

鋼皮圓筒倉多用途之研究 (II) —— 乾燥高粱及玉米之結果

A Study of Multiple Purposes of Steel Cylindrical Bins (II) —— Results of Drying Grain Sorghum and Shelled Corn

國立台灣大學
農機系教授

蕭 介 宗
Jai-Tsung Shaw

國立台灣大學
農機系教授

張 漢 聖
Hang-Sun Chang

國立台灣大學
農機系技正

賈 精 石
Jing-Shyr Jea

摘 要

民國77年利用一鐵質圓筒倉，座落於嘉義縣義竹鄉農會倉庫區內，圓筒倉裝設有國內自行設計之穀物掃倉循環機構，以及火爐與風機。倉頂則改成透明纖維玻璃板太陽能空氣加熱器。經六次乾燥高粱試驗結果顯示，圓筒倉裝有掃倉循環機構，則其功能如同循環式乾燥機。掃倉循環機構之正常運作影響乾燥速率甚大。乾燥少量的高粱在能源利用上較不經濟。太陽能的利用可以提供倉內乾燥所需之部份熱能。

78年繼續利用建於義竹農會之鐵質圓筒倉，頂部改成鋼板太陽能空氣加熱器，及倉內裝有一套國外引進之循環掃倉裝置。以玉米做五次乾燥試驗，結果顯示循環掃倉裝置在穀物乾燥均勻度上發揮了良好功能。同時顯示乾燥較多之玉米其能源消耗率，燃油及電力等，較少量玉米的能源消耗率為低。其乾燥均勻度0.56%及耗油率1.79L/T-%均合乎雜糧乾燥機之國家暫定標準。

關鍵詞：鋼皮圓筒倉，乾燥，高粱，玉米。

ABSTRACT

In 1988, a steel cylindrical bin located at Yi-Chu Farmer's Association was installed with a local designed grain sweeping circulator, burners and fans, and a transparent fiber glass solar collector on the top of the roof. After six times of drying grain sorghum, results showed the drying bin with a sweeping circulator functioned as a recirculating dryer. The sweeping circulator operation affected the drying rate. Drying small amount of grain sorghum was not very economic in the energy utilization. Solar energy may be applied as a supplemental heating energy.

In 1989, the same steel bin located at Yi-chu Farmer's Association was changed its roof with a steel-plate solar collector and installed with an import sweeping circulator. After five times of drying shelled corn, results showed the sweeping circulator has done a good job on

the uniform drying, and drying large amount of shelled corn with higher energy efficiency in terms of fuel and power. The performance of this drying bin has drying uniformity 0.56%, and fuel consumption rate, 1.79L/T-%, which are all met the national temporary standards.

Keywords: Steel cylindrical bin, Drying, Grain sorghum, Corn.

一、前言

近年來，政府積極推動穀物收穫後處理自動化，而推行自動化之先決條件為收穫後穀物處理之流程可以散裝作業化或機械化。平底圓筒倉配合掃倉機或穀斗底之圓筒倉 (Hopper Tanks) 有助於穀物流程之散裝作業。目前國內飼料業者對於進口雜糧的處理都已採用散裝作業，且鐵質圓筒倉國內也己能自製安裝，廣被採用。

鐵質圓筒倉目前在本省僅作貯存穀物用途，而國外多兼作乾燥用途。台灣區雜糧發展基金會在76年成立計畫探討其在國內多用途之可行性，77年探討圓筒倉利用太陽能兼作乾燥之效益，及78年多用途鐵質圓筒倉之改良及散裝作業示範，期能達成鐵質圓筒倉具有太陽能之收集，乾燥兼儲存之功能，並作收穫後雜糧儲運在本省農會之散裝作業之示範。

依據康(1985)，臺灣地處亞熱帶，年平均有太陽能達 1.87×10^{14} MJ，為73年臺灣地區總能源消耗的148倍。同時，中南部地區每年可用的太陽能日數超過300天。因此，對於本省主要農業區及乾燥倉儲設備集中地區的中南部而言，利用太陽能作為乾燥雜糧的輔助能源，確實具有十分良好的條件。

鐵質圓筒倉兼作乾燥用途雖屬可行，但其性能相當於箱式乾燥機，有上下層乾燥不均勻之缺點。為解決此一缺點，在77年參考美國方面所設計之倉內穀物自動循環機構，研製一組翻倉系統，期使穀粒在倉內自動循環，有均等受熱機會，乾燥得以均勻。可惜自行研製之掃倉循環系統性能不穩定，復於78年補助義竹鄉農會引進美國Shivver's公司Circulator I，另外將太陽能收集器改成鋼板太陽收集器以解決纖維玻璃板收集器可能老化及需經常更換的缺點。

本研究之目的旨在探討鐵質圓筒倉兼作乾燥之效益，除利用太陽能以減少燃油消耗外，亦期能有助於推動國產穀物之處理，邁向散裝作業，以減少

耗工的袋裝作業費用，增加農民收益。

二、文獻探討

圓筒倉的乾燥系統，目前在國外已有三種商業產品：第一種雙倉系統，一個圓筒倉為乾燥倉，當最下層穀物乾燥至預設含水率，則控制系統利用Tapered Sweep Auger將穀物集中至中心，經垂直螺旋運送機，再經傾斜螺旋運送機輸送至另一圓筒倉儲存，此乾燥倉可視為連續循環乾燥機。將前述系統之傾斜螺旋運送機省略，則變成批式循環乾燥倉，可視為如同國內常見之循環式乾燥機。第三種利用螺旋運送機在水平和垂直方向運送，相當於一般的循環乾燥機；即將乾燥至一定程度的最下層穀物利用螺旋運送機移至最上層，如此乾燥程序使穀物不斷移動，不但可免除乾燥時上下層水份不均勻的缺點，同時減少下層過份乾燥及穀粒破碎的情形並增加乾燥效率。但乾燥後之穀物由倉底出料經運送機運送到儲存倉，再進行下批乾燥作業。

Loewer et al. (1984)，曾比較增加攪拌器於乾燥倉之經濟性，歸納結果認為相當經濟於層層乾燥方式，不經濟於自然通風乾燥，和合乎經濟於低溫乾燥用大直徑乾燥倉和較高之玉米價格時。Marks et al. (1993) 以試驗證實雙倉乾燥系統之最佳濕穀深度為1.5m在乾燥倉直徑5.5m和用9.7kW軸流式風機時；最佳濕穀深度為0.8m在乾燥倉直徑9.1m；在同一風機時，最佳的濕穀深度時之對應風量為 $11.1\text{m}^3/\text{min/T}$ 。

鐵質圓筒倉在國內儲存之研究文獻，彭(1968)建議為了克服倉內穀溫之變化及含水率之升高，在倉壁上增加防熱材料及實施選擇性通風。湯等(1984)用含水率13%之水稻儲存於攪拌型乾燥倉配合通風儲存二年，其品質仍較傳統式倉庫為佳。蕭(1988)曾報導以直徑5.5公尺高6.1公尺（倉容100公噸）之鋼皮倉長期儲存玉米之溫度、發芽率、脂肪酸度、含水率、昆蟲數和微生物含量之變化情形。蕭(1986)比較鋼皮及水泥圓筒倉用於儲存進口玉米

