，引起民众恐慌与反核团体抗议。在一系列事故发生后，有关机构试图掩盖事实，后来事件在德国媒体上密集报道，破坏了球床反应堆为代表的核电技术在德国民众中的正面形象，动摇了人们对高温气冷堆固有安全性的认识，加速了反应堆的关闭。在此背景下，德国宣布球床反应堆的技术已经失败。

1.4 两座高温气冷堆的退役过程艰巨而复杂

AVR 堆在 1988 年停堆后，经历了极其困难地退役过程，且此堆型的乏燃料后处理极为艰难，陶瓷燃料球不如压水堆燃料棒好处理。资料显示，近 30 万个燃料球，到 2014 年 7 月前，储存在 152 个特殊核废料容器里。反应器于 1994 年批准拆除，目前临时储存在中转仓库中，至少要储存 60 年，核电厂未来的目标是建成一片绿地。AVR 的整个退役过程需要花费数亿欧元，由联邦和州政府的科技管理部门按照 7:3 的比例分担。目前，AVR 有专人负责管理，并成立了监督委员会，每年定期发布评估报告。同样，THTR 于 1989 年 9 月被关闭，在退役的几年时间里也是麻烦不断。反应堆的拆除和核原料的处理具有高风险性，需要付出巨大的人力、技术、时间和资金成本。

2 近年来德国核电技术的研究重点及趋势

1956 年起德国建立了一系列的核能研究中心，如于利希研究中心（FZJ）、卡尔斯鲁厄理工学院（KIT，原核能研究中心）、马普学会等离子体物理研究所（IPP）等。大部分研究中心和大学的研究院都拥有实验反应堆，这些科研单位的研究成果为核电厂的建设运营提供了理论和技术支持，也为核电企业输出了大批核电专家和工程师。目前，这些科研单位的大部分反应堆已经关闭，科研重点也转向了核事故评估、核废料处理以及核辐射防护等技术领域，但在核聚变领域的技术研究一直在继续。

2.1 关于高温气冷堆固有安全性的讨论持续不断

自 AVR 和 THTR 发生事故以来，关于高温气冷堆的固有安全性讨论一直不断。于利希研究中心（FZJ）是最早研究高温气冷堆技术、并全程参与 AVR 和 THTR 建设的研究机构，集中了一批核电专家。该中心的 Moormann（2008）认为^[2]，堆芯燃料球温度的不确定性以及石墨粉尘的产生是导致德国高温气试验堆出现一回路遭金属裂变产物污染的主要原因，这是球床反应堆的固有问题，并建议或可采用与球床式高温气冷堆不同的另一种技术即柱状高温气冷堆解决这一安全问题。与此同时，高温气冷堆技术也不乏支持者，其代表人物 Schiller 研究所的 Urban Cleve（2009）认为^[3]，THTR 技术原理没有问题，核电是安全的。尽管 THTR 运行时间很短，但是在这个原型的基础上，进行新的设计和管理，实现商业化运行是完全有可能的。

国内学者也对该问题给予了关注。清华大学核能专家田嘉夫（2010）分析认为^[4]，德国球床堆存在一些技术问题，过分简单的随机堆放不能满足反应堆多方面的技术要求。燃料球以“无序”和“随机”的状态散装在堆芯内，造成堆芯功率分布极不均匀；为缓解这种影响，只好提高燃料球的流动速度；这样做的结果，增加了燃料球的摩擦，产生更多的石墨粉。此外，燃料球随机堆积限制了输出功率和温度的提高，也使冷却剂穿过球床的阻力增大，造成功率密度低和循环热效率低。他认为，对球床进行改进是必要的、可能的，也是容易实现的。

2.2 核废料的安全处理和防辐射研究是重点

两座高温气冷堆关闭后，于利希研究中心核能专家团队不再参与高温气冷堆技术的发展，转而从事核废料的安全和处置的问题。该中心的员工也是国内外在辐射防护和核废物处理方面的专家，在为保护环境和人类公共安全而努力。相关技术在医学方法中也得到了应用。

