

論臺灣地區廢輪胎的處理

楊金鐘*

摘要

隨著工商經濟之發展，國民生活水準之提高與關稅之降低，臺灣地區的各種機動車輛也逐年大增，相對地，各種報廢的車輛與汰舊換新而來的廢輪胎也與日俱增。長久累積，棄置的廢輪胎不但破壞環境景觀與提供病媒蚊孳生源場所，同時，也浪費了大量可以利用之能量與資源。

本文首先探討臺灣地區廢輪胎回收再利用之必要性與可行性，然後介紹日本與美國收集廢輪胎之路線與方法。在廢輪胎能源回收方面，分別介紹了燃燒、熱分解與氣化的幾種技術和製程；在資源回收方面，則着重於超低溫粉碎技術之介紹。本文最後探討了臺灣地區廢輪胎應如何處理，並建議引進超低溫粉碎技術來應用。

前言

近些年來，臺灣地區各種機動車輛急速增加，目前，光是小汽車就有二百一十萬輛之多，而摩托車的數量更高達六百七十萬輛〔1, 2〕。追究其原因，不外乎是隨著經濟的發展，各種公路建設之改善，以及現代都市生活型態對上下班，商務洽談與陸上旅遊之需要，加上國民的生活水準大幅提高，對於各種機動車輛的購買能力與慾望也逐年增強，近年來，更由於進口關稅的大幅降低，也大大地助長了消費。根據統計，民國65年，各種機動車輛（包括公共汽車、大貨車、小貨車、機車以及其他種車輛）的總數為 2,347,298 輛；民國75年時，則為 8,303,808 輛，這十年間大約增長 254%。據估計，目前臺灣的小汽車每年將以近四十萬輛的幅度增加，摩托車的年產量更達百萬輛之譜；而每年報廢的小汽車大概在五萬輛左右，摩托車的年報廢量則在五十萬輛左右〔3〕。伴隨著報廢的車輛而來的廢輪胎以及汰舊換新而來的舊輪胎之總數實在可觀，況且仍在逐年增加中。

廢輪胎的長久累積，堆棄與逐年增加已為所有的工業化國家帶來了一個很頭痛的處理問題。美國每年累積的廢輪胎已高達二億四千萬個之多〔4〕；英國在1976年時的廢輪胎年產量早已有六千萬個〔5〕，估計現今的年產量將超過此數目；至於日本，在1976年時，廢輪胎的年產量為近四千六百萬個，在1980年時，則已增至將近五千七百萬個〔6〕。這些數量龐大的

* 工業技術研究院能源與礦業研究所

廢輪胎若不加以妥善處理，不但會造成環境景觀之破壞與潛在的環境危害性，而且也浪費了大量可以回收再利用之能源與資源。

長久以來，臺灣地區所累積下來的廢棄輪胎已經為數可觀，再加上臺灣地區每天報廢的輪胎數量也重達15公噸之多〔7〕，這些大宗的廢輪胎之處理問題已引起行政院環境保護署之重視。輪胎具有大自然環境的惰性 (Environmental Inertness)，亦即，輪胎本身不會自己腐化分解。因此，若將廢輪胎棄置於垃圾掩埋場，雖然不會造成毒害，但是，十年後，甚至於百年後，廢輪胎還是依照故我，加上輪胎所佔的體積大，嚴重影響垃圾掩埋場的掩埋年限，以致於幾乎沒有掩埋場願意接受完整的廢輪胎。在不得已的情形下，廢輪胎大多被累積成堆或棄置於荒郊野外，但是，也有少數的廢輪胎則堆置於住家附近或移作他種用途。棄置的輪胎堆除了造成環境景觀之破壞外，也形成二個潛在的環境危害性：火災與昆蟲類的騷擾〔4〕。一旦廢棄的輪胎堆失火開始燃燒，那幾乎是一發不可收拾，無法撲滅。廢輪胎堆也是昆蟲類繁殖的大本營，例如在臺灣南部很盛行的「登革熱」病，就發現其傳染媒體的埃及斑蚊是在住家附近的廢輪胎內繁殖。基於上述種種原因，行政院環保署已將廢輪胎的處理列為79年度的重點計畫之一〔8〕。

廢輪胎本身具有大量可以被利用的資源與能源必須加以妥善處理，否則對整個國家而言是一個極大的浪費與損失。本文將從資源回收與能源回收兩個觀點來探討臺灣地區廢輪胎的處理問題，以供行政院環保署以及其他公營機構之參考。

回收廢輪胎的必要性與可行性

在進入本文的主題之前，讓我們先來思考與研究臺灣地區廢輪胎回收再利用之必要性與可行性。

一、必要性

為何要回收廢輪胎？要回答這個問題，我們可以從下面五個觀點着眼來探討：

1. 環境上的價值——長久以來，臺灣地區所累積下來的廢輪胎，加上現在逐日增加的機動車輛所汰舊換新來的廢輪胎，數量實在非常龐大。這些到處堆棄的廢輪胎，不但嚴重破壞環境景觀，而且具有容易招致失火與蚊蟲棲息繁殖之虞。假若能將這些廢輪胎回收再利用，不但能解決上述的環境問題，而且能將環境上所牽涉到的責任問題轉變成國家的資產之一。
2. 廢棄的利用——臺灣地區的廢輪胎只有極少部份被回收利用，絕大部份都被隨意棄置。那些被回收再利用的廢輪胎大多被用作船邊防撞材，碼頭防撞設施，道路的防撞設施，邊坡地的防崩設施，遊樂場內的設施，非水泥屋頂之壓鑄……等。國內環保意識日漸提高，以往的任意棄置廢輪胎已經無法再被接受；露天焚燒廢輪胎所造成的空氣污染，更是為法令所不准許。因此，提高廢輪胎的回收再利用率乃是唯一可行之道。
3. 資源保育的迫切需要——臺灣幅員狹小、資源有限，加上不產橡膠，資源保育的工作更是迫切需要，尤其，臺灣的機動車輛隨著工業的發展與經濟起飛而快速增多。廢輪胎的回收

