

電解水基礎研究

詹舒斐、陳仁仲、王今方/工研院能資所節水團

摘要

將水加以電解，在陽極會生成具氧化力之酸性水，陰極則生成具還原力之鹼性水，這兩種不同性質的產出水在實際應用上可分為：

酸性水：殺菌、收斂水、器皿清潔、烹調、電子零件及晶圓清洗等。

鹼性水：飲用、保健醫療、食物清洗浸泡、電子零件及晶圓清洗等。

電解水之應用目前在台灣最常見為市售供飲用之電解水機，以養生保健為主要訴求。為瞭解電解水之作用機構，本研究將以可調整基本參數之實驗用電解水機，深入瞭解電解水之製造與電解水之基本性質與組成變化情形，及植物生長與殺菌效果模擬測試。

實驗結果分述如下：

1. 加入氯化鈉電解可產生具殺菌力之次氯酸根(OCl^-)溶液。
2. 隨著電解時間增加，陽極之 pH 值遞減，氧化還原電位與導電度遞增。
3. 隨著電解時間增加，陰極之氧化還原電位遞減，pH 值與導電度遞增。
4. 電解水約可靜置 3 小時保持性質不變，超過則氧化還原電位逐漸回復電解前狀態，導電度升高，pH 值保持不變。
5. 自來水的 O17 NMR 圖譜半高寬約為 100Hz，電解水則為 50 Hz，持續監測 2 天無顯著變化，間接顯示電解水水分子團較自來水為小。
6. 綠豆芽生長測試，其生長速度及高度依次為電解水、麥飯石水、自來水、去離子水。
7. 市售電解水機測試結果大致與上述結果相同。

前言

機能水，顧名思義乃賦與水某種特定效能之新興技術。日本機能水專家藤田 矩彥教授曾為機能水下了一個較為嚴謹之定義 1：(1)水本身或(2)水中所含有的微量混雜物，在某種條件下(電解、電場、添加物、高溫高壓)，呈現本身卓越的潛在特性，使水達到某種特定的狀況(打斷氫鍵、改變酸鹼度、ORP)，或達到

某種值得注意的目的(防腐蝕，結垢.. 等)。此種新發現的水，均稱為機能水。舉例來說：水分子團(Cluster)與超臨界水屬於第(1)類，一些壽命有限的活性種子及金屬離子則歸屬於第(2)類。

其中的電解離子水(以下簡稱電解水)在日本已被廣泛應用在生活飲水、醫院消毒，此外工業清洗及農業殺菌方面亦有相關案例。其製造原理與理論基礎較為成熟²。電解水之應用目前在台灣最常見為市售供飲用之電解水機，以養生保健為主要訴求。為瞭解電解水之作用機構，本研究將以可調整基本參數之實驗用電解水機，深入瞭解電解水之製造與電解水基本性質及組成變化情形。希望藉由實驗結果，提供國人使用電解水之相關基本資料，未來更希望能建立電解水之效能測試評估方法，以達到有效利用機能水之目的。

一、電解水的原理 1

電解水是以電解方式使水之 pH 值與氧化還原電位改變，並分解產生 O₂ 及 H₂。一般來說，能讓自由能增加的化學反應是不存在的。因此水在自然狀態下不可能分解產生 O₂ 及 H₂。但是若在水中加入陰極、陽極，通上電流，即能比照法拉第定律發生電解反應。陽極的材料通常以不易溶解的白金或石墨比較妥當。在陰極及陽極的氧化還原反應如下：

- 陰極： $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- = 2\text{OH}^- + \text{H}_2$ 具還原力之鹼性離子水。
 $E_0 = 0 - 0.0591\text{pH}$
- 陽極： $\text{H}_2\text{O} = 2\text{H}^+ + 1/2\text{O}_2 + 2\text{e}^-$ 具氧化力之酸性離子水。
 $E_0 = 1.228 - 0.0591\text{pH}$

