

利用核能海水淡化初探

A PRIMARY STUDY OF NUCLEAR SEA WATER DESALINATION

赵 华 刁远清

(中山大学地环学院科技应用研究中心 广州 510275)

早在 1977 年,联合国水资源委员会就向全世界发出警告:“供水不足将成为一个深刻的社会危机,世界上在石油危机之后的下一个危机便是水的危机。”如今,世界上共有 100 多个国家缺水。我国更是被联合国列为 13 个贫水国之一。我国仅缺水城市就有 300 多个,严重缺水的 108 个。甚至连降水量较多的沿海城市,也纷纷告急。现在 14 个沿海开放城市都不同程度的缺水。虽然我国已经制订了众多节水和水资源综合利用的政策,但随着工农业的持续发展和人民生活水平的提高,水的需求只会愈来愈大,所以另辟水源就显得非常重要。陆地上可利用的淡水只占全球水量的 0.26%,这毕竟有限,而且过分利用的危害已众人皆知。因此,我们把目光投向了海洋——这个占地球总水量 97%的“大咸水库”。人们普遍认为,海水淡化是解决水资源“开源”问题的一大趋势。但海水淡化能耗颇大,需要巨大而廉价的能源,而我们的能源利用趋势——核能,就符合这一条件。因此,从两大趋势结合的必然性,就不难想象利用核能海水淡化的前景是多么广阔。目前,世界上已有 11 个核电站安装了海水淡化装置,提供饮水和核电站补水。1992 年,国际原子能研究中心表明,在核反应堆技术成熟的条件下,核能海水淡化在技术上已经不

存在障碍。我国现有和将建的核电站都设置在沿海,如果用核能进行海水淡化以解决沿海城市缺水问题,无论是位置,还是技术上都是可行的。

1 核能利用的可行性

1.1 国内外核能利用状况

从 1961 年,美国建成第一个商用压水堆核电站——杨基核电站起,核能开始广泛地应用于大型商业核电站以生产电力,且增长迅猛。据日本原子能产业协会统计,截止 1998 年底,全世界 34 个国家和地区共建有核电站 422 座,总装机容量为 35.85×10^7 kW。核电站高速发展的主要原因是其发电成本比燃油电站以及燃煤电站低很多,大约低 20%~50%^[1]。统计表明,1985 年,法国、比利时、荷兰、意大利、西德和英国的核电成本比煤电成本分别低 41.4%, 34.7%, 19.5%, 25.1%, 36.4%和 23%~38%。1994 年底,法国的核电已经占全国总发电量的 75%。许多国家和地区的实践证明,核电已成为比火电更加安全、清洁、经济的工业能源。

我国现已建成秦山 30×10^4 kW 和大亚湾 $2 \times 90 \times 10^4$ kW 两座核电站(未计入台湾省),秦山二期 $2 \times 60 \times 10^4$ kW 核电站、岭澳一期 $2 \times 100 \times 10^4$ kW 核电站和田湾一期 $2 \times 100 \times 10^4$ kW 核电站正在加

紧建设。估计到 2010 年,我国核电装机容量将达到 2×10^7 kW。1999 年,我国核能发电 1.52×10^8 kWh,占全国电力生产量的 1.23%。待到 2020 年,核电在全国总发电量比重提高到 5%之后,我国的核电将进入快速发展时期。大多数能源专家都认为我国能源结构在 21 世纪由化石能源为主向核能为主的转化势在必行,且难以推迟。他们预测,到 2040 年,核电在全国总发电量中的比重将超过 50%。

1.2 核能利用的必要性和安全性

1995 年,我国已成为石油净进口国,今后,我国 1/3 的石油供给都要依靠进口。这样,不管是从远期还是近期预测,石油这种不可再生资源不能成为我国的重要能源。煤炭资源虽然丰富,在理想条件下,可够开采 300 a,但年耗煤量在 2020 年达到 30×10^8 t 后,供给再难以大量增加,甚至会下降,缺口 5×10^8 t 之多。而燃煤所带来的

第一作者:赵华,出生于 1976 年,硕士研究生,广州中山大学地理系人文地理专业,主要从事区域发展与土地利用等方面的研究。E-mail: zhao hua-1999@sohu.com 电话: 020 - 84113645

收稿日期:2001-02-14;

