

# 中華民國第 60 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

國小組 化學科

第三名

080215

水中餘氯真的被吸收了嗎

學校名稱：新北市蘆洲區仁愛國民小學

作者： 小五 郭祖安 小五 吳軒齊 小四 李竑逸 小四 陳宥潔	指導老師： 陳秀蕙 張霽秀
---	---------------------

關鍵詞：自由餘氯、總氯、DPD

## 摘要

網路看到水中自由餘氯被食物或人體吸收的實驗，這說法讓我們疑惑，因此想研究自由餘氯真的被吸收了嗎？

以膠帶沾黏實驗物質的方式將實驗物質「間接」加入自來水，再用DPD餘氯測定液觀察變色情形，發現測定液呈現透明，表示水中沒有自由餘氯，但實驗物質本身沒有接觸到自來水，不可能吸收自由餘氯，是口腔、水果、茶葉、米溶入水中的成分把自由餘氯還原成氯離子；以總氯餘氯測試計測量，觀察水中「總氯、餘氯、結合氯」的變化，發現洗手、洗菜時，是手與菜上的細菌、表皮細胞和自由餘氯反應變成結合氯，才使自由餘氯濃度下降，並不是手和菜吸收了自由餘氯。我們的實驗可以證明，目前網路上關於自由餘氯被吸收的說法，都不是事實。

## 壹、研究動機

我們在大賣場看到濾水器老闆示範了自來水餘氯被吸收的實驗，他請路人把手伸進自來水中攪一攪後，原本滴入餘氯測定液會變黃色的自來水，竟然沒有變黃而是透明的，老闆說這是自來水中的餘氯被手吸收。上網查找後，發現還有蘋果、茶葉、米也都會使餘氯測定液從黃色變透明(圖 1)，難道自由餘氯真的被吸收了嗎？我們想知道：

1. 自來水中為什麼要有自由餘氯？
2. 如何確定自由餘氯有沒有被蘋果、茶葉、米、手等干擾物吸收？
3. 測定液為什麼會因為這些干擾物而呈現透明？
4. 水中變少的自由餘氯到哪裡去了？



圖 1 網路上自來水餘氯被吸收的實驗

## 貳、研究目的

- 一、探討「餘氯測定液變色的原理」
- 二、探討「干擾物為什麼能使餘氯測定液變透明」
- 三、探討「自由餘氯有沒有被吸收」
- 四、探討「水中自由餘氯的濃度變化」
- 五、探討「使自由餘氯濃度減少的原因」

## 參、研究設備及器材

自來水、純水、總氯餘氯測試計 FTC-420、DPD餘氯測定液、滴管、燒杯、量筒、濾紙、冰棒棍、膠帶、養樂多、小蘇打、醋、米、芭樂、蕃茄、蘋果、棗子、橘子、檸檬、糖、維生素C發泡錠、手、豬皮、大白菜、地瓜葉、積木。



## 肆、流程圖



## 伍、研究方法

### 一、文獻探討

#### (一) 自來水的自由餘氯標準

自來水的原水以氯氣( $\text{Cl}_2$ )消毒，依原水雜質含量，所需氯氣的用量就不同。氯氣加入水中反應，以自由餘氯( $\text{HClO}$ 、 $\text{ClO}^-$ )或結合氯( $\text{NH}_2\text{Cl}$ 、 $\text{NHCl}_2$ )等形態存在，其殺菌效果則依水質和自由餘氯、結合氯形態的濃度而異。因此有必要控管水中的自由餘氯的濃度(參考資料二)。

為了在配水管中停留時可預防細菌的滋生，自來水含自由餘氯是必要的，「飲用水水質標準」之自由餘氯的濃度是  $0.2 \sim 1.0 \text{ ppm}$ ，對人體健康無害，民眾可安心飲用(參考資料二)；不過，用在環境消毒的次氯酸水濃度高達  $200 \text{ ppm}$ (參考資料三)，不可以直接用在人體，以免造成傷害。

在自來水各供應區的網站，可以查詢每個月用戶端的水質資料，自由餘氯含量都在安全範圍內(圖 2)，大腸桿菌群、總菌落數都小於1(單位CFU/100毫升)(參考資料四)，可見自由餘氯真的能有效抑菌。

標準值	濁度 (NTU)	色度 (鉑鈷單位)	臭度 (初嗅數)	PH 值	自由餘氯 (毫克/L)	大腸桿菌群 (CFU/100 毫升)	總菌落數 (CFU/毫升)
	2	5	3	6.0-8.5	0.2-1.0	6	100
台北市中山區	0.10	<5	<1	7.1	0.50	<1	<1
新北市蘆洲區	0.30	<5	<1	7.5	0.40	<1	<1
宜蘭縣頭城鎮	0.25	<5	<1	8.1	0.45	<1	<1
台南市中西區	0.25	<5	<1	8.0	0.61	<1	<1

圖 2 取自 109 年 1 月各區用戶端供水數據資料

#### (二) 水中氯的形式

如上段所述，氯氣在水中反應，以自由餘氯( $\text{HClO}$ 、 $\text{ClO}^-$ )或結合氯( $\text{NH}_2\text{Cl}$ 、 $\text{NHCl}_2$ )等形態存在，其相關化學反應式整理如圖 3：

水中氯的形式		化學式反應式
總氯 TCL	自由餘氯 FCL	次氯酸 $\text{HClO}$ 次氯酸根離子 $\text{ClO}^-$ $\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HClO} + \text{H}^+ + \text{Cl}^-$ $\text{HClO} \rightarrow \text{H}^+ + \text{ClO}^-$
	結合氯 CCL	一氯胺 $\text{NH}_2\text{Cl}$ 二氯胺 $\text{NHCl}_2$ $\text{NH}_3 + \text{HClO} \rightarrow \text{NH}_2\text{Cl} + \text{H}_2\text{O}$ (一氯胺) $\text{NH}_2\text{Cl} + \text{HClO} \rightarrow \text{NHCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (二氯胺) $\text{NHCl}_2 + \text{HClO} \rightarrow \text{NCl}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (三氯胺)

圖 3 自來水中氯的形式及其相關化學反應式

自來水中氯的形式包含了：自由餘氯(Free Available Residual Chlorine, FCL)、結合氯(Combined Chlorine, CCL)、總氯(Total Chlorine, TCL)。

如圖 3所示，氯( $\text{Cl}_2$ )加入水中，會產生次氯酸( $\text{HClO}$ )，次氯酸在水中，會解離成次氯

酸根離子( $\text{ClO}^-$ )， $\text{HClO}$ 和  $\text{ClO}^-$  就是自來水中的自由餘氯，用來消毒滅菌 (參考資料五)。

電中性的 $\text{HClO}$  比帶負電的  $\text{ClO}^-$ 更容易通過細胞膜進入細胞內，所以 $\text{HClO}$ 的殺菌效率較高， $\text{HClO}$ 極容易與胺 (含人體表皮、污垢等有機胺) 進行反應，一氯胺 和 二氯胺 被稱做結合氯( $\text{CCL}$ ) (參考資料六)。

例如，皮膚的表皮上層由角質細胞組成，主要成分為角蛋白 (參考資料七)，當皮膚接觸自來水時，表皮角質細胞的胺基( $-\text{NH}_2$ )會和自由餘氯反應變成氯胺，而降低原有自由餘氯的濃度，使結合氯的濃度上升。

水中總氯的濃度則為兩者的總和： $\text{總氯} = \text{自由餘氯} + \text{結合氯}$ 。

自來水中的「氯離子  $\text{Cl}^-$ 」，則不屬於自由餘氯、也不屬於結合氯，當然也就不屬於總氯，所以無法用餘氯測定液 或 餘氯總氯檢測計 來檢測出  $\text{Cl}^-$ 的濃度。

### (三) 檢測餘氯、總氯的原理

目前最常見的自由餘氯檢測方法為 DPD 法，若在反應溶液中再加入碘化鉀，就能測出總氯，總氯和自由餘氯之間的差就是結合氯(圖 4)。

圖 4 中，DPD 滴入自來水會呈現粉紅色，是因為和自由餘氯反應後，DPD 被自由餘氯氧化成氧化態的 DPD 而呈粉紅色，此時的自由餘氯則被還原成  $\text{Cl}^-$ ，若在溶液中再加入碘化鉀，水中的結合氯可將碘化鉀氧化而釋出碘，碘再氧化 DPD，使溶液顏色加深，再以分光光度計在波長 515 nm 處量測其吸光度，就能測到總氯濃度 (參考資料八)。

檢測項目	檢測方法	原理
自由餘氯	DPD 法	自由餘氯 + DPD 測定液 $\xrightarrow{\text{被氧化}}$ $\text{Cl}^-$ + 氧化態的 DPD 呈粉紅色 $\xrightarrow{\text{被還原}}$
總氯	DPD 法 + KI	結合氯可將碘化鉀氧化而釋出碘，碘再氧化 DPD，使溶液顏色加深
結合氯	總氯 - 自由餘氯	自由餘氯 + 結合氯 = 總氯

圖 4 檢測餘氯、總氯的原理

如果水中加入比DPD更強的還原劑，例如維生素C這種干擾物，粉紅色DPD就會被還原成透明的DPD (圖 5)：



圖 5 粉紅色狀態的 DPD 被還原為透明狀態

#### (四) 檢測自由餘氯的方法

##### ① 比色法

在水中以 10 mL 水滴 1 滴測定液的比例，滴入 DPD 餘氯測定液，依變色情形比對色表圖 6 來判斷水中自由餘氯濃度，檢測範圍為 0~10 ppm。

DPD 滴入自來水後，會被水中的自由餘氯氧化，才會變成粉紅色，說明水中含自由餘氯，而自由餘氯則被還原成  $Cl^-$ ；自由餘氯的濃度越高，顏色越深。

如果把看起來淡紫色的 DPD 餘氯測定液滴入沒有自由餘氯的純水中，會呈現透明，這是因為水中沒有能和 DPD 反應的自由餘氯，此時純水中的 DPD 就只是顏料而已，由於加入的量很少，才會呈現透明，大約要加到純水量的 1/4 才開始有淺紫色出現。(附錄一 紫色高麗菜汁及 DPD 呈色實驗)

- (1) 優點：可以馬上從變色情形判斷水中有沒有自由餘氯，比對色表估計濃度。
- (2) 缺點：測定液可能被其他物質還原成透明，影響判斷；肉眼判斷誤差大，無法測出細微的自由餘氯濃度差異；而且無法測總氯。



圖 6 餘氯測定液比色表

##### ② 分光光度計法

這次研究用的「總氯餘氯測試計 FTC-420」是單一色光 520 nm 的分光光度計，搭配的是片狀的 DPD 試紙，其中 DPD-1 = DPD，DPD-4 = DPD+碘化鉀，使用方法如圖 7：



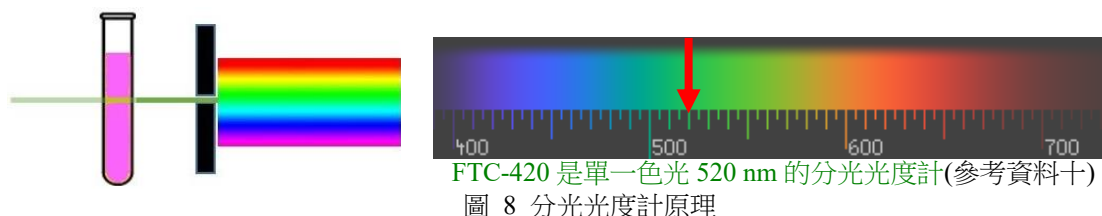
圖 7 總氯餘氯測試計 FTC-420 檢測步驟

- (1) 優點：可以測 FCL 和 TCL 的濃度，並以數據呈現。
- (2) 缺點：很貴，DPD-1 和 DPD-4 買一瓶要 700 元/50 片，每次實驗各用 1 片就要 28 元。以分光光度計來測量某個波長的顏色深淺，比用肉眼來分辨顏色深淺要強得多，還能進

一步把顏色的深淺給數字化，來判斷某個已知物質的濃度

「分光」光度計的設計原理(圖 8)，是將燈源的光線分散成七彩色光，並從中擷取出某個「單一色光」，然後讓這個「單一色光」穿過樣品溶液之後，以光感測器量測這個單一色光的衰減程度，並將此衰減程度量化成數字(參考資料八)。

