

稻穀乾燥理論之探討與高溫 間歇通風乾燥之研究

A Review on the Drying Theory and A Study on the Intermittent Dryeration of Rice with Heated Air of High Temperature.

臺大農工系副教授

陳 貽 倫

臺大農工系助教

馮 丁 樹

壹、前 言

本省地處亞熱帶，高溫多雨，常年溼度亦高。因此，稻穀之收穫與乾燥作業屢受天候限制，難有充裕時間予適當處理。一旦遭逢雨期，則各項作業驟然進入緊急狀態。此時稻米之品質好壞已無法兼顧。為應付這些不利情況，乾燥機之推廣，此應為其時矣。

傳統之稻穀乾燥，咸為人工方式；以日光為能源，稻穀鋪地受熱。在能量方面之取得，此法應屬最廉。但如考慮其他因素，則缺點很多：一、稻米胴裂極為嚴重，品質亦難控制；二、受天候影響甚鉅，如遇陣雨，則收攤，覆蓋等緊急之工作更費人工；三、晒場面積佔地大，無法適應大農戶作業，有時農民佔用馬路作為晒場，更妨礙交通；四、此法毫無搶救效果。

間歇通風與均化乾燥法係一種較高效率之乾燥方式。不但可兼顧米質，減少胴裂，而且可作為雨期搶救乾燥之措施。最近臺灣大學農工系進行之浮動層式乾燥機試驗，其作業之系統過程即以間歇通風與均化乾燥法為其骨幹，融合運用而成。其主要優點在於，利用此法可抵消因高溫通風所造成品質降低之趨勢，使經搶救後之稻穀亦能維持適當之品質水準。

此種間歇通風乾燥法亦可運用於其他型式之乾燥機，但其作業過程必需與有關因素相互配合，進行方能順利。

貳、乾燥理論之探討

(一) 一般理論：

稻穀係有生命力之膠體有機質，其乾燥之過程與一般工業上產品之乾燥有所不同，大體上言，稻米之乾燥注重其生命力之維護以及穀粒完整性之保存；而工業上之乾燥則無此種顧慮，其處理之對象亦較為均

勻，不如稻穀之富於變化。

稻穀之乾燥過程約可分為兩階段之作用：(1)穀粒表面與其周圍之熱量與水分之傳遞；(2)穀粒內部之熱量與水分之傳遞。前者之傳遞過程受外界因素所限制；而後者則因稻穀性質之不同而有異。就穀粒內部情形而言，穀粒初受熱，其中心溫度較表面低而水分含量則較高，穀粒內部之熱量與水分乃呈相反之傳遞方向；而在通風冷卻狀況下，因情形相反，故兩種傳遞流向又復重合，增加水分向外之傳遞量。李可夫(Lykov, 1966)⁽¹¹⁾ (註一) 將此兩種梯度所導引之總水分傳遞量作成下列公式：

$$m = m_{\mu} \pm m_{\theta} = -K r_0 (\Delta\mu \pm S\Delta\theta)$$

$$\text{kg/m}^2 \cdot \text{hr} \dots \dots \dots (1)$$

此處， m_{μ} ：由於水分梯度所產生之水分傳遞量

m_{θ} ：由於溫度梯度所造成之水分傳遞量

r_0 ：乾物質比重， kg/m^3

S ：熱水分傳導係數， $1/^{\circ}\text{C}$

∇ ：Laplace 演算符號

$$= \frac{\partial}{\partial x} \bar{i} + \frac{\partial}{\partial y} \bar{j} + \frac{\partial}{\partial z} \bar{k}$$

由於溫度差異所導致穀粒內部水分之傳遞量為 m_{θ} 。此值若詳加分析，其間因素甚為複雜。據一般說法⁽¹¹⁾：當熱量流向低溫處之際，穀粒內部水份部份受熱膨脹，部份則汽化為水蒸氣；另外，穀粒內殘留之氣泡亦相繼受熱。這些受熱後之水分及水汽乃開始壓迫其他低溫水分沿熱流(heatflow)方向流動，此即 m_{θ} 值之形成。事實上，稻風乾燥作業中，熱風溫度只要不超過 150°C 以上， m_{θ} 遠比 m_{μ} 值為小，因此其影響較小。惟在熱輻射為原理之乾燥作業(如人工日晒法)，或超高溫通風乾燥作業中， m_{θ} 值

註一：括號內數字為參考資料欄內之序數。

之影響則不可忽略。

穀粒內部水分傳遞之能力與其對乾質之親和力有關。據瑞班達氏 (P.A. Rebinder) ⁽¹¹⁾ 之分析, 水分子間依吸引力狀態可分為三種:

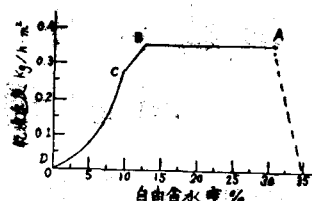
1) 化學鍵水 (chemical bond): 化學鍵水分與乾質之結合力極強, 必須用相當高溫或其他化學方法方可使之分離。

2) 理化鍵水 (Chysicochemical bond): 包括附着水 (adsorbed moisture), 滲透水 (osmotically-absorbed moisture) 及結構水 (structural moisture)。其中以附着水結合力最強, 必須化為氣態方式後方易析出。滲透水與構造水同乾物質之結合力則較弱, 但其數量則較多, 是為穀粒吸溼膨脹之來源。分離此種水分極為容易, 因稱為自由水 (free water)。

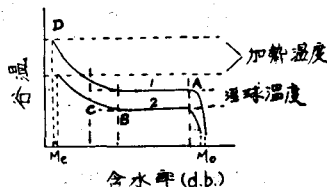
3) 機械鍵水 (mechanical bond): 包括毛細管水與潤水 (wetting moisture)。存於極細管孔內之水分謂之毛細管水。毛細管半徑約在 10^{-5} cm 左右, 較細者可直接由大氣中吸收水分, 較粗者則必需與液體水面接觸方有吸水作用。潤水則是存於較大氣孔內之水分。這些水分結合力比理化鍵水強, 但仍屬於自由水之一部份。

一般稻穀含水量以理化鍵水與機械鍵水居多。故穀粒之乾燥亦以此部份水分之去除為主要對象。正常乾燥過程中, 穀粒內部水分常較外緣為高。因此, 水分乃以液態或氣態自內向外作放射性移動, 此即 m_c 值。 m_c 值之大小與稻穀之性質與阻力有關。

