

## 核能海水淡化技术：经验、需要和前景

### 示范工厂和近期研究项目综述

A. Barak、L. A. Kochetkov、M. J. Crijns 和 M. Khalid

到 2050 年，预计全世界的人口将达到 110 亿。人口的不断增长，将给水资源造成愈来愈大的压力。居民生活、农业和工业都需要大量的水，在目前供水已经不足的发展中国家更是如此。石油生产国的水需求尤为急迫，这里为促使经济进一步工业化仍在进行大量的投资和艰苦的工作。但是，种种预测表明，到 2000 年，地中海地区每天将短缺大约 1000 万立方米的淡水。

相对而言，不经处理就可利用的水仅占世界水资源的很小一部分。一般说来，盐度低于 500 ppm 的地表水可以用作饮用水。对于某些农作物来说，灌溉用水的盐度可为 500 - 1000 ppm。可得到的其它水——例如稍咸水（盐度高于 1000 ppm 的地下水、地表水或废水）和海水——不经处理是不能利用的。幸运的是，现在已有了一些可用来脱除水中盐分使其可被利用的处理工艺。处理的对象包括海水，后者实际上是一个用之不竭的水源。

已经开发出的海水淡化工艺有许多种，但最有希望的是低温卧管多效淡化法（LT-HTMED）、蒸汽压缩法（VC）和反渗透法（RO）。

今天，人们正在建造一些比较大型的淡化工厂，它们要消耗大量的热，从而提出了如何获得可靠、连续供应的热源问题。现在，海水淡化所用的能源主要是石油。但是，石油价格愈来愈高，淡化工厂的规模愈来愈大，能源密集程度愈来愈高。这种情况正在促

使人们寻求其它的能源。把核动力厂与海水淡化工艺相结合，是人们长期以来经常考虑的方案之一。这样一些“两用”企业，既能提供电力以满足能源需求，又能提供热能以帮助淡化大量的海水。