自由餘氯可將 DPD 氧化，使溶液轉變為粉紅色，用互補色 520 nm 淺綠色的單一色光穿過溶液，以光感測器量測 520 nm 單一色光的衰減程度，就能換算出自由餘氯的濃度。



### ③ 電位法

採用無膜三電極技術來測水中的 FCL 濃度，是由金陰極、銀陽極和銀參考電極組成三傳感器系統(參考資料十一)。

我們試用了 twinno FCL30 餘氯測試計(如圖 9)，用法是把待測溶液倒入搭配的測試杯中後，將儀器插入水中輕輕晃動，就能讀取 FCL 濃度。

- (1) 優點：不消耗任何比色試劑，量測值不受濁度影響，步驟簡單。
- (2) 缺點：電極法容易受水中導電物質的影響，數據差異大；只能測自由餘氯。



圖 9 餘氯測試計 twinno FCL30

### (五) 網路實驗

網路實驗「眼見為憑」，是以餘氯測定液變透明的結果，認定消失的自由餘氯是被人體或食物吸收(參考資料一)，針對這段網路實驗，我們有以下部分想再研究：

表 1 網路實驗「眼見為憑」可再探討的內容

影片中探討的因素	本研究 可再探討的內容
① 漱過口的自來水，讓餘氯測定液變透明，表示水中沒有自由餘氯，所以漱口時口腔會吸收自由餘氯。	我們發現，影片中的實驗是把「漱過口的自來水」吐進「半杯自來水」中，那半杯自來水並沒有接觸到口腔，為什麼水中的自由餘氯也消失了？ <b>實驗設計</b> 如果把干擾物「間接」加入自來水中，也能讓加了餘氯測定液的水溶液變透明，就能確定自由餘氯沒有被吸收，而是和干擾物溶入水中的成分發生反應。

## (六) 期刊研究

在科學月刊565期中，高憲明教授在「破解水中餘氯的迷思」文章中提到，網路或電視上以「OTD餘氯測定液由黃色變透明了來斷定餘氯被吸收」的說法並不是事實。由於OTD會被自由餘氯氧化成黃色，用可見光光譜儀測量互補色450 nm藍色光的吸收程度，就能以OTD的顏色變化情形，判斷水中餘氯變化 (參考資料十二)。

2013年7月聯合國世界衛生組織癌症研究所將OTD列為第二級 B 類致癌物，環保局發出新聞稿指OTD試劑有致癌疑慮，建議改用環保署公告的DPD檢測劑 (參考資料十三)，所以我們的實驗改用DPD餘氯檢定液。針對這份期刊研究，我們覺得有以下部分需要再探討(表 2)：

表 2 「破解水中餘氯的迷思」可再探討的內容

文章中探討的因素	本研究 可再探討的內容
❶ 把干擾物「直接」加入自來水中，讓餘氯測定液變透明，推論是因為干擾物將餘氯還原成 Cl <sup>-</sup> 或把餘氯測定液還原成透明。	「破解水中餘氯的迷思」和網路實驗(參考資料一)一樣，都是把干擾物「直接」放入自來水中，但對餘氯測定液變透明的現象做出相反的解釋；可是干擾物「直接」接觸到自來水，很難判斷有沒有吸收自由餘氯。 <b>實驗設計</b> 如果把干擾物「間接」加入自來水中，也能讓加了餘氯測定液的水溶液變透明，就能確定自由餘氯沒有被吸收，而是受干擾物溶入水中的成分影響。
❷ 洗米水的白色混濁蓋住了黃色的餘氯測定液的水溶液，所以才會看不出黃色，其實餘氯還很多，所以洗米不會吸收自由餘氯。	<b>實驗設計</b> 我們想把洗米水先「過濾」成透明，再拿來實驗，看看會得到什麼結果？
❸ 手放入自來水攪一攪，加入餘氯測定液後不會變黃，推論這是因為自由餘氯殺死手上的細菌而變少；洗乾淨的手放入自來水中，使餘氯測定液變黃(?)，所以證明當手上沒有細菌時，自由餘氯不會變少。	水中的自由餘氯是用來殺菌的，自由餘氯有可能因為幫手殺菌而變少，但從文獻探討(二)可以知道，手上的表皮角質細胞能和自由餘氯反應變成結合氯，也可能是自由餘氯減少的原因。 在同一作者的簡報第 43 頁可以看到，洗乾淨的手放入自來水中，餘氯測定液明明就只有極淺的黃色，450 nm 的吸收值也很低(參考資料十四)，這表示自由餘氯濃度變得很低，可見手上的細菌不是使自由餘氯變少的唯一原因。 <b>實驗設計</b> 如果手放入第 1 杯自來水就被殺菌，那再放入第 2 杯時，會因為手上的細菌變少而剩下較多的自由餘氯嗎？ <b>實驗設計</b> 如果把手消毒乾淨後放入自來水中，自由餘氯會怎麼變化？
❹ 以紫外線可見光光譜儀的吸光曲線說明餘氯變化	以紫外線可見光光譜儀的吸光曲線，只能判斷餘氯的變化。 <b>實驗設計</b> 我們用餘氯總氯測試計測量，就能根據「總氯、餘氯、結合氯」的變化，判斷實驗物質對自由餘氯的影響。



## (七) 科展作品

第 48 屆全國科展作品「無憂無氯」，主要探究影響自來水中的餘氯含量的因素，目的是製造能降低水中自由餘氯的多孔隙裝置(參考資料十五)，需要再探討的部分如表 3：

表 3 「無憂無氯」可再探討的內容

文章中探討的因素	本研究 可再探討的內容
實驗 8 的結論： 厚薄葉子及茶葉渣有相當不錯的除餘氯效果，推論菜、茶葉會吸收餘氯。	他們的實驗是用電位法測量餘氯，容易受水中電解質影響，結果不一定準確，菜葉和茶葉也不一定吸收了餘氯。 <b>實驗設計</b> 以茶葉、菜葉為干擾物，加入自來水中，用餘氯總氯測試計測量，判斷實驗物質對自由餘氯的影響。

## 二、實驗方法

### (一) 定義符號代號

依文獻探討(二)，我們將本實驗使用的代號定義如下：

**FCL** = 自由餘氯    **TCL** = 總氯    **CCL** = 結合氯    **DPD** = DPD 餘氯測定液

### (二) 實驗用的自來水

自來水供應到用戶端時，規定自來水中的FCL濃度 需在 0.2~1.0 ppm之間，但在學校不同地點取水、不同時間取水發現FCL濃度都不同(表 4)，濃度都低於 0.2 ppm。

我們去問學校事務組長，她說：學校的自來水會先流入每棟的地下蓄水池，再往上抽到頂樓水塔，接著再往下流到各水龍頭，第一棟沒有蓄水池，是共用第二棟的蓄水池。

實驗的自然教室在新棟，新棟只有科任教室，用水量比其他班級棟少，自來水在蓄水池靜置的時間長，所以 FCL部分揮發或被污染物消耗掉而減少，在自然教室取得的自來水濃度低於 0.2 ppm。

第二棟與第一棟共用蓄水池，加上掃地時間用水量大，會有較多新鮮的自來水流入，此時在第二棟一樓可取得較多新流入的自來水，FCL 濃度剛好比 0.2 ppm大一些，但仍比每月的自來水用戶端供水數據低很多。

我們到附近的加油站取水，這個加油站有洗車服務，用水量大，果然自來水中的FCL濃度介於自來水廠的供水數據之間，所以我們實驗用的自來水就都從這個加油站裝回來用。

表 4 不同取水點 FCL 濃度

地點	FCL 濃度 (ppm)
自來水用戶端供水數據(學校附近 12 ~ 1 月)	0.40 ~ 0.58
新棟自然教室洗手台	0.06
二棟一樓洗手台 (剛到校)	0.15
二棟一樓洗手台 (下午掃地時間)	0.23
二棟一樓廁所 (剛到校)	0.14
二棟一樓廁所 (下午掃地時間)	0.21
附近加油站洗手台	0.40 ~ 0.47

### (三) 定性實驗

1. 後加 DPD：在 40 mL 自來水加入實驗物質，此時自來水仍會是透明的，然後再加入 4 滴 DPD，記錄顏色變化。
2. 先加 DPD：在 40 mL 自來水加入 4 滴 DPD 使自來水變成粉紅色，然後再加入實驗物質，記錄顏色變化。

### (四) 定量實驗

1. 在 40 mL 自來水加入實驗物質，用 總氯餘氯測試計 FTC-420 測餘氯總氯濃度。
2. 使用總氯餘氯測試計 FTC-420，是先加實驗物質、後加 DPD 試片顯色，屬於後加 DPD 實驗

### (五) 「間接」加入實驗物質

1. 將膠帶反貼在冰棒棍上，反覆黏貼實驗物質，再放入自來水中；不可重覆使用冰棒棍及膠帶。
2. 把實驗物質加純水做成水溶液，再滴入自來水中。

## 陸、研究結果

### 實驗 1 靜置時間對水中自由餘氯的影響

#### (一) 實驗方法

1. 倒 4 杯 40 mL 的自來水，靜置桌面。
2. 第 1 杯 40 mL 自來水 用 總氯餘氯測試計 FTC-420 測餘氯、總氯濃度。
3. 隔 2 小時測第 2 杯，依序測完 4 杯。
4. 從有蓋子的瓶子每隔 2 小時倒出 40 mL 自來水，用 總氯餘氯測試計 FTC-420 測餘氯、總氯濃度。

#### (二) 實驗結果

表 5 無蓋的自來水 FCL、TCL 變化

	經過時間	FCL	TCL
1	0 時	0.40	0.47
2	2 時	0.22	0.33
3	4 時	0.14	0.20
4	6 時	0.15	0.21

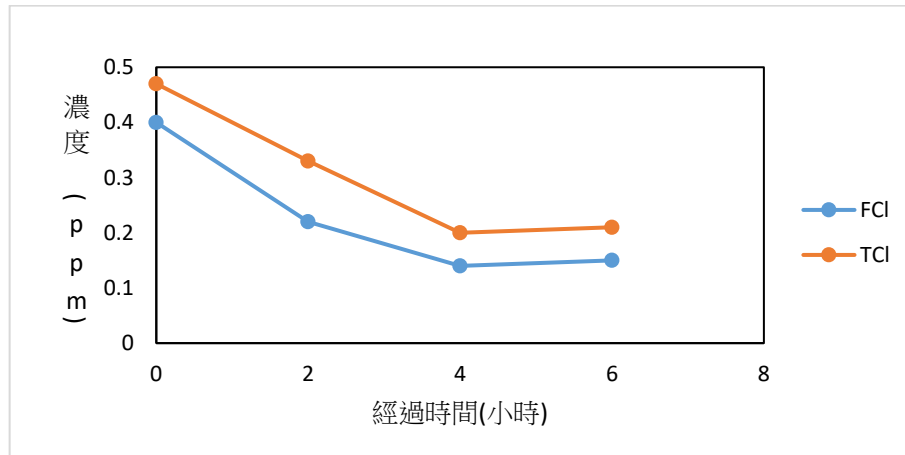


圖 10 無蓋的自來水 FCL、TCL 變化

表 6 有蓋的自來水 FCL、TCL 變化

	經過時間	FCL	TCL
1	0 時	0.37	0.41
2	2 時	0.34	0.41
3	4 時	0.36	0.41
4	6 時	0.32	0.40

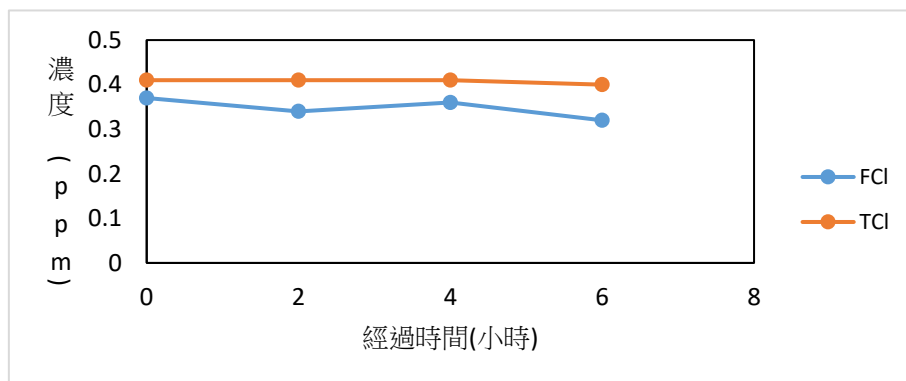


圖 11 有蓋的自來水 FCL、TCL 變化

### (三) 實驗討論

1. 無蓋自來水 FCL、TCL 會隨時間減少，而有蓋自來水 FCL、TCL 在 1~4 小時幾乎無變化，但 4~6 小時開始下降。
2. 我們實驗時用的都是從有蓋的自來水倒出，而且實驗都集中在前 2~4 小時做，所以用 總氯餘氯測試計 FTC-420 測餘氯、總氯濃度時，以當日自來水一開始的 FCL、TCL 做為對照組就可以了。