穀粒內部阻力不同影響水分移動速率, 但穀面水分之蒸發則完全為外界之空氣條件所限制。設穀面水蒸氣壓為 P_s , 外界水氣壓力為 P_v 。若 $P_s > P_v$, 則穀面水分汽化, 並由外界空氣帶走, 此即為乾燥之作用; 若 $P_s < P_v$, 則水分自外向內移動, 穀粒產生回潮現象; 如 $P_s = P_v$, 則水分傳遞作用中止, 是為平衡狀態。雖然, $P_s > P_v$ 之條件即為乾燥狀態, 但為使乾燥速率增加, 必須加大此兩水氣壓之差距。一般的作法是採取加熱通風之方式以減小 P_v 值 (即減低空氣之相對溼度), 並同時加大 P_s 值。 P_s 值雖可因溫度增加而增加, 但仍以該溫度之飽和蒸氣壓為極限。一般之乾燥, 若能繼續維持此飽和蒸氣壓之狀態, 稱為恆率乾燥期 (constant-rate drying) 如圖一之 A-B 部份。此時之穀溫, 因熱量僅供以穀面水分汽化之用, 乃固定在溼球溫度, 如圖二之 A-B 部份所示。通常, 除高水分之農作物諸如蔬菜, 煙草



A→B 恆率乾燥 B→C 過渡期
B→D 減率乾燥 B 臨界含水率
圖一、乾燥速率與穀物含水率之關係
(資料來源: 日本農機手冊⑧)

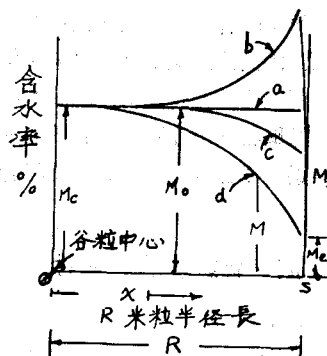


圖二、乾燥期間, 穀溫與含水率變化之關係
(資料來源: Monson S. ⑩)

等之乾燥具有較長之恆率期外, 一般穀類之恆率期極為短暫, 水稻亦然, 但臺灣北部二期稻作收成時, 常逢雨季而有浸水或溼度過高之現象, 其恆率期仍然存在。

穀粒內部水分傳遞速率不足維持穀面之蒸發時, P_s 值即開始降低, 進入減率乾燥期 (falling-rate drying), 如圖一之 BD 部份。此時水分之移動大部份以氣態為主, 不過所產生之蒸氣壓有時反而有阻礙正常水分子向外移動速率之現象, 使減率情形更趨惡化, 如圖一之 CD 部份。在此減率期間, 由於水分蒸發速度逐漸減低, 故谷溫不再維持溼球溫度, 乃逐漸上升, 如圖二 BD 之部份, 直到加熱溫度為止。

就米粒內部水分之分佈而言, 可作如下之分析: 設有一米粒其縱斷面之一半如圖三所示。所繪之曲線



圖三、米粒縱斷面水分沿軸之假想分佈

代表沿軸線上不同狀況時之含水率。若米粒乾燥後均化相當長之時間, 其內部水分分佈較為均勻, 近乎水

平線 a 之分佈。若米粒置於溼空氣中，水分自外向內移，其分佈應如曲線 b；而恒率乾燥期之水分分佈則如曲線 c，依蒙森氏 (S. Monson) (11)，其方程式如下：

$$M = M_0 - \frac{A}{R} \left(t - \frac{Rt - 3x^2}{k} \right) \dots \dots (2)$$

此處， M_0 ：乾燥前之平均含水率，

R ：米粒厚度之半；

A, K ：常數； t ：時間

在減率乾燥期時，米粒內部水分分佈如曲線 d，當 $t=0$ 時，應為拋物曲線，故：

$$M = M_0 - \left(\frac{x}{R} \right)^2 (M_0 - M_e) \dots \dots (3)$$

此處， M_0 與 M_e 為米粒中心與表面之含水率， M_e 在乾燥末期，應接近平衡含水率。

上面所言之含水率均為米粒內部任何一點之含水率，其值隨點而變化。一般乾燥上所用之含水率均為平均含水率，設恒率乾燥期之乾燥速率為 $S\%/hr$ ，則平均含水率 \bar{M} 之變化應為：

$$\bar{M} = M_0 - St \dots \dots (4)$$

而減率乾燥期之稻谷平均含水率公式應為：

$$\frac{\bar{M} - M_e}{M_0 - M_e} = e^{-Kt} \dots \dots (5)$$

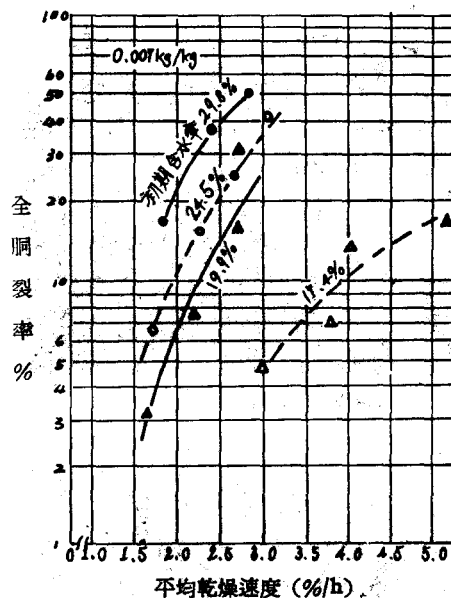
此處， M_0 為初期含水率； M_e 為最後平衡含水率， K, S 則各為常數。

(二) 胴裂與米質

稻米之品質可從多方面加以判斷 (6)，而米粒的完整性則為乾燥過程中，判斷乾燥機械性能之主要因素。稻米之胴裂則直接影響其品質。因此，如何降低胴裂水準實為設計乾燥機時所不可忽略之一項重要因素。

稻米之胴裂現象主要歸因於其胚乳部澱粉之特性使然。在低倍的顯微鏡下，米粒之斷面可區分為穀殼、胚胎及胚乳三部份。胚乳全為澱粉所充滿，其狀如無數小磚塊疊成，沿長軸向兩旁輻射分佈 (15)。此種細塊澱粉質極易因高溫、回潮、乾燥速率或初期含水率等因素之變化而產生裂痕。漢得生氏 (Henderson) (15) 曾以 X 光作米粒透視實驗，結果：發現絕大部份之胴裂始自谷粒中心部位，爾後再延伸至外圍構成環狀裂痕。因此，其結論認為胴裂原因係源自溫度梯度之差異。易言之，溫度梯度差愈大，停留時間愈久，其內部累積之應力亦愈大。漢得生 (18) 氏又根據熱應力試驗結果得知：溫度差在 43°C 以上米粒內部開始發生嚴重胴裂。因此建議加熱空氣之溫度以

不超過 53°C 為宜。雖然如此，乾燥時間與速率仍為重要因素。據農試所試驗結果 (6)：稻米之胴裂速率與乾燥速率之平方成正比。伴敏三 (1) 氏之報告中亦指出此項趨勢，如圖四所示，乾燥速率愈大其胴裂率愈高。此處所謂乾燥速率即為穀粒內水分之去除速率。但

