

新北市立鶯歌陶瓷博物館

自行研究報告書

「探討柴燒對環境的影響及改善對策(續論)」

巫漢青

Han-Ching Wu

中華民國一〇八年十二月

探討柴燒對環境的影響及改善對策(續論)

目次

摘要

壹、緒論

一、研究動機與目的

二、研究範圍與限制

三、研究方法

貳、探討陶藝柴燒的現況

一、臺灣現代柴燒的現況

二、柴窯結構與特性介紹

三、木材燃燒面面觀

四、柴燒煙霧對人體健康造成的危害

五、柴燒煙霧對生態環境造成的影響

參、研討可行之節能減碳燒程與改善對策

一、預防與降低燃燒衍生物的發生

二、調整可影響效能之變動

三、調整煙囪的結構功能

四、增設有效的輔助裝備

肆、結論

關鍵字詞 柴燒、柴窯、環保柴燒、窯爐結構

摘要

本論述主要針對陶瓷藝術領域作品燒成處理方式之一的柴燒模式，進行時所產生的濃煙對環境空氣污染情形，以致於延伸探討如何針對窯爐結構缺失改進和周邊硬體設施輔助結合及技術操作方式來改善空氣污染程度，冀期有效呈現(建立)各種控制措施之可行性和有效性，以茲削減煙霧的產生，朝向空氣品質改善之目的，從友善環境概念孕育出發來執行合理可行的生態柴燒策略與方法，並以珍惜資源永續生態理念運作。

Abstract

The thesis mainly indicates several methods to solve wood smoke related issues, which caused by burning woods while making ceramic artworks, because burning will produce serious wood smoke and pollute the environment profoundly. Consequently, the essay will extend the discussion on how to improve the structure of the kiln and the auxiliary hardware installation with technical methods, in order to effectively present or establish the feasibilities. Accordingly, the article will aim for achieving air quality criteria by cutting down the creation of wood smoke

and cherish the resources of sustainable ecology. To create a friendly environment, the concept should implement from adopting reasonable and feasible ecological firewood strategies.

壹、緒論

近幾年來，臺灣在環境保育及土地開發上出現了不少的爭議，一則極力主張環境的保護，倡導保存土地的原貌對環境生態的重要性，另一則主張是為了維持臺灣經濟的成長，須對土地進行適當的開發，以發揮土地的最大效用。然而，在土地開發上，卻又未能有效的規劃掌控人為的過度開發使用與踐踏，致使臺灣地區長期受到環境污染與破壞，這是眾所皆知的態樣，因而在環境保護觀念的推展下，促使大眾逐漸的了解資源回收與再利用的重要性。透過回收拆除分解後就可以直接燃燒產生熱能利用，然而在燃燒處理過程之中，所產生的濃煙造成空污問題，以致於如何處理排放監測空污等相關問題，亦成為各地方政府的難題。而隨著國家政府對資源環境越來越多的關注，作為高能耗的陶瓷工業，環境保護與節約能源勢必成為我們現階段該努力改進的重要方向。¹

一、研究動機與目的

友善環境思潮在世界各地興起，人們對於資源再生、永續利用與綠色環境保護的概念日益重視，許多結合友善環境理念的產業亦應運而生；即便是經營

¹ 環境教育資訊網 <http://eeweb.gcc.ntu.edu.tw/topic/protect/book13.htm>

已久的傳統產業也開始關注其與環境之間相互的共生關係與不可分割性，甚至更多具先進環境保護理念的知名事業集團，亦早已將友善環境理念落實至其企業文化與產品之中了。

筆者在新北市立鶯歌陶瓷博物館(以下簡稱為陶博館)與陶藝圈內各地執行柴燒業務和創作時，卻不時感受到柴燒業務執行和「環保、節能減碳」政策，產生些許的矛盾與衝突現象。針對此一情況，也嘗試做了一些調整和改善實驗，並且曾經在業務執行研析報告「陶博館穴窯之燒成問題與改進措施」中提及問題點，惟在做進一步探討之際，該論述評量人員卻給予以下建議：

『…不要將「環保」與「節能」作為述求，只需務實針對陶博館穴窯的燒窯歷史、歷程、改進、結果等進行說明即可。如果納入「環保」議題，燃燒所產生的煙塵問題將成為必須被探討的對象。況且現在許多陶藝家之所以使用柴燒，主要是追求燒成效果；如果要強調環保與節能，則應該儘量完全燃燒，避免追求強還原氣氛。』

因而針對上述建言；筆者亦曾納悶為何不能正視問題點，雖說其所涉略的涵蓋面與深度探討，會是一個頭痛且難以整理出個所以然的完整報告，但也總得有個開端與頭緒吧！再說陶藝燒製技術中，本來就有還原、氧化燒之分別；來呈現作品質感色澤效果。若是僅顧及環保問題而硬要將還原燒從陶藝界燒製技術中屏除或片面制止，似乎是很難的一件事情。與其消極面對不如積極處理來得妥當些，因而繼業務研析報告之後，本文接續要探討的議題；即是柴燒陶藝從業者，在呼應資源永續環境保護議題的同時，如何將友善環境理念導入柴燒領域，透過瞭解柴燒原理變化與窯爐的結構調整及搭配周邊硬體設施的衡量操作

手法，直接或間接地思考與面對的課題。其實，這也是減緩對環境的污染程度和邁向節能減碳標的之必然途徑。當然，在陶瓷產業領域來看，其層面包含甚廣，舉凡陶瓷工藝之應用工序皆涵蓋於其中；例如從陶土取得、過篩、練土、養土、成型、配釉、原料處理、木材取得、燃燒作業、燒成處理、包裝材料、運輸作業…等等，以致於處理流程、工作場所的環境評估、軟硬體設施及周邊輔助器材的建置、能源取用、水資源回收、廢料回收再利用或是結合創作理念之可行性等，在在都說明著每一個環節皆須從友善環境的概念裡，重新反覆地思考確認、再設定與再出發。而檢視陶藝界目前正在興建與服役工作的柴燒窯爐，大多數在節能減排議題上仍無法符合綠色環保的要求與期望；雖說更新與改造需要甚多進程與時間，但是，我們必須在觀念想法上，必須先實施灌輸培育既定的教育理念紮根，此即是本論述最主要的目的。

二、研究範圍與限制

本論述的部分採證研究範圍在於陶博館銜接後方陶瓷藝術園區內，規劃出一隅作為陶瓷教育展示體驗空間—火廣場；羅列包括有柴燒穴窯、蘇打窯、瓦斯窯、四角窯、樂燒窯、迷你土窯和國際駐村研習中心結合。陶博館成立初衷是為了延續傳統有效利用這些窯具設施，讓陶藝愛好者共同切磋學習研討相關柴燒技藝，培養窯燒團隊分工合作模式之建立，使硬體設施發揮其最大的效益，同時也希望為陶藝界培育出技藝人才、窯燒活動執行研究方案及燒成技術

實務經驗之紀錄資料累積，進而推廣柴燒之美，讓土與火的完美結合創造出陶藝新境界。也因為如此，陶博館自民國 97 年起嘗試以另一種實驗模式「開放申請」使用柴燒穴窯，經由統計結果顯示，在逐年維修調整的過程中，申請使用的口碑與窯數逐年攀升(圖 1)。惟在專業人力管理欠缺與逐年調降預算、維護經費拮据的情況下，亦隨著硬體設施在經年累月使用下，窯體膨脹收縮推擠變形走位、窯身中段拱型窯磚掉落等因素考量下，不得不約束執行率而將措施調整緊縮，直至民國 105 年 9 月中旬止，終告一段落。然而，其歷年來執行機能調整與周遭環境的變動現象，透過觀察、調整與紀錄資料的累積，冀能做為

臺灣柴燒陶藝發展的紀錄與日後相關窯爐(指其他窯具設施)維修調整之部分參考資料或案例。

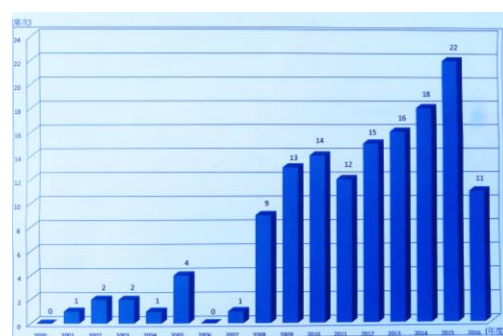


圖 1.陶博館穴窯執行窯燒數統計表

本文所要探討的「柴燒陶藝」，範圍並不是在時光上，所謂的「古代」和「現代」之分；也不是地域上，「國內」和「國外」之別，因為自古至今，不管國內外皆是如此，在窯內燒製陶瓷材料的過程中，一貫使用的主燃料是薪材；而人們也總是認為燃燒木材時，必定會產生冒煙情況似乎也是司空見慣、理所當然之事矣。然而，我們要探討的標的不是它燒成作品結果如何...，而是燒製過程中窯內氛圍的掌控技術，這其中既有所謂的氧化焰和還原焰之差別；

「氧化燒」即是空氣助燃量供應大(多)於薪柴燃燒所需助燃量情況下，呈現正常燃燒之藍火焰或無焰稱之，相反的，在空氣供應小(低)於薪柴燃燒量情況下，燃燒不正常而冒黑煙，呈現紅、黃火焰的情況，即所謂的「還原燒」。常態之下，要燒「還原氛圍」；又要讓煙囪不冒黑煙，對大部分的人來說，這般技術似乎是很難駕馭控制的。

三、研究方法

近二、三十年來，縱觀臺灣現代柴燒陶藝發展的情況與現象，不論是傳統窯場，或是近幾年來成立的柴燒個人工作室，投注在現代柴燒陶藝的心力與日俱增。而筆者從大學時代便投入陶瓷領域，因緣際會輾轉來到陶瓷博物館接手管理穴窯柴燒業務長達十餘年，對於臺灣現代柴燒陶藝亦多所關注。有鑑於環保意識抬頭，生存在這個美麗的地球上，每個人都有義務去維護它原有的樣貌(生態環境)，因而想在執行窯燒業務的同時，藉由工作之便現身說法，將執行心得、觀察點滴訴諸筆墨和同好分享，但又惟恐個人所學與片面的體驗觀察、紀錄整理有所欠缺而造成偏頗之疑慮，因而本著初衷着手針對陶藝界柴窯窯燒實務、窯具硬體設施搭配及結構原理之資料蒐集彙整，其中包含理論、論文、期刊及著作等文獻，做為撰述參考的基本資料，並加以整理歸納、佐證探討，朝向主旨標題所要解決或改善的方法為標的，俾利於陶藝界在執行窯燒業務之際，能斟酌衡量行為與條件對周遭環境的影響程度，當然，更期盼的是「拋磚

引玉」，而能獲得在此一領域執行相關活動的人們互通有無，來維護改善我們的生活環境。

貳、探討臺灣陶藝柴燒的現況

一、臺灣現代柴窯的現況

臺灣曾經幾何西風東漸，逐漸受到國際現代柴燒陶藝創作發展的推波助瀾之下，加上部份陶者引進鄰國日本的柴燒思潮影響，於是乎吸引了一批陶藝家投入現代柴燒創作行列，早期的做陶之人先後在苗栗地區構築了「漢寶窯」和「華陶窯」，追求柴火落灰的自然效果，並掀起一股找回傳統之風的民藝風潮。此乃民國 59 年至 75 年間之事，然而，就在現代柴燒陶藝逐漸影響傳統窯廠轉型之際，傳統柴燒窯卻先後被四角窯、隧道窯所取代，當時被工業界視為不合乎經濟效益的生產工具。與其說是「經濟效益」考量；倒不如說是「環保議題」來得更貼切吧！因為早期這些生產的硬體設施窯具之燃料是使用薪柴、煤炭、重油和煤油，燃燒時所產生的濃煙微粒勢必對環境保護造成極大的衝擊。故在 60 年代禁止燃燒生煤與禁止採礦法令頒布後，導致北投當地窯廠外移，「大屯燒」、「北投燒」成為絕響；加上電窯、瓦斯窯的便利普及化，更是讓鶯歌的四角窯數量大減，「柴燒」近乎絕跡。接續在民國 76 年至 89 年期間，可謂是「風起雲湧」時期，全臺在陶藝協(學)會、個人工作室、一校一特色、藝廊個展、美術館聯展、藝文單位的企劃展催促下，加上媒體的大肆報