尽管世界各地已有许多常规的海水淡化工厂投入运行，但核能海水淡化方面的经验却很少，只有苏联

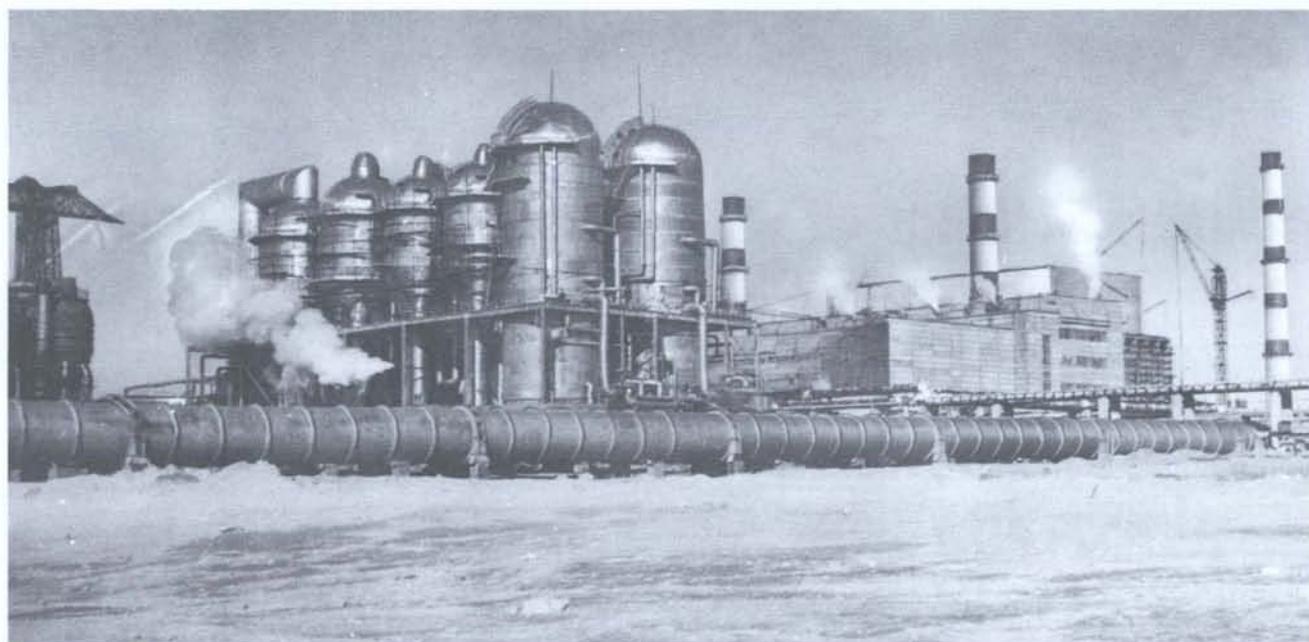
### 技术研究和报告

60 年代以来，IAEA 一直在研究核能海水淡化的可行性。在 IAEA 1989 年大会通过了一项决议之后，成员国最近对此项技术的兴趣重新增加。这项由阿拉伯国家提议的决议，强调了一国范围和地区范围缺水的现实，指出了对饮用水的需求日益增加，并特别要求机构就核能海水淡化的发展及其潜在作用准备一份报告，以利于机构目前对这些问题的讨论。目前正在编写一份技术研究报告，并将提交给 1990 年 9 月举行的 IAEA 大会。

IAEA 先前已经发行了一些有关此项技术的技术性出版物。它们包括：

- 《使用常规能源和核能淡化海水》（*Desalination of Water Using Conventional and Nuclear Energy*），技术报告系列 No. 24（1964 年）。
- 《估算核能海水淡化工厂淡水成本指南》（*Guide to the Costing of Water from Nuclear Desalination Plants*），技术报告系列 No. 80（1967 年和 1973 年）。
- 《利用核反应堆的热淡化海水》（*Heat Utilization from Nuclear Reactors for Desalting of Sea Water*），IAEA-TECDOC-206（1978 年）。

Barak 先生是以色列原子能委员会官员，Kochetkov 先生供职于苏联动力工程研究和研究所。Crijns 和 Khalid 先生是 IAEA 核动力处职员。



苏联的舍甫琴柯核动力厂。

进行了示范。另外，在过去几十年中，已在一国范围和国际范围内，对核能海水淡化的技术可行性进行了研究，其中包括通过国际原子能机构（IAEA）所作的工作。（见上页附框。）

本文评述苏联的核能海水淡化经验，美国和以色列的一个合作项目，以及美国、日本和德意志联邦共和国最近完成的研究工作。

#### 苏联的经验

在舍甫琴柯市，已经建立了一个大型的多用途核动力联合企业。它向该市的居民和工业企业供应水、电和热能。该联合企业包括 1 座 BN-350 快中子增殖堆（FBR）、3 座热电站、1 座带有热蒸馏设备的海水淡化工厂，以及用脱盐的海水生产饮用水的若干装置。<sup>\*</sup> 该企业已对不同的海水淡化工艺进行了研究，做了一些开发工作，如多效立管蒸发（VTE）、多级闪蒸（MSF）、电渗析和离子交换等。

FBR 被选作该联合企业的主要能源之一。在同一厂址上还建有以天然气为燃料的另一个能源设施。这两个能源设施共用一个汽轮机大厅和一套统一的给水处理系统，这后一点是特别重要的。