陰極和陽極表面生成氫與氧後，電極四週的水，便會傾向鹼性和酸性，氧化還原電位亦隨之改變。在兩極之間插入能限制水移轉的多孔性半透膜，或能讓陰陽離子有選擇性通過的陰陽離子半透膜，即能自陰極收集氫氧離子濃度高具還原力的鹼性水，陽極收集氫離子濃度高且具氧化力的酸性水，自陰極、陽極產生之電解水稱謂目前並未統一，電解酸性水亦稱為電解氧化水，電解鹼性水則是電解還原水，本文為統一起見一律稱電解鹼性水、電解酸性水。

二、電解水的應用

1. 鹼性離子水(pH=9-11)：

根據廠商之使用建議，主要為生飲、解宿醉、沖茶，咖啡、調酒、沖泡奶粉、煮飯、烹調用水、清洗蔬菜、植物澆灌等。

日本有醫療機構，以鹼性離子水代替一般飲用水供給患者飲用。其宣稱之療效包括治療胃腸不適、便秘、下痢、糖尿病、高血壓、改善體質等。台灣亦有學者指出鹼性離子水可消除人體內之自由基(free radical)⁴ (自由基含不安定之不成對電子，過多可破壞人體之脂質，甚至最後使細胞突變而產生癌症)。此外 NEC 公司在 1994 年曾提出以鹼性離子水清洗切割晶圓表面，比一般所用之氨水更能有效去除塵粒，且減少化學品之使用與廢水處理成本⁶。

2. 酸性離子水(pH=5-2.5)：

弱酸性離子水可當皮膚收斂劑使用，據稱有美容效果亦可清潔器皿、擦拭傢俱等。pH 值小於 2.5 之超酸性水則有殺菌功能，日本有醫療機構以超酸性水作為消毒傷口及殺菌用。農業上也有以超酸性水替代農藥殺菌，再以鹼性水改善土壤 pH 值之例子。日本 NEC 及 Organo 公司則發展出以酸性離子水清洗晶圓表面之殘餘金屬離子⁸，可減少化學藥劑之使用量。

三、實驗設備及步驟

1. 實驗設備：

為能有效控制電解時之影響因子，本實驗所使用之電解水製造設備為自行設計，電源供給可調整電解電位，電解電流，水樣進樣分為批次式(Batch type)或可調整流速之流動式(flow type)，並同時監測陰極槽與陽極槽之 pH、ORP、導電度變化。設備簡圖見圖 1，陰極為不銹鋼片，陽極為碳棒。

