

SAMYANG

**SAMYANG
CORPORATION**

TRILITE
삼양 트리라이트
Reverse Osmosis

TRILITE RO

使用反渗透膜的水处理指南

(The guide book for water treatment using reverse osmosis membrane)



Samyang Water Solutions

首尔市钟路区钟路33街31 电话) 02-740-7732~7

传真) 02-740-7709 <http://samyangtrilite.com>

Samyang Water Solutions

31, Jongno 33-gil, Jongno-gu, Seoul, Korea TEL) 82-2-740-7732~7

FAX) 82-2-740-7709 <http://samyangtrilite.com>

1. 水处理（Water treatment）概要	05
1.1 水循环	05
1.2 水资源	05
1.3 原水中的杂质和处理方法	06
2. 反渗透膜（Reverse osmosis）概要	08
2.1 反渗透膜的原理	08
2.2 反渗透膜的分离对象颗粒大小	11
2.3 反渗透膜的使用方式	11
2.4 反渗透膜的分离特点	11
2.5 反渗透膜纯水装置设备	12
2.6 反渗透膜优缺点比较	15
2.7 离子交换树脂与反渗透膜比较	15
2.8 反渗透膜性能的影响因素	17
2.9 反渗透膜进水条件	23
2.10 原水预处理方法	24
3. 三养TRILITE反渗透膜产品介绍	31
3.1 产品种类和特点	31
3.2 产品阵容（Line-Up）和详细规格（Spec.）	32
3.3 三养TRILITE反渗透膜质量保证体系	36
3.4 检测报告（COA）格式	36
3.5 同等产品比较表（Cross-Reference Guide）（参考用）	37

4. 反渗透膜系统的设计	38
4.1 反渗透膜系统概要	38
4.2 设计反渗透膜系统时的推荐工作限制条件	38
4.3 各阶段的设计指南	39
4.4 反渗透膜系统设计示例	43
4.5 设计反渗透膜系统时的其他参考事项	44
5. 反渗透膜元件安装/更换	46
5.1 安装/更换前的准备事项	46
5.2 压力容器零件构成	46
5.3 压力容器零件拆卸	47
5.4 旧元件 (Element) 拆除 (更换时)	48
5.5 新元件 (Element) 装载 (Loading)	48
6. 反渗透膜系统初始启动	50
6.1 初始启动前的检查事项	50
6.2 初始启动指南	50
7. 反渗透膜系统的一般运行和维护	51
7.1 预处理系统运行	51
7.2 反渗透膜系统通常运行	51
7.3 反渗透膜系统停机	55

Contents

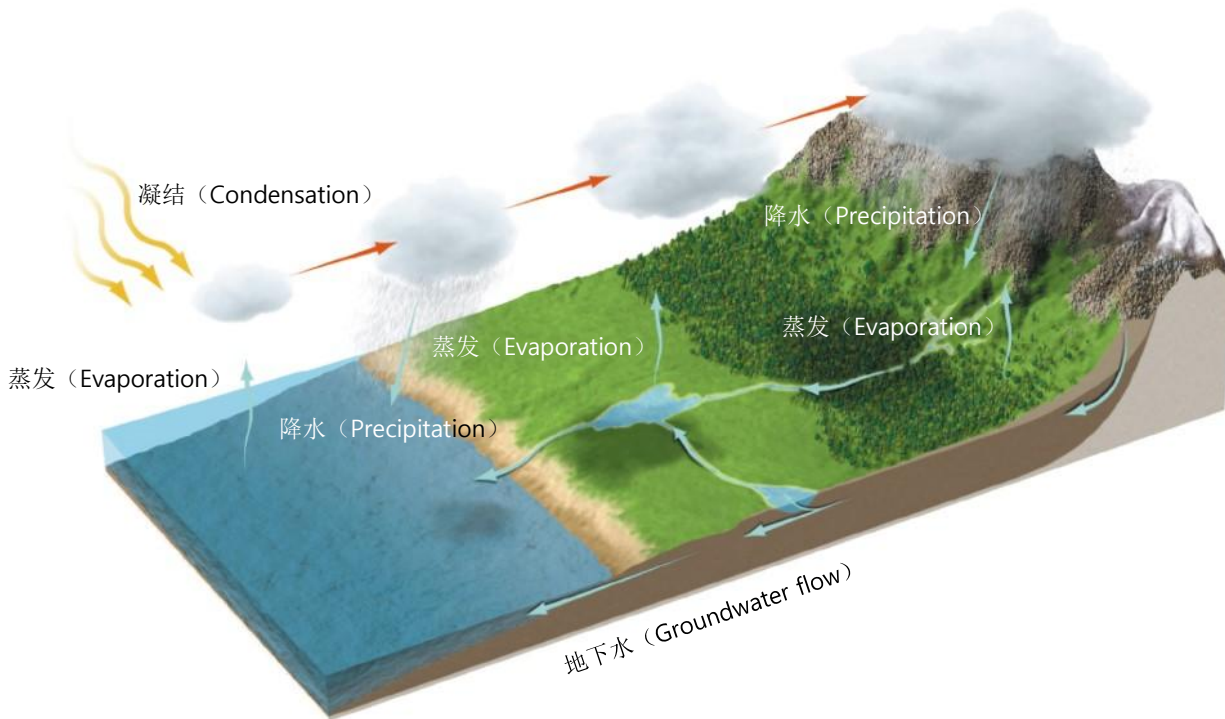
8. 化学清洗（CIP）和灭菌	56
8.1 化学清洗（CIP）概要	56
8.2 化学清洗（CIP）设备	56
8.3 实施化学清洗（CIP）前的检查事项	56
8.4 化学清洗（CIP）流程	58
8.5 其他化学清洗（CIP）相关设计标准和注意事项	59
8.6 不同污染物的症状和清洗液选择指南	61
9. 反渗透膜系统Trouble Shooting	63
9.1 反渗透膜系统故障的种类、原因和解决措施概要	63
9.2 主要故障的原因和解决措施详情	64
9.3 测量仪器校准的重要性	68
10. 不同停机时间的反渗透膜系统管理	68
10.1 反渗透膜系统的停机（Shut-down）流程	68
10.2 短期停机时反渗透膜系统的管理	68
10.3 中期停机时反渗透膜系统的管理	69
10.4 长期停机时反渗透膜系统的管理	69
11. 三养TRILITE反渗透膜操作和保管方法	69
11.1 反渗透膜操作和保管方法（使用前）	69
11.2 反渗透膜操作和保管方法（使用中）	69
11.3 反渗透膜操作和保管方法（使用后废弃）	70



1. 水处理（Water treatment）概要

1.1 水循环

如下图所示，地球上的水会不断循环，我们把水在海洋、大气和地表之间以不同形态（液态、固态、气态）连续循环的过程称为水循环（Hydrologic cycle）。

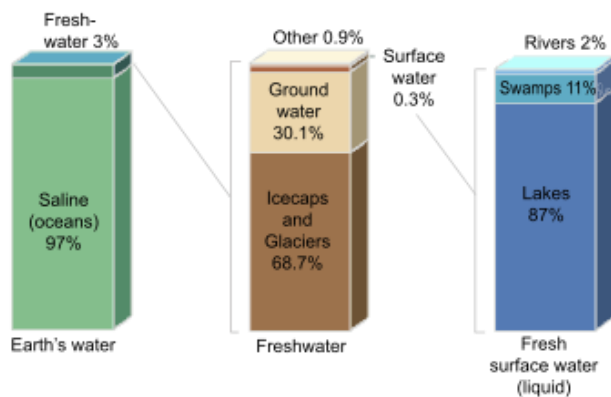


<图1-1. 水循环>

（来源：Britannica Visual Dictionary）

1.2 水资源（Water resources）

据估计，地球上大约有14亿立方千米的水，其中大部分以海水（Sea water，97~97.5%）的形式存在，只有2.5~3%以淡水（Fresh water）的形式存在。大部分的淡水（Fresh Water）都以冰川和积雪的形式存在，我们能够使用的水是河流或湖泊中的地表水，只占地球总水量的极少部分。



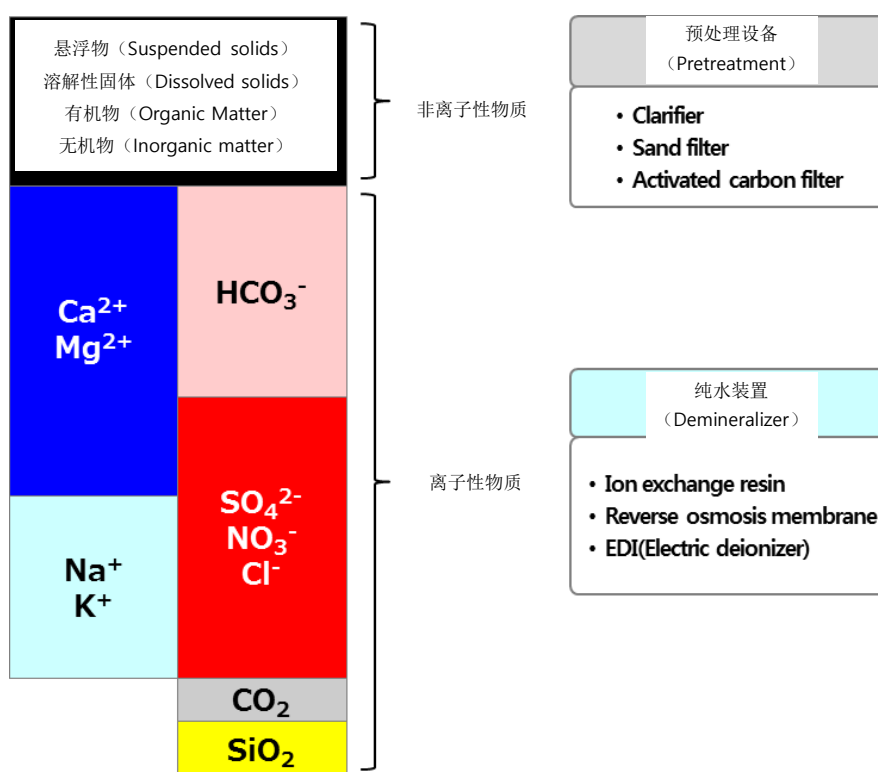
<图1-2. 水的种类和分布>

根据溶解性总固体（TDS，Total dissolved solids）划分，水资源可分为以下几类：

- 1) 海水 (Sea water) : 海水的TDS约为10,000~50,000mg/ℓ, 标准海水约为35,000mg/ℓ。
- 2) 半咸水 (又称汽水, Brackish water) : 指的是由海水和江水混合而成、含盐量低于海水的水, 半咸水通常存在于距离河口2~3公里的范围内, TDS通常约为1,000~10,000mg/ℓ。
- 3) 淡水 (Fresh Water) : 指的是存在于普通陆地上的含盐量较低的水, 淡水与纯净水不同, 仅含有少许盐分, TDS一般低于1,000mg/ℓ。.

1.3 原水 (Raw water) 中的杂质 (Impurities) 和处理方法 (Means of treatment)

各种原水 (Raw water) 中都含有多种杂质, 我们需要根据使用目的以适当的方法去除。水中通常含有以下杂质:



<图1-3. 水中杂质的种类和治疗方法>

悬浮物、有机物等非离子性物质可以用澄清器 (Clarifier)、砂滤器 (Sand filter)、活性炭过滤器 (Activated Carbon Filter) 和微滤/超滤过滤器 (MF/UF) 等预处理设备去除, 离子性物质则可以用离子交换树脂 (Ion exchange resin)、反渗透膜 (RO)、电去离子装置 (EDI) 等纯水装置去除。

原水中的各种杂质引发的故障及处理方法如下:



杂质种类	故障内容	处理方法
1) 硬度成分 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+})	① 在锅炉等的管道中形成水垢 (Scale)，妨碍热传导，造成局部过热，还会损坏设备 ② 洗涤时造成肥皂浪费 ③ 抑制染色 ④ 溶解氢氧化钠 (NaOH) 时形成氢氧化物沉淀物	通常地下水中的含量比较高，地表水中的含量比较低，可以用反渗透膜 (以下简称RO)、EDI、弱酸性阳离子交换树脂 (WCA10L) 和Na型强酸性阳离子交换树脂 (SCR-B、MC-08等) 去除
2) 铁 (Fe^{2+} 、 Fe^{3+})	① 形成铁化合物沉淀物，造成水质污染，在染色、皮革加工、造纸、化纤制造等工艺中会造成变色和着色	地下水中多以 Fe^{2+} 形式存在，地表水中则多以 Fe^{3+} 形式存在，可通过注入空气、注入化学药品以及除铁除锰剂等去除
3) 锰离子 (Mn^{2+})	① 和 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 一样，会造成黑色着色问题	Mn^{2+} 经常和 Fe^{2+} 同时存在，处理方法和铁相同
4) 钠离子、钾离子 (Na^{+} 、 K^{+})	① 增加锅炉管道水浓度，造成携带 (Carry-over，与蒸汽无关，锅炉水以泡沫形态或水形态被快速吸入并通过的现象)	含量会因混入海水而增加，可以用RO、EDI、H型强酸性阳离子交换树脂 (SCR-BH、MC-08H等) 去除
5) 碱度 (Alkalinity) (HCO_3^- 、 CO_3^{2-})	① 在锅炉管道水内形成气泡，造成携带 (Carry-over) 等 ② 生成 CO_2 ，造成管道腐蚀 ③ 增大水的pH值，中和无机酸，妨碍pH值调节	地下水碱度 (Alkalinity) 通常比较高，可以用RO、EDI、强碱性阴离子交换树脂 (MA-12、MA-20等) 去除
6) 有机物 (Organic matter)	① 碳化 (Carbonized) 后在锅炉等的管道中形成水垢 (Scale)，促进携带 (Carry-over) 发生 ② 污染离子交换树脂、降低树脂性能	可以用澄清器 (Clarifier)、砂滤器 (Sand filter)、活性炭过滤器 (Activated carbon filter) 等过滤去除
7) 硫酸根离子 (SO_4^{2-})	① 和 Ca^{2+} 结合生成 CaSO_4 ，形成水垢 (Scale)	可以用RO、EDI、弱碱性阴离子交换树脂 (AW30等) 和强碱性阴离子交换树脂 (MA-12、MA-20等) 去除
8) 氯离子 (Cl^-)	① 增加腐蚀性	含量会因混入海水而增加，可以用RO、EDI、强碱性阴离子交换树脂 (MA-12、MA-20等) 去除
9) 氟离子 (F^-)	① 用作饮用水时会引发斑状菌病	可以用强碱性阴离子交换树脂 (SAR20、MA-20等) 去除
10) 硅 (SiO_2 、 H_2SiO_2)	① 在锅炉、冷却装置中形成水垢 (Scale) ② 在涡轮叶片上形成不溶性沉淀物	可以用强碱性阴离子交换树脂 (SAR10、MA-12等) 去除

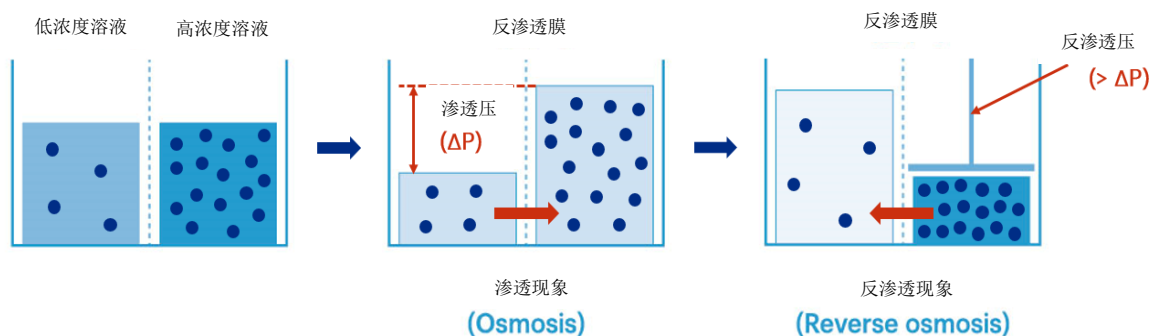
杂质种类	故障内容	处理方法
11) 游离碳酸 (Free CO ₂)	① 在碱度比较高的水中产生，造成管道腐蚀	可以用脱气塔 (Degasifier) 等去除
12) 游离氯 (Free Cl ₂)	① 慢慢地氧化离子交换树脂和反渗透膜 (RO)，造成性能下降	天然水中不存在游离氯，它是为去除微生物人为添加的成分，可以用活性炭过滤器 (Activated carbon filter) 或还原剂 (SBS) 去除

2. 反渗透膜 (Reverse osmosis membrane) 概要

2.1 反渗透膜的原理

如果用半透膜 (Semi-permeable Membrane) 将不同浓度的溶液隔开，那么经过一定时间后，水就会从低浓度溶液向高浓度溶液移动，从而产生水位差，这种现象称为渗透现象 (Osmosis)，此时产生的水位差称为渗透压 (Osmotic Pressure)。相反，如果对高浓度溶液施加高于渗透压的压力，那么水就会从高浓度溶液向低浓度溶液移动，这种现象称为反渗透现象 (Reverse Osmosis)，此时使用的半透膜称为反渗透膜 (Reverse Osmosis Membrane)。

渗透压几乎和溶解的盐浓度成正比，每1,000mg/l溶质的渗透压约为0.6~0.8kg/cm²，海水 (TDS = 35,000mg/l) 的渗透压约为25kg/cm²。应用反渗透膜分离法时，通常会对高浓度溶液施加渗透压2倍以上的压力，对于海水淡化用RO，渗透水一般在42kgf/cm²左右开始分离，在56kgf/cm² (800 psi) 左右可以正常运行。



<图2-1. 渗透现象和反渗透现象>

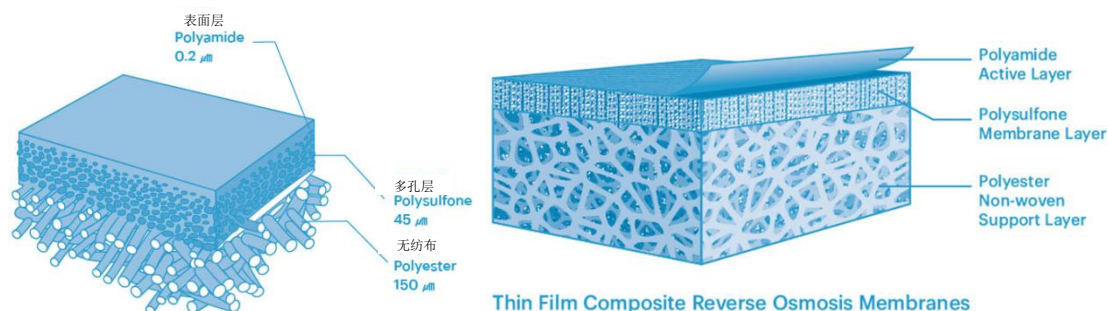
1) 反渗透膜的种类和生产方法

过去经常使用耐氯性 (Chlorine tolerance) 高、微生物膜污染 (Bio-fouling) 影响小的醋酸纤维素非对称膜 (Asymmetric cellulose acetate membrane, 以下简称CA膜)，其缺点是可运行的pH值范围小，且工作压力高导致运行成本高，因此目前主要使用聚酰胺复合膜 (Composite Polyamide membrane, 以下简称PA膜)。和CA膜相比，PA膜的特点是膜表面积大、膜渗透通量高、脱盐率高。PA膜和CA膜的特点如下：



项目		PA膜 (PA Membrane)	CA膜 (CA Membrane)
工作pH值范围 (Operating pH range)		2~12	4~6
工作压力 (Operating Pressure, kg/cm ²)		低	高
脱盐率 (Salt Rejection rate, %)	TDS	> 99.0	< 98.0
	硅	> 99.0	< 95.0
耐氯性 (Chlorine tolerance, ppm)		< 0.1	1~2
微生物膜污染 (Bio-fouling)		高	低
清洗频率 (Cleaning frequency)		高	低
最大容许工作温度 (Maximum operating temperature, °C)		高 (40~45)	低 (30~35)

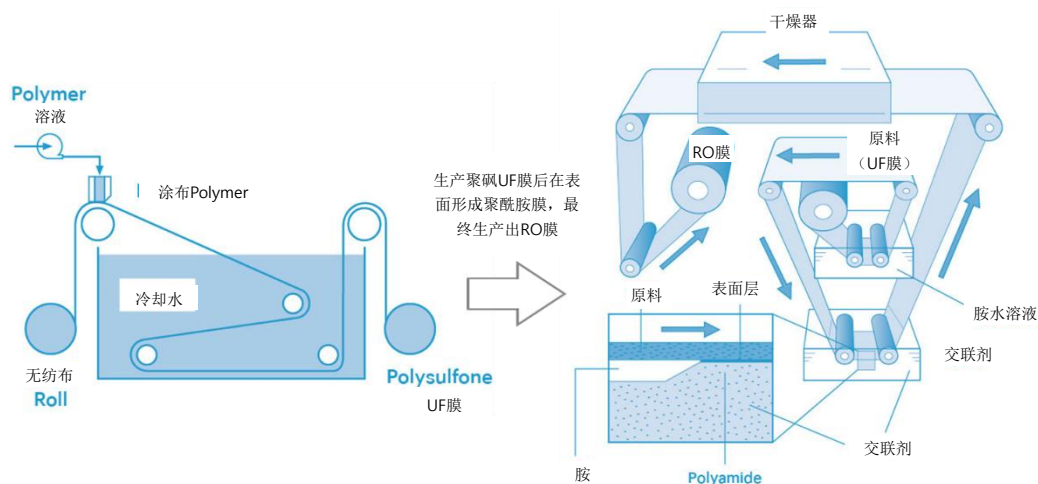
复合膜通过界面聚合 (interfacial polymerization) 而成。在聚酯纤维 (Polyester) 材质的无纺布上形成聚砜 (Polysulfone) 不对称多孔膜，并在其上形成聚酰胺 (Polyamide) 表面层。多孔层的孔径约为0.01 μ m，厚度约为45 μ m，表面层的孔径 (Pore Size) 约为0.001~0.0001 μ m，厚度约为0.2 μ m (上述数据仅为参考值，具体值可能会因实际产品而异)。



<图2-2. 复合膜的结构>

如下图所示，表面层是通过连续滚压 (Rolling) 作业形成的。在无纺布上涂布疏水性高分子溶液，形成聚砜 (Polysulfone) 微孔支撑体，然后浸入间苯二胺 (m-Phenylene Diamine, mPD) 水溶液中形成mPD层，再将其浸入交联剂均苯三甲酰氯 (Trimesoyl Chloride, TMC) 有机溶剂中，使mPD和TMC进行界面聚合，在表面形成芳香族聚酰胺高分子薄膜层。

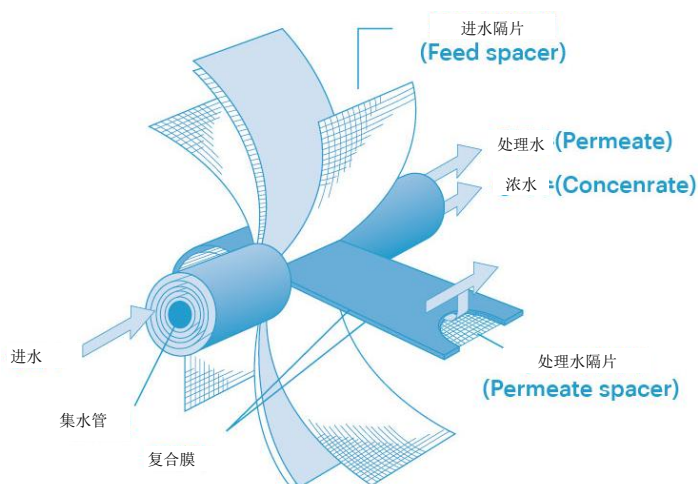
由于聚酰胺具有亲水性，因此在使用时呈凝胶 (Gel) 状，并且可以实现高透水率。另外，均匀的网孔 (Mesh) 和褶皱的表面结构增加了膜的表面积，可以保持99.0%以上的脱盐率，并且透水率提高了两倍以上。随着这些高渗透膜投入实际使用，以比过去更低的压力运行成为了可能，反渗透膜的应用范围也得以不断扩大。



