

利用低温核供热的创新技术 应对减排和气候变化

田嘉夫¹, 赵兆颐², 曹栋兴²

(1. 清华大学核能技术设计研究院, 北京 100084;
2. 清华大学工程物理系, 北京 100084)

摘要: 煤炭是我国主要的能源, 也常常是供热系统负担得起费用的能源。在市内, 大量燃煤造成了严重的环境污染, 而且煤炭还是温室气体的强排放能源。为适应人口密集、建筑集中的情况, 我国已经建成和正在建设很多集中供热系统。至2005年, 全国集中供热的建筑面积达到25亿m², 消耗煤炭1.5亿t, 排放温室气体大约2.5亿t。为减轻地区环境污染以及应对减排和气候变化, 需要转变能源结构。核能替代煤炭是最有效的应对措施之一, 因为核能够满足较大规模、连续可靠地提供热能的要求。但这需要开发创新型供热反应堆, 应该比现有的供热堆设计更安全、更可靠、更经济, 而且能够在经济上与常规区域供热能源相竞争。本文介绍了为这种应用而设计的一种新型低温供热堆。

关键词: 裂变堆工程技术; 深水池供热堆; 低温核供热; 温室气体排放; 气候变化; 海水淡化
中图分类号: TL3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-2850(2008)06-0367-5

An innovative technology of the nuclear heating for reducing greenhouse gas emissions and addressing climate changes

TIAN Jiafu¹, ZHAO Zhaoyi², CAO Dongxing²

(1. *Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084;*
2. *Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084*)

Abstract: Energy of heating systems is dominated by coal, which is cheap and often the affordable option in China. The direct burning of coal in cities results in local serious pollution. Coal is carbon intensive sources emitted a mass of greenhouse gas. Many district heating systems have already been constructed or were under construction since they are most suitable for dense population and concentrated buildings. These systems supply heat for the floor area of 2 500 million m² and consume up to 150 million tons of coal as well as produce about 250 million tons of greenhouse gas in whole country by the year of 2005. Converting energy structure is needed for alleviating local pollution, reducing greenhouse gas emissions and addressing global climate change. One of the effective alternative solutions is substituting coal by nuclear energy, which is well suited to meeting the demand for continuous, reliable heating supply on a large scale. However, it is necessary to develop innovative reactor concepts which should be much more safe, reliable and economical than the existing heating reactor design. Moreover, it should be competitive economically with the conventional energy for district heating. This paper introduces a novel heating reactor design for low-temperature heat supply.

Key words: fission reactor engineering technology; deep pool reactor for district heating; low-temperature nuclear heating; greenhouse gas emissions; climate change; seawater desalination

0 引言

我国为应对气候变化采取了一系列的政策和措施, 成立了国家应对气候变化及节能减排工作领导小组, 出台了国家方案。全球气候变化是一个环境问题, 更是一个发展问题。我国是以煤炭为主要能

作者简介: 田嘉夫 (1937—), 男, 教授, 主要研究方向: 高温气冷堆及低温供热堆工程设计. E-mail: jftian@tsinghua.edu.cn

源的国家，二氧化碳排放强度相对较高，从传统能源向新能源转化是一个重大的发展问题，如今已经被提上了更紧迫的日程。

核能替代煤炭是最有效的转化措施之一。除发电外，在供热领域以核代煤所需技术简单，适合国情，是应对减排和气候变化，缓解能源和环境问题的有力措施。这项早在25年前我国就已经启动的低温核供热科学研究，如今情况如何？

在1983年，清华大学核能研究所（后改称核研院）利用一座建于上世纪60年代初的池式反应堆，对核能所的几幢楼房进行了一个冬季的供暖试验。这是我国第一次核供热试验，从当时情况看，核能供热在我国并不是遥不可及的事情。当时国家科委核安全局局长姜圣阶主持了现场会，专家们审查了放射性测试报告，一致认为用池式堆进行核供热是安全的，解决了大家最关心的放射性问题。这种具有开创性的研究，受到包括总理在内的很多中央领导的重视。他们认为采暖需要清洁能源，如研究获得成功，对国家的能源和环保都有重要意义。