## 實驗 2 實驗物質「直接」加入水中對自由餘氯的影響

### (一) 實驗方法

1. 實驗物質：切下等重的水果(芭樂、蕃茄、蘋果、棗子、橘子皮、橘子瓣)、漱過口的水、綠茶水、米、洗米水、沒洗過的手、維生素 C 水
2. 水溶液的做法：
  - (1)漱過口的水：將 20 mL 的純水含在口中漱 10 秒後吐出，加 10 滴到自來水中。
  - (2)綠茶水：2 克綠茶茶葉放入 20 mL 的 100°C 純水泡到冷卻，加 10 滴到自來水中。
  - (3)洗米水：將 5 克的米放入 40 mL 純水中用玻棒攪拌，加 5 mL 到自來水中。
  - (4)維生素 C 水：將 1 顆維生素 C 發泡錠放入 250 mL 純水中，加 10 滴到自來水中。
3. 在 40 mL 自來水加入實驗物質，此時自來水仍會是透明的，然後再加入 4 滴 DPD，記錄顏色變化。
4. 在 40 mL 自來水加入 4 滴 DPD 使自來水變成粉紅色，然後再加入實驗物質，記錄顏色變化。

### (二) 實驗結果

表 7 實驗物質加入水中對自由餘氯的影響

	實驗物質	後加 DPD	先加 DPD
1	芭樂	透明	透明
2	蕃茄	透明	透明
3	蘋果	透明	透明
4	棗子	透明	透明
5	橘子皮	透明	透明
6	橘子瓣	透明	透明
7	沒洗過的手	透明	(無實驗)
8	米 5 克	白色混濁	一開始淡粉紅混濁，經過 1 小時變白色混濁，隔天變透明，攪拌變白色混濁(圖 12)
9	洗米水	白色混濁	一開始淡粉紅混濁，經過 1 小時變白色混濁，隔天變透明，攪拌變白色混濁(圖 12)
10	漱過口的水	透明	透明
11	綠茶水	透明	透明
12	維生素 C 水	透明	透明

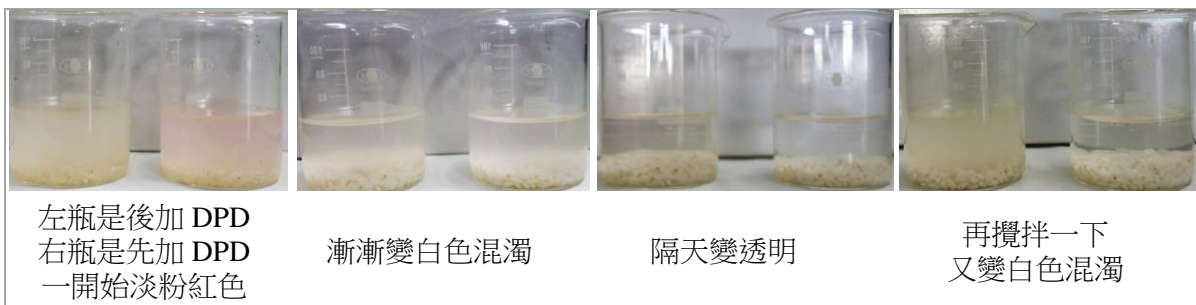


圖 12 米加入自來水後 DPD 的顏色變化

### (三) 實驗討論

1. 自來水中的自由餘氯能把 DPD 氧化成粉紅色，自己則被還原成  $Cl^-$ ，我們實作發現，就算加入更多的測定液，顏色也不會更深，所以按比例加入的測定液，已足夠將水中的自由餘氯還原成  $Cl^-$ 。
2. 表 7 的實驗物質 9~12 是「間接」加入自來水中的，實驗物質根本沒有接觸到自來水，不可能吸收自由餘氯，因此可以證明實驗中所使用的：米、口腔、茶葉、維生素 C 發泡錠本身不會吸收自由餘氯，而是溶入水中的成分把自由餘氯還原成  $Cl^-$ 了，但可以再用餘氯總氯檢測計做定量實驗，觀察濃度變化。
3. 根據實驗物質 9~12 的實驗結果，配合文獻探討(三)，歸納出以下的結論(表 8)：

表 8 實驗物質 9-12 先後加入 DPD 顏色變化的原理

實驗結果	原理
先加實驗物質，後加 DPD 水溶液呈現透明	實驗物質先和自由餘氯反應，把自由餘氯還原成 $Cl^-$ ，這時沒有自由餘氯能氧化 DPD，所以 DPD 呈現透明。
先加 DPD，後加實驗物質水溶液由粉紅變透明	DPD 先被自由餘氯氧化成粉紅色 DPD，此時水中的自由餘氯已被還原成 $Cl^-$ ，實驗物質沒有自由餘氯可以吸收，還把已氧化成粉紅色的 DPD 還原成透明的 DPD。

4. 表 8 中能還原自由餘氯或 DPD 的物質，應該是具抗氧化的成分，像口腔中消化酶、茶葉中的兒茶素、維生素 C (參考資料十二)。
5. 表 7 中的實驗物質 1~7 是「直接」加入自來水的，不論先後加入 DPD 都呈現透明，有吸收自由餘氯的可能性，可以把它們像實驗物質 9~12 以「間接」方式加入自來水，進一步實驗確認。
6. 維生素 C 是很強的還原劑，可以還原自由餘氯、氧化態的 DPD，或許 切片水果也是因為富含維生素 C，才使 DPD 由粉紅變透明，才會以為實驗物質看吸收了自由餘氯。

### 實驗 3 實驗物質「間接」加入水中對自由餘氯的影響



圖 13 實驗物質間接加入自來水的做法

### (一) 實驗方法

1. 實驗物質：芭樂、蕃茄、蘋果、棗子、橘子皮、橘子瓣、手。
2. 在冰棒棍上反貼一圈膠帶，在實驗物質上反覆粘黏。
3. 在 40 mL 自來水加入黏了實驗物質的冰棒棍，「間接」加入實驗物質，此時自來水仍會是透明的，然後再加入 4 滴 DPD，記錄顏色變化。
4. 在 40 mL 自來水加入 4 滴 DPD 使自來水變成粉紅色，然後再加入黏了實驗物質的冰棒棍，記錄顏色變化。

### (二) 實驗結果

表 9 實驗物質「間接」加入自來水和 DPD 的結果

	實驗物質	先加實驗物質 再加 DPD	先加 DPD 再加實驗物質
0	冰棒棍+膠帶	粉紅	粉紅
1	芭樂	透明	透明
2	蕃茄	透明	透明
3	蘋果	透明	透明
4	棗子	透明	透明
5	橘子皮	透明	透明
6	橘子瓣	透明	透明
7	沒洗過的手	透明	粉紅

### (三) 實驗討論

1. 從表 9 可以發現，切片水果 和 手「間接」放入自來水中，就能使檢測結果變透明，實驗物質根本沒有接觸到自來水，不可能吸收自由餘氯，可以證明實驗中所使用的干擾物：芭樂、蕃茄、蘋果、棗子、橘子皮、橘子瓣、手並沒有吸收自由餘氯。
2. 實驗物質 1~6 不論先加或後加入自來水，都能使檢測結果變透明，是因為被實驗物質溶在水中的成分還原成  $Cl^-$  或把已氧化成粉紅色的 DPD 還原成透明的 DPD。
3. 我們把未切片的完整芭樂放入自來水中，DPD 呈現粉紅色(圖 14)，表示水中有自由餘氯，再次證明只有切片水果會讓水溶液變透明，這是切片水果溶入水中的維生素 C 造成的，並不是吸收了自由餘氯，而是像圖 5 一樣，是干擾物參與 DPD 的氧化還原反應所造成的。

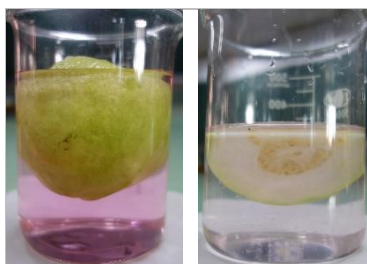


圖 14 完整芭樂不會讓 DPD 變透明

- 雖然我們已可以證明手沒有吸收自由餘氯，但是並不知道是手上的什麼物質讓自由餘氯減少？自由餘氯是用來殺菌的，會不會是手上的細菌使自由餘氯減少？如果把手消毒乾淨後放入自來水中，自由餘氯也會減少嗎？
- 先加 DPD 再「間接」加入手，水仍是粉紅，表示手上沒有能將粉紅色 DPD 還原成透明的 DPD 的物質。

#### 實驗 4 實驗物質加入自來水後 FCL、TCL、CCL 的變化

##### (一) 實驗方法

- 實驗物質：芭樂、蕃茄、蘋果、棗子、橘子皮、橘子瓣、漱過口的純水、綠茶水、紅茶水、過濾的洗米純水、沒洗過的手
- 在 40 mL 自來水「直接」加入實驗物質，用 總氯餘氯測試計 FTC-420 測餘氯總氯濃度。
- 在 40 mL 自來水「間接」加入實驗物質，用 總氯餘氯測試計 FTC-420 測餘氯總氯濃度。
- 利用  $TCL - FCL$  算出  $CCL$ 。

##### (二) 實驗結果

表 10 實驗物質「直接」加入自來水後的 FCL、TCL、CCL

	實驗物質	FCL (ppm)	TCL (ppm)	CCL (ppm)
0	自來水	0.40	0.47	0.07
1	芭樂	0.06	0.09	0.03
2	蕃茄	0.13	0.13	0
3	蘋果	0.09	0.23	0.14
4	棗子	0.08	0.20	0.12
5	橘子皮	0.08	0.09	0.01
6	橘子瓣	0.09	0.10	0.01
7	沒洗過的手	0.04	0.42	0.38

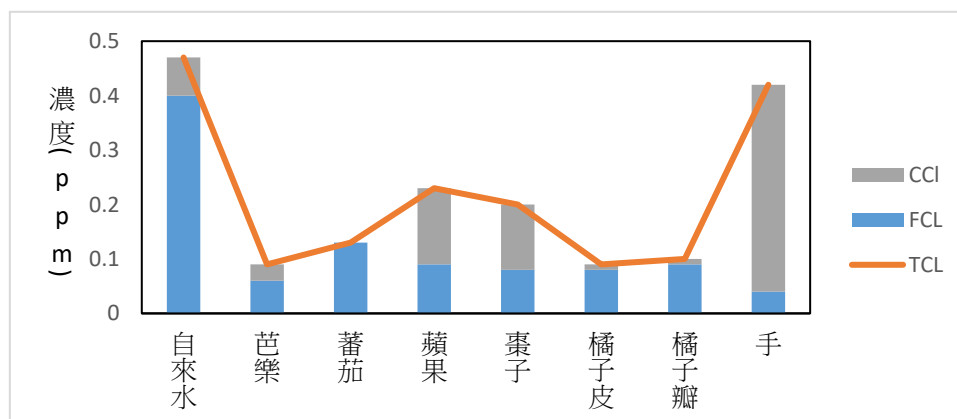


圖 15 實驗物質「直接」加入自來水後的 FCL、TCL、CCL 變化

表 11 實驗物質「間接」加入自來水後的 FCL、TCL、CCL

	實驗物質	FCL (ppm)	TCL (ppm)	CCI (ppm)
0	自來水	0.40	0.47	0.07
1	芭樂	0.04	0.05	0.01
2	蕃茄	0.09	0.08	-0.01
3	蘋果	0.06	0.16	0.10
4	棗子	0.07	0.09	0.02
5	橘子皮	0.09	0.29	0.20
6	橘子瓣	0.05	0.06	0.01
7	沒洗過的手	0.12	0.40	0.28
8	過濾的洗米水 10 滴	0.00	0.16	0.16
9	漱過口的水 10 滴	0.05	0.07	0.02
10	綠茶水 10 滴	0.03	0.10	0.07
11	維生素 C 水 10 滴	0	0	0

