

冷卻水系統的管理

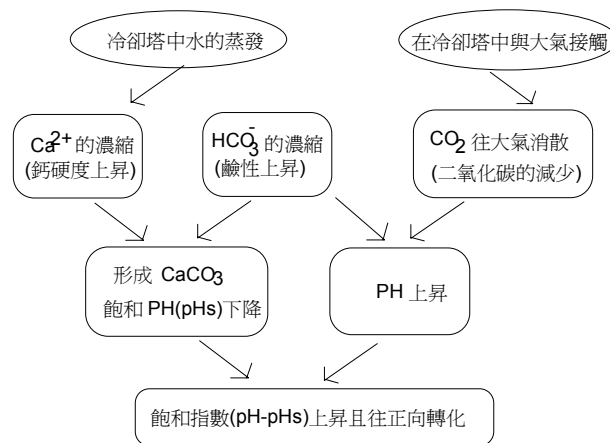
原文刊載於一丞通訊 VOL.11. 1997.2.

酒井康行

1.冷卻水具備抑制腐蝕性的能力

在開放冷卻塔的循環過程中，氧氣極容易溶於冷卻水中。且冷卻塔的運轉過程中，水份不斷的蒸發，造成溶質的濃縮現象，再加上大氣中酸性污染物質亦溶入冷卻水中，故冷卻水很容易被誤解是強腐蝕性的水。圖 1 所示形成冷卻水的過程中，飽和指數（後述）均上昇，此點和其他水系在基本上就不同了。除了相當嚴重的大氣污染之外，其他情況時冷卻水的飽和指數皆上昇。即使補給自來水，飽和指數依然偏向 -1.5~-3，冷卻水飽和指數上揚，具備抑制腐蝕性的能力，系統內的金屬都不怕被腐蝕。

圖 1. 冷卻水的飽和指數上昇之因果關係



2.冷卻水系的障礙和原因

2.1.冷凝器銅管內面污染為起因

一般冷凝器內傳熱管是由銅或銅合金等耐蝕金屬製成的，不易產生腐蝕銹。而非耐蝕性的普通鋼和鍍亞鉛的鋼情形則有所不同，隨著腐蝕現象釋出 CaCO_3 ，不會因產生 CaCO_3 而形成積垢 (scale)。

冷凝器銅管內面污染通常是微生物繁殖引起的，微生物分泌黏蛋白質，這種黏性物質覆蓋銅管內面，使浮游固體物附著在上面。而碳酸鈣、積垢附著於無機物質上，以無機物為結晶核而形成鹽類，微生物很容易依附其上繁殖。一旦溶質大量被濃縮，鹽類濃度亦隨著提高，高濃度鹽類是藍藻類等植物性生物繁殖的溫床，而其他微生物繁殖就根據它們作為營養源，其中存在 *Legionella* 屬菌是引發急性肺炎的退伍軍人症 (Legionnaire's Disease, LD)，主要原因是沒有好好維護冷卻塔周邊環境衛生而導致的。表 1 所示為日本各地冷卻水塔中 *Legionella* 屬菌

含量的調查結果，Legionella 屬菌是定居於冷卻水中，即使供給營養不多，亦可以增殖許多共生微生物。微生物量和營養形成有機物量，代表 TOC (Total Organic Carbon) 和冷卻水的濃縮倍數之間，在許多報告中可以發現兩者密切的關係，不難察覺出過度濃縮形成高濃度的無機鹽類，而這些鹽類正是微生物繁殖的基本條件。爲了抑制冷卻水中的生物繁殖（包括 Legionella 屬菌），冷卻水中鹽類（溶質）濃度不要過高，故適當地管理冷卻水的濃縮倍數是極爲重要的課題。

表 1 日本各地冷卻水塔內 Legionella 屬菌檢出狀況

項目 \ 區域	北海道	東北	關東	中部	近畿	中國	四國	九州	合計
檢體數	12	30	71	48	48	63	26	131	429
陽性檢體數	3	4	41*	22*	23*	25*	11*	52*	181
檢出率〔%〕	25.0	13.3	57.5	45.8	47.9	39.7	42.3	39.7	42.2

*1 檢體中檢出複數種的 L.Pneumophila 或 Legionella 屬菌（藪內英子,1978）

2.2 冷凝器銅管穿孔腐蝕

如上述所提及冷凝器銅管被腐蝕的因素之一是微生物，它們分泌的粘著性物質覆蓋於金屬表面，使浮游固體物黏著在上方，導致氧氣供給遲滯不進，於是開始產生空隙腐蝕。而銅管本身外層有不均等氧化物皮膜，一旦氯離子 Cl⁻或硫酸根離子 SO₄²⁻變多，PH 值或鹼度降低，這種情況將更嚴重。