再利用已是未來社會型態的導向，無法避免；此外，回收再利用可以降低我國橡膠原料之進口量。

4. 能源的節省——通常，生產原生物質 (Primary Materials) 要比生產再生物質 (Secondary Materials) 耗費更多的能源。根據報導，再生橡膠所需的能量要比原生橡膠所需的能量節省70%左右 [9, 10]。能源的大量節省就是生產成本的大幅降低，因此，產品的推廣利用極為有利。更重要的，在環保意識高漲的今天，臺灣的百姓頗為反對核能與燃煤發電，故能源的節省，其所代表的意義更是不同了。

5. 經濟上的價值廢——輪胎的回收可以節省大筆的掩埋費用或運送至堆積場的費用，同時，可以經由能源與資源的回收再利用產生很大的經濟價值。廢輪胎的熱解可以產生油、氣、碳黑……等產物；廢輪胎的燃燒可以用來發電；廢輪胎的再生橡膠比原生橡膠可以節省約70%的能源；再生橡膠可以做為許多製品的原料。因此，廢輪胎的回收再利用，不但可以解決廢輪胎的處理問題，也可以降低我國對樸膠原料進口的仰賴，更可以產出大量的有 useful energy 與資源，經濟效益極高。

二、可行 性

回收廢輪胎可行嗎？要回答這個問題，我們也可以從下面五個觀點來探討：

1. 來源的穩定性——就廢輪胎而言，供應來源絕對不是問題。臺灣現有小汽車 210 萬輛，摩托車 670 萬輛，若再加上其他的機動車輛，總數可能超過 1,000 萬輛。若以每部車輛平均每年換一個輪胎來算，臺灣每年汰舊換新下來的廢輪胎就有 1,000 萬個之多；再加上目前臺灣的小汽車以每年將近四十萬輛的幅度增加，機車更是大幅增多；而每年報廢的機動車輛總數也有數十萬輛之多。因此，據保守的估計，臺灣每年廢輪胎（包括內輪的產量至少有一千萬個。因此，只要臺灣繼續仰賴陸上交通為主，則廢輪胎的供應來源是不用擔心的。
2. 回收物的應用性——回收的廢輪胎可以將它所具有的能源與資源廣為利用。就能源回收而言，熱解後的廢輪胎可產出油與瓦斯；燃燒後的廢輪胎可用來發電。就資源回收而言，粉碎後的廢輪胎橡膠可應用於新輪胎，鋪路、屋頂、運動場、土地改良、保護塗料、地毯的底襯……等。因此，回收的廢輪胎去路也不是問題。
3. 經濟上的考慮——回收的廢輪胎可經由能源與資源的回收再利用產生很大的經濟價值（已於上一節討論過）。但是，廢輪胎的收集、運輸費用加上投資建造一個無二次污染的廢輪胎處理工廠的費用龐大，以致於即使在美國廢輪胎的回收再利用工作進展緩慢。我國政府現有七百多億美元的外匯存底，可以考慮由政府出資或與私人公司合資建造一座適合國家需要的廢輪胎處理工廠。如此，回收廢輪胎可能面臨的經濟難題就可迎刃而解了。
4. 技術上的考慮——工業化先進國家已經發展出許多有關廢輪胎能源與資源回收的技術，其中有不少已經商業化，我國政府或民間機構可以引進適合國情的技術；另外，國內現有的各方面人才濟濟，技術的引進與本土化不是難題。
5. 法律上的考慮——依據行政院環境保護署所頒佈的廢棄物清理法第十條第一款規定，廢輪胎屬於不易腐化成份的物品，製造、輸入、販賣業者需負責回收，清除與處理；另根據報

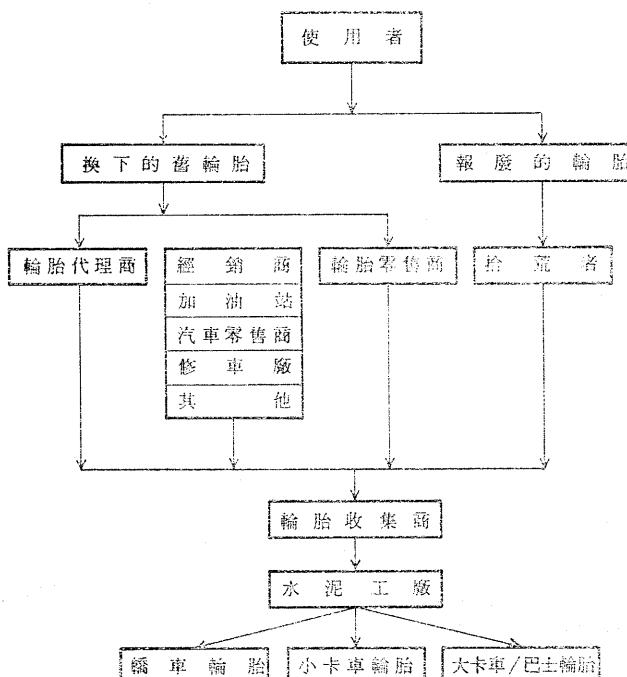
導，環保署已經計畫於民國78年（1989年）7月開始強制執行廢輪胎的回收工作〔11〕。因此，廢輪胎之回收是依法有據，而且是即將必須展開的工作。

廢輪胎之收集

「市場第一，收集第二」是整個廢棄物回收再利用理念的核心。收集工作本身並不構成回收再利用；收集工作確實協助了環境的清理，也教育了社會大眾廢棄物回收再利用之重要性，但是收集工作並不代表廢棄物回收再利用。收集工作只是將廢棄物井然有序地從一個地點移至另一個地點。因此，除非實際上有市場出路存在，否則，收集工作並不能使廢棄物真正達到回收再利用。換句話說，只有當市場需要提供要拉進更多的原料的原因時，固體廢棄物纔會進入回收再利用的循環。只有擴大回收物質的市場，吾人纔能有效地提昇固體廢棄之再利用〔12〕。

就廢輪胎的回收再利用工作而言，同樣地，也是「市場第一，收集第二」。至於廢輪胎之「市場」，有能源方面的，也有資源方面的，遠景看好。接下來的工作，當然是廢輪胎的收集了。