之溫度含水率、發芽率、黴菌、昆蟲和脂肪酸度之變化情形。蕭等（1993）對鐵質圓筒倉儲存省產雜糧品質及經濟效益做過評估。

鐵質圓筒倉暴露於烈日之下，倉頂與倉壁均吸收太陽能，如加以收集可以用來預熱空氣做為乾燥穀物。Peterson and Hellickson (1976) 在美國 South Dakota 地區利用圓筒倉外壁吸收太陽能進行低溫乾燥試驗，其結果顯示，利用太陽能較傳統乾燥方式可節省26%之能源消耗。張與蕭（1987）配合圓筒倉頂結構以有皺褶之鋁薄管及透明塑膠布組成太陽能空氣加熱器，其結果顯示可使空氣溫度升高8.95℃（上午9時至下午3時之平均），其平均集熱量每年相當於3,800公升（北部地區）至5,900公升（高雄地區）柴油之熱量。陳與蕭（1990）以76年之月平均乾濕球溫度，日射量，大氣風速和日照小時推測此收集器裝置在台北、台中、台南和高雄地區每年可節省的柴油分別為2,249，2,980，2,747和2,650公升。

三、有關理論

(一)薄層乾燥

一般穀物的乾燥模式，常由薄層乾燥方程式推導而來。Brooker et al. (1974) 及Hall(1980)所謂薄層乾燥方程式乃根據牛頓冷卻定律發展而成之代表減率乾燥期間水分移動之方程式。

當物體與外界溫差很小時，在恆溫環境中之物體溫度變化與“物體和環境之溫差”成正比，此即牛頓冷卻定律，可以下式表之

$$\frac{dt}{d\theta} = -c(t - t_e) \quad \dots\dots\dots (1)$$

上式中， t 表示物體溫度； θ 為時間； t_e 表環境溫度； c 為加熱或冷卻常數。

根據牛頓冷卻定律，假設穀粒周圍充滿等溫之乾燥介質時，其含水率損失速度與“穀粒含水率及其平衡含水率之差值”成正比，即

$$\frac{dM}{d\theta} = -k(\bar{M} - M_e) \quad \dots\dots\dots (2)$$

其中 $\bar{M}$ 及 M_e 分別表示平均含水率及平衡含水率； k 為乾燥常數； M 為任一時間之含水率。

由(2)式積分得

$$\frac{\bar{M} - M_e}{M_0 - M_e} = Ae^{-kt} = MR \quad \dots\dots\dots (3)$$

(3)式即為薄層乾燥方程式，其中 M_0 為初始平均含水率， k 為乾燥常數， MR (moisture ratio)為水份比率， A 為常數， $A=e^*$ ； a 為指數常數。

根據Brooker et al. (1974) 和 Hall (1980)，在(3)式中之平衡含水率 M_e 係與穀物種類、空氣溫度及相對溼度而異。依據ASAE Standards (1990)所提供之Modified Henderson Equation，玉米之平衡含水率公式為

$$M_e = \{ 1n(1 - RH) / [-8.6541 \times 10^{-5}(T + 49.810)] \}^{1/1.8634} / 100 \quad \dots\dots\dots (4)$$

而高粱之平衡含水率公式為

$$M_e = \{ 1n(1 - RH) / [-0.8532 \times 10^{-5}(T + 113.725)] \}^{1/2.4757} / 100 \quad \dots\dots\dots (5)$$

在(4)及(5)式中， M_e 為小數型表示之乾基平衡含水率， T 為以攝氏溫標表示之乾燥介質空氣的溫度，而 RH 為以小數型表示之相對溼度。

(二)太陽能空氣加熱器

太陽能空氣加熱器是太陽能收集器的一種，其功能是以太陽能來加熱流經其中的空氣。對於一太陽能空氣加熱器而言，如已知器內空氣流量（ m ， kg/s ），進入器內及流出器外之空氣溫度 T_i (℃)與 T_o (℃)，則空氣因太陽能而增加的有用能 Q_u (W)。依據Duffie and Bechman(1980), Low Temperature and Solar Grain Drying Handbook(1980), Ozisik et al.(1980), 及 Parker et al. (1985) Q_u 可表為：

$$Q_u = mC_p(T_o - T_i) \quad \dots\dots\dots (6)$$

上式中 C_p 為空氣之比熱($J/kg^\circ C$)。

已知太陽能空氣加熱器的集熱面積 A_c (m^2)，某時間太陽能強度 I (W/m^2)，則該時間太陽投射於集熱面上的照射能(total incident energy)， Q_i (W)，為

$$Q_i = IA_c \quad \dots\dots\dots (7)$$

太陽能空氣加熱器之熱效率(thermal efficiency， n)為其有用能與照射能之比，即下式

$$n = \frac{Q_u}{Q_i} = \frac{mC_p(T_o - T_i)}{IA_c} \quad \dots\dots\dots (8)$$

四、試驗設備與試驗方法

一、試驗設備

1.試驗用鐵質圓筒倉

本研究用之試驗倉為一直徑5.49m，高5.18m之鐵質圓筒倉，倉頂改裝成太陽能空氣加熱器，並在倉內穀物入口加裝穀物分配器。國內試製之穀粒循環之掃倉機經多次測試後，性能不穩定，難符要求，因而引進美國Shivver's公司Circulator I，其掃倉循環設備示意圖如圖1。主要機構包括①掃倉機，②垂直螺旋運送機，③水平出倉一螺旋運送機，④馬達，⑤穀物分配器。圖2為試驗倉在安裝完成後，穀物之流程圖，說明如下：

(1)進料

穀物經卡車或人工以散裝方式倒入卸坑(1)，再以斗昇機(2)將穀物送至最高處的流向控制閥（進料狀態），經螺旋運送機(3)輸送，到達分配器(4)後將穀物撒入倉內。

(2)循環乾燥

- ①倉內循環：（一般狀況）
- 錐形螺旋掃倉機(6)將底層的穀物捲入，由直立螺旋運送機(5)送至高處，再將其撒至穀物頂層。
- ②倉外循環：（當穀物量大時，由於穀層壓力增大，使掃倉機構的扭力負荷增大，故輔以倉外循環，一則以減輕掃倉機構的負荷，二則可增加乾燥的效果）。

因出倉控制閥(15)的開啓，由錐形螺旋掃倉機(6)捲入的穀物，一部份進入螺旋運送機(7)帶出倉

外，再經斗昇機(2)、螺旋運送機(3)、分配器(4)，撒至穀物頂層。整個流程之控制，由控制室內開關做聯鎖控制，以避免穀物之堵塞。

試驗倉之火爐與風機，有關規格請參見表1。為能調整太陽能加熱後空氣與大氣空氣之比例，故在風機頂部進風口區分成三個區域，中為太陽能預熱空氣入口，左右兩側分別為大氣入口，以可滑動鐵板控制其開口大小；倉頂太陽能空氣加熱器之構成係在倉頂上面塗上黑漆，再以2mm厚之纖維玻璃覆蓋其上形成一平板式的太陽能集熱器（圖2），78年改成漆黑鋼板太陽能收集器；進風口共有四個（400×600，其位置如圖3），為求其開口大小可調整。

2.試驗用儀器

- (1)溫度記錄儀——Electronic Controls Design Co., Model 3032T，連接熱偶線作定點之溫度記錄。
- (2)太陽能輻射儀—Eppley Black and White Pyranometer, Model 8—48。
- (3)長時記錄儀—Watanabe SR 6312 Servocorder。
- (4)水份測定器—Digital Moisture Computer 700, Burrows Equipment Co.。
- (5)微差壓計—Digital Micro Manometer, Okano Works Ltd.

