

γ - 射線照射對文化用紙光學性質的影響*

蘇裕昌^{1,4)} 趙國評^{1,3)} 陳鴻財¹⁾ 陳家杰²⁾

摘要

γ - 射線照射可應用為紙製品的滅菌法，但往往會對紙的主成分的纖維素、半纖維素造成降解作用，本論文探討以不同劑量 50 Krad-25 Mrad 的 γ - 射線照射文化用紙，進行不同劑量做為滅菌法之可行性評估，定量照射後對各紙樣的光學性質如白度、色調及色差值等的影響，以為建立滅菌法的參考依據。同時進行照射紙張的 FT - IR 圖譜解析，以了解其顏色劣化之情形。結果顯示在 2.5 Mrad 以上之照射劑量有 100% 之滅菌效果，2.5 Mrad 應為理想之滅菌劑量。低劑量 (< 1 Mrad) 照射各種文化用紙紙張之白度及色相無明顯之變化，中劑量 (1.0-2.5 Mrad) 下紙張有明顯之顏色劣化如白度下降、黃度上升、色差值變大等，但在目視條件下仍不易區別，高照射劑量下 (> 2.5 Mrad)，照射試樣顯示有強度的顏色劣化。照射環境中，光線與空氣之有無均影響照射紙張之光學性質等，以空氣介質的有無影響較大。FT - IR 圖譜分析結果，顯示照射後纖維素分子降解所產生的衍生物，會在 1720 cm^{-1} 附近會有新官能基形成 (羧酸基、醛基或酮基等)，此官能基對顏色劣化影響很大，亦受照射劑量影響，劑量愈大官能基形成愈多。

關鍵詞： γ - 射線照射、FT - IR 圖譜、紙張性質、光學性質。

蘇裕昌、趙國評、陳鴻財、陳家杰。1999。 γ - 射線照射對文化用紙光學性質的影響。台灣林業科學 14(1): 37-44。

Effects of Gamma Ray Irradiation on Optical Properties of Printing and Writing Paper*

Yu - chang Su,^{1,4)} Kuo - ping Chao,^{1,3)} Horng - tsai Chen¹⁾ and Chia - chieh Chen²⁾

[Summary]

γ - Rays used as a sterilization method for paper always cause degradation of main components such as cellulose and hemicellulose. This report elucidates the effects of γ - ray irradiation on optical properties (brightness, color difference, etc.) and examines the feasibility of γ - ray irradiation for sterilization at different dosages. The results obtained can be used for establishing a proper sterilization method for paper. FT - IR spectrum analyses were also conducted and the results used for understanding color degradation of paper. Gamma - ray irradiation at dosages above 2.5 Mrad gave 100% sterilization, and 2.5 Mrad seems to be a proper dosage for sterilization of paper. No significant resultant changes in optical properties of the paper were shown at low (< 1 Mrad) and medium

¹⁾ 台灣省林業試驗所木材纖維系，台北市 100 南海路 53 號 Division of Wood Cellulose, Taiwan Forestry Research Institute. 53 Nanhai Rd., Taipei 100, Taiwan, ROC.

²⁾ 行政院原子能委員會核能研究所，桃園縣龍潭鄉 325 文化路 1000 號 Institute of Nuclear Energy Research, Atomic Energy Council. 1000 Wenhua Rd., Long Tam Township 325, Taoyuan County, Taiwan, ROC.

³⁾ 國立海洋大學水產養殖所，基隆市 105 北寧路 2 號 National Taiwan Ocean University. Graduate School of Aquaculture. 2 Peining Rd., Keelung City 105, Taiwan, ROC.

⁴⁾ 通訊作者 Corresponding author

1998 年 8 月送審 1998 年 10 月通過 Received August 1998, Accepted October 1998.

* 本研究承行政院農業委員會 84 科技 - 2.11 - 林 - 17(6-3) 研究計畫經費補助，特予致謝。

(1.0-2.5 Mrad) dosages of γ -ray irradiation. At high dosages (> 2.5 Mrad) of irradiation, the resulting paper showed significant decreases in brightness, increases in yellowness, and greater color differences. Conditions excluding light and air during irradiation influenced the optical properties of the resulting paper. The presence of air affects the properties more than that of light. FT-IR spectrum analyses showed that a new adsorption band was formed near 1720 cm^{-1} . This reveals the formation of functional groups in irradiated paper, and they are assumed to be carboxyl, aldehyde, or ketone groups. Formation of functional groups is responsible for the discoloration of the irradiated paper. The higher the dosage of irradiation, the higher the amounts of functional groups formed.