導，全國的柴燒窯爐至民國 98 年止，統計約有 154 座窯(含拆除)²；而陶博館也在民國 77 年倡議興建，直至民國 89 年 11 月 26 日方才興建完成主體的部分。在開館的同時，既已擁有一座約 1.5 立方米的柴燒穴窯（內容積尺寸約 450*350*236 公分；圖 2），是由竹南蛇窯第一代創辦人林添福師傅和第二代窯主林瑞華先生所建造完成。後因窯體受風吹日曬雨淋及高溫熱脹冷縮且長期操作使用(16 年間；139 窯次)、造成窯體結構自然耗損(窯磚掉落、磚裂、間縫增多加大、材料變質膨脹走樣、窯磚位移、窯體變型...)，故乃於民國 106 年 7 月拆除重新構築一座容積經實測約為 2.9 立方米的柴燒穴窯（圖 3）

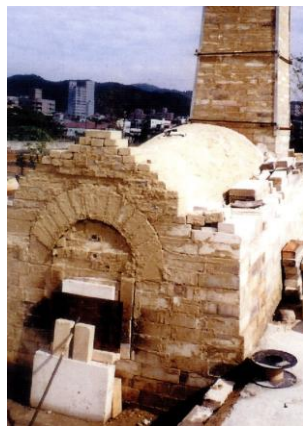


圖 2.陶博館穴窯(已拆除；圖片引用臺灣的蛇窯，頁 104)



圖 3.陶博館新建穴窯
(2017.08.03 攝)

臺灣現代陶藝柴燒由初期的模仿、探索學習階段，發展至今已逐漸地形成一種不同的特色風貌呈現。且近幾十年來臺灣柴燒陶藝發展迅速，關心與投入的人越來越多，窯爐數量也驟增，已經到前有未見的地步，而且仍在繼續的發展中...，就如同陶藝家廖禮光在其論述「1982-2009 年臺灣現代柴燒窯爐之調

² 《1982-2009 臺灣現代柴燒窯爐之調查與研究》，頁 38。

查與研究」，第三十五頁中所提及：

「臺灣現代柴燒陶藝的發展，從現代柴燒所使用的現代柴窯數量來研究，是可以看出臺灣柴燒的發展與軌跡。從 1982 年漢寶窯完竣算起，至今還不到三十年，由 1984 年華陶窯成立，至 1999 年鄧淑慧年統計臺灣現代小型柴燒創作窯約有 20 座，至 2003 年時約有 35~40 座；2002 年賀豫惠、葉相君、林明卿所撰的〈柴燒之美在苗栗〉中提及的苗栗地區已完成 14 座柴窯；2008 年 5 月出版的《臺灣的蛇窯》一書中，其調查結果為：「新建的小型柴燒創作窯目前全台約有 70 座，屬橫焰式窯爐的有 31 座。」至 2009 年 6 月止，筆者的統計已經超過 149 座以上，且調查中也極可能有所疏漏，同時也還有一些柴窯正在陸續的建構之中，也有不少人正籌畫準備構築柴窯當中。」

另外，根據東海岸文教基金會串聯在地、全臺及國際柴燒創作者，舉辦為期近一個月(107 年 8 月 4 日至 107 年 8 月 30 日)的「2018 花蓮國際柴燒藝術祭」活動(圖 4)，其在文宣稿上也如此這般描述

著：「臺灣目前約有 500 座柴燒窯坐落於各地，近年來臺灣的柴燒作品，也在國際間掀起一股玩賞和收藏的熱潮，足見國內柴燒藝術發展的成熟實力。」³

然而，現今國際環保團體在鼓吹勵行節能減碳的



圖 4.2018 花蓮國際柴燒藝術祭活動文宣

³ 廖禮光，〈1982-2009 臺灣現代柴燒窯爐之調查與研究〉，頁 41。

當下，陶藝圈內針對解決空污的問題，卻依然沒有更精進有效的做法，既使有也只是鳳毛麟角、冰山之一隅罷了(圖 5)，就現實層面上來看，不單是設施裝備的金額昂貴；不然，就是某種特殊材料或專業技術上無法解決的擾人問題。其實，在執行面上的某個階段；即使金錢無法解決時，亦可用操作技術來換取解決問題點所在。針對此一部分則保留到第三部分「節能減碳燒程與控制對



圖 5.三層窯的周邊設施--局部
(2017.07.26 攝)

策」來討論之。我們從一些陶藝家或藝評家在報導評論「早期的柴燒陶藝」和「現代柴燒陶藝」的差別性為何時，以東方或臺灣這個區塊來看，早期柴燒是以生活實用市場為主要考量，物件處理是以掛滿釉、不裸燒(不沾灰)、產品規格化、色澤力求一致性的大量生產型態在經營。這種情況和現代柴燒的呈現模式則正好相反；是以強調個人創作風格、不施釉或施釉沾黏灰(裸燒)為主的型態，顯然這兩種柴燒是截然不同的思維與處理方法。⁴而現代柴燒陶藝的內容重點幾乎全放在敘述創作理念、窯變作品等議題上居多，或是用某種材料加以技術塑型和最末段燒製完結呈現陶瓷藝術上著墨；而非柴燒執行時所產生的正、負面影響層面來作探討！在這裡我們可以從一位資深的陶藝家在某家報章雜誌中

⁴ 洄瀾網 <https://www.poja.com.tw/news/life/2018-06-19/11243.html>

這般引述著：「現代柴燒陶藝」，並不是廣義上所謂「用木材燒成的陶藝」，它是一種新的燒陶和做陶的觀念。在此，木材不止是燃料，它更是一種「媒材」，由它所產生的「效果」，是柴燒藝術中所追求和評賞的重要部分。它與過去的舊柴燒雖然都使用相近的窯爐和燃料，卻有著完全不同的作法和理念，尤其在審美的角度更是迥然不同……⁵。其僅強調材料上的使用觀念和最末階段美的呈現，可說是一種片面、狹義的正面利益，卻罔視了負面的影響。極少數陶藝家或評論家在論述中評擊柴燒行為對周遭環境所造成的影響層面做探討分析，因為，大多數的人總是認為在這燒製技術操作過程中，或多或少都會產生煙霧和碳素，是在所難免的情況…。而且「褒」與「貶」之間，人們總是比較能夠接受前者之說，後者之言似乎也略帶有忠言逆耳、自討沒趣、詆毀誹謗…等意味，也因而避之不談。再說現代柴燒，從各方面來看它與過去的舊柴燒，雖然都是使用相近的窯爐和燃料，卻有著完全不同的想法、作法和風格呈現，尤其在審美的角度上更是截然不同；有趣的是這種過去被視為粗糙的做法，但在近半個世紀以來才逐漸地被啟蒙釋放出來，時至今日，做陶人反而從這種原始和粗獷的風味之中得到更真實恆久的精神寄託。雖然，臺灣在柴燒創作的領域起步較慢也較保守，不過近幾年來投入柴燒的陶者與日遽增，研討和賞析的風氣也漸開，但在許多的環保觀念及操作技術都急需被加強釐清、提升和傳

⁵ 吳水沂，〈臺灣現代柴燒陶藝的探討與柴燒創作的要素〉，《臺灣工藝》季刊第一期，1999。

播。⁵

二、柴窯結構與特性介紹

柴燒窯爐是一個從事柴燒陶藝創作者，必須花費時間與精神去瞭解的硬體設施。它脩關創作者在火、形、色的最終端意念表達之呈現。所以，我們有必要確切地瞭解柴燒窯爐的結構與特性，尤其是會影響到節能減排、環保議題方面的相關問題。燒窯的實際操作與掌控上有幾項重點須特別留意的地方，例如：升溫、降溫的速度、窯內、室外空氣流通量與木材量的燃燒狀況、冷熱空氣進入的多寡與進氣孔的調整、粗大與細小木材的搭配選用、積炭的運用與排除等等。柴窯的組成架構一般分為四個部分：火膛(即燃燒室)、窯室(即燒成間)、煙道、煙囪(附錄一)。燒窯的原理則是：木材於火膛中燃燒，其產生的火焰熱度、灰燼漂流經過窯室間每一處所，對於擺在窯室間的坯體產生作用與效果，再經由煙道煙囪逕行排出。因此窯的設計重點必定是要有利於燃燒(包括升溫和保溫)，讓熱能得以充分有效運用。⁵當然，窯壁的厚度也會有所影響，但絕不是單純的窯壁厚度數據而已，而是要能夠達到保溫蓄熱的功能外，它還必須要能夠斷絕熱能傳導流失，故僅需附加一層輕質斷熱磚即可，並在間縫中用耐火綿加以填塞密閉，又窯磚的品質也是主要考量原因之一。俟這兩個問題都解決了，基本上熱能就能夠保留在窯內，溫度也就可以掌控上升，那熱能當然可以發揮出其效率且為我們所利用了，至於在操控細節上，我們亦將其保留到

後面再來詳述之，因它與其他操作環節又有直接或間接的關聯性。接續要能夠讓火的熱氣流經由煙道路徑順暢排出，若少了煙道煙囪，熱氣不能獲得調節而無法產生對流；或煙囪太短太長，也會影響到空氣對流與拉力的速度，溫度就不可能燒得上去。這股熱對流的速度掌控則是由煙囪擋板來控制拿捏，當擋板推(切)入煙囪時，煙道熱氣出口斷面積減小，此時煙囪末端出口流速加快壓力則變小。但依各窯條件之不同，擋板之調節比率與流速之互動組態皆需依個別狀況進行多次測試；再從實驗值與經驗值中建立數據資料庫以作為後續窯燒參考依循。

窯的建構不單純只是技術問題，窯的組裝型式和造型作品擺放更決定了落灰與火的路徑，因而也奠定了火痕方向性與窯火風格。柴窯窯性的掌握，除了駕馭順應之外，不當的設施環節設計將導致窯燒效果不彰，溫度燒不上去，耗費人力、蓄溫不易浪費能源等缺憾。燒窯與燃料方面：燃料木材，最好能在燒窯前三個月至半年內準備就緒，因為木材的來源是個很重要的問題，這包括供應的穩定性，品質的適切度，運輸，搬運的考量等等，許多人比較關心木材的種類，以為相思木或松木就可以造就特定的落灰色澤。其實，每一樹種有其不同的成分特性，更何況燒窯成效的因素太多，樹木種類的影響力應該不致於太大，僅是成分影響呈色與效果而已，倒是木材的品質，所能產生火力熱能才是應該要求的，例如木材的密度比重，長短粗細，乾燥程度等，燒火的各個階

段，都應有其不同品質需求的木材。目前時下大部分所使用的木材大都是來自製材所(鋸木廠)裁掉的廢木料或是裝潢廢料，而且不忌諱使用任何材種，只要品質合格就可以。選用雜木廢料，原因在於環保問題以及成本問題。臺灣地區亦常有使用漂流木的情形，木材品質的選取常因人而異，每一次選取部位都有它特別的作用，例如：粗大(較重)的木材可用來當作蓄熱的基礎，細小(較輕)的木材燃燒速率高(快)，升溫快；軟質木放熱比硬質木快，為升高窯溫重要因素，松、樅樹、檜木等，都是最佳燃料，高溫投柴較易揚起灰燼。提及廢木料的選擇使用，其實，廢木料表面因各種木料加工手法，附著許多異材質，包含：塑膠、油漆、鐵釘等多項材質，加上廢木料中各種防腐處理材在空氣中燃燒其最大重量損失峰值之溫度位置，隨著藥劑留存率之增加而呈現降低趨勢，其溫度範圍介於 307.46~350.98°C之間，發現鉻化砷酸銅 (CCA)⁶_{註一} 處理材中之銅與鉻會殘留在焦炭中，而砷成分則會隨著燃燒溫度的升高而溢散於氣態中，空氣中氧含量愈多則釋出量愈多，其所造成的毒害亦愈大⁷。故廢木料異質物燃燒後是否對環境產生不當影響，值得評估。

⁶ 註一、鉻化砷酸銅(Chromated Copper Arsenate, CCA)是由鉻、砷所組成的水溶性木材防腐劑，再透過加壓過程注入木材中，用來防止木材腐敗，並避免木材遭受蕈類、黴菌及白蟻等的危害。而經鉻化砷酸銅處理後的木材，會因為氣候、雨水或土壤酸度等因素，釋出砷、鉻等物質，而對人及環境生態造成風險，民眾接觸鉻化砷酸銅處理後的木材，有可能直接吸入口中，或透過皮膚接觸而進入體內，有潛在的危害風險。(摘自環保署全球資訊網)