今天看来，研究结论可以证明用池式堆进行低温核供热安全、经济、技术可行。建造高安全性和高可靠性的池式示范供热堆已经不存在疑问。面对节能减排和应对气候变化的严峻形势，这一研究项目可能有重要的应用价值^[1~2]。

1 低温核供热研究的由来

上世纪六、七十年代，清华大学核能所曾开展了先进核能发电的技术研究，研究中认识到有些核能应用技术难点集中，暂时在我国难以实现，但有些技术可能适用于我国的情况。低温核供热就是具有现实意义的技术之一，当时国家工业刚刚起步，城市扩展、人口密集、热负荷密度高、燃煤污染严重。与西方多数国家不同的是我国可以实施，也适于实施集中供热。有集中供热的需求，就可以发展经济的核供热能源，而低温堆本身需要的技术我国完全具备。这项研究由笔者及其研究组完成，并于1981年12月在中国中小动力堆研讨会上提出倡议。同时在核能所的支持下，向国家科委攻关局和国家计委节能局汇报了有关情况。这两个局的同志非常感兴趣，包括局长和副局长在内的多位同志几次听取了介绍。于1982年，由国家科委在沈阳召开了低温核供热选题论证会，得到了与会专家的赞成和支持。很快科委就批准了低温核供热科研立项并划拨了“六五”期间的研究经费，在后续的几个五年计划中，成为国家重点科技攻关项目。

2 低温供热堆是先进设计思想产生的新堆型

上世纪70年代末，核电在国际上已有了大规模的发展，为什么会出现一个“低温供热堆”的堆型？原因是在总结前些年的经验中，逐渐认识到反应堆必须改善自身安全，即加强所谓固有安全性能。从那时至今，出现了许多提高固有安全性的第三代和第四代核电反应堆设计。另一个原因是发生了石油危机，为发展替代能源，核能用于供热也受到关注。

由于这两个因素的推动，产生了一种新堆型——低温供热堆。由于在低温堆上很容易采用固有安全设计原则，因此能大幅降低造价，使经济供热成为可能^[3]。也就是说低温供热堆是一种提高固有安全性的先进设计原则的体现，而不是原有高温高压技术和设备的改造和简化。

清华大学核研院在上世纪60年代初建造了池式实验反应堆。本文作者都是当年参与建设的人员，其中曹栋兴教授还是主要技术负责人之一。那时，我国连一般的仪表和稍精密些的设备都没有，但在科研人员的努力下，1964年在北京就建成了2座池式反应堆，至今都已安全运行40多年。原因之一是这种反应堆安全性好、结构简单且造价低廉。1983年的供暖试验又说明它是实现低温供热最简单易行的途径。在这种技术的基础上，创造性地设计出了更安全、造价更低的深水池供热堆^[4]。这时正逢1985年国家实施专利法，于是以吕应中、田嘉夫等为发明人，为此项目申请了清华大学的国家专利，并被排在第一批发明专利的第44号。

3 对深水池供热堆进行了多年深入研究

深水池供热堆的主要特点是将反应堆堆芯放在一个开口水池的深处，利用水层的静压力提高堆芯出口水温，以满足低温供热的温度要求。从1985年发明专利开始，对这一新的核能利用的工程课题进行了全面的设计研究。完成了多种方案设计，其中包括物理热工计算、供热回路、总体结构、辅助系统、燃料装卸、厂房建筑等设计，以及设备调研、经济分析、环境影响评价、工程可行性研究、事故安全分析和专家评审论证等多项工作。至1996年，国内有5座城市曾研究试点建设深水池供热堆的可行性，其中2座城市曾批准工程立项。现在可以看出深水池供热堆在多方面体现了上述先进的设计原则，是一种既安全又低造价的反应堆，对城市供热具有突出的实用价值，详见文献 [2]、[4]。