Key words: γ -ray irradiation, FT-IR spectrum, paper properties, optical properties.

Su, Y. C., K. P. Chao, H. T. Chen, and C. C. Chen. 1999. Effects of gamma ray irradiation on optical properties of printing and writing paper. *Taiwan J. For. Sci.* 14 (1): 37-44.

緒言

以往常用的醫療器材或食品包裝容器的殺蟲滅菌採用的方法，有化學燻蒸法如氧乙炔氣(ethylene oxide gas)、高壓蒸氣滅菌及少數採用照射的殺蟲滅菌法如紫外線照射、放射線照射等。最近因氧乙炔氣體具致癌性、環境保護採用濃度日趨嚴格，高壓蒸氣滅菌法雖沒有毒性問題，但不耐熱、不耐濕之樣品無法使用，滅菌後再行包裝也有再污染之可能，因此紙製容器之滅菌如醫療用之無菌紙、農用食品包裝紙等以天然纖維素主體之包裝容器之滅菌的應用，以輻射照射法中的 γ -射線照射(Keeney, 1990)及電子線照射(Muto *et al.*, 1995)等為一相當方便可行之滅菌法。

輻射照射乃是利用放射性元素釋出高能量的 γ -射線進行各種物質的照射，是釋放能量的一種形式，與紫外線、可見光、紅外線、微波或無線電波相同，只是 γ -射線的能量較高、波長較短、穿透力也較強。基本上「輻射照射」乃是一種光波的照射，被照射過的物體，就如同被太陽光照射一般，不會有放射線的殘留。

輻射照射所需的劑量則視其應用之目的而定。利用鈷六十($\text{Co}-60$)釋出 γ -射線，進行各種物質的照射，對生物體產生特定生物化學效應，以達到殺蟲、滅菌、突變、植物體的矮種化等醫學、農業應用。對非生物體物質，可利用輻射引起物理化學效應，以達到工業應用之目的(Anonymous, 1990)，在製漿造紙研究中曾被應用為製漿之前處理法(Inaba *et al.*,

1979; 1981)。

以 γ -射線照射進行殺蟲及滅菌法有以下的優點：如可在常溫之下進行，適用於易吸濕樣品，具高穿透性，可以以包裝好之狀態進行滅菌後不會再引起二度污染，能均一滅菌，無殘留毒物之可能，可說是一種以利用光波的輻射所引起照射物質起物理化學作用的滅菌法，只要應用得法不會對被照物產生破壞。目前應用在藝術上是做為古文化財的修護，在可控制的條件下將材料老化之仿古材料的製備(Nagazawa, 1992; Handa, 1992)，以為文化財如木雕、紙張、絹布等之修補材料。利用 γ -射線作為紙製品的殺蟲滅菌方法預期會有劣化之情形發生，因此本論文探討以 γ -射線做為重要文物的防蟲，滅菌等文化財的保存應用上之可行性，探討在各種照射劑量對文化用紙如濾紙、書寫用紙、宣紙等的光學性質，並以解析 FT-IR 圖譜探討照射紙張照射產生之變化，以做為建立 γ -射線應用法之參考數據。

材料與方法

一、試驗材料：濾紙、手工宣紙、機械宣紙、影印紙等。試驗所用材料之基本性質如 Table 1。

二、試驗方法

(一) γ 射線的照射：以 60°C 的板狀鈷60($\text{Co}-60$)照射源在室溫下，在空氣中或經抽真

Table 1. Characterization of test specimens¹⁾

	A	B	C	D
Basis wt. (g/m ²)	86.1	27.7	36.5	69.2
Brightness(% ISO)	92.0	78.6	82.3	84.4
Yellowness index(%)	3.6	12.5	3.5	6.9
Opacity(%)	—	74.2	68.9	86.7

¹⁾A: Filter paper; B: Handmade printing paper; C: Machine - made printing paper; D: Xerox paper.