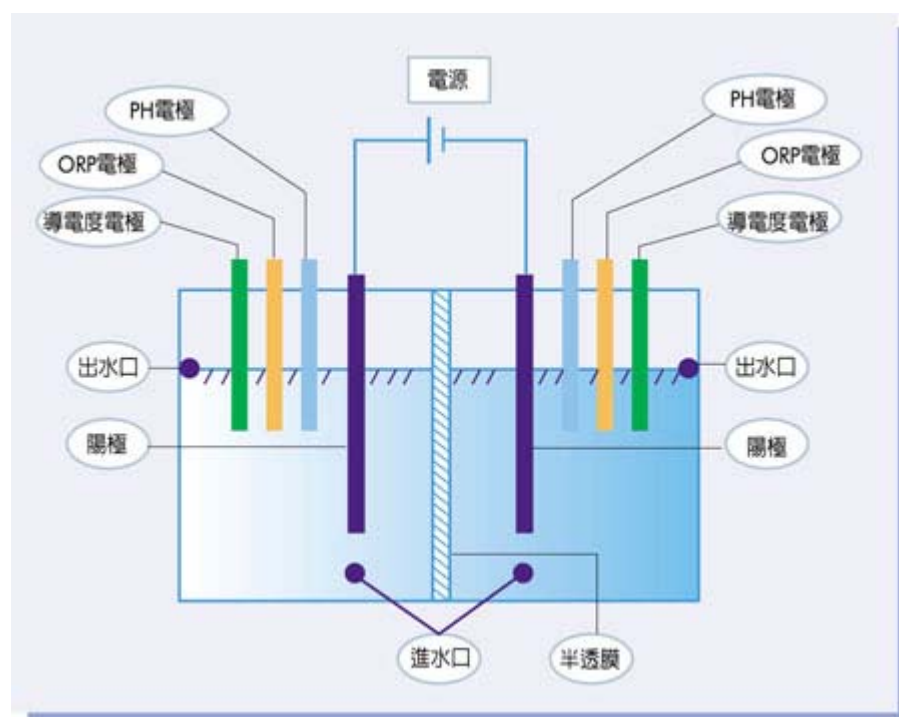
2. 藥品：

99.5%氯化鈉(島久製藥)。

3. 實驗參數：

影響電解水組成之因素包括電解電位、電解電流、電解時間(或進水流速)、電解質種類、半透膜種類等。本研究初步設定電解電位為 60V，進樣方式為批次式(Batch type)，比較樣品與改變參數分列如下：

- (1)水樣：自來水、2mM 氯化鈉溶液、5mM 氯化鈉溶液。
- (2)半透膜：陽離子交換膜。
- (3)電解樣品靜置時間：0-3 天。



▲圖 1 電解水製造設備

4.市售電解水機測試：

A、B、C 三種廠牌電解水機基本水質測試。

四、結果與討論

1.電解水的組成分析

在合理解釋電解水各種效能前，首先必須瞭解酸性水與鹼性水基本水質資料。本實驗首先以不加電解質之當地(新竹縣)自來水加以電解，觀察不同電解時間陰極與陽極之水質變化情形，其結果見表 1。

由於自來水中，電解質有限，即使電解電位提高到最大值 60 V，其電解電流亦只有 0.22A，且並未隨著電解時間增加而逐漸放大。但無庸置疑在陰極、陽極皆因電解而有離子產生，兩邊之導電度分別由 265.5 μ S/cm 增加到 406 μ S/cm、317.8 μ S/cm。其中包括在陽極產生氫離子(H⁺)，因此 pH 值由原本自來水的 7.63 降到 4.00，在陰極產生氫氧離子(OH⁻)，pH 值由 7.63 升高到 10.62。氧化還原電位

則發現陽極之變化不大(303mV~376mV)，可能為少量增加之餘氯所貢獻(0.08 mg/L~0.12 mg/L)。陰極之氧化還原電位則變化相當明顯，顯示產生了具還原力之物質。

在自來水樣中依需求加入不同之電解質，可產生不同組成或強化某部份特質之電解水。以下實驗以 2mM 及 5mM 氯化鈉溶液加以電解，其水質變化見表 2 表 4。

首先以新竹縣自來水混合氯化鈉配製成 2mM 氯化鈉溶液加以電解，其電解電流明顯比電解自來水高，起始電流為 0.43A，電解 30 分鐘後電流升高到 0.76A。導電度分別由 544 μ S/cm 增加到 965 μ S/cm(+) 1020 μ S/cm(-)，由於加入之氯離子(Cl-)可能經由電解產生次氯酸根離子(OCl-)，因此我們也加以監測餘氯、總氯之變化情形。陽極部份餘氯由 0.08mg/L 增加到 0.7mg/L，陽極電解水中可聞到明顯之氯味。陰極則偵測不到餘氯及總氯。pH 值兩極則各呈酸性及鹼性反應，陰極由於 pH 由 7.6 提高到 10.4，溶液中可明顯看到白色沉澱物，應為鈣、鎂等之氫氧化物沉澱。酸性水之 pH 值與電解時間成反比，ORP、導電度及氯離子濃度則成正比，由 ORP 可看出酸性水具氧化力，餘氯之增加則可增強其殺菌力，反之鹼性水之還原力隨著 ORP 遞減而加強。

日本栗田工業(株)研究開發總部以當地自來水混合氯化鈉當電解質，觀察不同電解時間酸性水與鹼性水之水質變化情形 3, 5，如表 3。發現與表 2 之變化趨勢一致，但電解水水質組成與表 2 有部份差異，其餘氯生成濃度明顯高出許多，可能當地水質與電解設備本身設計差異所引起，將來之實驗亦會針對此差異作研究。