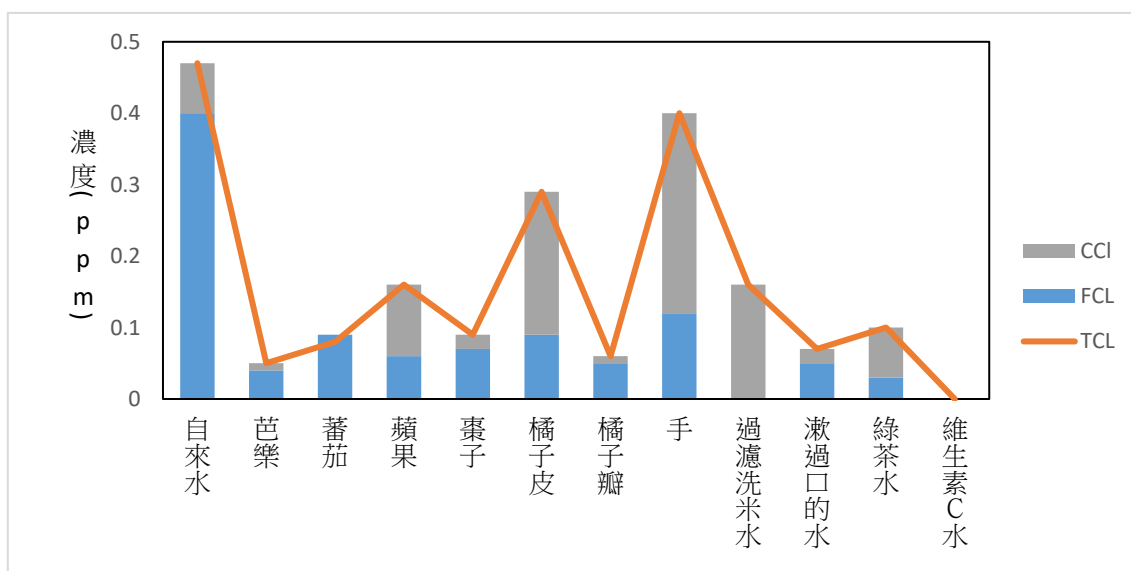


圖 16 實驗物質「間接」加入自來水後的 FCL、TCL、CCL 變化

### (三) 實驗討論

#### 1. 檢測結果如下：

表 12 FCL、TCL 變化的原理

FCL	TCL	原理說明
下降	下降	自由餘氯變成 $Cl^-$ ，不計入 TCL，所以兩種濃度都下降
下降	不變	自由餘氯變成氯胺，計入 TCL，只有 FCL 下降。

- 除了手以外，不論「直接」或「間接」放入實驗物質，都會使 FCL、TCL 下降，再次證明實驗物質沒有吸收自由餘氯，而是實驗物質把自由餘氯還原成  $Cl^-$ 。
- 過濾過的洗米水是透明的，仍可以讓水中 FCL 降到 0，證明米沒有吸收餘氯，而是洗米水中的成分把自由餘氯還原成  $Cl^-$ ，DPD 測定液無法檢測到  $Cl^-$ ，所以變透明。



4. 從圖 15 看到，手的實驗結果很有趣，和自來水相比，TCL 變化不大，但 FCL 降到很低、而 CCL 增加很多，證明是自由餘氯變成了氯胺，並不是被手吸收了；所以 DPD 測定液變成透明，並不是因為自由餘氯被手吸收了。
5. 在文獻探討(二)提到，自由餘氯和手上的細菌、或表皮角質細胞等有機胺反應，會形成氯胺，氯胺屬於 CCL，這應該是手放入自來水後 CCL 增加的原因。
6. 可以用不同來源的菌實驗看看，觀察自由餘氯遇到細菌後的濃度變化。

## 實驗 5 細菌對水中自由餘氯的影響

### (一) 實驗方法

#### 積木上的細菌

1. 在 80 mL 自來水中加入 3 顆積木，攪拌 10 秒。
2. 用總氯餘氯測試計 FTC-420 測餘氯總氯濃度。
3. 3 顆積木用肥皂洗淨，再以 100 °C 熱水沖洗 3 次殺菌，再以純水沖洗
4. 消毒過的 3 顆積木放入 80 mL 自來水中，攪拌 10 秒。
5. 用總氯餘氯測試計 FTC-420 測餘氯總氯濃度。

#### 乳酸菌

1. 在 20 mL 純水中滴入 5 滴養樂多，做成養樂多稀釋液。
2. 在 40 mL 自來水中加入 4 滴 DPD，水變粉紅色，再加 20 滴養樂多稀釋液，觀察並記錄顏色變化。
3. 在 40 mL 自來水中加入 20 滴養樂多稀釋液，再加入 4 滴 DPD，觀察並記錄顏色變化。
4. 在 40 mL 自來水中加入 20 滴養樂多稀釋液，用總氯餘氯測試計 FTC-420 測餘氯總氯濃度

### (二) 實驗結果

表 13 細菌對水中自由餘氯的影響

	實驗物質	FCL (ppm)	TCL (ppm)	CCl (ppm)
0	自來水	0.28	0.32	0.04
1	積木	0.08	0.23	0.15
2	消毒過的積木	0.20	0.27	0.07
3	養樂多	0.05	0.28	0.23

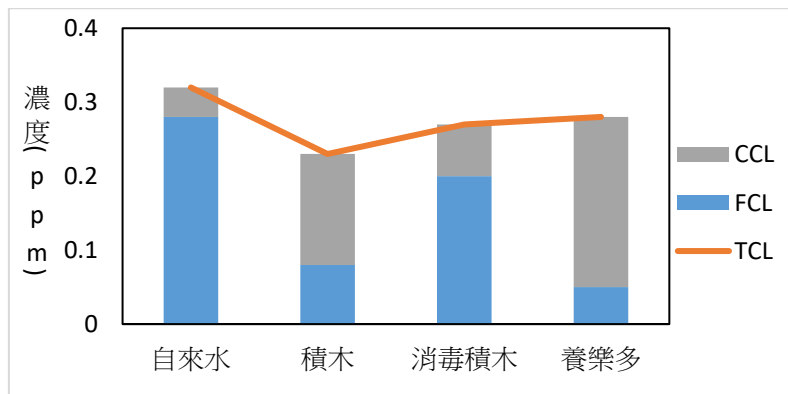


圖 17 養樂多對水中自由餘氯的影響

### (三) 實驗討論

- 小孩玩的積木可能細菌很多，我們把積木放入自來水，能使 FCL 從 0.28 降到 0.08，而 CCL 從 0.04 上升到 0.15，應該是積木上的細菌使自由餘氯變成「氯胺」，所以 FCL 下降、CCL 才會上升；消毒過的積木，上面的細菌極少，果然 FCL、CCL 變化就不大；可見 FCL 和 CCL 的濃度的確會受到細菌影響。
- 我們以養樂多的乳酸菌當做一種菌，發現稀釋的養樂多能讓 DPD 檢測結果變透明，從儀器檢測後可以看到，TCL 變化不大，但 FCL 降到 0.05 ppm，CCL 增加到 0.23 ppm，應該是 FCL 用來殺養樂多的活性乳酸菌後，變成「氯胺」，所以減少的 FCL 變成 CCL，而 DPD 只能測 FCL 不能測 CCL，所以變透明。
- 尚未洗乾淨的手和積木、養樂多的乳酸菌都能使 DPD 檢測結果變透明，也都讓 FCL 減少、CCL 大增，我們合理推論手放入自來水會使 DPD 變透明的原因是手上的細菌。
- 假如手放入第 1 杯自來水就被殺菌，那再放入第 2 杯時，會因為手上的細菌變少而剩下較多的自由餘氯嗎？假如 2 杯的自由餘氯一樣變很少，就有可能是和手上表皮角質細胞等有機胺反應變成氯胺，而使自由餘氯濃度降低。



圖 18 未消毒積木上的細菌可以使自由餘氯變成結合氯

## 實驗 6 手連續放入對水中自由餘氯的影響

### (一) 實驗方法

#### 直接加入手

1. 在 4 個大燒杯內倒入 200 mL 的自來水。
2. 手放入第 1 個燒杯中，攪動 10 秒；再放入第 2 個燒杯，攪動 10 秒；再放入第 3 個燒杯，攪動 10 秒；再放入第 4 個燒杯，攪動 10 秒。
3. 分別用總氯餘氯測試計 FTC-420 測餘氯總氯濃度。

#### 間接加入手

1. 在另外 4 個小燒杯內倒入 40 mL 的自來水。
2. 在冰棒棍上反貼一圈膠帶，在手上反覆粘黏。
3. 手藉著冰棒棍「間接」放入第 1 個燒杯中，攪動 10 秒；再放入第 2 個燒杯，攪動 10 秒；再放入第 3 個燒杯，攪動 10 秒；再放入第 4 個燒杯，攪動 10 秒。
4. 分別用總氯餘氯測試計 FTC-420 測餘氯總氯濃度。

#### 直接加入消毒過的手

1. 在 4 個大燒杯內倒入 200 mL 的自來水。
2. 用肥皂把手洗乾淨晾乾之後，再用酒精消毒 3 次，用純水沖 1 次。
3. 把手放入第 1 個燒杯中，攪動 10 秒；再放入第 2 個燒杯，攪動 10 秒；再放入第 3 個燒杯，攪動 10 秒；再放入第 4 個燒杯，攪動 10 秒。
4. 分別用總氯餘氯測試計 FTC-420 測餘氯總氯濃度。

#### 直接加入戴手套的手

1. 在 4 個大燒杯內倒入 200 mL 的自來水。
2. 要實驗的手戴上塑膠手套。
3. 把手放入第 1 個燒杯中，攪動 10 秒；再放入第 2 個燒杯，攪動 10 秒；再放入第 3 個燒杯，攪動 10 秒；再放入第 4 個燒杯，攪動 10 秒。
4. 分別用總氯餘氯測試計 FTC-420 測餘氯總氯濃度。

#### 消毒過的豬皮

1. 實驗物質：豬皮
2. 用酒精消毒豬皮 3 次，再用純水沖洗，放入 40 ml 自來水中攪拌 30 下
3. 將泡過消毒豬皮的自來水，用總氯餘氯測試計 FTC-420 測 FCL、TCL

### (二) 實驗結果

表 14 直接把手連續放入對水中餘氯的影響

	檢測的水	FCL (ppm)	TCL (ppm)	CCl (ppm)
0	自來水	0.36	0.41	0.05
1	第 1 杯	0.04	0.35	0.31
2	第 2 杯	0.04	0.34	0.30
3	第 3 杯	0.10	0.37	0.27
4	第 4 杯	0.07	0.38	0.31