<图2-3. 复合膜的生产方法>

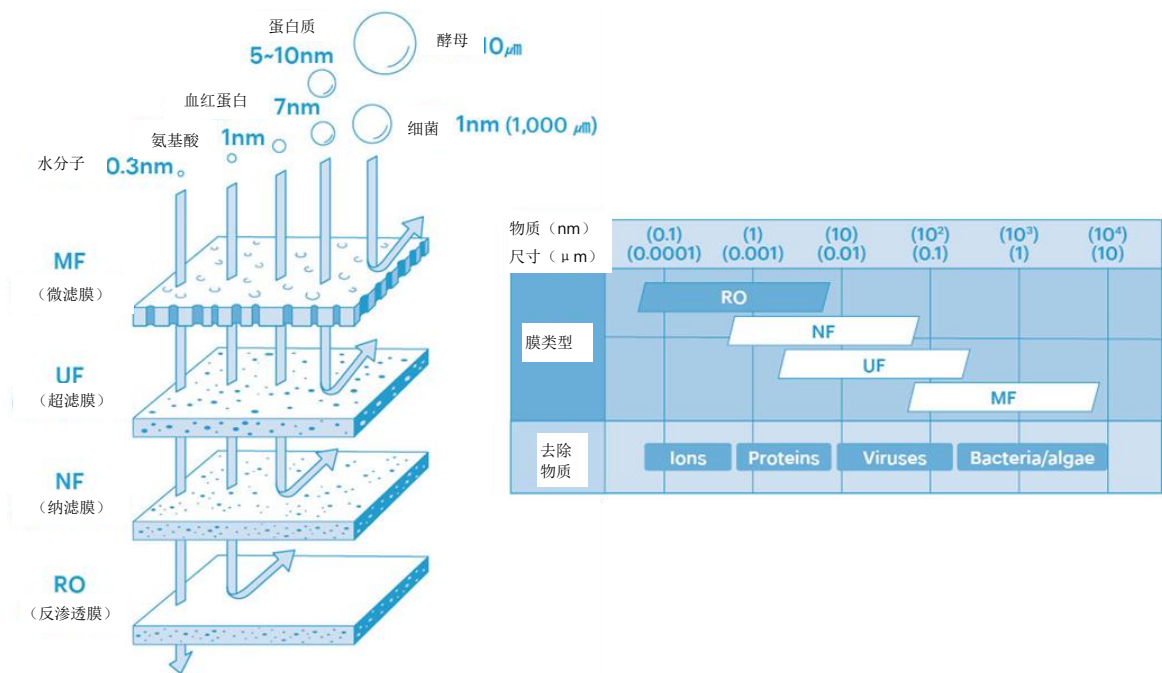
生产聚酰胺复合膜后制造反渗透膜元件（Element）时，通常以螺旋卷（Spiral wound）的形式制造，因为这种方式最小巧（Compact）、最经济。螺旋卷式反渗透膜是在两片复合膜中间放置处理水隔片（Permeate spacer），在外面铺设一层网状的进水隔片（Feed spacer）后卷成圆筒状制成。

进水隔片是进水（Feed water）通过的通道，经反渗透膜去除离子和有机物、无机物等的水称为处理水（Permeate），不能通过反渗透膜的离子和有机物、无机物浓缩的水称为浓水（Concentrate）。处理水会通过处理水隔片被收集到反渗透膜中心的处理水集水管（Permeate tube）中。



<图2-4. 螺旋卷式反渗透膜的结构>

2.2 反渗透膜的分离对象粒度



<图2-5. 不同膜类型的分离能力>

膜的类型按可去除对象物质的粒径区别进行分类，可去除的物质粒径从大到小依次是微滤（Micro-Filtration，MF）、超滤（Ultra-Filtration，UF）、纳滤（Nano-Filtration，NF）、反渗透（Reverse Osmosis）。

微滤主要滤除微米（Micron）级的悬浮物和细菌等颗粒物，超滤则主要滤除用亚微米（Sub-micron）级分子量表示的胶体（Colloid）或高分子物质。反渗透膜不仅可以去除颗粒物，还能滤除最小粒径不足1nm的离子性物质。

2.3 反渗透膜的使用方式

1) 提纯（Purification）

一种常见的反渗透膜使用方式，通过反渗透膜去除原水或原液中的离子和高分子物质等杂质，从而获得纯水或处理液。处理水（Permeate）变成生产水（Product），浓水（Concentrate）变成废水。

2) 浓缩（Concentration）

一种通过反渗透膜分离和浓缩原水或原液中的目标（Target）离子和高分子物质的方式，处理水（Permeate）变成废水，浓水（Concentrate）变成生产水（Product）。

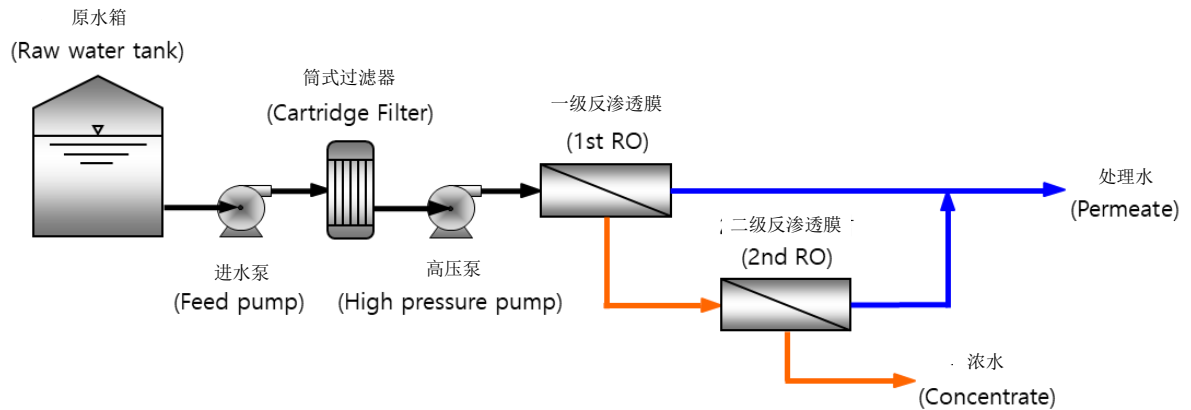
2.4 反渗透膜的分离特点

- 1) 电解质（溶解于水等溶剂中并电离的物质）比非电解质更容易分离。
- 2) 多价离子的选择性更高（三价离子 > 二价离子 > 一价离子）
- 3) 无机离子的去除率受离子固有的水合数和水合离子半径影响，水合离子半径越大，去除率越高。
 - ① 阳离子：Mg²⁺ > Li⁺ > Na⁺ > K⁺
 - ② 阴离子：F⁻ > Cl⁻ > Br⁻ > NO₃⁻

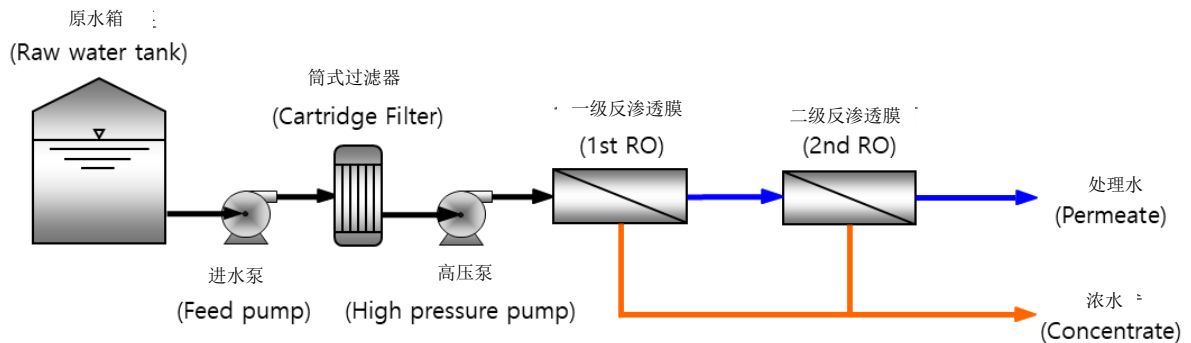
- 4) 非电解质的分子越大，去除率越高。
- 5) 溶解气体（Dissolved Gases）无法去除。
- 6) 弱酸（Weak acids）的去除率低，有机酸中去除率从高到低依次是：柠檬酸（Citric acid） > 酒石酸（Tartaric acid） > 醋酸（Acetic acid）。

2.5 反渗透膜纯水装置设备

典型的反渗透法纯水装置的设备概要如下：



<图2-6. 2-Stage RO>

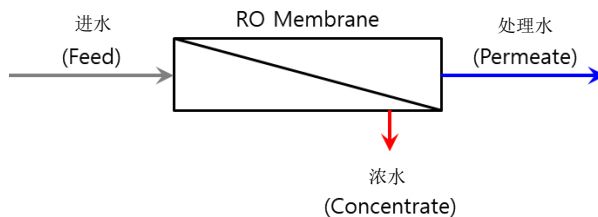


<图2-7. 2-Pass RO>

反渗透膜设备既可以单列（Single array或Single Stage）使用，也可以两列或三列组合使用。<图2-6>中是二段式反渗透膜设备（2-Stage RO），将一级反渗透膜设备中排出的浓水（Concentrate）利用二级反渗透膜设备再次处理，可以大幅提高系统的回收率。如果需要提高处理水质，则可以如<图2-7>所示，设计成双级反渗透膜设备（2-Pass RO）的形式，即利用二级反渗透膜设备再次处理一级反渗透膜设备处理水（Permeate）的方式。

1) 单列反渗透膜（Single-Array或Single-Stage RO）

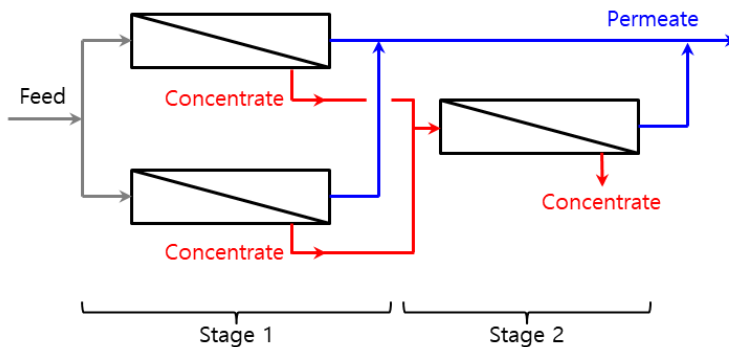
进水（Feed）以单流形式流入反渗透膜系统，无需额外处理，直接产生处理水（Permeate）和浓水（Concentrate）。



<图2-8. 单列反渗透膜 (Single-Array RO) >

2) 二段式反渗透膜 (2-Stage RO)

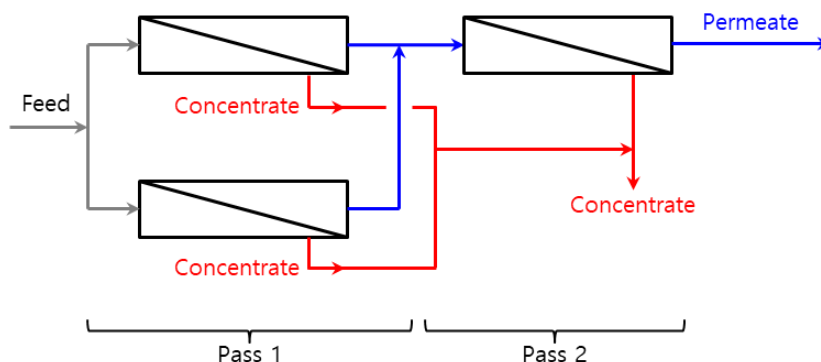
进水通过反渗透膜的阶段称为“段 (Stage)”或“阵列 (Array)”。二段式反渗透膜 (2-Stage RO) 配置通过将一段 (1st-Stage) 排出的浓水作为2段 (2nd-Stage) 的进水回收利用来提高反渗透膜系统整体的回收率。此时，各段 (Stage) 的压力容器数量用“冒号 (:)”隔开，下图中的配置可以用“2:1”来表示。



<图2-9. 二段式反渗透膜 (2-Stage RO) >

3) 双级反渗透膜 (2-Pass RO)

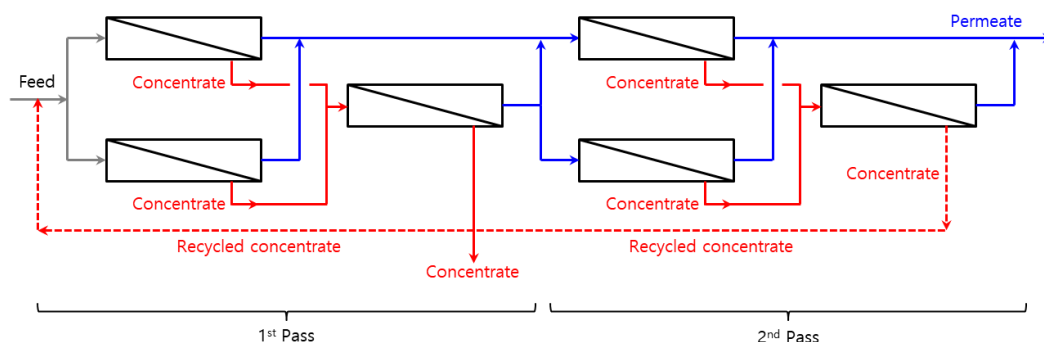
双级反渗透膜 (2-Pass RO) 配置通过将一级RO设备 (1st-Pass RO) 的处理水作为二级RO设备 (2nd-Pass RO) 的进水再次处理来提高处理水的纯度。



<图2-10. 双级反渗透膜 (2-Pass RO) >

4) 段和级组合配置

我们也可以根据水质和回收率要求组合段和级来配置系统。<图2-11>是组合段的观念和级的概念设计的反渗透膜设备，该设计采用二段式 (2-Stage) 配置来提高回收率，同时采用双级 (2-Pass) 配置来提高处理水的质量。



<图2-11. 二段式&双级RO组合配置>

5) 去除率（Rejection rate）和回收率（Recovery rate）

原水中溶解性总固体（Total Dissolved Solids, TDS）被去除的比例称为去除率（Rejection rate），该数值因反渗透膜的特点和种类而异，是评估反渗透膜性能的重要指标。

$$\text{去除率 (Rejection rate, \%)} = \frac{\text{原水TDS} - \text{处理水TDS}}{\text{原水TDS}} \times 100$$

假设进水的TDS为600ppm、处理水的TDS为12ppm，则去除率为

$$\text{去除率 (Rejection rate, \%)} = \frac{600\text{ppm} - 12\text{ppm}}{600\text{ppm}} \times 100 = 98\%$$

通过反渗透膜去除的TDS会浓缩在浓水中并随之排出。

此时，原水中处理水的比例称为回收率（Recovery rate）。

$$\text{回收率 (Recovery rate, \%)} = \frac{\text{处理水量}}{\text{原水量}} \times 100$$

假设进水流量为120m³/hr、处理水流量为90m³/hr，则回收率为

$$\text{回收率 (Recovery rate, \%)} = \frac{90\text{m}^3/\text{hr}}{120\text{m}^3/\text{hr}} \times 100 = 75\%$$

使用一般聚酰胺复合膜的反渗透膜性能（Performance）如下，以下数值仅为参考值，具体值可能会因离子组成、pH值、温度等其他因素不同而有所不同。

反渗透膜处理水质（Treated water quality of RO）	
去除率（Rejection rate, %）	95 ~ 99
回收率（Recovery rate, %）	70 ~ 85
电导率（Conductivity, μS/cm）	10 ~ 20
SiO ₂ 去除率（Silica rejection rate, %）	95 ~ 99

2.6 反渗透膜优缺点比较

1) 优点

- 分离工艺不涉及相变，分离对象物质变形少。
- 利用膜材料的物理和化学功能基于粒径和化学亲和性进行分离，因此具有仅分离特定物质的功能。
- 应用范围广，工艺设计和规模扩大（Scale-Up）容易。
- 设备配置简单，可以最小化布局（Lay-out）。
- 运行方式简单，易于实现自动化。
- 冲击载荷（Shock Loading，短时间内原水水质的变化严重）造成的影响小。

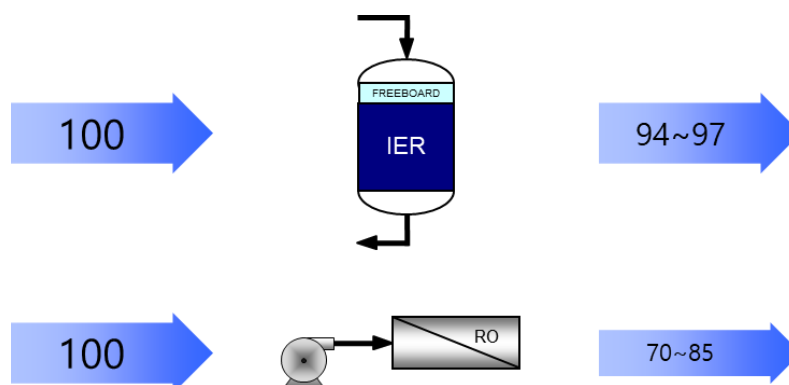
2) 缺点

- 根据原水的离子组成、温度值、pH等条件不同，运行可能会受到限制。
- 需要预处理设备。
- 会产生高浓度的浓水，因此需要最终处理设施。
- 初始投资成本和维护管理成本比较高。
- 发生水垢（Scale）或污垢（Fouling）等污染时，须进行化学清洗（Chemical Cleaning）。

2.7 离子交换树脂与反渗透膜比较

1) 回收率（Recovery rate）

离子交换树脂的再生废水量和自耗量因设计标准而异，但一般仅为3~6%，纯水产水量（Net throughput）可达到原水投入量的94~97%。但是，反渗透膜的回收率通常仅为70~85%。



<图2-12. 离子交换树脂（IER）与反渗透膜（RO）的回收率比较>

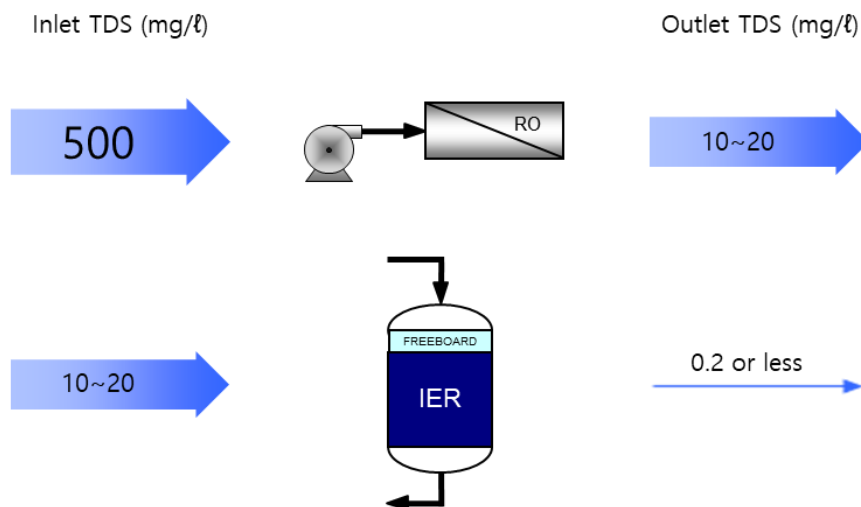
2) 再生剂使用和废水产生量

离子交换树脂需要使用酸（Acid）和碱（Alkali）作为再生剂，因此必须依据《化学物质管理法》等进行管理，虽然只有少量，但也会产生高浓度的废水。反渗透膜则会产生大量（原水投入量的15~30%）浓度相对较低的废水。

3) 离子去除率和处理水质

离子交换树脂利用离子选择性去除所有离子，因此可以将离子去除到非常低的浓度。反渗透膜则是基于分子量的大小去除异物，因此分子量大的物质几乎可以彻底去除，但 Na^+ 、 Cl^- 等可以部分透过膜， CO_2 等溶解气体则不能被膜去除。因此，倘若使用反渗透膜进行预处理并与离子交换树脂组合使用，则可以经济高效地运行。生产电阻率在 $10\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ 以上或 SiO_2 在 0.01ppm 以下

的超纯水时，更是少不了离子交换树脂。



<图2-13. 离子交换树脂（IER）与反渗透膜（RO）的TDS去除性能>

4) 处理高浓度原水

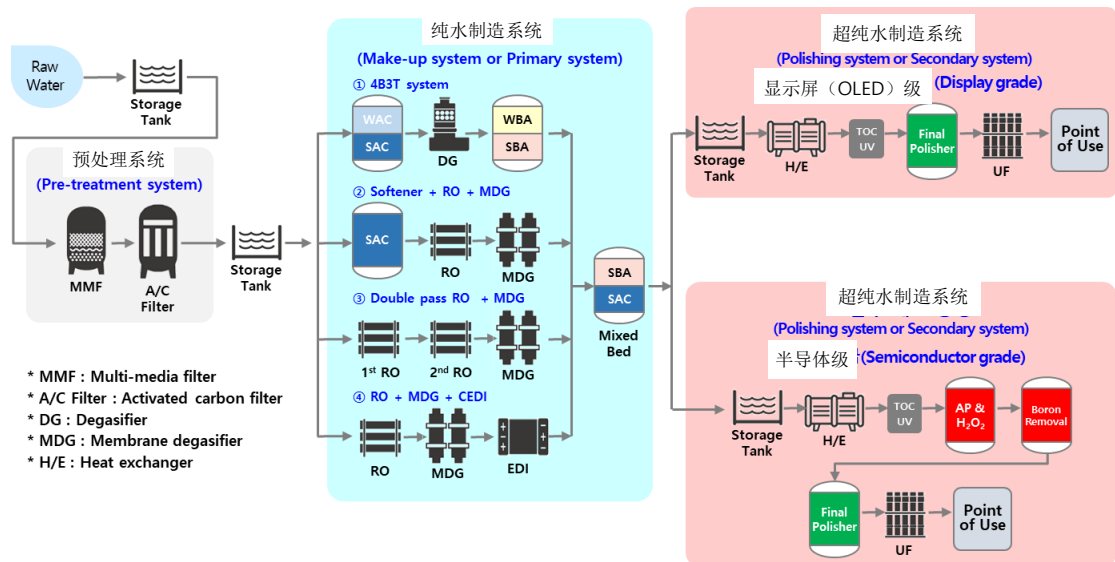
一般来说，离子交换树脂处理TDS 400ppm as CaCO_3 以下的原水比较经济。如果原水的TDS过高，需要的离子交换树脂量则会大幅增加，按照相应的离子交换树脂量设计压力容器（Pressure Vessel）时，无法得出适当的设计因数（有效树脂层高度（mm）、线性速度（Linear Velocity）、空间速度（Specific Velocity）等）。反渗透膜的使用范围则非常广泛，甚至可以用于海水淡化（标准海水的TDS约为35,000 mg/l as CaCO_3 ）。

5) 人力（Man power）投入量和运行自动化

离子交换树脂必须定期（通常0.5~1次/天）进行再生（Regeneration），因此操作人员的人力投入量相对来说比反渗透膜更大，并且也不如反渗透膜更容易实现运行自动化。

6) 结论

离子交换树脂和反渗透膜都是优缺点分明的水处理设备，搭配使用时可以达到理想的效果，最近在半导体和显示屏等电子行业应用的超纯水制造装置和发电站用纯水制造装置中组合离子交换树脂和反渗透膜使用已成为常态。



<图2-14. 纯水/超纯水制造系统设备类型>

2.8 反渗透膜性能的影响因素

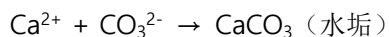
1) pH

反渗透膜存在容许工作pH值范围，一般来说，CA膜的容许pH值为4.0~6.0，PA膜的容许pH值为2.0~12.0。采用PA膜时，pH值应用范围比较广，但pH值过低或过高都会造成反渗透膜性能下降，因此将进水的pH值调节为适当水平至关重要。

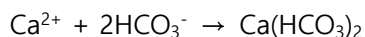
调节进水的pH值是去除水垢（Scale）的有效预处理方法。反渗透膜面上最容易产生的水垢是钙类水垢和硅类水垢。如果原水中含有大量硬度成分，则反渗透膜面上很容易形成碳酸钙（CaCO₃）水垢，这种情况下，必须对原水进行软化（Softening）处理或者调节pH值。

为防止形成水垢，建议将反渗透膜进水的pH值调节为弱酸性（pH 6.0~6.5）后再运行设备。<图4-15>显示了与水垢形成相关的pH值和钙硬度间的关系，当原水pH值被调节到7.0以下时，形成钙水垢的安全区域扩大。

此外，水中的碳酸根离子（CO₃²⁻）、碳酸氢根离子（HCO₃⁻）、二氧化碳（CO₂）的丰度因pH值而异。<图4-16>显示了pH值变化时的总碳酸丰度。当pH值高于7.0时，碳酸根离子（CO₃²⁻）会开始慢慢增加；当pH值高于12.0时，碳酸根离子（CO₃²⁻）会以100%的比例存在。此时，如果原水中存在钙离子（Ca²⁺），则极有可能会形成碳酸钙（CaCO₃）水垢。