將氯化鈉濃度提高至 5mM 加以電解，陽極之氧化還原電位(330~826mV)與餘氯濃度(0.12~2.45mg/L)明顯增加，結果見表 4，但還是與日本結果有差距。電解含氯離子之水溶液，肯定的確可製造出具殺菌力之 OCl-溶液，想製造含高濃度餘氯之酸性水，適度提高水中氯離子濃度應為可行之方式。

水質：新竹縣門牌水

電解時間 (min)	導電度(μS/cm)		ORP(mV)		pH		餘氯(mg/L)	
	陽極	陰極	陽極	陰極	陽極	陰極	陽極	陰極
0	265.5		303		7.63		0.08	
1	267.3	265.0	208	271	7.87	7.82		
2	267.1	264.9	217	275	7.71	7.73		
4	266.0	266.0	228	8	7.54	8.41		
5	265.4	265.9	249	-9	7.16	8.60		
10	228.9	269.1	297	-89	6.03	9.18		
20	283.9	284.5	380	-405	5.53	10.11		
30	406.1	317.8	376	-736	4.00	10.62	0.12	ND

▼表 2 電解 2mM 氯化鈉溶液之水質變化

電解時間 (min)	電解 電流(A)	導電度(μS/cm)		ORP(mV)		pH		餘氯(mg/L)		總氯(mg/L)	
		陽極(+)	陰極(-)	陽極	陰極	陽極	陰極	陽極	陰極	陽極	陰極
0	0.43	544.0		270		7.50					
1		543.0	544.0	161	226	8.10	7.69				
2		542.0	545.0	291	90	7.97	7.76				
3		544.0	548.0	255	33	7.38	8.07	0.04	0.04	0.17	0.07
4		547.0	552.0	350	11	6.92	8.56				
5		588.0	553.0	270	-2	6.33	8.83	0.08	0.06	0.14	0.13
10	0.42	478.0	596.0	352	-695	5.55	9.62	0.13	0.07	0.28	0.10
20	0.60	815.0	833.0	332	-758	2.50	9.90	0.43	0.04	0.46	ND
30	0.76	965.0	1020.0	332	-798	2.55	10.46	0.70	ND	0.84	ND
靜置時間											
1hr		1058.5	858.2	459	-830	2.48	11.08				
2hr		1049.7	774.2	466	-819	2.47	11.02	0.49	ND	0.59	0.02
18hr		779.0	546.0	346	-106	2.82	9.74	0.05	0.01	0.17	0.02
42hr		681.0	627.0	322	13	3.33	9.38	陽極澄清,陰極有白色沉澱			

註：自來水之餘氯為0.08mg/L，總氯0.10 mg/L

▼表 3 日本-不同電解時間之電解水的組成(2mM NaCl 溶液)

電解時間 (min)	電流 (A)	酸性水				鹼性水		
		ORP (mV)	pH	導電度 μS/cm	自由氯 Cl (mg/L)	ORPmV	pH	導電度 μS/cm
0	0.46	682	7.50	600	0.50	682	7.60	600
10	0.51	929	3.69	870	2.80	-44	10.22	780
15	0.58	967	3.30	1,140		-90	10.60	820
20	0.70	1,101	3.10	1,220	7.01	-165	10.80	690
25	0.81	1,054	2.96	1,450		-280	10.98	850
30	0.91	1,070	2.90	1,670	11.60	-315	11.15	980

2.電解水性質之持久性

即使可證明電解酸性水及電解鹼性水之性質與效用，但畢竟這種經電解產生之變化並非常態。製造出來後可以持續多久是必須面對的問題。以下實驗則是以 2mM 及 5mM 氯化鈉溶液電解 30 分鐘後靜置，觀察水質變化情形。2mM 氯化鈉溶液是電解 30 分鐘後靜置於電解槽中，以陽離子半透膜隔開陰極、陽極，結果見表 2。如先前所預料，氧化還原電位及導電度由於經半透膜擴散、中和，逐漸趨向電解前狀態。pH 值則維持在酸性與鹼性範圍，變化有限。餘氯本身為強氧化劑，經數十小時反應後即消耗殆盡。