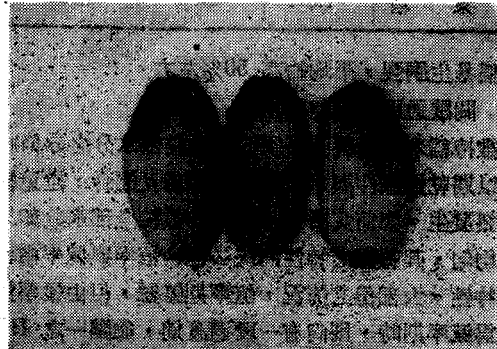


圖四、平均乾燥速率與稻米胴裂之關係

(資料來源：伴敏三(1))

據漢得生氏之研究，他認為穀粒水分之去除速率不應為影響胴裂之主要因素，否則大部份之胴裂現象應自穀表面開始而非始自中心部份。惟此項說法仍有待進一步證實。

稻穀初期含水率與胴裂率亦有極明顯之關係存在。據農試所試驗結果 (4)：一般稻穀水分乾到 23% 後，方始產生胴裂，此可能係由於內部自由水之減少損及澱粉之結構，因而惡化胴裂。但據伴敏三 (1) 氏指出：初期含水率愈高，在相同乾燥狀況下，乾至 13% 含水率時之胴裂愈為嚴重，其情形如圖四所示。惟其



圖五a 完整之米粒，無胴裂現象

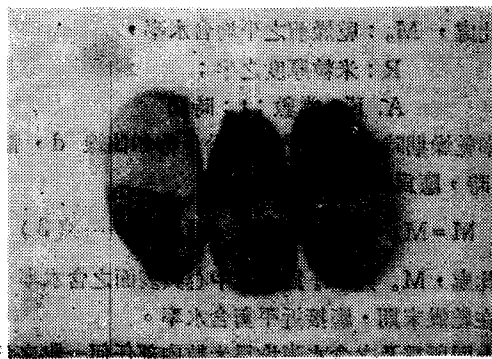
中原因可能係乾燥時間過長所致。換言之，加熱時間愈長，胴裂率也必愈高。

檢驗稻米胴裂之標準可以圖五中各圖作比較。一般情形是以環痕數目為準分成兩大類⁽¹⁾：凡裂痕未及一環者謂之輕胴裂 (check)，如圖五 b 所示；裂

痕超過一環以上謂之重胴裂 (crack)，如圖五 c 至五 e 所示。在百粒中，輕胴裂與重胴裂之數目之總和謂之全胴裂。表(一)為羅東六十三年度農民繳交農會之一期水稻胴裂情形。因該地一期稻收成時氣候良好，故其乾燥方式以日晒法居多。由表中得知：蓬來稻比



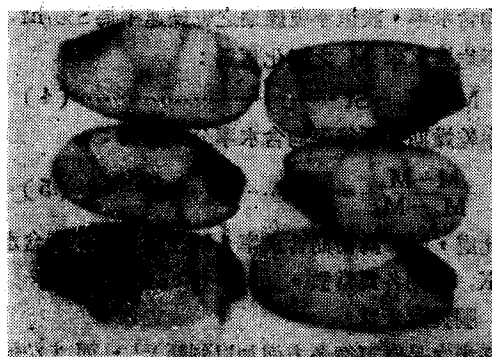
圖五b 輕胴裂，裂痕始自中心



圖五c 重胴裂之一，有橫斷線紋



圖五d 重胴裂之二



圖五e 高溫通風過長所發生嚴重胴裂之現象

表一、羅東六十三年一期水稻之胴裂情形

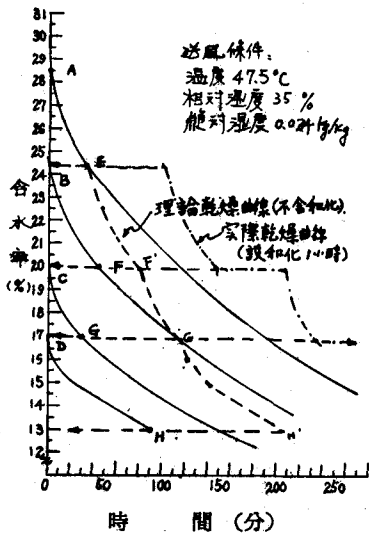
百粒中之胴裂米	輕 胴 裂			重 胴 裂			全 胴 裂		
	本 均	範 圍	標準誤差	平 均	範 圍	標準誤差	平 均	範 圍	標準誤差
蓬 萊 稻	22.35	11-28	± 6.08	34.21	15-63	± 12.70	56.57	33-74	± 10.90
在 萊 稻	15.91	5-23	± 5.36	21.77	5-63	± 16.50	37.61	20-68	± 14.38

在來稻易生胴裂，平均約高 50% 左右。

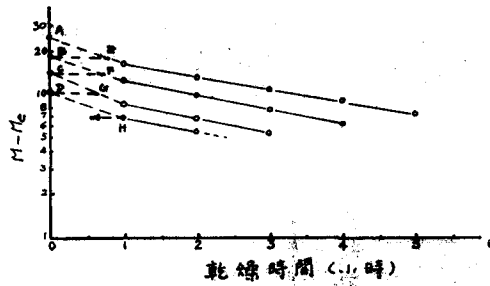
(三) 間歇通風乾燥理論

維持稻米之品質，必須顧及米粒部水分之分佈狀況，以期乾燥條件與水分流動速率相互配合，避免嚴重胴裂發生。如前文所述，乾燥前穀粒全部水分如果分佈均勻，其乾燥之特性曲線必包含恒率與減率兩種乾燥特性。大部份之情況，恒率期雖短，但由恒率期轉變為減率期時，則尚有一段過渡期，如圖一之 BC 部份。此過渡期之乾燥速率仍高於後半段之減率期。

因此如能利用短暫的恒率期與此過渡期之乾燥特性以乾燥稻谷，當可改善乾燥速率與乾燥效率。圖六與圖七是根據伴敏三氏⁽¹⁾之試驗資料再加描繪而成。圖內各曲線則表示由不同初期含水率同時乾至 13% 時之乾燥特性。其中 B 與 E, C 與 F, D 與 G 雖然有相同之平均含水率，但其水分分佈狀況則不同。B, C, D 各點水分分佈極為均勻；而 E, F, G 各點則如圖三曲線 d 之分佈。故其乾燥特性不同。由 E, F, G, 各點狀態到達 B, C, D 各點之狀態必先予



圖六、稻穀乾燥時，含水量與經過時間在不同初期含水量下之關係
(資料來源：仲敏三^①)



圖七、圖六之資料以半對數格紙表出後之情形

均化 (Tempering)——或將之停止通風，靜置數小時。據仲敏三^①之試驗：此種均化程序至少必須四小時，理想時間應為 48 小時以上 (但時間過長仍應防止回潮現象)。此種乾燥與均化串聯進行之乾燥方式稱為間歇通風均化乾燥 (dryeration)。正常狀況，稻穀必須如此輪迴乾燥 5-6 次，方可達到 13% 之理想含水量。