4 深水池供热堆设计特性

深水池供热堆具有优异的安全性和经济性，其特征如图1所示。

1) 这种供热堆不需要承压和密封系统，也不需要压力壳和安全壳，只需要在地面以下建造一个大型的有不锈钢衬里的钢筋混凝土水池，反应堆安装在水池中，在常压下运行和供热，既简单又安全。与壳式堆的不同之处就是不必依靠制造高质量的“壳”来防止泄漏，它根本不产生超压，从而排除了超压引发泄漏的可能性。这是倍受国际推崇的设计方法，是一种“固有安全”的设计。

2) 反应堆水池顶部为常压，它的几十套控制传动系统都被放置在顶盖上的空间里，便于工作人员接近和检修，池内没有其它转动或移动设备，根据池式实验堆的运行经验，这种设计能够可靠地连续供热运行。

3) 深水池供热堆依靠在池外安置的循环泵实现强迫循环来冷却堆芯，在设计中采用了一些创新方法，当发生断电事故时，强迫循环会自动转换成自然循环，保证剩余发热的冷却，而且不借助控制棒动作，也能停止反应堆运行，使反应堆具有固有安全的停堆功能。

4) 深水池供热堆的主要设备都是国内成熟设备，如：带有不锈钢衬里的钢筋混凝土水池、循环泵、板式换热器以及机电驱动控制棒等。技术成熟、工程实施容易，具备投入示范建设的条件。

5) 深水池供热堆在常压下工作，它与工作在几十个大气压下的反应堆不同，设备承压级别不同、安全级别不同，因此使两种反应堆总投资相差很大，在200 MW的规模下，深水池供热堆与有压力和密封要求的反应堆相比，总投资会降至1/2甚至1/3。

6) 现有的低温供热堆都存在一个问题，就是与核电站相比，功率规模小，燃料利用率低。但在深水池供热堆的条件下，找到了提高燃料利用率的办法，使供热堆的燃料能够达到核电站的利用水平，这项研究使低温核供热成本显著降低。在北京地区，与其它燃料相比，核燃料成本大约是煤的1/3，天然气的1/10。

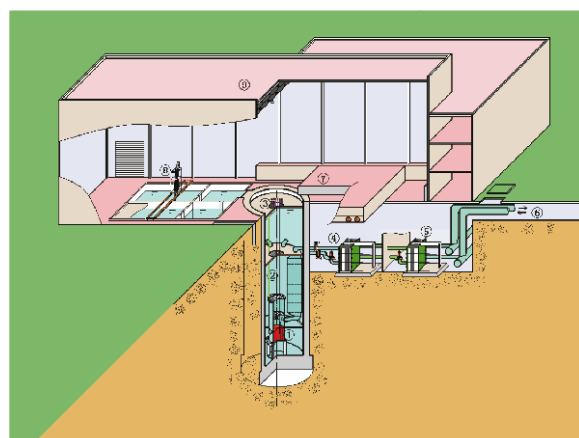


图1 深水池供热堆结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of the deep pool reactor for district heating

- ①—反应堆堆芯；②—反应堆水池；③—控制棒驱动机构；
- ④—一次热交换器；⑤—二次热交换器；⑥—供热管网；
- ⑦—可移动混凝土防护盖板；⑧—装卸料机；⑨—反应堆厂房
- ①—Reactor core；②—Reactor pool；③—Control rod drive；
- ④—Primary heat exchanger；⑤—Secondary heat exchanger；
- ⑥—Heating pipeline；⑦—Moveable concrete shield；
- ⑧—Handling machine；⑨—Reactor building

7) 反应堆水池及主要系统和设备都放置地下, 堆芯处于地下深处, 水池顶部有厚混凝土防护盖板。可预防外界发生的事故, 包括一些人为事故和地震灾害等, 甚至当地面以上建筑物受到损坏时, 反应堆地下部分也能受到保护, 由于得到了大量池水的冷却, 不会引发核泄漏事故。