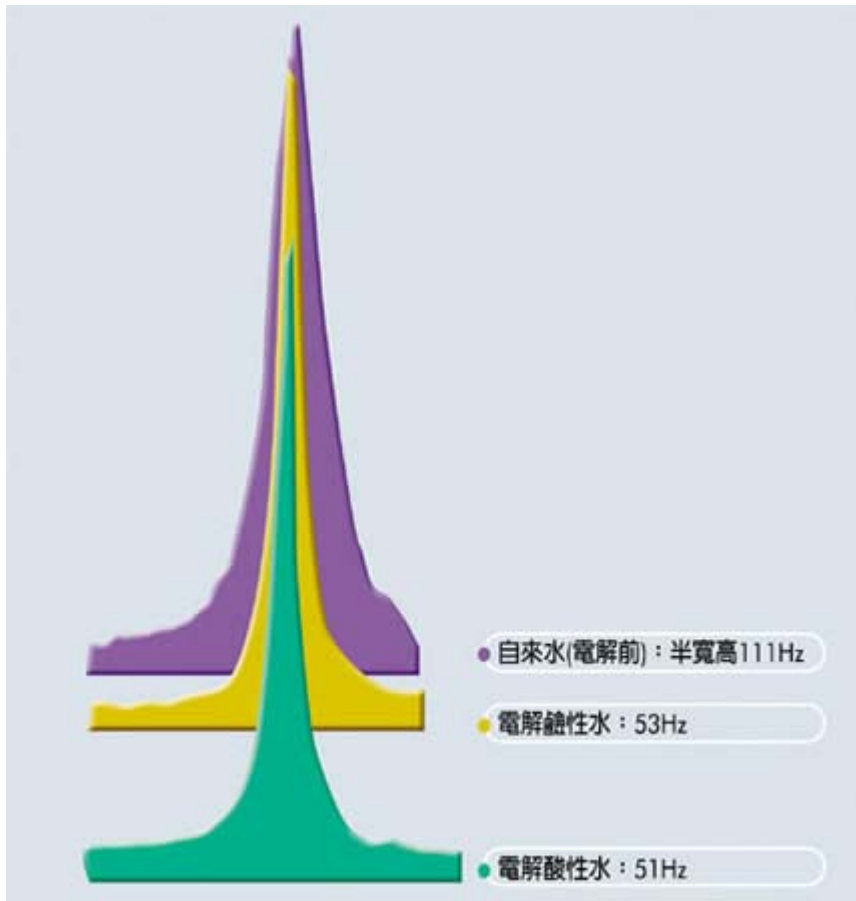
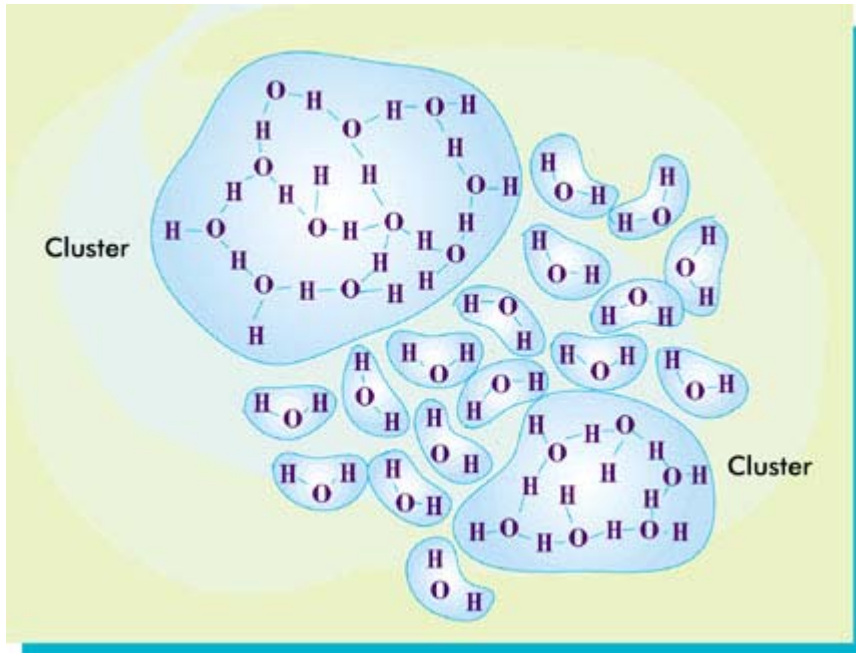
如電解完將酸性水與鹼性水分別裝在燒杯中並隔離光線靜置，除了餘氯外其性質約可保持 3 小時不變。其中發現有趣之現象，（見表 5）。即兩邊之導電度隨著靜置時間增加而增加，與上述表 2 之結果正好相反，顯示靜置後陸續產生離子，但因分開儲存使兩邊之離子無法反應成為中性分子，至於產生了那些離子則尚待研究。氧化還原電位則在靜置 46 小時後趨於平衡，一直觀察到 75 小時都維持在酸性水(546mV)，鹼性水(158mV)。其 pH 值在觀察時間內則無明顯變化，保持在電解完後之狀態。餘氯與總氯與先前觀察 2mM 氯化鈉電解水溶液結果一致，逐漸減少，但因與光線隔絕，所以消滅之速率較慢。