就乾燥時間考慮，設 T_1 為一次乾燥至 13% 之總時間，則依公式(5)， T_1 應為：

$$T_1 = -\frac{1}{K} \ln \left(\frac{M_{13} - M_0}{M_0 - M_s} \right) \dots \dots \dots (6)$$

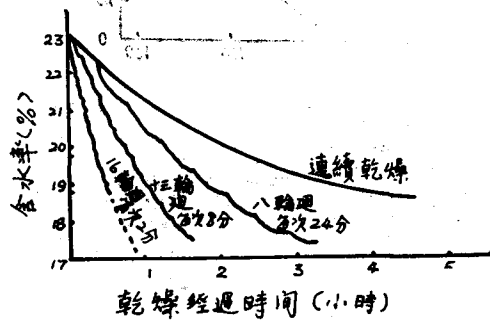
又設 T_d 為 n 次輪迴間歇通風乾燥之總乾燥時間，則 T_d 為：

$$T_d = -\sum_{i=1}^n \frac{1}{K_i} \ln \left(\frac{M_i - M_0}{M_{i-1} - M_0} \right)$$

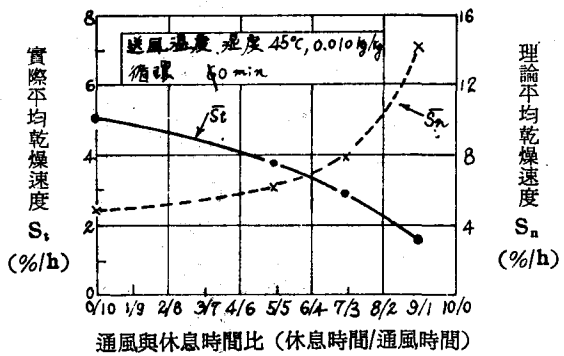
$$= -\sum_{i=1}^n \ln \left(\frac{M_i - M_0}{M_{i-1} - M_0} \right)^{\frac{1}{K_i}} \dots (7)$$

此處 K_i 值為變數，其最低值應趨近公式(6)之 K 值 (可比較圖七中實線與虛線之斜率)，故 K_i 等值應比 K 值高。一般言， K_i 等值愈大，總乾燥時間愈短。

若將 T_d 與 T_1 時間加以比較， T_d 應比 T_1 為短，而且乾燥的次數愈多，每回合乾燥時間愈短則乾燥時間 T_d 愈短 (如圖八所示)。故間歇乾燥法之乾燥效率顯然比一次乾燥法為高，其理論乾燥速率亦快



圖八、間歇通風乾燥之效果 (不包括和化時間)
(資料來源：H. Edholm^⑩)

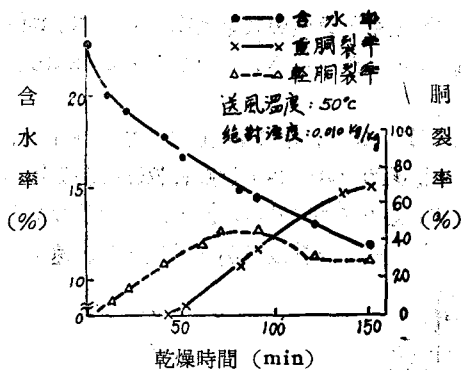


圖九：間歇通風乾燥法之理論與實際平均速度之關係
(資料來源：仲敏三^①)

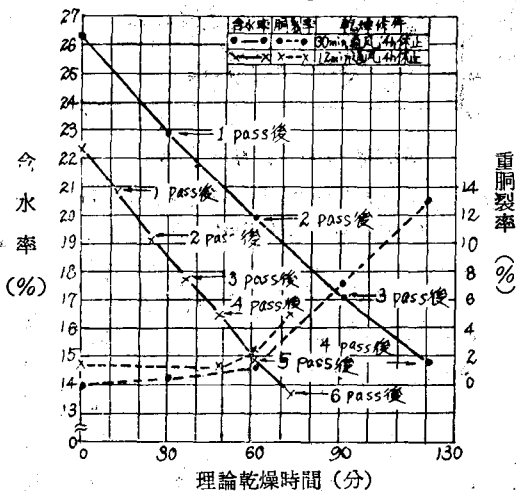
(如圖九之虛線)。實際上，如以實際經過時間比較，因必須加上每次之均化時間，故間歇法所花費之時間反而更多。其實際乾燥速率因而相對降低 (如圖九實線部份)。降低之數值則與均化時間及乾燥時間之比例有關。

實際操作時間雖然增多，但是間歇乾燥法之真正效果並不在於乾燥之快慢，其最大優點乃在於胴裂之減低與乾燥效率之提高。如圖十顯示，一次乾燥雖溫度僅及 50°C，但達到 13% 左右之含水量時，其胴裂率已達 70%，如加上輕胴裂，其胴裂率已高達 100%。但如採用間歇通風均化乾燥方式，其重胴裂率仍然相當低；如輪迴次數增多，其重胴裂率更為減

少，如圖十一。此即間歇乾燥方式之優點所在。



圖十、一次乾燥之含水率與胴裂率變化之關係
(資料來源：伴敏三①)



圖十一、間歇通風與均化法之含水率與胴裂率變化之關係
(資料來源：伴敏三①)

參、基本試驗

(一) 概 說：

高溫乾燥可以增加乾燥速率，但如時間不加控制則足使米粒變質，其生機亦遭破壞。其中尤以胴裂受影響最大。據伴敏三氏之實驗，熱風增至 80°C，胴裂率可達 100%。當然此項報告係基於一次乾燥完成之結果；事實上，如僅以搶救乾燥為目的，則一次完成乾燥並非必要。一般搶救式乾操作業均以乾燥至 18% 為目標，爾後再設法利用大型乾燥機或其他方式處理未完之過程。基於此，如能採用高溫通風方式並配合間歇乾燥之理論，在不過份惡化胴裂率之情況下，當屬合理可行。

又根據前文所述，溫度梯度差異有助於內部水分之向外移動。因此，為期能使穀粒表面溫度降低，增加梯度差距，乃採取在均化期之前加以短時間通風冷

却方式，以增強水分去除之效果。

(二) 目 的：

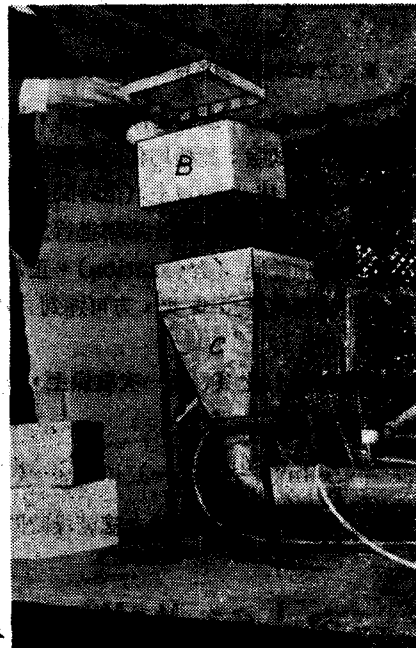
本試驗目的在於尋求一合理之乾燥程序，並瞭解熱風溫度，加熱時間等因子對稻米品質之影響。同時，觀察均化時間對第二回乾燥之影響。綜合其最佳因子，以配合浮動層式乾燥機之作業。