2.3 冷卻水形成腐蝕性

日本自來水導電率，就東京和大阪而言，是 200~300 μ S/cm，而名古屋和一部份地方都市是 60~70 μ S/cm 且電解質非常少，唯有鹼度和鈣硬度降低，飽和指數才會偏向負值，像這樣的補給自來水情況，因大氣污染中和了鹼度，使 PH 值大幅降低，冷卻水的飽和指數轉化爲正向，而濃縮倍數變得相當大，冷卻水的飽和指數若滯留在負向，就會形成腐蝕性，配管等的腐蝕亦會繼續發生。

3. 冷卻水水質對於補給水產生的變化

冷卻塔中因水份的蒸發和大氣污染物質的溶入，系內有碳酸鈣等的釋出，補給水對於冷卻水的水質產生變化，以下就來進行這方面的討論。

3.1 冷卻水的理論濃縮倍數

當冷卻水系出入各種水量達到平衡狀態時，補給水對於冷卻水溶質的濃縮倍數，理論上可參考下式：

$$\text{理論濃縮倍數} = \frac{\text{補給水量}}{\text{強制排放量} + \text{自然排放量}}$$

$$\text{且補給水量} = \text{蒸發水量} + \text{強制排放量} + \text{自然排放量}$$

3.2 全溶解固形物和鈣硬度

成爲理論濃縮倍數的指標之溶質典型，是安定存在於水中的氯離子(Cl⁻)，其他，如硫酸根離子(SO₄²⁻)，因大氣污染物質二氧化硫(SO₂)溶入冷卻水而產生的，一般對補給水而言，濃縮倍數比氯離子大。

鈣離子(Ca²⁺)和碳酸氫離子(HCO₃⁻)等形成的碳酸鈣(CaCO₃)成份被高度濃縮後釋出像積垢的狀態，因水中濃度降低，濃縮倍數比氯離子小。

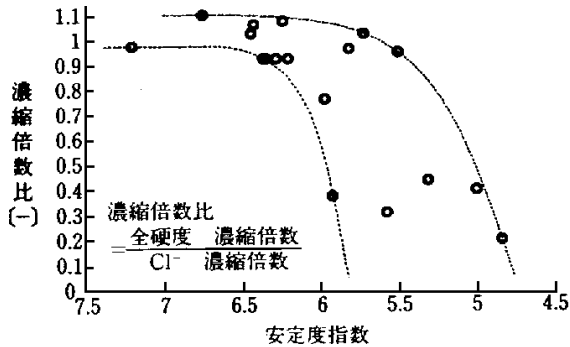


圖 2 “全硬度的濃縮倍數/Cl⁻的濃縮倍數”與安定度指數的相關例

事實上，多數工廠的冷卻水系得到以下的結果，對於氯離子的濃縮倍數，全硬度的濃縮倍數比和安定度指數（後述）的關係如圖 2 所示。濃縮倍數上昇，安定度指數就下降至 6.7，對氯離子而言，全硬度的濃縮倍數比急劇下降，可能因此時釋出碳酸鈣的積垢有關。

碳酸鈣不釋出積垢 (scale) 的冷卻水才是適當的界限濃縮倍數，全溶解固體物和鈣硬度如下式：

$$D_c \doteq ND_m \quad H_c \doteq NH_m$$

D_c, D_m ：每種冷卻水，補給水的全溶解固體物〔mg/l〕
 （以“0.7×導電率〔 $\mu S/cm$ 〕”代用即可）

H_c, H_m ：每種冷卻水，補給水的鈣硬度〔mg Ca CO₃/l〕
 （以“0.8×全硬度〔mgCaCO₃/l〕”代用即可）

N ：理論濃縮倍數〔-〕

3.3 M 鹼度

碳酸鈣釋出積垢 (scale)，就無法達到高濃縮狀態，形成 M 鹼度的濃縮倍數比理論濃縮倍數小。主要原因是大氣污染物質如 SO₂，NO₂，NO 等溶入冷卻水，SO₂ 形成硫酸(H₂SO₄)，NO₂ 和 NO 形成硝酸(HNO₃)中和了冷卻水一部份的鹼度。在大氣污染影響下，冷卻水的 M 鹼度如下式：

$$A_c \doteq NA_m - 150 (N - 1) \times ([SO_2] + 0.6 [NO_2] + 0.8 [NO])$$

A_c, A_m ：每種冷卻水，補給水的鹼度〔mg Ca CO₃/l〕

[SO₂][NO₂][NO]: 大氣中的 SO₂, NO₂, NO 之月平均值 [ppmv]

