

## 引言:

在各種工業用純水系統中，微生物濃度(CFU/ml)的管控也是重要的目標，雖然有些標準似乎也不太嚴苛(100~1 CFU/ml)，但是這是一個非常難以達成的目標，大部分的純水系統都在嚴重汙染狀態，或是藻類與菌類共生的狀態，如何改善，觀念與知識最重要，所以以下，我們將用十二個問題來引導這個議題，希望能討論的淋漓盡致!

### 1. 什麼是微生物?

微生物是指一切肉眼看不到或看不清楚的一群微小生物的總稱，一般需要藉助顯微鏡來觀察研究。微生物個體微小（直徑小於 0.01~0.001 毫米），構造簡單，例子包括細菌、放線菌、原生動物、藻類和原蟲等。微生物與人類日常生活、健康非常密切，工業應用日益廣泛(出自維基百科)。

### 2. 什麼是 biofilm (生物膜或菌膜)?

在自然界中，微生物的唯一生存模式是形成 Biofilm(菌膜)，它是一個可附著在各種物質表面、多層但不同種類的微生物共生的組合體，它能非常有效率的利用周遭的物質當作食物，並能夠協同作戰抵禦各種殺菌劑或其它不利生存的條件，這是經過好幾十億年的演化成果。

無所不在的菌膜，對要長期使用的純水系統來說，並不是一個好消息! 因為一個管理不當的純水系統對使用者來說，會是一場失控的災難。

基本上，在純水系統中存在的微生物分成兩種狀態:

一種是附著性的(sessile)、有能力繁殖的，叫做菌膜(biofilm)。

另外一種是懸浮性的(planktonic)、無法繁殖的、隨著純水流動的、微生物採樣時會被採樣到的，是我們熟悉的水中微生物。

### 3. 為什麼純水系統的微生物濃度越低越好?

控制微生物的濃度，就是控制最終產品被汙染的風險，您可以目標管理(添加防腐劑)，或是源頭管理(純水系統管理)，雖然執行這兩種選擇的難易度不同，但客戶的評價也會不同吧!

### 4. 純水系統被微生物汙染時，會產生什麼樣的問題?

先說明一下，所謂的微生物汙染，就是指菌膜的汙染(biofilm)，如果純水系統被菌膜汙染甚至包覆時，首當其衝就是逆滲透膜(RO)，因為菌膜會很快分解這個高分子薄膜，導致對水中雜質的去除能力大打折扣，使整體的產出水質影響巨大。

其次，菌膜會對純水系統不可或缺的離子交換樹脂的效能發生致命的影響，理由很簡

## ◀ 純水系統的十二個微生物問題 ▶

單，被菌膜包覆的離子交換樹脂將損失九成以上的交換表面積，不只耗材壽命變短，它本身也變成微生物的溫床，影響甚巨！

### 5. 水中的微生物如何檢測？

基本上，還是要使用傳統的培養皿方法，並且分成塗抹法及濾膜法兩種為主，我們先簡介最常用的塗抹法如下：

#### 水中總菌落數檢測方法－塗抹法 (簡化版)

塗抹法使用<胰化蛋白胍葡萄糖抽出物培養基> (Tryptone glucose extract agar; TGEA) 或<培養皿計數培養基> (Plate count agar; PCA) 來培養並形成菌落之水中好氧及兼性厭氧異營菌。

#### 採樣與保存流程:

- (一) 盛裝水樣檢驗微生物時，應使用清潔並經滅菌之玻璃瓶、無菌塑膠 容器或市售無菌採樣袋，且於採樣時應避免受到污染。
- (二) 採樣前應清潔手部，出水口以 70% 至 75% 酒精消毒。
- (三) 運送時水樣溫度應維持在 $<10^{\circ}\text{C}$  且不得凍結，實驗室內保存溫度應維持在  $4 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 。
- (四) 水樣應於採樣後 24 小時內完成水樣塗抹步驟，並置入培養箱中培養。
- (五) 水樣量以能做完所需檢驗為度，但不得少於 100 mL。