8) 常压反应堆的选址条件也与有压力的反应堆不同, 世界上有很多常压实验堆就建造在人口稠密的城市市区之内或城市边界附近。这样我国建设低温供热示范堆, 在选址上有先例可循, 使这种堆型成为城市清洁能源更具现实性。

9) 一座 200 MW 供热堆, 在北方城市采暖运行, 每年可替代燃煤 16 万 t, 减少了这些燃煤的污染排放物, 其中烟尘大约 3 000 t, 二氧化硫 2 000 t, 氮氧化物 1 000 t, 灰渣 3 万 t, 以及二氧化碳 27 万 t, 能够显著地减排温室气体, 改善城市环境。

5 国内外专家对深水池供热堆的评论和意见

5.1 国内专家论证会纪要

国家核工业、核安全、城建和环保等部门的专家一致赞成我国可以首先在这样的新能源项目上做出示范和进一步推广应用。在 1996 年的一次论证会上, 会议纪要是这样评论的:

“……深水池供热堆方案是在现有研究用池式堆的基础上发展起来的。这种池式反应堆国际国内的多年运行表明, 是安全可靠的。深水池供热堆的安全性是建立在自身固有特性的基础上, 因而反应堆的结构和系统简单, 不仅安全性好, 而且投资低、经济性好, 单位能源成本也会较低。核工业总公司一直关注各类核反应堆的开发, 认为这一池式堆核供热项目技术成熟、安全性好, 有条件上项目的地区加以选用建设是合适的, 预期会得到核工业总公司的支持。……从我国环境保护的角度看, 我国环境质量总体上在一天天变坏, 化石燃料大量燃烧释放的二氧化硫、氮氧化物以及温室气体等问题已引起人们极大的关注。发展核能供热有利于我国的环境保护。深水池供热堆具有固有安全性, 其三废的来源、处理和排放在设计中都有明确的交代, 对环境影响很小, 作为安全清洁能源的结论是可信的。”

5.2 国外专家的评论和意见

加拿大建有 2 MW 池式供热试验堆, 加拿大专家曾访问我国, 认为池式堆简单安全, 赞成我国的大型池式供热堆设计。法国原子能委员会的核能专家来华参观访问, 了解了深水池供热堆的设计研究情况, 访问了深水池供热堆在辽宁阜新及天津的核供热站选址。他们在深水池供热堆设计的基础上, 完成了一个改进的方案设计, 提出希望与我们合作开发被他们称之为冷池式供热堆的新堆型。在俄罗斯奥布宁斯克国际核电安全会议后, 俄罗斯专家召开了研讨会与赵兆颐教授讨论池式堆设计问题, 他们希望用已经设计的 RUTA 池式供热堆的经验与中方一起开发深水池式供热堆。在日本东京全球环境和核能会议上, 日本核能专家认为深水池供热堆是非常安全的堆型, 完全放置地面以下的设计可以消除很多人的核恐惧心理。

6 一些城市曾批准深水池核供热示范项目工程立项

深水池供热堆曾完成北京郊区、辽宁阜新和天津等核供热工程预可行性研究。其中阜新市和天津市曾批准示范工程立项。

1988 年, 天津市派出一个技术考察小组, 由天津市建委、市科委、市供热办、市供热公司负责人及天津大学教授等组成, 考察了解国内各种低温供热堆的研究情况及听取有关核研究单位专家意见, 考察后他们选择了深水池供热堆。天津市深水池核供热工程预可行性研究完成后, 国内专家给予了很高的评价。此后又召开了国家地震局和国家核安全局专家会议, 对天津市西南区汪顶堤外的核供热站选址给予肯定。那时法国原子能委员会对深水池堆研究设计也很感兴趣, 法国专家认为池式堆非常安全, 他们的意见也说服了很多担心安全问题的中国人。特别是应法国邀请, 天津市相关人员访问了法国核工业基地, 参观了原子能委员会的 70 MW 大型池式实验堆。这座堆紧靠巴黎市区边界, 已经运行 26 年, 参观以后