而上式方程式需依照下列條件才能成立。

1. 因白天大氣污染程度比日平均值大，白天運轉冷卻塔，所吸入空氣的大氣污染物質平均濃度為月平均值的 1.7 倍。
2. 假定在盛夏 7、8 月期間，冷卻塔運轉時間其平均負荷率的設計條件約 2/3，冷卻範圍設計值為 5°C 的 2/3 (即 3.33°C)。
3. 冷卻塔的循環水量和冷卻空氣流量比即水·空氣比，為空調用冷卻塔一般值的 1.65 倍
4. 冷卻水系中碳酸鈣幾乎沒有析出。

3.4 硫酸根離子濃度

如前述，硫酸根離子：SO₄²⁻是大氣的 SO₂ 溶入冷卻水而產生的，冷卻水中濃度比理論濃縮倍數高，如下式求得：

$$S_c = N S_m + 140 (N - 1) [SO_2]$$

S_c, S_m: 每種冷卻水，補給水的硫酸根離子濃度 [mgSO₄²⁻/l]

3.5 游離碳酸濃度

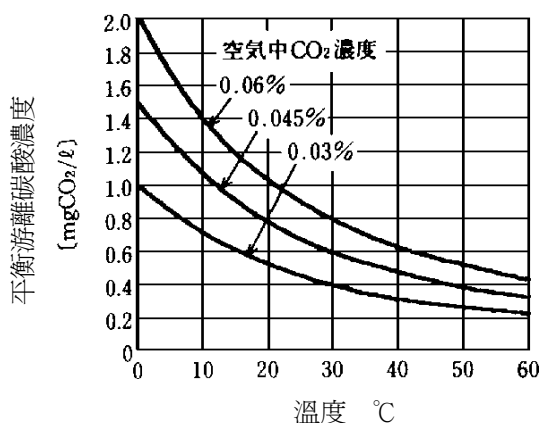


圖 3 空氣中 CO₂ 濃度與水中游離碳酸濃度的平衡

冷卻水的游離碳酸 (溶於水中的 CO₂) 濃度和冷卻塔吸入空氣中的 CO₂ 分壓之間的平衡關係如圖 3 所示，橫軸的溫度是冷卻塔的出口水溫 [°C]，以全地表平均而言，大氣的 CO₂ 濃度約 0.034vol%，在田園地區約 0.03vol%，而都市內之值最大約為 0.06vol%。

針對大樓空調用冷卻塔吸入的空氣，不包括廚房排氣等，一般都市內約為 0.045vol%，如果使用前述 M 鹼度計算條件，其冷卻塔出口水溫約 29°C 左右，冷卻水的游離碳酸濃度則約為 0.6mgCO₂/l。

3.6 PH 飽和指數，安定度指數

冷卻水的 PH 是根據前項求得的 M 鹼度和游離碳酸濃度如下式計算求得。

$$PH = 6.31 + \log \frac{M \text{ 鹼度} [mgCaCO_3/l]}{\text{游離碳酸濃度} [mgCO_2/l]}$$

使用 PH 和前項求得的全溶解固體物，M 鹼度、鈣硬度，依下式可計算出飽和指數和安定度指數：

$$\text{飽和指數} = pH - pHs$$

$$\text{安定度指數} = 2pHs - pH$$

$$pHs = 8.22 + \frac{682}{156 + \text{溫度} [^{\circ}C]} - \frac{100}{450 + \text{全溶解固體物} [mg/l]} - \log(M \text{ 鹼度} [mgCaCO_3/l]) - \log(\text{鈣硬度} [mgCaCO_3/l])$$

4. 冷卻水適當濃縮倍數的計算方法

依照前項 3 的計算方式，使用冷卻水的水質不同，濃縮倍數 N 亦會改變，將溫度作為冷卻水的往復平均溫度來計算 pHs 和安定度指數，以碳酸鈣不積垢化為界限，當安定度指數為 6.7 時的濃縮倍數，N 才為適當濃縮倍數，表 2 為大阪市內某地點計算適當濃縮倍數的實例。得到適當濃縮倍數乘以補給水的導電率，即為冷卻水的導電率作為管理基準。