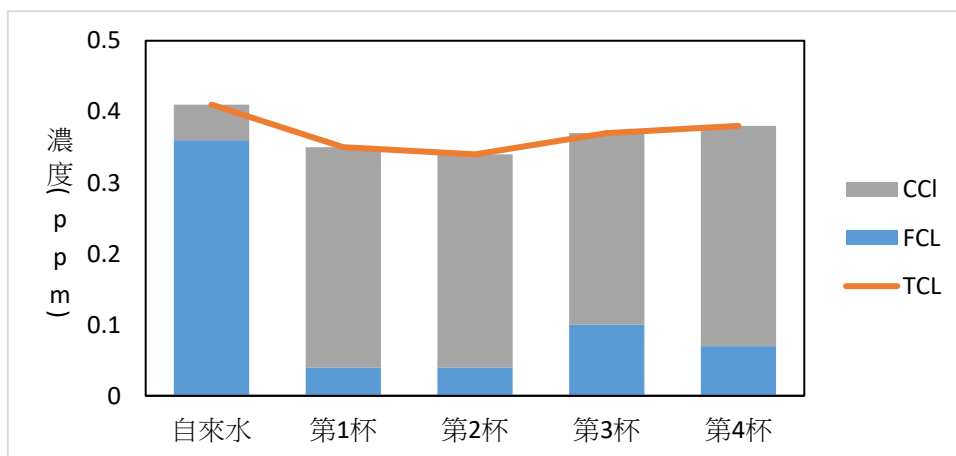


圖 19 直接把手連續放入對水中餘氯的影響

表 15 間接把手連續放入對水中餘氯的影響

	檢測的水	FCL (ppm)	TCL (ppm)	CCl (ppm)
0	自來水	0.41	0.49	0.08
1	第 1 杯	0.06	0.45	0.39
2	第 2 杯	0.28	0.43	0.15
3	第 3 杯	0.33	0.43	0.10
4	第 4 杯	0.36	0.48	0.12

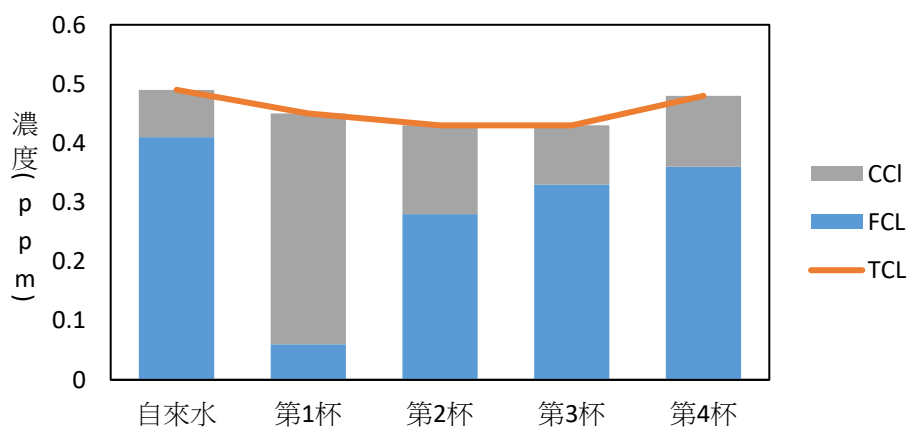


圖 20 間接把手連續放入對水中餘氯的影響

表 16 消毒過的手 連續放入對水中餘氯的影響

	檢測的水	FCL (ppm)	TCL (ppm)	CCI (ppm)
0	自來水	0.28	0.32	0.04
1	第 1 杯	0.04	0.28	0.24
2	第 2 杯	0.04	0.26	0.22
3	第 3 杯	0.04	0.25	0.21
4	第 4 杯	0.05	0.25	0.21

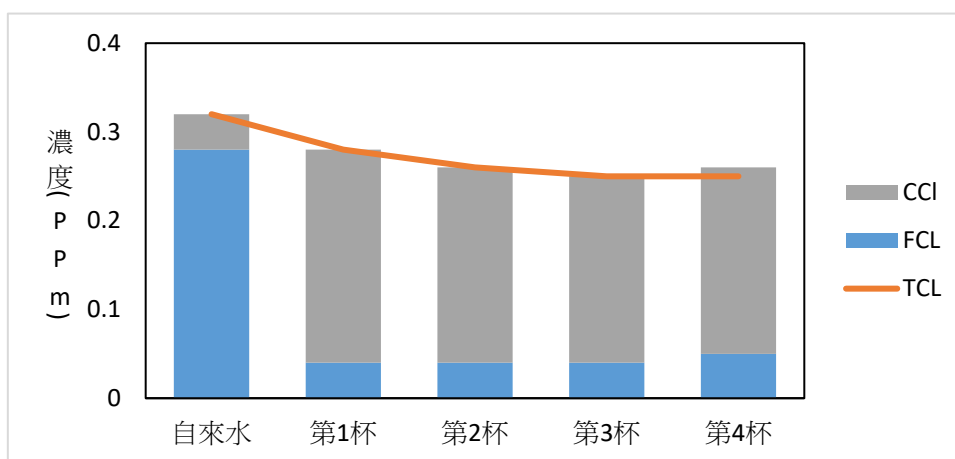


圖 21 消毒過的手連續放入對水中餘氯的影響

表 17 戴手套的手 連續放入對水中餘氯的影響

	檢測的水	FCL (ppm)	TCL (ppm)	CCI (ppm)
0	自來水	0.28	0.32	0.04
1	第 1 杯	0.25	0.29	0.04
2	第 2 杯	0.23	0.28	0.05
3	第 3 杯	0.21	0.27	0.06
4	第 4 杯	0.23	0.30	0.07

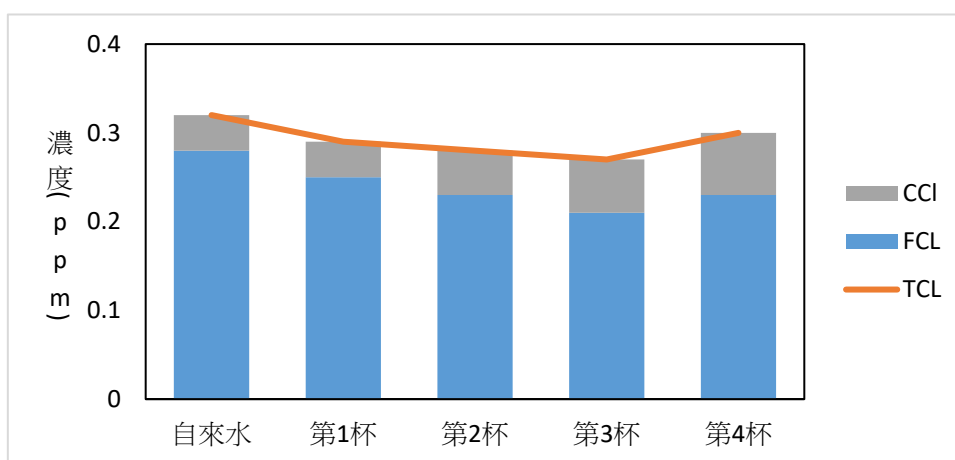


圖 22 戴手套的手連續放入對水中餘氯的影響

表 18 消毒的豬皮加入自來水後 FCL、TCL、CCL 的變化

實驗物質	加入實驗物質			DPD 顏色變化
	FCL (ppm)	TCL (ppm)	CCI (ppm)	
自來水	0.29	0.33	0.04	淡粉紅
消毒過的豬皮	0.06	0.30	0.24	透明

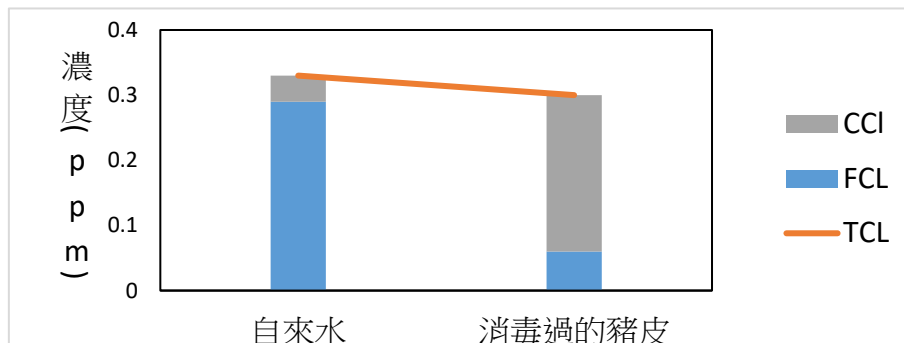


圖 23 消毒的豬皮加入自來水後 FCL、TCL、CCL 的變化

### (三) 實驗討論

1. 我們原本認為水中的自由餘氯會因為殺菌而降低濃度，所以當第 1 杯的自由餘氯殺死一些手上的細菌後，再把手放入水中，第 2 杯之後的 FCL 應該會上升，但從圖 19 發現，每 1 杯水的 TCL 變化不大，但 FCL 濃度都降到很低，CCL 的濃度則增加很多，這可能是手上的細菌真的很多，或是手上的表皮角質細胞和自由餘氯反應變成氯胺，而降低原有自由餘氯的濃度，使結合氯的濃度上升。
2. 從圖 20 可以看到，「間接」把手放入自來水，水中的 TCL 變化也不大，但只有第 1 杯的 FCL 濃度降到很低，CCL 的濃度增加很多，接著後面幾杯則看到 FCL 慢慢上升，因為膠帶黏到的物質是有限的，和第 1 杯的自由餘氯反應完之後，能和第 2 杯反應的就變少，所以 1 ~ 4 杯的 FCL 會呈現上升的情形，這可能是因為只黏到有限的細菌，或是有限的表皮角質細胞。
3. 根據文獻探討(二)，人的皮膚由表皮細胞組成，最上層的表皮角質細胞主要成分為角蛋白，自來水中的自由餘氯會和表皮角質細胞的胺基(-NH<sub>2</sub>) 反應變成氯胺(結合氯)，使自由餘氯的濃度下降，結合氯的濃度上升。而手上的表皮角質細胞很多，所以不管手連續放入自來水幾次，都能使 FCL 下降。
4. 我們把手消毒過，再連續放入 4 杯 200 mL 的自來水中攪拌 10 秒，結果圖 21 和沒消毒過手圖 19 一樣，每 1 杯的 TCL 變化不大，但 FCL 濃度都降到很低，CCL 的濃度則增加很多，所以使 FCL 下降的原因，不只是手上的細菌，還有手上的表皮角質細胞；可見皮膚上的表皮角質細胞可以保護人體，不會因為接觸自來水而吸收水中的自由餘氯。
5. 把消毒過的手與實驗 5 消毒過的積木比較，消毒過的積木上面沒有表皮細胞可以和自由餘氯反應，所以 FCL、CCL 變化不大，但手上有表皮細胞，能使自由餘氯變成

氯胺，所以不論手放入水中幾次，都能使 FCL 下降、CCL 上升。

6. 豬皮上有表皮細胞，常被用來代替人的皮膚做實驗，把消毒過的豬皮放入自來水，得到和消毒過的手一樣的結果，可見表皮細胞真的能使自由餘氯變成氯胺。
7. 手戴上塑膠手套後，因為手套沒有細菌、也沒有表皮細胞可以和自由餘氯反應，所以 FCL、CCL 和原來的自來水相比變化不大。
8. 手放入自來水能使 FCL 下降的原因，除了手上的細菌之外，還有手上的表皮角質細胞，這應該也是網路電視示範餘氯被手吸收時，不論手放入水中幾次，測不到結合氯的餘氯測定液都能成功變透明的原因。



圖 24 戴手套和豬皮的實驗

## 實驗 7 洗菜時會吸收自由餘氯嗎？

### (一) 實驗方法

1. 實驗物質：大白菜、地瓜葉
2. 在 200 mL 自來水加入實驗物質，攪拌 30 秒，用 總氯餘氯測試計 FTC-420 測餘氯總氯濃度。
3. 利用  $TCL - FCL$  算出 CCL 。

### (二) 實驗結果

表 19 洗菜後水中的 FCL、TCL、CCL 的變化

	檢測的水	FCL (ppm)	TCL (ppm)	CCI (ppm)
0	自來水	0.23	0.36	0.13
1	地瓜葉	0.12	0.34	0.18
2	大白菜	0.11	0.33	0.22