修回日期:2001-06-28



环境进一步污染和运煤所加剧的交通运输紧张,是无法容忍的。因此,以煤炭作为我国主要能源的格局是应当改变的。尽管我们今后要大力开发水电,但2010年,我国水能达到总耗能的10%左右,约 2×10^8 kW,就已基本开发完毕。所以,我们只能求助于新能源。而核能就是很理想的一种,具备能量大、易控制、运行成本低、受外界影响小等优点,是公认的未来能源。

但有人担心核电站发生事故时的安全性,因为核能是唯一可能造成巨大事故性污染的一种能源。事实上,由于具备完善的工艺和冗余技术以及监测报警系统,核电站的事故率比任何电站都低。美国核管理委员会副科学顾问赫·波特,曾对核能、煤炭、石油、天然气、水力、风力、太阳能在内的11种能源的危险性作了系统比较。结果表明,除了天然气外,核能是最安全的。只是由于人们观念上的“不接受”和一些舆论的刻意宣传,导致了对核电站的担忧和恐慌。例如:烧煤电站由于煤中含有镭而释放出比核电站高100倍的放射性,但人们却置之不理。

2 海水淡化的可行性

2.1 海水淡化是趋势

人类进行海水淡化已经有100余年历史,淡化技术日臻成熟。不少国家已建成日产 10^4 m³淡水的大型淡化装置,甚至美国正在研制日产 3×10^6 m³的淡化器。现在全世界每天淡化海水能力约 2.3×10^7 m³,并以10%~30%的年增长率攀升。海水淡化是海水利用的重点,预计到21世纪中叶,全世界使用的水资源中1/5以上来自海洋。

据我国水利部门预测,20世纪末,全国总需水量(中等干旱年)将增加到 7.1×10^{11} t,缺口 2.1×10^{11} t。目前,

全国自来水供水能力只能保证高峰期需水量的80%,日平均缺水 1×10^7 t^[2]。由于缺水,深圳1991年影响产值 50×10^8 元,大连1990年减少产值 20×10^8 元,烟台 10×10^8 元^[3]。缺水问题已经成为大部分沿海城市影响经济持续稳定增长的突出矛盾。虽然,节水、提高水利用率和防治水污染以及废污水处理回用,都是一些积极的措施,但新增水源则是一个更有效的途径,且意义重大。区域外调水是我们通常的办法。但美国有资料认为,远程调水超过40 km,成本就超过了海水淡化。因此,许多沿海城市已经开始重视海水淡化。而且海水淡化作为朝阳产业,各国竞相开发竞争。如今,世界海水淡化市场年成交额已达数十亿美元。目前,我国天津市已初步形成海水淡化产业,且正要筹建一家海水淡化股份公司,作为这个行业的龙头。由于市场激烈的竞争和通过国际招标,采用“Boo”或“Boot”形式的合同,海水淡化水的销售价达到了0.67美元/m³的最低纪录^[4]。

2.2 我国的海水淡化

我国海域辽阔,共 72.2×10^4 km²,海岸线总长 3.2×10^4 km,沿海14个开放城市都有不同程度的缺水。为了弥补供水缺口,大部分采取了域外调水和开采地下水的办法。这不仅受现有淡水资源的限制,而且还会对原有水系和生态环境产生不良影响,如滦河的干涸,上海地面下陷、海水入侵,胶东沿海土地的盐碱化等。若能大规模进行海水淡化,则对沿海城市的经济可持续发展提供保证。我国从50年代就开始了海水淡化研究。国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所现已完成了我国最大的岛屿用海水淡化工程——大连市长海县大长岛1000 t/d反渗透海水淡化

项目。早在1986年,天津大港电厂就引进了3000 t/d闪蒸海水淡化设备。1998年,该厂完全运用国内技术和设备,完成了1200 t/d多级闪蒸海水淡化设备的安装与运行。

1997年,浙江嵊山建立了500 m³/d的反渗透淡化示范工程,产水耗电量5.5 kWh/m³,工程技术经济指标达到国际先进水平^[4]。

2.3 多级闪急蒸馏海水淡化技术

海水淡化,用数字说明,即将盐度为35左右的海水淡化为盐度为0.5左右的自来水。实际中运用较多的海水淡化技术有多效蒸馏法、多级闪急蒸馏法、电渗析法和反渗透法。其中多级闪急蒸馏法是最宜大型化,且与原子能发电相结合进行大型装置开发的海水淡化技术。