(三) 方法與步驟

本試驗之裝置如圖十二。外界空氣經由離心抽風機送至加熱器加熱。之後，再送至乾燥部進行乾燥過程。空氣之加熱係採用電熱式，利用 220 V 之電源以兩具自耦變壓器改變電壓以控制所加之熱量，並控



A 乾燥箱 B 傾斜壓力計
C 溫度自動記錄儀
D 加熱器 E 離心抽風機
圖十二a 基本乾燥試驗裝置全貌



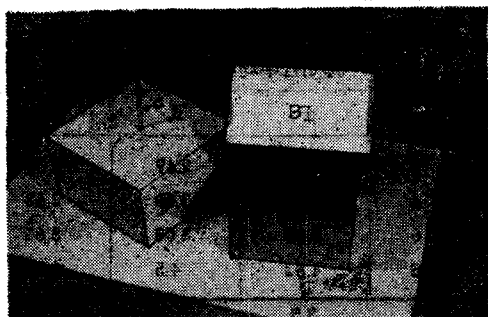
A 乾燥箱網蓋 B 乾燥箱
C 骨架與熱風管路 D 皮氏管

圖十二b 乾燥部裝置圖

制熱風溫度。試驗期間，熱風溫度均調節在 70 °C 與 80 °C 兩點。各點溫度則分別以自動溫度記錄儀予以記錄之。

風量則由串激馬達之轉速直接控制。風速則利用皮氏管 (pitot-tube) 配合傾斜壓力計測定之。試驗時，風量均固定在 100 CMM/100kg 之比例。

每一試驗之樣品單位重量為 1.5kg，利用臺大農場之蓬萊稻種進行試驗。容器之構造如圖十三所示，

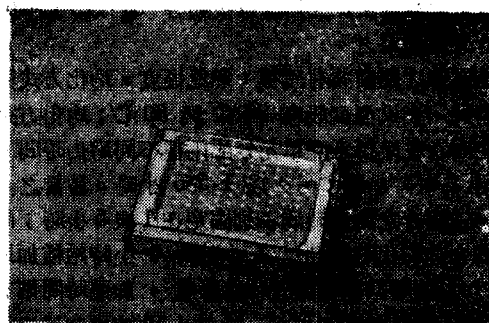


A 乾燥箱 B 保麗龍絕熱盒
C 谷溫度計

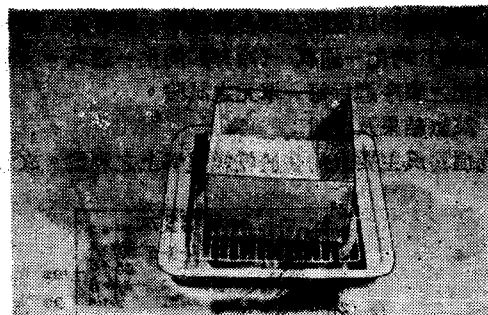
圖十三、乾燥箱及絕熱盒圖

四周用鋅鐵皮做成，底部採用細目鐵絲網以利通風。均化期間，為使樣品更近絕熱狀態，乃利用保麗龍板作成密閉箱（如圖十三），以容納乾燥箱與乾燥後之

稻穀。均化之前並利用風扇將稻穀通風冷卻廿分鐘（如圖十五），以排除穀粒間之水蒸汽，穀溫則以溫度計接測量之。



圖十四、脹裂率檢視盤



圖十五、稻谷加熱乾燥後置於風扇上通風冷卻廿分鐘

表二、基本乾燥試驗結果

試驗項目 No.	資 料			每回合乾燥後之含水率(%) w. b.			每回合乾燥後之 膨裂率 %			附 註	
	熱風溫度 (°C)	均化方式 (hr)	乾燥時間 (min)	初 期 含水率	I	II	III	I	II		III
1	70	1-3-5	2	27.6	25	23.4	21.9	0	0	0	試驗時室內 條件為： 平均室溫：21.4°C 平均相對溼度： 82.4% 樣品重：1.5Kg 風量：1.5CMM
2	70	1-3-5	4	27.6	24.9	22.3	19.2	0	0	9	
3	70	1-3-5	6	27.6	23.9	22.5	17.8	0	11	47	
4	70	1-3-5	8	27.6	22.9	19.8	15.9	3	44	70	
5	70	1-5-5	2	27.5	25.2	22.1	19.5	1	5	5	
6	70	1-5-5	4	27.5	25	21.2	17.8	1	13	30	
7	70	1-5-5	6	27.5	23.3	21.1	16.77	0	48	76	
8	70	1-5-5	8	27.5	22.2	18.5	15.6	5	55	87	
9	80	1-3-5	2	27.8	24.7	22	18.9	1	3	8	
10	80	1-3-5	4	27.8	22.7	19.3	17.4	14	25	44	
11	80	1-3-5	6	27.8	22.4	18.9	15.8	13	30	59	
12	80	1-3-5	8	27.8	22.3	17.2	14.4	18	61	86	
13	80	1-5-5	2	26.3	25.1	22.6	21.5	0	1	1	
14	80	1-5-5	4	26.3	23.8	19.7	17.6	3	25	40	
15	80	1-5-5	6	26.3	23.7	19.5	16.1	1	19	81	
16	80	1-5-5	8	26.3	22.4	16.3	13.8	16	71	99	

胴裂率之測定則是將乾燥後之稻穀樣品 100 粒，存置 24 小時。再利用手工剝除穀皮於燈光板下檢視之，如圖十四。

含水率測定法係採用磨碎後稻谷 5g-110°C-20 分之紅外線法為之。

本試驗之變數共有三項：熱風溫度，均化方式與加熱時間。熱風溫度設在 70°C 與 80°C；均化方式則以三回合乾燥為考慮單元分配兩種不同均化時間，其一為 1-3-5 小時；另一為 1-5-5 小時。易言之，第一、三回合之均化時間各別固定在 1 與 5 小時；而第二回合之均化時間則以 3 小時與 5 小時兩種加以試驗，以瞭解其對乾燥過程之影響。加熱時間則有 2, 4, 6, 8 分鐘等四組合，故總共 16 項處理單元。其試驗結果資料如表(三)。