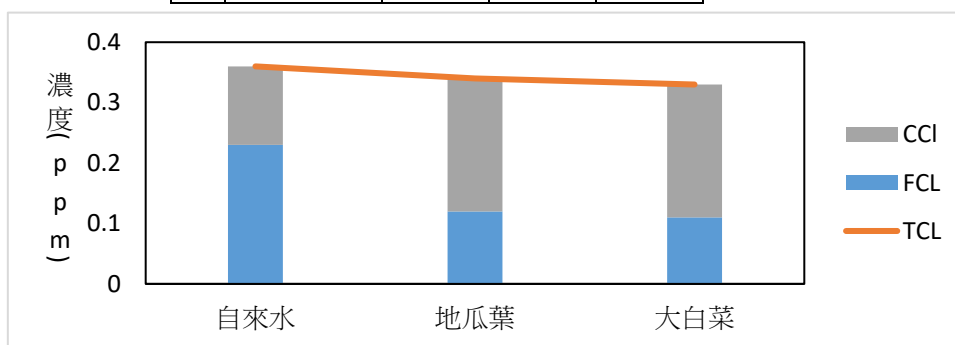


圖 25 洗菜後水中的 FCL、TCL、CCL 的變化

### (三) 實驗討論

1. 洗菜的情形和手放入自來水很像，FCL 變化不大，FCL 濃度都降到很低，CCL 的濃度則增加很多，原因可能也和手一樣，菜葉的表皮細胞也能和自由餘氯反應形成結合氯，使自由餘氯減少，不是菜吸收了自由餘氯。



圖 26 洗菜後的 FCL、TCL、CCL 的變化

## 柒、結論

- 一、藉由將實驗物質「間接」加入自來水，可以確定是實驗物質溶在水中的成分讓 DPD 變透明，實驗物質本身並沒有吸收自由餘氯；所以口腔、水果、茶葉、米沒有吸收自由餘氯，而是溶入水中的成分把自由餘氯還原成  $Cl^-$ ；藉由比較 FCL 和 TCL 的濃度，也得到相同的結論。
- 二、我們歸納出「後加 DPD、先加 DPD 後顏色變透明的原理」有以下 2 種：
  1. 先加實驗物質，後加 DPD 仍透明：  
實驗物質先和自由餘氯反應，把自由餘氯還原成  $Cl^-$ 、或變成氯胺，因為已經沒有自由餘氯去氧化 DPD，所以 DPD 呈現透明。
  2. 先加 DPD，後加實驗物質變透明：  
DPD 先被自由餘氯氧化成粉紅色 DPD，此時水中的自由餘氯已被還原成  $Cl^-$ ，實驗物質沒有吸收自由餘氯，而是實驗物質把已氧化成粉紅色的 DPD 還原成透明的 DPD。
- 三、從實驗 5 和實驗 6 中 FCL 減少、CCL 大增的結果，是因為水中的自由餘氯與手上的細菌、表皮角質細胞反應變成氯胺，使自由餘氯(FCL)變成結合氯(CCL)，DPD 餘氯測定液只檢測到自由餘氯減少，才會變透明，並不是手吸收了自由餘氯。
- 四、洗菜的結果和手很像，是菜葉的表皮細胞和自由餘氯反應形成結合氯，使自由餘氯減少，不是菜吸收了自由餘氯。
- 五、我們的實驗可以證明，目前網路上關於自由餘氯被吸收的實驗，都不是事實，所以接觸任何訊息時，眼見不一定為憑，應該用科學方法仔細驗證。



## 捌、參考資料

- 一、 hunghugh. (2014 年 2 月 11 日). 眼見為憑－餘氯實驗. 擷取自 <https://www.youtube.com/watch?v=WHE12Zj4kTA&list=FLCywNq0AGwKdBfcH7ls45jA&index=46&t=0s>
- 二、 台灣自來水公司. 自來水有效餘氯的含量依「飲用水水質標準」規定為多少?. 擷取自 [https://www4.water.gov.tw/04\\_services/ser\\_F\\_con.asp?bull\\_id=6135](https://www4.water.gov.tw/04_services/ser_F_con.asp?bull_id=6135)
- 三、 行政院衛生署. 營業衛生基準  
[http://www.ntba-global.org/upload/content\\_111626031698948.pdf](http://www.ntba-global.org/upload/content_111626031698948.pdf)
- 四、 台灣自來水公司第十二區管理區. 用戶端供水數據資料. 擷取自 [https://www12.water.gov.tw/ch/07water/wat\\_01c2\\_list.asp](https://www12.water.gov.tw/ch/07water/wat_01c2_list.asp)
- 五、 王炳鑫. (2014 年 7 月 23 日). 認識自來水消毒. 取自 <https://sgwep.water.gov.tw/files/%E8%AA%8D%E8%AD%98%E8%87%AA%E4%B%E%86%E6%B0%B4%E6%B6%88%E6%AF%92%E7%8E%8B%E7%82%B3%E9%91%AB%E8%91%97.pdf>
- 六、 吳美慧、姚寶蓮. (2010 年 6 月). 板新給水廠水源中氨氮耗氯情形之探討. 擷取自 <https://www4.water.gov.tw/files/%E6%9D%BF%E6%96%B0%E7%B5%A6%E6%B0%B4%E5%BB%A0%E6%B0%B4%E6%BA%90%E4%B8%AD%E6%B0%A8%E6%B0%AE%E8%80%97%E6%B0%AF%E6%83%85%E5%BD%A2%E4%B9%8B%E6%8E%A2%E8%A8%8E.pdf>
- 七、 角質層, 維基百科, 擷取自 <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E8%B3%AA%E5%B1%A4>
- 八、 環保署環境檢驗所. (2006 年 10 月 15 日). 水中餘氯檢測方法－分光光度計法. 擷取自 <https://www.epa.gov.tw/DisplayFile.aspx?FileID=4B0139D60173CD1D>
- 九、 勢動科技. 認識分光光度計 (一) 原理與設計概念. 擷取自 <https://www.acttr.com/tw/tw-report/tw-report-technology/335-tw-tech-spectrophotometer-principle-concept.html>
- 十、 顏色. 維基百科. 擷取自 <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%A2%9C%E8%89%B2>
- 十一、 美國 CLEAN-FCL30 餘氯測試計. 擷取自 <https://3g.made-in-china.com/gongying/joxtec2019-BXgQnHSVXGWS.html>
- 十二、 高憲明. (2017 年 1 月). 破解水中餘氯的迷思. 科學月刊, 頁 32-35.
- 十三、 行政院環保署毒物與化學物質局. (2013 年 10 月 17 日). 氯試劑含致癌物 北水處回收. 擷取自 持久性有機污染物(POPs)資訊網站:  
<https://topic.epa.gov.tw/pops/cp-68-2348-D5540-2.html>
- 十四、 高憲明.(2017 年 10 月 24 日).生活化學 543, 頁 45.  
<http://in.ncu.edu.tw/ncu65002/paper/2017.10.24-speak.pdf>
- 十五、 陳鉉霖、鄭博鴻、馬季涵、陳奕丞、陳暄雅、廖亮因. (2008). 第 48 屆全國科展作品：無憂無「氯」。擷取自 <https://www.ntsec.edu.tw/Science-Content.aspx?cat=59&a=6821&fld=&key=&isd=1&icop=10&p=5&sid=3394>

## 附錄一

### 紫色高麗菜汁及 DPD 呈色實驗

淡紫色的 DPD 依照比例 (10 mL : 1 滴) 滴入沒有自由餘氯的純水後，為何看起來是透明的？為了釐清這個疑惑，我們將五年級剛學過的自製酸鹼指示劑紫色高麗菜汁，滴入中性的純水和酸性的白醋，觀察顏色變化。

#### (一) 實驗方法

1. 實驗物質：DPD 餘氯測定液、紫色高麗菜汁、純水、白醋
2. 倒 3 杯 40 mL 的純水，分別滴入 4 滴、8 滴、12 滴 DPD。
3. 倒 1 杯 40 mL 的純水，一直滴入 DPD，直到水中出現顏色，記錄 DPD 滴入的量
4. 重覆步驟 2~3，改滴入紫色高麗菜汁。
5. 倒 3 杯 40 mL 的自來水，分別滴入 4 滴、8 滴、12 滴 DPD。
6. 倒 3 杯 40 mL 的白醋，分別滴入 4 滴、8 滴、12 滴紫色高麗菜汁。

#### (二) 實驗結果

純水+DPD

純水	DPD	顏色
40 mL	4 滴	透明
40 mL	8 滴	透明
40 mL	12 滴	透明
40 mL	10 mL	淡紫色

自來水+DPD

自來水	DPD	顏色
40 mL	4 滴	粉紅
40 mL	8 滴	粉紅
40 mL	12 滴	粉紅

純水+紫色高麗菜汁

純水	DPD	顏色
40 mL	4 滴	透明
40 mL	8 滴	透明
40 mL	12 滴	透明
40 mL	10 mL	淡紫色

白醋+紫色高麗菜汁

白醋	DPD	顏色
40 mL	4 滴	淡淡的紅
40 mL	8 滴	淡紅
40 mL	12 滴	桃紅

#### (三) 實驗討論

1. 將 DPD 滴入有自由餘氯的自來水中，DPD 立刻呈現粉紅色，但加再多顏色也不會更深，因為水中自由餘氯濃度很低，已經都還原成氯離子了。
2. 純水中沒有自由餘氯可以氧化 DPD，所以 DPD 在純水中就只是顏料而已，加很少是看不到顏色變化的，大約要加到純水的 1/4 量，才開始看到淡紫色。
3. 紫色高麗菜汁的結果和 DPD 一樣，滴入酸性的白醋立刻有變化，滴入中性的純水中，就只是顏料而已，加很少是看不到顏色變化的，大約要加到純水的 1/4 量，才開始看到淡紫色。



滴 4~12 滴 DPD 到純水



加 10 mL 的 DPD 到純水



滴 4 滴 DPD 到自來水

## 【評語】 080215

水中餘氯的量測雖然不是新穎的研究，但是本作品在實驗設計具有獨特的見解，邏輯相當清晰，在文獻資料收集整理完整，藉由破解謠言為出發點，設計了相對特別的”間接“實驗，而且有注意到”空白實驗對照組“的重要性，值得讚賞。惟研究的策略只定在”直接”和”間接”，建議應該從各種角度去證明。

## 壹、摘要

為了研究使用自來水時會不會吸收自由餘氯，我們以膠帶沾黏實驗物質以「間接」方式加入自來水中，用 DPD 餘氯測定液觀察變色情形，發現能使測定液呈現透明，表示水中真的沒有餘氯；但實驗物質的本身沒接觸到自來水，根本不可能吸收餘氯，是溶入水中的成分將自由餘氯還原成氯離子，使水中的自由餘氯濃度降低，並不是實驗物質吸收了自由餘氯。以 FTC-420 測量水中「總氯、餘氯、結合氯」變化，發現自由餘氯會和手或菜上的細菌、表皮細胞反應變成結合氯，使自由餘氯濃度降低，並不是手、菜吸收了自由餘氯。實驗證明，關於自由餘氯被吸收的說法，不是事實。



圖1 YOUTUBE上的「眼見為憑 - 餘氯實驗」

## 貳、動機

在大賣場看到濾水器老闆示範自來水餘氯被吸收的實驗，他請路人把手伸進自來水中攪一攪，原本滴入餘氯測定液變黃色的自來水，竟然沒有變黃而是透明的，老闆說這是自來水中的餘氯被手吸收。上網查找後，發現還有蘋果、茶葉、米也都會使餘氯測定液變透明(圖 1)，自由餘氯真的被吸收了嗎？水中變少的自由餘氯去哪了？測定液為何會變透明？

## 參、研究目的

- 一、探討「餘氯測定液變色的原理」
- 二、探討「干擾物為什麼能使餘氯測定液變透明」
- 三、探討「自由餘氯有沒有被吸收」
- 四、探討「水中自由餘氯的濃度變化」
- 五、探討「使自由餘氯濃度減少的原因」

## 肆、原理探究

### 一、自來水的自由餘氯標準

在台灣，「飲用水水質標準」的自由餘氯含量是 **0.2~1.0 ppm**， $\text{HClO}$  和  $\text{ClO}^-$  就是自來水中的自由餘氯，負責在管路中消毒滅菌，使細菌控制在安全範圍內，所以自來水含自由餘氯是必要的。

109年2月用戶端供水水質取樣地址：區路							
標準值	濁度 (NTU)	色度 (鉑鉍單位)	臭度 (初嗅數)	pH值	自由有效餘氯 (毫克/公升)	大腸桿菌群 (CFU/100毫升)	總菌落數 (CFU/毫升)
	2	5	3	6.0-8.5	0.2-1.0	6	100
	0.45	<5	<1	7.4	0.51	<1	<1