雖然廢輪胎收集工作本身並不代表廢輪胎的回收再利用，但是，廢輪胎收集路線之設立卻是廢輪胎回收再利用整個程序成功的關鍵所在。在日本，通常，廢輪胎有二個主要的來源：一個是廢汽車堆積場（佔廢輪胎總數的30%）；另一個是來自修車廠與加油站替顧客換下來的舊輪胎（佔70%左右）。



圖一 廢輪胎的收集路線

圖一是日本水泥公司所採用的廢輪胎收集路線 [6]。廢輪胎經收集商送至水泥廠（當作燃料用）後，再根據尺寸分成轎車輪胎（7公斤）、小卡車輪胎（15公斤），以及大卡車／巴士輪胎（50公斤）三類，加以貯存。

柯特斯國際公司（Curtis International, Ltd.）就為了在美國密西西比州維克斯堡（Vicksburg, Mississippi）與加拿大蒙特婁（Montreal）的廢內胎處理工廠設計了一套廢內胎收集網路 [9]。柯特斯國際公司首先把目標放在重工業區或貨運頻繁的地區，在這些地區內再選定一次可以貯存40,000磅內胎（剛好一卡車）的商底。在選定這些收集站後，柯特斯國際公司就分函通知小商店與當地的卡車修理業者，讓他們知道有收集廢內胎的服務與收集站所在。等到收集站收集了一卡車的廢內胎後，柯特斯國際公司的相關企業就會派人付款給收集商而運走廢內胎。柯特斯國際公司甚至於與收集商預先協商決定了下一卡車廢內胎的價位，目的在保障收集商，讓他們知道柯特斯國際公司一直會收購他們的廢內胎。

廢輪胎的能源回收

廢輪胎能源回收的方式主要有下述三類：燃燒、熱分解與氣化。視其應用對象之不同，每一類都有許多種技術被發展出來，其中，有的技術成功地被商業化，有的卻因素而沒有被推廣應用。以下將分類介紹幾種廢輪胎能源回收的技術，以饗讀者。

一、燃燒（Combustion）

在1975—1977年間，美國固特異輪胎與橡膠公司（Goodyear Tire and Rubber Company）曾經嘗試將整個廢輪胎置於一特製的高溫爐內燃燒，但是，由於無法克服燃燒廢輪胎所引起的環保問題，以致於研究，計畫中斷 [13]。

日本的水泥業在1980年2月時，已有12家公司的23個水泥工廠已經或計畫利用廢輪胎來代替燃料使用，其中，日本水泥公司（Nihon Cement Co. Ltd.）與石橋輪胎公司（Bridgestone Tire Co., Ltd.）則已成功地開發出燃燒整個廢輪胎來當生產水泥的輔助燃料的技術，更值得一提的是，此技術不會造成二次污染 [6]。以較典型的水泥業用的旋轉窯而言，每個窯每月可用掉300至1,000噸廢輪胎或者是43,000至150,000個廢輪胎；而廢輪胎的熱值之有效利用率則在60—80%間。

世界上第一個燃燒整個廢輪胎發電成功的例子乃是摩碟斯脫能源計畫（Modesto Energy Project）。美國牛津能源公司（Oxford Energy Co.）與奇異公司（General Electric）合資在加州衛斯理（Westley, California）建造了現今世界最大的燃燒廢輪胎發電的工廠 [9]。廢輪胎每次有二個被送進2000°F的鍋爐中燃燒，每小時廢輪胎的處理量為700至800個，每小時產生14.4百萬瓦特的電力。在1988年3月，這家燃燒廢輪胎來發電的工廠完全符合州政府與縣政府的廢氣排放標準，並領有使用執照。這家工廠目前已百分之百運轉中，應可供應15,000個家庭至少在未來15年所需的電力。此外，牛津能源公司又回收了燃燒廢輪胎所得的副產品——鋼、鋅的化合物與石膏。但是，這種燃燒廢輪胎來發電的設備費用很龐大，以摩碟斯脫能源計畫而言，就花費了四千一百萬美元；此外，要囤積足夠

量的廢輪胎來燃燒發電所需的運費也是不小。由於摩碟斯脫能源計畫的成功，牛津能源公司計畫利用同樣的技術在康涅底克州 (Connecticut) 建造一個二千五百萬瓦特發電量的工廠。

二、熱解 (Pyrolysis)

熱解乃是在缺氧或在有控制氧的環境下將含碳物質加熱 (通常是 400—900°C) 使其分解。熱解後的產物通常有四個相：(1)氣體，(2)油，(3)炭 (Char)，(4)水。一般而言，快速分解會產出較多的氣體；長久而緩慢的加熱過程會產出較多的油與炭。

嘗試用熱解方式來處理廢輪胎的技術不少，以下僅介紹幾種作爲參考。

固特異輪胎與橡膠公司以及脫史可公司 (Tosco Corp.) 曾經共同建造了一個廢輪胎熱解工廠來回收油與碳黑 (Carbon Black)。然而，由於世界性的油價偏低，此技術不再引起興趣；同時，由於所產出的碳黑質地不夠高，以致於不能用來再製造輪胎，因此，這個製程不合乎經濟效益 [13]。