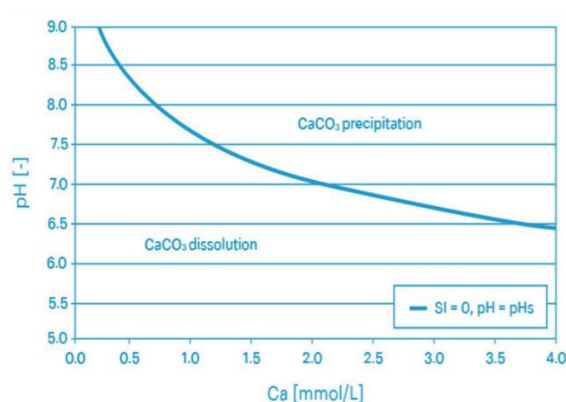
另外，当pH值达到5.5时，大部分都会变成碳酸（H₂CO₃），碳酸根离子（CO₃²⁻）被释放到大气中，钙离子（Ca²⁺）会失去结合伙伴，变成简单的Ca胶体。残留的少量碳酸氢根离子（HCO₃⁻）会与钙离子（Ca²⁺）结合生成碳酸氢钙（Ca(HCO₃)₂），但由于含量比较少，所以问题不大。RO进水的弱酸化（pH值约为5.5）也有助于防止生成其他重金属离子（Fe、Cu、Ni、Zn等）的氢氧化物沉淀。



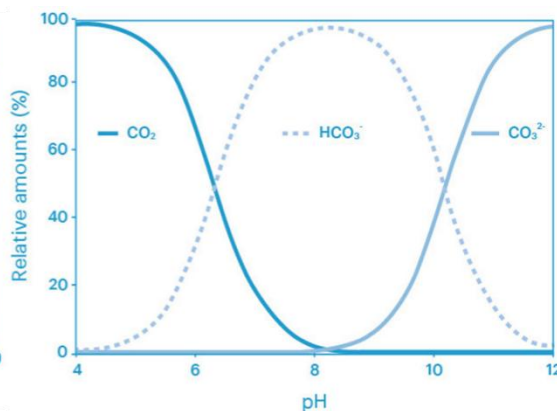
碳酸钙水垢也可以用LSI或S&DSI的数值来表示水垢的程度，TDS在10,000ppm以下的半咸水（Brackish water）用朗格利尔饱和指数（Langelier Saturation Index, LSI）表示，TDS在10,000ppm以上的海水（Sea water）用史蒂夫和戴维斯稳定指数（Stiff-Davis Index, S&DSI）表示。

- LSI（Langelier Saturation Index）： $\text{pH} - \text{pH}_s$ （TDS < 10,000ppm）
- S&DSI（Stiff and Davis Stability Index）： $\text{pH} - \text{pH}_s$ （TDS > 10,000ppm）

这里说的pH值是指浓水的pH值，pH_s是指水与碳酸钙饱和后达到平衡时的pH值。如果想仅通过注入酸来防止碳酸钙水垢形成，则LSI或S&DSI必须是负值，如果LSI或S&DSI大于0，则判定可能会形成碳酸钙水垢，须采取注入阻垢剂等措施。



<图2-15. pH和钙硬度-水垢（Scale）形成范围>



<图2-16. pH值变化和CO₂、HCO₃⁻、CO₃²⁻的关系>

2) 温度

原水的温度是影响反渗透膜性能的主要因素。一般来说，原水的温度每下降3℃，反渗透膜的渗透通量（Flux）会减少10%左右；每下降5℃，进水泵（Feed Pump）的压力会增加15%左右。另外，原水的温度过低时，膜的加压造成的压密化（Compaction）现象增加，膜的使用寿命可能会缩短。

相反，原水的温度升高时，反渗透膜的盐透过率增加，处理水质可能会变差。因此，夏季和冬季必须考虑不同原水温度的反渗透膜性能变化后运行，反渗透膜设备的工作温度以20~25℃为宜。

原水温度过低时渗透通量（Flux）会减少，因此需要利用换热器等给原水加热，无法加热时需要增加膜面积本身。

不同温度时的膜面积修正系数如下：

温度 (°C)	修正系数	温度 (°C)	修正系数	温度 (°C)	修正系数	温度 (°C)	修正系数
1	3.64	14	1.54	27	0.94	40	0.63
2	3.23	15	1.47	28	0.91	41	0.61



温度 (°C)	修正系数	温度 (°C)	修正系数	温度 (°C)	修正系数	温度 (°C)	修正系数
3	3.03	16	1.39	29	0.88	42	0.60
4	2.78	17	1.34	30	0.85	43	0.58
5	2.58	18	1.29	31	0.83	44	0.56
6	2.38	19	1.24	32	0.80	45	0.54
7	2.22	20	1.19	33	0.77	46	0.53
8	2.11	21	1.15	34	0.75	47	0.51
9	2.00	22	1.11	35	0.73	48	0.49
10	1.89	23	1.08	36	0.71	49	0.47
11	1.78	24	1.04	37	0.69	50	0.46
12	1.68	25	1.00	38	0.67		
13	1.61	26	0.97	39	0.65		

水温25℃的修正系数为1.00，水温7℃的修正系数为2.22，因此在不加热原水的情况下要想得到相同的渗透通量，需要2.22倍的膜面积。

3) 电导率（Conductivity）和TDS（溶解性总固体，Total Dissolved Solids）

电导率是表示物质或溶液能够携带电荷的程度的物理量，单位是 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，电导率是电阻率（Resistivity）的倒数。水中溶解的离子成分会导电，水中的带电离子越多，电导率越大。

电导率是一种方便有效的测量水中离子浓度的方法，但由于它不能准确测量原水中的离子组成，因此通常被用作估算水中溶解离子浓度的指标。

TDS是指过滤悬浮物和蒸发胶体后剩下的无机物，用 mg/l 或 ppm 表示。TDS可以使用TDS测量计直接测量，也可以通过换算水的电导率来计算。TDS由电导率值乘以一定的系数求出，不同种类的水的电导率-TDS换算系数如下：

水的种类	电导率（25℃时）	换算系数（K）
RO处理水 （RO Permeated water）	0 ~ 300	0.50
半咸水 （Brackish water）	300 ~ 4,000	0.55
	4,000 ~ 20,000	0.67
海水 （Seawater）	40,000 ~ 60,000	0.70
RO浓水 （RO Concentrated water）	60,000 ~ 85,000	0.75



4) 硬度 (Hardness)

硬度成分会和水中高浓度的碳酸氢根离子 (HCO_3^-)、碳酸根离子 (CO_3^{2-})、硫酸根离子 (SO_4^{2-}) 等结合形成不溶性盐, 这是膜表面形成水垢 (Scale) 的主要原因。一般来说, 通过反渗透膜处理硬度成分高的原水时, 必须使用软水器 (Softener) 或者通过注入酸 (Acid) 调节 pH 值来控制水垢形成, 另外, 设计系统时还必须考虑通过注入阻垢剂 (Scale inhibitor) 来最大限度地减少水垢形成。

5) Na离子 (Sodium)

Na离子是高纯度的水中非常重要的管理因素。Na是一价阳离子, 不易被反渗透膜去除, 在反渗透膜后段的离子交换树脂中也比其他离子更难去除。因此, 在要求高纯度的设备中, 钠离子可能是主要的泄漏 (Leak) 离子, 在半导体等行业, 钠离子还可能会成为引发产品缺陷的主要原因。

6) 碱度 (Alkalinity)

一般的原水中存在与氢离子发生化学键合的阴离子, 如碳酸氢根离子 (HCO_3^- , Bicarbonate)、碳酸根离子 (CO_3^{2-} , Carbonate)、氢氧根离子 (OH^- , hydroxide) 等。这些离子会通过去除 H^+ 来提高水的 pH 值, 一般原水中的碱度 (Alkalinity) 成分大部分都以碳酸氢根离子 (HCO_3^-) 的形式存在。

水具有吸收碱度成分的能力, 因此自然状态下的水中碳酸钙 (CaCO_3 , Calcium carbonate) 几乎是饱和的。如果这些水在反渗透膜中浓缩, 则可能会产生碳酸钙沉淀物, 而且碳酸钙通常会比其他盐更早地出现。因此, 反渗透膜设备中有必要考虑通过调节 pH 值等预处理方案来防止碱度成分形成碳酸钙沉淀。

7) 硫酸盐 (Sulphate)

存在 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Ba^{2+} 、 Sr^{2+} 等二价阳离子时, 硫酸盐的溶解度非常低。硫酸盐和碳酸钙、二氧化硅及氢氧化物沉淀物一样, 都是主要的水垢成分, 在大部分的原水中都以相对较高的浓度存在, 通过添加硫酸来调节 pH 值时, 硫酸盐的浓度会增加。必须通过减少原水中的二价阳离子或者防止化学键合来抑制硫酸盐水垢 (Sulphate scale) 形成。

8) Cl离子和余氯 (Chloride and Chlorine)

大多数氯化物盐 (Chloride salt) 都极易溶于水, 因此不会形成水垢。但是, 高浓度的氯离子会造成不锈钢 (Stainless Steel) 管道的腐蚀, 原水中含有几千 ppm 以上的氯离子时, 需要使用 SUS316 级的管道。

余氯 (Cl_2) 是氧化性物质, 它会氧化反渗透膜, 造成膜损坏。一般来说, 在 1 ppm 的余氯中暴露 200~1,000 小时就会造成膜的劣化 (Degradation), 因此原水中容许的最大余氯浓度通常限制在 0.1 ppm 以下。

由于聚酰胺复合膜不具有耐氯性, 因此在进水和浓水出口不应检出余氯 (Cl_2) 和溶解氧 (O_2)。原水中存在余氯时, 应通过活性炭过滤器进行预处理或者通过注入还原剂来还原处理, 常用的还原剂有亚硫酸钠 (Na_2SO_3 , Sodium sulfite)、亚硫酸氢钠 (NaHSO_3 , Sodium bisulfite, 以下简称 SBS)、焦亚硫酸钠 ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$, Sodium metabisulfite, 以下简称 SMBS)、硫代硫酸



钠 ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, Sodium thiosulfate) 等, 通常主要使用性价比高的焦亚硫酸钠。焦亚硫酸钠 (SMBS) 溶于水后变成亚硫酸氢钠 (SBS)。

活性炭过滤器 (Activated Carbon Filter)

- $\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{HOCl} + \text{HCl}$
- $\text{C} + 2\text{HOCl} \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{HCl}$

注入还原剂

- $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5 (\text{SMBS}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaHSO}_3 (\text{SBS})$
- $\text{Cl}_2 + \text{NaHSO}_3 (\text{SBS}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaHSO}_4 + 2\text{HCl}$

理论上, 如果水中残留有 $1\text{mg}/\ell$ 的 Cl_2 , 则需要还原的 SBS 量为

$1\text{mg}/\ell \times 104/71 \approx 1.5\text{mg}/\ell$, 实际应用时每 $1\text{mg}/\ell$ 的 Cl_2 注入 $3\text{mg}/\ell$ 左右的 SBS。

使用聚酰胺复合膜的反渗透膜装置长期 (一个月以上) 停机时, 建议置于 SMBS 0.5~1.0% 水溶液中保管, 有可能冻结时, 建议添加甘油并置于甘油 10~20% 溶液中保管。

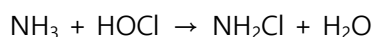
9) 细菌和有机物 (Bacteria and organic compound)

如果原水中存在能在低浓度余氯中存活的细菌, 则聚酰胺复合膜或醋酸纤维素非对称膜都有可能发生快速氧化, 导致膜的脱盐率下降。当膜表面被细菌侵入时, 表面会发生类似于腐蚀的变化, 同时膜表面的乙酰化程度也会降低, 导致膜的脱盐率大幅下降。

所有原水中都含有细菌、藻类、霉菌、病毒等微生物, 特别值得一提的是, 细菌大小一般为 $1\mu\text{m}$, 在有利于微生物繁殖的条件下会快速繁殖, 形成生物膜 (Bio-Film), 反渗透膜设备的压差增大会导致套叠 (Telescoping) 等机械损坏和处理水流量减少。微生物污染通过化学清洗也不易去除, 因此防止生物污染也是预处理工艺的主要目的。

醋酸纤维素膜耐氯性优秀, 但不耐细菌。因此, 需要通过调节浓度来确保供应给醋酸纤维素膜的原水中余氯始终保持在 $0.5\sim 1.0\text{mg}/\ell$ 范围内, 从而防止细菌增殖, 如此即可防止细菌滋生。但是, 设备长时间停机时余氯会流失, 细菌可能会再次增殖, 因此长时间停机时, 建议使用 0.5% 左右的福尔马林灭菌处理后保管。

怀疑发生了细菌污染时, 向原水中注入氨 (NH_3) 或硫酸铵 ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), 将余氯转化成杀菌力比较弱的氯胺 (Chloramine) 并用作杀菌剂。需要注意的是, 虽然氯胺比较弱, 但仍然具有氧化反渗透膜的作用, 因此使用时需要多加注意。



反渗透膜表面的有害油脂类、溶剂、有机物需要通过预处理去除。反渗透膜一般带有负 (-) 电荷, 所以当阳离子表面活性剂或阳离子性有机抑制剂与膜表面接触时会电吸附到膜表面, 导致渗透通量 (Flux) 减少。砂滤器或活性炭过滤器等预处理设备必不可少, 反渗透膜进水的 COD (Chemical Oxygen Demand, 化学需氧量) 值必须控制在 $15\text{mg}/\ell$ 以下。



10) 氟离子 (Fluoride)

一般原水中氟离子的浓度非常低。但是，如果氟离子浓度比较高，则可能会形成氟化钙盐 (Calcium fluoride salt)，氟化钙盐是一种难溶性物质，可能会污染反渗透膜。

11) 铁和锰 (Iron and Manganese)

如果铁或锰以溶于水的还原状态存在，则可能不会有太大问题，但如果这些过度金属和氧化剂（余氯等）同时存在，则铁和锰会被氧化成不溶于水的状态，造成反渗透膜污染，它们会通过充当氧化剂的活性催化剂来促进反渗透膜的氧化。因此，如果铁或锰含量超过0.05mg/l，则必须通过预处理去除。

12) 硅 (SiO₂、Silica、二氧化硅)

硅分为不溶性和可溶性。硅在pH值为12.0的条件下以HSiO₃⁻形式存在，在pH值为9.0的条件下以H₂SiO₃ (SiO₃⁻)形式存在，在pH值低于9.0的条件下以Si(OH)₄(H₂O)₂的复杂形式存在。不溶性硅处于悬浮或胶体状态，因此可以通过混凝沉淀或微滤/超滤 (MF/UF) 去除。

可溶性硅不能用过滤法去除，一般来说，原水中的可溶性硅含量在1~100mg/l左右。当硅在原水中过度饱和时，可能会形成不溶性胶体硅并污染反渗透膜，硅一旦沉淀就会变成非常稳定的物质，很难去除，因此需要格外注意。如果原水中含有50mg/l左右的硅，那么2倍浓缩时浓水中的硅浓度会达到100mg/l，可能会发生硅水垢的析出，这种情况下建议避免浓缩2倍以上。

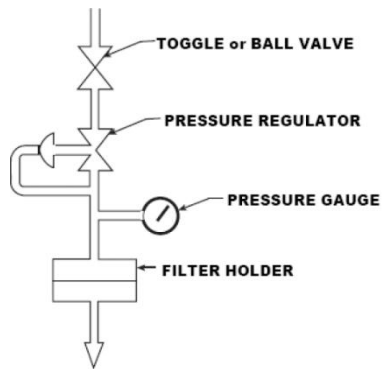
将硅成分含量较高的地下水等用作反渗透膜系统的原水时，建议采用多种方式的预处理措施，如注入阻垢剂、调节pH值 (pH值在7~7.8范围内时SiO₂的溶解度最低)、提高回收率、用换热器等加热原水等。在超纯水制造系统中，有时也会在反渗透膜前段利用离子交换树脂去除硅后再用反渗透膜处理。

13) SDI (Silt Density Index, 淤泥密度指数)

SDI又叫污染指数 (Fouling index)，用于衡量反渗透膜发生污染 (Fouling) 的可能性。SDI使用孔径为0.45μm的过滤器测量悬浮物造成的污染程度。使用SDI检测盒 (Kits) 的标准试验方法遵循ASTM D4189-82，详细内容如下：

让水在30psig的压力下通过直径为47mm的过滤器，测量前500ml水通过所花费的时间 (t₁)，经过15分钟 (T) 后，测量另外500ml水通过所花费的时间 (t₂)，用下面的计算公式求出SDI。

$$\text{SDI (Silt Density Index)} = \frac{1 - (T_2 / T_1)}{T} \times 100$$



【SDI检测盒组成】

直径为47mm的膜过滤器支架

直径为47mm的膜过滤器（孔径：0.45 μ m）

压力表（测量范围0~70psi（0~5bar））

压力调节器（可用手动针阀代替）

手动阀和过滤器支架

<图2-17. SDI检测盒>

由于SDI测量利用的不是和实际反渗透膜中发生的现象完全相同的现象，因此存在局限性。SDI测量过程中所有悬浮物（Suspended solid）都会被过滤器滤除，但反渗透膜中会有未知比例的污染物随着膜的表面流入浓水中，因此SDI数值高不是反渗透膜中可能会立刻发生污染（Fouling）的绝对依据。另外，即使是SDI数值比较低的原水，反渗透膜中也可能会发生严重的污染（Fouling）。一般来说，进水原水的SDI限制在5以下，SDI值在3以下时，视为污染（Fouling）程度不严重，SDI值在5以上时，则视为发生了严重的污染（Fouling）。

14) 浊度（Turbidity）

浊度（Turbidity）是表示液体因肉眼可见的大量颗粒呈现出混浊状态的程度的数值，被用作表示反渗透膜污染（Fouling）可能性的指标，一般用NTU（Nephelometric Turbidity Unit）表示，但也可以使用其他相对单位。

浊度通过使用浊度计（Turbidity meter）以光学方式测量光被悬浮物散射的程度来表示，浊度在1NTU以上时，则判定反渗透膜很有可能被污染了，反渗透膜进水的浊度通常会限制在1NTU以下。

然而，浊度与SDI一样，只是污染（Fouling）的间接指标，浊度高并不意味着引起浊度的所有物质都会在反渗透膜上沉淀。和SDI一样，相反的情况也可能会成立，事实上，也有很多光能通过的污染物。总之，浊度或SDI都是很有用的指标，但却也都不是表示反渗透膜原水状态的完美衡量指标，可以用作预处理设备性能的衡量指标。

15) 氧化还原电位（ORP, Oxidation Reduction Potential）

氧化还原电位，即ORP是表示氧化物质和还原物质数量的指标，一般使用毫伏（mV）单位表示。如果ORP是正（+）值，则代表原水中含有氧化物质，如果ORP是负（-）值，则代表原水中含有还原物质。一般来说，如果反渗透膜原水中没有余氯，则ORP会在175~200mV左右，通常将该值设定为管理目标ORP范围，以防止反渗透膜氧化。

原水中常见的氧化性物质包括余氯（Cl₂）、臭氧（O₃）等，ORP比较高的原水必须用活性炭进行预处理或者通过注入还原剂来去除氧化物质。原水的ORP也可能会呈负值，这意味着水中存在H₂S、SO₄²⁻或Fe²⁺等。H₂S和Fe²⁺会造成胶体污染等，在反渗透膜预处理系统中，可以通过活性炭吸附、氧化沉积、混凝过滤、离子交换等多种方法去除这些物质。当水处于还原状态（-10



0 ~ -200mV) 时, 消耗硫酸根 (SO_4) 的厌氧性细菌繁殖良好, 因此让原水的氧化还原电位保持在微氧化状态 (+) 有助于防止微生物污染。

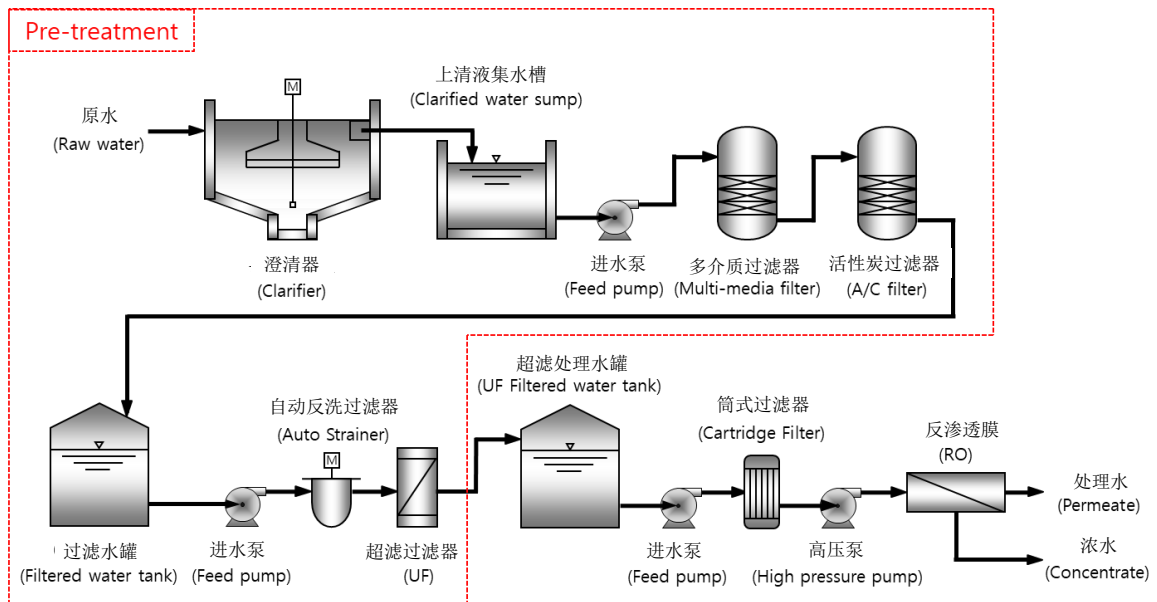
2.9 反渗透膜进水条件

使反渗透膜性能长期保持良好状态的进水条件如下:

项目		条件	超出标准时可能会发生的污染
1	浊度 (Turbidity, NTU)	< 1	形成沉淀物和污泥污染
2	SDI ₁₅ (Silt Density Index)	< 5	形成沉淀物、污泥和胶体污染
3	pH	3~10	反渗透膜水解
4	水温 (Water Temperature, °C)	< 45°C	设备运行经济性差 (温度↓ / 压力↑) 不可逆性膜劣化 (温度↑)
5	硬度 (Hardness, mg/l)	-	形成无机盐垢
6	碱度 (Alkalinity, mg/l)	-	形成碳酸盐垢
7	BOD (mg/l)	< 10	有机物污染
8	COD _{Mn} (O ₂ , mg/l)	< 15	有机物污染
9	TOC (mg/l)	< 2	有机物污染
10	余氯 (Residual Chlorine, mg/l)	< 0.1	反渗透膜氧化
11	Fe (mg/l)	< 0.05	铁污染
12	Mn (mg/l)	< 0.1	锰污染
13	阳离子·两性离子·中性 表面活性剂 (mg/l)	未检出	渗透通量不可逆性减少
14	洗涤剂、油、H ₂ S等 (mg/l)	未检出	有机物和油污染
15	沉淀物、盐等 (mg/l)	没有因浓水产 生的沉淀物	形成无机盐垢

2.10 原水预处理方法

流入反渗透膜的原水可分为地下水、自来水、地表水、海水、污水/废水出水（回用水）等，原水水质受多种因素影响，因地理位置条件和季节性天气的不同，含有的杂质成分也可能会不同。因此，必须通过适当的预处理工艺去除可能会影响反渗透膜性能和寿命的杂质等。



<图2-18. 原水预处理工艺>

1) 澄清器（Clarifier）

由于原水中的各种非离子性物质在自然沉降时不能在经济的时间内沉淀出来，因此可以通过快速沉淀装置混凝沉淀来有效去除。水中的悬浮物一般都带电，其电荷相互排斥，使得它们继续悬浮在水中。混凝沉淀装置是一种让被凝结剂（Coagulant）中和电荷的细小颗粒互相吸引、凝聚后与絮凝剂（Flocculant）形成絮凝物（Floc）沉淀，然后以污泥（Sludge）形式去除的装置。混合、搅拌、混凝沉淀、分离上清液、去除和操作污泥在同一个槽内连续进行，可适用于大多数的原水条件，因此被广泛用作预处理工艺。

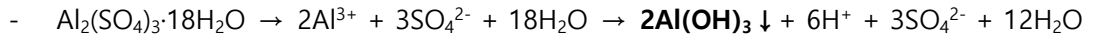
（原水浊度：10~100NTU → 处理后5~10NTU）

原水中胶体成分带有负（-）电荷，由于彼此的负（-）电荷相互排斥，以稳定的分散状态存在于水中。此时，如果注入带有正（+）电荷的凝结剂中和凝结对象颗粒表面的电荷，则失去电斥力的颗粒会彼此接触并在引力的作用下结合，通过搅拌使颗粒增大到可以实际去除的大小，让凝结颗粒相互碰撞形成絮凝物（Floc），最终以污泥（Sludge）的形式沉淀并去除。澄清器的混凝处理对象如下：

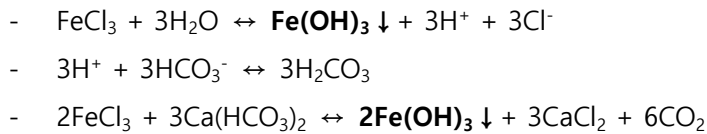
- 浊度（约 $1\mu\text{m}$ 大小）
- 天然着色成分（ 1nm 大小）
- 病毒（几十 nm 大小）
- 细菌类（ $1\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ 大小）
- 藻类（ $1\mu\text{m}\sim$ 几十 μm 大小）