### 二、水中氯的形式

自來水中氯的形式包含了：自由餘氯(Free Available Residual Chlorine, FCL)、結合氯(Combined Chlorine, CCL)、總氯(Total Chlorine, TCL)；**自由餘氯 + 結合氯 = 總氯**。氯氣在水中反應，以自由餘氯( $\text{HClO}$ 、 $\text{ClO}^-$ )或結合氯( $\text{NH}_2\text{Cl}$ 、 $\text{NHCl}_2$ )等形態存在，其相關化學反應式如下圖：

水中氯的形式		化學反應式
總氯 TCL	自由餘氯 FCL 次氯酸 $\text{HClO}$ 次氯酸根離子 $\text{ClO}^-$	$\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HClO} + \text{H}^+ + \text{Cl}^-$ $\text{HClO} \rightarrow \text{H}^+ + \text{ClO}^-$
	結合氯 CCL 一氯氨(胺) $\text{NH}_2\text{Cl}$ 二氯氨(胺) $\text{NHCl}_2$	$\text{NH}_3 + \text{HClO} \rightarrow \text{NH}_2\text{Cl} + \text{H}_2\text{O}$ (一氯胺) $\text{NH}_2\text{Cl} + \text{HClO} \rightarrow \text{NHCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (二氯胺) $\text{NHCl}_2 + \text{HClO} \rightarrow \text{NCl}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (三氯胺)

### 三、檢測餘氯、總氯的原理

目前最常見的自由餘氯檢測方法為 DPD 法，若在反應溶液中再加入碘化鉀，就能測出總氯濃度，把總氯減去自由餘氯就能得到結合氯的濃度：

檢測項目	檢測方法	反應過程
自由餘氯	DPD 法	自由餘氯 + DPD 測定液 $\xrightarrow{\text{被氧化}}$ $\text{Cl}^- + \text{DPD}$ 呈粉紅色 $\xrightarrow{\text{被還原}}$
總氯	DPD 法 + KI	碘化鉀 + 結合氯 $\xrightarrow{\text{被氧化}}$ $\text{I}_3^- + \text{Cl}^-$ $\xrightarrow{\text{被還原}}$ $\text{I}_3^- + \text{DPD 測定液} \xrightarrow{\text{被氧化}}$ $3\text{I}^- + \text{DPD}$ 呈粉紅色(顏色加深) $\xrightarrow{\text{被還原}}$
結合氯	總氯 - 自由餘氯	自由餘氯 + 結合氯 = 總氯

### 四、檢測自由餘氯的方法

#### (一) 比色法 DPD 餘氯測定液

在水中以 10 mL 水滴 1 滴測定液的比例，滴入 DPD 或 OTO 餘氯測定液，依變色情形比對色表來判斷水中自由餘氯濃度，檢測範圍為 0~10 ppm。

#### (二) 分光光度計法 FTC-420

水中的自由餘氯可將 DPD 氧化，使溶液轉變為粉紅色，立即以分光光度計讓 520 nm 的「單一色光」穿過溶液，再以光感測器量測這個單一色光的衰減程度量化成數字。這次研究使用的「FTC-420 總氯餘氯測試計」是單一色光 520 nm 的分光光度計，搭配的是片狀的 DPD 試紙，其中 DPD-1 = DPD，DPD-4 = DPD + 碘化鉀；將 DPD-1 和 DPD-4 分別放入檢測瓶中顯色，再置入 FTC-420 判讀濃度。



## 伍、實驗方法

### (一) 定義符號代號

FCL：自由餘氯濃度    TCL：總氯濃度    CCL：結合氯濃度    DPD：DPD 餘氯測定液

### (二) 實驗用的自來水

我們實驗用的自來水都到有洗車服務的加油站取水，自來水中的 FCL 濃度介於 0.40 ppm ~ 0.47 ppm。

### (三) 定性實驗

1. 後加 DPD：在 40 ml 自來水加入實驗物質，此時自來水仍會是透明的，然後再加入 4 滴 DPD，記錄顏色變化。
2. 先加 DPD：在 40 ml 自來水加入 4 滴 DPD 使自來水變成粉紅色，然後再加入實驗物質，記錄顏色變化。

### (四) 定量實驗

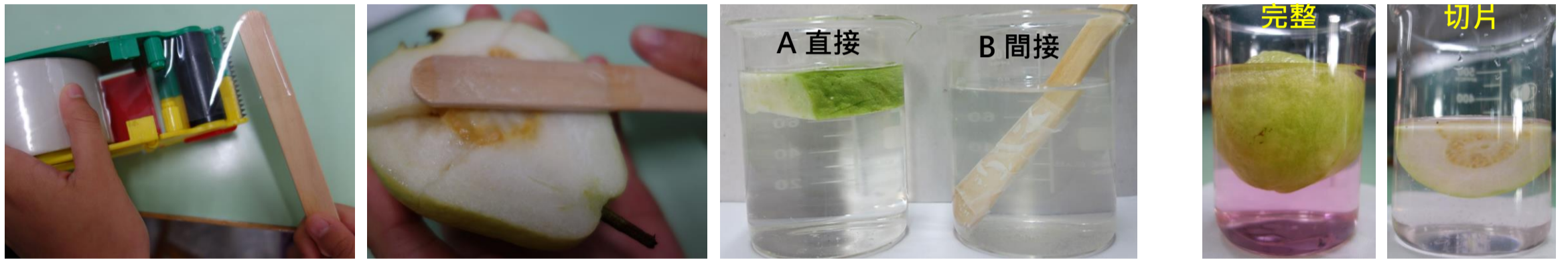
1. 在 40ml 自來水加入實驗物質，用 總氯餘氯測試計 FTC-420 測餘氯總氯濃度。
2. 使用總氯餘氯測試計 FTC-420，是先加實驗物質、後加 DPD 試片顯色，屬於後加 DPD 實驗

### (五) 間接加入實驗物質

1. 將膠帶反貼在冰棒棍上，反覆黏貼實驗物質，再放入自來水中；不可重覆使用冰棒棍及膠帶。
2. 把實驗物質加純水做成水溶液，再滴入自來水中。

## 陸、研究結果

### 1 實驗物質「間接」放入自來水，也能使 DPD 檢測液變透明，所以自由餘氯並不是被實驗物質本身吸收



冰棒棍反貼一圈膠帶，在芭樂上反覆粘黏，結果：A：直接加入芭樂 → 透明    B：間接加入芭樂 → 透明

完整芭樂不會讓 DPD 變透明

實驗物質「間接」放入自來水後 DPD 檢測液的變化

實驗物質	後加 DPD	先加 DPD
0 冰棒棍+膠帶	粉紅	粉紅
1 芭樂	透明	透明
2 蕃茄	透明	透明
3 蘋果	透明	透明
4 棗子	透明	透明
5 橘子皮	透明	透明
6 橘子瓣	透明	透明

實驗物質	後加 DPD	先加 DPD
7 沒洗過的手	透明	粉紅
8 洗米水	白色混濁	淡粉紅混濁 → 白色混濁 → 透明
9 過濾的洗米水	透明	透明
10 漱過口的水	透明	透明
11 綠茶水	透明	透明
12 維生素 C 水	透明	透明

### 2 實驗物質「間接」接觸自來水，也能使自由餘氯濃度下降，所以自由餘氯並不是被實驗物質本身吸收

不論「直接」或「間接」放入實驗物質，都會使 FCL、TCL 下降，所以自由餘氯並不是被實驗物質本身吸收，而是自由餘氯被實驗物質溶入水中的成分還原成  $Cl^-$ ；圖 2 中，手的實驗結果：TCL 變化不大，但 FCL 降到很低、而 CCL 增加很多，證明減少的自由餘氯變成了增加的結合氯，並不是被手吸收了。

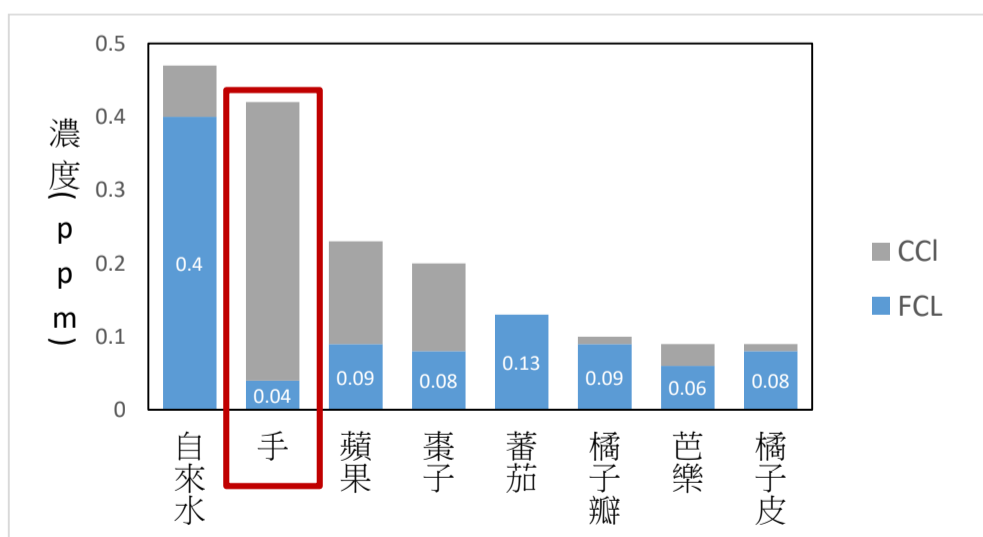


圖 2 實驗物質「直接」加入自來水後的 FCL、TCL、CCL 變化

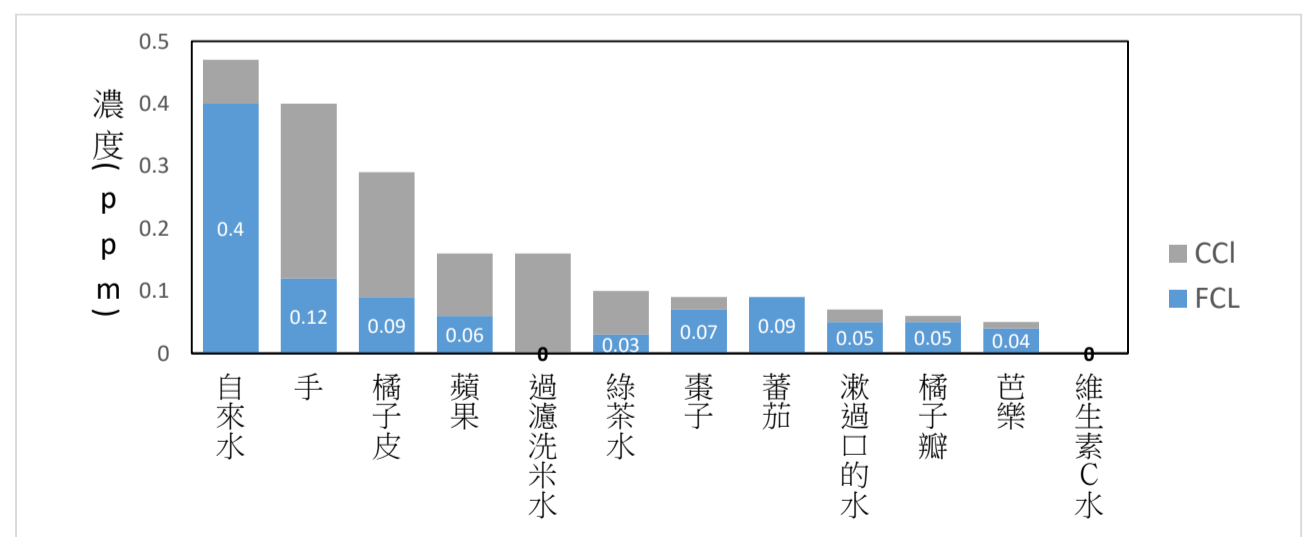


圖 3 實驗物質「間接」加入自來水後的 FCL、TCL、CCL 變化

### 3 使 DPD 餘氯檢測液變透明的主要原因是「氧化還原」反應，如下表：

實驗結果	原理
先加實驗物質，後加 DPD 水溶液呈現透明	實驗物質先和自由餘氯反應，把自由餘氯還原成 $Cl^-$ ，這時水中沒有自由餘氯能氧化 DPD，所以 DPD 呈現透明。
先加 DPD，後加實驗物質 水溶液由粉紅變透明	DPD 先被自由餘氯氧化成粉紅色 DPD，此時水中的自由餘氯已被還原成 $Cl^-$ ，實驗物質沒有自由餘氯可以吸收，還把已氧化成粉紅色的 DPD 還原成透明的 DPD。

