

國立交通大學

精密與自動化工程學程

碩 士 論 文

太陽能電池的材料回收處理與再利用研究

A STUDY OF MATERIAL RECOVERY, PROCESS AND
UTILIZATION OF SOLAR CELLS



研 究 生：吳 貴 淳

指 導 教 授：徐瑞鐘 博士

陳俊勳 教授

中 華 民 國 九 十 五 年 七 月

太陽能電池的材料回收處理與再利用研究

研究生：吳貴淳

指導教授：徐瑞鐘 陳俊勳 博士

國立交通大學 精密與自動化學程 碩士班

摘 要

隨著人類生活的進步，對於能源的需求是愈來愈高。但地球所蘊含之能源都日漸枯竭，各種替代的再生能源便在這種情況下發展出來。尤其以太陽能為代表，因它取之不盡用之不竭，若太陽能能更有效率的轉換成其他形式能源，將提供人類所需的能源。太陽能發電是利用半導體材料所製作出的太陽能電池，將光能轉換成電能，因半導體技術的進步，使製作太陽能電池的成本下降同時效率也提升，使太陽能電池的使用普及化。

在先進國家大力推廣與補助太陽能產業下，太陽電池製造量大幅增加，生產與製造的過程中有害物質使用未管制；太陽能電池生命週期約 20-25 年，使太陽能電池面臨更換命運；亦隨科技進步，太陽能電池效率亦將提升，舊型且效率不彰的太陽能電池，未達年限即淘汰更新。這些廢棄太陽能電池與發電模組，隨意棄置未作妥善的處理將對環境造成相當大的負擔與污染。

因此太陽光電產業發展欣榮可期，相關法令與處理技術未臻完備，本研究試研擬在不增加管理與回收處理成本下，由現行回收體系直接回收的可行性，研究運用現行製造設備在不增加成本下，即能直接回收廢太陽電池技術。其研究方向從生產端到成品端所生之廢矽材，並預估廢棄產生時間與量，提供政府管制的時間與設置處理廠的各項依據；從社會、成本與技術面分析回收的各種可行性，回收應採取的經濟手段與管理的架構，並提出回收的系統架構建置，使太陽電池發電系統均能受管制。

關鍵字：廢太陽電池材料、回收再利用、管理與處理體系架構、處理技術

A study of material recovery, process and utilization of solar cells

Student : Kuei Chun Wu

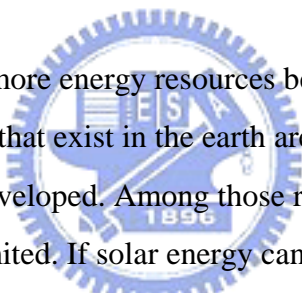
Advisor : Dr. Ruey-Jony Shyu

Dr. Chiun-Hsun Chan

Degree Program of Automation and Precision Engineering

National Chiao Tung University

Abstract



Human require more and more energy resources because technology improved life. However, the energy resources that exist in the earth are depleted. Therefore, more and more re-used energy resources are developed. Among those re-used energy resource, solar energy is the epitomes because it is unlimited. If solar energy can be more efficiently transformed into different type of power, it will provide the energy that human need. A solar cell, which is Power by solar energy, is using semiconductor to transform light into electric power. Because of improved manufacture process, the manufacture cost decreased meanwhile the solar cell is more efficient. It makes solar cell more available to all.

Because develop country governments encourage using solar cells, requires of those solar cells are increased. However, harmful materials that produced during the manufacture process are not been controlled. Life cycles of solar cells are usually 20-25 years. After the period, those cells need to be replaced. Also, because more and more innovations have been developed, old power model and inefficient solar cell are eliminated. Those eliminated cells and power model will cause a lot of pollution with properly handle process.

Therefore, handling those discarded materials would be another prospect industry even though related laws and techniques are not been perfectly established. This research develops

a process which using current recycle techniques without increasing management and recycling costs, Using current equipments and technique to handle discarded solar cells without increasing budget. This process is focusing on predicting the amount of discard silicon materials, providing government the direction that could be the standard of handling discarded material. Based on the viewpoint of society, budget and technique, the research can provide a structure of recycling model.