凝结剂（Coagulant）主要使用硫酸铝（Alum, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, Aluminium sulphate）或氯化铁（ FeCl_3 , Ferric chloride），其化学反应方程式如下：

硫酸铝（Alum, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ）：



氯化铁（ FeCl_3 ）：



添加凝结剂（Coagulant）时，pH值会因产生的氢离子（ H^+ ）而有所下降，因此通常会注入氢氧化钠（ NaOH ）来调节pH值。使用氯化铁作为凝结剂时，则需要添加碱成分（Alkalinity）来进行反应，如果原水中没有碱成分，则可以添加碳酸钙（ CaCO_3 ）。

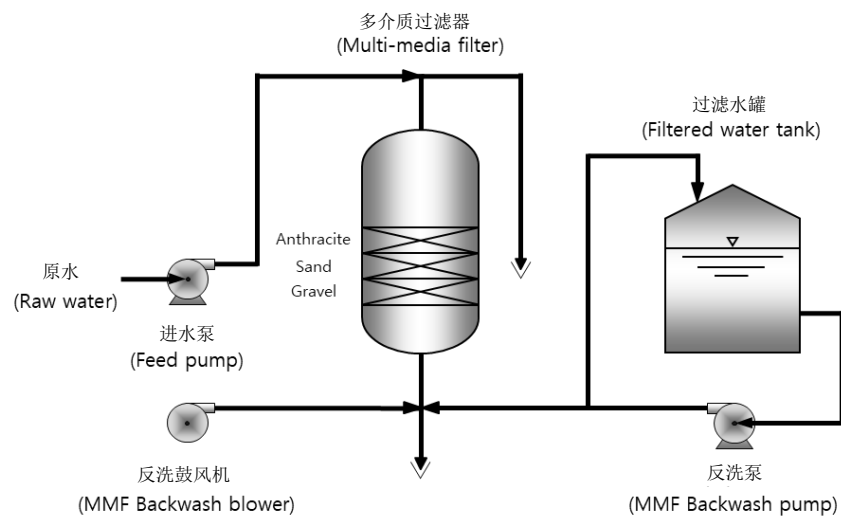
絮凝剂（Flocculant）主要使用阴离子性高分子交联物质，这是为了增加絮凝物（Floc）的粘合强度，但过量添加时可能会造成后段膜的污染，因此需要注入适当的量。

2) 多介质过滤器（Multi-media filter）

多介质过滤器用于将原水浊度比较低的水或者经澄清器（Clarifier）处理过的水浊度处理到1~2NTU以下。其原理是水中的杂质（Impurities）从过滤器上部流向底部时通过堵塞在介质（Media）上层被去除，也叫表面过滤（Surface filtration）（原水浊度：20NTU → 处理后1~2NTU）。

多介质过滤器主要使用以下介质（Media）：

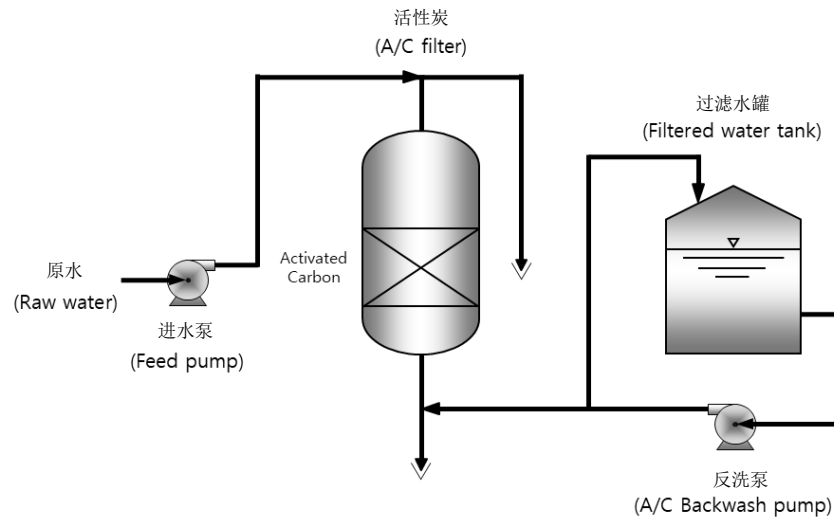
- 无烟煤（Anthracite）：煤炭的一种，碳化程度高、杂质少，悬浮物和藻类去除性能优秀
- 沙子（Sand）：滤砂，悬浮物去除性能优秀
- 砾石（Gravel）：起到支撑和防止滤砂泄漏的作用



<图2-19. 多介质过滤器工艺>

3) 活性炭过滤器（Activated carbon filter）

活性炭过滤器是一种使用具有吸附力的活性炭（Activated carbon）去除原水中的固形物、COD物质和氧化性物质（游离氯、 Cl_2 ）等的装置。代表性的吸附力可以视为范德华力（Van der Waals），控制合适的流速（Flow velocity）使细颗粒能够很好地吸附在滤料（Media）表面至关重要（COD 2~5ppm → 处理后1ppm以下，游离氯0.1~0.5ppm → 0.1ppm以下）。



<图2-20. 活性炭过滤器工艺>

4) 软水器（Softener）

去除水垢形成主要原因的硬度成分（ Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等）的工艺称为硬水软化（Softening），此时使用的装置即软水器（Softener）。一般的软水器使用Na型强酸性阳离子交换树脂，并用氯化钠（NaCl）溶液进行再生。离子交换后处理水的pH值没有变化，不会额外产生 CO_2 ，因此不需要脱气塔（Degasifier），但处理水中和硬度成分交换的 Na^+ 离子增加，因此在微量 Na^+ 离子也会引发问题的半导体、饮用水等领域应用时，推荐使用弱酸性阳离子交换树脂。

弱酸性阳离子交换树脂的官能团是羧基（Carboxyl group, COOH ），不具备中性盐分解能力，但和强酸性阳离子交换树脂相比，交换容量更高、再生效率也更高。但是，随着处理水中和硬度成分交换的 H^+ 离子增加，pH值会下降，会产生 CO_2 ，因此可能会需要另行安装脱气塔（Degasifier）。近年来，在大型系统中，为了防止无机盐垢形成，也经常添加阻垢剂（Scale inhibitor）来代替软水器。

5) 微滤/超滤（Micro filtration/Ultra filtration）

一般的多介质过滤器（Multi-media filter）或活性炭过滤器（Activated carbon filter）可以将原水的浊度降低至1~2NTU，但原水中的细小悬浮物（粒径在 $10\mu\text{m}$ 以下）则很难去除。这些细小颗粒持续流入反渗透膜时，可能会因浓缩作用污染反渗透膜，因此需要通过微滤/超滤去除。一般来说，微滤（Micro filtration）的主要去除对象是粒径在 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 之间的悬浮物、胶体等，而超滤（Ultra filtration）的主要去除对象则是粒径在 $0.01\sim 0.1\mu\text{m}$ 之间的细菌、胶体、乳液、蛋白质或高分子成分等。

微滤/超滤过滤器的进水口（Inlet）和出水口（Outlet）都分别装有压力表，可以通过压差（Differential pressure）来判断过滤器的污染程度，和压差无关，一般都会定期进行反洗和化学清洗。例如，每隔30分钟用处理水反洗1分钟，化学清洗（CEB, Chemical Enhanced Backwash）则是在处理水中添加少量次氯酸钠（NaOCl），每隔4小时进行1分钟化学清洗。通过定期



清洗进行维护时，可以大幅提高过滤器的使用寿命。

6) 筒式过滤 (Cartridge filtration)

筒式过滤器 (Cartridge filter) 主要安装在反渗透膜进水泵 (RO feed pump) 和高压泵 (High pressure pump) 之间。虽然其孔径 (Pore Size) 比前段使用的超滤 (UF) 装置大，但可以通过阻止意外细颗粒的流入来达到保护高压泵和反渗透膜的目的。筒式过滤器的孔径 (Pore size) 必须在 $10\mu\text{m}$ 以下，一般情况下，建议使用孔径为 $5\mu\text{m}$ 的筒式过滤器，如果存在胶体硅等污染风险，则建议使用孔径为 $1\sim 3\mu\text{m}$ 的筒式过滤器。

筒式过滤器和微滤/超滤过滤器一样，也需要在进水口 (Inlet) 和出水口 (Outlet) 分别安装压力表，我们可以通过压差 (Differential pressure) 来判断过滤器的污染程度，一般来说，压差在 15psi (0.1MPa) 以上时需要考虑更换过滤器，即使压差没有增大，也建议每3~6个月更换一次过滤器。

7) 阻垢剂 (Scale inhibitor)

一般来说，反渗透膜最常见的污染是无机盐垢。阻垢剂 (Scale inhibitor) 可以防止无机盐 (Inorganic salt) 的结晶增大到足以沉淀的程度，大多数阻垢剂的原理都是通过分散作用使无机盐、铁 (Fe)、有机物等颗粒被带有负电荷的阻垢剂包围，防止其结团沉积。主要使用的阻垢剂如下：

阻垢剂	特点
六偏磷酸钠 (SHMP) (Sodium hexametaphosphate)	① 最便宜、最经济 ② 效果差、不稳定 ③ 很难适当使用，因此使用呈减少趋势 ④ 水解成磷酸盐，可与钙发生沉淀 (中性和碱性条件)
有机磷酸盐 (Organo-phosphonate)	① 防结垢效果比SHMP更好、更稳定 ② LSI 2以下时效果好、比较便宜
高分子阻垢剂 (Polyacrylate)	① 防结垢效果最好、价格最贵 ② 分散力良好，但LSI 3以下时效果好

六偏磷酸钠 (SHMP, Sodium hexametaphosphate) 价格便宜，但不如高分子阻垢剂稳定，并且有形成磷酸钙水垢的风险，因此一般不建议使用SHMP。有机磷酸盐比SHMP更有效，但会和阳离子性物质结合，形成胶质 (Gum) 等难以去除的沉淀物。大多数高分子阻垢剂都带有COOH或 PO_4 等官能团，通常使用分子量在 $1,000\sim 5,000$ 之间的聚丙烯酸酯 (Polyacrylate)。

高分子有机阻垢剂比SHMP更有效，但带有阴离子电荷的阻垢剂和阳离子凝结剂或多原子阳离子 (铝或铁等) 发生反应时可能会产生沉淀物。由此产生的粘液状污染物极难从反渗透膜中去除。使用带阴离子电荷的阻垢剂时，必须通过计算化学药品的适当投入量来防止过度添加，从而防止阻垢剂与阳离子性聚合物发生反应。

8) 物理和化学灭菌 (Physical and chemical sterilization)

原水中可能会含有细菌、霉菌、藻类等多种微生物，这样的原水如不经过适当的灭菌处理就直



接流入反渗透膜中，则会浓缩并在膜表面形成微生物膜，这可能会影响渗透率和去除率并增大压差（ ΔP ）。

处理含有微生物的原水时，建议采用适当的灭菌工艺，并且最好选择简化预处理、耐氧化性优秀的反渗透膜产品。灭菌工艺通常可分为物理灭菌和化学灭菌，详细内容如下：

- 物理灭菌：紫外线灭菌灯（UV Sterilizer）

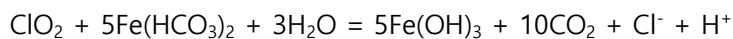
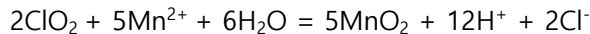
波长为254nm的紫外线可以有效灭菌，对细菌照射紫外线时，细菌的核酸会吸收紫外线的能量并发生变化，紫外线会妨碍细菌体的蛋白质和酶合成，造成微生物的变异或死亡。

- 化学灭菌：杀菌剂（Disinfectant）

杀菌剂一般可分为氧化性杀菌剂和非氧化性杀菌剂。氧化性杀菌剂包括氯（ Cl_2 ）、二氧化氯（ ClO_2 ）、臭氧（ O_3 ）等，非氧化性杀菌剂包括DBNPA（2,2-Dibromo-3-nitrilopropionamide）、异噻唑啉酮（Isothiazolinone）、甲醛等。使用聚酰胺反渗透膜时，原水中的余氯最大容许浓度为0.1mg/l，因此必须设置单独的残余氧化剂去除工艺，一般采用活性炭吸附方式和注入还原剂（ NaHSO_3 ）的方式。

9) 氧化过滤（Oxidation filtration）

一般来说，地下水中往往含有 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 等杂质，当它们流入反渗透膜中时，会被氧化成不溶于水的状态，造成反渗透膜污染。原水中含有 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 时，可以将它们转化成难溶性的 Fe^{3+} 和 MnO_2 后通过过滤去除。主要使用氯（ Cl_2 ）、二氧化氯（ ClO_2 ）、臭氧（ O_3 ）等作为氧化剂，其化学反应方程式如下：

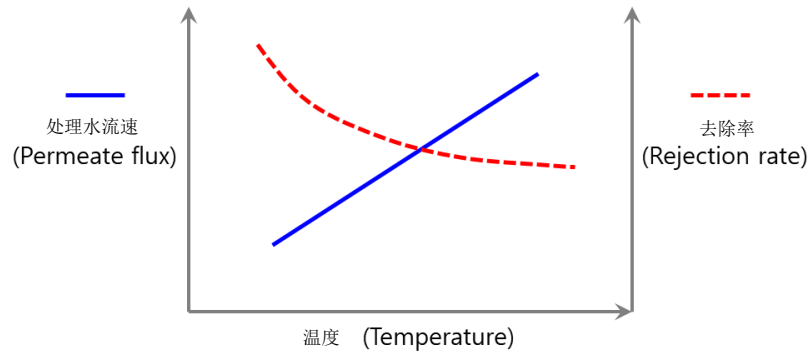


二氧化氯（ ClO_2 ）对 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 的去除能力比氯（ Cl_2 ）更优秀，因此处理 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 浓度比较高的原水时建议使用二氧化氯（ ClO_2 ）。

10) 运行条件调整（pH值、温度、回收率）

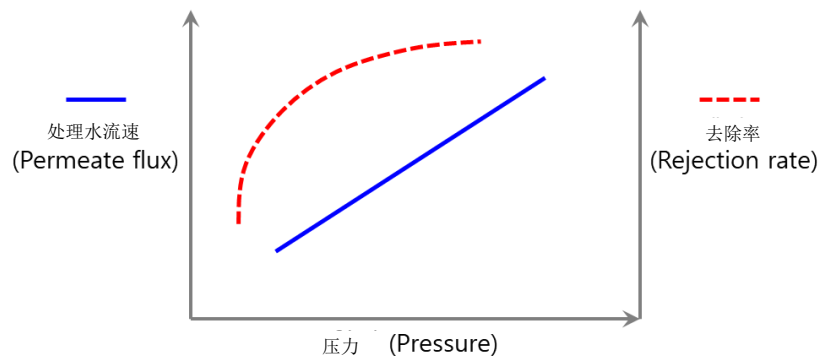
反渗透膜系统只需调整各种预处理方法和运行条件，即可应对污染等造成反渗透膜性能下降的因素，同时长时间以良好的状态使用。主要考虑的运行条件包括原水温度、进水压力、回收率、进水TDS浓度，需要根据具体情况调整适当的因素。主要的方法包括，通过下调反渗透膜系统的回收率降低浓水中的无机盐、硅等的浓度，或者通过用换热器等加热原水来提高硅等的溶解度以防止结垢。以下是主要运行条件变化时的膜性能变化图表：

- 温度（Temperature）：进水温度↑ → 处理水流速↑ / 去除率↓
（进水压力和回收率固定）



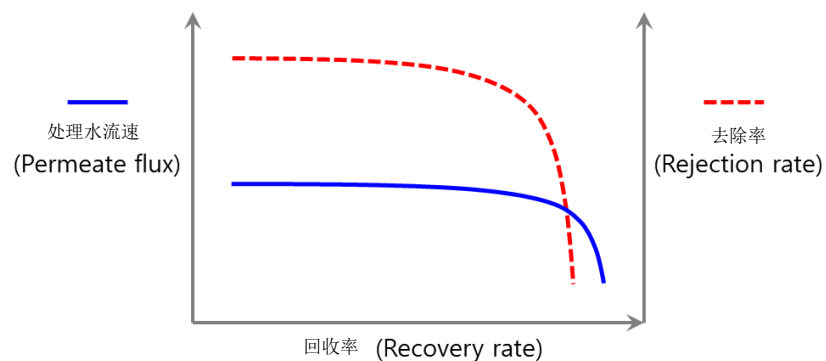
<图2-21. 不同工作温度的流速和去除率关系>

- 压力 (Pressure) : 进水压力 \uparrow \rightarrow 处理水流速 \uparrow / 去除率 \uparrow
(温度和回收率固定)



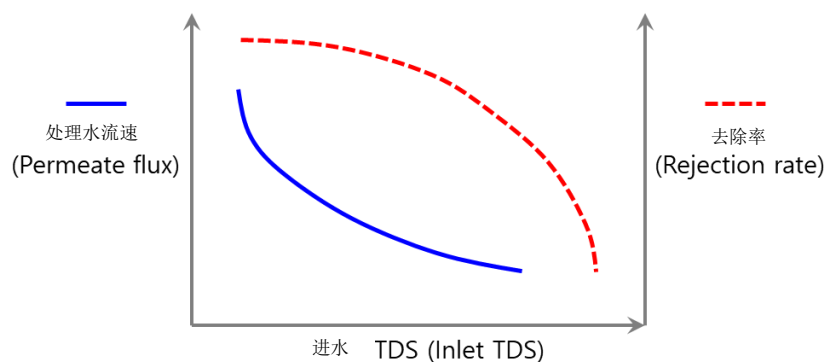
<图2-22. 不同工作压力的流速和去除率关系>

- 回收率 (Recovery rate) : 回收率 \uparrow \rightarrow 处理水流速 \downarrow / 去除率 \downarrow
(进水压力和温度固定)



<图2-23. 不同回收率的流速和去除率关系>

- 进水TDS浓度 (Inlet TDS) : 进水TDS浓度 \uparrow \rightarrow 处理水流速 \downarrow / 去除率 \downarrow
(进水压力、温度和回收率固定)



<图2-24. 不同进水TDS浓度的流速和去除率关系>

11) 预处理工艺概要 (Summary)

对各种污染物的一般预处理工艺及其效果可总结如下：

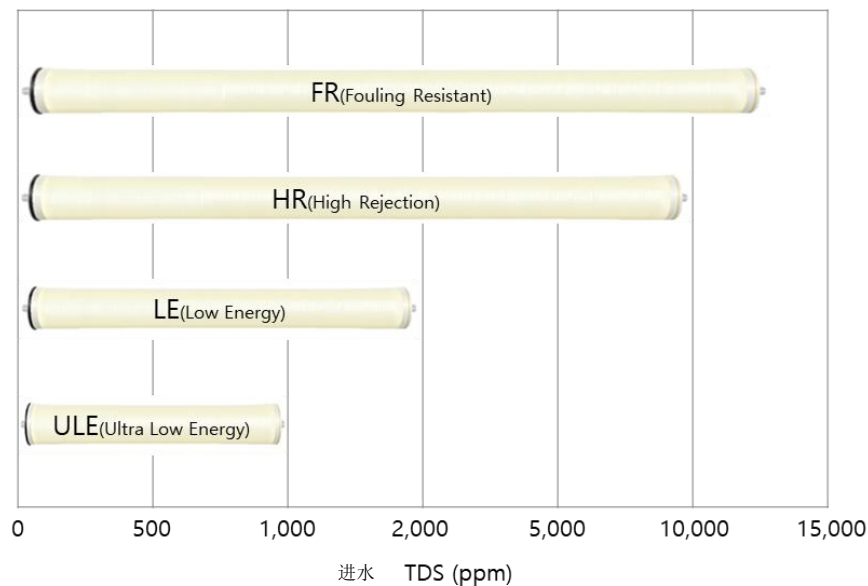
预处理工艺	污染物										
	CaCO ₃	CaSO ₄	BaSO ₄	SrSO ₄	CaF ₂	SiO ₂	SDI	Fe	细菌	氧化剂	有机物
澄清池						▲	●	▲			●
多介质过滤器						▲	▲	▲			
活性炭过滤器										●	●
软水器	●	●	●	●	●						
pH酸化	●							▲			
阻垢剂	▲	●	●	●	●	▲					
MF/UF						●	●	▲	▲		●
注入还原剂										●	
物理和化学灭菌									●		
氧化过滤								●			
石灰软化	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲			▲
预防清洗	▲					▲	▲	▲	▲		▲
调整运行条件		▲	▲	▲	▲	●					

●：效果卓越 ▲：大体有效

3. 三养TRILITE反渗透膜 (SAMYANG TRILITE RO) 产品介绍

3.1 产品种类和特点

三养TRILITE反渗透膜 (SAMYANG TRILITE RO) 在严格的质量管理下生产而成，以稳定的质量和耐用性著称，三养致力于开发和供应符合客户需求 (Needs) 的各种等级的产品。产品的种类和详细特点如下：

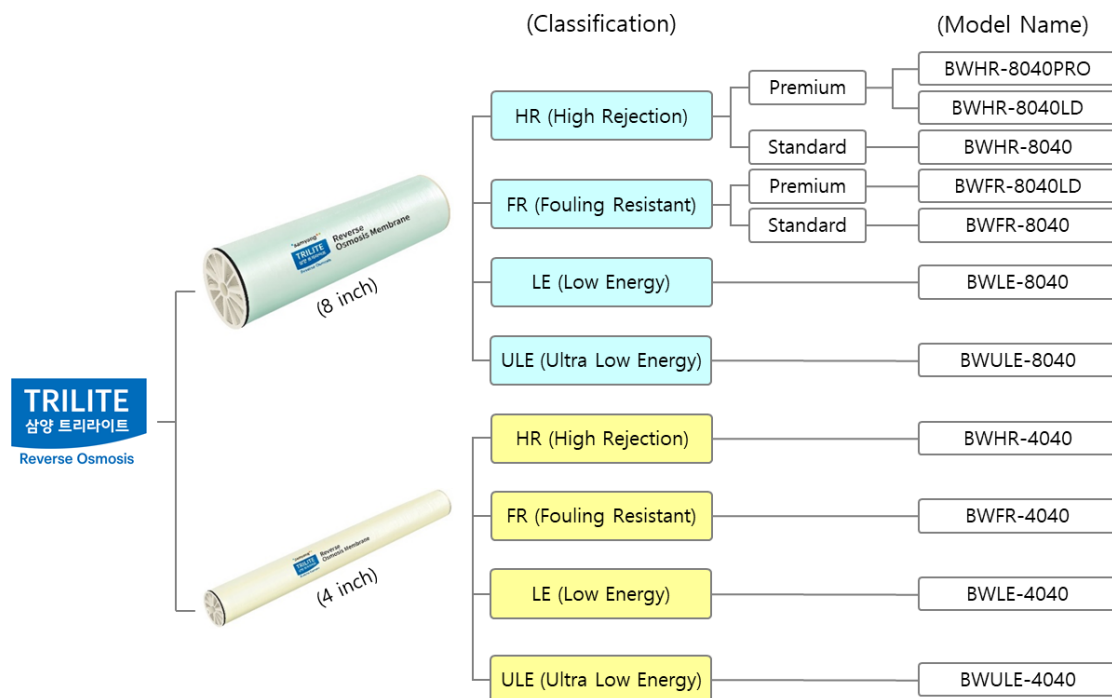


<图3-1. 不同原水TDS浓度的产品适用范围>

产品种类	详细特点
HR系列 (High Rejection Series)	该系列的特点是工作压力低、处理水量和去除率高。TDS、TOC、S iO ₂ 的去除性能卓越，可以广泛用于电气电子行业超纯水（Ultrapur e water）制备用纯水（Pure water）生产用途。 (适用范围：进水TDS在10,000ppm以下)
FR系列 (Fouling Resistant Series)	该系列是通过特殊表面处理减少膜表面吸附污染物、预防微生物繁殖的耐污染性产品。其特点是耐污染性高、初始压差小、耐用性优秀。 (适用范围：进水TDS在10,000ppm以下)
LE系列 (Low Energy Series)	该系列即使以较低（HR系列的70%左右）的工作压力运行也能稳定地获得99.5%以上的去除率。应用于系统时，可以节省初始投资成本和维护管理成本。 (应用范围：进水TDS在2,000ppm以下)
ULE系列 (Ultra Low Energy Series)	该系列即使以超低（HR系列的50%左右）的工作压力运行也能稳定地获得99.2%以上的去除率。应用于系统时，可以节省初始投资成本和维护管理成本。 (应用范围：进水TDS在1,000ppm以下)