⁷ 李鴻麟、夏滄琪、許富蘭、林勝傑(2005)。《新型水溶性木材防腐藥劑對木材保存性與燃燒性之影響》。台灣林業科學 20(2):139-56。

柴燒是一項具有高機動性、複雜性、專業性及勞動性的工作，只要大原則掌握住，其他的呈現就視為隨機性的效果，雖說柴燒陶的特質在預期效果之外，本來就不具有精密準確性，出現某些意外的精彩效果是被允許或是被追求的。⁵然而，若以站在柴燒工作者立足友善環境理念導入柴燒陶藝的過程中，面臨最大的挑戰便是如何調整窯具設施；乃至創新與設計出一個符合綠色環保需求的柴燒窯爐，並且要配套一系列符合陶瓷藝術家們多樣創作需求的燒製程序。惟檢視陶藝界目前正在興建與服役生產的柴燒窯爐，大多數在節能減排議題上仍無法符合綠色環保的要求與期望，雖說更新與改造需要甚多的經費與進程時間，值此，我們必須在觀念作法上，先實施灌輸培育既定的教育理念紮根才是正道。

三、木材燃燒面面觀

在瞭解窯體結構設施之後，接續，讓我們來探究設施能源的生成與產生污染源的空間，即是窯體最前端之火膛處，火膛燃燒木材產生熱源來改變被燒製物件的功能性與特色效果。木材或生質材料的燃燒，是人類最早使用的能源形態，它在人類文明的演進過程中有著舉足輕重的地位，也是諸多科技和工藝發展的奠基石。然而，在人類生活演進史之中，眾多的能源燃燒殆盡所衍生出對地球整個生態環境造成的危害影響，可說是有過之而無不及…。當然，木材和其他生質材料的燃燒可以具有建設性的，也可以是破壞性的，在此節能減碳的

時代，木材的燃燒可以負面地增加碳排放，也可以正面地提供再生性能源，端看人類如何善用知識結合技術來巧妙應用了。⁸

首先，我們先從木材燃燒的要件來看，所謂的燃燒是指物質在空氣中因快速氧化作用而產生光與熱的現象⁵，而空氣是指地球大氣層中的氣體混合。它主要由 78%的氮氣、21%氧氣、還有 1%的稀有氣體和雜質組成的混合物。然而，空氣的成分組合也不是固定的，它會隨著高度的改變、隨著氣壓的變化，空氣的組成比例也會隨之改變。⁹從燃燒的發生包含了四個缺一不可的要素；即燃燒四要素：燃料、氧氣、熱源及連鎖反應，燃燒過程的延續與擴展，還需要一連串複雜的物理和化學連鎖反應所組成來維繫著交替作用，它的影響因素也十分地複雜⁵，加上木材的異質性使它的反應機制和中間產物為何而來至今仍無法完全明瞭，相形之下，若要全盤探討影響木材燃燒的因素也就相當困難了。在燃料方面，可為固體、液體、氣體或蒸氣；大部分為有機物⁶。在氧氣方面，燃料燃燒需要有充分的氧氣，而空氣為主要之供氧源，高溫燃燒時氧化性物質中的氧，亦可能成為氧源。故燃燒是燃料與氧分子間的高能分子碰撞進行，若燃燒物周圍氧氣濃度充足且單位時間的供應速率充分，使其在焦炭表面的擴散率夠大，則可引燃物質、升高火焰溫度、增加燃燒速率而使燃燒擴展延續進行著。

⁸ 黃清吟，林業研究專訊 Vol.16 No.6 200920，頁 20

⁹ 維基百科，自由的百科全書 <https://zh.wikipedia.org/wiki/燃燒>

¹²另，在空氣與燃料進行燃燒時，化學惰性氣體氮氣稀釋了活性氧，並帶走大部分的熱量由煙囪排出。因此，若能增加燃燒中的氧氣濃度，則可降低排氣熱損失、增加傳熱效果、能達到節約能源、降低汙染排放...等優點。¹⁰

有關燃燒模式的分析；又可分為宏觀模式與微觀模式來了解燃燒結構(組成)。在熱分析之中，若使用氣體中氮氣成份增加則其吸熱峰及放熱峰向較高溫移動，而氧氣成分增加則剛好相反。在熱能源方面，燃料燃燒須有一定的能量使其著火，而供應能量的來源可能為明火、衝擊、摩擦、高溫表面、自然發熱、過熱物件、電器火化...。加熱介質(heating medium)、加熱溫度、加熱時間、加熱條件及加熱方式等均會影響熱分解及燃燒的結果；而導火(pilot flame)有無則影響引燃單位表面積所需的熱。一般而言，揮發成份含量隨加熱速率加快而增加，而焦炭則隨加熱速率加快而

減少。在連鎖反應方面，物質燃燒時，因連鎖反應使分子解離，生成不穩定的中間生成物為氫自由(游離)基 H 與氫氧自由基 OH 的作用，維持火焰的繼續燃燒反應。且其涉及反應路徑及反應速率

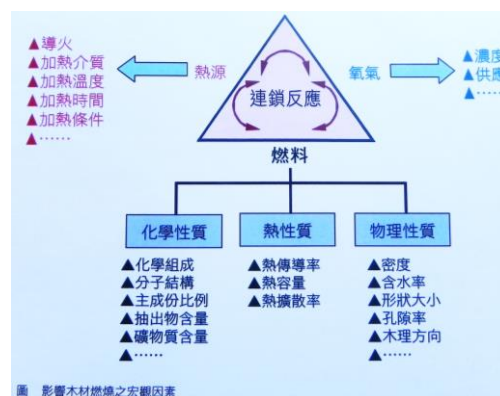


圖 6.影響木材燃燒之宏觀因素-圖片截錄自
林業研究專訊 Vol.16 No.6 200920 頁 24

¹⁰ 張育誠、吳國光、焦鴻文、簡國祥、歐陽湘，富氧燃燒技術之應用與分析，民
104.9。臺灣能源期刊 第二卷 第三期 第 323-331 頁

等屬微觀的熱動力學及化學動力學等範疇。本文僅就分別由木材(燃料)的化學、熱性質及物理性質與燃燒環境等宏觀面相來探討，並歸納出圖 6。當高分子受外部熱源加熱，溫度逐漸上升，至熱裂解(pyrolysis)溫度後產生可燃性、不可燃氣體及固體殘渣，又可燃性氣體達到燃點並與助燃性氧氣混合，便發生燃燒反應釋放光和熱。燃燒所釋出的熱量又回饋到高分子使燃燒持續進行著，一直到氧氣、熱源或燃料三要素中的任何一個要素耗竭後致使連鎖反應中斷為止。因此在宏觀面上燃燒是包含了受熱(heating)、分解 (decomposition)、燃燒(combustion)及傳導(propagation)等四個階段，而高分子一定是在凝聚狀態(condensed phase，指固體和液體)下，表面受熱發生無氧狀態的熱分解，其熱分解產物在氣相時發生有氧狀態的燃燒。由微觀的角度觀點來看，高分子的燃燒是由氫自由基 H 與氫氧自由基 OH 所引發的自由基連鎖反應。經過這些連鎖反應後，高分子的碳鏈逐漸縮短，進一步轉為甲醛、一氧化碳和氫氣等，最後燃燒生成了二氧化碳與水蒸汽。¹¹

接下來，我們將燃燒原理帶入陶瓷領域的窯燒來看，自古至今人們在操作柴燒窯爐之際，以木質燃料來燒製陶瓷時，通常會以燒窯階段(低溫烘窯、中溫蓄熱、中高溫還原、恆溫等作業期程)依實際火力大小所需來斟酌研判投入的薪材(稻殼、芒草、木柴...)燃料，一般為了減少反覆操作投柴動作，且考量燃燒火

¹¹ 黃清吟，林業研究專訊 Vol.16 No.6 200920，頁 21

力和持久性，當下便會選擇投入稍為粗大的木材，以便能夠延長休息時間、節省體力。然而，粗大的木材在燃燒之際，通常都不會得到充分的燃燒，木材的燃燒反應是一個連續式的物理與化學反應，且木材燃燒的特性有下列幾種形態呈現：¹²

(一)擴散燃燒：可燃性瓦斯分子與空氣分子互相擴散混合起燃之現象。如氫氣、甲烷、丙烷等可燃性瓦斯由噴嘴流出與空氣混焰點燃屬之。

(二)蒸發燃燒：醇類、醚類等揮發性液體由蒸發作用產生蒸氣引火燃燒，起燃後自液體表面繼續蒸發而維持燃燒之現象。

(三)分解燃燒：木材、煤炭、焦炭等固體可燃物於空氣中被加熱失去水分。再起熱分解反應產生可燃性瓦斯，起燃後由化合反應火焰維持其燃燒。

(四)表面燃燒：木炭、焦炭等物由熱分解產生無定形炭化物，在固體表面與空氣接觸部分形成燃燒帶(Zone)其燃燒常維持在表面；表面燃燒通常不帶有明顯之火焰，有時因不完全燃燒而形成一氧化碳火焰。而緻密度較高的硬木質其炭化層的氣化屬固態非均相燃燒其反應速率較慢，但熱能釋放量比前段生物質氣相燃燒還來得更高。

上述木材燃燒的幾種形態特性中，也都會同時、交替或單獨存在(發生)。

故先前提及投入粗大的木材，依常態研判當以表面燃燒的情形，較為常見；表

¹² 薛瑞芳；陶瓷製作技藝訓練班；燃料與燃燒/講義 p.2

面燃燒通常不帶有明顯之火焰，茲因不完全燃燒而形成一氧化碳火焰氛圍，因而產生濃煙與灰炭。同時，再讓我們從物理、化學角度再來切入分析瞭解燃燒過程的種種變化情形；木材是由纖維素、半纖維素和木質素組成的天然高分子化合物，它的燃燒也依循高分子化合物的燃燒過程來進行，但由於木材的異質性使它的燃燒特性較一般均質性的高分子化合物更為複雜。其實木材是無法直接燃燒的，它是在加熱後的熱分解過程中，先產生揮發性氣體，在適當情況下方可引燃。若燃燒熱足以維持熱分解反應進行著，那麼燃燒便可持續到木材燒至灰燼為止⁸。一般而言，木材的熱解離反應(固態轉變為氣態)，乃依溫度的區間變化而有所不同，木材受熱後開始升溫，當溫度高於 100°C 時，內部所含水份開始以水蒸氣形態逸出，當達到 180°C 時，則產生可燃、揮發性氣體如一氧化碳、甲烷、甲醇及其他不燃性氣體如二氧化碳、甲醛和液體(高燃點的焦油)及醋酸等成分而開始分解。在 200~260°C 時呈現半纖維素，而半纖維素與纖維素均屬多醣類，其熱分解產物不論來源均甚相似。但與纖維素相較，半纖維素的熱穩定性較差，最易受熱反應，其熱分解後所產生的不燃性氣體較多，焦油較少。故纖維素次之，也由於半纖維素屬高分子的鏈狀結構，具有非結晶性的特質，使其易於水解產生組成醣，也因此影響了轉醣作用，使半纖維素熱分解產生左旋葡萄糖的量不如纖維素多。雖然纖維素及半纖維素熱分解過程中均產生水和酸類，但木材熱分解所生成的醋酸大多來自半纖維素。其中聚木醣因屬

較易水解及脫水反應的五碳糖，熱安定較差。另外，木質素在分解時為放熱反應，含有較多的焦炭產生，所以是最不容易有反應的部分。¹³

其後它的主成分和副成分也因熱性質不同陸續交互影響發生一連串的脫水、氧化、分解及解聚等熱分解反應，產生種類繁多的中間產物，最後轉化成固體殘渣、不燃性氣體與揮發性氣體及焦油。在氧氣供應充足的情況下，固體殘渣與氧作用產生無焰燃燒 (glow)生成焦炭，揮發性可燃物質則與氧作用進行有焰燃燒(flame combustion)，二者產生的光和熱可再回饋至木材表面，使熱分解和燃燒周而復始的持續進行著，而不燃性氣體釋出後則冷卻變成煙霧。木材熱分解反應與溫度、壓力及加熱速率都有直接的關係，可由反應動力學、熱分解途徑及生成物的數量與性質等研究來瞭解。木材的熱分解以碳-氧鍵(C-O bond)的斷裂為主，在 250°C以上熱化分解急遽進行，可燃氣體大量釋出，與進入窯內的氧氣產生強烈反應作用--着火燃燒；然而，在 650°C以下碳 - 碳鍵(C-C bond)的斷裂現象變為極為不易。¹⁴