#### 培養操作步驟:

- (一) 水樣在進行檢測或稀釋之前必須劇烈搖晃 25 次以上，以使樣品充分混搖均勻。
- (二) 以 1 mL 無菌吸管原液或各稀釋度水樣滴在培養基上。原液或各稀釋度水樣均需進行二複。
- (三) 將無菌之彎曲玻棒放在培養基上，再用手或旋轉桌 (Turn table) 旋轉培養皿至水樣均勻分佈於培養基表面、完全被培養基吸收為止。
- (四) 倒置培養皿於培養箱內，在  $35 \pm 1^{\circ}\text{C}$  培養  $48 \pm 3$  小時。
- (五) 計數各稀釋度培養皿中所產生的菌落數並記錄之，若菌落太多造成計數困難，則以「菌落太多無法計數」(Too numerous to count; TNTC) 表示。
- (六) 步驟 (二) 至 (三) 須在無菌操作檯內操作。

### 6. 在純水的國際標準上，微生物的標準應是多少？

一般而言，國際間對純水系統的生菌數容許量基準介於 100 cfu/ml~ 0 cfu/ml 之間。  
以下是重要的水質標準摘錄(紅字標識為微生物部分):

#### ASTM Standards for Laboratory Reagent Water (ASTM D1193-91)

ASTM: American Society for Testing and Materials

Measurement (Unit)	Type I	Type II	Type III	Type IV
Resistivity (M $\Omega$ -cm)	> 18	> 1	> 4	> 0.2 (200K $\Omega$ )
Conductivity ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	< 0.056	< 1	< 0.25	< 5
pH at 25 $^{\circ}\text{C}$	N/A	N/A	N/A	5.0 - 8.0
Total Organic Carbon	< 50	< 50	< 200	N/A

## 純水系統的十二個微生物問題

(TOC) ppb or µg/L				
Sodium (ppb or µg/L)	< 1	< 5	< 10	< 50
Chloride (ppb or µg/L)	< 1	< 5	< 10	< 50
Silica (ppb or µg/L)	< 3	< 3	< 500	N/A

### Additional ASTM Sub-Standards for Laboratory Reagent Water

Measurement (Unit)	A	B	C
Heterotrophic Bacteria Count (CFU/ml)	< 1	< 10	< 1000
Endotoxin (units per ml)	< 0.03	< 0.25	N/A

### CLSI-CLRW Guidelines

CLSI-CLRW: Clinical and Laboratory Standards Institute - Clinical Laboratory Reagent Water

<sup>1</sup> CLSI was formerly known as NCCLS (US National Committee for Clinical Laboratory Standards)

Contaminant	Parameter and Unit	Type 3	Type 2	Type 1	CLRW
Ions	Resistivity (MΩ-cm)	> 0.05 (50 KΩ)	> 1	> 18	> 10
Organics	Total Organic Carbon (TOC) ppb	< 200	< 50	< 10	< 500
Pyrogens	(EU/ml)	N/A	N/A	< 0.03	---
Particles	Particles > 0.2 µm (units/mL)	N/A	N/A	< 1 (0.22 µm filtration required)	Include 0.22 µm filtration
Colloids	Silica (ppb)	< 1000	< 100	< 10	---
Bacteria	Bacteria (CFU/ml)	< 1000	< 100	< 1	< 10

### Laboratory Water Purity Specifications

Contaminant	Parameter and Unit	Type 1	Type 2	Type 3
Ions	Resistivity (MΩ-cm)	> 18	> 1	> 0.05 (50 KΩ)
	Silica (ppb)	< 10	< 100	< 1000
Organics	Total Organic Carbon (TOC) ppb	< 20	< 50	< 200
Particles	Particles > 0.2 µm (#/ml)	< 1	N/A	N/A
Bacteria	Particles > 0.2 µm (#/ml)	< 1	< 100	< 1000
	Endotoxin (EU/ml)	< 0.001	N/A	N/A