从它的水系统来看，这个联合企业是非常复杂的。产生的蒸汽用于发电、海水淡化和满足各种工业需要。馏出液用于生产饮用水、工业用水和供暖用

水，并且用来补偿不可回收的给水损失。

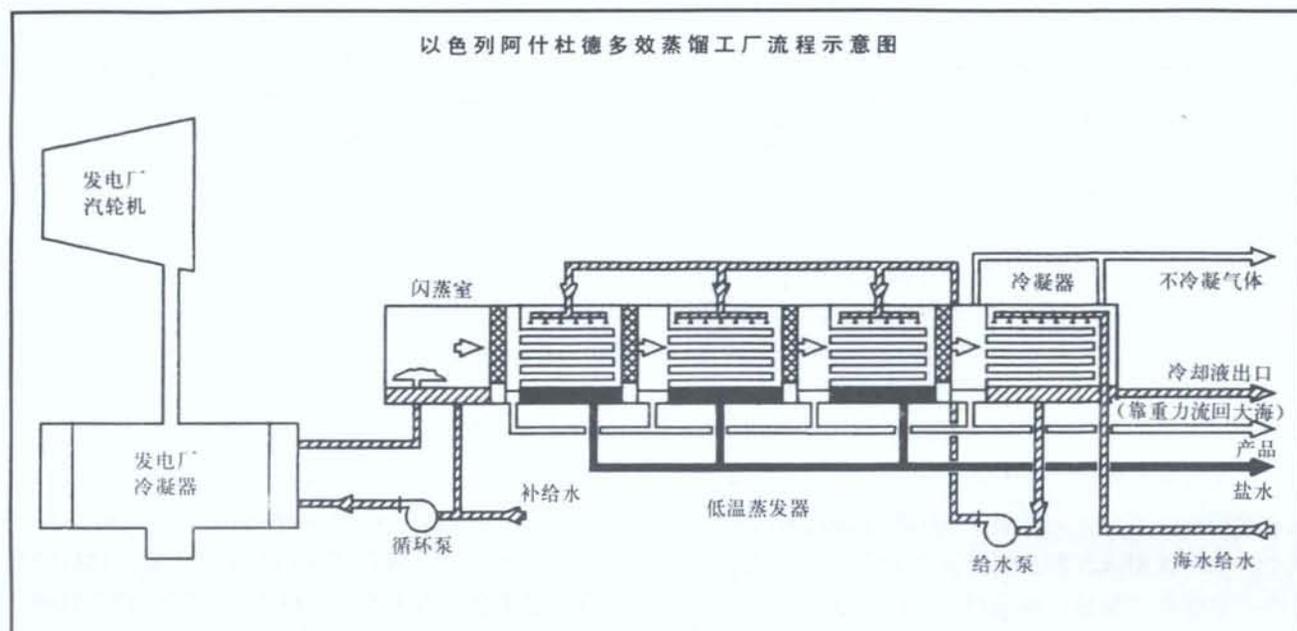
这座核反应堆、发电厂和一些淡化装置，构成了一个具有许多明显优点、设备互补的高技术的联合企业。

由于有了这些能利用低温低压热的设施，即淡化装置，人们便能够使不同季节里的抽热量保持稳定。在冬季，这个联合企业以集中供热厂的身份运行；而在夏季，大部分热力用于海水淡化。这种非常恒定的抽热量，意味着电力生产的比热耗较低。

这些向发电厂和反应堆提供高纯淡水的海水淡化设施，对于降低蒸汽发生器给水处理所需的基建费用和运行费用，是非常有用的。这是热水及热力供应系统方面一个特别宝贵的特点，因为它使得无水垢锅炉运行成为可能，并且能减少生产单位质量馏出液所需

<sup>\*</sup> 有关这一节的技术参考文献（俄文）包括：“Survey of fast reactor development in the USSR”, by L. A. Kochetkov and Yu. E. Bagdasarov, proceedings of a symposium in Bologna, IAEA, Vienna (1978); “Ten years of BN-350 operation”, by D. C. Yurchenko et al., *Atomnaya ehnergiya* 55 (1983); “Main results obtained in operating nuclear pilot plants equipped with the BN-350 and BN-600 reactors”, by L. A. Kochetkov, proceedings of a symposium in Lyon, IAEA, Vienna (1986); and “Water chemistry in a power plant using a fast reactor”, by R. N. Musikhin et al., *Atomnaya ehnergiya* 55 (1983).