此外，研究人员也在研究高温气冷堆事故对环境的影响。德国儿童癌症登记处受隶属联邦环境、自然保育及核能安全部（BMUB）的辐射防护办公室（BfS）委托，开展了核电厂附近儿童癌症研究（2003—2007 年），其研究报告称，在核电厂附近儿童患白血病的几率增加了。资料显示，1990 年

前后于利希附近的白血病患者明显增加,怀疑与反应堆事故以及放射性氙大规模污染地下水有关^[5]。

2.3 核聚变技术将是德国核能的发展方向

2014年第三届核安全峰会在荷兰海牙举行,峰会主题是:如何加强核设施和核材料的保护,防止出现核事故。峰会呈现的趋势是从核“裂变”迈向核“聚变”。德国也是较早开展核聚变技术研究的国家。1984年用于研究核聚变技术的托卡马克(Tokamak)装置TEXTOR在利希研究中心建成。1991年德国马普学会等离子体物理研究所的核聚变实验装置ASDEX产生了首批等离子体,2002年其核聚变装置还曾落户中国西南物理研究所,演变为中国环流器二号装置。除了参与国际热核聚变实验堆(ITER)及之后的示范电站(DEMO),2014年德国建成了世界上最大的、最现代的核聚变装置“螺旋石(Wendelstein)7-X”仿星器。

3 德国放弃核能而发展可再生能源的政策面临严峻考验

3.1 德国的弃核倾向由来已久

德国的核电政策,一方面与德国向可再生能源社会转型的尝试有关,另一方面也是执政党和反对党选举政治博弈的结果。德国政府最终弃核,除了技术和环保方面的原因,更多地是基于政治因素的考虑^[6]。德国弃核政策大致经历了以下几个阶段:萌芽期、形成期、反复期和确定期:(1)萌芽期(二战后至20世纪70年代末),德国人有很深的反核情节,民众普遍不信任核能。冷战期间,英法美在西德配备了大量核武器,柏林墙两侧的德国人长期处于核战争的阴影下;(2)形成期(上世纪70年代末至2002年),随着环保理念的兴起,德国成立了世界第一大环保政党——绿党,并把核电站渲染成武器。1986年苏联切尔诺贝利核爆炸事件发生,人人谈核色变,德国核工业从此一蹶不振。1986年8月,联邦政府宣布在未来的十年中放弃发展核电。2000年联邦政府与核电企业签署《关于逐步退出核能利用的协议》,2002年该协议被纳入能源法;(3)反复期(2002—2011年),在此期间德国的核能政策有所摇摆,一时提出大力发展核能发电,一时又要弃核。2005年默克尔上台后逐步取消了弃核计划,2010年10月默克尔政

府把关闭最后一座核电站的时间由原定的2022年推迟到2035年前后;(4)确定期(2011年以来),2011年3月日本福岛核电站事故后,德国随即关闭了1980年前建成的8座运转反应炉。2011年5月德国政府宣布将于2022年前关闭所有核电厂,这项决定使德国成为首个放弃核能的主要工业化国家。6月德国议会以绝对多数通过弃核法案,并纳入《原子能法》,以法律形式确认。

3.2 德国后核电时代的可再生能源政策面临巨大考验

在20世纪90年代开始,德国出台了《可再生能源法案》^[7],数十亿欧元流入参与绿色电力项目的消费者和投资者手中,法律保证了每度绿色电力都能进入电网,发电者能获得令人满意的电价回报。截至2010年底,德国核能占能源总量的1/4,可再生能源比例为16%。2014年4月德联邦内阁通过《可再生能源法改革方案》草案,明确德国政府将通过放弃核能逐步提高可再生能源比重,实现能源转型。根据该法案,德国可再生能源在电力供应总量中的比重,到2025年将达到40%,到2035年达到55%,2050年超过80%。