3.2 产品阵容（Line-Up）和详细规格（Spec.）

1) 三养TRILITE反渗透膜产品阵容（Line-Up）和详细规格（Spec.）

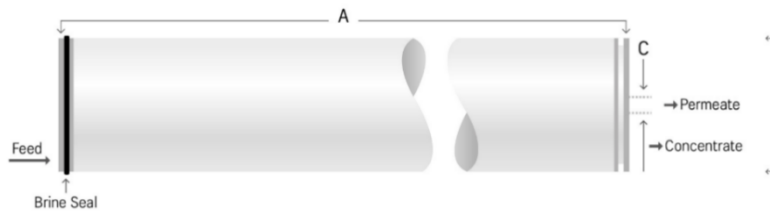


<图3-2. 三养TRILITE RO产品阵容>

种类 Type	产品名称 Model	去除率 Rejection rate %	处理水量 Permeate Flow GPD (m ³ /d)	有效膜面积 Active Membrane Area ft ² (m ²)	隔片厚度 Spacer Thickness mil	试验条件		
						试验压力 Test Pressure Psi (MPa)	NaCl 溶液浓度 Concentration of NaCl ppm	回收率 Recovery rate %
HR	BWHR-8040PRO	99.8	11,500 (43.5)	400 (37.2)	34-LD	225 (1.55)	2,000	15
	BWHR-8040LD	99.7	10,500 (39.7)	400 (37.2)	34-LD	225 (1.55)	2,000	15
	BWHR-8040	99.7	10,500 (39.7)	400 (37.2)	28	225 (1.55)	2,000	15
FR	BWFR-8040LD	99.6	10,500 (39.7)	400 (37.2)	34-LD	225 (1.55)	2,000	15
	BWFR-8040	99.5	10,500 (39.7)	400 (37.2)	34	225 (1.55)	2,000	15
LE	BWLE-8040	99.5	10,500 (39.7)	400 (37.2)	28	150 (1.03)	1,500	15
ULE	BWULE-8040	99.2	12,800 (48.4)	400 (37.2)	28	100 (0.69)	500	15
HR	BWHR-4040	99.6	2,800 (10.6)	100 (9.3)	28	225 (1.55)	2,000	15
FR	BWFR-4040	99.5	2,200 (8.3)	90 (8.4)	34	225 (1.55)	2,000	15
LE	BWLE-4040	99.5	2,600 (9.8)	100 (9.3)	28	150 (1.03)	1,500	15
ULE	BWULE-4040	99.2	2,600 (9.8)	100 (9.3)	28	100 (0.69)	500	15

2) 产品尺寸 (Size)

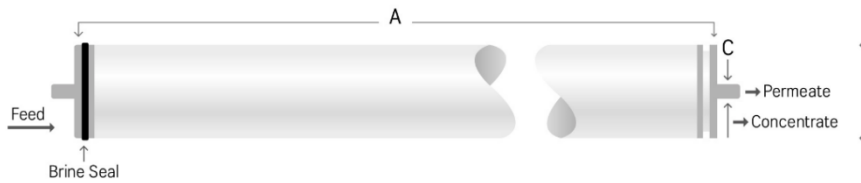
① 8040反渗透膜 (“8040”表示直径8英寸、长40英寸。)



<图3-3. 8英寸 (inch) 元件 (Element) >

A / inch (mm)	B / inch (mm)	C / Inch (mm)
40 (1,016)	7.9 (201)	1.125 (29)

② 4040反渗透膜 (“4040” 表示直径4英寸、长40英寸。)

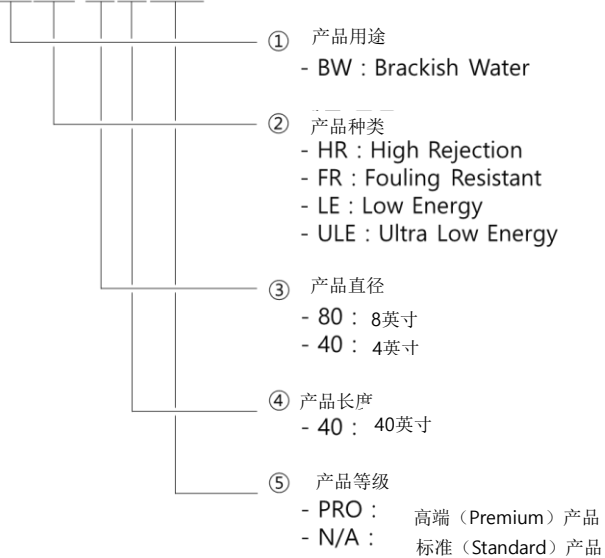


<图3-4. 4英寸 (inch) 元件 (Element) >

A / inch (mm)	B / inch (mm)	C / Inch (mm)
40 (1,016)	3.9 (99.7)	0.75 (19.1)

3) 产品命名方法

BWHR-8040PRO



4) 产品构成和包装照片

区分	8英寸	4英寸
----	-----	-----



托盘 (Pallet) 包装		
产品包装箱		
元件 (Element)		
互联器 (Interconnector)		

5) 三养TRILITE反渗透膜去除率表

去除物质 (Solute)	分子量 (Molecular Weight)	去除率 (%)	
		HR系列	LE系列
NaF	42	99.0	98.5
NaCl	58.5	> 99.5	99.5
NaHCO ₃	84	99.0	99.0
NaNO ₃	85	> 98.5	97.0
MgCl ₂	120	99.0	98.0
MgSO ₄	246	> 99.5	> 99.5
CaCl ₂	111	> 99.0	> 99.0
Ca(NO ₃) ₂	164	99.0	99.0
NH ₄ Cl	53.5	98.0	98.0
SiO ₂	60	99.0	98.0



去除物质 (Solute)	分子量 (Molecular Weight)	去除率 (%)	
		HR系列	LE系列
CuSO ₄	250	> 99.5	> 99.5
Al(NO ₃) ₃	213	95.0	90.0
Methanol	32	40.0	25.0
Ethanol	46	60.0	50.0
1-Propanol	60	78.6	60.0
2-Propanol	60	90.0	85.0
Glucose	180	> 99.0	> 99.5

※ 上表仅供参考，实际去除率可能会因离子组成、pH值、温度等运行条件不同而有所不同。

6) 产品贴纸

三养TRILITE反渗透膜产品外部粘贴的贴纸格式如下：

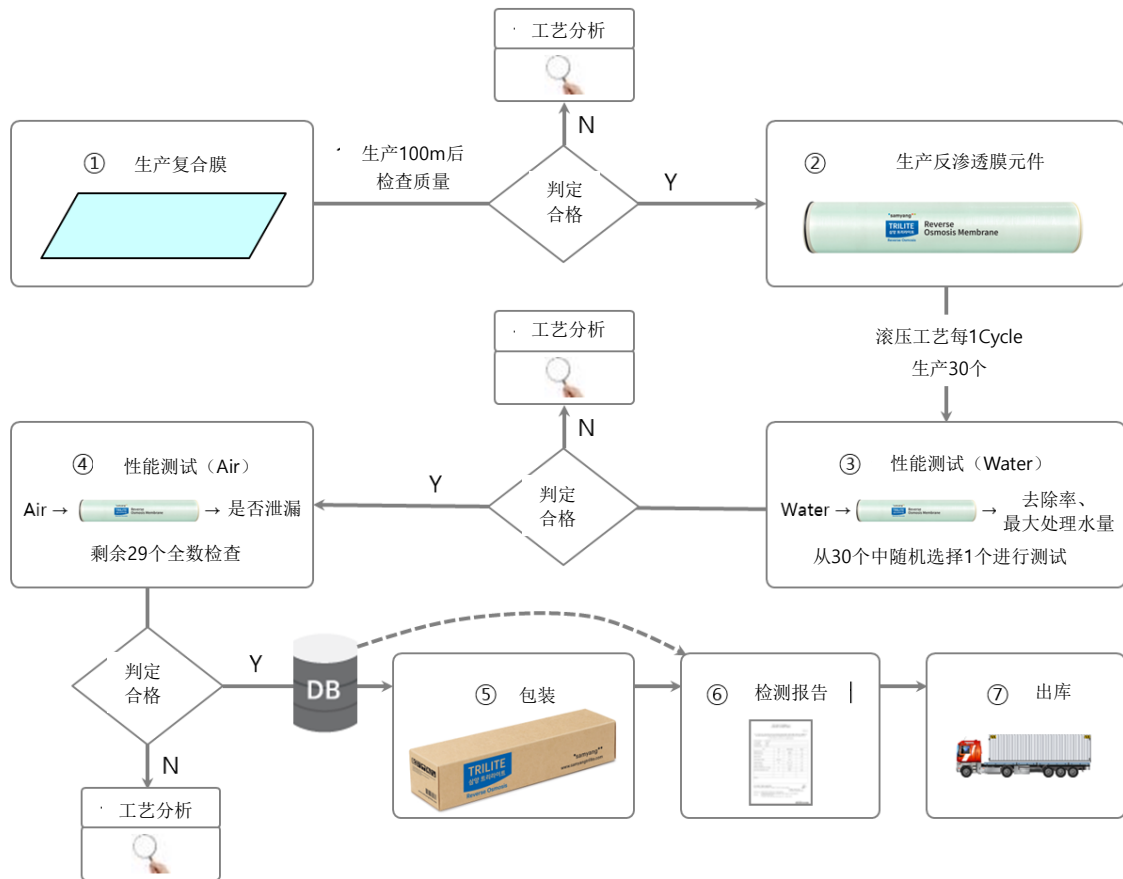
标注有产品名称 (Model)、序列号 (Serial No.)、进水流向 (Flow Direction)，通过序列号可以追踪到生产批号 (Lot No.)，查看检测报告出具当时的分析结果。



<图3-5. 产品贴纸 (Sticker) >

3.3 三养TRILITE反渗透膜质量管理体系

三养TRILITE反渗透膜产品在严格的质量管理体系下生产而成，其体系的详细内容如下：



<图3-6. 三养TRILITE（SAMYANG TRILITE）质量管理体系>

对反渗透膜产品质量影响最大的是PA复合膜（Composite Polyamide Membrane），每生产100mPA复合膜实施一次质量检测，以保证稳定的复合膜质量，每条生产线（Line）都只生产规定的一种膜（Membrane），从而最大限度地降低生产工艺变更造成的不良产品发生率。



滚压（Rolling）工艺时把30个产品作为一个批次（Lot）进行管理，从30个产品中随机选出一个产品，通过湿试验（Wet test）检查是否符合脱盐率（Salt rejection rate, %）和最大处理水量（Permeate flow, GPD或m³/天）试验标准，判定合格时对剩余29个产品进行漏气试验（Air leak test）。此时将进行湿试验的一个产品废弃不销售，判定不合格的产品也全部废弃。最终检查完成后在数据库（Database）中录入检查结果，出库时出具检测报告（COA）并提供。

3.4 检测报告（COA）格式

在产品质量检测结果的基础上制定和出具COA并提供给客户，产品检测报告（COA）格式如下。

产品检测报告（COA）格式如下：



INSPECTION AND TEST REPORT

ISSUE DATE : 2023-10-11

We hereby certify that undermentioned products were duly inspected by us
and were found to conform to our specifications.

Customer		Model Name	TRILITE BWHR-8040
End User		Quantity (EA)	120

	Item	Unit	Specification
Testing Conditions	Testing Pressure	psi	224~226
	Temperature of testing solution	°C	23±3
	Concentration of testing solution (NaCl)	μs/cm	3,900~4,150
	pH value of testing solution	-	6.5~7.0
	Recovery rate	%	15~18
Performance Standard Requirements	Typical rejection rate	%	99.7
	Minimum rejection rate	%	99.4
	Permeate flow rate	GPD	8,800~13,200

Item No.	Rejection Rate (%)	Permeate Flow (GPD)	Result
1	99.72	12,778	PASSED

Serial No. :

S23K02-01-0101	S23K02-01-0102	S23K02-01-0103	S23K02-01-0104
S23K02-01-0105	S23K02-01-0106	S23K02-01-0107	S23K02-01-0108
S23K02-01-0109	S23K02-01-0110	S23K02-01-0111	S23K02-01-0112

We certify the above statement of quality to be true and correct.

Manager Seong-Min Kim
Production Team

Head Office : SAMYANG CORPORATION
31 Jong-ro 33-gil, jongno-gu, Seoul, Korea / TEL : 02-740-7732~7

Plant : SAMYANG CORPORATION ULSAN 1 PLANT
285 Jansaengpo-ro, Nam-gu, Ulsan, 44778, Korea / TEL : 052-279-4782

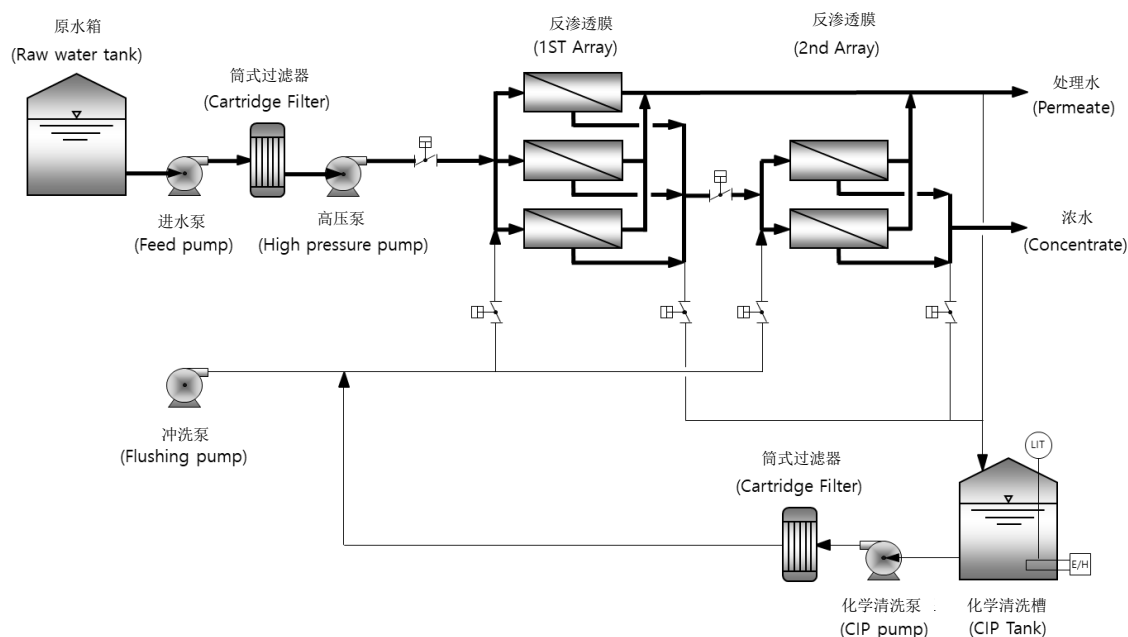
3.5 同等产品比较表（Cross-Reference Guide）（参考用）

类型								
8英寸	HR	BWHR-8040PRO	BW30XHR PRO-400/34	CPA7-LD		TM720D	BW 400R G2	PURO-II
		BWHR-8040LD	BW30 PRO-400/34	CPA5-LD	RE8040-BE34		BW 400 R Dura	LP400-LD
		BWHR-8040	BW30 PRO-400	CPA3	RE8040-BE		BW 400 R	LP22-8040
	FR	BWFR-8040LD		LFC3-LD	RE8040-FEN34	TML20D-400	BW 400 AFR G2	FR400-LD
		BWFR-8040					BW 400 AFR	FR12-8040
	LE	BWLE-8040	ECO PRO-400	ESPA2-LD	RE8040-BLR	TMG20D-400	BW 400 ES(L)	ULP32-8040
	ULE	BWULE-8040	XLE-440	ESPA4-LD	RE8040-BLF	TMH20A-400C	BW 400 UES	XLP12-8040
4英寸	HR	BWHR-4040	BW30 PRO-4040	CPA2-4040	RE4040-BE	TM710D	BW 4040 R	LP21-4040
	FR	BWFR-4040		LFC3-LD-4040	RE4040-FEN	TML10D		FR11-4040
	LE	BWLE-4040	LC LE PRO-4040	ESPA2-LD-4040	RE4040-BLN	TMG10D	BW 4040 ES	ULP21-4040
	ULE	BWULE-4040	XLE PRO-4040	ESPA4-LD-4040	RE4040-BLF	TMH10A	BW 4040 UES	XLP11-4040

4. 反渗透膜系统的设计

4.1 反渗透膜系统概要

典型的反渗透膜系统可以采用多种预处理工艺，还可以加装用来定期清洗反渗透膜的化学清洗（CIP, Cleaning In Place）设备。下图是典型的反渗透膜系统示例：



<图4-1. 反渗透膜系统示例>

反渗透膜系统的性能（Performance）用处理水（Permeate）的流量和纯度这两个参数评估，性能可能会因进水的TDS、压力、回收率等不同而有所不同。设计反渗透膜系统时，目标通常是最大限度地减少进水压力和元件（Element）数量，同时尽可能地提高处理水的水质和回收率。

4.2 设计反渗透膜系统时的推荐工作限制条件

设计反渗透膜时最大的影响因素是进水的污染程度。反渗透膜在使用过程中会被进水中的颗粒和胶体物质污染，膜表面的污染物浓度会随着渗透通量（Permeate flux）和回收率（Recovery rate）增加而增加，因此可以说渗透通量高的系统中膜会被快速污染，很有可能需要频繁地进行化学清洗（CIP）。为了最大限度地减少这些膜污染并防止机械损坏，设计反渗透膜系统时建议考虑推荐运行限制条件（Operating limits），其详细内容如下：

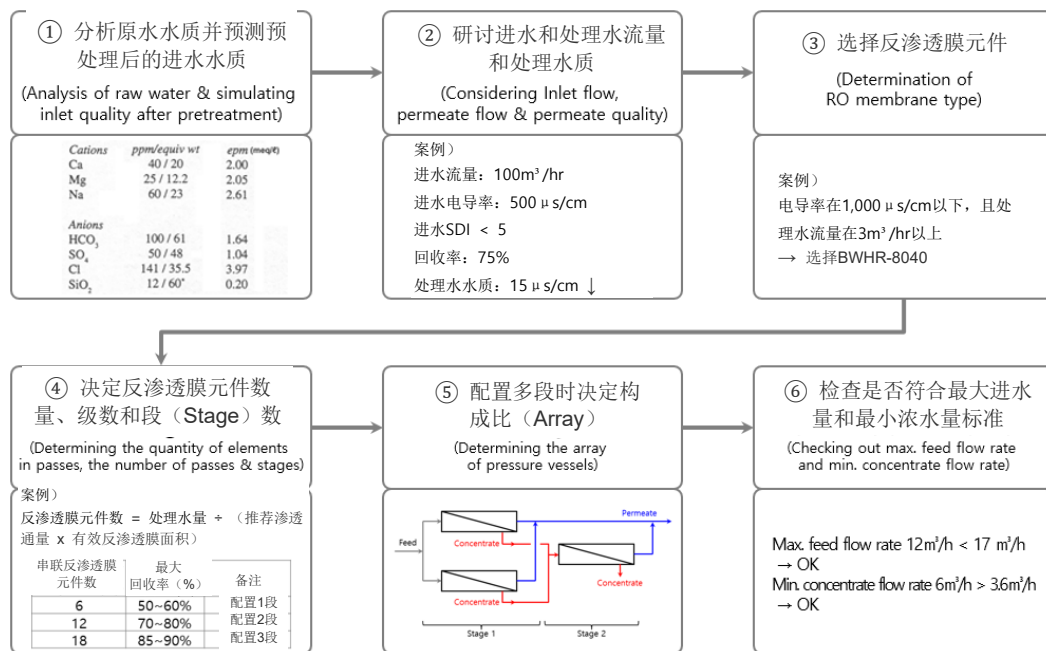
不同进水种类的推荐 运行限制条件（Operating limits）		RO 处理水	地下水	自来水	地表水		废水	
					MF/UF 处理水	传统 处理方法	MF/UF 处理水	传统 处理方法
进水SDI		<1	<3	<3	<3	<5	<3	<5
推荐渗透流量	GFD	21~25	16~19	14~19	14~18	12~16	10~14	7~12
	LMH	35~43	27~32	24~32	24~31	20~27	17~24	12~20



单个元件的最大回收率 (%)		30	19	17	17	15	14	12
最大处理水量 GPD (m³/d)	8英寸 (400ft²)	11,000	9,100	7,900	7,900	7,200	6,400	5,700
		(42)	(34)	(30)	(30)	(27)	(24)	(22)
	4英寸	2,400	2,000	1,600	1,600	1,500	1,400	1,200
		(9.1)	(7.6)	(6.1)	(6.1)	(5.7)	(5.3)	(4.5)
最小浓水量 GPM (m³/h)	8英寸 (400ft²)	10	13	13	13	15	18	20
		(2.3)	(3.0)	(3.0)	(3.0)	(3.4)	(4.1)	(4.6)
	4英寸	2	3	3	3	3	4	5
		(0.5)	(0.7)	(0.7)	(0.7)	(0.7)	(0.9)	(1.1)
最大进水量 GPM (m³/h)	8英寸 (400ft²)	75	75	73	73	67	61	61
		(17)	(17)	(16.6)	(16.6)	(15)	(14)	(14)
	4英寸	16	16	16	16	16	16	16
		(3.6)	(3.6)	(3.6)	(3.6)	(3.6)	(3.6)	(3.6)

4.3 各阶段的设计指南

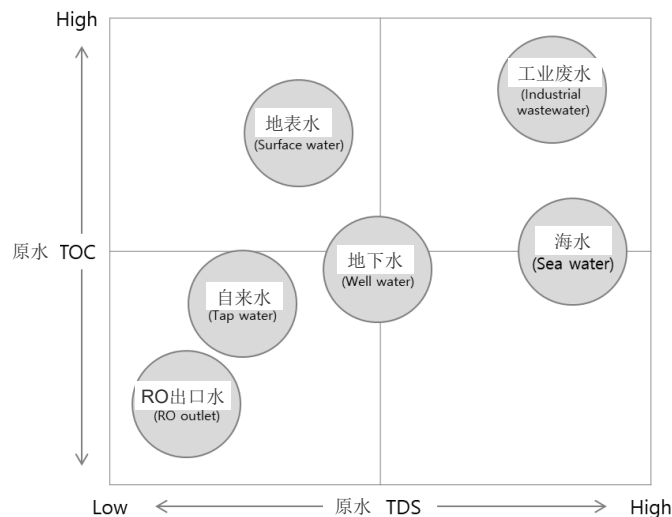
反渗透膜系统设计必须考虑多种因素 (Factor)，各阶段的设计指南如下：



<图4-2. 反渗透膜系统各阶段的设计指南>

1) 分析原水水质并预测预处理后的进水水质

分析预处理前的原水水质, 原水水质不符合前面介绍的反渗透膜进水条件时, 预测配置适当的预处理设备后的预计进水水质。一般来说, 原水可根据水源 (Raw water resource) 和水质分类如下:



<图4-3. 基于TDS、TOC浓度的原水分类>

- TDS在50ppm以下的RO出口水 (TDS、TOC都非常低)
- TDS在500ppm以下的自来水 (TDS、TOC都比较低)
- TDS在5,000ppm以下的地下水 (TDS中等、TOC中等)
- TDS在5,000ppm以下的地表水 (TDS中等、TOC高)
- TDS在35,000ppm左右的海水 (TDS非常高、TOC中等)
- TDS、TOC都非常高的工业废水



原水水质分析是反渗透膜系统设计的标准，因此需要尽可能详尽地掌握。下表是原水分析表的示例：

pH		浊度 (NTU)			水温 (°C)	
SDI		电导率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)			ORP (mV)	
阳离子组成		ppm	meq/l	阴离子组成		ppm
Ca ²⁺				Cl ⁻		
Mg ²⁺				SO ₄ ²⁻		
Na ⁺				CO ₃ ²⁻		
NH ₄ ⁺				HCO ₃ ⁻		
Ba ²⁺				PO ₄ ³⁻		
Sr ²⁺				F ⁻		
K ⁺				NO ₃ ⁻		
Fe ²⁺				SiO ₂		
Fe ³⁺				其他阴离子		
Al ³⁺				其他阴离子		
阳离子合计				阴离子合计		
TDS (ppm)				BOD (ppm)		
总硬度 (as CaCO ₃ ppm)				COD (ppm)		
总碱度 (mmol/L)				微生物数 (per/L)		
P-碱度 (mmol/L)				余氯浓度 (ppm)		

※ Ba²⁺和Sr²⁺必须用ppb和ppm的浓度进行试验。

2) 研讨进水和处理水流量和处理水质

确认用户的处理水质和处理水量要求，并研讨在前一阶段探讨的预处理后进水的进水量和平衡 (Balance)。

3) 选择反渗透膜元件

在上一阶段研讨的进水/处理水质、进水/处理水量基础上选择元件 (Element) 类型。一般来说，处理水量大于3m³/hr时使用8英寸元件，处理水量低于该数值时使用4英寸元件。产品推荐指南如下：