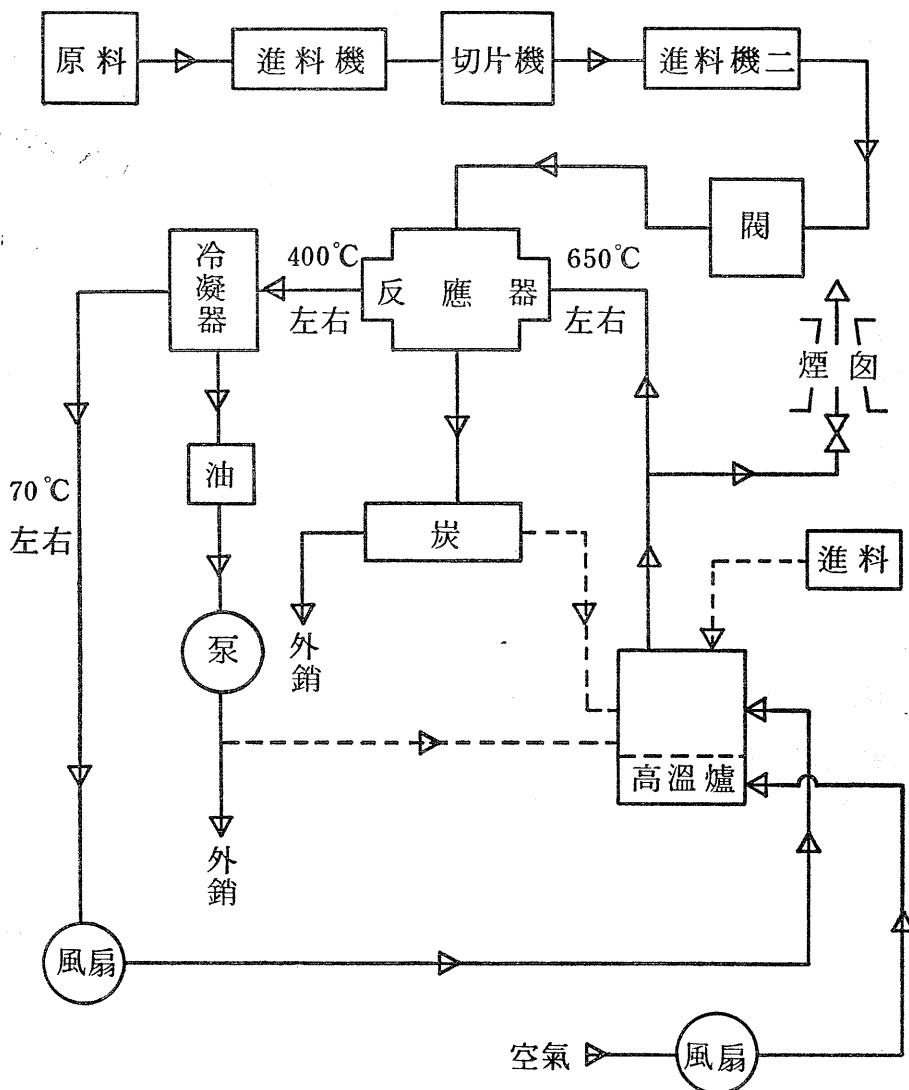
脫史可公司另外再開發一種熱解技術來處理廢輪胎以回收油、氣與炭。在此製程中，切片後的廢輪胎被送進一個熱解旋轉筒 (A Rotary Pyrolysis Drum)，加熱後的陶瓷球再被送進旋轉筒內，提供熱解所需的熱，並把旋轉筒的溫度昇高到 1000°F (810°K)。熱解後的油與氣再經一個分餾器分離出油；產出的氣體則用來作爲陶筒球加溫之用。另外，產出的炭則藉助於一個轉筒篩 (Trommel) 來與熱陶瓷球分離。從一個每天處理 15噸的示範性工廠所得的結果是，每噸的廢輪胎可產 150加侖的油 [14]。

日本橫濱鋼鐵株式會社也有一個利用旋轉窯 (Rotary Kiln) 的廢輪胎熱解示範工廠，其操作溫度爲 1120°K。這個處理量僅爲 5 噸／天的示範工廠可從切片後的廢輪胎回收 51.³% 油、15.2% 氣與 33.5% 炭。至於所產出之氣體的熱值則爲 41.8 MJ/Nm³ [14]。

美國歐斯點特石油公司所屬的歐斯點特研究公司 (Occidental Research Corp.) 也發展出一個「閃熱解」法 (Flash Pyrolysis Process) 從廢輪胎中回收碳黑與油。熱解係在一個 25 mm 直徑乘 701 cm U 型反應器中進行，這個反應器係以電熱方式在溫度 644 至 1144°K 間進行運轉。溫度爲 920°K (1200°F) 時，熱解廢輪胎可得進料重量之 35% 的炭與 38% 的油 [14]。

在西德與日本都有利用流體化沙床 (Fluidized Sand Bed) 來進行廢輪胎的熱解。在西德，示範工廠的年處理量是 10,000 噸的完整廢輪胎，其操作溫度是 650 至 850°C 之間 [5]。在日本，則將粉碎後的廢輪胎通過 450°C 的流體化沙床，油從氣流中冷凝出，而炭則從床內回收 [5]。

在英國也有好幾種利用熱解來處理廢輪胎的製程被發展出，佛斯特惠勒動力產品公司 (Foster Wheeler Power Products Limited) 所開發出的交錯流式廢輪胎熱解製程就是其中一種，其流程如圖二所示 [5]。此製程的特點係將進料垂直通過 500—800°C 的循迴熱解所產的氣體，實驗室測試的結果，在約 600°C 的操作溫度下，可從廢輪胎回收進料重量 50% 的油與 38% 的炭，其餘則爲氣體，其中，炭可當作高熱值的燃料，或可經過進一步的處理成爲活性碳或者是碳黑。據估計，在 1981 年在英國要建造一個處理量爲 5 噸／時的廢輪胎



圖二 交錯流式輪胎熱分解流程

熱解工廠之投資額在 150 至 200 萬英鎊之間；每年的操作費用約 60 萬英鎊；而預期的年收入則在 100 萬英鎊左右。

另外，也有一種觸媒氫化 (Catalytic Hydrogenation) 製程可用來處理廢輪胎，其產品為重油與碳黑 [14]。

三、氣化 (Gasification)

美國堪薩斯州立大學利用流體床來從事廢輪胎的氣化研究 [15]。將已去除尼龍線與鋼絲的廢輪胎切片 (直徑約 3 mm；長度約 5 mm)，以每小時約 6 至 11 公斤的進料量放入

的 900—1100°K 的流體化床內進行氣化。結果顯示，在上述溫度範圍內，氣體的產生量隨著溫度從 0.21 Nm³/kg DAF 增至 0.76 Nm³/kg DAF；而所產出氣體的熱值卻從 39.6 MJ/Nm³ 降至 22.2 MJ/Nm³。所產出之氣體內含有 13.5 至 34.0% 的烯屬烴 (Olefins)，這些氣體雖可當作燃燒使用，但應考慮當作其他物質的化學原料使用，以提高其經濟價值。

廢輪胎的資源回收

廢輪胎資源回收的方式主要有二類：直接利用與切片粉碎後利用。廢輪胎的直接利用通常不會牽涉到很難的技術；但由於輪胎具有韌性與彈性，其切片與粉碎不容易，通常須要特殊的技術。