(二)試驗方法

試驗用高粱和玉米由義竹鄉農會提供，運來高

表1 火爐與風機之規格

型 式		三 久 M D B - 3 0 型（ 直 接 燃 燒 ）
送 風 機	型 式	二段式中壓型送風機（直徑770mm）2台。
	回 轉 數	135rpm。
	風 量	靜壓水柱40mm時，600CMM。 靜壓水柱15mm時，700CMM。
燃 燒 器	需 要 動 力	3.7KW馬達2台，（10馬力）。
	型 式	全自動切斷式高壓槍型，噴嘴2頭式。
	著 火 方 式	點火電壓10,000V。
	需 要 動 力	三相220V，1/3HP馬達。
安 全 裝 置	安 全 裝 置	電磁閥，電眼（CDS），燃燒控制器，壓力計。
	燃 料 消 耗 量	煤油最多30L/h。
	溫 度 異 常	溫度異常感溫器OFF 180℃。
安 全 裝 置	風 壓 開 關	靈敏度很高之微動開關。
	溫 度 控 制	恆溫器可變化於0℃～100℃。
	定 時 器	0～24小時。
	警 報 蜂 鳴 器	故障時，控制箱會燈號顯示，並且蜂鳴器會響。
馬 達 過 載 保 護 器	馬 達 過 載 保 護 器	馬達超載或故障時會自動跳脫。

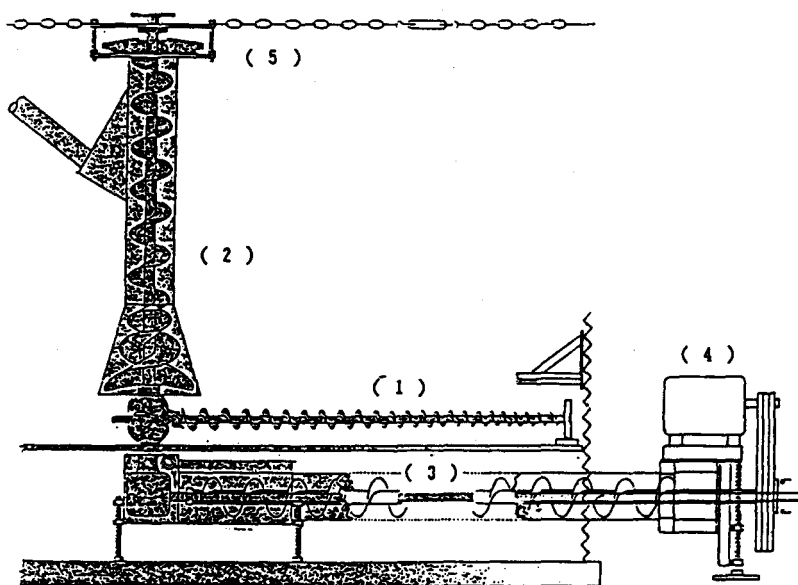


圖1 SHIVVER'S 掃倉循環螺旋系統示意圖

梁和玉米由運送機構送入試驗倉內。

高粱或玉米進入倉內後隨即進行乾燥試驗，試驗過程中所量測的項目有各處空氣溫度、空氣流量、日射量、穀物含水率變化、耗油率及耗電率，茲分述如下：

1. 空氣溫度之測定

溫度測量點共50處，如表2所示，除大氣乾溼球溫度（編號34與35號）掛在控制室之屋簷下，其餘相關位置如圖4。測量穀層空氣溫度有33點（如圖4），分成三組，各有11個溫度測量點；其分佈

為自有孔地板開始往上至一米高處，每10cm一點，除地板及地板上10cm處之兩組測量點為避開掃倉機而直接由倉壁外側打孔伸入安裝之外，其餘9個測量點如圖5所示；將熱偶線細紮成束，由倉頂伸入，穿過掛扣，使其自然懸垂於倉內。所有熱偶線皆匯集至溫度記錄儀上，每小時自動記錄一次。

2. 空氣流量之測定

風機通往圓筒倉的矩形管為空氣流量測定處。讀出矩形管內等距離不同位置之空氣流速平均，再乘以矩形管的截面積，即得流入倉內的空氣流量。

3. 日射量之測定

直接以太陽能輻射儀及長時記錄儀於試驗進行期間連續記錄。

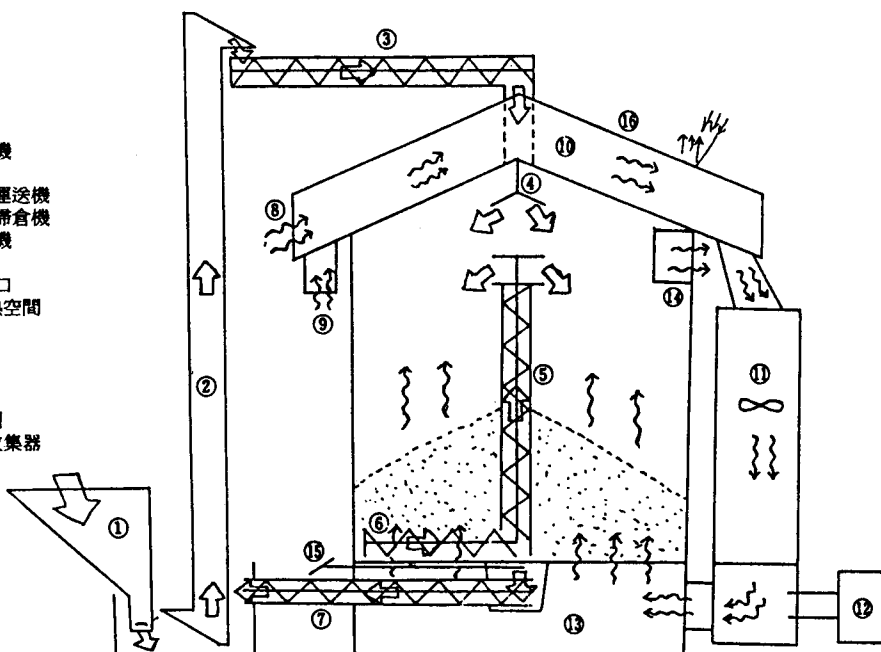
4. 高粱或玉米水份變化之測定

由於圓筒倉面積大，故在取樣時依圖5 所標示之位置取12組樣本；每組樣本以水份測定儀測量三次，取平均值為該組樣本之含水率，而12組樣本之平均值則為倉內穀物當時之含水率。取樣時間視實際狀況而定。

表2 熱偶線編號及測量項目

編號	測量項目
1 ~ 33	穀層間空間溫度
34 ~ 35	大氣乾濕球溫度
36 ~ 41	排氣口空氣乾濕球溫度
42 ~ 44	空氣離開風機／火爐時溫度
45 ~ 48	空氣進入太陽能集熱器時溫度
49 ~ 50	空氣離開太陽能集熱器時溫度

- (1)卸坑
- (2)斗昇機
- (3)螺旋運送機
- (4)分配器
- (5)直立螺旋運送機
- (6)錐形螺旋掃倉機
- (7)螺旋運送機
- (8)主進風口
- (9)輔助進風口
- (10)空氣加熱空間
- (11)鼓風機
- (12)火爐
- (13)倉底
- (14)出風口
- (15)控制閥門
- (16)太陽能收集器



進料：(1)→(2)→(3)→(4)→進入倉內

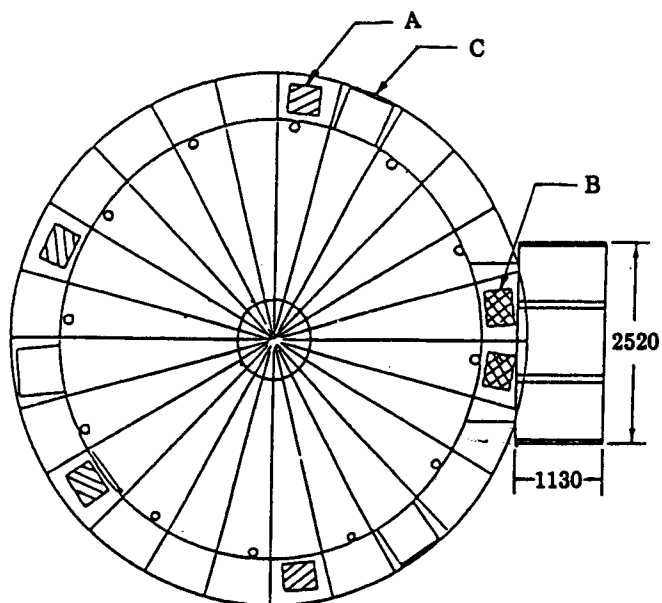
循環乾燥：(A)倉內：底層穀物→(6)→(5)→穀物頂層

(B)經分配器：

底層穀物→(6)→(15)→(7)→(2)→(3)→(4)→穀物頂層

**是否有(B)之循環，由(15)控制閥門控制

圖2 試驗倉在安裝SHIVVER'S 掃倉循環螺旋系統後之穀物流程圖



A：進氣口 (400×600)