空、遮光或不遮光之條件下進行各種紙張的照射，或順次包裝鋁箔及黑紙，是為遮光組，或裝入紙樣利用裝玻璃容器抽氣至真空組。照射劑量：50 krad-25 Mrad(1 Mrad = 10 KGy)，照射後考慮照射對試樣的照射影響，在恆溫、恆濕室中(20°C, 65% RH)放置 1 週後才進行後續之試驗工作。

(二)照射對紙張之滅菌之確認：以 PDA (Difco) 製備 PDA 培養基後，經滅菌後(121°C, 30 min)，分注於 9 cm 的培養皿中，俟凝固後在無菌操作箱中分別置入 γ -射線及未照射之紙樣，後觀察培養基的混濁程度及其上有否菌落或菌絲的生成。

(三)照射對紙張光學性質之影響，紙樣使用 Data color (Elrepho 2000) 光學測試儀測試紙張白度 (CNS 1466)，及直接由反射曲線轉換求得之 CIE 色彩體系之 L*, a*, b* 值，計算照光紙張表面顏色變化如色差值 (color difference, ΔE^*) (Wang *et al.*, 1994) 及黃色指數 (yellowness index, YI) 等，並測量紙張之不透明度、吸光係數 (light absorption coefficient) 及光散亂係數 (light scattering coefficient)。

(四)傅立葉紅外線光譜分析：試驗所使用傅立葉紅外線光譜儀 (FT-IR, Bio-rad, Model FTS-40)，配合多次全反射裝置 (ATR, attenuated total reflectance) 分析紙張的表面化學官能基的變化，使用 KRS-5 晶片，掃描次數為 64 次，解析度為 8 cm⁻¹，掃描範圍 4000-600 cm⁻¹。

結果與討論

一、 γ -射線照射後照射滅菌後之滅菌確認
一般滅菌照射量在歐洲各國之建議基準為

2.5-4.5 Mrad，日本則無特殊建議照射劑量。最佳的 γ -射線照射應用應依使用用途決定滅菌劑量。本試驗採用 1, 2.5, 10, 25 Mrad 為滅菌劑量進行各種紙張照射，經照射後之滅菌紙移至滅菌培養基上，經 30°C 之培養一定時間後以觀察培養基混濁狀況有無細菌的菌落發生及有無菌絲之發生來判定滅菌效果。不經滅菌之對照組在紙樣放入後 2-3 日培養基即有變濁之狀況，其後培養基濁度逐漸增大至二週後漸呈一定。於其上亦有多數試樣上有菌落的生成或菌絲的存在。以 1.0 Mrad 劑量處理之試樣有 10% 左右的含試紙之培養皿有菌絲發生，或培養基變混濁。但以超過 2.5 Mrad 之劑量處理，滅菌後無論何種紙樣經 2 週 -3 個月，一定溫度 30°C 培養後，培養基仍沒有變濁之狀態，亦無菌絲的發生或菌落之生成，顯示 γ -射線在照射劑量 2.5 Mrad 以上均有優良之滅菌性，2.5 Mrad 應為可信賴之滅菌劑量 (Fig. 1)。

二、 γ -射線照射對文化用紙光學性質的影響

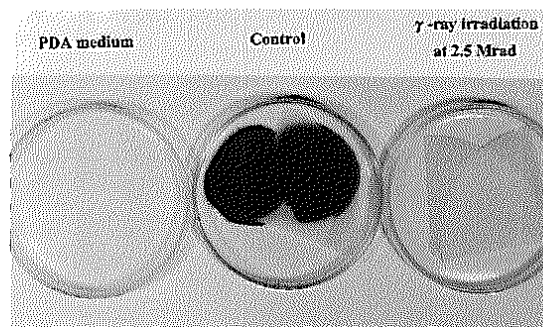


Fig. 1. Recognition of sterilization effect of γ -ray irradiation.