## USP Standards

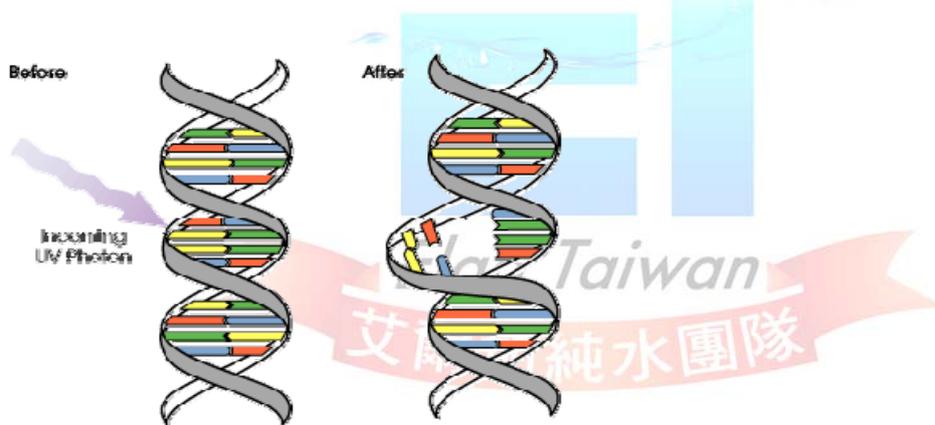
USP: United States Pharmacopoeia

Properties	USP 'Purified Water'	USP 'Water for Injection' & 'Highly Purified Water'
Conductivity ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ @ 25°C)	< 1.3	< 1.3
Total Organic Carbon (TOC) ppb or $\mu\text{g}/\text{L}$	< 500*	< 500*
<b>Bacteria (guideline)</b>	<b>&lt; 100 CFU/ml</b>	<b>&lt; 10 CFU/100ml</b>
Endotoxin (EU/ml)	N/A	0.25 EU/ml

## 7. 各種殺菌方法的原理探討

### A: 紫外線殺菌

紫外線殺菌法是目前常使用的殺菌方法之一，它的殺菌機制是破壞細菌核酸(DNA)的生命遺傳物質，使其無法複製及繁殖，其中主要的反應是 UV 光將核酸分子內的相鄰的 Thymine 或 Cytosine 鹽基之間產生新的共價鍵，變成雙合體(dimer)。



因為紫外線殺菌法安全，經濟，對菌種的殺菌差異性小，照射後的水質也不會受到改變，所以近年已廣泛使用這種方法，例如專業的純水系統及一般飲用水就使用這種殺菌法以達到微生物的控制目標。

紫外線殺菌法的缺點是在純水系統中，易誘發出 photo-reactivation(光反應修補)機制，長期來看可能天擇(natural selection)出能夠抵抗紫外線的微生物，所以必須配合其它的手段來控制微生物濃度。

單獨使用時，紫外燈不是一種有效的方法，因為它無法去除已存在的菌膜(因為光線照不到)。

### B: 加熱殺菌(>80°C)

效果最好，殺菌後有沒有化學殘留問題，但成本也最高，約是傳統系統十倍以上的價格!