Keywords : Used solar cell material, Recycle, Construed of manage and process, Process technique



誌 謝

經歷了四年的時間，終於可以畢業了，求學期間在工作上經歷了離職，與人合夥開公司，到彼此對前景業務方向的差異而拆夥，在在都豐富了我的人生經歷，更因為有這些經歷，對未來規劃將更謹慎，也更有能力去掌握自己的人生。

在交大的求學期間是我人生中一段美好的回憶，在這認識與交了許多的好友，提供了我許多不同的視野；而學經歷都豐富的教授，在課堂上的知識傳遞與專業的精神，更是讓我了解敬業與專注的義涵，讓我除了在學業上獲得許多，在態度與專業上更看到每個人所展現出的自信與身為交大人的驕傲。

要感謝的人真的很多，首先感謝我的恩師 徐瑞鐘博士，經常在公務之餘，撥允時間抽空指導我的論文，讓我的論文更臻至所求，其專業與敬業精神更是做出最佳的身教；也謝謝另一位恩師 陳俊勳教授，他給我在論文上的諸多建議與協助，使論文能順利付梓；而楊致行博士於口試上的諸多寶貴建議與鼓勵，使論文的內容更充實更具參考性。

求學期間相當支持我的父母，亦要表達我無盡的感謝；也要謝謝我二技的恩師王中行，鼓勵與協助我進入交大；謝謝女友千惠，在兩年的論文過程中，捨棄許多休閒時間陪我上圖書館，給我很多支持與鼓勵。要感謝的人真的太多，在此借用陳之藩先生的文章作為結尾。「得之於人者太多，出之於己者太少，因為需要感謝的人太多了，就感謝天罷」。

簡 歷

姓 名：吳 貴 淳

出生日期：1976.10.20

聯絡方式：van1020@gmail.com

經 歷：佳龍科技-設備工程師

全亞冠科技-業務工程師

SGS-ISO9000 稽核員

目 錄

	頁次
中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝	iv
目錄	v
圖目錄	vii
表目錄	viii
第一章	緒論 01
1.1	研究背景..... 01
1.2	研究動機..... 02
1.3	研究步驟..... 06
第二章	文獻回顧 07
2.1	太陽電池發電原理與材料簡介..... 07
2.2	國內外太陽能產業發展現況..... 15
2.3	國內外廢棄物法令簡介..... 18
2.3.1	日本、德國、美國廢棄物法令..... 19
2.3.2	國內廢棄物法令..... 24
2.3.3	WEEE與RoHS與Eup法令..... 25
2.3.4	各國法令規範小結..... 27
2.4	廢太陽電池相關回收文獻..... 28
2.4.1	法令要求與回收探討..... 29
2.4.2	廢棄太陽電池產生量..... 31
2.4.3	國外回收太陽電池技術..... 31
第三章	太陽電池結構與回收理論 36
3.1	太陽光電系統結構與製程及對環境影響..... 36
3.2	廢棄物回收理論與市場工具..... 39
3.2.1	成本效益與延伸製造者責任..... 39

3.2.2	市場工具.....	41
3.3	廢棄物處理再生技術.....	43
第四章	太陽能電池處理方案與處理再生技術.....	47
4.1	太陽能電池生產過程之廢棄物.....	47
4.1.1	矽砂到晶棒（磚）階段.....	50
4.1.2	晶棒（磚）到晶片階段.....	51
4.1.3	晶片到太陽能電池階段.....	51
4.1.4	太陽能電池到模組與系統階段.....	52
4.1.5	太陽能電池生產過程小結.....	53
4.2	廢太陽能電池量預估與法令分析.....	53
4.3	廢太陽能電池回收可行性分析與方案研擬.....	57
4.3.1	回收可行性分析.....	58
4.3.2	回收可行性方案研擬.....	66
4.3.3	回收管理架構.....	68
4.3.4	回收系統架構.....	70
4.4	廢太陽能電池處理再生技術.....	75
4.4.1	周邊廢電子零件處理.....	75
4.4.2	廢太陽能電池處理.....	77
第五章	結論與建議.....	81
5.1	結論.....	81
5.2	後續研究建議.....	81
參考書目	84