故木材的加熱分解反應過程分別在 200~260°C半纖維素、260~310°C 纖維素及 310~400°C木質素三區間的綜合表現，而三個主成份的熱重分析比較，以木質素的分解速率較 α -纖維素及全纖維素(纖維素及半纖維素；約佔有約 75%)慢，但發生的溫度較全纖維素稍低。而木質素出現使得固體殘渣量增加，

¹³ 黃清吟，林業研究專訊 Vol.16 No.6 200920，頁 22

¹⁴ 黃清吟，林業研究專訊 Vol.16 No.6 200920，頁 23

則為其主成份交互影響所致。¹¹ 整體而言，木材的熱重損失型態與全纖維素最為接近，與木質素則差異較大。木材纖維素熱分解過程中，因為碳-氧鍵的斷裂而引發兩個相互競爭的反應。第一個反應是在較低溫度時(< 300°C)纖維素分子內環狀的葡萄糖單體內分子鏈斷裂，發生分子內脫水反應(intramolecular dehydration)生成脫水纖維素(anhydrocellulose)，之後產生 CO、CO₂、CH₄、H₂O、其他揮發性氣體，以及焦炭。第二個反應是在較高溫度時(> 300°C)纖維素因為解聚(depolymerization)而發生轉糖作用(transglycosylation)以及左旋葡萄糖生成反應(levoglucosan formation)，即纖維素中任意位置的糖苷鍵(glycosidic linkage)發生斷裂產生葡萄糖，其後葡萄糖脫水生成左旋葡萄糖，再繼續脫水、去羧、交聯反應等裂解作用產生包含 CO、CO₂ 等氣體的氣態部分、包含揮發性的醋酸、甲醇和焦油部分以及固體的焦炭部分。在加熱速率極緩時傾向於不規律的解聚反應，使焦炭的產量最大化，加熱速率極快則傾向產生氣體、揮發性物質及灰燼，而無焦炭產生。一般木材的熱分解介於此二極端之間。^{8、10}

當溫度持續上升至 400~500°C 時，木材成分完全解離，以至於燃燒更為激烈。燃燒產生的溫度最高可達 900~1100°C；木材燃燒時，表層逐漸炭化形成導熱性比木材低(約為木材導熱係數的 1/3~1/2)的炭化層。當炭化層達到足夠的厚度並保持完整時，即成為絕熱層，能有效地限制熱量向內部傳遞的速

度，使木材具有良好的耐燃與持溫作用。木材在風乾後之熱值約 16MJ/Kg(百萬焦爾/公斤)，綠色木材之熱值約 8.2MJ/Kg(百萬焦爾/公斤)。針對柴燒最主要的「燃燒熱」：即是物質與氧氣進行燃燒反應時放出來的熱量，烴類燃燒反應會生成 CO₂ 和水，並釋放出熱能，另有不完全燃燒之 CO。而木材之化學成份是由碳(47~53%)、氫(6%)、氧(40~44%)、硫(0~1%)、氮(0.1~0.2%)等物質轉換所組成。另外，引燃物的效能和燃料接受引燃能量的能力關係密切。木材能被引燃的靈敏度受含水率、密度、形狀大小及孔隙率等物理性質影響。¹⁰

在所有物質理性質中，木材含水率是決定引燃的先決條件。含水率在是在某個限度 (40%)以上就不易引燃，因為導火的熱能完全用來蒸發水分。木材尺寸增大，所需要的熱傳或質傳時間就增加，而大型角材燃燒後在材面堆積的焦炭層，可形成隔熱層阻絕未炭化木材與氧氣接觸，使燃燒中斷。另一方面，燃料和氧分子接觸的表面積則決定燃燒的反應速率，形狀不規則或者材面突起則較易引燃；氧氣是藉著擴散作用滲入物質內部孔洞，若其直徑夠大就可藉著對流來傳導熱能，因此木材孔隙率愈高，除了可以快速引燃，完全燒盡率也較高。木材的密度和孔隙率有很大關係，它也影響木材的熱性質進而影響燃燒性質。木材燃燒也受使用時的外在因素影響。外在因素包括燃燒時的空氣、壓力、溫度、通風和濕度等環境狀況，木材製品所使用的樹脂、塗料、染料與添加物等加工藥劑，以及作為建材時建築的結構設計、火載量(fire load)以及區劃

(partition)情形等。¹⁵

有了木材燃燒知識就可以降低它所造成的危害，例如以破壞火的四要素來阻斷或影響(控制)燃燒，或改變反應路徑來減少有害物質排放等來達到預防和補救目的；另一方面，也可以利用木材燃燒的特性來產生木炭品，再利用木炭品來進行還原作用製造效果如金銀彩等。最重要的是和其他燃料互相比較，木材的氫含量較多，一般而言氫含量越高就越容易燃燒，氮含量越高就越不易燃燒。燃燒中產生的揮發性物質也較多，加上它碳中性(carbon neutral)和可再生性的特質，使它成為環保的燃料來源。木質廢棄物或製漿廢液可在控制氧氣的情況進行部分燃燒，所生成的氫氣和一氧化碳可取代部分石化燃料，這種汽化(gasification)技術將是未來重要的發展趨勢。總而言之，在善用、節用和永續利用全球資源的目標中，木質材料的燃燒佔有其一席之地。其他尚有影響燃燒的考慮因素，包含有環境優劣條件、燃料的物理和化學性質、礦物質的種類和含量、燃燒熱性質(包括木材熱傳導率、熱容量及熱擴散率)...等。¹²也都會影響木材的裂解進行，而本文不再此贅述。

四、柴燒煙霧對人體健康造成的危害

當我們清楚知道木材物質的組成成份和燃燒時各種的物理化學變化，或許在往後燒製陶瓷材料處理流程時會有所助益(附錄二)。柴窯在燒製過程中所產

¹⁵ 黃清吟，林業研究專訊 Vol.16 No.6 200920，頁 25

生的煙霧是否能與其他污染源產生的煙霧相比呢？我們試著來了解一下，在城市中，汽車和工廠是最大的空氣污染源。郊區焚燒稻草麥稈所產生的煙霧會順著風流到農村。以往柴窯燒成雖然也會產生一些煙霧，但是由於其燒成時間有限，所以污染程度可以被忽略或不列入考量。但是，隨著時間流逝和觀念的改變，當設施數量達到某種程度的危害，或是以個案行為的加總對地球總體環境的影響角度來切入時，便是另一個探討的觀點。柴燒之不同於一般電窯燒、瓦斯窯燒是因為木材是有機物，柴燒造成幾百種化學物質的重組，又是極微細小的微粒。產生的有害物質包括：細懸浮微粒 (Particulate Matter) PM2.5、苯 (Benzene)、甲醛(Formaldehyde)、丙烯醛(Acrolein)、多環芳香烴碳氫化合物 (PAHs) (Polycyclic aromatic hydrocarbons)、戴奧辛(Dioxin)、一氧化碳 (Carbon Monoxide)、氮氧化物 (oxides of nitrogen)…。¹⁶

接續，就讓我們來瞭解柴燒煙霧中危害人體健康的化學元素有哪些及其危害程度：¹⁷

◎一氧化碳(CO)：它無色無味，產生於氧氣匱乏的燒成氛圍中。一氧化碳會令人體缺氧，當空氣中瀰漫著少量的一氧化碳時，人會覺得胸悶氣短、四肢無力。而受煙霧為害最大的當屬尚在懷腹中的胎兒和患有貧血、心臟病、循環系

¹⁶ 美國華盛頓州州政府文獻： How Wood Smoke Harms your Health, 2002, p.2-3
美國環保署對柴燒的警告 Wood Smoke and Your Health
<http://www.epa.gov/burnwise/wood-smoke-and-your-health>
<https://fortress.wa.gov/ecy/publications/documents/91br023.pdf>

統疾病以及肺病的人。

◎二氧化氮(NO_2)：它會破壞人體呼吸系統的功能，減弱人體的抵抗力。

NO_2 、 NO 以及揮發性有機化合物構成了臭氧，臭氧與水蒸氣混合後會形成酸雨或是酸霧。

◎揮發性有機化合物(VOC_5)：這種物質具有揮發性，有些元素還有毒性，在日光下與 NO_2 和 NO 混合時會形成臭氧或者光化學煙霧。且臭氧對人體的肺和呼吸系統有害。

◎可吸入的粉塵顆粒(PM_{10})：木材在燃燒的過程中，會產生固態或者是液態、可吸入的粉塵顆粒。顆粒的直徑大致上不超過 10 微米(μm)。大多數顆粒都是在燃燒過程中產生的濃縮蒸氣，例如木材焦油和瓦斯。其他顆粒還包括煙灰(未燃盡的木炭)以及未燒盡的礦物質。由於大多數顆粒的直徑都小於 1 微米(μm)，所以它們在空氣中漂浮的時間會長達數周之久。而大部分柴燒產生的粒子皆小於 2.5 微米(μm)，稱之為「微懸浮微粒 2.5」(圖

7)；即 $\text{PM}_{2.5}$ ，直徑還不到人的頭髮絲粗細的

1/28，極易進入肺泡微氣管末端，穿透肺部氣泡，

並直接進入血管中隨著血液循環全身，造成肺癌與

心血管疾病。上述粉塵顆粒一旦被吸入肺臟內(圖

8)，就會引發不適症和咳嗽。這些粉塵顆粒有可能

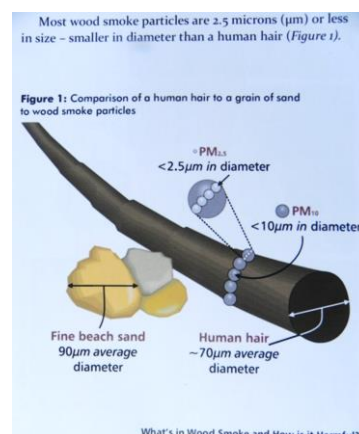


圖 7. $\text{PM}_{2.5}$ 大小與頭髮細絲相比-圖片截錄自網路

在人體肺臟中停留數年的時間，令肺臟逐漸病變甚至引發癌症。

在歐美國家都已制定了管

制條例辦法，有如下文便是譯

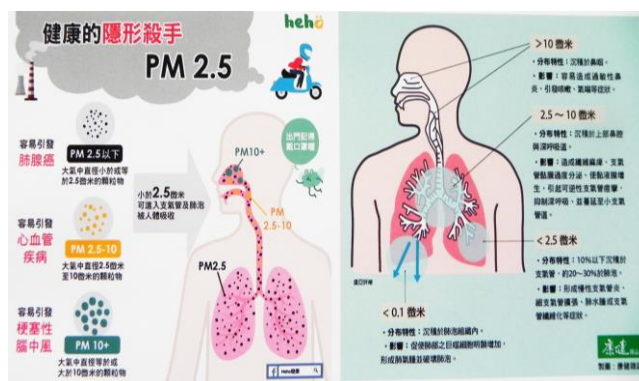


圖 8.健康的隱形殺手 PM2.5-圖片截錄自網路

自美國猶他州醫師公會與健康環境工會於西元 2015 年報告呼籲「立法禁止社區內燃燒木材」（包括柴燒烹烤食物及取暖用壁爐）。該公會依據多項長年研究數據，具體指出 17 點理由應嚴禁社區柴燒：¹⁷

- (一) 所有空氣污染源的影響程度都不盡相同，木材柴燃燒煙霧 (Wood Smoke) 是都市中最具毒性的，比汽車排污還嚴重。
- (二) 癌症的危險係數，柴燒比吸二手煙還嚴重 12 倍。
- (三) 燃燒 10 磅的木材 1 小時，釋放出的多環芳香烴化合物 PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons) 比香菸多 6,000 倍。

¹⁷ 資訊節錄自: 美國醫師與健康環境工會於 2015 年報告:
Utah Physicians for a Healthy Environment give 17 reasons to ban wood burning
<http://uphe.org/priority-issues/wood-burning/>
<http://www.monroecourier.com/21903/physicians-organization-gives-17-reasons-to-ban-wood-burning/>
<http://uphe.org/wp-content/uploads/2015/07/UPHE-wood-smoke-report-2015-pdf.pdf>
The Health Effects of Wood Smoke:
http://www.ehhi.org/woodsmoke/health_effects.shtml