表 2 冷卻水的適當濃縮倍數計算

水質項目\濃縮倍數	補給水	3.0	4.0	3.75
全溶解固形物 [mg/l]	157.5	472.5	630.0	590.6
M 鹼度 [mgCaCO ₃ /l]	35	89.7	117.1	110.2
鈣硬度 [mgCaCO ₃ /l]	35	105.0	140.0	131.3
Ph	(6.09)	8.47	8.59	8.56
pHs	(8.63)	7.80	7.58	7.63
飽和指數：pH-pHs	(-1.7)	+0.67	+1.01	+0.93
安定度指數：2pHs-pH	(10.4)	7.13	6.56	6.70

(SO₂)=0.0135, (NO₂)=0.0315, (NO)0.0233ppmv

游離碳酸濃度=0.6mgCO₂/l, 溫度=30℃

5. 實現適當濃縮倍數的方法

為實現適當濃縮倍數而進行強制排放量，如下式：

$$\text{強制排放量} = \frac{\text{蒸發水量}}{\text{適當濃縮倍數} - 1} - \text{自然排放量}$$

蒸發水量是冷卻範圍 1°C 相當於循環水量的 0.18% ，通常辦公大樓的平均冷卻範圍為 3°C 左右，故蒸發水量約為循環水量的 0.6% ，以這樣的定義，強制排放率如下式：

$$\begin{aligned} \text{強制排放率}[-] &= \frac{\text{強制排放量}}{\text{冷卻水循環量}} \\ &= \frac{0.006}{\text{適當濃縮倍數} - 1} - \text{自然排放率} \end{aligned}$$

自然排放率是冷卻水循環量和自然排放量的比率〔-〕。例如適當濃縮倍數為 3.0 時，假定自然排放率為 $0.1\% = 0.001$ 依照上式計算強制排放率為 $0.006 / (3.0 - 1) - 0.001 = 0.002 = 0.2\%$ 。圖4為簡便強制排放調整方法。在此冷卻塔橫切面積 A 和漏斗（承接落水）的表面積 B 的比率 B/A 即為理想強制排放率。冷卻水的可能最大濃縮倍數是視強制排放水量為零如下式：

$$\text{可能最大濃縮倍數} = 1 + \frac{\text{蒸發水量}}{\text{自然排放量}}$$

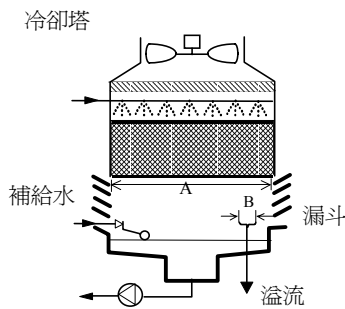


圖4 簡單的強制排放調整方法

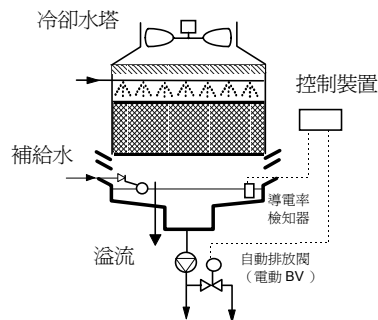


圖5 自動排放裝置構造圖

如前述通常辦公大樓其循環水量的 0.6% 若為蒸發水量，自然排放率則為 0.2% ，如上式，可能最大濃縮倍數則為 $1 + 0.6/0.2 = 4.0$ ，適當濃縮倍數比此值小較好，若大時大於此值，則無法達到適當的濃縮倍數。

補給水的 M 鹼度降低，大氣污染嚴重時，適當濃縮倍數變得相當大。整體冷卻負荷變小，大部份是指分散型熱泵系統，此時蒸發水量亦非常少，任何場合中，欲提高

可能最大濃縮倍數時，就必須減少自然排放量。

使用自動排放裝置，利用急速補給，將冷卻水以溢流（over flow）的方式運轉水位達到最大極限的溢流水位，當運轉停止時，冷卻塔上方水槽（散水槽）或橫向配管內原有的水滴落而引起溢流（over flow）。只要增加自然排放量就可以抑制可能最大濃縮倍數降低。

當適當濃縮倍數變大時，如圖 5 所示。從循環泵的吐出管採取強制排放等方法。為降低運轉水位必須在運轉停止時，分配聚集的落水，這種強制排放的自動閥為適合污濁地區使用的電動泵閥。