以色列阿什杜德多效蒸馏工厂流程示意图



的热量（热的馏出液被泵送到供热系统）。

此外，由于能获得的淡化水数量很大，因此可以向当地工业企业输送一部分淡化水，以满足其生产过程的需要。这就可使当地企业不必建造自己专用的小型海水淡化设施。蒸汽用户也无须把蒸汽冷凝液返回核反应堆发电厂系统。

BN-350 FBR 及有关的蒸汽发生器，于 1973 年投入运行。在苏联，这是第一座为了同时进行试验、实验和工业应用而设计的大型多用途 FBR。这座 150 兆瓦电 (MWe) 的反应堆每天能够生产 12 万立方米的馏出液。它一投入运行，就成了所在地区馏出液的主要来源，其产量约占该地区总产量的 80%。它发出的电力最多达到该地区全部发电量的 25%。这样，BN-350 FBR 从一开始就担起了维持该地区的正常生活条件和工业生产条件的重任。

整个联合企业的运行稳定性，取决于许多因素，特别是反应堆设备和相关的蒸汽发生器的可靠性。起初，蒸汽发生器成了该厂的唯一薄弱环节。在起动后的头 6 个月中，6 台蒸汽发生器有 5 台出过故障。关于引起故障的原因和所进行的修理工作，已写了份相当详尽的报告。工厂在加工管系端头过程中所犯的的错误和（端件与管件的）焊接不合格，是水向蒸汽发生器钠侧渗漏的原因。修理是在不运走蒸汽发生器的情况下在原地进行的，于 1975 年完成。

反应堆系统运行不稳定的另一个原因，是大量燃

料元件破损。这是由于燃料和包壳之间用于积存气态裂变碎片的补偿空间过小引起的。因为空间过小，使包壳内气体压力升高，应力增大，最后导致包壳破损。设计上所作的一些改进有效地保证了燃料元件的完整性，并使燃耗超过了设计值。蒸汽发生器最终也能稳定地运行，尽管反应堆的起始功率曾不得不从 1000 兆瓦热 (MWt) 降低到 750 MWt。

起初，设计人员和操作人员曾在这座反应堆的水系统方面遇到过许多困难。来自淡化装置的给水曾被腐蚀产物污染过，在事故工况下也曾被海水中的盐污染过。因此，曾在装有机件过滤器和混合床过滤器的燃气设施中，对给水进行附加的化学净化。尽管如此，在初始阶段，馏出液质量和给水质量都不令人满意。对这座海水淡化厂作过许多改进，并且为了净化流经 BN-350 蒸汽发生器的馏出液，安装了一个新的化学淡化设施。

为了找到热淡化设施的最优技术设计方案，曾就若干工艺参数作过一些实验研究。

为了防止设备结垢，曾将完全是由苏联开发的籽晶法用于所有这些淡化设施。这种籽晶（一种磨得很细的天然白垩）是在起动过程中通过一个注入口引入水系统的，然后用一个澄清装置（澄清槽）和一台离心泵使其循环。

这种通过循环白垩籽晶限制结垢的方法，曾保证十效立管蒸发设施中的蒸发器连续无垢运行了 1 年。

在不同的蒸发器中，加热表面的水垢线性生长率是不同的：第1蒸发器为0.6-0.8毫米/年(mm/a)；第2蒸发器为0.3-0.4 mm/a；第3蒸发器为0.2-0.3 mm/a；第4蒸发器为0.1-0.2 mm/a；其余蒸发器为0.05 mm/a。这个十效设施可产出很高质量的馏出液。

从这些热淡化设施得到的馏出液，随后被转化成符合苏联国家标准(GOST 2874-82)要求的饮用水。对于这个十效设施来说，馏出液的生产成本约为50戈比/m<sup>3</sup>。

这样，舍甫琴柯市在提供高质量水方面，已取得了极为丰富和宝贵的技术资料与实际经验。如果这里积累的经验能被广泛地用于未来的海水淡化系统和生产“人工”饮用水，那么在世界上象哈萨克斯坦这样一些干旱或半干旱地区创造舒适生活条件的问题，就能成功地而且迅速地得到解决。