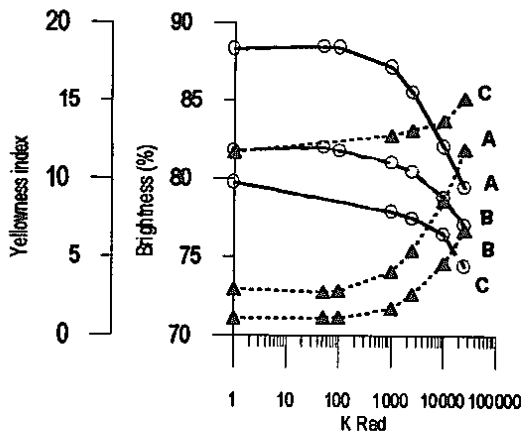


Fig. 2. Influence of gamma ray radiation on brightness and yellowness index of papers. A: Filter paper writing paper, B: Xerox paper, C: Hand-made paper, ○: Brightness, ▲: Yellowness index.

Fig. 2 為文化用紙濾紙、影印紙、宣紙等，在不同照射劑量，不同處理之方法下進行照射紙張的白度及黃度指數變化之結果，紙張白度隨照射量增加而下降，黃度指數隨照射劑量增加而增加。在照射劑量在 50 Krad-1 Mrad 以下時兩者均無明顯之變化，但照射劑量為 1-2.5 Mrad 時，三種紙張的白度則下降 1-2% ISO，黃色指數的上升，超過此劑量 (1-2.5 Mrad) 照射的紙張則白度及黃度指數則隨照射劑量增加而呈明顯的變化。

Table 2 為手工宣紙經 γ -射線照射後，其色相的變化情形，色相的表現通常三色彩參考 L^* , a^* , b^* 值 (C.I.E. L^* , a^* , b^*) 表示，其中 L^* 值代表色彩的明亮度，經照射後的紙張的 L^* 值亦隨處理劑量而減小，顯示紙張之明亮度的值下降，經照射後其明亮度有變深、變

暗的傾向。代表色彩的紅綠軸指標之 a^* 值亦隨處理劑量增大而減小， Δa^* 值為負值，唯差異並不明顯，顯示紙張顏色在紅綠色軸上的變化往綠色方向變化。代表色彩的黃藍指標之 b^* 值亦隨處理劑量而增大， Δb^* 值變大，顯示在黃藍色軸上的變化趨向往黃色方向變化。色差值 $\Delta E^* = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$ 亦隨照射劑量增加而增加。而且與 ΔB (白度損失) 呈負相關、 ΔY (黃度變化) 呈正相關， Δb^* 與 ΔE^* 值相近顯示經照射之紙張漸趨變黃。

Table 3 探討在不同條件下如空氣介質、光線之有無影響照射紙張之色調之結果，因此以成分較為純粹濾紙進行 γ -射線照射。曝露在空氣中的試樣在遮光的條件下之照射較曝露在光線中有稍小之光劣化現象。各種處理中，曝光組及遮光組無論照射劑量的多少，兩處理間之差異並不很大。色彩三要素之差異值 (ΔL^* , Δa^* , Δb^*)、色差值 (ΔE^*)、白度下降 (ΔB)、黃度上升值 (ΔY) 三值均很小，但曝露在空氣中及抽真空組 (ΔE^*) 的對比組則各差異均很大，而且抽真空組之各差異值尤其是 Δb^* 值與色差值均高於曝氣組很多，此現象與木材光變色反應不同，一般光化學反應在光及空氣或水的存在下，才有光劣化產生，沒有氧氣存在下光劣化很小 (Wang *et al.*, 1994)。

真空抽出後之照射後，無論濾紙、手工紙之黃色度、色差值 (ΔE^* 值)、 Δb^* 值均較曝露在空氣中照射之結果為高。其原因可推論為在空氣介質的存在下，在高能量的 γ -射線照射下，使其中之氧產生活性化之作用，因而可能有如 $[H_2O_2 \cdot]$ 及 $[O_2 \cdot]$ 自由基之形成或

Table 2. Influence of gamma ray irradiation on optical properties of hand-made painting paper¹⁾

	1 Mrad		2.5 Mrad		10 Mrad		25 Mrad	
	A	B	A	B	A	B	A	B
ΔL^*	-0.44	-0.44	-0.60	-0.50	-0.95	-0.84	-1.66	—
Δa^*	-0.09	-0.01	-0.12	-0.08	-0.13	-0.05	-0.05	—
Δb^*	0.56	0.32	0.72	0.54	1.00	0.56	1.67	—
ΔE^*	0.72	0.54	0.94	0.74	1.39	1.25	2.36	—

¹⁾A: Light(+) Air(+); B: Light(-) Air(+).