圖 目 錄

圖 1.1	國際煤價走勢圖	03
圖 1.2	未來全球太陽能電池生產量	05
圖 2.1	p 型 n 型半導體分別	08
圖 2.2	太陽能電池發電原理	09
圖 2.3	太陽電池種類與市佔率	10
圖 2.4	單晶矽太陽能電池	11
圖 2.5	多晶矽太陽能電池	12
圖 2.6	非晶矽太陽能電池 (撓曲式)	12
圖 2.7	化合物半導體系類	13
圖 2.8	德國廢太陽電池廢棄成分與廢棄量	32
圖 2.9	德國廢太陽電池廢棄成分與廢棄量	33
圖 2.10	德國回收廢太陽電池流程示意圖	34
圖 2.11	EVA 氣化溫度與重量關係圖	34
圖 2.12	日本回收廢太陽電池研究示意圖	35
圖 2.13	回收廢太陽電池流程圖	35
圖 2.14	玻璃回收流程圖	36
圖 3.1	結晶矽太陽能電池製造流程圖	38
圖 3.2	太陽電池模組剖面圖	39
圖 3.3	產品生命週期與所產生廢棄物示意圖	45
圖 3.4	廢棄物管制與技術處理示意圖	46
圖 4.1	多晶矽原料成為太陽電池晶圓過程	49
圖 4.2	太陽能電池製造流程與相關廢棄物	50
圖 4.3	矽砂到晶棒流程—單晶與多晶	51
圖 4.4	太陽電池成長量與廢棄量比較	55
圖 4.5	矽晶價值與工資成本比較示意圖	65
圖 4.6	回收管制流程示意圖	71
圖 4.7	廢太陽電池回收體系制度	74
圖 4.8	太陽電池發電系統(獨立與混合型)	80
圖 4.9	廢電子零組件與五金拆解流程示意圖	81
圖 4.10	回收流程示意圖	83
圖 4.11	廢太陽電池回收流程示意圖	84

表 目 錄

表 1.1	台電歷年電價表.....	03
表 2.1	太陽能電池主要種類與材料.....	10
表 2.2	太陽電池應用範圍表.....	14
表 2.3	世界各國對太陽能光電系統發展規劃及展望.....	15
表 2.4	主要國家歷年太陽電池市場銷售量.....	16
表 2.5	WEEE 指令所列電子電機設備之分類.....	26
表 2.6	RoHS 指令相關影響範圍與濃度.....	28
表 3.1	太陽光電系統成本結構分析.....	37
表 3.2	太陽電池重金屬物質與成分表.....	40
表 4.1	太陽電池模組重量成分表.....	54
表 4.2	太陽電池系統處理與現行廢電子處理比較.....	62
表 4.3	太陽電池瓦數轉換重量表.....	62
表 4.4	矽價與工資成本比較示意圖.....	65



第一章 緒論

1.1 研究背景

能源是經濟發展與社會的原動力，而大部分的石化能源，例如石油、燃煤、天然氣等能源的轉換，都需要用燃燒方式才能轉換成電力，在轉換的過程中都會造成能源損失，對環境造成污染與破壞；而號稱發電效率較佳與成本較低的核能，雖說有效減少二氧化碳的產生，但生產過程中所造成的生態破壞亦不可忽視，例如廢熱需要使用海水冷卻，但卻造成海中的珊瑚礁群白化，使生態遭受嚴重破壞，而生產後的核廢料處理問題更是令人棘手，核廢料的衰減期很長，若接觸到高劑量輻射，將使生物基因發生突變，如何找到一種妥善處理核廢料方法與暫存地，仍是有待人類研究克服的難題。

石化能源在人類的使用下，已經呈現逐年減少的趨勢，而這些能源都集中蘊藏於少數地區，造成國際上為爭奪能源，所引發政治與軍事上的衝突。這些都顯示能源的稀少性與地區性，這是全球都面臨的問題。而新興能源開發就需要考量到這些問題，除減少對他國能源的依賴，同時將環境污染衝擊降至最低，讓人類永續生存與經濟發展，這是世界各國研究的重要課題。目前能源的研究方向大都是向孕育地球的母親太陽來找尋，因為太陽供給了地球上所需的能量轉換，使得我們的生態系統循環得以生生不息；也因為如此，向太陽找尋人類所賴以生存的能源，正是解開能源不足的最佳解決方式。

台灣位處亞洲為一海島天然資源極度缺乏，正因資源極度缺乏，各種能源都仰賴進口以轉換成電力與動力，以提供民眾日常所需與更舒適的生活，也因穩定的電力供應，亦創造台灣的經濟起飛。台灣能源有九八%以上依賴國外進口，因為能源並非能自行掌握，經常會受到國際市場所左右，造成價格波動與供應上的問題，所以如何找到可靠有效率的能源，已成為當務之急。