上項試驗均以乾燥三回合為基準，換言之，照通風→(冷卻)均化→通風→(冷卻)均化→通風→(冷卻)均化之順序進行每一單元之試驗。

(四) 試驗結果及研討：

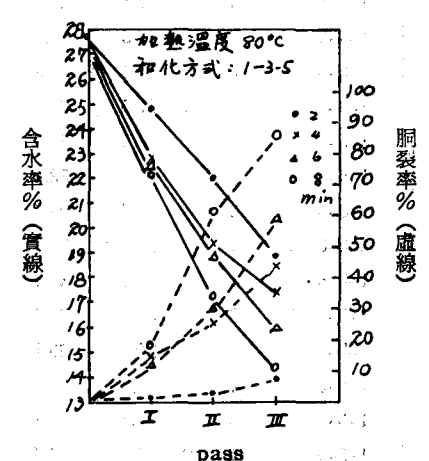
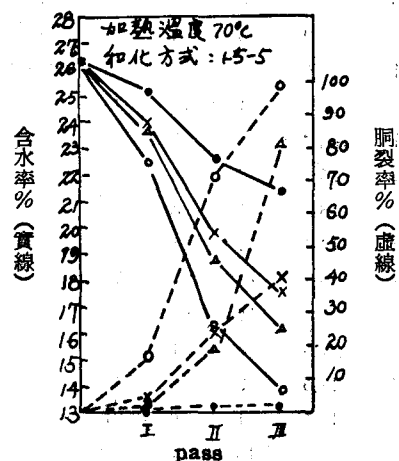
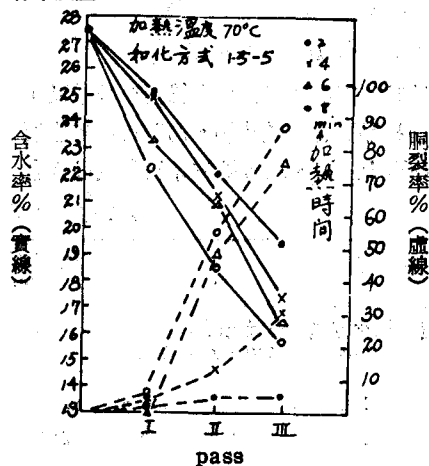
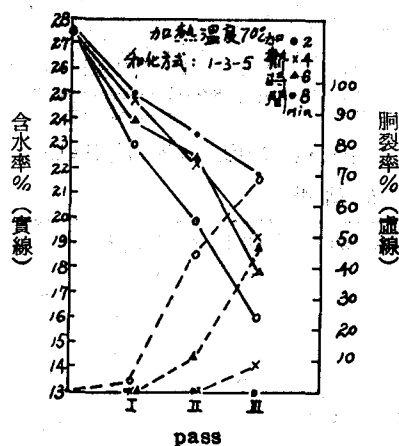
高溫送風主要目的在於乾燥速率上之利益。故若

就此項利益言，平均每回合約可乾減 3.24%；而各回合之平均乾減率各別約為 3.5%，3.38%及 2.84% (如表三)。三回合之乾燥速率雖略呈遞減但其趨勢不大。尤其在某些情況 (如 2 min, 4 min 組合)，其第二回之平均乾減率有反高之傾向。由於各項相差極少超過標準誤差值之範圍，故其變異分析表 (表四) 所顯示各回合乾減率之差異並不顯著。此種恒率乾燥期之特性顯然已在此乾燥方式中得到有效地發揮，此即間歇乾燥法之優點所在。

表三、每回合乾減水分之狀況分析

加熱時間 (min)	每回合平均乾減水分率 % (w.b.)		
	I	II	III
2	2.18	2.49	2.08
4	3.20	3.50	2.63
6	3.88	3.08	3.65
8	4.83	4.5	3.03
每回合平均 5	3.5	3.38	2.84

標準誤差：±1.22%



圖十六、各回合之乾減率與胴裂率間之關係

表四、每回合乾燥速率之變異分析

變因	自由度	均方(M.S.)	F
回合(pass)	2	2.04	1.94 N. S.
乾燥時間	3	7.48	7.12 ***
機差	42	1.05	

圖十六之 a 至 d 為四種不同單元處理後之乾燥特性。其中，直線之特性曲線極為顯著，尤以 70°C 通風乾燥者為然。

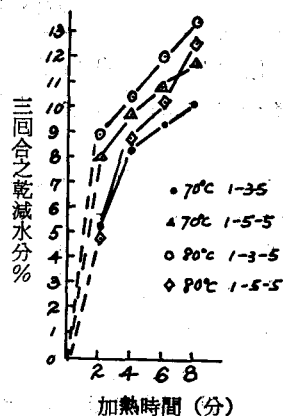
各回合水分之乾減率顯然受所加熱量之影響。但乾減率並非隨加熱時間成正比例增加，因此，若僅以增加加熱時間為快速乾燥之手段，則有待詳加考慮之必要。假設有足量之溼穀可連續進出乾燥機之乾燥部而不間斷。此時若以乾燥機之立場考慮其單位時間之乾燥速率，則表三之資料可以換算成表五。顯然地，乾燥機每小時之乾減率因每回合加熱時間之縮短而反增。對乾燥機之效率以及能量之利用而言，這是一項極大的鼓勵。但是若從另外一方面加以考慮：對固定量溼穀之乾燥言，此舉勢必增加乾燥之回數以及均化時間，間接降低溼穀之實際乾燥速率。因此，縮短加熱時間之方式仍有其限度。從上述資料研判，每回合加熱兩分鐘之方式仍不失為最佳之選擇。而且，若從胴裂速率考慮，亦唯有此處理單元方能維持胴裂現象至最低程度。由初步資料顯示，無論通風溫度設在 70°C 或 80°C，其最後胴裂僅及 4% 左右。

表五、每回合加熱時間與乾減速率以及胴裂速率之關係

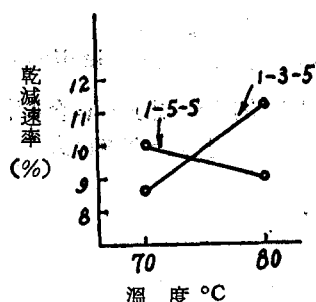
加熱時間 (min)	每回合合理水分乾減速率 %/h			每回合增加之胴裂率 %		
	I	II	III	I	II	III
2	65.4	74.7	62.4	1	2	1
4	48	52.5	39.45	4.5	11.3	15
6	38.8	30.8	36.5	3.5	23.5	38.25
8	36.23	33.75	22.75	10.5	10.5	26.3

就三回合乾燥後之總乾減率言，三個變數中以加熱時間之影響最為顯著，其差異均在 0.5% 之顯著水準，(請看表六之變異分析)，另外從圖十七所顯示：乾燥時間愈長，其乾減水分愈大。通風溫度方面之影響則次之。惟其與均化方式之交互作用 (interaction effect) 亦極為顯著。如圖十八所示，1-3-5 之均化方式在高溫通風時有助於水分之乾減，而 1-5-5 之方式其影響則相反。