Table 3. Color differences of filter paper after γ - ray irradiation

	1 Mrad				2.5 Mrad				10 Mrad				25 Mrad			
	A ¹⁾	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
$-\Delta L^*$	0.21	0.21	0.54	0.59	0.68	0.36	0.82	0.97	1.22	0.95	1.48	1.56	1.21	1.24	2.01	2.01
$-\Delta a^*$	0.02	0.02	0.16	0.18	0.06	0.04	0.24	0.26	0.15	0.11	0.41	0.45	0.39	0.35	0.59	0.63
Δb^*	0.41	0.41	1.11	1.00	0.85	0.75	1.84	1.88	2.07	1.86	3.39	3.48	3.05	2.93	4.99	4.94
ΔE^*	0.46	0.46	1.24	1.17	1.09	0.83	2.03	2.13	2.41	2.09	3.72	3.84	3.30	3.20	5.43	5.37
$-\Delta B^2)$	0.60	0.90	2.40	2.30	2.30	1.63	3.90	4.20	4.90	4.20	7.10	7.30	6.10	6.00	10.2	10.0
ΔYI	0.57	0.77	2.04	1.83	1.62	1.42	3.41	3.47	3.94	3.54	6.35	6.51	5.68	5.49	9.42	9.31

¹⁾A: Air(+)light(+); B: Air(+)light(-); C: Air(-)light(+); D: Air(-)light(-).

²⁾ ΔB : Change in brightness; ΔYI : change in yellowness index.

單峰氧 (singlet oxygen)，將水與氧氣形成過氧化物離子或自由基，因而有漂白作用 (Suzuki *et al.*, 1980; Kim *et al.*, 1990)。或在高能之照射下，氧氣被高能激起的狀態下轉變成臭氧 [O₃] 而有漂白之作用。這種漂白作用導致在空氣中之照射組紙張之白度較高，色差值較低，其他之影印用紙及二種宣紙之三色彩參數的變化，雖試樣間其值有若干之變化但也顯示有相同之傾向。

Table 4 顯示不同紙張在不同劑量照射時不同的色差值變化。各種紙間以手工宣紙之變化為最小，濾紙為次，而以影印紙的色差值較高，其原因與紙張的化學組成有關，一般而言宣紙之成分甚純，僅有少許之添加成分，濾紙則幾乎 100% 為纖維素，而影印紙則含有大量之添料及回收纖維。在滅菌劑量 2.5 Mrad 以下的各種紙經照射後之紙張其色差值均在 3.0 以下，一般而言，在此色差值範圍在目視的條件下，無法區別顏色的變化，但在 10 Mrad 以上的照射劑量則色差值有極大的變化，各試樣無論材質均明顯變黃。

光散亂係數是用來測量紙張內部擴散及繞射的能力，此係數與紙張中纖維鍵結結合程度呈反比，散亂係數變小顯示纖維間之距離被拉近，結合面積變大，反之則有較低之結合面積 (Keeney, 1990)。通常不透明度的變化與光散亂係數相若，本試驗中經照射後各試樣之光散亂係數僅有些微的變化，不透明度亦僅有些微之變化 (Table 5)，顯示 γ - 射線照射也許會導致纖維素之降解反應，也許會損傷纖維強度或紙張強度劣化之情形，但對紙張之結合與交織沒有明顯的影響，有關照射影響紙張物理性質另文中討論 (Su *et al.*, 1998)。各種紙張的吸光係數隨照射劑量增加而變大，此數值與白度下降及黃度的上升有明顯的相關，在本文中不再討論。

三、照射紙樣的 FT - IR 圖譜解析

Fig. 3 為對照組紙樣與經 25 Mrad 照射之紙樣的比較圖，圖中顯示經照射之劣化產物除了在 1725 cm⁻¹ 附近有新形成之吸收帶，隨著照射劑量生成，進而其他之吸收帶並無明顯的

Table 4. Influence of γ - ray irradiation on color difference (ΔE^*) of painting and writing papers ¹⁾

	50 K	100 K	1 Mrad	25 Mrad	10 Mrad	25 Mrad
Xerox paper	0.15	0.24	1.08	2.17	5.00	8.05
Filter paper	0.1	0.06	0.65	1.44	3.25	5.08
Painting paper	—	—	0.72	0.94	1.39	2.36

¹⁾Air(+)Light(+).