### C: 化學殺菌

## ◀ 純水系統的十二個微生物問題 ▶

系統之化學藥劑消毒法，包括：

鹵化物、過氧化氫、臭氧或過醋酸等。

鹵化物(漂白水等)是有效的消毒劑，但很難從系統中沖洗掉(所以會有殘留問題，但成本最低，安全性最高)，且破壞菌膜的能力較差。

過氧化氫、臭氧和過醋酸等化合物藉由形成活性過氧化物和自由基(以氫氧基最顯著)，來氧化細菌和菌膜。

這些化合物，特別是臭氧的半衰期很短，因此在消毒過程中，需要持續添加。

過氧化氫和臭氧會迅速分解成水和氧；過醋酸在紫外燈下則分解成醋酸。

### 8. 純水系統為什麼一定要定期(化學藥劑)殺菌?

在任何開放的環境中,如果有水的存在,溫度又適中,微生物的孳生是必然的結果。

紫外燈不是完美的殺菌工具，因為照不到長菌膜的地方。

紫外燈不是完美的殺菌工具，因為非常容易篩選出抗紫外線的微生物。

因此，使用不同的殺菌方法才能對抗有生存智慧的微生物。

並且，**正確來說，化學殺菌是針對菌膜而非懸浮性微生物，而紫外線殺菌是針對懸浮性微生物而非菌膜。**

### 9. 死水會助長微生物的繁殖，但純水儲槽裡的水怎麼辦?

理想的解決方法就是將**純水儲槽及配水管線納入<循環設計>**

水系統應將儲存的純水予以再循環，以保持水的流動(理想上，是每秒流速 1.2 公尺或更高)。

不流動或低流動情況的水易助長微生物的增殖與菌膜的形成，特別是在水的輸送管線。

### 10. 常見微生物失控的原因?

- **水溫過高:** 環境溫度導致純水系統的水溫過高(>30°C)，會使微生物繁殖速度加快到失控的地步，這種情況經常發生，因為大部分的業主都習慣性的將純水系統安置在最邊陲地帶，通常沒有空調，布滿灰塵，太陽直曬。
- **水溫過高:** 直射陽光同樣會導致系統水溫過高(>30°C)，使得微生物繁殖速度加快到失控的地步。
- **水質變差:** 當水質變差(主要是 RO 或離子交換樹脂出問題)時，如果沒有警覺或立即改善，會因為水中的養分提高，也會導致微生物快速繁殖，絕大部分的用水者，不了解也不關心水質的變化。
- **合理用水量:** 業主的純水系統的每日製水能力通常很大，但每天實際用水量卻很少，這樣會導致系統在大部分的時間是在停機狀態，也就是維持在死水狀態，這對微生物來說，好像是在天堂。
- **純水儲槽內的水是死水:** 純水儲槽沒有<動態循環設計>，呈現死水狀態。
- **純水儲槽沒有氣密設計:** 容易被環境汙染，變成細菌溫床。
- **管線水不流動:** 單向水系統基本上是一個「死水管線」，供水管線非<動態循環設計>或

## ◀ 純水系統的十二個微生物問題 ▶

流速不足，或存在嚴重的盲管(dead leg)問題，微生物的汙染是必然的宿命

- **沒有定期更換耗材:** 很多用戶認為用水量少，所以不須準時更換耗材，殊不知，活性碳及離子交換樹脂是細菌繁殖的溫床，使用越久，微生物繁殖越嚴重。
- **紫外燈的功能失效:** 使用者要每周檢查紫外燈的功能，因為沒有光亮的紫外燈是完全沒有殺菌功能的，並且超過使用期限的紫外燈的強度是不足的，最好能定期更換。
- **沒有定期進行系統消毒(化學藥劑):** 特別是針對純水儲槽及配水管線，因為單靠紫外燈是無法去除菌膜的。

### 11.那麼要如何才能有效控制純水系統的微生物呢?

- **儘量確保純水水質(導電度或電阻值)**，因為水質純度越高則越不易長菌，因為對微生物來說，水質越純，養分越低。
- **耗材要在合理的時間之後更換**，用微生物的術語來說，避免使微生物的 growth phase 從 lag phase 進入到 log phase，否則微生物數量會失控(通常耗材表面積佔純水整體表面積的98%以上，所以耗材是在純水系統中提供大量微生物孳生所需要之表面積之元兇)。
- **系統每天的運作時間要足夠**，最好能在4小時/天以上，並且最好具備內部清洗(Flush)、消毒，循環等功能。
- **水質檢測功能要正常並準確**，比方導電度計…等，最好能定期做校驗或儀表比對工作。
- **紫外線燈管一定要定期更換**，因為超過使用期的紫外燈，即使還能點亮，但其強度已經嚴重衰減了，會使純水系統發展出菌膜(biofilm)的風險。
- **機台運作環境要儘量保持低溫(<30°C)**，衛生、通風、無塵，純化單體及流路標示清楚。
- **建立維修保養記錄簿**，建立責任制及緊急聯絡人，並定期記錄所有水質狀況。
- **建立定期化學殺菌機制及週期**，由專業的人員來執行。
- **改善配水管線的流路設計**，希望能夠達到無死水，無盲管的狀況。

### 結論:

純水系統的微生物問題，遠比您想像的複雜很多，這是因為微生物是有生命的、有生存策略的、在地球上也生存了幾十億年了，再加上台灣的溼熱天氣，所以即使歐美國家生產的純水系統，往往對微生物的防護能力有時也力有未逮，所以，具備正確的觀念，尋找有能力的供應商，投入持續性的管理才是完全之道!!

台灣艾爾加生命科學(股)公司 孫承儒

E-mail: [charles.sun@elga.com.tw](mailto:charles.sun@elga.com.tw)

Mobile: 0975-578-872