一、直接利用 (Recycling in Original Form)

廢輪胎的直接利用方式最常見的有：人工漁礁、碼頭防撞設施、海岸防波設施、邊坡地防崩設施、道路防撞設施、遊樂場內設施、非水泥屋頂壓磚……等。這些利用方式很簡單、很方便，但從解決廢輪胎處理問題的觀點來看，廢輪胎的直接利用並無法解決問題。

二、切片粉碎後利用 (Recycling After Physical Treatments)

廢輪胎經切片粉碎後可利用於很多方面，諸如：添加於柏油後舖路、運動場或遊樂場地表面、粘接劑、輪胎製造、橡膠管製造、橡膠品成型加工……等等。其中，橡膠粉(約25%)與柏油(約70%)混合後舖路很值得一提：第一、用量大。在美國，1987年就有 150 萬個廢輪胎被用於橡膠與柏油的化合物，1988年預計增加50%；第二、道路壽命增長。一般的柏油路面壽命只有 5 至 7 年，而舖上一層 3/8 至 5/8 吋的橡膠與柏油混合物，其路面壽命增長至 15 年，甚至可能至 20 年；第三、降低道路噪音。比利時首都布魯塞爾 (Brussels, Belgium) 的環城公路舖上橡膠柏油混合物後，路面吸收了大量的輪胎噪音，使噪音讀數降低了整整 30% [9]。

在資源再生工業裏，一般多掌用高轉速 (600 RPM) 的撞擊式破碎機 (Hammermill) 來從事廢棄物的破碎工作，但是，這種撞擊式的破碎機會產生大量的熱，不適用於有韌性的橡膠與塑膠物質。有一種高力矩、低轉速 (60 RPM) 的切片機 (High Torque, Low Speed Shredder) 却很適合於廢輪胎的切片 [16]。

低溫粉碎技術是一種可以克服輪胎橡膠之韌性與輪胎構造的吸收能量性質之利器之一。大多數的物質（包括輪胎橡膠在內）在溫度很低時，其延性都會大為降低，並且物質內的水份也會凍結，超低溫粉碎法就是利用物質的低溫脆性而施力加以破碎的。據報導，在冷卻到 -60°C (-80°F) 左右，再利用撞擊式破碎法即可將廢輪胎的橡膠、鋼絲與尼龍纖維（或聚酯纖維）完全分離，至於橡膠塊的細度與纖維的性質，則可以由製程的調整來控制 [17]。以下將介紹超低溫粉碎技術在廢輪胎資源回收上的應用。

在日本，自從 1972 年引進液化天然氣後，大阪瓦斯株式會社即致力於液化天然氣冷能利

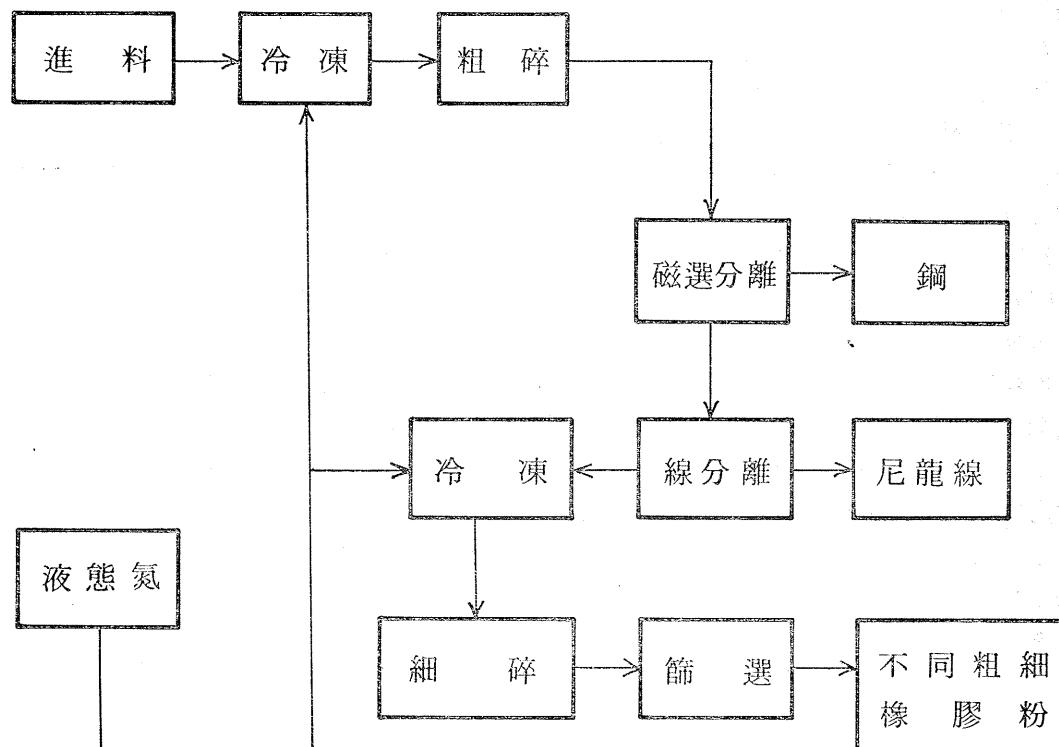
用之研究，其所開發出的技術包括了液化空氣之製造、超低溫機器之製造、超低溫粉碎……等。

Linrex Mill 就是大阪瓦斯株式會社與細川鐵工株式會社所共同開發出來的超低溫粉碎裝置（以液態氮為冷媒）。有關 Linrex Mill 的流程、特點與應用實例，請見其他文獻〔18-20〕。