Table 5. Changes of opacity, light absorption, and light scattering coefficient of papers treated with γ -ray irradiation

	A ¹⁾					B					C				
	c ¹⁾	I	II	III	IV	c	I	II	III	IV	c	I	II	III	IV
Opacity	84.2	85.9	85.6	86.9	87.0	74.2	74.2	75.9	75.3	76.0	86.7	87.1	87.1	87.6	88.1
Light S. C. ²⁾	34.6	37.3	36.2	36.2	38.9	58.5	60.7	61.8	59.6	61.9	48.0	46.5	46.0	46.5	46.5
Light A. C. ²⁾	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.26	0.27	0.25	0.25	0.27	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07

¹⁾A: Filter paper; B: Handmade printing paper; C: Xerox paper; c, I, II, III, IV: γ -ray irradiation at dosages of 0, 1, 2.5, 10, and 25 Mrad, respectively.

²⁾Light S. C.: light scattering coefficient; Light A. C.: light adsorption coefficient.

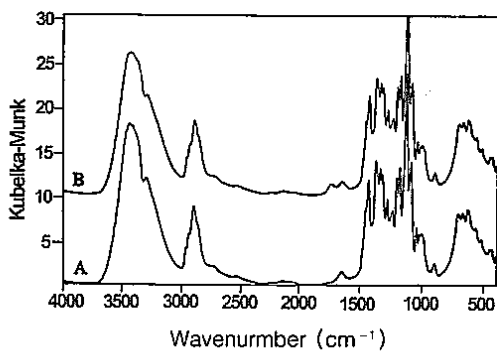


Fig. 3. FT-IR spectrum of filter papers after 25 Mrad γ -ray irradiation. A: control, B: 25 Mrad irradiation.

變化。一般木材經長時間照光後，木材表面之 FT-IR 圖譜顯示木質素吸收帶 1510 cm^{-1} ， 1593 cm^{-1} 強度有明顯的減少，全纖維素也產生降解，木材表面即劣化之衍生物會形成具有羧基、羰基等 (1770 cm^{-1} ， 1720 cm^{-1}) 的官能基衍生物 (Chang and Chang, 1997)。O'Connor *et al.* (1957) 進行纖維素氧化時，在 $5.80\text{ }\mu$ (1720 cm^{-1} 附近) 附近會有一新的吸收帶生成，氧化程度愈高則此吸收帶強度愈大。此吸收帶主要是顯示氧化衍生物中醛基、酮基或羧基的形成。另外並進行棉花的 γ -射線照射，將試樣曝露在不同的氣體條件下，進行照射發現在 $5.7\text{-}5.8\text{ }\mu$ 間也有新的吸收帶生成 (O'Connor *et al.*, 1958)。在 $5.7\text{-}5.8\text{ }\mu$ 左右之吸收帶為羧基及羰基之特性吸收，隨照射劑量增加。纖維素中的葡萄糖分子在如臭氧等強氧化劑的氧化或高能輻射之照射下，無水葡萄糖分子中的 C6 碳原子位置會產生醛基，C2 或 C3 會產生酮基，C2、C3 間之鏈結開裂形成羧基，半纖維素降解亦同樣會產生具羧基

及醛基之衍生物，此等具有羧基、羰基官能基之衍生物均為造成漂白漿白度及不安定性之主要原因 (Rapson *et al.*, 1979)。依上述之結果推論，經照射後紙張 FT-IR 圖譜上新生成之 1725 cm^{-1} 附近吸收帶應為羧基、醛基或酮基等。

Fig. 4 為四種紙樣，濾紙、手工宣紙、機械宣紙、影印紙分別經 0, 1, 2.5, 10, 25 Mrad 之照射紙樣在 1700 cm^{-1} 左右之變化