- (四) 木材燃燒的化學物質在體內的生物活性比香菸持久 40 倍。
- (五) 柴燒是毒性極高的戴奧辛(dioxin)的第三大來源。
- (六) 柴燒產生的非常微小的燃燒木屑，比其他粒狀污染物更容易被吸入（吸入程度 7 倍於其他微粒）。
- (七) 柴燒極易穿透滲入鄰居家中，產生的累積濃度相當於戶外空氣的 88%（極高比例的沉積）。
- (八) 如果你聞到柴燒味道，代表你已受到傷害，因為帶有甜味的木材味來自於致命的苯(benzene)。
- (九) 最危險的空氣污染物在有燃燒木材的室內，遠高於沒有燃燒木材的室內，達 500 倍之差異。
- (十) 柴燒產生的最危險有害物質，遠高於冬季開車污染的總和（美國猶他州）。
- (十一) 一個木材窯烤爐產生的可吸入污染粒子，是瓦斯爐的 3,000 倍。
- (十二) 以現代工具燃燒木頭產生的排放物可能 10 倍於以往。
- (十三) 柴燒是唯一能將空污直接排入人們最長時間停留的生活空間中之一種污染源；他們很難散去、不均衡分布、且因為顆粒微小停留在空氣中時間更長。鄰居家戶中的濃度比燃燒源更高出 100 倍；即使整個社區的空污平均值是低的，仍有家戶中真正的「污染受害者」。

(十四) 如果你的鄰居是經常的燃燒木材者，也能依照規定於黃色與紅色警示天燒柴（美國空氣污染警示標誌包括紅、黃、綠；紅色與黃色警示天，不得燃燒木材），但在所有的「綠」天皆燒柴，你仍是沒有任何一天有清潔空氣。這是公民權(civic right) 的議題了。

(十五) 依據美國加州空氣品質法案，柴燒造成的社區健康傷害，以每燒 1 磅木材來估計，燒柴者至少要多支出超過美金 2 元的醫療費用，而鄰居卻要支出超過美金 40 元的醫療費用。

(十六) 過去人們倡議通過法案反對「二手煙」，但家戶鄰居的柴燒卻是數 10 倍嚴重於二手煙，且無法防護。諷刺的是，環境法規所保護的場所，人們不必然需要進去（如：餐廳、商店、大樓等）；但是，人們一定要停留的場所（自己的家），卻沒有法令保護免除於更糟糕的空污（柴燒）侵入。我們不讓人們在你面前抽煙，為何能容許人們將柴燒的煙飄進入你家？

(十七) 柴燒是永遠無法達到碳中和，因為每單位柴燒比石化燃料產生更多的二氧化碳，且產生的懸浮微粒對大氣及全球暖化產生更大傷害。¹⁸

五、柴燒煙霧對生態環境造成的影響

在瞭解柴燒煙霧對人體健康所造成的危害程度後，同樣的，它對整個周遭生態環境的影響又是為何呢!? 當執行者操作現代陶藝柴燒的窯爐，以薪柴燃料

¹⁸ 資訊節錄自: 柴燒之傷害 How Wood Smoke Harms your Health
<https://fortress.wa.gov/ecy/publications/documents/91br023.pdf>

來燒製時，必定會產生燃燒不完全的濃煙灰炭與消耗熱能，在現今強調環保節能減碳的時代，柴窯的存廢發展勢必會受到許多的輿論壓力影響和窯體結構調整的必然性。通常柴燒窯爐在燒製作品時，燒成時間乃依窯體的內容積大小與結構性能上之差異性而有所不同，一般而言，快者二、三天；慢者五至七天。對於燃料亦有所不同，一窯所需要的薪柴燃料，少則二、三公噸，多則達五、六公噸重，甚至更多的薪柴。臺灣現代柴窯所使用的燃料，除了使用較不具經濟效益的相思木為主燃料之外，亦有使用漂流木和枯樹枝等，大多數還是以製材所(鋸木廠)的邊材為替代考量，而之所以會選用雜木廢料，除了價錢便宜之外，主要是將木材處理過後產生無法使用的末端邊材，考量到環保問題與剩餘價值再利用也是其中的原因之一。但是，臺灣目前的鋸木廠已經越來越少了，以臺北士林洲子島地區而言，十幾年前還有著許多的鋸木廠，鋸木時所剩餘的邊材相當多，目前只剩下零星的一兩家，生產剩餘的邊材數量已大不如從前。依附著鋸木廠邊材來燃燒的柴窯，除了都會區周邊面臨了燃料來源的問題之外，在都會區以外的鄉鎮郊區，也同樣的面臨到燃料來源日漸不足的窘境。雖說全世界的柴燒工作者都有一個共識，那就是決對不會為了燒窯而去砍伐樹木！但我們也不諱言，市場上也有可能因供需的問題浮現，而有砍伐情況產生也不無可能發生...。5

臺灣傳統的窯爐走進歷史的原因，早期是因為使用生煤(石炭)燃燒產生濃

煙的問題，加上新式窯爐的燃料柴油或瓦斯之取用方便之外，對於空氣污染也是主要考量因素之一。故現代柴燒陶藝的發展除了薪柴燃料供應和窯體設施輔助功能的提升問題之外，另一個要面臨的就是環保問題。也就是燒柴窯爐在燃燒階段所產生的濃煙和塵灰，當下是一個無法輕易操作即可避免或解決的技術難題。柴窯在低溫燒造時，尚可以用瓦斯燃燒器來替代薪柴燃燒產生熱能源，但在高溫時卻必須要投入大量的薪柴來燃燒，否則無法產生出柴燒特有的效果，此時濃煙是必無法避免的必然現象。雖然也有陶藝家以較新式的方式來燒造特別處理，可以避免使用大量薪柴與濃煙的問題，但目前也只有少數的幾位陶藝家在嘗試應用與實驗，然而有些特殊的柴燒效果還是無法全然掌控。

現代柴窯在燒成後期，由於升溫與還原上的問題，必須投入較大量的燃料，以至於產生一陣陣的濃煙，這黑煙中最主要的是未完全燃燒的炭素，離開煙囪隨著熱氣上升之後，會逐漸的飄散於空氣之中，在人口較為聚集的地方，這種黑煙中未知的污染令人感到害怕，相對地人煙稀少的鄉間野外讓人看起來，則容易與炊煙或是燃燒稻草、雜木之類的聯想在一起，是比較不會令人覺得那麼恐怖。許多現代柴燒的陶藝家，在鄰居有疑義或是抗議聲中，悄悄的於入夜時才做較大量的投柴動作，或是加裝了抽煙處理的設備，甚至將原有的窯燒停止運作，於人煙較稀少的地方另起爐灶。要找尋適當地點來構築柴窯工作室的陶藝家們，其地點的選擇當然是首要的條件，陶藝家吳水沂則強調：處在現今的臺灣，柴燒陶藝家所面臨最大的問題，並不是築窯或是燒成技巧上的疑

慮，而是臺灣現代柴燒陶藝的發展，如同許多有煙囪的產業一樣，也同樣的是會面臨到環境保護的問題，節能減碳是全世界各個國家、地區方興未艾的口號與行動，柴燒陶藝卻不得不透過燃柴來創造出精彩的作品，環境保護與藝術創作上相衝突的問題，還需要一段時間來沉澱與思考，找尋出其間的平衡點。⁵

參、研討可行之節能減碳燒程方法與改善對策

綜觀上述所彙整轉載國外有關造成空氣汙染成因與影響程度，皆以人為因素居多，故控制對策針對空氣汙染物削減量必然是一個重要衡量依據的著眼點；欲達到汙染物削減目標，所應用技術則為關鍵，因此，控制技術的處理手法亦為著墨重點。以下將分別檢視窯具設施各項控制對策與做法。

在研討如何有效優化柴窯燃燒效率與控制對策之前，我們必須先了解到硬體設施柴窯有哪些熱效特性：¹⁹

- 一、柴窯耐氣候變化之承載力偏低。
- 二、硬質耐火磚窯爐結構降溫較慢。
- 三、柴窯氣密性通常較不佳，熱能損失較大。
- 四、前段升溫較慢時，土坯可省略素燒步驟。
- 五、木材燃料相較於電能與石化燃料熱值偏低。
- 六、柴灰有助熔作用，並可提供形成釉面元素。
- 七、木材特殊的燃燒吸放熱循環令窯內溫度難掌控。
- 八、若投柴節奏掌握得宜，可營造出各種不同強度的還原氛圍。

¹⁹ 窯業操作；程道腴,鄭武輝;徐氏基金會;民 87 頁 186

- 九、柴窯的燃料供給是非連續性的，其熱值供應高低起伏差異極大。
- 十、木材燃燒的固態、氣態轉換特性，使得窯內火流窯壓與氛圍變化極大。
- 十一、非強制性與非連續式供氧，供氧量不定，火流不穩，窯內溫度分佈不均。
- 十二、木材的質量密度、含油量及含水量之變動值非常大，燃燒熱值供應亦極不穩定。
- 十三、耐火磚升溫時吸收熱值；俟熱值飽和後，窯磚釋放出幅射熱有助於土燒結與釉熔。

至於在操作硬體設施柴燒窯爐時，如何減少煙霧生成或有益於降低排放量的燒窯方法，這是執行者與相關單位及管理機構所要面對解決的問題。對於執行者來說，儘管不正常燃燒所產生的煙霧是營造絕佳還原氣氛，藉以促進黏土和釉藥之間，直接或間接地發生轉變的必備因素，但是它勢必會對環境和人體健康造成危害。故必須竭盡所能地將燒製過程中產生的煙霧量減至最低(少)。

在執行面上，首先採用氧化焰氛圍燒窯，氧氣量供應充足，木材便能夠充分燃燒，如此溫度提昇便會顯得稍快些。²⁰因此，我們也可以採用以下措施步驟來改變窯爐結構減少煙霧的生成量，藉以作為「良性生態柴燒」——傳統柴窯節能減排燒成的解決或控制對策：

²⁰ 日下部正和·馬克蘭賽特(Marc Lancet)《日本柴窯燒成揭密》。香港：上海科學技術出版社。頁 309-310

一、預防與降低燃燒衍生物的發生：

(一)設計建構前之需求選項

1. 建構指標：窯爐設計力求二無(無煙、無汙染)；三省(省柴、省時、省力)
2. 窯址環境：依建窯地理位置、地形特徵與氣候條件來設定燃燒室、燒成室、貯熱集煙室(即捨間)與煙囪之火流動線、路徑比率與四個結構流通之火流口徑尺寸大小。
3. 操作功能：操作過程中所有應用資源材料，皆需達到可回收、可再生、可再利用，並依需求選定或設計附加裝置完善。

(二)窯燒前的各項考量

1. 降低陶土比熱值：依照不同的土種與釉藥，考量耐火材料、強度結構與強化灰釉變化，添加觸媒熔劑性原料(如矽灰石、白雲土等)，以掌握燒結度與成釉溫度點，是達到節省薪柴、縮短燒程、節省人力資源的有效途徑。如燒成溫度從 1280°C 降到 1180°C，燒成能耗則可降低約 30%。²¹
2. 作品的類型：依作品造型特性與尺寸大小，選擇相對應的燒成間與火流類型(例如橫焰式、倒焰式、昇焰式、混合焰式等)。亦可運用自體循環式火路熱流，而不浪費熱值與灰釉間促成相輔相成的捕捉效果。
3. 木材的分類：按照木材的種類、質量(緻密度、含脂量、含水量)和粗

²¹ 打造環保新產業綠色陶瓷將成為未來發展趨勢 <http://www.zhongaokiln.com/?thread-978-1.html>

細度做分類，以便在燒製過程中決定燃燒室的結構型式(包刮有全循環下火流式、蓄碳式、富氧燃燒²²註二、預熱式燃燒等)，做有效率的搭配應用且其影響控溫表現甚鉅。新砍伐或淋濕的木材含有大量水分，燒窯時會產生大量的水霧蒸氣，間接影響燃燒而產生煙霧，所能產生的熱能量也相對較少。