#### 4 手放入自來水使 FCL 降低的主因是：自由餘氯與手上含胺的細菌、表皮角質細胞反應，變成結合氯

次氯酸的殺菌效率高，極容易與胺（含人體表皮、污垢等有機胺）進行反應形成結合氯。皮膚的表皮上層由角質細胞組成，當皮膚接觸自來水時，表皮角質細胞的胺基(-NH<sub>2</sub>)也會和自由餘氯反應變成氯胺，因而降低原有自由餘氯的濃度，使結合氯的濃度上升，DPD 餘氯測定液測不到自由餘氯，當然會呈現透明。

圖 4 中消毒積木的 FCL 和圖 5 的結果相似，是因為細菌較少，自由餘氯不需殺菌，所以 FCL 變化不大。手連續放入不同杯的自來水中，在自由餘氯殺菌下，照理應該會像圖 7 一樣，因為間接加入黏到的物質有限，手上的細菌會逐杯減少、FCL 則會逐杯增加；可是圖 6 的每一杯的 FCL 都降到很低，是手上的細菌多到殺不完？還是自由餘氯被手吸收了？

為了釐清這個問題，我們把手充分消毒，再連續放入不同杯的自來水中，結果圖 8 的每一杯的 FCL 都還是降到很低，但是你可以看到，每一杯減少的自由餘氯，都變成增加的結合氯，所以並不是手吸收了自由餘氯。這個實驗結果，讓我們發現自由餘氯變少的原因，不只是手上的細菌，有極大可能是因為自由餘氯也會和手上含胺的表皮角質細胞反應變成結合氯。而手上的表皮角質細胞很多，所以不管手連續放入自來水幾次，都能使減少的自由餘氯變成增加的結合氯。

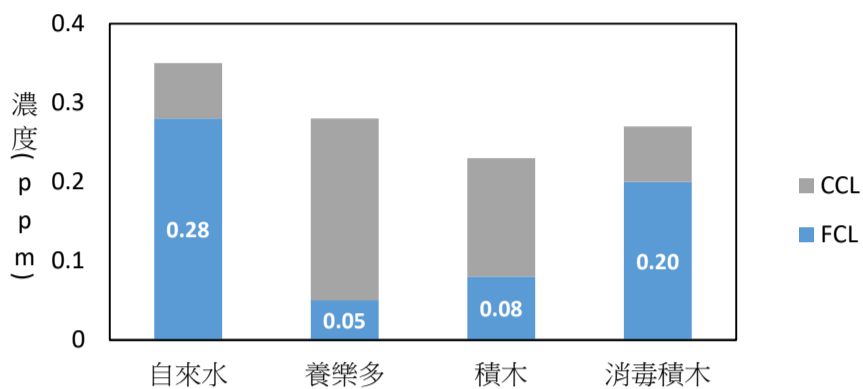


圖 4 「養樂多、積木」對水中餘氯的影響

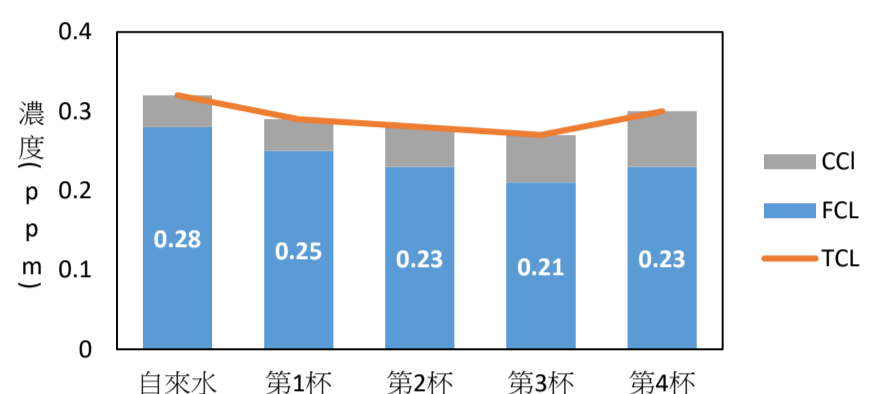


圖 5 「戴手套的手」連續放入對水中餘氯的影響

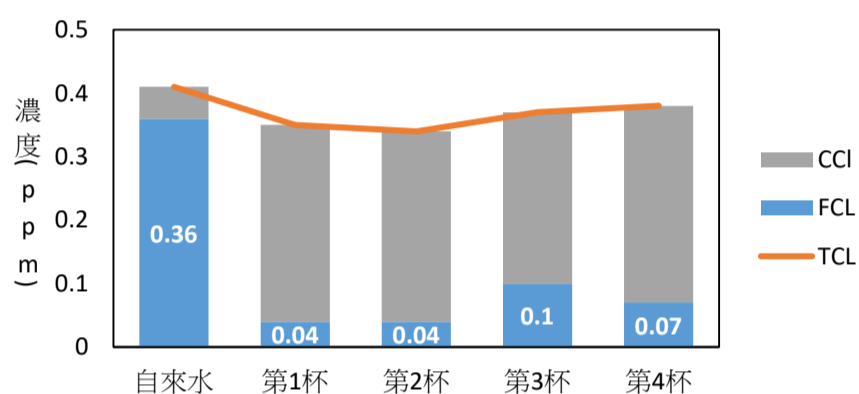


圖 6 「直接」把手連續放入對水中餘氯的影響

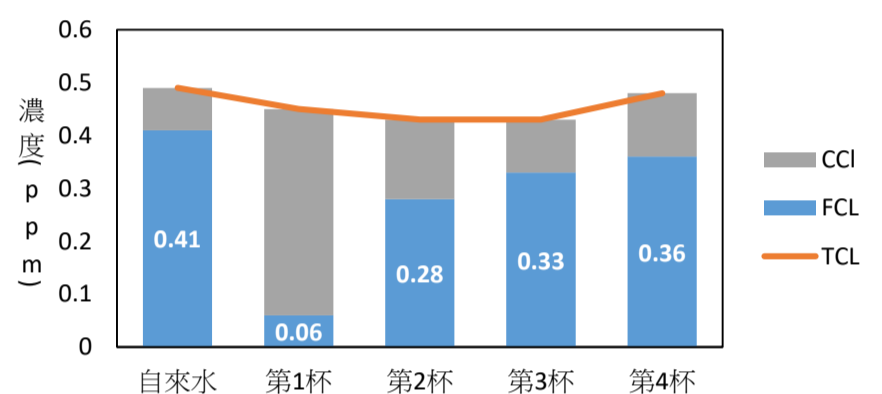


圖 7 「間接」把手連續放入對水中餘氯的影響

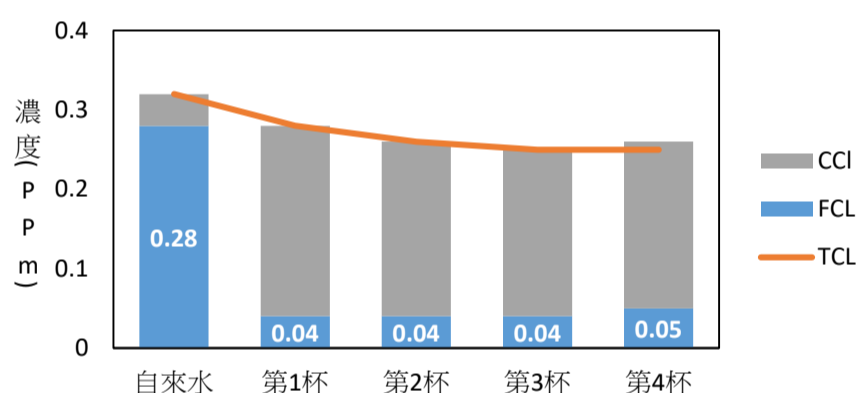


圖 8 「消毒過的手」連續放入對水中餘氯的影響

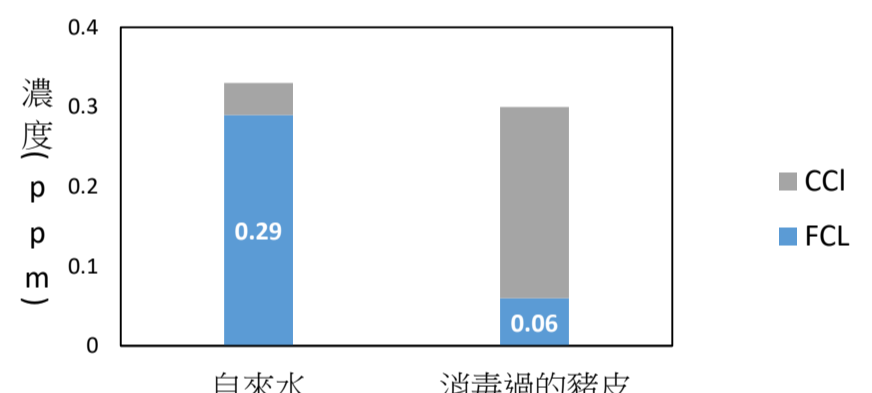


圖 9 「消毒的豬皮」對水中餘氯的影響

#### 5 洗菜時使 FCL 下降的主因是：菜葉的成分和自由餘氯反應形成結合氯，並不是菜吸收了自由餘氯

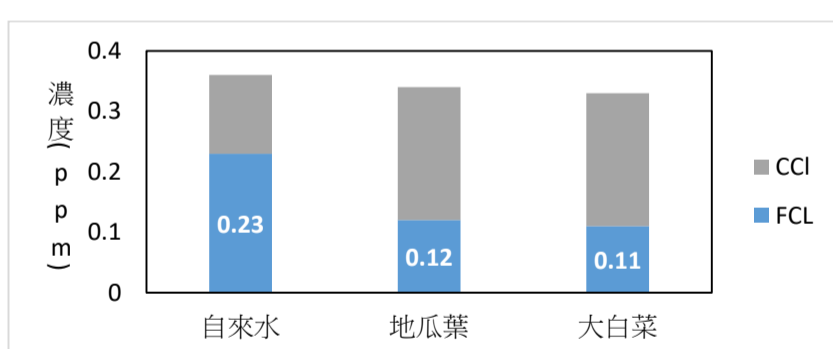


圖 10 洗菜後水中的 FCL、TCL、CCL 的變化



洗菜後加入 DPD-1 和 DPD-4 的 FCL、TCL 顏色變化

### 柒、結論

- 藉由將實驗物質「間接」加入自來水中，可以確定是實驗物質的成分讓自由餘氯消失，使 DPD 變透明，並不是實驗物質吸收了自由餘氯；利用 FTC-420 比較 FCL 和 TCL 的濃度，也得到相同的結論。
- 從減少的 FCL、變成增加的 CCL 可以發現，是水中的自由餘氯與手上的細菌、表皮角質細胞反應變成氯胺，DPD 餘氯測定液檢測不到自由餘氯，才會變透明，並不是手吸收了自由餘氯。
- 綜合以上 2 點，自由餘氯減少的主要原因：
  - 自由餘氯被實驗物質溶入水中的成分還原成 Cl<sup>-</sup>。
  - 自由餘氯與含胺的細菌、表皮角質細胞反應，變成結合氯。
- DPD 餘氯測定液變透明的原因：
  - 先加實驗物質，後加 DPD 仍透明：  
實驗物質先和自由餘氯反應，把自由餘氯還原成 Cl<sup>-</sup>、或變成氯胺，因為已經沒有自由餘氯去氧化 DPD，所以 DPD 呈現透明。
  - 先加 DPD，後加實驗物質變透明：  
DPD 先被自由餘氯氧化成粉紅色 DPD，此時水中的自由餘氯已被還原成 Cl<sup>-</sup>，實驗物質沒有吸收自由餘氯，而是實驗物質把已氧化成粉紅色的 DPD 還原成透明的 DPD。