B：出氣口

C：排氣口 (500×600)

圖3 試驗倉頂進氣口與出氣口之位置

5.耗油率及耗電率之測定

於取樣同時，讀取電錶讀數及油面高度，後者乘以油筒截面積即為筒中油量，將所得電錶讀數及油量與前次讀數相減，再除以時間，即為耗電率及耗油率。

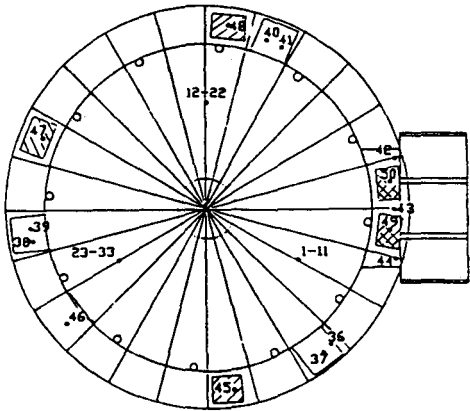


圖4 溫度測定點位置

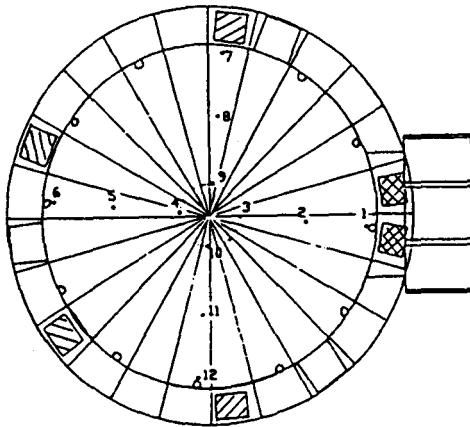


圖5 穀物含水率測定取樣位置

五、結果與討論

(一)高粱乾燥試驗

自77年6月22日起連續二星期，進行了五次高粱乾燥試驗，復於9月15日再進行一次，六次乾燥試驗結果如表3所示。第一～五次試驗之相關乾燥曲線請參見蕭與張(1991)。含水率與乾燥時間仍呈自然對

數之關係，與傳統的乾燥曲線符合。

由於平底乾燥倉及運送機餘料的問題，表3中提到之乾燥後重量並非實際量得，而是根據含水率變化估算得知，估算方程式如下〔蕭與張(1991)〕：

$$M_t = M_i (1 - \bar{M}_i) / (1 - \bar{M}_t) \dots\dots\dots (9)$$

其中M穀物重； $\bar{M}$ 為以小數型式表示之平均溼基含水率，而下標i與t分別表初始及最終狀況。

其次，由於圓筒倉在乾燥時有掃倉機掃不到靠近倉壁之死角邊區域，該區高粱含水率較其他乾燥區稍高，因此，在其他部份已乾燥完成的情形下，死角部份依然無法達到預期的含水率。因此，在第二、三、四次試驗時，乃將前次未乾燥完成的死角部份以人工撥至倉中間再送入下次待乾燥高粱。根據估算，死角地區約有0.73m³的高粱，即約560kg；因此，表3的乾燥前重量一欄中，第二、三、四次試驗均加入額外的560kg；第五次試驗完全以太陽能乾燥為避免死角處高粱堆置過久而發霉，因此，先將死角處之高粱撥至倉中間予以乾燥出倉，再入倉待乾燥高粱。另一解決的方法是設計多孔狀之支柱，以解決倉壁的通風死角。

第一次與第二次試驗，倉內待乾的溼高粱重量相等，所不同的是第一次設定熱風溫度80℃；第二次設定60℃。此外，掃倉機控制情況亦有不同：

1.第一次在前4小時乾燥過程中，每隔1小時掃倉循環運轉1小時，接著掃倉機停機半小時，高深掃倉循環運轉1.5小時，再停機1小時之後，持續掃倉循環運轉至乾燥結束。

2.第二次則持續掃倉循環運轉

理論上，乾燥初期減乾率應大於乾燥後期減乾率，各時間區段之乾減率說明如下：

- (1)掃倉機先停機1小時，接著運轉1小時，乾減率每小時為0.55%。
- (2)掃倉機先停機1小時，接著運轉1小時，停半小時，再運轉1.5小時，乾減率每小時為0.70%。
- (3)掃倉機先停機1小時之後，連續循環運轉3小時，乾減率為2.18%。
- (4)掃倉機持續運轉2.5小時，乾減率為1.80%。

由上可知，掃倉機是否連續運轉嚴重影響乾燥速率；掃倉機運轉時間越長，乾減率越高，因為掃

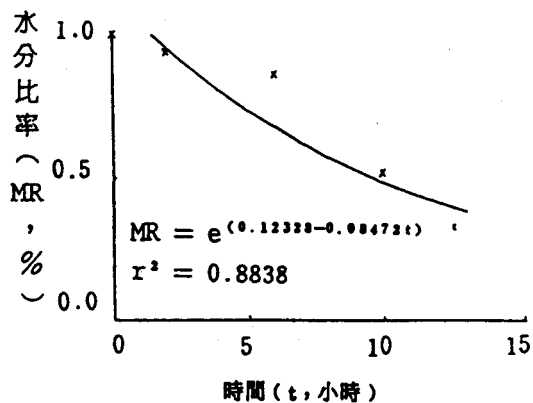


圖6 第一次試驗水分比率與時間之關係
(熱風設定溫度80°C)

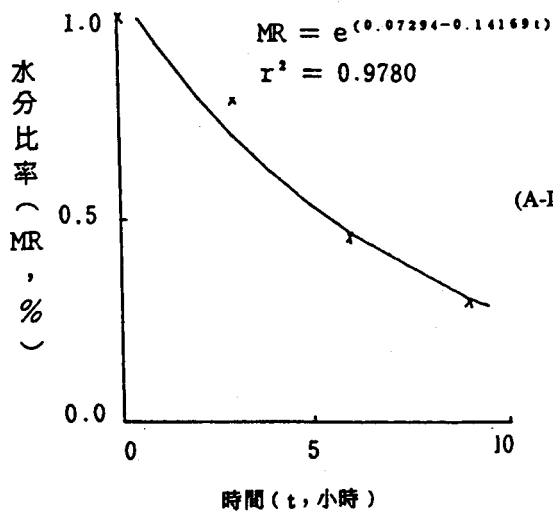


圖7 第二次試驗水分比率與時間之關係
(熱風設定溫度60°C)

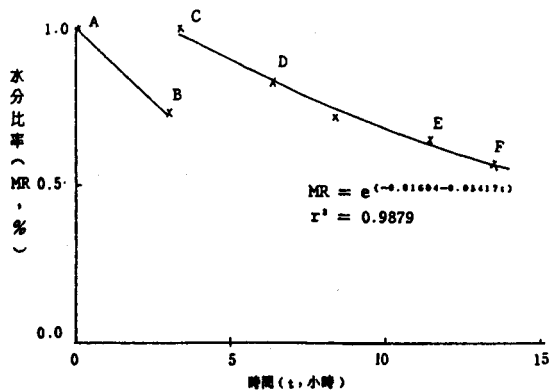


圖8 第三次試驗水分比率與時間之關係
(A-D熱風溫度37-35°C；D-F熱風溫度60°C)