#### 以色列的经验：以-美联合项目

80年代初期，以色列和美国开始为称作LT-HTMED的海水淡化工艺合作研制大型模块。在以色列的阿什杜德，建造了一座专门设计能与轻水堆(LWR)相连的海水淡化厂。

选择LT-HTMED的蒸发级数量和规模时，考虑了既能利用核动力厂的废热又无须对核蒸汽汽轮机做很花钱的复杂改动。在研制阶段，利用常规电厂向蒸发器供热，用它的供热系统模拟两用核动力厂中已设计好的连接部分。为此，使用了一个压力逆垒，以防止从LWR的蒸汽回路向淡化厂的可能泄漏。当时的做法是让汽轮机的乏汽在约65℃条件下在壳管式冷凝器中冷凝。利用溶解固体总含量为5.7%的浓缩海水作为循环冷却水(进口温度为55.5℃，出口温度为62℃)。这部分冷却水被送入蒸发器，靠部分地闪蒸成蒸汽而释热。冷凝器中冷却水的压力高于被冷凝蒸汽的压力，这样，一旦发生泄漏，蒸汽也不会渗入淡化系统。对此类蒸发器来说，该淡化厂的规模已大得不能再大。一座大型核动力厂需并联安装若干个这样的模块。

这个生产能力为725 m<sup>3</sup>/h的LT-HTMED蒸发器，1982年曾与50 MW燃油发电机组联机，后者每小时提供约120吨蒸汽。该淡化厂1983年开始运行，经过短时间的调试后成功地运行了一年。该厂在取得足够的运行数据后，因石油价格太高而停运。

这座淡化厂在控制、运行稳定性、起动和停运方面，或负荷跟踪和从“两用状态”改为“单一发电状态”方面，都没有碰到什么操作问题。在各种条件下，该厂都能稳定运行。起动时间，即从冷态及空蒸发器处于大气压下到正常运行所需的时间，为3-3.5小时。短时间故障停车后(只要仍保持真空状态)的起动时间为30分钟。让发电机组慢慢冷却的停车时间约为20分钟。从一种“状态”变为另一种“状态”比较简单(反之亦然)，约需15分钟。在额定产量35%和110%之间的负荷跟踪验证获得成功，没有出现任何问题。

该淡化厂即使在停车数月之后也能重新起动。为了向参观者表演，还时不时地运行几小时。1986年，因严重干旱，该厂连续运行了3个月。运行的第一年，意外停车时间共计749小时，计划停车时间共计2665小时。预计，在正常情况下淡化厂-汽轮机合在一起的可利用率至少为88%。

一开始，生产出的水的质量虽然是合格的(280 ppm)，但比设计值差一些。后来，在额定负载条件下，生产出的水的盐度减少到40-80 ppm。淡化水产量一直超出该厂设计值，但受海水温度的影响。若海水温度超过设计值4℃以上，则淡水产量将降到设计值的92%。

阿什杜德淡化厂雇用了14人。一般淡化厂所需人员会少些，因为在阿什杜德厂必须进行包括数据采集在内的许多“开创性”活动。

发电机组的冷凝器比单一目的运行条件下清洁。在较“热”的一些级中，水垢形成速度很慢(1年后水垢厚度为0.1 mm)；在较冷的一些级中，则没有看到水垢，也没有发现腐蚀现象。

#### 近期的研究

南加利福尼亚的研究。美一家自来水公司(南加利福尼亚大城市地区供水公司)和美能源部(US DOE)一起开展过一项研究，以评价利用核热淡化海水的技术与经济生存力。1988年12月，通用原子公司发表了最后报告。\* 在此项研究中，选择模块式高温气冷堆(MHTGR)作为热源，LT-HTMED作为淡化工艺。

\* MHTGR Desalination for Southern California, GA-A 19476, General Atomics Co., San Diego, CA (December 1988).