在各種能源研究發展中，每種能源各有其優缺點，但以太陽能發電方

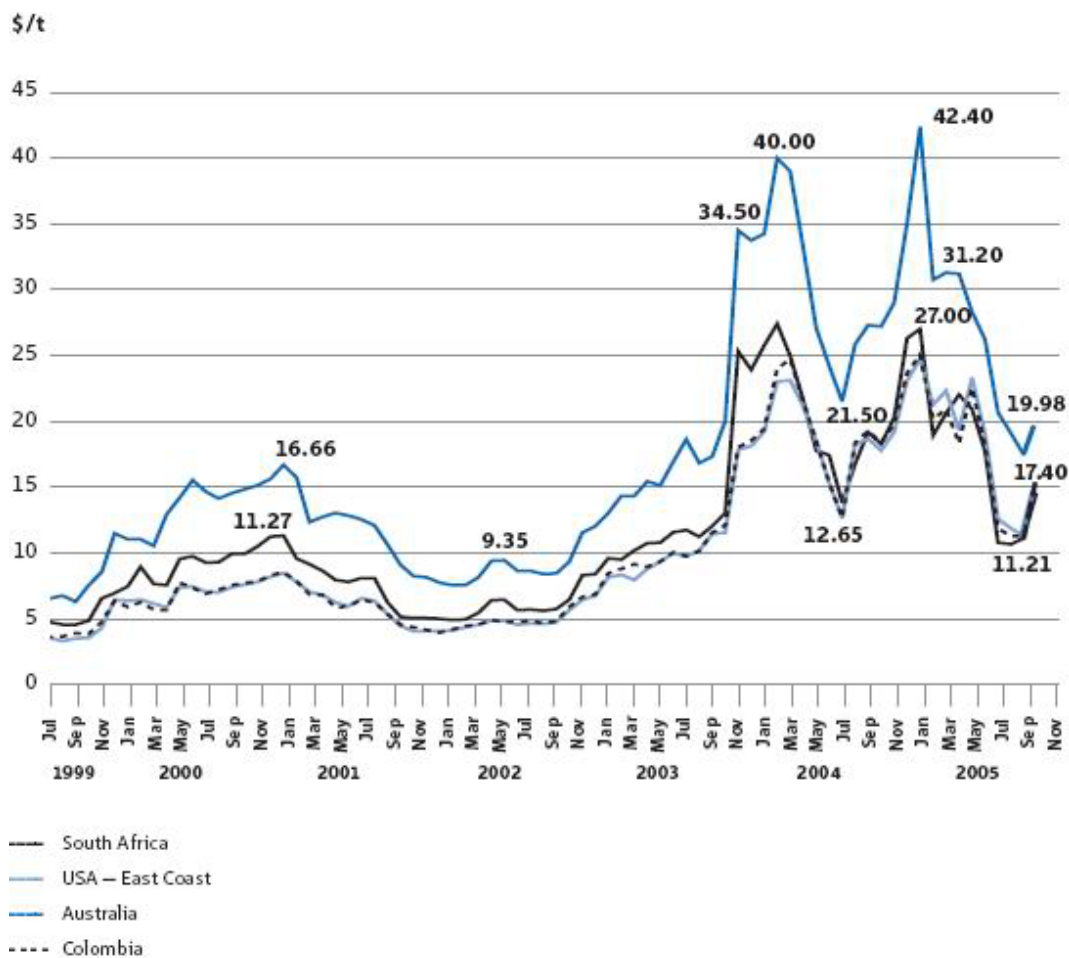
式是較佳的選擇，國內外已經有許多太陽能發電的相關研究與實績，隨著半導體工業的進步與發展，使製造太陽能電池的成本降低，也為太陽能發展提供良好的發展契機。台灣位處北回歸線附近日照充足，實為發展太陽能產業最好的國家；台灣亦為世界半導體工業的生產基地，有半導體製造的相關工業的配合，對於這個明星產業，台灣將有機會佔一席之地。

使用太陽能發電就是希望減少對環境的負擔，若製造過程產生廢棄物或生命週期結束時沒有妥善處理任意廢棄，將對環境造成影響使美意打折。太陽電池因長期使用，其材料性質因陽光照射而老化，將使轉換效率降低而淘汰，若無先期規劃其處理或是回收再利用，將造成二次的污染，屆時再花費龐大的經費處理，實為不智之舉。