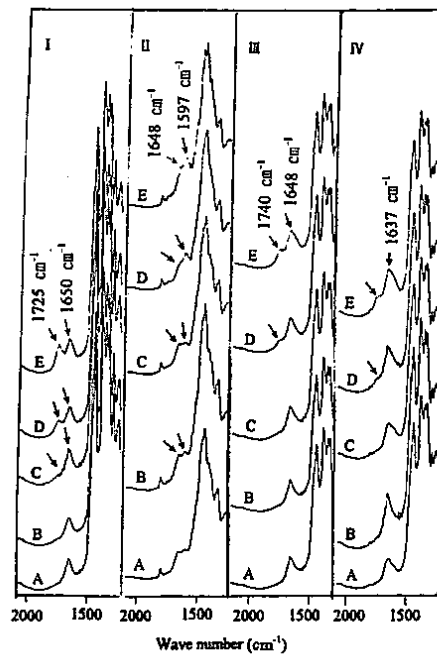


Fig. 4. Changes of FT-IR spectrum of papers after different dosages of γ -ray irradiation. I: Filter paper, II: Handmade painting paper, III: Machinemade painting paper, IV: Xerox paper. A: Control, B: 1 Mrad irradiation. C: 2.5 Mrad, D: 10 Mrad, E: 25 Mrad.

圖，四種紙樣均為文化漂白用紙，其中含有極低或不含木質素，因此無明顯之木質素吸收帶之變化。各紙樣均可視為絕大部分為全纖維素，僅部分紙張含有上膠劑及灰分等，經照射後降解反應發生，在 1725 cm^{-1} 有新吸收帶之生成，此等吸收帶之強度與白度下降及黃度上升趨勢相同，但並不具比例的關係。其中較為不同的為手工宣紙，雖在 1700 cm^{-1} 沒有明顯的新吸收帶形成，但 $1750\text{-}1650\text{ cm}^{-1}$ 部分呈不規則之肩帶亦即顯示有羧基或羰基等的生成。

羰基、羧酸基一般被認為是漂白紙漿中白度不安定性的一個重要影響因子(Sjöström, 1968)，回色的程度與導入的羧酸基、醛基、酮基等成正比例(Rapson and Spinner, 1979)， γ -射線照射文化用紙紙樣變黃，可推論為照射所引起的降解反應發生官能基的生成所導致之結果，其他降解反應所引起之各項化學變化將另闢論文加以闡述(Su *et al.*, 1998)。

結論

以 γ -射線進行文化用紙照射探討在不同劑量下(50 Krad-25 Mrad)照射對滅菌性及對光學性質之影響。綜合試驗結果如下：

一、本試驗採用 1-25 Mrad 為滅菌劑量進行照射，2.5 Mrad 以上各劑量有 100% 之滅菌效果，2.5 Mrad 應為理想滅菌劑量。

二、照射引起紙張色調變化，主要是 Δb^* 值變大與色差值 (ΔE^*)， Δb^* 與 ΔE^* 二值相若顯示紙張往黃色變化。

三、在低劑量(< 1 Mrad) γ -射線照射下，各紙張之光學性質影響不大。在中劑量(1-2.5 Mrad)照射下，紙張的白度下降，黃色度指數的上升，色差值等均有明顯的上升，但目視仍不易區別。高劑量(> 2.5 Mrad)各性質變化更趨嚴重，色彩三要素 L^* ， a^* ， b^* 值與色差值有明顯的變化，白度的下降在目視下可明顯區別。

四、照射環境中，光線與空氣之有無均影響光學性質之變化，光線之有無對光學性質、白度、黃度、色差值稍有影響，但空氣介質的有無則影響很大。空氣的存在，在高能射線照射下會產生過氧化物自由基或臭氧而有漂白作用，進而使紙張有較小的顏色變化。

五、 γ -射線照射對光散亂係數及不透明度沒有明顯之影響，顯示照射對紙層之結合影響不大。

六、FT-IR 圖譜分析結果顯示 γ -射線照射會使纖維素分子產生降解作用劣解產物，在 1720 cm^{-1} 附近會有新吸收帶之生成，顯示劣解產物具有新官能基的生成，此官能基被推論為羧酸基、醛基或酮基等，此等官能基可能導致紙張的變黃，照射劑量愈高，此類官能基生成愈多，顯示紙張回色更為嚴重。