之所以选用 MHTGR, 是因为它规模较小, 又是模块式结构, 比目前的水冷堆更适合于海水淡化这种用途, 而且, 当反应堆处于两用状态时, 对电力生产的影响要小些。此外, 由于它的非能动安全特性和单机规模较小, 因此可以建在供水系统附近。

在海水淡化工艺方面, 对一些经过商业示范的淡化工艺, 例如多级闪蒸 (MSF), 立管蒸发 (VTE) 和 LT-HTMED 做过比较。

被研究的这个系统包括 4 个 350 MWt 的反应堆模块、2 套 273 MWe 的蒸汽轮机能量转换系统和 8 套水产量各为 50 000 米<sup>3</sup>/日 (m<sup>3</sup>/d) 的 LT-HTMED 装置。该厂电力净输出功率约为 460 MWe, 水的净产量约为 400 000 m<sup>3</sup>/d。时间归一的水成本在 0.44 到 0.49 美元/m<sup>3</sup> 之间 (随所用的假定条件变化)。

**西德的研究。** 德意志联邦共和国的霍瓦尔茨韦克德国造船公司和国际原子反应堆建造公司, 最近对在平底船上建造给反渗透法 (RO) 海水淡化供热的 MHTGR 一事, 进行了技术经济可行性研究。\* MHTGR 为一种氦冷球形反应堆, 可提供 400 MWt (2 个模块) 到 1600 MWt (8 个模块) 的功率。

该项研究涉及一座由 2 个模块组成的两用动力厂。该厂能生产 152 MWe 电力和 100 000 m<sup>3</sup>/d 的淡化水, 水的盐度为 450 ppm (溶解固体总含量)。该厂本身的电力消耗仅为 30 MWe, 其余的 122 MWe 可售给其他电力用户。

此项研究是根据阿拉伯湾海水的盐度进行的。海水先在冷凝器中预热到 38℃, 再经预处理, 然后注入 RO 工艺的第一级。(第一级有 45 列, 每列各 40 个 RO 模件。) 经过第一级之后, 水的盐度降低到 1470 ppm。然后再将水注入第二级。这一级有 9 列, 每列 60 个 RO 模件。第二级生产的水盐度为 190 ppm。第二级生产的水中要掺入一些第一级的水, 使水的最终盐度保持 450 ppm。预处理所用化学品总消耗量每年约 5 500 t; 为清洗两个 RO 级 (每年 4-6 次), 另外还需 250 t 化学品。

饮用水的生产成本取决于所选取的电力/饮用水比。当以发电为主 (只在用电低谷期间生产饮用

水) 时, 饮用水的生产成本为 3.81 - 4.69 西德马克/m<sup>3</sup>。计算时假设运行时间为 8 000 h/a。

**日本的研究。** 日本电力工业中心研究所 (CRIEPI) 已开始进行一项有助于防止沙漠化的研究。\* 这项研究的成果也可用于从海水大规模生产饮用水。

该项研究涉及液态金属冷却快中子增殖堆 (LMFBR) 和 RO 海水淡化工艺的结合, 淡化水的生产速率为 30 000 m<sup>3</sup>/d。反应堆是模块式的, 热输出功率为 125 MWt, 其初步设计具有结构紧凑、安全和简单等特点, 被称为超级安全、小型和简单的 (super-safe, small and simple) “4S” 反应堆。堆芯由内装金属燃料细棒的无导管组件组成, 设计寿命为 10 年, 无需换料。

之所以选中 RO 工艺, 是因其能耗低, 运行简单, 维修量小, 起动时间短以及易于减功率运行。根据这项研究, 如不计淡化水输送泵的能耗, 则淡化水的能耗约为 4.1 kWh/m<sup>3</sup>。

### 发展中国家的需求和前景

对需求迫切而资源贫乏的发展中国家来说, 海水淡化技术和核动力技术的引进都有不少困难。这两种技术都是投资密集、复杂而尖端的, 并且主要是在规模很大时才有经济性。

因此, 需要饮用水的发展中国家, 在考虑采用大规模的海水淡化方法之前, 必须考虑其它的办法。这些办法包括: (1) 开发所有的天然水资源, 除非水的输送距离过长因而成本较高; (2) 回收尽可能多的污水, 供灌溉和其它用途使用; 以及 (3) 利用反渗透法或电渗析法将可利用的盐度比海水低的稍咸水淡化。