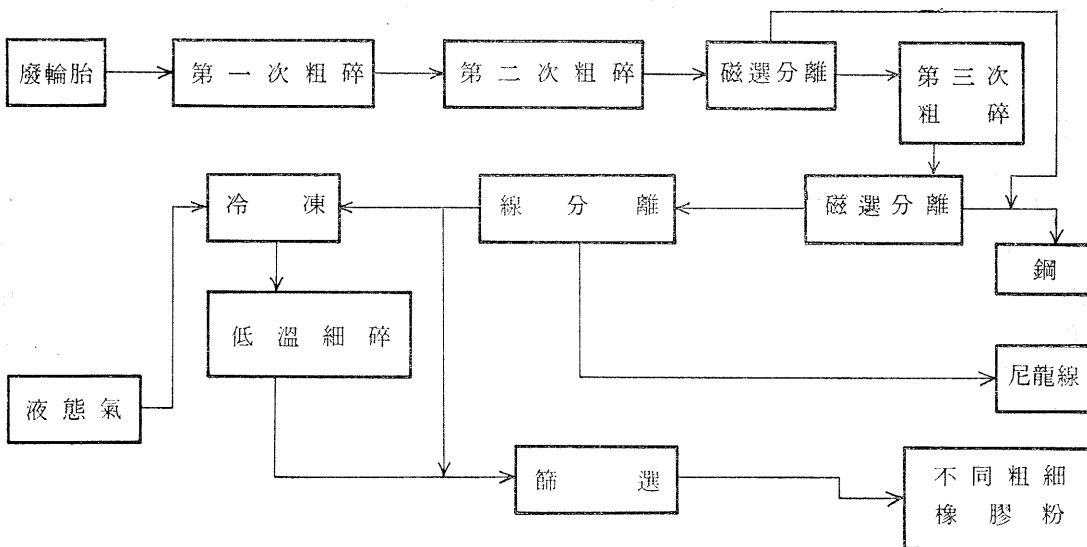
于1972年，大阪瓦斯株式會社在細川鐵工株式會社與帝國酸素株式會社之合作下建造了一座每小時處理 100 公斤廢輪胎的示範性工廠。這個以研究為目的之示範性工廠係同時掌用超低溫粗碎（Coarse Crushing）與粉碎（Fine Crushing）來處理廢輪胎，其流程如圖三所示〔20, 21〕。

此外，大阪瓦斯株式會社又與橫濱鋼鐵株式會社以及細川鐵工株式會社共同開發出了一套利用常溫粗碎而超低溫粉碎的系統來處理廢輪胎，其詳細流程如圖所示〔20, 21〕。從1977年7月開始，關西環境開發株式會社的「輪胎回收中心」就是採用此系統來從事商業化的廢輪胎資源回收工作，其設備的處理能力為每年 7,000噸，可產出 5,000噸橡膠粉（ $300\text{ }\mu\text{m}$ 以下佔70%）〔20〕。

根據一份1974年6月的報導，在美國威斯康辛州麥迪遜市的威斯康辛大學（University of Wisconsin, Madison）與位於威斯康辛州拉柯羅斯市的超低溫回收國際公司（Cryog



圖三 廢輪胎超低溫粗碎與粉碎流程



圖四 廢輪胎常溫粗碎與超低溫粉碎流程

bnic Recycling International, Inc., La Crosse, Wisconsin) 共同設計了一個機動式的超低溫處理設備（包括液態氮槽與撞擊式破碎機），每分鐘可處理到15個廢輪胎，處理過的廢輪胎碎塊僅佔原來完整廢輪胎之18%。這個機動式的超低溫處理機的售價依當時之幣值大約是美金200,000元〔22〕。

美國埃爾可 (Airco) 公司也設計了一個每小時可以處理 10噸廢輪胎的超低溫粉碎流程。廢輪胎首先經過一個「輪胎粒化機」 (Tyre Particizer)，產物約為 5 平方公分，然後，再經過液態氮冷卻而以撞擊式破碎機破碎之，再用雙層式篩機分離出金屬與纖維，過大的橡膠塊再用第二個撞擊式破碎處理，然後回到雙層式篩機分選〔23〕。

關於廢輪胎或廢橡膠之超低溫粉碎技術，在美國、英國、澳洲等地區還有不少其他的研究與發展，其中，不乏獲得各國專利的技術〔23〕。

廢輪胎資源回收除了可以利用超低溫粉碎技術外，尚有其他的方法可行，例如：美國固得公司 (Gould Inc.) 外發展出的就是一種「熱——機械」製程 (Thermo-mechanical Process)。此法係將廢橡膠硬化過的網路在適當的溶劑中膨脹，再用一個特製的研磨機將橡膠磨成 $20 \mu\text{m}$ 大小的粉末，此種橡膠粉可以再度加以硬化。雖然硬化後的再生橡膠內部網路不若新橡膠的內部網路，但利用「固得製程」 (Gould Process) 所得的再生橡膠可以在製造新輪胎時取代30%的新橡膠（正常為 5 %左右），而不會影響到新輪胎的品質〔23-25〕。

討論

從環境上的價值、廢棄物的利用、資源保育的迫切需要、能源的節省、以及經濟上的價值五個觀點來看，臺灣地區的廢輪胎確實有回收的必要性。更重要的，從來源的穩定性、回收物的應用性、經濟上的考慮、技術上的考慮、以及法律上的考慮來看，臺灣地區的廢輪胎回收再利用確實可行。

既然臺灣地區的廢輪胎回收有其必要性，也確實可行，但到底要如何進行？第一步工作當然是廢輪胎的收集。廢輪胎與廢寶特瓶同樣屬於不容易清除處理的廢棄物，行政院環保署對於廢寶特瓶提供五種回收方式〔26〕，但是，廢輪胎既重又大，不能全盤採用寶特瓶的收集方式，筆者建議廢輪胎之收集應採用下列方式：委託專業廢棄物回收清除公司、或藉由地區性回收中心、或以押金的方式由輪胎經銷商／零售商回收。