電解 時間(min)	電解 電流(A)	導電度(μS/cm)		ORP(mV)		pH		餘氯(mg/L)		總氯(mg/L)		氯離子(mg/L)	
		陽極(+)	陰極(-)	陽極	陰極	陽極	陰極	陽極	陰極	陽極	陰極	陽極	陰極
0	0.72	870.0		330		7.60		0.12		0.20		230.00	
0.5	0.72	870.8	874.9	305	297	7.00	6.84						
1	0.72	869.0	876.0	307	290	7.19	6.84						
2	0.73	564.5	876.4	347	14	6.56	7.38						
3	0.75	908.8	877.2	493	29	4.80	7.97						
4	0.76	932.6	878.5	519	-2	3.90	8.35						
5	0.76	1025.8	879.5	435	-21	4.04	8.66	0.16	0.10	0.28	0.14		
10	0.84	1134.1	860.7	686	-786	3.14	9.76	0.44	0.03	0.57	0.07		
20	1.15	1760.4	1444.0	741	-830	2.51	10.52	1.50	ND	1.68	0.02		
30	1.33	2227.5	1687.9	826	-844	2.16	10.44	2.45	ND	2.73	ND	190.00	230.00

▼表 5 5mM NaCl 電解水溶液靜置之水質變化

水分子團示意圖

電解 時間(min)	電解 電流(A)	導電度(μS/cm)		ORP(mV)		pH		餘氯(mg/L)		總氯(mg/L)	
		陽極(+)	陰極(-)	陽極	陰極	陽極	陰極	陽極	陰極	陽極	陰極
0		900		280		7.68	7.63				
30	1.71	1933.2	1823.0	810	-842	2.79	10.52	3.08	ND	3.39	ND
靜置時間(hr)											
0.5		1861.1	1582.6	879	-844	2.25	11.32	2.23	ND	2.90	ND
1		1880.4	1572.1	834	-841	2.23	11.35	2.08	ND	2.17	ND
2		1911.1	1555.0	859	-827	2.23	11.39	1.55	ND	1.95	ND
3		1944.6	1526.0	867	-785	2.23	11.42	1.20	ND	1.60	ND
5		2023.7	1424.9	860	-96	2.21	11.39	0.68	ND	1.19	ND
6		2078.5	1385.8	873	-91	2.22	11.32	0.53	ND	1.01	ND
21.5		2535.4	1546.7	545	76	2.22	10.12	0.03	ND	0.25	ND
46		3168.0	2400.0	549	129	2.29	9.80	ND	ND	0.05	ND
53		3245.3	2687.0	549	148	2.29	9.80	ND	ND	ND	ND
75		3680.3	3542.0	546	158	2.31	9.50	ND	ND	ND	ND
96.5		5443.6	6158.2	541	181	2.30	9.11	ND	ND	ND	ND