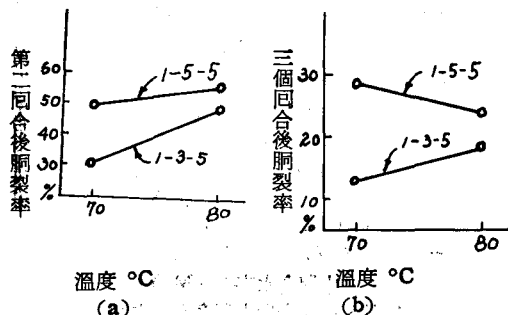
依試驗設計原意，均化因子應於第二回合乾燥後



圖十七、三回合乾燥後乾減水分與加熱時間之關係



圖十八、溫度與均化方式對乾減速率之交互作用 (interaction)



圖十九、均化與溫度因子對胴裂率之總效應

才開始其功能，因此，理論上均化因子之變異應直接影響及第三回合之乾燥速率。唯此次試驗似未能測出其間差異，但對第二回合之乾燥速率言，1-5-5 均化方式反而有促進乾燥速率之效果 (參考表六)。

均化之另一功能可減少米粒之胴裂。但均化時間過久對胴裂亦有不良影響。無論是總胴裂率或第二回合發生之胴裂，1-5-5 均化方式顯然有令胴裂加重之趨勢，如圖十九之 a 與 b 兩種情況所示。雖然其原因有待進一步研究，若以目前資料研判，均化方式仍以 1-3-5 方式為佳，不但可增加乾燥率，同時亦可抑制胴裂現象。

胴裂率之存在與乾燥後之末期稻穀含水率亦有明

表六、各回乾燥之乾減水分率與胴裂率之變異分析

變異原因 (Source of variation)	自由度 (d.f.)	均 方 (Mean Square)				
		三回乾燥後 總乾減水分率	第二回乾燥時 乾減水分率	第三回乾燥時 乾減水分率	三回乾燥後 總胴裂率	第二回乾燥期 間之胴裂率
乾燥時間	3	22.45 ***	2.9 **	1.79*	5318.08***	1547.89***
處理 (Treatment)	3	5.04 **	3.69**	1.50	424.08**	182.40*
溫度	1	2.18 *	7.70** (1%)	3.52**	552.25**	0.565 N.S.
	均化	1	0.52 N.S.	3.30**	0.46 N.S.	576.0 **
溫度×均化	1	12.43 ***	0.07 N.S.	0.52 N.S.	144.0 N.S.	95.06 N.S.
機 差	9	0.58	0.58	0.487	73.69	73.14

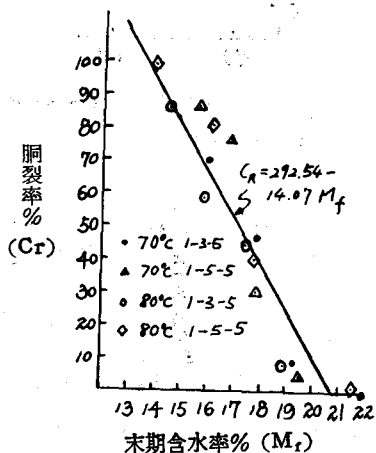
註：*** 0.5%差異顯著水準 (Significant level)

** 5%差異顯著水準

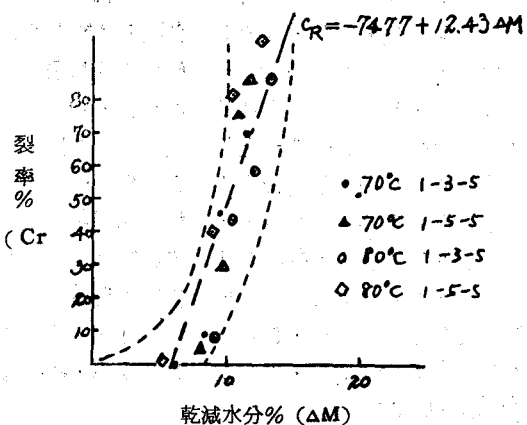
* 10%差異顯著水準

N. S. 不顯著差異 (Nonsignificance)

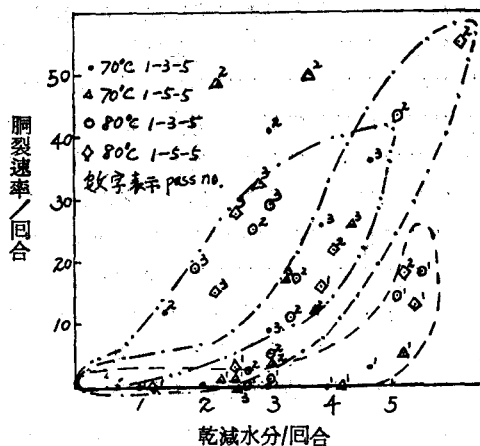
顯之關係，如圖廿所示。末期稻穀含水率愈高，則胴裂率愈低；相反時則反之。以統計方式，其迴歸關係式為：



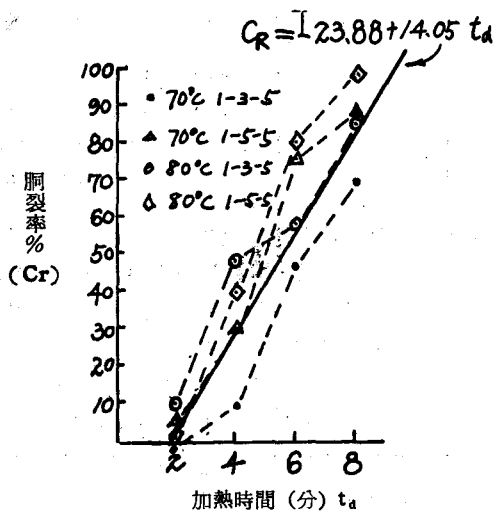
圖廿、胴裂率與末期含水率之關係



圖廿一、胴裂率與乾減水分之關係



圖廿二、每回合平均胴裂速率與乾減水分之關係



圖廿三、胴裂率與加熱時間之關係

$$C_B = 292.54 - 14.07 M_r \quad \% \quad r = +0.9373$$

$$S_y = \pm 11.66 \%$$

此處， C_B ：最後之胴裂率，%

M_r ：最後稻穀含水率，%

r ：相關係數

若不考慮及其他因素，胴裂率與總乾減率亦有關係。由圖廿一所示，胴裂率約在總乾減率 5% 時開始產生。自此開始，無論乾燥時間與熱風溫度如何變化，其胴裂率直線上升。圖中所顯示之胴裂區帶可約略窺其範圍。因此，如三回合乾燥後欲維持胴裂率 10% 以下，三向總乾減水分不得超過 6%。當然此範圍可因加熱時間之縮短情形酌予放寬。若不考慮通過原點，其間直線關係如下：

$$C_B = -74.77 + 12.43(\Delta M) \quad \% \quad r = +0.8706$$

$$S_y = \pm 16.45 \%$$

每回合乾燥期間，胴裂速率與乾減速率之間的關係可由圖廿二表示，大體言，第一回合之乾減率在 4%/pass 以下，其胴裂率仍然很低；而第二、三回合之胴裂速率則隨乾燥速率增加，惟每回合 2% 之乾減率則仍屬安全。