謝誌

作者等在完成本研究之際，農委會給予經費上的支持協助、台灣大學森林系張上鎮教授允借 FT-IR 測試儀測定並提供寶貴意見、行政院原子能委員會核能研究所提供 γ -射線照射，特此致謝。

引用文獻

- Anonymous.** 1990. General application on Radiation Ray irradiation. Inst. Nuclear Energy Res. ROC. [in Chinese].
- Chang, S. T., and H. T. Chang.** 1997. Surface property changes of uncoated woody materials induced by light. Quart. J. Chinese For. 30 (1): 45-54. [in Chinese with English abstract].
- Handa, T.** 1992. Application of ray irradiation on silkbase painting perservation. Radiation Ray Industry. 56: 9-13. [in Japanese].
- Inaba, M., G. Meshitsuka, and J. Nakano.** 1979. Kraft cooking of gamma irradiated wood (Part 1) Effect of alcohol addition be-

- fore irradiation. *Jpn. Tappi J.* 33(12): 782 - 789. [in Japanese with English summary].
- Inaba, M., G. Meshitsuka, A. Ishizu, and J. Nakano.** 1981. Kraft cooking of gamma irradiated wood (Part 2) Behaviors of lignin and carbohydrates. *Jpn. Tappi J.* 35(4): 368 - 374. [in Japanese with English summary].
- Keeney, N. H., and J. W. Walkinshaw.** 1990. The effects of radiation on the strength of medical packaging papers. *Tappi J.* 73(10): 233 - 236.
- Kim, B. Y., A. Isogai, F. Onabe, and M. Usuda.** 1990. Degradation mechanism of paper by UV treatment. *Jpn. Tappi J.* 44(2): 242 - 248. [in Japanese with English summary].
- Muto, H., K. Takahashi, and H. Yamazaki.** 1995. Effect of electron beam irradiation on characteristics of paper. *Jpn. Tappi J.* 49(7): 1086 - 1097. [in Japanese with English summary].
- Nagazawa, I., M. Inaba, and T. Handa** 1992. Application of ray irradiation on wood-curving culture assets repairing. *Radiation Ray Industry* 56: 4 - 8. [in Japanese].
- O' Connor, T. R., E. F. Dupre', and Dimitcham.** 1958. The application of infrared absorption spectroscopy to investigation of cotton and modified cottons. *Textile Res. J.* 29: 382 - 392.
- O' Connor, T. R., E. F. Dupre', and E. R. McCall.** 1957. Infrared spectro - photometric procedure for analysis of cellulose and modified cellulose. *Anal. Chem.* 29 (7): 998 - 1005.
- Rapson, W. H., and I. H. Spinner.** 1979. "Chapter 14: Brightness reversion in bleached pulp". Pages 356 - 392 in R. P. Singh, ed. *The Bleaching of Pulp* Tappi Press, Atlanta.
- Sjöström, E., and E. Eriksson.** 1968. The influence of carbonyl and carboxyl groups on the brightness stability of bleached pulps. *Tappi J.* 51 (1): 16 - 19.
- Suzuki, K., K. Inoue, N. Hanamura, and K. Mori.** 1980. The influence of irradiation of gamma - rays on the pulping and papermaking Part 4. The influence of irradiation of gamma rays on the beating of pulp and the paper strength. *Jpn. Tappi J.* 34 (2): 197 - 203. [in Japanese with English summary].
- Su, Y. C., K. P. Chao, H. T. Chen, and C. C. Chen.** 1998. Effect of gamma ray irradiation on the physical and chemical properties of papers. *Taiwan J. For. Sci.* 14(2): xxx - xxx. [in Chinese with English summary].
- Wang, S. Y., S. T. Chang, and Y. C. Su.** 1994. The effect of environmental factors on the discoloration of *Taiwania cryptomerioides* heart wood. *For. Prod. Ind.* 13(3): 351 - 361. [in Chinese with English abstract].