2011年德国决定加快退出核电步伐,尽快实现能源转型。能源转型计划被默克尔称为“世纪工程”,也受到民众的普遍欢迎。德国政府对这一工程寄托的希望,不仅仅只是改变能源结构,使能源供应更环保,而更希望通过此举培养起一个新的生态能源产业链,使它与纺织机械和高档轿车一样托举起德国出口经济的半壁江山。三年过去了,可再生能源的确在德国得到了空前大发展。但是,发展过程中伴生的布局混乱、供求失衡、牺牲环保、分配不公等现象,使能源转型与德国一向追求的有序、高效和准确相去甚远,与经济、生态和环保的初衷背道而驰。

德国发展可再生能源也存在诸多矛盾和问题^[8]。以风力发电为例,风电存在输电成本较高、高压输电走廊下居民意见纷纷、风力发电塔对自然景观的破坏,以及风力扇机的低频噪声对人体健康造成的潜在影响等现实问题。目前,投资可再生能源回报率低,部分企业担心能源转型带来成本增加,能源价格的不确定性正影响着投资者的决定等,这场“能源革命”能否取得胜利,德国政府还将面临严峻的

考验。

4 结语

虽然德国停止了高温气冷堆等核电技术的开发，但其核电走向，特别是能源结构的发展变化，以及核聚变技术的进展依然值得我们继续关注。也许若干年后，我国的经济状况和能源取向也会面临与德国类似的局面，应及早借鉴，从他国的实践中吸取经验。此外，德国在防止核辐射和保护方面，如核反应堆附近辐射与癌症关系及原因等研究，拥有先进的技术和经验，同样值得我们学习借鉴。■

参考文献：

- [1] 张禄庆. 话说德国球床高温气冷堆的安全教训. 中国核电信息网, (2009-08-31). http://www.heneng.net.cn/index.php?mod=news&action=show&article_id=7744.
- [2] Rainer Moormann. AVR Prototype pebble bed reactor: a safety re-evaluation of its operation and consequences

for future reactors, 2008. http://juwel.fz-juelich.de:8080/dspace/bitstream/2128/3136/1/Juel_4275_Moormann.pdf

- [3] Urban Cleve, Dortmund. Die Technik der Hochtemperaturreaktoren, (2009-04-05). http://www.buerger-fuer-technik.de/body_technik_der_hochtemperaturreaktor.html.
- [4] 田嘉夫. 高温气冷堆技术开发需要改进和创新. 中国能源报, (2010-08-04)
- [5] H. Kuni. A Cluster of Childhood Leukaemia in the Vicinity of the German Research Reactor Jülich, (1998) <http://staff-www.uni-marburg.de/~kuni/all-doc/juele.pdf>.
- [6] 丁永健. 德国弃核政策及其影响. (2011-06-30). http://blog.sina.com.cn/s/blog_72d083c701017s36.html. http://www.ce.cn/cysc/ny/hgny/201008/04/t20100804_20452392.shtml.
- [7] 德国原子能法律概况. (2012-09-12). http://blog.sina.com.cn/s/blog_aed52f3201014akd.html.
- [8] 赵川. “去核化”挑战凸显德国可再生能源计划进入抉择期. 21 世纪经济报道, (2013-07-15). <http://www.21cbh.com/2013/7-15/zNNDE3XzcyMzQzNw.html>.

The Development and Related Policies of HTR Nuclear Power Technology in Germany

WANG Jing-hua

(China Rural Technology Development Center, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, Beijing 100045)

Abstract: In the late 1980s Germany closed its two reactors of HTR. In 2011 Germany announced to abandon nuclear energy and began to implement energy transformation strategy. This paper describes the process of Germany to abandon the technology and the reason for giving up, analyzes the research priorities and trends in nuclear power technology, reviews the policies of abandonment of nuclear energy and the development of new energy. Although the development of new energy in Germany had made remarkable achievements in recent years, but it also faces a huge challenge for many practical problems.

Key words: Germany; high temperature gas cooled reactor; nuclear power; science and technology policy