- 处理水的水质必须比较高且进水的TDS低于8,000ppm时
 - 选择HR (High Rejection) 系列 (Series) 为宜
- 处理水的水质比较低也没关系且进水的TDS低于2,000ppm时
 - 选择LE (Low Energy) 系列 (Series) 为宜
- 处理水的水质比较低也没关系且进水的TDS低于1,000ppm时
 - 选择ULE (Ultra Low Energy) 系列 (Series) 为宜
- 进水是废水或有大量污染物流入时
 - 选择FR (Fouling Resistant) 系列 (Series) 或使用34mil Spacer的产品为宜



- 进水TDS低于500ppm时
 - HR、LE、ULE、FR系列均可使用，但考虑到运行的经济性，推荐选择ULE系列

4) 决定反渗透膜元件（Element）数量以及级（Pass）和段（Stage）的排列

目标是以处理水质和回收率要求为基准，通过适当组合元件数量以及级（Pass）和段（Stage）的排列最大限度地减少工作压力和元件数量，同时尽可能地提高处理水的水质和回收率。

反渗透膜元件在压力容器（Pressure vessel）中串联使用，串联连接的反渗透膜元件数量由预计回收率决定。串联连接的反渗透膜元件过多时，最终可能会导致反渗透膜元件的回收率增大，进而导致形成无机盐垢的风险增加，因此通常会在一个压力容器中串联连接6~8个反渗透膜元件使用，需要串联连接更多的元件时则采用多段（Stage）设计。目前大多数反渗透膜系统都采用二段式设计，3段以上的系统主要用于要求高回收率的用途或浓缩用途。

回收率和串联连接的反渗透膜元件数量的关系如下，下面的数据是以原水是半咸水（Brackish water）为基准得出的，原水是海水（Sea water）时回收率会更低。

串联元件数量	最大回收率（%）	备注
1	15~20%	
2	28~33%	
3	38~43%	
4	43~48%	
5	43~52%	
6	50~60%	配置1段，平均回收率为55%
12	70~80%	配置2段，平均回收率为75%
18	85~90%	配置3段，平均回收率为87%

通过以下方法计算需要的反渗透膜元件数量和需要的压力容器数量。

确认所选反渗透膜类型的推荐渗透通量（LMH或GFD）后，

反渗透膜元件数量 = 处理水量 ÷ （推荐渗透通量 × 有效反渗透膜面积）

5) 决定配置多段时的构成比（Array或Stage）

在多段反渗透膜系统中，如果在1段安装4个压力容器、2段安装2个压力容器，则构成比（Array）为2:1。存在3段时，如果1段安装4个、2段安装2个、3段安装1个，则构成比为4:2:1。

多段反渗透膜系统中，前段的浓水作为后段的进水流入。前段除了处理水以外的剩余水量成为进水，因此后段的进水量会减少。要想防止污染物沉积在反渗透膜表面，后段也必须保持充足的进水流量，以此来保证反渗透膜表面有足够的清洗力。为此，配置系统时通常让后段的压力容器数量少于前段的压力容器数量。和前段相比，后段的压力容器数量比例越高，后段的进水流量越大，比例越低，前段元件的回收率越低。



6) 检查是否符合最大进水量和最小浓水量标准

设计结束后检查是否超出最大进水量（Max. feed flow rate）和是否高于最小浓水量（Min. concentrate flow rate）的过程至关重要。超出最大进水量时元件的稳定性可能会出问题，低于最小浓水量时，反渗透膜可能会过早地被污染、使用寿命也可能会缩短。

二段式系统中，进水量一般用处理水量 \times 1/回收率计算，用该值除以前段的压力容器数量来检查是否符合标准。浓水量用进水量 - 处理水量计算，然后用该值除以后段的压力容器数量来检查是否符合标准。

4.4 反渗透膜系统设计示例

假设有一个假定项目，其设计示例如下：

1) 分析原水水质并预测预处理后的进水水质

- 原水：地表水，预处理方式：传统方法
- 预处理后的进水水质：600 μ S/cm，满足反渗透膜系统进水条件，SDI <5

2) 研讨进水和处理水流量和处理水质

处理水量：50m ³ /h	处理水质：15 μ S/cm ↓
去除率：98% ↑	回收率：75%

3) 选择反渗透膜元件

- 进水量大于4m³/h，因此选择8英寸反渗透膜元件
- 电导率低于1,000 μ S/cm，因此选择ULE（Ultra Low Energy）系列的BWULE-8040

4) 决定反渗透膜元件数量以及级数和段（Stage）数

- BWULE-8040的有效反渗透膜面积为37m²（400ft²）
- BWULE-8040的推荐渗透通量为20~27LMH（12~16GFD），因此采用中间值24LMH
- 反渗透膜元件数量：处理水量 \div （推荐渗透通量 \times 有效反渗透膜面积）
 $\rightarrow 50\text{m}^3/\text{h} \div (24\text{l}/\text{m}^2\text{hr} \times 37\text{m}^2/\text{个}) \approx 57\text{个}$
- 压力容器数量：57 \div 6（采用标准压力容器） \approx 10个
 \rightarrow 实际需要的元件数量为60个

5) 决定配置多段时的构成比（Array）

- 回收率为75%，因此采用二段配置，10个压力容器按照2:1的比例排列（6:4或7:3）

6) 检查是否符合最大进水量和最小浓水量标准

- 进水量：处理水量（50m³/h） \times 1/回收率（75%） = 66.7m³/h，
前段的压力容器有6个时 $66.7 \div 6 = 11.1\text{m}^3/\text{h} < 15\text{m}^3/\text{h}$
（传统预处理，SDI < 5时最大处理水量）



- 浓水量：进水量（66.7m³/h） - 处理水量（50m³/h） = 16.7m³/h,
后段的压力容器有4个时 $16.7\text{m}^3/\text{h} \div 4 = 4.2\text{m}^3/\text{h} > 3.4\text{m}^3/\text{h}$
（传统预处理，SDI < 5时最小浓水量）

4.5 设计反渗透膜系统时的其他参考事项

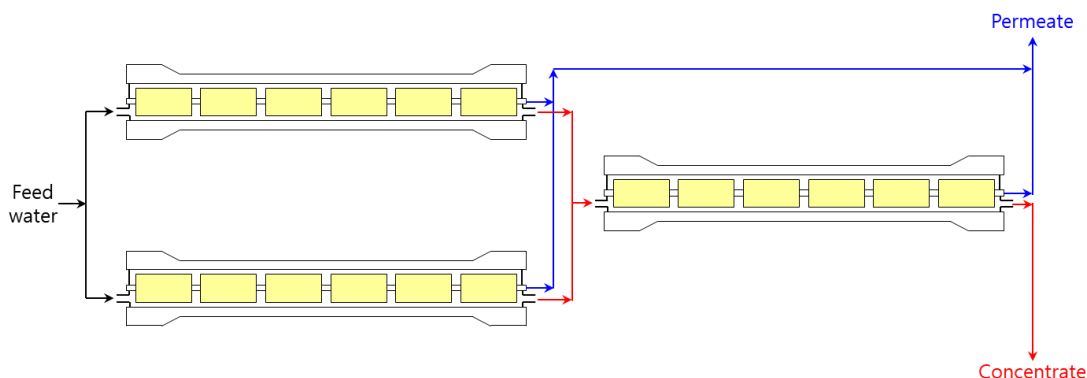
- 1) 反渗透膜系统的压力容器（Pressure vessel）必须牢牢地固定在适当的滑橇（Skid）上，以免系统运行时晃动，压力容器两端须留出可以安装/更换元件的空间。
- 2) 高压泵启动或停止时，可能会因水锤作用（Water hammering）发生液压冲击。直接对反渗透膜元件造成冲击时，反渗透膜的粘合线可能会被破坏。为防止和减少此类冲击，设计高压泵时建议使用变频泵、软启动器（Soft Starter）。
- 3) 单个反渗透膜元件的压降（Pressure drop）不能超过15psi，压降过大时，可能会发生套叠现象。套叠现象是一种元件内产生标准值以上的压降时以处理水集水管为基准、元件像望远镜一样被推开并导致分离膜破坏的现象，该现象可能会造成反渗透膜损坏。

因此，运行反渗透膜系统期间，必须将单个反渗透膜元件的压降控制在不超过15psi、单个压力容器的压降控制在不超过60psi。为预防套叠现象，压力容器的前/后段压降增加15%以上时建议立即实施化学清洗。

- 4) 过大的背压（Back pressure，处理水的压力和进水/浓水的压力差之差）可能会使反渗透膜的聚酰胺脱盐层脱落，给反渗透膜元件造成不可逆的损坏，在任何情况下，都不得对反渗透膜元件施加5psi以上的背压。可以通过在最终处理水总管（Header Line）中安装止回阀（Check valve）来防止这种情况。
- 5) 设计反渗透膜系统时每次启动和结束时都低压清洗反渗透膜元件，建议在使用手册中写明：短时间（少于7天）停机时，每天使用反渗透膜处理水清洗元件。长时间（7天以上）停机时，需要用0.5~1.0% SBS（NaHSO₃）保存液处理后保管。
- 6) 由于进水温度会影响处理水质、处理水量等膜的性能（Performance），因此建议在系统内安装温度计监测倾向性（Trend）并在系统运行时做出适当的判断。
- 7) 进水的pH值是计算LSI指数并判断结垢倾向的重要指标，因此必须进行监测，进行CIP清洗时也必须监测清洗液的pH值。
- 8) 预处理过程中采用氧化消毒或使用氧化剂的其他处理方法时，一般需要去除残留氧化剂并添加还原剂来保护反渗透膜元件。此时测量进水的ORP，可以判断添加的还原剂是否充分、氧化剂是否流入了反渗透膜元件。
- 9) 压力表使用前必须进行校准，压力表的安装位置须满足以下测量要求事项：
 - 必须能够测量反渗透膜系统所有区段的进水和处理水压力。

- 必须可以测量预处理设备（砂滤器、活性炭过滤器、微滤/超滤过滤器）的进水和过滤水压力，并判断是否需要清洗过滤器或更换过滤元件。
- 在高压泵的进水口和出水口分别安装压力开关，以便在进水口的压力过低或出水口的压力过高时进行调节，保护高压泵和反渗透膜元件不被损坏。

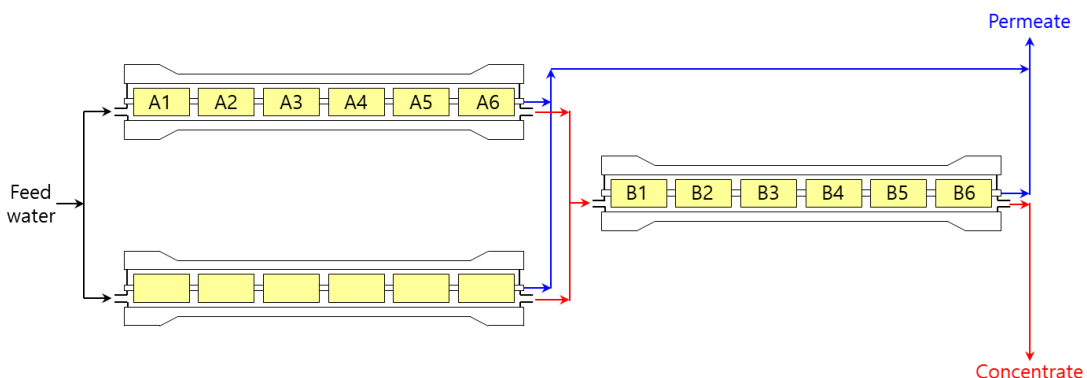
10) 运行多段系统时，根据系统的运行特点和压力容器内的反渗透膜元件顺序等理解不同的运行特点至关重要。为了举例说明，我们假设有个3个6件式压力容器以二段式（2:1）配置的系统，具体如下：



<图4-4. 2:1压力容器排列>

二段式系统的平均回收率通常会设计成75%，回收率高于75%时须考虑三段以上的系统。相反，回收率过低时（不足55%），前段压力容器的进水流量会过度升高，进水/浓水侧的压力会过度下降，这可能会导致反渗透膜元件损坏。因此，回收率不足50%的系统一般采用单段配置。

压力容器中用互联器连接的反渗透膜元件的处理水量、压力、回收率会根据顺序表现出不同的倾向。



<图4-5. 压力容器内部元件顺序>

对于处理水量，前段压力容器中位于最前面的反渗透膜元件（A1）的处理水量最高，后段压力容器中位于最后面的反渗透膜元件（B6）的处理水量最低，压力则是A1的压力最高、B6的压力最低。

在单个压力容器内，第一个元件（A1、B1）的处理水质最好，最后一个元件（A6、B6）的处理水质最差。在上图的系统中，可以说元件A1的处理水质最好、元件B6的处理水质最差。如果在

上述原理下满足处理水质的要求，还有一种以单个压力容器为基准从两个方向生产处理水后混合或者将后段处理水（Rear permeate）重新用作进水的方式，这被称为流量分岔（Split partial），这会减少反渗透膜设备的容量。

前段的回收率平均高于后段（ $A > B$ ），单个压力容器内最后一个元件的回收率最高（A6、B6）。因此，在上图的系统中，元件A6的回收率最高，因此必须注意以元件A6为基准，不要超出推荐回收率上限值。超出推荐回收率上限值时，可能会污染反渗透膜。

11) 反渗透膜系统的管道和泵材质必须考虑工作压力和因原水组成产生的腐蚀性后选择。

- 一般来说，低压（不足10bar）运行的反渗透膜设备通常会使用塑料材质（PVC、UPVC、CPVC、GRP等）的管道而不是钢（Steel）材质的管道。塑料管道的运行容许压力比钢（Steel）质管道低，但耐腐蚀性和耐化学性非常优秀，价格也更便宜，在可容许的压力范围内运行时，使用塑料管道更经济。
- 原水的腐蚀性非常高且以高压运行反渗透膜设备则需要使用钢（Steel）质管道。通常会使用不锈钢（Stainless Steel）材质，处理水（Permeate）管道建议使用304级以上的不锈钢，进水和浓水管道则建议使用316级以上的不锈钢。用于海水淡化时，需要选择316/316L级以上的不锈钢材质，进水和浓水管道材质也可以考虑使用双相不锈钢（Duplex Stainless Steel）或超级双相不锈钢（Super Duplex Stainless Steel）材质。

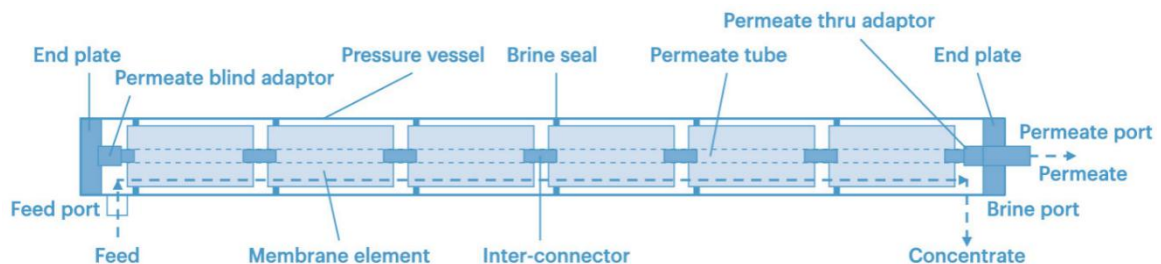
5. 反渗透膜元件安装/更换

5.1 安装/更换前的准备事项

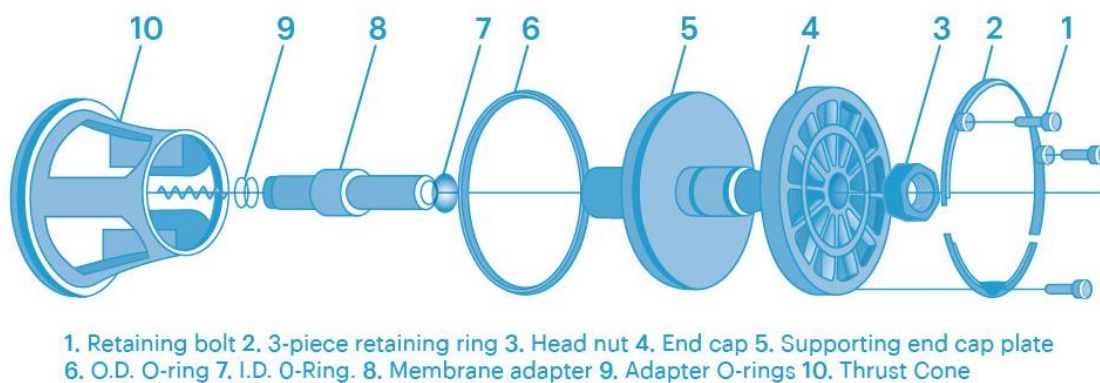
- 1) 确认要安装/更换的元件数量和产品名称，重新核对是否与检测报告一致和分析结果。
- 2) 准备安全装备（护目镜、安全靴、橡胶手套等）、润滑用甘油、作业工具等。
- 3) 需要安装/更换的各种零件和工具、重型装备（轿厢等）。
- 4) 预处理设备（砂滤器、活性炭过滤器、微滤/超滤过滤器等）通过提前实施反洗工艺等进行维护。
- 5) 检查进水管，确保水质适合用作反渗透膜系统的进水。

5.2 压力容器零件构成

反渗透膜元件安装在专用压力容器（Pressure vessel）内，使用的零件因种类而异，但一般配置如下：



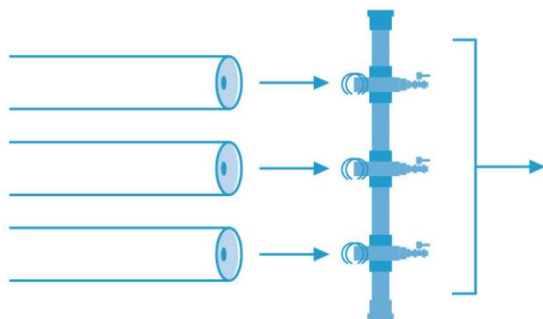
<图5-1. 反渗透膜压力容器的配置>



<图5-2. 处理水端口（Permeate port）端帽（End cap）组装图>

5.3 压力容器（Pressure vessel）零件拆卸

- 1) 更换现有设备时应停止设备运行，释放压力容器内的压力。
- 2) 拆下压力容器上装配的处理水管道。



- 3) 从压力容器两端拆下固定环（Retaining ring）和支撑环（Support ring），使用端帽抽取器（End cap extractor）或其他工具拆下端帽（End cap）。



- 4) 用反渗透膜处理水清洗压力容器内部，用干毛巾擦除内部异物。



5.4 旧元件拆除（更换时）

将与互联器（Inter-connector）相连的反渗透膜元件从压力容器的进水侧推出。将反渗透膜元件推出压力容器时，小心地从另一侧（处理水侧）接住反渗透膜元件，以免因重力损坏互联器，并在保持水平的状态下将其逐个取出。建议旋转反渗透膜元件使其从互联器中分离。



5.5 新元件装载（Loading）

- 1) 在压力容器进水侧装载（Loading）元件。此时，参考元件外部贴纸上标注的流向（Flow direction），确认插入方向是否正确。
- 2) 将元件推入压力容器约3/4左右，在盐水密封（Brine seal）和互联器用O型圈（O-ring）上涂抹润滑剂后插入。将互联器插入处理水集水管（Permeate tube）。
- 3) 重复上述过程，直到元件全都安装到压力容器内部。
- 4) 最后由于元件内不插入互联器，因此需要多加注意。



- 5) 在压力容器的处理水端口（Permeate port）内壁涂抹润滑剂。此时如果是超纯水装置，则建议不要涂抹润滑剂。



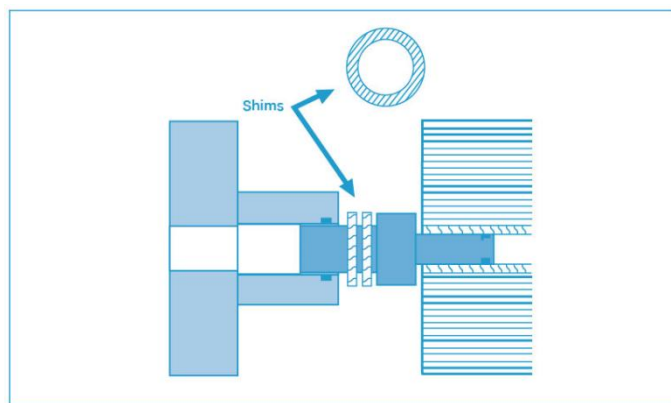
- 6) 如果推力锥（Thrust cone）和密封板（Sealing plate）分离成两部分，则组装它们并在连接器上涂抹润滑剂。



- 7) 重新安装拆下来的端帽（End cap）。



- 8) 回到压力容器的进水侧，将反渗透膜元件彻底推入压力容器内，使处理水侧的端板密封组件和第一个反渗透膜元件紧密接触后，在压力容器的进水侧安装端板密封组件。
- 9) 在下个压力容器中重复上述步骤。
- 10) 安装完所有元件后连接进水、浓水和处理水用外部管道。
- 11) 装载反渗透膜元件后可能会需要填隙，以减少先头元件的表面和适配器Hub表面之间的空间，该工艺称为填隙（Shimming）。压力容器在制作时会考虑容许误差，以保证反渗透膜元件的长度即使略有不同也被容许，这被称为自由空间（Free board）。如果不填充这部分，则启动或停止系统运行时反渗透膜元件可能会前后活动，导致内部密封件（Sealing）磨损，严重时可能会损坏设备。填隙（Shimming）时使用的垫片（Shim）是塑料圈，厚度约为0.2英寸（5mm），内径略大于适配器头端。垫片（Shim）应始终安装在进水侧的适配器上，元件应和浓水侧的止推环（Thrust ring）和端帽（End cap）牢固紧贴。



<图5-3. 填隙 (Shimming) >

6. 反渗透膜系统初始启动

6.1 初始启动前的检查事项

- 1) 新安装或更换后初始启动反渗透膜系统前的检查事项中，最重要的是检查预处理设备是否正常。需要维修预处理设备时，应通过反洗等清洗工艺来满足反渗透膜进水条件。
(一般的进水条件: $SDI < 5$, 浊度低于1NTU, 余氯低于0.1ppm, 温度在45℃以内, pH值在3~10, 不包含其他氧化剂 (ORP低于200mV))
- 2) 检查所有反渗透膜系统阀门是否都能正常开关。处理水阀门、浓水阀门、浓水压力调节阀、高压泵的流量调节用旁通 (by-pass) 阀必须彻底打开。
- 3) 检查预处理用化学药品罐中是否按照运行手册上的浓度充填了正确的产品, 并确认投入装置的设置和运行状态有无问题。
- 4) 检查所有测量仪器是否都已正确安装并完成校准。
- 5) 检查防背压 (Back pressure) 装置和防液压冲击装置安装是否正确及运行状态有无问题。
- 6) 检查各种泵和自动控制系统是否正常运行。

6.2 初始启动指南

- 1) 以低压向压力容器注入进水, 清洗 (Flushing) 反渗透膜元件。此时建议将进水压力控制在30~60psi以内、流量控制在相应反渗透膜元件最大进水量60~70%左右。建议以低压条件清洗15~25分钟左右, 再以高压条件清洗60~90分钟左右, 阻垢剂仅在高压清洗时注入。清洗过程中产生的浓水和处理水必须彻底排出。
- 2) 启动高压泵时应完全打开浓水侧的阀门, 检查高压泵的排出压力, 并慢慢调节浓水侧的压力调节阀, 避免给元件造成剧烈冲击。
- 3) 进行清洗工艺并检查管道和系统的连接零件等是否泄漏。
- 4) 对于没有水锤作用 (Water Hammering) 防止装置的小型反渗透膜系统, 启动高压泵前必须先向压力容器内注入进水 (用于排出空气), 以免反渗透膜元件受到水锤作用的影响。大型反渗透膜系统通常采用变频启动或软启动器 (Soft Starter)。
- 5) 慢慢调节高压泵的旁通 (by-pass) 控制阀, 逐渐增加进水流量并慢慢关闭浓水控制阀来提高压力, 直到系统回收率和处理水量达到设计标准值。压力增加时间以30~60秒为宜、进水流量增加时间以20~30秒左右为宜。确认并检查系统的工作压力和元件的压降是否超出上限值。
- 6) 检查预处理化学药品投入量是否符合设计标准。
- 7) 测量进水和各压力容器的处理水和全部处理水的电导率并确认是否符合设计标准值。必要时比



较压力容器间的处理水电导率，检查反渗透膜元件和连接器（Connector）是否损坏、盐水密封（Brine seal）是否泄漏等故障。通过检测浓水的pH值、电导率、钙硬度、碱度等计算浓水的LSI指数和S&DSI指数，研讨相应条件下反渗透膜系统被CaCO₃污染的可能性。

- 8) 让反渗透膜系统连续运行24~72小时，记录并分析运行数据倾向性（Trend）。需要记录的数据包括进水压力、压差、温度、进水流量和电导率、浓水流量和电导率、处理水流量和电导率、系统回收率。
- 9) 安装或更换新反渗透膜元件后需要经过一定时间后才能达到稳定的性能，一般来说，干式（Dry type）反渗透膜元件需要连续运行48小时才能稳定，湿式（Wet type）反渗透膜元件需要连续运行12小时才能稳定。