加熱時間之長短是影響胴裂之最大因素（表六與圖廿三）。如理論部份所述，加熱時間愈長，米粒內累積之熱應力愈大，因此胴裂愈嚴重。另外一因素可能受立即風冷之影響，但仍待查證。以現況而論，加熱時間以二分鐘為佳。其相關式如下：

$$C_B = -23.88 + 14.05 (t_d) \quad \% \quad r = 0.9395$$

$$S_y = \pm 11.45 \%$$

此處， t_d 為加熱時間，以分為單位。

(五) 結 論

1. 高溫間歇通風與均化是一種高效率之稻穀乾燥方式。只要配合系統運用，可使乾燥機發揮其潛在性能。本試驗每項處理單元均經過三回合之乾燥與均化，且每次乾燥後立即加以冷卻以降低穀溫，使其適於暫時性短藏或均化之工作。

2. 每回合平均約可乾減水分 3.24%，各回合乾燥速率並無顯著差異，足證此法具有近乎恆率乾燥期之特性。

3. 高溫通風與長期加熱均不利米質。長期加熱將降低系統之操作效率並且增加胴裂，故熱風溫度 70°C 與加熱時間每回合二分鐘之狀況較佳。

4. 第二回合乾燥後，均化時間長短—5 時與 3 小時—並不影響乾燥速率，但可影響胴裂。故均化時間以採用 1-3-5 小時之次序較適宜。

5. 三回合之乾燥，其乾減水分最多勿超過 6%，或 2%/回合，但是第一回合乾減率達到 4% 仍屬安全。

肆、尾 語

本試驗承國科會與農復補助，並蒙丁冠中技士與周儀之技士共力協助，方克以成，謹誌謝意。

Summary

1. Intermittent tempering and drying with heated air of high temperature is a kind of highly efficient method on rice drying. In cooperation with systematic operations and arrangements, it will also enhance the potential drying capacities of rice driers. Each treatment of this test experiences three passes of drying and tempering, in which each pass of drying is immediately followed by a short period of cooling to lower the grain temperature to meet the safe requirement for a temporary storage or tempering before the next pass of drying begins.

2. Each pass of drying can deduct about 3.24% of grain moisture. However, the difference of moisture reductions between each sequential pass of drying is not great, which proves that this method of drying has possessed an approximate constant rate of drying during this experiment.

3. Aeration with higher temperature and longer heating period was found harmful to the rice quality. Long heating period will lower the operation efficiency of the system drying and increase the crack ratio of rice kernels. It is then recommended to use 70°C heated air for the rice drying but not to use for longer than 2 minutes per pass.

4. Different periods for tempering, 3 hrs. & 5 hrs., after the second pass of drying do not significantly effect the drying rate but do effect the cracks of rice kernels. Therefore, it seems better using the 1-3-5 hrs of time order for the tempering procedure.

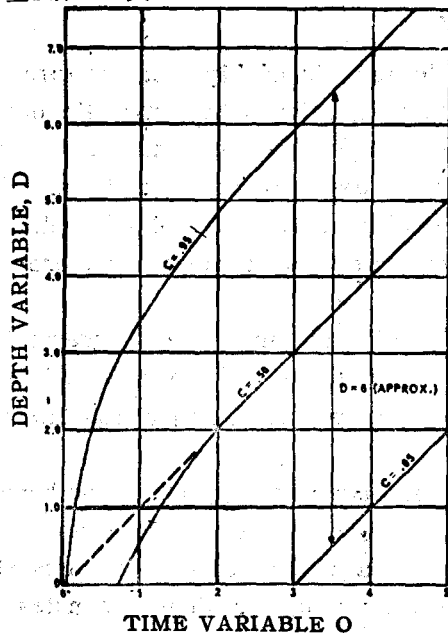
5. The moisture reduction after 3 passes of drying should not be more than 6%, or 2%/pass, so far as the rice cracks are concerned. However, 4% of reduction for the first pass of drying will be on the safe side.

伍、參考資料

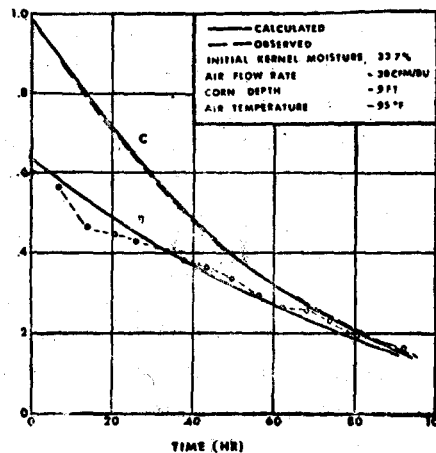
1. 伴敏三 人工乾燥における米の胴割れに関する實驗的研究, 農業機械化研究所 8 號報告 日本昭和 46 年
2. 蕭世民 稻穀之乾燥與貯藏 農林廳種苗繁殖場出版, 1952.
3. 鄒清標 穀類乾燥基本試驗之設計 農業研究 16 (3), 1967.
4. 鄒清標 水稻間歇通風乾燥法之研究 農工學報 15 (3, 4) 1969.
5. 鄒清標 水稻濕穀搶救乾燥法之研究 農工學報 14 (2) 1969.
6. 陳貽倫 稻谷乾燥之研究 農工學報 20 (3) 1974.
7. 沈國文 水稻常溫及加熱通風乾燥 (講義)
8. 農業機械學會 農業機械ハンドブック コロナ社 1969.
9. 高坂知武 農業機械構義
10. Carl W., Hall, Drying Farm Crops, Agricultural Consulting Associates, Inc, 1957.

11. Monson, S., Grain Drying and Grain Driers, The Office of Technical Services, U.S.D.C. 1960.
12. Brooker, Donald B. Drying Cereal Grains The AVI Publishing Co, Inc. 1974.
13. Henderson, S.M., T.H. Burkhart, Rice Drying Cracking Versus Thermal and Mechanical Properties, ASAE May, 1972.
14. Thompson, R. A. Dryeration-Better Corn Quality with High Speed Drying, Cooperative Extension Service, Purdue Univ., 1966.
15. Dachtler, W. C., Research on Conditioning and Storage of Rough Rice and Milled Rice, Agricultural Research Service, USDA, 1959.
16. Esmay, Merle L., Agricultural Mechanization in Developing Countries, p 135-175.
17. Steel, Robert G. D., Principles and Procedures of Statistics, McGraw-Hill Book Co., Inc. London 1960.

—上接第 61 頁—



圖(24) 穀物乾燥層深度與時間關係



圖(25) 穀物乾燥效率與水分含率比

(未完待續)