二、調整可影響效能之變動

(一)燃燒室(火膛)型態配置

1.火床：分割為大柴持溫區，中柴升溫區，小柴還原調控區。可設置左右兩側入氣口需具備預熱功能(二塊磚高度)引流九十度管狀或平行環狀以預熱空氣。亦可於上方二次進氣口，位於燃燒火束最高點(火堆 3 塊磚高 + 火流 15 塊磚高)。另外，在火床底鋪設斷熱磚減少熱流失加強熱反射。或於燃燒室牆壁頂部塗抹白色氧化鋁粉調合劑加強熱反射。

2.火柵：為燃燒提供更順暢的氣流，有助於木材充分燃燒。採雙層式，強化積碳二次燃燒，熱能完全利用，碳煙亦較少。

3.積碳坑：將入窯口火膛下方的落灰坑挖深一些，為燃燒提供更順暢的氣流，有助於木材充分燃燒。亦可為二度進氣口提供冷空氣預熱加溫區(空間)，讓窯燒區不致於二度進氣而拉低溫度，恆溫蓄熱的作用。同樣的，在碳坑

²² 註二、富氧燃燒是以高於空氣氧氣含量 (20.947%) 的含氧氣體進行燃燒，是一種高效的節能燃燒技術。富氧燃燒節能效果顯著，有效延長爐齡，有利於提高產品產量、質量，環保效果突出。

床底鋪設斷熱磚減少散熱，亦可採無間格柵欄蓄熱式燒法。

4.燃燒效率：依供料與進氣量調控燒成溫度要求設定燃燒室、燒成間、貯熱集煙室(捨間)與煙囪之容積比率，盡可能採用極端完全燃燒模式而不浪費能源且少煙霧生成。

5.氛圍要求：依氛圍表現要求，決定燒成間滯流區位與積碳坑尺寸來做還原效果方法(斷氧式、真空式、乾餾式)以降低碳煙排放，亦可應用成釉觸媒材料、掌握碳與水介質之運用來營造釉彩效果。其實，還原階段主燃料也可以改用瓦斯來進行作業，在控溫與還原效果掌控上，也比較容易拿捏準確。

6.循環式碳燃燒：建造一個附加式的大爐膛，增加燃燒空間，如此可以為燃料提供更多的氧氣，使木材得以充分燃燒，進而減少煙霧的生成量。

7.善用調節能力：將投柴次數變為頻繁規律性的動作，每次投進窯爐內部的木材粗細之直徑以細小(約為 2.5~4 公分)為考量且少量為宜。一捆細木材與一根粗木材相比，前者與氧氣的接觸面相對較多，因此能夠充分燃燒，所產生的煙霧也相對較少。善用蓄熱式與火車籠法燒窯^{23註三}，可為有效入柴法的交互運用，其煙量較少、用柴亦較省。

(二)燒成間火流動線配置參考

1.設定儲流區儲煙室。

2.設定水性介質對流方向。

3.推測還原區域，預留入碳操作空間。

4.將最底層棚板離窯床後階梯或是作品平台水平墊高中空約 4~6 公分；

藉以強化對流拉低火流與熱流。

23

註三、又稱組合燒；為臺式柴燒古法，將粗大柴與長柴置投柴口底層，用等高木架支撐中柴置中，上置薄柴接近塞滿投柴口，依燃燒速率與溫度狀況決定推入之柴量與速度，亦有各種變化燒法。

對流設定：

- 1.中央垂直高低溫對流環、流動間隙(垂直約 8~12 公分)。
- 2.中央水平對流通道，從投柴口至後(天子)壁之火流弧線(R：10~5 公分)。
- 3.沿左右窯壁環狀對流間隙(距壁約 4~6 公分)。
- 4.窯頭至窯尾兩側邊較長，兩側流速較快壓力較小。

(三)窯門位置：窯門高度決定入氧最高點決定火流流動弧線。若採用升降式窯門則方便調節入氣大小。而且在滿窯收窯門時，投柴口位置寧可略低但可昇高，寧可大但可縮小，太高、太小在高溫時，則非常不容易做調整。

(四)加裝火柵：可以在窯爐側面投柴孔的正下方地面上建造爐柵欄排，同樣可以為燃燒提供更多的氧氣，以減少煙霧的生成量。

(五)設貯熱區：若窯室空間許可，可規劃一處為貯熱集煙室(捨間)以作為廢排緩衝區，必要時需有加熱機能，可執行後段再燃燒消除碳煙之用。亦可作為素燒區之用，使能源再利用而不浪費。

(六) 縮小爐膛的容積：當煙囪加高有困難時，可以考慮縮小爐膛的內容積，這樣做就相當於擴大了煙囪的尺寸，採用這種方法也同樣可以減少煙霧的目的。¹⁷

(七)強化窯體操控孔洞密閉性與保溫斷熱功能：選用保溫性能良好的窯體

材料和塗料，並使用容量小，耐高溫的陶瓷纖維做窯體保溫材料，窯爐外表溫度可降到500°C左右，可減少散熱損失

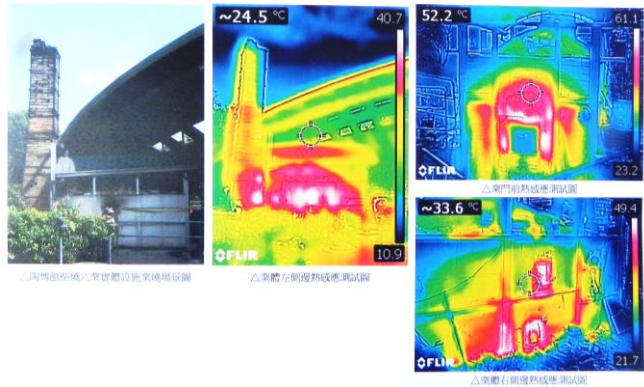


圖 9.熱感應測試圖(2018.04.13 攝)

(圖 9)。其目標值是：燃料消

耗下降 10~20%，熱效率則提高 10~20%，電力消耗下降 10~30%，噪音和煙塵有較大程度的下降。選用耐高溫的遠紅外線塗料在窯內壁，可增加幅射傳導熱，節能可達約 5~8%。¹⁸

(八)裝設二次燃燒迴路：設計排煙道後段裝設瓦斯快速燃燒器於煙囪中段

或末段。環保部門通常會建議陶藝家們採用此法，以方便讓未燃盡的碳元素得以再次充分燃燒，讓一氧化碳轉變為二氧化碳。這種方法雖然環保，但是設置價格與成本會略顯得昂貴。(圖 10、11)

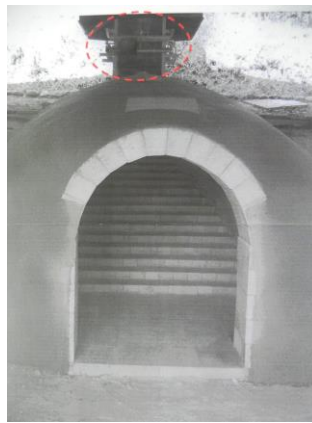


圖 10.日本·陶芸の之森，參考案例。圖片截錄自網路



圖 11.日本·陶芸の之森，二次燃燒器設施，參考案例。圖片截錄自網路

三、調整煙囪的結構功能¹⁷

(一)較粗大的煙囪火流較鬆緩；較細小的煙囪火流較急(緊)。而大肚縮口形

的煙囪可蓄煙氣緩衝，效果好保溫佳但窯室內氛圍變化則顯得和緩。

(二)較短(低)的煙囪火流速率較慢不利於升溫，但窯內熱流分佈較均勻。而較高(長)的煙囪可增加火流速率有利於升溫，但窯內熱流分佈較不均勻。

(三)又，加高(長)煙道長度距離為碳元素提供了充分燃燒的空間範圍。亦可提升窯爐內部的抽力相對較大，更多的氧氣補給讓木材得以充分燃燒。

(四)造型上，圓形的煙囪火流較順暢，但不易構築材料成本亦高。而方扁形的煙囪火流可全面性流動擾動較小，同時具寬度優勢可設置較多調節氣孔，缺點是散熱較快。

(五)透空式無蓋煙道可氧化再燃燒降低碳煙。

(六)於入煙囪口下迴旋管設計可提升窯壓，亦可利用餘熱升高煙囪肚部位溫度有利消除碳煙。(圖 12)

(七)設置水霧煙囪：在煙囪底部基座處設置一水盤、水盆、水槽；甚至擴增凹槽深度，可利用水蒸氣作為吸收劑²⁴，水所吸附污染物質種類繁多，運用噴霧式處理，將水以霧狀噴



圖 12.二次燃燒器設施，參考案例
(2014.11.07 攝)

霧洗滌方式噴灑於柴窯煙道。水滴與廢熱氣在相對運動中，經過慣性衝擊、直

²⁴ 曾四恭、吳先琪、李慧梅(1997)。《環境汙染及防治》。台北市：明文。p156
pp147-159

接阻截，及利用擴散機制，將粒狀物帶到水滴上，藉由水滴將粒狀物去除，有降溫消除飛灰碳煙污染之效果，減少對環境造成的負擔。也可去除水溶性高的氣體如氯化氫或二氧化硫等污染物。(附錄三)

四、增設有效的輔助裝備

可採機動式架構建造一個二次燃燒器的補燃裝置，採用高速節能噴火嘴能在窯爐內部產生強大的熱量和氣流攪動，藉此提高了熱量的傳輸。此類噴火嘴與傳統噴火嘴相比，大約可以節省 10~15%的燃料。¹⁸(圖 13)



圖 13.高速節能噴火嘴，參考案例(2018.07.29 攝)

目前在臺灣已有些許的柴燒陶藝工作者，早已身體力行從友善環境理念出發，提出符合綠色環保期待的概念與做法，重新翻轉甚多的傳統陶瓷工藝觀念，包括生態材料應用、自然工法、工序、舊有傳統柴窯結構與燒成方式的改良...等等。較積極先進者亦有引進高效的防汙設備以達污染防治要求，常見的粒狀汙染物控制技術是使用重力沉降室(gravity settling chamber)；其設備包括有旋風集塵器(cyclone)、袋式集塵器(bag house；fabric filter, FF)、靜電集塵器(electrostatic precipitator, ESP)、濕式洗塵器(wet scrubber)又稱為文氏洗滌塔(Venturi Scrubber)；每一種控制技術(設施)皆有其功效，但是，重力沉降室技術只能作為其他粒狀物控制設備之預淨器，單獨應用是很

難符合空氣汙染排放法規。尤其是針對陶藝柴燒窯而言，它所產生的木灰量加上高溫達千度以上，且又處於還原焰氛圍狀態下持續的進行作業，這種情況是很難用上述幾種的單一設施而能夠解決問題的，就如同陶博館在規劃重建柴窯之際，新北市環保局之協力配合單位(顧問公司)針對本館 105 年柴燒穴窯改建方案，在實地勘察後，也給予評估與建議做法如附錄四。

肆、結論

臺灣是能源資源相對貧乏的國家，在如今異常嚴峻的生態、氣候問題的威脅下，人們的環保意識也逐步增強，很多行業都在興起一股環保節能減碳的氛圍之中，當然，陶瓷行業也不例外，而且陶瓷行業還是耗能大戶。雖說陶博館不是陶瓷生產單位，但近幾年來館方在環保節能減碳的行列中，也都在積極的進行規劃調整改善，例如將原有的館舍清水模牆面搭配組裝種植植物使其成為綠色建築、強化館舍節能隔熱低碳工程(玻璃貼上反射隔熱模)、館舍與園區裝設雨水回收系統、逐步調整穴窯柴燒業務執行方案，也從一年 22 窯次調降為 2 窯次(分上半年與下半年執行)，停止樂燒、燻燒等活動，致於如何將友善環境理念導入柴燒領域，陶博館也因地制宜利用陶瓷專業博物館的硬體設施和機制運作，在民國 100 年起陸續在陶瓷學院課程中開設「環保柴燒技法專修班」、「環保柴燒窯爐設計與構築」、「環保柴燒暨輕型柴窯構築研習營」…等節能環保相關課程，讓「事實的與概念化的知識」透過「實務課程教育教學與操

作」的管道，使得某些專業或非專業的陶瓷愛好者，能夠經由此一管道獲得某種程度上的專業知識相關訊息與職能應變措施之建立，俾利在節能減排議題上，能夠循序漸進地培育出環保柴燒幼苗邁向符合綠色環保的要求與期望。附錄五即是該課程部分資料，主要是為了實踐環保柴燒。若「環保理念」與「實際行動」不能並駕齊驅推動時，就如同紙上談兵淪為空談了。然而，當有了環保觀念之後，再藉由技術性的操作，與周邊硬體設施以相輔相成的斟酌運作，即可達到事半功倍的成效。