▲圖 2 核磁共振質譜儀(NMR)O17 分析圖譜

3.電解水的 O17NMR(核磁共振)圖譜

電解水之水分子團是否比一般水要小？目前之分析技術並沒有方法直接觀查證明。但測試樣品水之 O17 NMR(核磁共振)圖譜，則可間接比較各種不同來源水之分子團大小。O17 波峰的半高寬代表水分子間之作用力大小，相互作用力與水分子團大小成正比，半高寬亦隨之增減。因此如果測得水樣之半高寬比電解前小，則表示水分子團已經變小。

表 6 為電解水與自來水之測試結果，自來水經電解後其 O17 半高寬由 100 Hz 降為 50 Hz，連續監測 2 天並無明顯變化。典型自來水與電解之 NMR O17 半高寬圖譜參考圖 2。

以 2mM 及 5mM 氯化鈉溶液加子電解測試，其結果與上表大致相同。

▼表 6 電解水之 O17 半高寬(Hz)

靜置時間	自來水	酸性水	鹼性水
0分鐘	111.5	50.6	52.7
1小時	105.3	52.4	52.3
3小時	108.2	52.4	53.0
24小時	99.9	48.2	48.3
48小時	100.5	50.5	50.7

註：電解水取自自來水靜置30分鐘，電解電壓60V，以2mM 及5mM氯化鈉溶液加子電解測試，其結果與上表大致相同

▼表 7 電解水殺菌比較測試

靜置時間	單位：CFU/ml				
	純水	自來水 (餘氯0.1ppm)	次氯酸鈉溶液 (餘氯3ppm)	酸性水 (餘氯3ppm)	鹼性水
0 min	3.0×10^3	<5	<5	<5	3.1×10^3
5 min	3.1×10^3	<5	<5	<5	1.0×10^3
10 min	3.0×10^3	<5	<5	<5	2.7×10^2
30 min	2.9×10^3	<5	<5	<5	<5
60 min	2.9×10^3	<5	<5	<5	<5

4.電解酸性水的殺菌力測試

見表 7，在純水、自來水、3ppm 次氯酸鈉溶液、電解酸性水、及鹼性水中加入菌種靜置，觀查菌種之變化情形。自來水、次氯酸鈉溶液及電解酸性水皆有餘氯存在，具殺菌效果，水樣中測不到總菌落數，鹼性水則菌落數為慢慢減少，半小時後完全測不到菌落數。

5.植物生長測試

以培養皿鋪上棉花，每個培養皿放 20 顆綠豆，分別加入 20mL 去離子水、自來水、電解酸性水、電解鹼性水及麥飯石過濾水，並且每日補充 20mL 各種水樣，觀查記錄綠豆發芽及生長情形。詳細記錄見表 8 及圖 3 至圖 6。



豆芽播種



▲圖 3 豆芽生長狀況（第一天、第二天）



▲圖 4 豆芽生長狀況（第三天）

6.市售電解水機測試

廠牌		水質	pH值	ORP(mV)	導電度 (μ S/cm)	O^{17} 半高寬 (Hz)	餘氯 (mg/L)
原水	自來水		7.6	330	305	109.5	0.03
	自來水(煮)		8.32	228	314.1	53.7	ND
A	酸性水		3.30	524	662.1	47.6	0.03
	酸性水(煮)		3.08	519	601.5	53.7	ND
	鹼性水		8.42	-174	402.8	52.3	0.04
	鹼性水(煮)		8.12	173	465.5	51.5	ND
	強酸性水		3.17	1077	2117.8		14
	強酸性水(煮)		2.86	1081	2454.6		6
B	酸性水1		5.62	472	147.7	50.3	0.04
	鹼性水1		9.33	-53	101.7	47.5	ND
	酸性水2		6.66	252	104.5	52.1	0.03
	鹼性水2		8.61	24	207.3	51.6	ND
C	酸性水		5.86	264	255.5	95.5	0.04
	酸性水(煮)		6.59	322	240.5	127.9	ND
	鹼性水		9.10	-301	303.6	48.3	ND
	鹼性水(煮)		8.69	-115	259.3	48.7	ND
π	π 水		7.10	336	316.8	107.3	0.03
	π 水(煮)		8.36	219	275.6	51.3	ND
麥飯	麥飯石水		7.76	290	254	119.1	0.03
石水	麥飯石水(煮)		8.53	191	296.1	50.6	ND