廢輪胎收集後，接下來的工作就是決定採取能源回收或資源回收方案。日時水泥公司(Nihon Cement Co., Ltd.)在1981年曾經對各種廢輪胎回收系統做了一個比較〔6〕，根據此研究，以廢輪胎當作製造水泥之旋轉窯的燃料為最佳選擇，因為，其投資成本低、操作費用低，而且整個輪胎可以完全燃燒（鋼絲被氧化而轉換成水泥的一部份），更不會產生有害的SO_x。雖然日本水泥公司的這項應用技術似乎是最好的選擇，但是，其所搜集比較的資料不夠完整，例如：根據日本水泥公司所報導的資料，超低溫粉碎的處理能力為0.83噸／時左右，但是日本關西環境開發株式會社「輪胎回收中心」的設備處理能力為1.5噸／時〔20〕。此外，最近幾年來，相繼有各種製程與技術被發展出來，例如：美國牛津能源公司與奇異公司所合資進行的摩碟斯脫能源計畫所利用的燃燒整個廢輪胎發電的技術〔9〕。因此，各種系統之優劣，實在有重新評估的必要。就能源回收方案而言，不論是燃燒、熱解或氣化方式，都必須有精密的設備與嚴格的管理措施，以防範造成二次公害污染，正因為如此，使得能源回收方案面臨經濟效益與環境保護的種種問題。依筆者之淺見，資源回收方案與能源回收方案比較，前者可能是比較好的選擇。

在決定廢輪胎採取資源回收方案後，下一個步驟就是要如何進行。高雄市環保局曾於去(1988)年調查散置在高雄市的廢輪胎，並加以列管，目前，已清運四萬至五萬個廢輪胎並集中堆放在大林埔廢棄物處理場。高雄市長並指示環保局研究將廢輪胎製成人工漁礁的可行性〔27, 28〕。廢輪胎的直接利用實在無法解決廢輪胎之間題於一二〔17〕，工業技術研究院能源與礦業院能源與礦業研究所人員因此向高雄市環保局提議採用超低溫粉碎處處理廢輪胎〔29〕。事實上，早在去(1988)年工研院能礦所人員就已經向行政院環保署廳議採用超低溫粉碎法來處理廢輪胎、廢家電廢汽車等〔30〕。

利用超低溫粉碎法來處理廢輪胎可行性實在值得探。第一、技術的引進問題。超低溫粉碎已經是一個商業化的技術，歐美先進國家與日本都擁有此技術，因此，引進此技術應無問題。至於對象，似乎應以鄰近的日本為優先考慮，但若其他國家之技術與條件優於日本，仍應採用較有利於我國者。第二液態氮的供應問題。目前，中國石油公司正在高雄縣永安鄉建立液化天然氣用的碼頭與儲存、輸送設備，預定今(1989)年4月開始接收自印尼進口的150

萬噸／年液化天然氣，並計畫在西元1993年至2000年間擴大到450萬噸／年之規模〔31〕。若配合中國石油公司利用液化天然氣之冷能於空氣液化，估計，每100萬噸液化天然氣可產萬23萬5千噸液態氮，而目前國內的需求量僅有6千5百噸而已〔30〕。根據日本大阪瓦斯株式會社之研究，利用超低溫粉碎技術處理廢輪胎時，每一公斤的廢輪胎橡膠約需消耗一公斤的液態氮〔19〕。若以每個廢輪胎之重量為10公斤（日本的轎車輪胎每個重7公斤；小卡車輪胎15公斤；大卡車／巴士輪胎50公斤來算，23萬5千噸液態氮可處理23萬5千噸廢輪胎，亦即，23,500,000個廢輪胎。因此，利用超低溫粉碎技術處理廢輪胎所需的液態氮依應不成問題，更多多餘的液態氮可用於其他廢棄物之資源回收。第三、回收後橡膠粉的應用問題。廢輪胎超低溫粉碎所得之橡膠粉可應用於製造輪胎、橡膠管、鐵軌的避震物、運動場跑道、網球場地面、以及橡膠柏油路面……等。臺灣地區現正計畫興建第二條高速公路，筆者建議，有關單位應充份利用超低溫粉碎後的橡膠粉，使其與柏油混合而鋪設於第二條高速公路上使用或其他省公路的擴建與新建工程上使用，因為橡膠柏油的用量大，橡膠柏油不怕炎熱與嚴寒可增長道路壽命，而且鋪設橡膠柏油的路面噪音大幅降低，一舉數得。第四、二次污染的問題。利用超低溫粉碎技術處理輪胎時，唯一的副產物就是氮氣（當液態氮被用作冷媒時）；另根據日本大阪瓦斯株式會社測試之結果，超低溫粉碎法處理廢輪胎無噪音、粉塵、震動等二次污染〔20, 21〕。第五、經濟效益的問題。根據文獻的報導〔32, 34〕，利用超低溫粉碎法處理廢橡膠確實有利可圖；但是根據日本關西環境開發株式會社透露，該公司利用超低溫粉碎法處理廢輪胎並不賺錢〔35〕。這個問題的確很複雜，有待做詳細的評估。

結論

近幾年來，工商業蓬勃發達、經濟起飛、國民的生活水準大幅度地提高，對於各種機動車輛的購買能力與慾望也隨著增強。近一、二年來，進口關稅的逐漸下降，更是助長了進口轎車與中小型商用車之成長。目前，臺灣地區的小轎車約有二百一十萬輛之多，而機車的數量則高達六百七十萬輛。根據統計，去（77）年臺灣地區國產小轎車銷售量共十八萬三千多輛，連同十二萬輛左右的進口轎車，去年總共小客車的銷售量超過三十萬輛。今（78）年國內車廠陸續擴建完工後，估計總產能將超過四十萬輛；據估計，今年國內汽車市場（包括各種商用車）總銷售量可以達到五十萬輛的嶄新紀錄〔36〕。臺灣地區估計每年報廢的小汽車在五萬輛左右，而機車每年報廢的數量也在五十萬之譜。伴隨著報廢的車輛而來的廢輪胎與汰舊換新而來的舊輪胎之總數龐大，據估計，臺灣地區每年廢輪胎（包括外胎與內胎）的產量可高達一千萬個之多。

廢輪胎之累積與棄置不但造成了環境景觀之破壞，也會造成蚊蟲之繁殖與潛在的火災危害，更重要的是，大量可以回收再利用之能源與資源也浪費了。

廢輪胎能源回收與資源回收的方式有很多種。在能源回收方面，可以經由燃燒來發電或利用所產生的熱能；可以經由熱解而得到油、氣、碳黑……等有用物質；也可以經由氣化而得到有用的氣體當作化學原料用或當作燃料用。在資源回收方面，可以採取整個廢輪胎的直接利用，也可以採取廢輪胎切片粉碎後利用。