大家一致认为这么大的池式堆就建在巴黎市，安全运行多年，天津市为供热建池式堆，在安全上可以放心。因此，于1995年正式批准天津深水池核供热工程立项，但后来天津项目却没有继续进行下去。

7 低温供热领域需要科技创新以应对减排和气候变化

我国能源与环境问题不容乐观，只有依靠创新才能寻得出路。从全国城市集中供热的情况来看，近些年发展速度惊人，集中供热的建筑面积从2000年的11亿 m^2 发展到2005年的25亿 m^2 。年供热量达到21亿GJ，每年大约消耗煤炭1.5亿t，排放温室气体2.5亿t。城市建筑的能源耗费和污染排放物的增长震惊世界。虽然用天然气来替换煤炭，可以缓解一些城市的大气污染，可是我国资源有限，能用天然气采暖的城市不多，也不能持续很长时间。在集中供热系统中，供应采暖基本热负荷的供水温度仅为 $90^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$ 。

国家面临的另一项重大问题就是水资源短缺，解决沿海地区缺水的办法之一是海水淡化。海水淡化耗费大量能源，会加剧能源与环境的矛盾，由核能提供清洁能源是最合理的选择。在目前各种热法淡化工艺中，低温多效蒸馏法经济性较好，并已经具有大规模生产经验，技术成熟，适合与低温供热堆耦合建设海水淡化站。这种淡化工艺要求供应的蒸汽温度不高于 72°C ，也就是说，与集中供热系统的温度要求一样，处于很低的水平^[5~6]。

集中供热和海水淡化的共同特点是耗费大量能源，但供热温度要求很低，最简单型的深水池供热堆就足以满足这两方面的要求。这种简单型供热堆造价低，可以像锅炉房那样只在采暖期运行，与其它常规能源相比有较好的经济性。当用于海水淡化时情况稍有不同，在与其它能源或膜法淡化工艺相比时，其生产成本没有明显优势。但这时供热堆是全年连续运行，便于发挥池式堆的辐照功能，供热时可生产各种合适的辐照产品。供热和辐照综合利用，不仅淡水生产成本降低，而且还能满足国内外辐照产品的需求。

综上所述，在当今国际、国内面临能源价格上涨、淡水资源短缺、生态环境恶化的形势下，研制和开发适合中国国情、技术现实、具有自主知识产权、经济可行的深水池低温核供热能源，减少对煤炭、石油、天然气的依赖，应对减排和气候变化，能够有力地支持国民经济的可持续发展。

[参考文献] (References)

- [1] TIAN J F, YANG F, ZHAO Z Y. Deep pool reactors for nuclear district heating[J]. Progress in Nuclear Energy, 1998, 33(3): 279~288.
- [2] 田嘉夫. 低温核能供热用深水池供热堆[J]. 科技导报, 1998, 11(125): 55~57.
TIAN J F. Deep pool reactors for low-temperature nuclear district heating[J]. Science & Technology Review, 1998, 11(125): 55~57. (in Chinese)
- [3] TIAN J F. Economic feasibility of heat supply from simple and safe nuclear plants[J]. Annals of Nuclear Energy, 2001(28): 1145~1150.
- [4] 田嘉夫. 常压核供热——技术现实经济可行的清洁能源[J]. 中国工程科学, 2000, 2(2): 74~76.
TIAN J F. Non-pressurized heating reactor—a realizable and economical clean energy[J]. Engineering Science, 2000, 2(2): 74~76. (in Chinese)
- [5] TIAN J F, SHI G, ZHAO Z Y, et al. Simple, safe and low-cost nuclear plants as a heat source for seawater desalination[J]. Desalination, 1999, 123(1): 15~23.
- [6] TIAN J F, SHI G, ZHAO Z Y, et al. Economic analyses of a nuclear desalination system using deep pool reactors [J]. Desalination, 1999, 123(1): 25~31.