▲圖 5 豆芽生長狀況 (第五天)



▲圖 6 豆芽生長狀況（第八天，去離子水、電解鹼性水、自來水、電解酸性水及麥飯石）

以市面販售之電解水機，廠牌 A、B、C 分別測試其煮沸前與煮沸後之基本水質，包括 pH 值、導電度、氧化還原電位(ORP)及 O17 半高寬，(見表 9)。

市售電解水機之測試結果大致與實驗室測試結果相同，煮沸後之電解水則酸性水無明顯改變，鹼性水之氧化還原電位則明顯往正值移動，其原因應為高溫加速氧化反應的關係，使鹼性水趨於平衡狀態。另一值得注意之處為自來水、 π 水、麥飯石水煮沸後其 O17 半高寬也會變窄(由 100 降至 50)，顯示只要在水中加一能量，不論是電解或加熱，皆可打散水分子團，使其變小。

▼表 10 電解水與原水之水質比較

	自來水	電解還原水 (鹼性水)	電解氧化水 (酸性水)
氧化還原電位(mV)	500	-250	750
pH值	7.2	8.9	3.7
溶氧量(mg/L)	8.2	7.2	9.5
硬度(mg/L)	61	75	45
鈣(mg/L)	14.2	17.4	10.3
鎂(mg/L)	6.5	8.0	4.9
氯(mg/L)	19.0	13.8	26.3
硫酸根(mg/L)	27.7	18.8	24.6

五、結論

水經電解後之性質變化，經本實驗結果與日本之實驗比對，可得到一致之現象。表 104 為一般飲用型電解水機與自來水之參考數值。但其所

宣稱的各種效用除了酸性水具殺菌力是顯而易見外，鹼性水對人體之療效有待醫界之注意與觀察。電解水之水分子較小以及有助於植物生長則可在本研究中得到初步之證實。

電解水之設備與操作成本，電力之消耗是未來想採用電解水設備來替代現有技術所必須考量的重點。電解水最大的優點在可節省藥品或以低(無)危險性之藥品替代高危險性藥品，間接降低廢液對環境之衝擊，節省人工配製時間及職業傷害亦是一大誘因。

參考文獻

1. 藤田 矩彥，「機能水の考察」，造水技術， June 29, 1999。
2. 2.通商産業省環境立地局産業設施課造水對策室，「明日の水資源」，p23，平成 8 年 8 月。
3. 3.關川 泰弘等，「電解酸性水的作用機構」，造水技術，p19~24，Vol.20. No.3，1994。
4. 4.呂鋒洲，元氣齋出版社，「電解水是好水」，p190，1998。
5. 5.長谷川 進等，「電磁場及電解處理水的效果」，造水技術 p19~23，Vol.20 No.2， 1994。
6. 6.蔡明蒔，「化學技術研磨後清洗技術簡介」，毫微米通訊， 6 卷 1 期，88 年 2 月。
7. 7.郭葉輝，「造水技術發展新趨勢-機能水介紹」，工業用水與造水技術之展望研討會論文集， p E-1~E-，87 年 11 月 10 日。
8. Hidemitsu Aoki etc.，“Cleaning Technologies using Electrolytic Ionized Water and Analysis Technology of Fine Structures for Next Generation Device Manufacturing”， mat.Res.Soc.symplProc. vol. 477，1997。