既然我國行政院環保署計畫於今(1989)年7月起比照廢寶特瓶回收方式，強制要求廢輪胎製造、輸入、販賣業者負責回收，臺灣地區廢輪胎之處理已經是勢在必行，而且也確實可行。在已經商業化運轉的廢輪胎處理技術中，超低溫粉碎技術是一個很值得嘗試的方法，深盼國內有關單位能對此技術加以進一步地評估，更期望能夠很快地見到此技術之引進臺灣以便處理廢輪胎、廢家電、廢汽車……等大宗消費後廢品，如此，本文就可達到拋磚引玉的目的了。筆者相信，經由新的科技引進，必能帶動許多相關工業與技術之發展，使我國的工業化向前邁進一大步。

參考文獻與資料

1. 臺北國際社區廣播電臺(ICRT)「臺灣的空氣品質」報導系列(1989年1月25日)。
2. 關永貴 臺灣電視公司「無所不談」節目(1989年1月27日)。
3. 龍村倪 「大宗消費後廢品處理技術展望」(1989) (即將發表於「能源、資源與環境季刊」)。
4. Trunick, P. A. "Shredders Expand Solid and Hazardous Waste Processing", Recycling Today, pp. 51, 52, 54, 56, 136 & 137 (August 1988).
5. Fletcher, R. and Wilson, H. T. "The Role of Pyrolysis in the Disposal of Waste Tyres", Resource Recovery and Conservation, Vol. 5, pp. 333-342 (1981).
6. Nakajima, Y. and Matsuyuki, M. "Utilization of Waste Tires as Fuel for Cement Production" Conservation and Recycling, Vol. 4, No. 3, pp. 145-151 (1981).
7. 錢建嵩、陳文輝 「流體化床燃燒廢輪胎之研究」，廢棄物處理與能源利用技術研討會專輯，工研院能礦所能源與環境論文集 No. 8, 第17-30頁 (1988)。
8. 劉崑山 行政院環境保護署，私人通訊(1989年10月11日)。
9. Rautenberg, C. "Rubber Recyclers Find Tires Untapped Resource", Recycling Today, pp. 50-52 (June 1988).
10. Powell, J. "A Comparison of the Energy Savings from the Use of Secondary Materials", Conservation & Recycling, Vol. 6, No. 1/2, pp. 27-32 (1983).
11. 中華電視臺 「早安今天」節目(1989年2月2日)。
12. Anonymous "Markets First—Collections Second", Recycling Resources—Priorities for the 1980s, NARI, New York, 3p. (Date Unknown).

13. Singh, J. and Athay, L. D. "Technical, Cost and Institutional Aspects of Asphalt-Rubber Use as a Paving Material", Conservation & Recycling, Vol. 6, No. 1/2, pp. 21-26 (1983).
14. Wolk, R. H. and Battista, C. A. "Study of the Technical and Economic Feasibility of a Hydrogenation Process for Utilization of Waste Rubber", U. S. Environmental Protection Agency; U. S. NTIS PB-222, 694 (1973).
15. Raman, K. P., Walaender, W. P., and Fan, L. T. "Gasification of Waste Tires in a Fluid Bed Reactor", Conservation & Recycling, Vol. 4, No. 2, pp. 79-88 (1981).
16. Graveman, D. F. "Can a Slow-Speed Shredder Replace Your Hammer mill?", Recycling Today, pp. 66-68 (March 1988).
17. Barton, A. F. M. Resource Recovery and Recycling, A Wiley-Inertscience Publication, John Wiley & Sons, New York, pp. 154-157 (1979).
18. Anonymous "Linrex Mill", Published by Hosokawa Micron Co., Ltd., Cat. No. HLX-2, pp. 1-6 (Date Unknown) (in Japanese).
19. Anonymous "LINREX-MILL (Extra-Fine Crushing System under Cryogenic Temperature)", Published by Osaka Gas Co., Ltd., 4p. (Date Unknown) (in English).
20. 楊金鐘、蔡尤溪 「日本超低溫粉碎法資源回收的發展」 (1989) (即將發表於「能源、資源與環境季刊」)。
21. Anonymous "Used Tire Cryogenic Crushing System", Published by Osaka Gas Co., Ltd., 4p. (Date Unknown) (in English).
22. Anonymeus "Cryogenic Process Recycles Used Auto Tires", Chemical & Engineering News, Vol. 52, No. 6, pp. 21-22 (June 1974).
23. Burford, R. P. "Cryogenic Regrinding of Rudder", Conservation & Recycling, Vol. 4, No. 4, pp. 219-233 (1981).
24. Anonymous "Methods to Recycle Scrap Rubber Advance", Chemical & Engineering News, Vol. 55, No. 25, pp. 5-6 (June 1977),
25. Phadke, A. A., Bhattacharya, A. K., Chakraborty, S. K., and De, S. K. "Studies of Vulcanization of Reclaimed Rubber", Rubber Chemistry and Technology, Vol. 56, No. 4, pp. 726-736 (1983).
26. 中國時報第5版 (1989年2月1日)。
27. 民生報第21版 (1989年2月2日)。
28. 聯合報第14版 (1989年2月14日)。

29. 臺灣時報 (1988年1月24日)。
30. 蔡尤溪、楊金鐘、龍村倪 「超冷凍法廢棄物回收」，1989年12月12日向行政院環保署簡報資料。
31. 方正璇， 工業技術研究院能源與礦業研究所，私人通訊 (1989年1月19日)。
32. Mishra, I. B., Koutsky, J. A., and Braton, N. R. "Cryogenic Recycling of Solid Wastes", Polymer News, Vol. 2, No. 9/10, p. 32 (1976).
33. Allen, D. H. and Biddulph, M. W. "The Economic Evaluation of yopu-lverising", Conservation and Recycling, Vol. 2. p. 255 (1979).
34. Zolin, D. J., Frable, N. B., and Gentilcore, J. F., Paper presented at a meeting of the Rubber Division, American Chemical Society, Cleveland, Ohio, October 4-7, 1977. Abstract in Rubber Chemistry and Technology, Vol. 51, p. 386 (1978).
35. Kaneda, M., Osaka Gas Engineering Co., Ltd., Private Correspondence December 16, 1988.
36. 聯合報第6版 (1989年2月11日)。