闪急蒸馏,是先使海水在管中加热,然后引至一个压力较低的设备中,海水便急速汽化(此即“闪急”名称的由来),蒸汽迅速地离开热的海水,结果使沉淀留于液体中,而不附着于任何换热面上。而多级闪急蒸馏(简称MSF),即在多个蒸馏室依次对海水进行处理。其优点在于加热和淡化过程在不同部位进行,这就大大减轻了锅垢的危害。多级闪急蒸馏法虽然1975年才出现,但发展迅速,一跃成为最主要的大规模海水淡化方法。目前,全世界海水淡化产量的70%出于此技术。现今世界上最大MSF工厂为JawelahB,日产淡水 3.3×10^5 m³^[5]。且多级闪急蒸馏淡化成本随级数的增加而下降,因为随规模扩大,能量利用率可提高,均耗下降。美国盐水局曾在70年代中期对多级闪急蒸馏法的造水价格作过设计计算的比较,发现 23.7×10^4 t/d $\times 4$ 套的大型淡化设备的淡化成本是9500 t/d的1/4。如能与原子能发电结合,则日产淡



水 1×10^6 m 的大型方案也可实现,且更经济。

3 核能用于海水淡化的可行性

3.1 核能用于海水淡化的必然性

海水淡化的理论能耗为 1.41 k Wh/t , 但实际生产中能耗都大于 10 k Wh/t , 如 MSF 的能耗为 15.32 k Wh/t 。大规模海水淡化将消耗为数惊人的能量, 需要巨大而廉价的能源(能耗占淡化成本的一半), 这是常规燃料难以供应的。因此, 人们早就开始考虑结合原子能发电进行海水淡化问题。1956 年, 美国盐水局即组织力量研究这个问题。英、法、前苏联也相继开展了原子能海水淡化的研究。1976 年, 前苏联建在里海东岸舍甫琴柯市的日产淡水 $12 \times 10^4 \text{ t}$ 原子能海水淡化厂宣布投产, 并在 1980 年, 又增加了日产 $9 \times 10^4 \text{ t}$ 淡水的设备。在阿根廷、韩国、俄罗斯、印度、日本的中小型热核反应堆(75 MW 至 500 MW) 均被提议作为海水淡化的能源, 其中日本的 LMFR 型 50 MW 反应堆, 被称为 4S(Super、Safe、Small and Simple), 采用反渗透法可产水 $7 \times 10^7 \text{ t/a}^{[10]}$ 。印度在 Kalpakam 的 Madras 核电站旁建一个淡化厂, 采用多级闪蒸和反渗透技术, 产水 6300 t/d , 预计 2001 年投产使用。我国核能科学家也十分重视海水淡化。1996 年, 清华大学核研院与摩洛哥有关机构共同开展了海水淡化项目可行性研究工作。1999 年 10 月, 10 MW 核能海水淡化示范厂可行性研究已完成, 正在摩洛哥进行建厂的前期准备工作, 采用多效蒸发(MED), 预计日产水量 8000 m^3 。

3.2 核能海水淡化的成本

1998 年, 国际原子能机构(The International Atomic Energy Agency)对核能海水淡化进行了一项综合

对比研究, 并自行开发了一套命名为 Deep 的软件对各种方法的海水淡化进行测算。试验对象分为不同的三个区域, 在第二区南亚、红海、北非及第三区阿拉伯湾地区的研究发现, 多级闪蒸的基本单位成本(Basic Unit Cost)为 1800 美元/(t/d) , 水厂的合理规模在 $60000 \sim 480000 \text{ t/d}$ 。而且还测算出核能海水淡化产水成本是在一个等级上的^[11]。目前, 国内现有的条件下, 不同工艺、不同规模的海水淡化产水成本为 $6.20 \sim 9.80 \text{ 元/t}$ 。国外海水淡化成本在 $1.20 \sim 2.50 \text{ 美元/t}^{[16]}$ 。成本过高是海水淡化的最大问题。而降低成本很好的一种办法就是扩大规模。若能海水综合利用, 即原子能发电、废热用于海水淡化, 再从淡化排出的浓海水中分离提取各种物质, 则经济效益很可观。美国橡树岭国家实验室原子能委员会, 对以核能发电和大型多级闪蒸海水淡化双重目的的工厂为中心的工业联合企业, 进行过深入的研究, 提出了一个海水综合利用规划。认为最理想的方案是: 建立包括 $1 \times 10^6 \text{ kW}$ 的核能发电厂、日产 $5 \times 10^5 \text{ t}$ 淡水的水淡化厂、2000 t 氮肥厂、360 t 的磷肥厂和年产 $1.9 \times 10^6 \text{ t}$ 的盐厂、5000 t 的溴厂、 $6 \times 10^5 \text{ t}$ 的镁厂、 $4.5 \times 10^4 \text{ t}$ 钾厂的联合企业。因为海水淡化后排出的废浓海水, 含盐量是海水的 2 倍以上。对于一个日产淡水 $1 \times 10^5 \text{ t}$ 的工厂, 每日排出的浓海水中的盐量约为 6000 t, 如果作为副产品提取, 就可使淡化成本下降 20%^[7]。