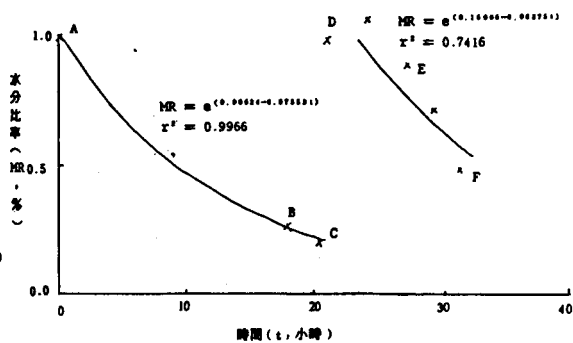


圖9 第四次試驗水分比率與時間之關係
(A-D熱風溫度28-38°C；D-F熱風溫度37°C；E-F熱風溫度80°C)

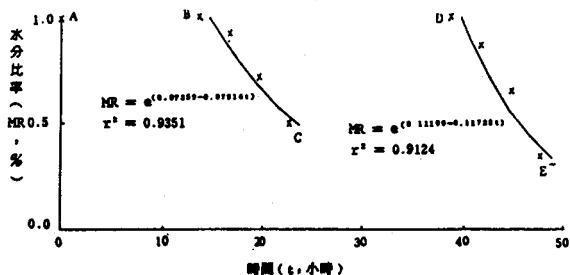


圖10 第五次試驗水分比率與時間之關係
(熱風溫度36°C)

倉循環運作增加混合和流動顆粒與熱風增加對流熱交換之效率之結果。由第一次與第二次試驗設定溫度相差20℃，但溫度梯度的影響減乾率反而沒有掃倉機的影響大。

第三次試驗採用了兩階段進料的乾燥方法——先入倉4,535公斤，予以乾燥，隔3小時後，再送入1,325公斤混合乾燥，此外，乾燥過程中，晝間僅用太陽能，下午五時後才啓用火爐設定60℃，各時間區段說明如下：

- (1)以太陽能乾燥4,535公斤高粱（熱風溫度37℃），掃倉機先停1.5小時，運轉1.5小時，得乾減率0.80%。
- (2)加入1,325公斤溼高粱，用太陽能乾燥，熱風溫度約35℃，掃倉機停機1.5小時，運轉1.5小時，得乾減率0.73%。
- (3)以60℃熱風乾燥5,860公斤，掃倉機停1小時，運轉1小時，停1小時，運轉1小時之後再停1小時，得乾減率0.60%。
- (4)持續以60℃熱風乾燥，掃倉機持續運轉2小時，得乾減率0.7%。

依據上述，過程(1)-(3)乾減率持續降低，但(4)乾減率卻較(5)增加，足見掃倉機的運轉確實有助於乾減率的提升。

第四次試驗與第三次試驗過程大致相同，唯一不同在於熱風溫度提高至80℃，第二次進料在第一次進料21小時之後，各時間區段分別說明如下：

- (1)倉內有2,780公斤含水率21.9%濕高粱，由六月廿八日下午2點43分通風並持續掃倉循環至六月廿九日上午8點43分（熱風溫度介於28到37℃），含水率降至14.2%，得乾減率0.43%。
- (2)以太陽能提供35~38℃之熱風繼續乾燥，掃倉機停1小時，運轉1.45小時，得乾減率0.57%。
- (3)再加入3,150公斤，以太陽能乾燥，熱風溫度37℃，掃倉機運轉1小時，停1小時；運轉1小時，停1小時；運轉1小時之後再停1小時，得乾減率0.52%。
- (4)以80℃熱風乾燥5,930公斤，掃倉機持續運轉4小時，得乾減率0.85%。

第五次試驗則完全用太陽能，晚上只掃倉循環

但不通風。可見只掃倉循環不通風僅具有混合均化之功能，乾燥效果甚小。

根據第(3)式，茲將第五次試驗之MR與時間t之關係迴歸作圖，如圖6~10，由各迴歸曲線所得常數：

1.a值介於-0.01604與0.16066之間，即A（ $A = e^a$ ）值介於0.984與1.174之間。

2.k值介於0.05417與0.1469之間。

由於國內尚缺乏有關乾燥倉乾梁高粱的研究報告，上述數字無法做進一步的比較。

試驗中所測得之風量約為273CMM。試驗所消耗之能源包含電力（包含風機及掃倉循環系統）與燃油，其結果如下：

1.風機耗電率 $8.9 \pm 0.35 \text{ kWh/h}$ 。

2.掃倉系統耗電率 $2.6 \pm 1.14 \text{ kWh/h}$ 。

3.設定80℃熱風之耗油率為 $12.4 \pm 1.63 \text{ l/h}$ 。

4.設定60℃熱風之耗油率為 $11.3 \pm 3.26 \text{ l/h}$ 。

由表3中第一次與第二次試驗有關油、電消耗之比較得知，掃倉循環系統之運轉可以增加乾減率，同時有助於油、電消耗率之降低。分批進料增大耗油率。

此外，在試驗過程中，曾測量密度與溼基含水率（MC,W.B.%），得以下迴歸式：

密度(kg/m^3)= $812.67 - 2.58(\text{MC W.B.}\%)$, $r^2 = 0.5773$ (10)
上式相關係數(r)低之原因可能由於：

1.夾雜物含量之影響。

2.取樣偏差。

3.壓實程度之差異。

第六次試驗目的為在佐證先前所作試驗，由於靠近高粱收穫之末期大量高粱已不易取得，只入倉4,180公斤。初始含水率為18.6%，乾燥熱風溫度維持在 $54^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ 。掃倉機連續運轉，經6.5小時，含水率降至11.7%。因為此次試驗熱風溫度及掃倉機連續運轉，與第二次試驗情況相近，故可互相比較。茲選取重要項目比較如下（表3）：

1.平均乾減率(%/h)

第二次為1.52，而第六次為1.5，兩者很接近。

2.單位時間耗油量(L/h)

第二次為9.6，而第六次為10.2，兩者很接近。

3.單位時間耗電量(kWh/h)

第二次為10.7，而第六次為11.0，兩者很接近。

近。

4.耗油率(L/T-%)

第二次為0.79，而第六次為1.46，因穀層太薄第六次耗油率幾為第二次之2倍。

5.耗電率(kWh/T-%)

第二次為0.89，而第六次為1.57，因穀層太薄第六次耗電率亦幾為第二次之2倍。

以上2、3項結果相似，是因為兩者使用之熱風溫度相似，足證此乾燥倉的功能相當穩定。以上4、5兩項則明白顯示，乾燥較少量的高粱在能源利用上較不經濟。根據國外資料為達省能源堆積高度可達約5公尺，本試驗為了倉門可打開進倉取樣只做到倉門的高度，而使用之風機配有國內現有的機種並非最佳的設計，其設計根據Marks et al. (1993) 應為 $11.1\text{ m}^3 / \text{min} / \text{T}$ 。

(c)太陽能的利用

為了解利用倉頂太陽能所產生的效果，由表3選取第一次試驗與第五次試驗（完全利用太陽能），兩相比較可知。因為這二次試驗所使用之高粱數量相近，且機械之運作，天候情況亦相似，有利比較。這二次試驗結果比較如下：

1.第五次試驗其乾燥均勻度較佳，但乾減率小。

2.第一次試驗乾減率大。

3.第一次試驗耗油率為 $1.08\text{ L/T-\%}$ ，加上耗電率 $0.95\text{ kWh/T-\%}$ ，而第五次試驗耗油率為0，耗電率為 $5.21\text{ kWh/T-\%}$ 。如以油價 10.5 元/L 及電價 1.51 元/kWh 計算，則第一次試驗乾燥成本為 $12.77\text{ 元/T-\%}$ ，而第五次試驗為 $7.87\text{ 元/T-\%}$ ，則顯然第五次試驗（完全利用太陽能）較第一次試驗節省乾燥成本38%。