7. 反渗透膜系统的一般运行和维护

7.1 预处理系统运行

- 1) 一般可以应用各种预处理系统，但是其共同目的是供应符合反渗透膜系统运行条件的适当进水并最大限度地提高处理水质和回收率，为了达到并维持这个目的，必须系统地记录运行状态。
- 2) 预处理运行记录中一般包含以下项目：
 - 预处理过滤器（多介质过滤器、活性炭过滤器、微滤/超滤过滤器等）的压差
→ 达到一定数值以上时则成为实施反洗、化学清洗或空气清洗等的标准
 - 预处理过滤器的反洗、化学清洗或空气清洗（Air scouring）等实施内容
 - 进水的压力、余氯浓度、pH值、温度、微生物含量、预处理化学药品注入量等
- 3) 下面是预处理化学药品注入记录表格样式示例：

预处理化学药品注入记录						
日期和时间	日期					
	时间					
混凝剂	浓度					
	投入量（ppm）					
酸 (Acid)	浓度					
	投入量（ppm）					
还原剂	浓度					
	投入量（ppm）					
阻垢剂	浓度					
	投入量（ppm）					
备注	（记录系统故障、停机和措施事项等）					

7.2 反渗透膜系统通常运行

- 1) 一般来说，初始启动后没有特别的问题且处理水质稳定下来后，反渗透膜系统开始进入通常运行。通常运行时，建议每班至少参考1次以上下面的内容记录系统运行状态：

反渗透膜系统运行记录						
日期和时间	日期					
	时间					
进水 预处理状态	温度（℃）					
	SDI					
	浊度（NTU）					
	余氯（mg/l）					



反渗透膜系统运行记录						
压力 (bar)	1段进水					
	2段进水					
	浓水					
	处理水					
压差 (psi)	前段过滤器					
	1段					
	2段					
流量 (m ³ /h)	进水					
	处理水					
	浓水					
回收率 (%)						
电导率 (μS/cm)	进水					
	1段处理水					
	2段处理水					
	全部处理水					
	浓水					
pH值	进水					
	处理水					
修正后的运行数据	处理水量 (m ³ /h)					
	去除率 (%)					
	压差 (psi)					
备注	(对系统故障、停机、化学清洗等进行说明)					

- 2) 数据标准化 (Data normalization) 是指将记录的运行数据转换成最能反映反渗透膜系统状态的形式。该过程旨在区分反渗透膜系统运行时正常的性能变化和发生污染或问题引起的性能变化, 根据影响反渗透膜系统性能变化的原水浓度、运行压力、原水温度和回收率变化去比较实际性能和标准性能 (设计性能或之前测量性能)。

各个运行数据都是相互关联的, 因此即使其中一个项目发生了变化, 如果不同时考虑其他项目的变化, 也无法判断该变化是否是实际发生的, 因此通过将相关的项目标准化成常数并进行数据的修正工作, 来达到只比较一个主要项目变化的目的, 通常对处理水量、处理水质、去除率、压差进行运行数据修正 (具体如下)。

通过修正后的运行数据确认的反渗透膜系统变化如下:

- 反渗透膜元件膜组织的化学损坏
- 反渗透膜元件的污染 (Fouling、Scaling)
- 物理损坏 (O-ring、粘合部位等)
- 异物或膜表面污染造成的流路堵塞

3) 处理水量修正方法

处理水量是反渗透膜系统的管理项目中最重要因素, 处理水量受到工作压力、渗透压 (原水浓度)、温度等的影响, 因此必须在处理水量中反映这些影响。实际修正的公式如下:



$$Q_N = Q_o \times \frac{P_i - \frac{\Delta P_i}{2} - P_{pi} - \pi_i}{P_o - \frac{\Delta P_o}{2} - P_{po} - \pi_o} \times \frac{TCF_i}{TCF_o}$$

P_i = 初始工作压力,

P_o = 测量时的工作压力

ΔP_i = 初始压差,

ΔP_o = 测量时的压差

P_{pi} = 初始生产水压,

P_{po} = 测量时的生产水压

π_i = 初始平均渗透压^{<7>},

π_o = 测量时的平均渗透压

(原水渗透压 + 浓水渗透压) / 2

TCF_i = 初始温度修正系数^{<8>},

TCF_o = 测量时的温度修正系数

Q_N = 修正后的流量,

Q_o = 测量时的流量

假设渗透压和进水TDS已全部被反渗透膜均一处理的平均浓度 (C_{fc}) 的计算公式如下:

As standard conditions, we take either the design values or the conditions at initial performance as given in the start-up report, so that a fixed reference point is available.

For the osmotic pressure, different formulas are available in the literature. A valid and practical short approximation is:

$$\pi_{fc} = \frac{C_{fc} \cdot (T + 320)}{491000} \text{ bar} \quad \text{for } C_{fc} < 20000 \text{ mg/L} \quad \text{Eq. 75}$$

and

$$\pi_{fc} = \frac{0.0117 \cdot C_{fc} - 34}{14.23} \cdot \frac{T + 320}{345} \text{ bar} \quad \text{for } C_{fc} < 20000 \text{ mg/L} \quad \text{Eq. 76}$$

with C_{fc} = concentration of the feed-concentrate

C_{fc} can be calculated from following approximation:

$$C_{fc} = C_f \cdot \frac{\ln \frac{1}{1-Y}}{Y} \quad \text{Eq. 77}$$

where Y = recovery ratio = $\frac{\text{product flow}}{\text{feed flow}}$

C_f = TDS feed mg/Ls

4) 处理水质 (TDS) 修正方法

处理水质 (TDS) 也是反渗透膜系统的管理项目中最重要因素, 处理水质受到运行压力、渗透压 (原水浓度) 等的影响, 因此必须在处理水质中反映这些影响。实际的修正公式如下:



$$C_{p_i} = C_{p_o} \cdot \frac{P_{f_o} - \frac{\Delta P_o}{2} - P_{p_o} - \pi_{f_o} + \pi_{p_o}}{P_{f_i} - \frac{\Delta P_i}{2} - P_{p_i} - \pi_{f_i} + \pi_{p_i}} \cdot \frac{C_{f_o}}{C_{f_i}}$$

Terms not yet defined under A are:

C_p = product concentration as ion in mg/L

π_p = osmotic pressure of the permeate in bar

利用上述公式修正处理水质（TDS）的示例如下：

- 初始启动时
： TDS 2,000mg/ℓ / 温度25℃ / 压力25bar / 流量100m³/hr / 回收率75% /
压差3bar / 处理水压力1bar / 处理水质85mg/ℓ / 平均浓度渗透压2.5bar /
处理水渗透压0.05bar
- 当前运行时
： TDS 2,300mg/ℓ / 温度10℃ / 压力28bar / 流量85m³/hr / 回收率72% /
压差4bar / 处理水压力2bar / 处理水质95mg/ℓ / 平均浓度渗透压2.7bar /
处理水渗透压0.06bar / 温度修正系数（TCF）0.6
- 初始运行时的平均浓度（ C_{f_1} ）
 $C_{f_1} = 2000 \times (\ln(1-(1-0.75))/0.75) = 3,697\text{mg/ℓ}$
- 当前运行时的平均浓度（ C_{f_0} ）
 $C_{f_0} = 2300 \times (\ln(1-(1-0.72))/0.72) = 4,428\text{mg/ℓ}$
- 修正后的处理流量（ Q_n ）
 $Q_n = (25-1.5-1-2.5) / (28-2-2-2.7) \times (0.7 / 0.6) \times 85 = 93.1\text{m}^3/\text{hr}$
（和初始运行时相比，污染等导致流量减少了约7%）
- 修正后的处理水质（ C_{p_n} ）
 $C_{p_n} = (28-2-2-2.7 + 0.06) / (25-1.5-1-2.5+0.05) \times (3697/4428) \times 95 = 85\text{mg/ℓ}$
（和初始运行时相比，处理水质几乎没有变化（脱盐率未下降））

如上面的计算所示，通过与初始运行或所设置的运行标准进行比较来确定当前运行条件下反渗透膜设备的性能发生了怎样的变化，从而判断当前设备是否存在问题，并据此决定是否实施化学清洗（CIP）等维护措施。

5) 去除率修正方法

计算去除率的常用方法是假设进水TDS已全部被反渗透膜均一处理，这样做很可能会导致算出的去除率低于实际值。为了改善这个问题，可以将平均TDS视为被反渗透膜处理的TDS，这样可以在一定程度上修正因回收率产生变化的浓度。

- 平均TDS = （浓水TDS + 进水TDS） ÷ 2



- 修正后的去除率 = (平均TDS - 处理水TDS) ÷ 平均TDS × 100

很难计算浓水TDS时使用下面的简易公式:

- 浓水TDS = 原水TDS × (1 ÷ (1 - 回收率))

很难计算TDS时也可以利用电导率计算, 一般来说, 用电导率算出的去除率往往低于用TDS算出的数值。

6) 压差修正方法

在反渗透膜系统中, 通常将通过一个压力容器时产生的压力差作为管理项目, 在流量一定的情况下压差增大意味着流路堵塞或者系统存在故障。压差受处理水、浓水和温度变化等多个变量的影响, 用下面的公式进行修正:

$$\text{修正后的压差} = \frac{\text{测量的压差} \times (2 \times \text{初始浓水流量} + \text{初始处理水流量})^{1.5}}{(2 \times \text{浓水流量} + \text{处理水流量})^{1.5}}$$

7.3 反渗透膜系统停机

1) 停止反渗透膜系统运行时必须注意以下事项:

- 停止反渗透膜系统内的泵时, 必须先停止高压泵, 让进水泵再继续运行片刻。这是因为需要将压力容器内的浓水置换成原水, 如不进行该过程, 下次启动系统时可能会有高浓度的渗透水流出。
- 流量和压力应逐渐降低, 在压力降低的过程中, 进水量不应超过反渗透膜元件的最大进水量, 压力容器的压差不应超过上限值。
- 必须先打开处理水排放阀, 以防产生背压 (Back pressure)。

2) 反渗透膜系统各阶段的停止方法

- 先打开处理水排放阀。
- 为了去除压力容器内残留的高浓度盐 (Salt), 必须用处理水或高质量的进水进行清洗, 直到浓水电导率变得和进水电导率相同。
- 打开高压泵的旁通 (by-pass) 控制阀, 减少系统的进水流量。
- 慢慢打开浓水排放阀, 将压力降低到低压 (约30~40psi)。
- 高进水量清洗效果好, 但不得超出压力容器的最大压差。
- 清洗水中不得含有阻垢剂。因此, 开始清洗前需要停止化学药品注入系统。
- 完成清洗后彻底关闭进水阀。如果浓水管线连接到位置低于压力容器的排水口, 则位置高于最高的压力容器的浓水管线中必须使用空气断路器 (Air break), 否则容器可能会因为虹吸 (Siphon) 效应而变空。
- 在运行期间对处理水管线施加压力、使系统停止运行时, 反渗透膜可能会受到背压。为防止背压造成系统损坏, 背压不得超出5psi, 且必须使用处理水管线的止回阀或排气阀保护反渗透膜。相应安全阀门在停电或紧急停止等系统突然停止运行时也必须启动。
- 如果系统必须停机48小时以上, 则必须确保反渗透膜元件不变干, 为了防止微生物增殖, 建议每24小时定期清洗一次, 不能如此操作时, 必须用特殊化学药品保存。

8. 化学清洗（CIP, Cleaning In Place）和灭菌

8.1 化学清洗（CIP）概要

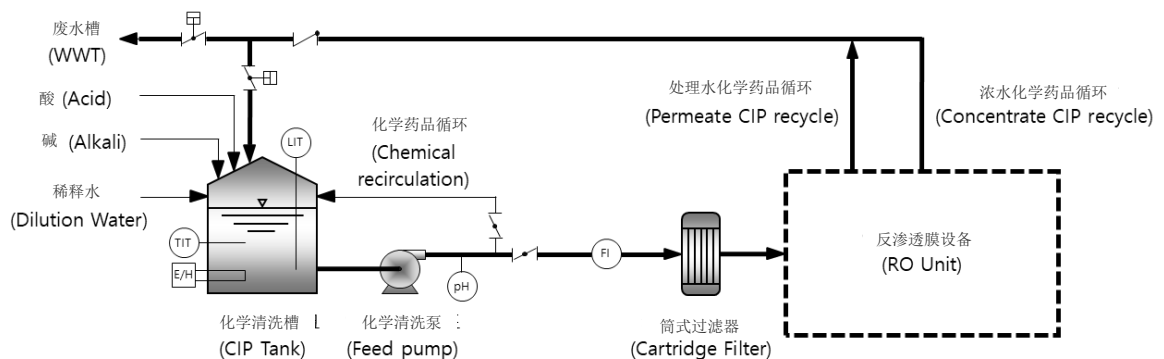
即使反渗透膜管理得当，其性能也会逐渐下降。上游侧有胶体或悬浮物成分造成的堵塞问题，下游侧有高盐浓度析出造成的结垢等问题，使用3~5年后，一般建议一年更换总数量的20%左右。膜的污染主要会引发以下问题：

- 处理水量减少
- 脱盐率下降（处理水电导率升高）
- 进水和浓水的压差增大

在膜过滤工艺中，除了膜损坏等事故外，几乎没有处理水质会急剧恶化的因素，但如果持续进行过滤，通常会产生污垢（Fouling），污垢也会降低膜的透水性能。反渗透膜工艺通常会充分进行预处理，最大限度地防止膜污染因素，但如不进行充分的预处理，则无法避免污垢的产生。污垢是在预处理过滤阶段去除的各种物质引起的。因此，要想使反渗透膜的过滤性能保持在一定水平以上，需要对膜进行清洗，不同系统的清洗频率和程度可能会有所不同。

8.2 化学清洗（CIP）设备

反渗透膜系统的化学清洗（CIP）设备具体可以参考下面的系统流程图，化学清洗会使用各种化学药品（Chemical），因此必须使用耐腐蚀性材质。一般来说，化学清洗槽（CIP Tank）主要使用FRP（fiber reinforced plastic）材质，管道或泵、阀门等主要使用不锈钢（Stainless Steel）316材质。用于去除有机物的碱（Alkali）供应管道和用于去除无机盐的酸（Acid）供应管道会长期接触化学药品，因此必须使用适当材质的断流阀（Block Valve）。预处理/后处理冲洗（Rinse）也可以使用温水（Warm water，在反渗透膜元件耐热性范围内）。



<图10-1. 化学清洗（CIP）设备配置>

8.3 实施化学清洗（CIP）前的检查事项

1) 检查是否需要实施化学清洗

为了长时间以良好的状态使用反渗透膜设备，即使运行期间没有特别的问题，也建议每3~6个



月实施一次化学清洗。但是，出现以下运行状态变化时必须立即实施化学清洗：

- 修正后的生产水量（Normalized permeate flux）减少10%以上时
- 修正后的盐透过率（Normalized salt passage）增加10%以上时
- 与初始运行条件（设计标准性能或试运行后稳定化的性能）相比，压差增加15%以上时

如果错过了应当清洗反渗透膜的时期并长时间放置不管，则很难彻底去除膜表面的污染物，因此需要格外注意。反渗透膜系统的性能取决于温度、压力、pH值、进水TDS浓度等的变化，因此修正运行数据并与初始值进行比较至关重要。

2) 分析污染并检查污染原因

如果观察到运行状态变化并判断需要实施化学清洗，那么通过分析污染掌握准确的污染原因并使用适当的清洗剂至关重要。分析污染时必须包含以下项目，分析样品应在原水流入的管道内部和原水流入反渗透膜的最前端采集。

- 记录设备运行性能的资料
- 原水水质
- SDI检测盒（Kits）滤芯上的异物
- 预处理设备（砂滤器、活性炭过滤器、微滤/超滤过滤器、筒式过滤器等）沉积物

反渗透膜发生污染的主要原因如下：

- 预处理效果欠佳或预处理设备运行异常（SDI成分、浊度、胶体等去除性能下降）
- 因选择不适当的材质导致管道、泵等发生腐蚀
- 因化学药品注入设备故障导致药品注入量不足或注入过多
- 停机后处理不充分（冲洗（Flushing）不足等）
- 不适当的运行条件（回收率、生产水&浓水量、压差等）
- 原水组成成分的剧烈变化
- 微生物污染

3) 选择清洗药品

化学清洗使用的药品应考虑通过污染分析掌握的污垢（Fouling）原因物质和反渗透膜的耐药品性后选定。尤其是清洗有机污染时经常会使用次氯酸钠，但PA复合膜的耐氧化性比较差，因此需要格外注意。主要使用的清洗药品种类和用途如下：

污染物	清洗药品	化学式
无机物 (Inorganic)	· 0.2%盐酸 (Hydrochloric Acid)	HCl
	· 0.5%磷酸 (Phosphoric Acid)	H ₂ PO ₄
	· 2.0%柠檬酸 (Citric Acid)	C ₆ H ₈ O ₇
有机物 (Organic)	· 0.1%氢氧化钠 (Sodium Hydroxide) (30℃以上)	NaOH
	· 0.025%十二烷基硫酸钠 (Sodium Dodecylsulfate)	NaC ₁₂ H ₂₅ SO ₄



污染物	清洗药品	化学式
	· 0.1%三聚磷酸铵 (Sodium triphosphate)	$\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$
氧化金属 (Metal Oxide)	· 0.5%磷酸 (Phosphoric Acid) · 1.0%硫酸钠 (Sodium Hydrosulfite)	H_2PO_4 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$
淤泥 (Silt)	· 0.1%氢氧化钠 (Sodium Hydroxide) (30°C以上) · 0.025%十二烷基硫酸钠 (Sodium Dodecylsulfate)	NaOH $\text{NaC}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4$
微生物膜 (Bio-Film)	· 0.1%氢氧化钠 (Sodium Hydroxide) (30°C以上) · 1.0%乙二胺四乙酸钠 (Sodium Ethylene Diamine Tetra-acetatic Acid)	NaOH EDTA
硅 (Silica)	· 0.1%氢氧化钠 (Sodium Hydroxide) (30°C以上) · 1.0%乙二胺四乙酸钠 (EDTA) (Sodium Ethylene Diamine Tetra-acetatic Acid)	NaOH EDTA
消毒剂 (Disinfectant)	· 0.1ppm ↓ 氯 (Chlorine) · 0.2%过氧化氢 (Hydrogen Peroxide) · 0.5~3.0%福尔马林 (Formaldehyde) · 500ppm亚硫酸氢钠 (SBS, Sodium Bisulfite)	Cl_2 H_2O_2 HCHO NaHSO_3

8.4 化学清洗 (CIP) 流程

1) 准备清洗药品 (Preparation of cleaning solution)

准备适合去除污染原因的清洗药品后投入到化学清洗槽 (CIP Tank) 中, 将其稀释成适当的浓度。此时建议使用纯水 (Demineralized water) 或反渗透膜处理水作为稀释水 (Dilution Water)。准确称量要投入的化学药品并混合均匀, 然后检查清洗药品的pH值和温度 (25°C以上) 是否合适。

自动装载 (Loading) 化学药品时, 通过槽液位 (Level) 控制, 按事先计算好的量装载药品原液和稀释水 (纯水) 后进行搅拌。氢氧化钠最好用浸入式 (Immersion) 电加热器 (Electric heater) 加热到30~40°C左右后再使用。

2) 低压清洗 (Low pressure flushing)

用纯水或清水 (反渗透膜处理水、经过预处理的进水等) 对管道和整个反渗透膜设备进行低压清洗 (Flushing)。

3) 清洗液投入和循环 (Feeding cleaning solution and circulation)

以清洗所需的化学药品注入流量50%左右的低流量注入反渗透膜设备, 替换压力容器 (Pressure vessel) 内的工艺水。此时, 进水压力应足以抵消进水和浓水之间的压差, 并且应足够低到几乎不产生处理水, 才能最大限度地减少异物在分离膜上再次沉积。如有必要, 将处理水和浓水丢弃直到清洗液首次排出为止, 可以防止清洗液稀释。



将压力容器内残余的水全部排出后，操作自动开关阀（On-Off Valve），使浓水和处理水侧流出的清洗液重新循环回化学清洗槽中。观察循环的清洗液浊度和pH值，清洗液明显变得浑浊或者pH值出现0.5以上的差值时，应适当地补充化学药品或配制新的溶液并重复上述步骤。

4) 浸泡和间歇循环（Soaking and Intermittent circulation）

停止清洗泵的循环，将元件浸泡（Soaking）在清洗液中。污染不严重时浸泡1小时左右即可，污染严重时则需要浸泡更长时间，通常浸泡一晚上（10~15小时）即可。长时间浸泡元件并保持一定温度（25~30℃）时可以提升清洗效果，此时可以间歇地启动循环泵，将流量调节到推荐流量的10%左右。

5) 高流量清洗（Large flow rate cleaning & circulation）

按推荐清洗流量在持续30~60分钟内注入清洗液，洗去从反渗透膜表面去除的污染物。污染严重时以高于推荐清洗流量50%的高流量清洗时效果更佳，但每个压力容器的压差必须保持在50psi以下。如果发生50psi以上的压差，反渗透膜可能会严重损坏。

6) 清洗液排空

关闭浓水和处理水侧流入化学清洗槽的管道上的阀门，打开流向废水槽（Wastewater pond）的管线上的阀门。启动化学清洗泵，将反渗透膜和管道、化学清洗槽中的清洗液全部倒入废水槽，然后排空（Drain）槽内残留的化学药品。

7) 最终清洗（Final flushing）

完成清洗后，用纯水或清水（反渗透膜处理水等）冲洗（Flushing）管道、反渗透膜、化学清洗槽，洗去残留的清洗液。此时，清洗水的温度应始终保持在20℃以上，以防止污染物再次沉淀。

8) 使用其他化学药品进行额外清洗时重复上述过程。

9) 完成所有清洗后，以正常条件启动反渗透膜设备，并倒掉处理水至少10分钟以上。此时检查运行条件是否符合设计标准。

8.5 其他化学清洗相关设计标准和注意事项

- 1) 化学清洗所需的药品量为压力容器整个容积和管道内部容积之和，化学清洗槽必须足够大以容纳相应量的清洗液。如果很难计算准确的容积，则可以参考以下指南计算清洗液的大致容积：

管道直径（Pipe Diameter, in）	体积分数（Volume Fraction）
2	0.16加仑/英尺（2.0升/米）
3	0.37加仑/英尺（4.6升/米）
4	0.65加仑/英尺（8.1升/米）



元件尺寸 (Element Size)	每个元件的容积 (Volumetric Capacity of Each Element)
4040	2.0加仑 (8.0升)
8040	8.0加仑 (32.0升)

- 2) 由于化学清洗槽内会接触各种化学药品，因此建议使用耐化学性和耐腐蚀性优秀的FRP或不锈钢 (Stainless Steel) 316材质。
- 3) 清洗液的供应压力应不超过60psi (4bar)，通常设计为2~3bar左右。
- 4) 进行化学清洗时需要的流量如下：

元件直径 (inch)	GPM	m ³ /hr
4 inch	6 ~ 10	1.4 ~ 2.3
8 inch	24 ~ 40	5.5 ~ 9.0

一般来说，4英寸反渗透膜设计成每个压力容器3m³/hr的流量，8英寸反渗透膜设计成每个压力容器9m³/hr的流量。

例如，清洗10个8英寸反渗透膜压力容器时，以9 x 10 = 90m³/hr的流量供应清洗液即可。

- 5) 多段设备建议分别清洗各段，以免第一段的流量过小或最后一段的流量过大。（即使是多段配置，压力容器的数量比较少时也可以一次性进行清洗。）如果设计成分别清洗各段的方式，则可以防止前段去除的污染物流入后段，造成清洗效果减半，还可以减少清洗液进料泵的容量，从而实现经济的设计。例如，清洗10:7:3排列的反渗透膜设备时，设计成单独清洗1段和（2段+3段）的方式，清洗液进料泵选择90m³/hr（9m³/hr x 10EA）容量。进行单独清洗时，高流量清洗（Large flow rate cleaning）必须单独实施，但浸泡（Soaking）和最终清洗（Final flushing）也可以全段（All stages）同时进行。
- 6) 优先考虑碱（Alkali）洗
反渗透膜元件的污染通常由有机污染物和无机盐垢物质组成，因此建议优先考虑碱洗。酸（Acid）洗仅在确定存在碳酸钙、氧化铁或氢氧化物造成的污染时优先考虑。否则酸洗可能会与反渗透膜表面存在的胶体硅、有机物、微生物代谢物等发生反应，进一步降低反渗透膜的性能。通常建议先通过碱洗有效去除有无机物物、胶体状污染物、微生物代谢物等后再实施酸（Acid）洗。
- 7) 化学清洗时保持清洗液的pH值
化学清洗期间监测清洗液的pH值，酸（Acid）洗期间pH值增加0.5以上时需要补充酸，碱洗期间pH值下降0.5以上时需要补充碱。用pH值为1~2的盐酸清洗碳酸钙时最易去除，但因《化学物质管理法》等规定无法使用时，尽可能地降低pH值最有利于去除，有机物污染在pH值为12的条件下可以有效去除。