6. 冷卻水水質管理方法

正確地設定適當濃縮倍數之下的導電率之管理目標值，是極為重要的管理方式，與有無裝置自動排放無關。如果有裝置自動排放，不僅可以正確決定導電率，亦可由導電率檢知器得到正確導電率。但檢知器容易附著積垢或污垢，故必須要清潔電極。累積以上經驗，冷卻水的水質管理要領如表 3 所示。

如圖 6 所示，設置側面過濾器以去除浮游懸濁物，使冷卻水更澄清化，可有效防止冷卻水系遭受污染。從前工廠所使用的冷卻水系重新組合程序化，成為近年來大樓空調用的冷卻水配備。但過濾器為一般砂濾過器，通常標準可處理量為冷卻水循環水量的 2~3%。

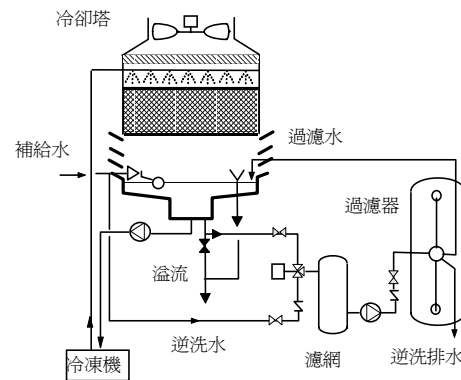


圖 6 冷卻塔側部過濾器的構造

7. JRA 的冷卻水水質基準和運用實例

日本冷凍空調工業協會（JRA）於 1971 年制定後，於 1980 年和 1994 年作一部份修改的冷卻水水質基準如表 4，其適用對象為冷凝器銅管，主要為延長銅管壽命，保持冷凍機效率與防止效率降低。制定大綱以 1960 年代大氣污染非常嚴重的時候，因濃縮過度導致水質惡化，使銅管遭受腐蝕，而經常發生冷凝器爆裂事故的因應對策。

當大氣污染嚴重時，補給水的 M 鹼度之比率較低時，濃縮倍數會略高，冷卻水的 M 鹼度降低，PH 值亦下降。因大氣中污染源的主成分： SO_2 溶入冷卻水中，提高了有害於銅管的 SO_4^{2-} 濃度，導致 pH 值降低，使溶出的銅活性化發展至最後形成穿孔腐蝕。目前的大氣污染越來越嚴重，而冷卻塔均沿著交通頻繁的道路設置，即使除卻吸入排氣管廢氣等的因素，通常稍微濃縮，鹼度或 PH 值升高，冷凝器銅管很容易就會腐蝕。

表 3 冷卻水水質管理要領

管理項目	管理頻率	管理基準	異常時的處理	異常時引起的問題
檢查自動排放的裝置	每月 1 次	導電率設定值正確	從最新的水質中計算並校正目標導電率	因腐蝕或積垢而致能力降低
		導電率檢知器正確測量冷卻水	檢查並清掃導電率檢知器 檢查導電率檢知器返回的水流	
		自動閥正常動作	檢查並清掃自動閥	
冷卻水的外觀	每月 1 次	沒有混濁，浮游物污垢、臭氣等現象	測量混合 PH 值，PH 值高時，自動排放裝置的設定導電率將下降（依要點 3 來處理）	因積垢而致導能力降低
		沒有紅水現象	測量混合 PH 值，PH 值低時，依要點 4 來處理	腐蝕
冷卻塔的外觀	每月 1 次	沒有積垢藻類等現象	測量混合 PH 值，PH 值高時，自動排放裝置的設定導電率將下降（依要點 3 來處理）	因積垢而導致能力降低
		生鐵部份沒有腐蝕的現象	測量混合 PH 值，PH 值低時，依要點 4 來處理	腐蝕
		沒有產生藻類的現象	清掃冷卻塔 視情況加入殺藻劑	因黏質物而致能力下降
PH	一季 2 次 〔初期和最大負荷時〕	8.3 ≤ PH ≤ 8.6	當 PH < 8.3 時，為避免更換太多的冷卻水依要點 4 來處理。 導電率的設定值極低才是正確的	腐蝕
			當 PH > 8.6 時，為避免太少的強制排放自動排放裝置沒有正常動作，依要點 2 或要點 3 來處理。 導電率的設定值極高才是正確的	因積垢而導致能力低下