上述办法的费用虽比海水淡化的低, 但只能提供数量有限的水。如果需要的水量较大, 并有海水可利用, 则应从引进单用途机组起步, 逐步引进海水淡化技术。这样做可使海水淡化所需要的经验和基础设施逐步得到积累和发展, 为下一步可能采用核能海水淡化创造条件。不过, 第一套核机组应该只用来发

\* "Autarke Barge-Montierte Energiestation mit Hochtemperatur-reaktor-Module", Howaltswerke Deutsche Werft AG and Interatom GmbH (July 1985).

\* "Use of Super-Safe, Small and Simple Liquid-Metal Reactors (LMRs) to create Green Belts in Desertification Areas", by S. Hattori and N. Handa, *Trans. ANS*, Vol. 60 (1989).

电,以便发展核基础设施和积累经验。之后才可以考虑将核装置按两用设施运行。

还有两个方案也是可以考虑的。一个是用总承包合同或建造和运行(BAO)合同方式较早地建造核能淡化厂(多半还能发电)。对后一种合同来说,供应商将在一定时期内全面负责核能淡化厂的建造、运行和维修。消费者到时候支付的将是淡化水的费用,而不是建厂费用。

另一个方案是设计和建造主要用于发电的单用途核动力厂。至于以后将其转变为两用厂的问题,则只对设计提出最低限度的要求(例如厂区规划、汽轮机选择等)。虽然这要增加数百万美元的费用,但可确保该核电机组几年后需要时能与海水淡化系统相连。

#### 中东石油生产国

中东的产油国在海水淡化方面有良好的基础设施和丰富的经验。而且,它们有足够的收入可支持海水淡化事业的发展。潜在的唯一限制因素是缺少核技术方面的基础设施。

这些国家迫切需要大量的水,所以那里已有许多海水淡化厂在运行。1988年初,这些国家的海水淡化装置的生产能力约占全世界的65%( $12 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ 中的 $7.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ ),大多采用MSF和RO工艺。

预计水的需求量将随着人口的增长而增加。这些国家的人口增长率很高,每年约为2.5-5%(美国的人口增长率仅为0.17%,世界平均的人口增长率为1.7%)。在今后十年及以后,现有淡化装置中

有许多将被改进后的装置所替代。在下一个十年内,这将要求在水系统方面投资约100亿美元,在必要的能源生产系统方面另外投资数十亿美元。

海水淡化系统究竟使用哪种一次能源,这是一个重要问题。核能和石油是最具有吸引力的两种选择。

从经济观点看,石油生产国较其他国家更倾向于选择石油。当然还要考虑其它一些因素,如环境、社会和心理等方面的因素。一种方案是采用与基本负荷发电所优先采用的能源相同的能源。在海水淡化方面赞成和反对使用核能或石油的人数比例,同发电方面的情况十分相似。

#### 结论

- 1973年以来苏联舍甫琴柯市利用快增殖堆进行海水淡化的长期运行经验,证明在该地区进行核能海水淡化,在技术上和经济上都是可行性的。

- 核能海水淡化之所以比常规海水淡化方法有吸引力,是因为其燃料价格能长期地相对稳定(而化石燃料的价格在不断上涨),设备容量因子高因而经济效益好,以及环境影响很小。

- 由于各种海水淡化工艺在80年代都有了改进和发展,看来将这些先进的海水淡化工艺同核动力厂相结合不会遇到特别的技术问题。

- 美国、德意志联邦共和国和日本最近的大型研究已经证明,核能海水淡化是有技术经济潜力的,尽管对某些应用(如农业应用)来说,淡化水仍然太贵。核能海水淡化的前景难以预测,这主要是因为,最后的决定除涉及这种工艺本身的技术和经济潜力以外,还涉及许多其它因素和政府的政策。