8.6 不同污染物的症状和清洗液选择指南

1) 无机盐垢污染 (Fouling by inorganic salt scaling)

无机盐造成的污染是反渗透膜系统中最常见的污染，主要因碳酸钙等碳酸盐或硫酸钙等硫酸盐发生。无机盐垢污染引起的主要症状和推荐清洗药品如下：

污染种类	主要症状		
无机盐垢污染 (Fouling by Inorganic Salt Scaling)	① 处理水量急剧减少 ② 进水压力逐渐增加 ③ 2段 (2nd-Stage) 处理水质恶化 (电导率增加) ④ 2段 (2nd-Stage) 压差逐渐增加 (进水压力 - 浓水压力)		
	主要污染物	清洗药品	备注
	碳酸盐 (Carbonate)	0.2% 盐酸 (Hydrochloric Acid, HCl)	最推荐, 最高温度: 45°C, pH = 2
		2.0% 柠檬酸 (Citric Acid, C ₆ H ₈ O ₇)	可使用 最高温度: 45°C, pH = 2
	硫酸盐 (Sulphate)	0.1% 氢氧化钠 (Sodium Hydroxide) ; 1.0% EDTA Tetrasodium	最高温度: 30°C, pH = 12

产生无机盐垢的主要原因是回收率过高、阻垢剂 (Anti-Scalant) 不足、前段软水器 (Softener) 再生不良等导致的预处理不足等。硫酸盐垢尤其难以去除，结垢后经过一周左右后，即使进行清洗，反渗透膜系统的性能也很难恢复，因此发现污染后必须立即清洗。

2) 胶体污染 (Colloidal fouling)

反渗透膜系统进水中的污泥 (Sludge)、无机胶体 (Inorganic colloids)、胶体硅 (Colloidal silica)、有机物 (Organic substances) 等胶体物质流入可能会造成胶体污染。胶体污染引起的主要症状和推荐清洗药品如下：

污染种类	主要症状		
胶体污染 (Colloidal fouling)	① 1段 (1st-Stage) 处理水量逐渐减少 ② 1段 (1st-Stage) 压差逐渐增加 (进水压力 - 浓水压力) ③ 1段 (1st-Stage) 处理水质恶化 (电导率增加)		
	主要污染物	清洗药品	备注
	无机胶体 (Inorganic Colloid)	0.1% 氢氧化钠 (Sodium Hydroxide) + 0.025% SDBS	NaOH + Na-DDBS 最推荐, 最高温度: 30°C, pH = 12
		2.0% 柠檬酸 (Citric Acid, C ₆ H ₈ O ₇)	可使用 最高温度: 45°C, pH > 2



3) 金属化合物污染 (Fouling by metallic compound)

金属化合物污染的主要原因是金属氧化物 (Metalic oxide) 或金属氢氧化物 (Metalic hydroxide)，特别是铁质污染 (Ferrous fouling) 频繁发生，不适当的预处理或不适当的材质选择很可能会导致泵、管道等发生腐蚀等。金属化合物污染引起的主要症状和推荐清洗药品如下：

污染种类	主要症状		
金属化合物污染 (Fouling by metallic compound)	① 1段 (1st-Stage) 处理水量急剧减少 ② 1段 (1st-Stage) 去除率急剧下降 ③ 进水压力&压差 (进水压力 - 浓水压力) 急剧增大		
	主要污染物	清洗药品	备注
	金属氧化物 (Metalic oxide)	1.0%焦亚硫酸钠 (Sodium pyrosulfite, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$)	最推荐, 最高温度: 30°C, pH = 5
		2.0%柠檬酸 (Citric Acid, $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$)	可使用 最高温度: 45°C, pH > 2

4) 有机物污染 (Fouling by Organic substances)

有机物污染多发生于使用含有大量有机物的地表水、废水、海水等作为进水时。有机物污染引起的主要症状和推荐清洗药品如下：

污染种类	主要症状		
有机物污染 (Fouling by Organic substances)	① 处理水量急剧减少 ② 去除率和压差无变化		
	主要污染物	清洗药品	备注
	有机物 (Organic substance)	① 0.1%氢氧化钠 (Sodium Hydroxide) + 0.025% SDBS ② 0.2%盐酸 (Hydrochloric Acid, HCl)	最推荐 ① 用NaOH + Na-DDBS溶液第一次清洗 最高温度: 30°C, pH = 12 ② 用HCl溶液第二次清洗 最高温度: 45°C, pH = 2
		2.0%三聚磷酸钠 ($\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$, STPP) + 0.025% SDBS	可使用 最高温度: 30°C, pH = 10

5) 微生物污染 (Fouling by microbes)

微生物污染多发生于未经过适当处理就关闭反渗透膜设备时或者使用含有大量有机物的地表水、再利用水、海水等作为进水时。微生物污染在发现时立即清洗并防止微生物膜 (Biological film) 形成至关重要。微生物污染引起的主要症状和推荐清洗药品如下：



污染种类	主要症状		
微生物污染 (Fouling by microbes)	① 1段&2段 (1st & 2nd Stage) 压差急剧增大 ② 处理水量减少 ③ 处理水质 (电导率) 无变化		
	主要污染物	清洗药品	备注
	微生物 (Microbe)	0.1%氢氧化钠 (Sodium Hydroxide) + 0.025% SDBS	NaOH + Na-DDBS 最推荐, 最高温度: 30°C, pH = 12
		0.1%氢氧化钠 (Sodium Hydroxide)	最推荐, 最高温度: 30°C, pH = 12
		2.0%三聚磷酸钠 ($\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$, STPP) + 0.025% SDBS	可使用 最高温度: 30°C, pH = 10

9. 反渗透膜系统Trouble shooting

9.1 反渗透膜系统故障的种类、原因和解决措施概要

反渗透膜系统在初始启动时和使用一段时间后可能会发生各种故障 (Trouble)，如果系统性能 (Performance) 逐渐下降，一般认为是可以通过化学清洗 (CIP) 恢复的正常范围内的污染，大多数情况下都能恢复。然而，如果性能下降发生的时间更早，则认为发生了设备或运行故障 (Trouble)，并且需要采取适当的措施。

一般来说，反渗透膜系统运行过程中可能会出现故障 (Trouble) 包括盐透过率升高 (处理水的电导率升高)、压差增大和处理水量减少等，主要原因和解决措施如下：

故障 (Trouble) 现象			原因	解决措施
处理水量	盐透过率 (电导率)	压差		
↓	↑	↑	水垢污染	① 化学清洗 (CIP) ② 检查和改善预处理设备
↓	↑	↑	胶体污染 金属氧化物污染	① 化学清洗 (CIP) ② 检查和改善预处理设备
↓	-	↑	微生物污染	① 化学清洗 (CIP) ② 灭菌 ③ 检查和改善预处理设备
↓	-	-	有机物污染	① 化学清洗 (CIP) ② 检查和改善预处理设备



↓	↓	-	反渗透膜压实化	① 更换反渗透膜元件
↑	↑	-	反渗透膜氧化	① 更换反渗透膜元件 ② 注入还原剂 ③ 考虑更换耐氧化性元件 ④ 检查和改善预处理设备
↑	↑	-	膜损坏和泄漏 O型圈 (O-ring) 泄漏	① 更换反渗透膜元件 ② 检查和改善预处理设备 ③ 更换O型圈 (O-ring)
-	↑	-	个别反渗透膜污染 氧化和表面损坏 套叠 O型圈 (O-ring) 泄漏	① 更换反渗透膜元件 ② 检查和改善预处理设备 ③ 更换O型圈 (O-ring)

※ 红色标记是各故障 (Trouble) 的主要症状

9.2 主要故障 (Trouble) 的原因和解决措施详情

1) 处理水的电导率升高、压差增大且处理水量减少时

很可能是反渗透膜被水垢或悬浮物、胶体、金属氧化物等污染所致。先根据运行记录掌握准确的污染类型，没有运行记录时，一般通过分析原水、完成预处理的进水和浓水的水质来间接地判断后实施现场调查。

进行现场调查时，对于2段设备，打开1段压力容器的进水端板 (End plate) 和2段压力容器的处理水端板 (End plate)，检查元件的截面和压力容器的内壁。如果内部触感很滑并且有异味，则很可能是发生了微生物污染；如果内壁感觉比较粗糙，则很可能是发生了结垢。另外，测量1段的第一个 (进水侧) 元件和2段的最后一个 (浓水侧) 元件的重量，如果1段元件相对更重，则很有可能是发生了悬浮物或胶体污染；如果2段元件相对更重，则很有可能是发生了结垢污染。

① 悬浮物或胶体污染

预处理工艺中发生问题的可能性很大，主要原因如下：

- 存在混凝设备 (Clarifier) 时，混凝剂的量不适当或者原水组成变化等导致混凝效果不佳
- 存在多介质过滤器和活性炭过滤器时，过滤超载或者未按适当周期实施反洗和清洗
- 存在微滤/超滤过滤器时，设计孔径大于设计所需直径

上述预处理设备等发生了问题时，如果定期监测SDI、浊度等与预处理相关的分析结果，则可以及早发现异常，还能分析和确认实际筒式过滤器 (Cartridge Filter) 或1段的第一个元件的残留物等。发生污染时实施化学清洗 (CIP)，预处理工艺中存在问题时使其恢复正常。

② 金属氧化物污染



很可能是因为进水中含有标准以上的铁、锰、铝等金属离子所致，主要原因如下：

- 未经过预处理或未能有效进行预处理工艺
- 进水中含有硫化氢（ H_2S ）（生成硫化物盐）
- 系统前段（Upstream）的管道、泵、阀门等零件发生腐蚀

金属氧化物污染主要发生在多段设备的1段。怀疑发生了金属氧化物污染时，可以通过分析进水检查铁、锰、铝等离子是否超出了标准值，观察前段第一个元件的截面和压力容器的内壁。金属氧化物污染常常以铁污染的形式发生，发生铁污染时，可以看到液体变成红色。发生金属氧化物污染时实施化学清洗（CIP），预处理工艺中存在问题时使其恢复正常。如果是腐蚀引起的问题，则将管道、泵等零件更换成适当的材质。

③ 水垢污染

水垢污染是反渗透膜表面形成并沉积不溶性盐的现象，一般主要发生在原水硬度和碱度高且回收率设置过高的系统中。通常具有从多段系统中最后一段的最后一个元件开始发生、然后逐渐扩散到前段的特点，使用含有高浓度的钙、碳酸氢盐或硫酸盐的进水时，系统启动后几个小时内就会形成水垢，导致系统性能开始下降。水垢污染的主要原因如下：

- 原水硬度和碱度高且回收率设置过高
- 选用不适当的阻垢剂或阻垢剂投入量不足

为了判断水垢污染情况，需要通过分析进水来确认一般系统回收率下发生结垢的可能性，通过分析浓水来确认钙、钡、锶、硫酸盐、氟化物、硅酸盐、pH、朗格利尔饱和指数的数值。另外，可以通过检查浓水侧有无水垢、最后端元件的重量是否增加来判断，必要时还可以通过拆卸和分析最后端元件来判断结垢与否。

判断发生了水垢污染时实施化学清洗（CIP），根据存在的水垢类型优化运行条件。碳酸盐垢需要降低进水的pH值并调整阻垢剂的投入量，硫酸盐或氟化物则需要降低系统回收率并重新研讨阻垢剂的种类和投入量。

2) 处理水的电导率正常、压差增大且处理水量减少时

使用地表水或回收废水等作为原水，未经过预处理或者未进行适当预处理的进水不断流入反渗透膜系统中时，系统可能会被产生的微生物污染。发生微生物污染时，无论是前段还是后段，所有段上的压差都会增大、处理水量都会减少。详细内容、确认方法及解决措施如下：

- ① 如果微生物污染比较多或者同时伴有淤泥（Silt）污染，则压差会急剧增大。压力容器的压差升高可能会成为污染的敏感指标，因此系统的每段都必须安装压差表进行监测。
- ② 处理水的电导率本来正常，但随着微生物污染不断进行，电导率也可能会进一步下降，微生物污染广泛扩散时电导率也可能会增大。
- ③ 进水、浓水和处理水样品中检出大量微生物时，可以间接得知微生物污染已经开始或者正在进行。
- ④ 微生物污染物往往很滑且有异味。



判断发生了微生物污染时，对整个预处理和反渗透系统进行清洗和灭菌，没有预处理系统或者系统无效时必须安装新的预处理系统并进行优化，必要时可以考虑更换微生物污染耐性优秀的FR（Fouling resistant）系列的反渗透膜元件。

3) 处理水的电导率和压差正常、处理水量减少时

未经过预处理或者预处理不适当、含有标准值以上有机物的进水流入反渗透膜系统中时，有机物可能会吸附在反渗透膜上，造成有机物污染。有机物污染的确认方法和解决措施如下：

- ① 在反渗透膜表面形成的有机污染物吸附层可能会对进水中含有的TDS起到额外的屏障作用等，因此不会影响电导率，在有些情况下甚至还会降低电导率，多段设备中前段的处理水量减少。
- ② 主要因分子量高、具有疏水性或阳离子基团的有机物发生，可用于预处理的微量油分或阳离子高分子电解质就属于此列。
- ③ 可以通过分析筒式过滤器等的沉淀物来检查进水中是否含有油分和阳离子高分子电解质等有机污染物，从而判断是否发生了有机物污染。

判断发生了有机污染时实施化学清洗（CIP），未经过预处理或者预处理不适当时必须安装新的预处理系统并进行优化，使用混凝剂时需要重新研讨投入量以防过量投入。

4) 处理水的电导率下降、压差正常且处理水量减少时

进水压力或温度过度高于标准值以上或者发生水锤作用（Water hammering）时，可能会发生压缩反渗透膜的压密化（Compaction）现象，被进水隔片（Feed Spacer）挤压的膜可能会变形，进水隔片的图案可能会印到膜上。

发生了膜的压密化（Compaction）时建议更换损坏的元件，同时装载（Loading）新元件和旧元件时，最好将新元件安装到系统的最后端，以便在高流量中保护新元件。另外，并排安装仅装载有新元件的压力容器和仅装载有旧元件的其他压力容器时，个别压力容器的流量分布和回收率可能会变得不均衡，因此建议均匀地分散装载。

例如，如想更换在一个压力容器中安装6个元件4:2排列系统的6个元件，必须将新元件放入位于2段的2个压力容器的4号、5号、6号位置。4:3系统中，则需要在位于2段的3个压力容器的5号和6号位置放入新元件。即使实在没办法如上所述安装，也不能在1段的1号和2号位置上放入新元件。

5) 处理水的电导率升高、压差正常且处理水量增加时

很可能是反渗透膜发生氧化损坏、O型圈（O-ring）损坏造成了泄漏（Leakage）所致。

① 反渗透膜氧化

反渗透膜持续接触进水中的氧化性物质（余氯 Cl_2 等）时，膜可能会氧化并发生不可逆的化学损坏，发生了氧化损坏时，还有可能必须更换所有元件。主要的氧化原因如下：

- 进水中的余氯（ Cl_2 ）或其他氧化性物质超出标准值
- 不适当的清洗/消毒或未实施清洗/消毒、清洗时间或温度超出上限值

反渗透膜是否发生了氧化可以通过加压染色试验来确认。

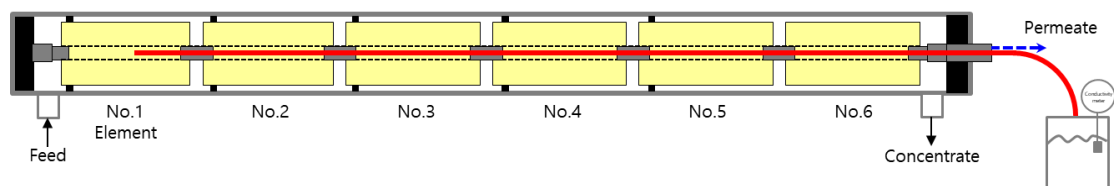
② O型圈（O-ring）损坏和泄漏（Leakage）

O型圈（O-ring）损坏或者集水管（Permeate tube）破损时，进水或浓水可能会流入处理水中，导致处理水的电导率升高、处理水量增加。集水管破损时必须更换相应元件，仅O型圈（O-ring）损坏时必须立即更换O型圈（O-ring）。

6) 处理水的电导率升高、压差和处理水量正常时

最重要的是找出处理水电导率升高的原因。因为这可能发生在整个系统中，也可能是部分反渗透膜元件或零件的问题，因此每个压力容器全都需要确认处理水的电导率。多段（Multi-stage）配置的系统中，同一段（Stage）的电导率必须在相同的范围内，和前段相比，后段的电导率通常处于更高的范围内。可以通过这些流程掌握问题发生原因在哪个段以及具体是哪个压力容器等。

如果哪个压力容器的处理水质和其他压力容器相比存在显著差异，则必须详细调查该压力容器。为此，将比互联器（Inter-connector）内径更小的管插入反渗透膜元件集水管（Permeate tube）内，并测量各位置的电导率。



<图9-1. 探针测试（Probing Test）>

正常的电导率倾向通常是从反渗透膜元件从No.1（进水侧）到No.6（浓水侧）逐渐增大，特定元件中的电导率异常高时，则该元件很可能是发生问题的原因。如果O型圈（O-ring）有问题，则耦合器或适配器位置上的电导率会大幅升高，如果在其他部分测出的电导率过高，则很有可能是套叠（Telescoping）、背压（Back pressure）或异物等造成的物理损坏等导致反渗透膜元件发生了损坏。

① O型圈（O-ring）泄漏（Leakage）

未安装O型圈（O-ring）或者安装不正确的O型圈（O-ring）因持续承受机械压力（水锤作用（Water hammer）造成的元件活动等）发生损坏时可能会发生泄漏。防止O型圈（O-ring）泄漏的方法是使用甘油等适当的润滑剂，在将元件装载（Loading）到压力容器时通过填隙（Shimming）来防止元件活动。

② 套叠（Telescoping）现象

进水和浓水的压力差过高时发生，该现象可能会造成机械损坏。为了防止这种现象，压差增大超出正常数值15%以上时必须立即实施化学清洗（CIP）。

③ 反渗透膜物理表面损坏



该现象是由进水中的异物（锋利的颗粒）流入和水锤作用（Water hammer）等的影响共同作用引发的，为了防止这种现象，需要定期更换安全过滤器并额外安装防水锤作用（Water hammer）装置（止回阀等）。

④ 背压（Back pressure）造成的反渗透膜损坏

处理水的压力比进水或浓水压力高0.3bar以上时，反渗透膜复合层可能会发生脱落并损坏。

9.3 测量仪器（Detector）校准（Calibration）的重要性

反渗透膜系统故障排除（Trouble shooting）的第一步是校准测量系统性能（Performance）的测量仪器，让人意外的是，故障是由测量仪器错误而不是实际系统的问题引起的情况比比皆是。

- 1) 电导率测试仪：使用完成校准（Calibration）的电导率测试仪检查与实际测量值之间是否存在差异，存在差异时须按照制造商的使用手册进行校准。此时，还必须检查探测器（Probe）安装是否正确、是否被污染。
- 2) 酸碱度计和温度计：使用校准后的酸碱度计和温度计检验原来测量的数据是否有错，有问题时更换为适当的设备。
- 3) 压力表：为了确定是否存在压差，在适当的位置安装压力表并定期进行校准至关重要。压力表通常使用易于连接到管道的校准压力表。
- 4) 流量计：流量计是掌握处理水量是否减少和增加的重要测量仪器，因此必须按照制造商的使用手册定期进行校准。进水流量与处理水流量和浓水流量之和发生差异时必须立即校准。

10. 不同停机时间的反渗透膜系统管理

10.1 反渗透膜系统的停机（Shut-down）流程

停止反渗透膜系统的运行时必须按照适当的流程停止，以免给设备和反渗透膜造成损坏。一般的反渗透膜系统停机流程如下：

- 1) 停止反渗透膜系统运行前必须用干净的水（纯水、反渗透膜处理水或完成预处理的进水）清洗整个系统。
- 2) 最先打开处理水排放管阀门。这是为了防止背压（Back pressure）造成反渗透膜损坏，所以一定要第一个打开处理水排放管的阀门。
- 3) 打开高压泵的旁通（by-pass）阀逐渐减少流入流量，慢慢打开浓水管线的阀门并使压力降到30~40psi左右。
- 4) 关闭与反渗透膜系统相关的所有化学药品注入管道的阀门。
- 5) 冲洗（Flushing）10~20分钟，直到进水和浓水的电导率变得相同。
- 6) 冲洗完成后停止泵，关闭进水、处理水、浓水侧的所有阀门。
- 7) 系统停止时，重要的是在30~60秒内缓慢地调节所有流量和压力，海水淡化设备中必须更缓慢地操作阀门。

10.2 短期停机时反渗透膜系统的管理（0~48小时）

48小时以内的短时间停机时，按照上述停机流程停止运行后原样保持即可，必要时可以每24小时冲洗（Flushing）一次，以防微生物繁殖。



10.3 中期停机时反渗透膜系统的管理（2~25天）

直接执行上述停机流程，并关闭进水、处理水和浓水管线的所有阀门，以防止膜干燥或微生物繁殖。停机期间内部温度应保持在5~45℃范围内，温度越低，越有利于反渗透膜的保存，但必须保持适当的温度以免膜冻结。内部温度在20℃以上时建议每12小时清洗一次，内部温度低于20℃时建议每24小时清洗一次。在使用极易被微生物污染的地表水等作为进水的设备中，建议用添加了1.0% SBS溶液的水清洗后进行浸泡（Soaking）。

10.4 长期停机时反渗透膜系统的管理（25天以上）

和中期停机时的管理方法相同，但长期停机25天以上时必须定期检查保存液的状态。保存液（Preservative solution）的pH值下降到不足3时建议立即更换保存液。

11. 三养TRILITE反渗透膜操作和保管方法

反渗透膜操作和保管大体可分为使用前——即以新品状态操作和保管的情况和使用中的情况，必须以能够尽量减少反渗透膜性能变化的方法执行。另外，三养TRILITE反渗透膜分为干式（Dry type）和湿式（Wet type）两种形式，除非有特殊情况，否则均以干式供货。干式和湿式反渗透膜的优缺点如下：

区分	干式（Dry Type）	湿式（Wet Type）
重量	比湿式更轻 易于进行运输和更换作业	比干式更重 运输和更换作业相对更难
保存液	不需要 装在阻氧塑料袋中密封出库	需要 投入1.0%（w/w）焦亚硫酸钠后 装入塑料袋中密封出库
保管期限	12个月以上	超过12个月时 需要检查是否有微生物产生
试运行容易性	和湿式相比， 需要相对更长的时间才能稳定	更换后试运行时 系统可以快速稳定

11.1 反渗透膜操作和保管方法（使用前）

使用前、即新品三养TRILITE反渗透膜会装入阻氧塑料袋中密封后以瓦楞纸板箱包装（防止物理损坏）的状态供货。之后的操作和保管方法具体如下：

- 1) 供货后保管时应置于避免阳光直射的阴凉仓库中保管。
- 2) 保管温度建议保持在45℃以下，即使温度降到零度以下，干式也不会受到影响。（湿式建议尽量不要让温度降到零度以下）
- 3) 建议直接以供货时的包装状态保管，在实际更换前都不要打开塑料袋。

11.2 反渗透膜操作和保管方法（使用中）

在压力容器内长时间停机时参考前面“10. 不同停机时间的反渗透膜系统管理”内容。将使用中的反渗透膜元件从压力容器中取出一定时间后需要操作和保管时请参考以下事项：

- 1) 从压力容器中取出的反渗透膜元件必须用保存液处理以防发生微生物污染。保存液主要使用1.0%



焦亚硫酸钠（SMBS, Sodium Metabisulfite）等，稀释水则使用反渗透膜处理水或纯水等干净的水。

- 2) 将反渗透膜元件放入保存液中浸泡大约1小时，将元件垂直放置，使内部的空气排出，然后装入塑料袋中密封。此时塑料袋内可以不填充保存液。
- 3) 需要长时间（3个月以上）保管时，建议每3个月检查一次保存液，确认是否存在微生物。一般来说，保存液不干净时很可能会滋生微生物。

11.3 反渗透膜操作和保管方法（使用后废弃）

反渗透膜元件中不包含保存液或其他有害物质，因此如果用于废水处理等用途且未积累重金属等，则可以归类为一般废弃物进行废弃。



삼양 워터솔루션의 50년 축적된 기술을 인공지능 ChatGPT를 이용하여 담았습니다.
삼양트리라이트 홈페이지에서 "Trigent"를 경험해 보세요!

Samyang Water Solutions

首尔市钟路区钟路 33 街 31 / 电话) 02-740-7732~7 / 传真) 02-740-7709 / <http://samyangtrilite.com>

Samyang Water Solutions

31, Jongno 33-gil, Jongno-gu, Seoul, Korea / TEL) 82-2-740-7732~7 / FAX) 82-2-740-7709 / <http://samyangtrilite.com>