為避免高含水率的高粱在倉內因低乾燥率可能引起品質變壞，可用高溫乾燥（即燃油與太陽能並用），及含水率降至18%左右改以完全利用太陽能乾燥以減少燃油消耗，降低乾燥成本，乾燥且更均勻，品質更可提高。又由試驗記錄顯示，經太陽能加熱之空氣溫度不超過 40°C ，十分適於作種子用途的穀物乾燥。此溫度也非常適用良質米的乾燥。

第五次試驗所記錄得之太陽能量及有關溫度如圖11所示，由圖11之數據及當日量得之空氣流量，利用式(8)，可得倉頂太陽能空氣加熱器的熱效率約56%。

倉頂太陽能空氣加熱器之熱效率如用50%，又依據張等(1985)之研究報告，推估在嘉義地區倉頂年累積有用能量約為 $24.73 \times 10^8\text{ kcal}$ ，轉換成柴油並考慮一般燃燒爐的效率約為50%，油價以每公升10.5元計算，則倉頂太陽能空氣加熱器，每年所收集的熱能相當於6萬1千元。本計畫倉頂改裝成太陽能空氣加熱器約需8萬元，壽命約10年；因此，倉頂為利用太陽能而作的改裝費用可望在二年內回收，當然，得視乾燥作業頻率的多少有所變動。同時，推廣利用太陽能不能僅從節省乾燥成本方面來考慮，更應注意的是節省燃油消耗，減少了空氣污染。

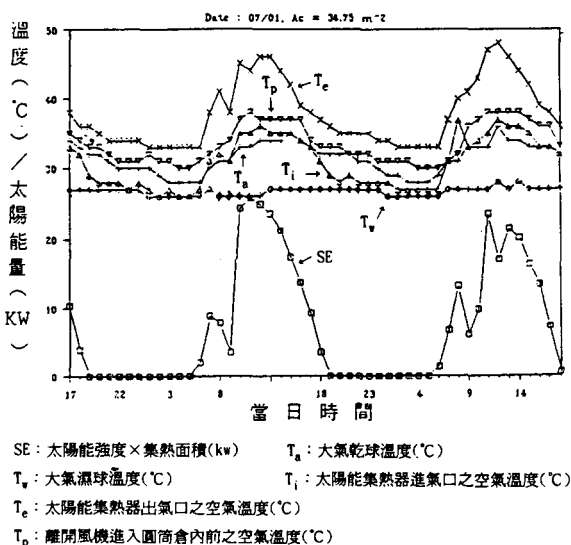


圖11 太陽能與空氣溫度之變化

(c)玉米乾燥試驗

七十九年針對省產玉米做了五次乾燥試驗，其結果如表4，各項結果之說明與討論敘述如下：

1.乾燥前含水率：

一般農民其田間收穫之玉米含水率甚高，無法用脫粒機將玉米脫粒，故須用日曬法乾至含水率約為30%以下始送到義竹農會用動力脫粒機將之脫粒，再用推車將脫粒後玉米送入本乾燥機之卸料坑。亦有農民於自家將已脫粒好之玉米裝袋用卡車送來，此時可省去代為脫粒之手續，直接將玉米洩入卸料坑。本試驗實施時即是卸料坑卸料時，間隔時段取樣，分別量測其含水率，由其平均值做為該次樣本之初值含水率。由於玉米來自不同農家及地區，且受天候以及採收時間先後之影響，故其初值

表3 高粱乾燥試驗記錄

試驗次數	1	2	3	4	5	6
試驗日期	77.6.22-6.23	77.6.24	77.6.27-6.28	77.6.29	77.7.1-7.3	77.9.15
試驗地點	義竹鄉農會倉庫	義竹鄉農會倉庫	義竹鄉農會倉庫	義竹鄉農會倉庫	義竹鄉農會倉庫	義竹鄉農會倉庫
乾燥前重量(kg)	7540	(7380+560)a*	(3975+560)b*	(2220+560)b*	6810	4180
			+	+		
			1325	3150		
乾燥後重量(kg)c*	6089	6715	5301	5371	6341	3863
乾燥前含水率(%)	28.2	24.9	20.3	14.2 21.9	18.7	18.4
乾燥後含水率(%)	11.1	11.2	11.9	9.8	12.7	11.7
乾燥時間(h)	12.5	9.0	14.0	12.8	34.0	6.5
平均減乾率(%/h)	1.37	1.52	0.70	0.66	0.18	1.5
熱風溫度(°C)	(79.4±5.4)h*	(57.9±6.0)i*	(30.6±1.6)j*	(36.6±1.6)k*	(36.1±1.7)l*	54.2±3.6
			(50.5±15.0)	(49.1±20.7)	(36.4±1.8)	
			63.2±7.0	80.5±2.4	36.6±1.8	
乾燥均勻度(%)	11.1±0.83	11.2±0.65	11.9±0.59	9.8±0.62	12.7±0.16	11.7±0.43
耗油量(L)	139.65	86.50	48.89	56.66	0	66.35
耗油率(L/T%)	1.08	0.79	(1.90)d*	(1.49)d*	0	1.46
耗電量(kWh)	123.0	96.3	128.2	126.0	(213.0)e*	71.6
耗電率(kWh/T%)	0.95	0.89	2.60	2.50	5.21	1.57
大氣狀況	晴時多雲	陰雨	晴時多雲	晴時多雲	晴時多雲	晴偶有雲
備註	掃倉機間歇運轉	掃倉機持續運轉	掃倉機間歇運轉 f*	掃倉機間歇運轉 f*	掃倉機定時運轉 g*	掃倉機連續運轉

*註：

本報告所列含水率均為濕基。

- 前次乾燥死角留下之量（估計值）。
- 穀物分兩次入料，括弧內為第一次，加號後為第二次。
- 估計值〔方程式(9)〕。
- 晝間用太陽能，夜晚用火爐，故耗油量少，但耗油率高。
- 夜間仍定時掃倉，但不通風。
- 掃倉機運轉時間請參看本文說明。
- 掃倉時間由定時器控制—運轉45鐘，斗昇機持續動作30秒，停機45分鐘。
- 熱風溫度設定為80°C。
- 熱風溫度設定為60°C。
- 上方為晝間的熱風溫度，下方為夜晚的熱風溫度（火爐熱風溫度設定為60°C），括弧內為全部乾燥過程中之熱風平均溫度。
- 上方為晝間的熱風溫度，下方為夜晚的熱風溫度（火爐熱風溫度設定為80°C），括弧內為全部乾燥過程中之熱風平均溫度。
- 上方為7月2日08:00至17:00之平均熱風溫度，下方為7月3日08:00至17:00之平均熱風溫度，括弧內為7月2日及3日兩天08:00至17:00共18小時之熱風平均溫度。

表4 玉米乾燥試驗記錄

試驗次數	1	2	3	4	5
試驗日期	79.2.21-79.2.22	79.2.28-79.3.1	79.3.7-79.3.8	79.3.14-79.3.16	79.3.25-79.3.27
試驗地點	義竹鄉農會倉庫	義竹鄉農會倉庫	義竹鄉農會倉庫	義竹鄉農會倉庫	義竹鄉農會倉庫
總重(kg)	12,171	6,092	15,000	18,345	18,800
乾燥前含水率(%)	27.6	20.9	25.6	23.9	29.4
乾燥前含水率(%)	12.2	12.0	12.2	12.8	12.6
乾減含水率(%)	15.4	8.9	13.4	11.1	16.8
乾燥時間(h)	26.1	16.0	29.0	30.5	36.0
平均乾減率(%/h)	0.59	0.56	0.46	0.37	0.47
大氣溫度(°C)	21.3	17.5	16.4	20.3	20.5
熱風溫度(°C)	47.1±8.9	36.5±6.5	42.2±10	42.5±9.5	45.3±9
乾燥均勻度(%)	12.2±0.8	12.0±0.4	12.2±0.5	12.8±0.1	12.6±1.0
耗油量(L)	268.0	178.5	212.9	368.5	439.9
耗油率(L/T-%)	1.45	3.29	1.06	1.80	1.39
耗電量(kWh)	303	154	331	378	427
耗電率(kWh/T-%)	1.64	2.84	1.64	1.86	1.35
大氣狀況	多雲時晴	陰偶小雨	多雲時晴	多雲時晴	晴時多雲