要點：

1. 進行適當地強制排放，使用自動排放裝置維持適當濃縮倍數。
2. 正常運作自動排放裝置，適當地檢查以下事項：
 - i) 正確地設定導電率（以“補給水的導電率×適當濃縮倍數”為目標值）。
 - ii) 導電率檢知器沒有污垢，且能量測正確值。
 - iii) 自動閥的動作是否正常。
3. 確認冷卻水是否混濁，有無浮游物、污垢、臭氣等，冷卻塔有無積垢，藻類、黏性物質等，因 PH 值高時會導致濃縮過度，故應適當地進行強制排放，以降低自動排放裝置的設定導電率。
4. 當冷卻水不澄清有紅水現象產生時，PH 值降低且冷卻塔的生鐵部份會遭受腐蝕，當自動排放裝置的設定導電率怎麼也無法到達時，因冷卻水更換太多，導致濃縮不足，泵停止時檢查溢流（over flow）是否正確。

表 4 日本冷凍空調工業協會（JRA）的冷卻水水質基準（1994 年）

基準項目	對象水	循環式		全排放式*
		循環水	補給水	水
PH (25°C)		6.5~8.2	6.0~8.0	6.8~8.0
電氣傳導率 (25°C)	[μ S /cm]	800 以下	300 以下	400 以下
氫離子	[mg cl/l]	200 以下	50 以下	50 以下
硫酸根離子	[mg SO ²⁻ ₄ /l]	200 以下	50 以下	50 以下
M 鹼度	[mg CaCO ₃ /l]	100 以下	50 以下	50 以下
全硬度	[mg CaCO ₃ /l]	200 以下	70 以下	70 以下
鈣硬度	[mg CaCO ₃ /l]	150 以下	50 以下	50 以下
離子狀矽石	[mg SiO ₂ /l]	50 以下	30 以下	30 以下

※全排放式（one through）：水不進行循環，直接排放。

此基準對於 PH 值的容許範圍很窄，並只規定溶質濃度的上限，而濃縮倍數儘可能降低為原則。姑且不論冷凝器銅管，對於配管機器的普通鋼或鍍亞鉛鋼等，溶質被濃縮後，冷卻水的飽和指數稍微偏高，碳酸鈣就釋出，故必須要防範腐蝕。從以上觀點，要特別注意這個基準的適用範圍。

另一方面，從 1988 年 7 月~9 月間進行了約 203 件冷卻水水質的實態調查，全件數的平均濃縮倍數為 15.7 倍，全件數 25%（51 件）有經過水處理，其中 63% 的平均濃縮倍數為 6.7 倍，倍數值偏低故水質良好，而其他 37% 有析出積垢的傾向，其平均濃縮倍數為 24.9 倍，且全件數中 75%（152 件）沒有經過水處理，其中有 71% 明顯釋出積垢，它的平均濃縮倍數為 20.6 倍。根據此調查報告，得知大多數均不依照 JRA 的水質基準，冷卻塔依然以強制排放運轉，造成冷卻水的濃縮過度。

8. 控制 Legionella 屬菌

Legionella 屬菌以 5mW，sec/cm² 的紫外線照射可以完全殺菌 99.9% 以上。而使用 99% 以上殺菌率的紫外線殺菌器，即使處理冷卻塔循環水量的 40%，其冷卻水的殺菌率亦可到達 80%，而冷卻水系以藥劑除菌洗淨後，亦可處理冷卻塔循環水量的 17%，和以紫外線處理時比較菌數，經過 1 個月後可抑制 1/50 以下，而經過 2 個月後可抑制 1/20 以下的菌數。但是只用藥劑來除菌洗淨，經過 1 個月後冷卻水中 Legionella 屬菌又恢復到洗淨前的菌數。

另一方面，即使不使用藥劑，冷卻塔下方水槽的抽水、注水，以充填式高壓水噴射洗淨，更進一步實施全配管的注水，如果強制性排放，Legionella 屬菌於清洗後 4~7 天又回到洗淨前的菌數。只有清掃下方水槽，若每一個禮拜進行一次強制排放不但菌數不會回復到洗淨前的菌數，而且慢慢逐漸地減少。

以上有關抑制 Legionella 屬菌的方式，主要是清掃冷卻塔內除去成為它們的巢穴之有機污染物，為減少清掃頻率提高清掃效果而添加藥劑以提昇除菌洗淨的性能，最重要的步驟是隨時進行強制排放，使冷卻水不會濃縮過度。

在台灣退伍軍人症的病例已有逐年增加的趨勢，許多使用冷卻水塔的業主也不免引起一陣恐慌，其實如果能針對水質進行管理，相信必能減少病菌生存的空間。將本文譯出，也希望能夠提供使用冷卻水塔的業主對於水質管理有一個遵循的目標。🌍