參考文獻、資料

1. 環境教育資訊網 <http://eeweb.gcc.ntu.edu.tw/topic/protect/book13.htm>
2. 廖禮光，〈1982-2009 臺灣現代柴燒窯爐之調查與研究〉，頁 38。
3. 廖禮光，〈1982-2009 臺灣現代柴燒窯爐之調查與研究〉，頁 41。
4. 洄瀾網 <https://www.poja.com.tw/news/life/2018-06-19/11243.html>。
5. 吳水沂，〈臺灣現代柴燒陶藝的探討與柴燒創作的要素〉，《臺灣工藝》季刊第一期，1999。
6. 註一(摘自環保署全球資訊網)
7. 李鴻麟、夏滄琪、許富蘭、林勝傑(2005)。《新型水溶性木材防腐藥劑對木材保存性與燃燒性之影響》。台灣林業科學 20(2)：139-56。
8. 黃清吟，林業試驗所森林利用組《林業研究專訊》Vol.16 No.6 200920，頁

20。

9. 維基百科，自由的百科全書 <https://zh.wikipedia.org/wiki/燃烧>

10. 張育誠、吳國光、焦鴻文、簡國祥、歐陽湘《富氧燃燒技術之應用與分析》民 104.9。臺灣能源期刊 第二卷 第三期 第 323-331 頁

11. 黃清吟，林業試驗所森林利用組《林業研究專訊》Vol.16 No.6 200920。頁 21。

12. 薛瑞芳；陶瓷製作技藝訓練班；燃料與燃燒/講義 p.2；2012\04\08

13. 黃清吟，林業試驗所森林利用組《林業研究專訊》Vol.16 No.6 200920。頁 22。

14. 黃清吟，林業試驗所森林利用組《林業研究專訊》Vol.16 No.6 200920。頁 23。

15. 黃清吟，林業試驗所森林利用組《林業研究專訊》Vol.16 No.6 200920。頁 25。

16. 資訊節錄自：美國華盛頓州州政府文獻；How Wood Smoke Harms your Health, 2002, p.2-3

美國環保署對柴燒的警告 Wood Smoke and Your Health

<http://www.epa.gov/burnwise/wood-smoke-and-your-health>

<https://fortress.wa.gov/ecy/publications/documents/91br023.pdf>

17. 資訊節錄自：美國醫師與健康環境工會於 2015 年報告: Utah Physicians for a Healthy Environment give

18. 資訊節錄自：柴燒之傷害 How Wood Smoke Harms your Health

<https://fortress.wa.gov/ecy/publications/documents/91br023.pdf>

17 reasons to ban wood burning <http://uphe.org/priority-issues/wood-burning/>

[http://www.monroecourier.com/21903/physicians-organization-gives-](http://www.monroecourier.com/21903/physicians-organization-gives-17-reasons-to-ban-wood-burning/)

[17-reasons-to-ban-wood-burning/ http://uphe.org/wp-](http://uphe.org/wp-content/uploads/2015/07/UPHE-wood-smoke-report-2015-pdf.pdf)

[content/uploads/2015/07/UPHE-wood-smoke-report-2015-pdf.pdf](http://uphe.org/wp-content/uploads/2015/07/UPHE-wood-smoke-report-2015-pdf.pdf)

The Health Effects of Wood Smoke :

http://www.ehhi.org/woodsmoke/health_effects.shtml

19. 窯業操作; 程道腴、鄭武輝;徐氏基金會;民 87 頁 186

20. 日下部正和、馬克蘭賽特(Marc Lancet)《日本柴窯燒成揭密》。香港：上

海科學技術出版社。頁 309-310

21. 打造環保新產業綠色陶瓷將成為未來發展趨勢

<http://www.zhongaokiln.com/?thread-978-1.html>

22.註二、

富氧燃燒是以高於空氣氧氣含量 (20.947%) 的含氧氣體進行燃燒，是一種高效

的節能燃燒技術。富氧燃燒節能效果顯著，有效延長爐齡，有利於提高產品產量、質量，環保效果突出。

23.註三、又稱組合燒；臺式柴燒古法，將粗大柴與長柴置投柴口底層，用等高木架支撐中柴置中，上置薄柴接近塞滿投柴口，依燃燒速率與溫度狀況決定推入之柴量與速度，亦有各種變化燒法。

24.曾四恭、吳先琪、李慧梅(1997)。《環境汙染及防治》。台北市：明文。

p156 pp147-159

• 李子介，李畫室藝術研究所《利用廢木料作為柴燒窯燃料之研究》2006年。

<http://www.wretch.cc/blog/leegj/5729543>

• 薛瑞芳，釉藥學，民 92.12 台北縣立鶯歌陶瓷博物館發行

• 窯業工學，正文科技文庫，民 84 正文書局

• 宋光梁，陶瓷技術概論，民 91 徐氏文教基金會

• 程道腴、鄭武輝，陶瓷窯爐學，民 89，徐氏文教基金會

• 林瑞華、鄧淑慧，高溫柴燒新紀元，民 100.2，竹南蛇窯文化工作室

• 鄧淑慧 (2003)，苗栗的柴燒陶藝，苗栗縣：苗栗縣文化局。

• 吳欣儒，論文小型土窯的燒製 2006.06 台北市立教育大學視覺藝術研究所

• 李宜玲，論文龍眼樹灰釉之實驗研究，民 100.06 國立屏東教育大學視覺藝術

學系

- 廖禮光，論文，1982-2009 年臺灣現代柴燒窯爐之調查與研究，民 98.0 逢甲大學歷史與文物管理研究所
- 張英彬，《柴燒陶藝表面效果分析與美感型式探討》南開學報 第十一卷 第二期 民國一〇三年
- 呂琪昌 (2006)．原始瓷壺-說柴燒，臺北市：陶藝雜誌第 50 期。
- 陳志明 (2007)．謝正雄柴燒創作作品之研究，未出版之碩士論文，台北市，國立臺北教育大學藝術學系碩士班。
- 吳水沂 (2009)．塊體·柴燒-陶藝創作的形式與媒材之研究，未出版之碩士論文，台北市，國立臺中教育大學美術學系碩士班。
- 蔡宗隆 (2010)．寧靜的溫度-探討柴燒之造形與溫度的樣貌。未出版之碩士論文，台北市，臺北藝術大學美術學系碩士班。
- 陳炯銘 (2008)．鳳凰式柴燒實驗窯改良設計與著色金屬氧化物對素坯表面效果影響之研究。未出版之碩士論文，高雄市，樹德科技大學應用設計學系碩士班。
- 芩可法燃燒理論與汙染控制機械工業出版社 2013.6
- 高嘉祥 (2009)．從發現「秘密花園」探索苗栗地區柴燒陶藝與休閒之結合。未出版之碩士論文，彰化市，國立彰化師範大學美術學系碩士班。
- 賀豫惠、葉相君、林明卿 (2002)．柴燒美在苗栗，南投縣：台灣工藝季刊。

Minogue Coll and Sanderson Robert, (2000). Wood-fired ceramics: contemporary practice. A & C Black (Publishers) London, UK and University of Pennsylvania Press. Lancet Marc, and Kusakabe Masakazu, (2005). Japanese Wood-Fired Ceramics. Iola Kansas Krause Publications. Taguchi, G. (1987). System of experimental design: engineering methods to optimize quality and minimize cost, UNIPUB/Kraus International Publications.

- Susan Peterson & Jan Peterson. The Craft and Art of Clay. Published in 2012 by Laurence King Publishing Ltd
- Amedeo Salamoni . Wood-fired Ceramics 100 Contemporary Artists. Published in 2013 by Schiffer Publishing Ltd.
- Frederick Olsen . The kiln book . Published May 2001 by A & C Black Limited.
- Coll Minogue and Robert Sanderson . Wood-fired ceramics , Published in Great Britain 2000 A & C Black Limited

圖目次

圖 1、陶博館穴窯執行窯燒數據統計表。

圖 2、陶博館穴窯<已拆除> (圖片引用《臺灣的蛇窯》· 頁 104) 。

圖 3、陶博館新建柴窯(2017.08.03 攝)

圖 4、「2018 花蓮國際柴燒藝術祭」活動文宣。

圖 5、三層窯的周邊設施--局部(2017.07.26 攝)。

圖 6、影響木材燃燒之宏觀因素。〈圖片截錄自林業研究專訊 Vol.16 No.6

200920 頁 24〉

圖 7、PM2.5 大小與頭髮細絲相比。〈圖片截錄自網路〉

圖 8、健康的隱形殺手 PM2.5 〈圖片截錄自網路〉

極細微粒侵入肺部的部位（肺泡微支氣管末端，與微血管氧氣交換處）

圖 9、日本・陶芸の之森，參考案例。〈圖片截錄自網路〉

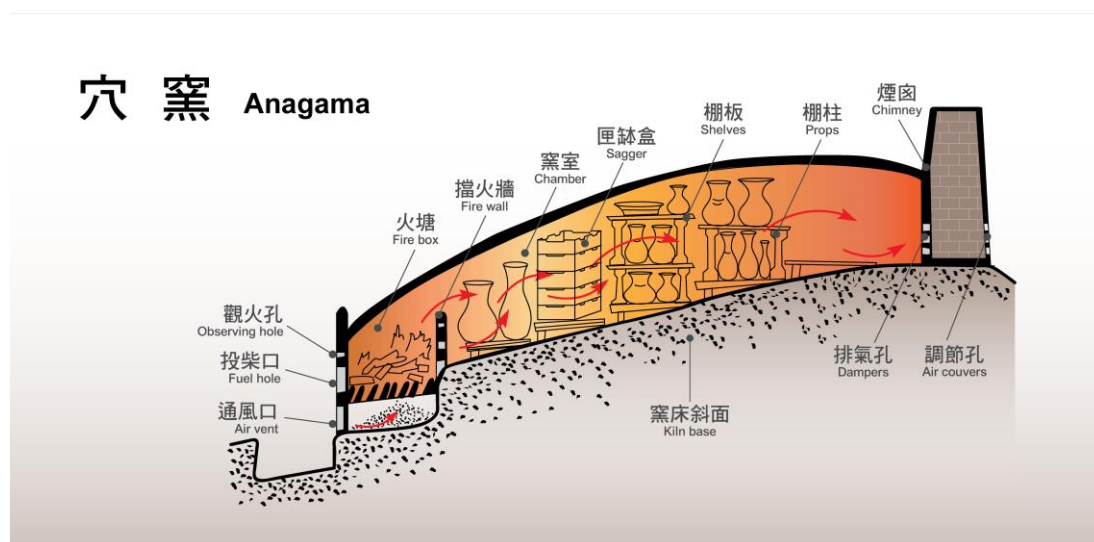
圖 10、日本・陶芸の之森，二次燃燒器設施，參考案例。〈圖片截錄自網路〉

圖 11、熱感應測試圖(2018.04.13 攝)。

圖 12、二次燃燒器設施，參考案例。(2014.11.07 攝)

圖 13、高速節能噴火嘴，參考案例。(2018.07.29 攝)