含水率差異較大，而用以做為本試驗用玉米之初值含水率大抵在20%~30%之間。

2. 乾燥後含水率：

根據Brooker等(1974)之研究，玉米保存一年之安全含水率應在13%左右，超過13%以上則品質將有問題，若太低則會有胴裂及重量損耗等問題，故本試驗在乾燥末期務使其含水以不超過13%且又不低於12%，如此則不僅乾燥品質有保障且也最合經濟效益。乾燥後之玉米可以出倉裝袋亦可直接留於乾燥倉內儲存。

3. 乾燥時間：

每次乾燥玉米所需時間，其間差異甚大，由16小時到36小時不等，所需乾燥時間之長短主要取決於(1)濕玉米之多寡(2)初含水率之大小(3)熱風之溫度等。根據試驗數據計算相關係數(r)(蕭與張，1991)，玉米重與乾燥時間等於0.965，乾燥含水率與乾燥時間等於0.754。所以乾燥時間之長短，玉米量之多寡，影響最大。

4. 平均乾減率：

在五次試驗中，其乾減率從0.37%/h到0.59%/h之間。而各次平均值為0.49%/h，由表4可知，玉米量的多寡為主要影響平均乾減率的因素，當玉米量越多時其平均乾減率就較低（相關係數 $r=-0.758$ ）。

此種現象主要是因為燃油爐所能提供的熱量大致不變，故在單位時間內所能烘乾水份量有一定限制，故當玉米量較多時，單位時間所烘乾的水份對穀物總量之比值較小，由是其平均乾減率亦愈低。另外乾減含水率降的多寡也是一個重要因素。因為在此含水率階段玉米乾燥過程大都屬於減率乾燥期，故乾燥速率因含水率之減小而有減慢的現象。於是當穀物之含水率愈低，其乾燥速率亦愈慢。含水率與乾燥時間關係圖可參看蕭和張（1991）。其五次的平均乾減率為0.49%/h比國家暫定標準0.6%/h之規定較低。若在相同的條件下，減少穀層的厚度，即可提高乾減率。

5. 熱風溫度：

用以乾燥玉米的熱空氣是由兩種方式加熱。晝間由於太陽光照在太陽能集熱器之金屬板上，再由此板將熱量傳導給流經此金屬板下層之空氣。被加熱之空氣便可以由穀倉底層送入倉內用以乾燥玉米，若此時之空氣溫度太低，可啟動燃燒爐來加熱已經由太陽能預熱過之空氣，使此空氣升溫至適合於乾燥之溫度。五次試驗當中，熱風溫度大抵介於30°C~50°C之間。由於燃油之噴射方式是以定量送出方式，故在風溫之控制上較困難，太陽提供較多之能量時間則熱風溫度較高，反之則低，故在夜

間、或陰天時，送入倉內熱風溫度就會稍微降低。當然相對的若在5~9月份間太陽較直射時，由於預熱效果佳，因而可以節省相當量之燃油消耗。在第二次試驗其熱風溫度即是受天氣陰雨之影響，較冷之空氣無法提昇到更高的溫度，所以該次試驗之熱風溫度為各次中最低者，相對的第五次試驗時，天候狀況最好所以熱風溫度較高。第一次試驗時天氣雖不是最好，但氣溫高，所以熱風溫度也高。

6. 乾燥均勻度：

在乾燥末期，當含水率降到13%以下時便停機，再從倉內各取樣點取樣，並測其含水率，由不同取樣點所得樣品含水率亦各不相同，其均勻度介於0.1~1%之間平均為0.56%。由國外引進之專利循環掃倉機具有特殊錐型螺旋掃倉臂和倉頂穀物分配盤，改善掃倉死角問題，使本試驗之乾燥均勻度，有相當良好的成果。改善死角之方法即在倉底加45°的斜角，使穀物可以自然滑落到掃倉機的外端，不僅消除了乾燥死角與靠人力攪料的問題。在整個試驗過程中，其下層含水率較低之穀層幾乎成層狀的被攪動並搬到穀層頂部。如此循環方式自然對均勻度甚有助益。

7. 耗油量及耗油率：

玉米乾燥耗油量與玉米重量高的相關關係（相關係數 $r=0.838$ ），玉米量愈多，初值含水率高，外界氣溫或經太陽能集熱板加熱後之空氣溫度較低，以及較小之乾燥率等，皆會使耗油量較大。

至於耗油率方面，在五次試驗當中除第二次外大抵在1.06~1.8 L/T-%之間。第二次的耗油率特別高為3.29 L/T-%，此乃由於第二次的玉米總量甚低，只有6公噸多，而其它每次試驗的玉米總量都在12~18公噸之間。燃燒爐的供油方式是定量噴出，所以太少的玉米層使熱風未有足夠時間與玉米做熱交換前就溢出穀層而導致了較高的耗油率。

8. 耗電量及耗電率：

本試驗無論進出倉、穀物之循環、及乾燥設備上之送風機等，皆以電動機為動力源。故耗電量之多寡隨所需乾燥時間而定，其相關係數 $r=0.994$ 。除第二次試驗以外，其它四次試驗之耗電率皆在1.35~1.86kWh/T-%之間。同前所述，在第二次試驗時，由於玉米量太少，因而導致了耗電率較高。若以最佳化的設計11.1m³/min/ T (Marks et al., 1993)，

其結果是否與國家標準1.0kWh / T-%相符合，尚待進一步評估。

六、結 論

1.以國內自製之掃倉循環系統，圓筒倉利用太陽能兼做乾燥之試驗以省產高粱含水率 18.4 % 至 2 8.2 %，密度介於740 kg/m³和765 kg/m³，平均高粱乾燥厚度介於23公分到45公分，熱風溫度介於36℃到80℃之間，風量約273 CMM，其乾減率、乾燥均勻度、耗油率、耗電率如表5：

(1)高粱乾燥試驗結果

表5 高粱乾燥試驗結果表

	太陽能(36℃)	58℃	79℃
減乾率(%/h)	0.18	1.52	1.37
均勻度(%)	±0.16	±0.65	±0.83
耗油率(1/T-%)	0	0.79	1.08
耗電率(kWh/T-%)	5.21	0.89	0.95

(2)在79℃之乾燥溫度，其乾減率、均勻度、耗油率和耗電率均劣於58℃之乾燥溫度，主要原因為掃倉循環作業不連續的原因。

(3)以58℃之乾燥溫度為例，其乾減率為目前國內循環式乾燥機之兩倍。

(4)太陽能乾燥(36℃)，非常合適做種子用途之乾燥，太陽能收集器之效率約為56%。

(5)分批進料乾燥增大耗油率。

(6)乾燥高粱層厚度減少，增加耗油率和耗電率。

(7)圓筒倉頂收集之太陽能，可做輔助能源，減少燃油使用，並減少環境之污染。

(8)以薄層乾燥理論，水分比(MR)= $e^{a-k t}$ ，五次乾燥試驗之高粱乾燥常數 a 值介-0.01604與0.16066之間， k 值介於0.05417與0.14169之間，其差異可能由於不同的高粱含水率、熱風溫度、乾燥層厚度、風量，和掃倉循環作業等綜合影響。