3.3 核能海水淡化的可持续性

海水中铀的含量虽只有 $3.3 \times 10^{-6} \text{ g/L}$, 但总量却有 40 多亿 t。现在海水提铀, 已进入中间生产阶段。日本仁尾中试厂 1986 年生产了 3.6 t 含铀 0.28% 的黄色液体, 再

经固化工序就可做核电站的燃料^[8]。展望未来, 海水提铀来补充核电站的燃料将成为核电持续利用的可靠保证。这样海水提铀用于核电站运行, 以电力作为海水淡化的能量, 来制取淡水, 同时海水淡化后的浓盐水可以作为提溴和制盐的原料, 也可以进一步提取钾、镁、锂、碘和重水, 环环相扣, 从而形成物资高效利用的生态工业。在工艺、设备、控制、经济性以及环保等方面, 许多专家都对原子能与淡化联合作出了肯定的结论。据悉, 我国科学家已在海水淡化工艺流程上取得突破性进展, 运用多效多级蒸馏技术, 造水比达到目前的 2 倍以上, 淡化成本可降到 1 元/t。此方案正在核工业第二设计院进行论证^[9]。如果可行, 则对我国的海水淡化产生巨大而深远的影响。

4 结语

现在许多沿海城市都有为保证市民必要的生活用水而放弃大耗水量工业或命令其停产的惨痛教训, 影响了经济的发展。据预测, 到 2010 年我国将进入严重缺水期, 发展大规模、低成本的海水淡化技术成为当务之急。由于我国沿海城市经济发达, 人口众多, 需水量大, 核能海水淡化形成规模是可行的, 规模大就可以降低产水成本。如果政府在水价上适当给予补贴, 带来经济的持续发展和人民生活的安逸, 其社会效益是不可估量的。相信若国家能在政策上重点扶持、鼓励、倾斜, 加大科技资金投入, 淡化成本会降到一个合理的程度, 核能海水淡化也将成为一个永久造福人类的技术。

参考文献

- 1 王庆一. 中国能源. 北京: 冶金工业出版社, 1988. 263 ~ 269
- 2 何希吾、姚建华等. 中国资源态势与开发方略. 武汉: 湖北科学技术出



- 版社,1997。68 ~ 293
- 3 中国自然资源丛书编辑委员会。中国自然资源丛书——水资源卷。北京:中国环境科学出版社,1995。352 ~ 379
- 4 林斯清、张维润。海水淡化的现状与未来,水处理技术,2000,**26**(1): 7 ~ 12
- 5 高从阶。膜技术与相关海洋产业,海洋通报,1997,**6**(4):44 ~ 45
- 6 安平。推广海水淡化技术前景良好,海洋信息,1999,4:13 ~ 14
- 7 王俊鹤、李鸿瑞、周迪颐等。海水淡化。北京:科技出版社,1978。220 ~ 233
- 8 国家海洋局技术研究所编。1987 海洋开发技术进展。北京:海洋出版社,1988。288 ~ 289
- 9 李斌。我国科学家提出海水淡化新构思。科技日报,2000-10-10(6)
- 10 Mnato A. . A challenge to global environmental issues by small reactor nuclear desalination and prevention of desertification, *Progress in Nuclear Energy*, 2000, **37**(1 ~ 4): 247 ~ 252
- 11 Gowin peter J. . Nuclear seawater desalination - IAEA activities and economic evaluation for southern Europe, *Desertification*, 1999, **126**(1 ~ 3): 301 ~ 307
- (本文编辑:李本川)