附錄一、穴窯柴燒示意圖



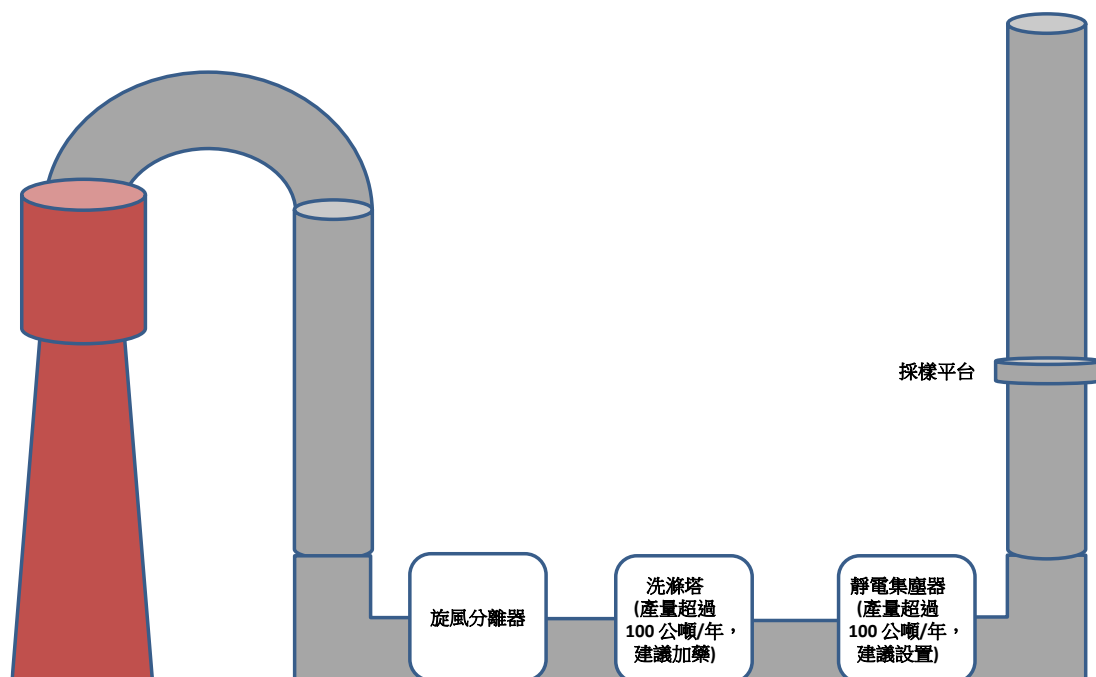
附錄二、陶土與木材在溫度上的變化情況。(巫漢青彙整)

「木材」在加熱過程中所引起的變化	變化情形	溫度範圍	變化情形	「粘土」在加熱過程中所引起的變化	
內部所含水份開始以水蒸氣形態逸出		高達至100°C	輕微的膨脹	殘存的孔隙水(即結晶水)由粘土晶內蒸發,含量應低於1%。若是坯體不乾而燒製速度太快,則有爆裂或破裂的危險,業必須通風良好。	
產生可燃、揮發性氣體如一氧化碳、甲烷、甲醇及其他不燃性氣體和液體(高沸點的焦油)等成分開始分解。	開始分解	180°C	101°C ↓ 200°C	微小的收縮	結晶水蒸發後粒子與粒子之間距離拉近。
與纖維素相較,半纖維素的耐燒定在較低,其熱分解後所產生的不燃性氣體較多,焦油較少。由於半纖維素屬高分子的鏈狀結構,具有非結晶性的特質,使其易於水解產生組成糖,也因此影響了轉糖作用,使半纖維素熱分解產生在脫葡萄糖的量不如纖維素多。雖然纖維素及半纖維素熱分解過程中均產生水和醱類,但木材熱分解所生成的醱酸大多來自半纖維素,其中聚木糖因屬較易水解及脫水反應的五糖糖,熱安定較差,在25°C以上熱化分解急遽進行,可燃氣體大量釋出,與進入窯內的氧氣產生強烈反應作用,即火燃燒。	加熱裂解反應急遽進行,可燃氣體大量釋出,與進入窯內的氧氣強烈反應,着火燃燒呈現半纖維素的熱分解過程。	200°C ↓ 260°C			
以實驗技術研究木質素裂解得知,在150~300°C間木質素內的α-及β-aryl-alkyl-ether linkage開裂,在200°C的脫水反應為木質素降解的主要原因,300°C左右直鏈狀的側鏈由芳香環的主鏈中脫離	加熱裂解反應呈現纖維素的熱分解過程	260°C ↓ 310°C	201°C ↓ 450°C	微小的收縮	粘土中的膠質結晶水蒸發,此階段陶器可用例快速度燒製,但通風必須維持良好。
木質素是非結晶性的高分子化合物,它的基本構造是苯基丙烷(C6-C3 phenylpropane),木質素裂解時,由於醚鍵(-O-)與碳-碳鍵(C-C)的斷裂生成酚類(phenol),而有較多的焦炭產生。最後在370~400°C左右木質素構成單體間的碳-碳鍵斷裂,木質素的熱分解為放熱反應,它的放熱峰發生在225~450°C間。	加熱裂解反應呈現木質素的熱分解過程	310°C ↓ 400°C			
			451°C ↓ 550°C	膨脹	結晶水去除,粘土礦物分解變成不定形的矽酸及醫土(meta kaolin), $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O \rightarrow Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 + 2H_2O$
木材成分完全解離,燃燒更為激烈。		400°C ↓ 500°C	551°C ↓ 573°C	微急遽收縮	大部份的結晶化合物已被驅除,表酸鹽類開始解離,所發生的氣體不致成問題,應注意極易透氣之故,但一次燒成的陶器若燒製太快,則易發生龜裂之現象。
			573°C ↓ 650°C	急遽的膨脹	在573°C發生石英轉化,即石英的低溫型轉變成高溫型。(α石英→β石英),這是吸熱作用,會發生急遽的膨脹,因收縮及膨脹發生,所以坯土中發生壓力會影響到坯土產生龜裂的危險性。
			651°C ↓ 880°C	很慢的收縮	欲被消除,高度含碳的粘土,尤其是一次燒成的陶器,必須緩慢,以避免使所發生的膨大,通風口須關閉。
			881°C ↓ 1030°C	急遽的收縮	坯體中開始進行中,在製成收縮未測之前,每件坯的溫度差異應減少,Kaolin 分解引起非晶質 Al_2O_3 變成 $\gamma-Al_2O_3$ 結晶化,同時產生矽酸鹽類分解,並且須在釉與坯的界面封閉之前,欲以驅除,通風孔應關閉,950°C左右變成 $\gamma-Al_2O_3$ 漸漸地活潑,在980°C附近最大。
燃燒產生的溫度最高可達900~1100°C;木材燃燒時,表面逐漸炭化形成導熱性比木材低(約為木材導熱係數的1/3~1/2)的炭化層,當炭化層達到足夠的厚度並保持完整時,即成為絕熱層,能有效地限制熱量向內部傳導的速度,使木材具有較好的耐燃與持溫作用。		900°C ↓ 1100°C	1030°C ↓ 1050°C	很慢的收縮	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \rightarrow Al_2O_3 \cdot SiO_2 + SiO_2$
			1051°C ↓ 1230°C	急遽的收縮	釉與坯的界面封閉之溫度高低,依釉的類別而定,多矽紅柱石(Mullite)生成開始,1200°C附近的收縮原因是因晶體(Crystallite)的生成,坯的燒成強度很快地增加。
			1130°C 至最高溫度	持續的收縮	若界面已經封閉,氣體可由釉層的那個逸出,當釉已熔化並已燒熟之時,燒製速度應緩慢,或將燒成溫度維持不變,以便將氣泡等經由釉層物逸出而逸出,反應層已生成,坯的收縮及炭化作用繼續進行,此時若是坯的製作不良或支持不均衡,坯的破裂危險性亦隨之增加。
			最後溫度至750°C	持續的收縮	已溶解的釉冷卻至液相點(liquidus point),光澤透明釉可快速冷卻,陶器具有高溫塑性(pyroplastic)而無損壞的危險,但結晶釉須緩慢地冷卻至930°C,以確保結晶體的發育。
			750°C ↓ 600°C	持續的收縮	在通過石英轉化的573°C之前,冷卻須為合理的緩慢,以促使溫度的一致,通風孔須關閉,釉轉固化,並且因坯的冷卻而應受到壓縮。
			600°C ↓ 500°C	持續的收縮	必須繼續冷卻,以避免在石英轉化的階段573°C發生冷裂。
			500°C ↓ 150°C	持續的收縮	在其緩慢的冷卻,以避免在白砂轉化的階段225°C附近發生冷裂的危險,而在500°C~300°C之間至少無損壞的危險,若是不含白砂的坯,如需要可較快的冷卻。

附錄三、竹南蛇窯柴窯之一，參考案例。(2016.12.14 攝)

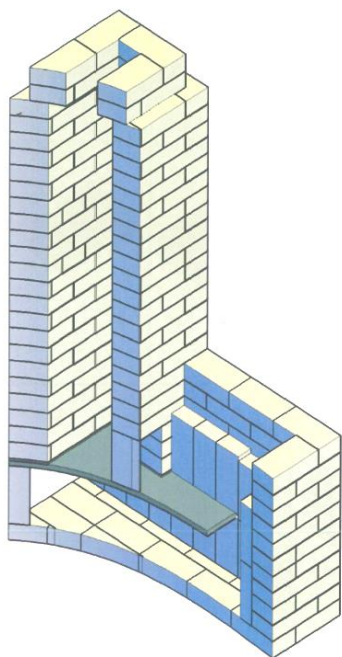


附錄四、防制設備設置建議示意圖

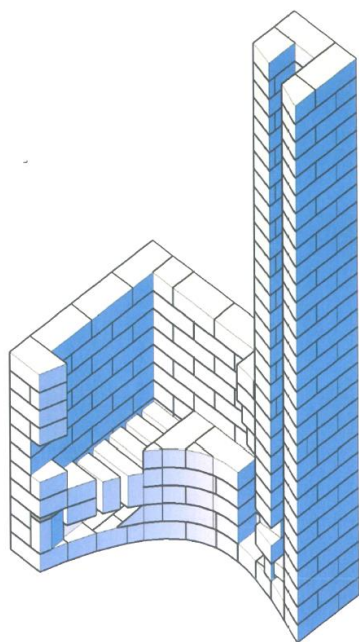
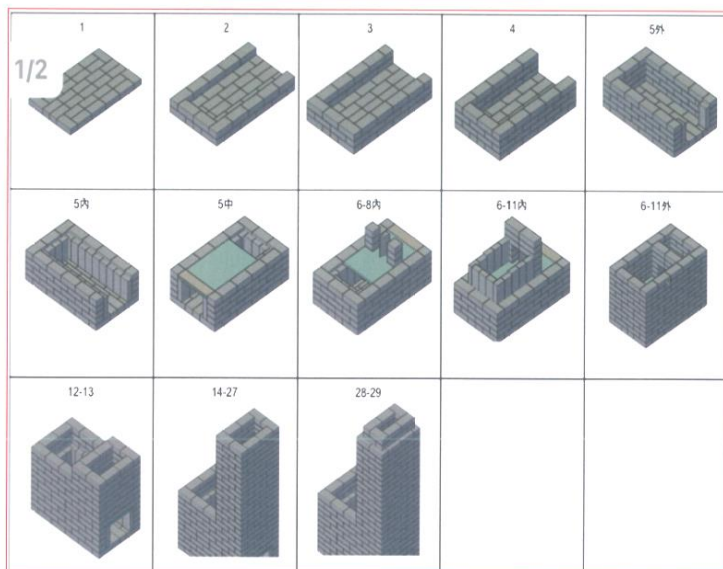


附錄五、106 年度柴燒暨輕型柴窯構築研習營-課程講義-1、-2、-3

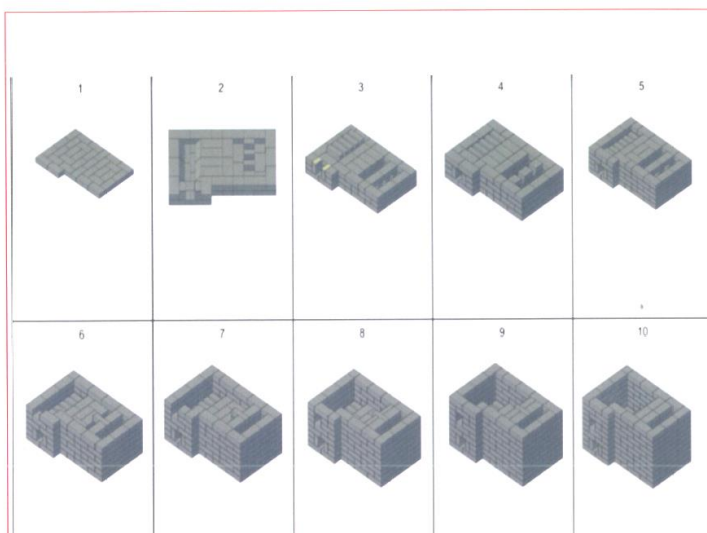
※因應陶博館陶瓷學院開設「106 年度柴燒暨輕型柴窯構築研習營」課程講義之部分資料



3.7 無積碳坑倒焰窯構建組立圖-1



3.7 側投倒焰窯構建組立圖-2



※因應陶博館陶瓷學院開設「環保柴燒窯設計與構築」課程，所建造之小型柴窯設計

3.8 陶博館環保小柴窯建構試燒圖