(9)圓筒倉容量大，乾燥後的穀物亦可就地儲存，且鍍鋅鋼板不畏日曬雨淋，而一般國內乾燥機必須放置於室內或另建遮蔽場所，所費不貲。經初步試驗省產之圓筒倉可設計成

乾燥倉，達成乾燥兼貯藏的功能。惟系統尚待改進之處仍多，應盡快設法研究解決，俾能早日推廣使用。

2.引進國外循環掃倉機及重新設計太陽能收集器，並以玉米為乾燥材料，其結果分述如下：

(1)循環掃倉機

此次引進之新型循環掃倉機，效果良好，只是在控制上皆連續操作，因此增加電力負荷，故若能改用自動門間歇式循環掃倉，定有助於電力之節省。

(2)燃燒爐及送風裝置

目前所使用之燃燒爐及送風裝置，是用三久公司原為蘭草乾燥所專用之加熱送風系統，但本試驗乾燥倉體積較大，而燃燒爐所能提供之容量稍嫌不足，在各次試驗中均無法將風溫調節到55°C以上。在送風裝置上，是使用兩具五馬力之軸流鼓風機將熱風吹入倉底。從風量之量測知道倉內存有19公噸左右玉米時，其出風量為198CMM，而在空倉時風量為382CMM，相差將近1倍，由於此二部風機為同步起動或停止，故在風量之調節上不盡理想，雖可由進風口處可控制其中之大小，但並不理想，並且在小風量時鼓風機仍在轉動，所以在電力的消耗上並不經濟，若能控制鼓風機以多段轉速來提供適當之風量有助於電力之節省。

(3)太陽能收集器

將太陽能收集器由原先之纖維玻璃覆蓋改裝成表面塗以黑色平光漆之鋼板，可以免除以纖維玻璃易於老化，造價貴之缺點。

(4)與國家暫定標準之比較

由表6可看出五次乾燥之平均結果與國家暫定標準相對照，其中乾燥均勻度與耗油率皆在標準以內，而平均乾減率之試驗結果為0.49%/h較之國家暫定標準0.6%/h較低，但可用調節穀層高度來補救。未來值得以Marks et al.(1993)建議最佳風量11.1 m³/min/T重新評估其乾燥性能是否可達國家標準。

七、誌 謝

台灣區雜糧發展基金會長期提撥經費支援及義竹鄉農會提供場地、試驗用的高梁及玉米及人力的支援，使本研究得以順利完成，在此敬表謝忱。

表6 玉米乾燥試驗結果與國家暫定標準之比較

項 目	五次試驗平均	國家暫定標準
平均乾減率(%/h)	0.49	0.6
乾燥均勻度(%)	±0.56	±1.0
耗油率(L/T-%)	1.79	2.0
耗電率(kWh/T-%)	1.87	1.0

八、參考文獻

- 1.彭錦樵。1968。鐵皮圓筒倉通風倉貯藏稻穀適用性之初步研究，台大農工所碩士論文。
- 2.湯松義、甘俊二、曹以松、田村恒俊、瀨尾康久、細川明。1984。鋼板圓筒倉儲藏稻穀可行性之研究，農業工程學報30(4):30-61。
- 3.康國裕。1985。談太陽能熱水系統之推廣與獎勵，中華民國太陽能學會第五屆年會暨學術研討會論文集，中華民國太陽能學會。
- 4.張鏡湖、鄭師中、劉明揚。1985。台灣地區太陽能輻射資料分析之研究，中華民國太陽能學會第五屆年會暨學術研討會論文集，中華民國太陽能學會。
- 5.張漢聖、蕭介宗。1987。鋼皮圓筒倉頂太陽能收集裝置之設計研究，農業工程學報33(2):40-44。
- 6.蕭介宗。1986。鋼皮及水泥圓筒倉用於儲存進口玉米之研究，農業工程學報32(1):8-35。
- 7.蕭介宗。1988。探討鋼皮圓筒倉在本省儲存玉米之可行性，第11章穀物的儲存與處理，S-39食品工業發展研究所。
- 8.陳輝光、蕭介宗。1990。鋼皮圓筒倉及多用途之研究(I)——圓筒倉頂鋁管太陽能收集器之性能分析。農業工程學報36(4):61-79。
- 9.蕭介宗、張漢聖。1991。多用途鐵質圓筒倉散裝作業研究倉儲叢書第27輯，台灣區雜糧發展基本會編印。
- 10.蕭介宗、盧福明、陳維微、彭武康、莊再揚。1993。散裝儲存省產雜糧品質分析及經濟效益評估，農業機械學刊2(1):45-61。
- 11.ASAE Standards. 1990. American Society of Agricultural Engineers, St.Joseph, Mich.
- 12.Brooker, D.B., F.W. Bakker-Arkema and C.W. Hall.

1974. Drying cereal grains. AVI Publishing Co., Westport, Conn.
- 13 Duffie, J.A. and W.A. Beckman. 1980. Solar engineering of thermal processes. John Wiley & Sons, New York.
- 14 Hall, C.W. 1980. Drying and storage of agricultural crops. AVI Publishing Co., Westport, Conn.
- 15 Loewer, O.J., T.C. Bridges, D.G. Colliver and G.M. White. 1984. Economics of stirring devices in grain drying. Transaction of the ASAE 27(2):603-608.
- 16 Low Temperature and Solar Grain Drying Handbook. 1980. Midwest Plan Service. Iowa State University, Ames, Iowa. U.S.A.
- 17 Marks B.P., D.E. Maier, and F.W. Bakker-Arkema. 1993. Optimization of a new in-bin counterflow corn drying system. Transaction of the ASAE 36(2):529-532.
- 18 Ozisik, M.N., B.K. Huang and M. Toksoy. 1980. Solar grain drying. Solar Energy 24,397-401.
- 19 Parker, B.F., D.G. Colliver and L.R. Walton. 1985. Prediction of solar air heater thermal performance. Transaction of the ASAE 23(3):932-936.
- 20 Peterson. W.H. and M.A. Hellickson. 1976. Solar-electric drying of corn in South Dakota. Transaction of the ASAE 19(2):349-353.

收稿日期：民國83年2月 2日

修正日期：民國83年3月30日

接受日期：民國83年4月12日

(上接第47頁)

- Simultaneous redistribution and evaporation. Water Resour. Res. Vol. 6, p.1148-1153.
- 10 Hillel, D. 1982. Introduction to Soil Physics. Academic Press Inc. London.
- 11 Johnston, W.R., 1983. Changes in subsurface drainage water salinity and boron concentrations. J. Irrig. and Drain. Div., ASCE. Vol. 105, p.439-441.
- 12 Jury. W.A., W.R. Gardner, C.B. Tanner, and P. Staffigna. 1976. Model for predicting movement of nitrate and water through a loamy sand. Soil Sci. Vol. 122, p.36-43.
- 13 Jury, W.A., W.R. Gardner, and W.H. Gardner. 1991. Soil Physics. John Wiley & Sons, Inc.
- 14 Rubin, J. 1967. Numerical Method for analyzing hysteresis-affected, post-infiltration redistribution of soil moisture. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Vol 31, p.13-20.
- 15 Sisson, J.B., A.H. Ferguson, and M. Th. van Genuchten. 1980. Simple method for predicting drainage from field plots. Soil Sci. Soc. Am. J. Vol. 44, p.1147-1152.
- 16 Veihmeyer, F.J. and Hendrickson, A.H. 1931. The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soil. Soil Sci. Vol. 32, p.181-193.

收稿日期：民國83年3月17日

修正日期：民國83年4月21日

接受日期：民國83年4月22日