1.2 研究動機

全球因經濟成長對能源的要求只有增加而無減少，不論是積極發展經濟建設需用電量大的開發中國家，或是生活品質要求高的已開發中國家，亦或是需要基礎建設的落後國家對於能源的需求都成長到歷史的高峰。這種現象在金磚四國（巴西、俄羅斯、印度、中國）努力發展經濟下，更使世界對石化能源的需求加大，而全世界產油國的生產與供應不及與戰爭所影響，造成油價上漲，原油價格居高不下，對經濟造成相當程度的影響；地球環境也因發展經濟，造成二氧化碳大增與加速地球暖化現象，使世界各地天氣異象頻傳，造成相當多生命與財產損失。世界各國為減少能源受制他國而影響經濟與生活，均大力推廣再生能源研究與使用。

以台灣為例，使用火力發電的比例仍高，由圖 1.1.煤價上漲的曲線圖與歷年台電電價表 1.1 可知，國際煤價因需求升高，而台灣電價卻未隨煤價同步調整，而原油價格上漲，造成相關成本的增加，發電成本壓力大增。以 93 年為例，國際煤價漲幅超過一倍，國內電價卻未上漲，反較 92 年下降 0.8%。政府若維持不漲價政策，將造成台電的虧損使全民買單，政府終將因市場機制而調漲電價，而調漲電價對節約能源更有顯著效果，更隨著各項對環境友善的國際公約的施行，如京都議定書在 2005 年 2 月 16 日生效，對環境不友善的國家，將受到經濟上的制裁，使環境成為有價與高



Source: Frachtcontor Junge Co., VDKI.

圖 1.1 國際煤價走勢圖

資料來源：Frachtcontor Junge Co., VDKI

表 1.1 台電歷年電價表

年別	88	89	90	91	92	93	94
電價	2.1071	2.1133	2.1221	2.0945	2.0682	2.0520	2.415
增加%	-	0.3	0.4	-1.3	-1.3	-0.8	18

資料來源：台灣電力公司

昂的成本支出。台灣以燃煤等發電方式產生的電力，使二氧化碳排放量增加，而台灣總體二氧化碳排放量佔全球排放量1%，這種高污染的發電與供電效率不佳的發電方式，將受到嚴厲考驗。為了減少對環境的破壞，提高發電成本與轉嫁給消費者將是必然的，世界各國都面臨同在一個地球上生活，他國對環境的破壞，終將影響自己，而無法置身度外。

在這種時空背景下，各種方式的替代能源便出現了，其中較有發展潛力的有生質能、風力、水力、海洋能、地熱等，這些能源大都間接或直接來自太陽提供，其中太陽能電池為直接利用太陽能發電。太陽能電池的優點是使用地點廣泛，不受有形的疆界所限制；是一種模組式成品，可任意組成所需功率；可靠度與耐久性很高，保養費低；沒有短路或開路的損害問題；只要有陽光便有電的特性，即使未架設輸配電系統（如架設困難或不合算）的偏遠地區也有電可用；加上操作容易，安全無虞，所以可廣泛應用。缺點是夜晚無太陽便無法發電，受限場地面積僅能提供小單位的發電，相對於大型火力或核能電廠，太陽能電池的轉換效率仍不理想，以至於發電成本較高，目前無法與其他發電方式競爭。

目前以國內PV系統發電成本約 14-15 元/度電，一般住宅用電夏季尖峰時段 2.7~3.1 元/度電，非尖峰時段 2.3 元/度電，兩者相較之下，高出一般住宅用電價 2.3-3.1 元/度電甚多[1]，在推廣上相當不易。若參照國外經驗，除補助購置太陽電池發電設備外，更藉由法令要求電力公司用較優惠價格收購電力，將能大幅促進裝設意願，對環境負擔與成本將有效降低。雖說以目前再生能源的發電成本仍高，但是再生能源的發展，不應只從單純的成本來看，傳統發電產生的環境及社會成本相當大，二氧化碳與核廢料棄置的問題，都未能確實反映其社會及環境成本，若經計算這些隱藏成本，再生能源將突顯其優勢，而發展再生能源也具有掌握自主能源的戰略意義，能減少對他國的依賴。

太陽電池的種類繁多，若依材料種類來區分，可分為單晶矽(single crystal silicon)、多晶矽(polycrystic silicon)、非晶矽(amorphous silicon，簡稱 a-Si)、III-V 族[包括：砷化鎵(GaAs)、磷化銦(InP)、磷化鎵銦(InGaP)]、II-VI 族[包括：碲化鎘(CdTe)、硒化銦銅(CuInSe₂)]等。而矽乃地球上蘊含量相當豐富的元素，且矽本身無毒性，它的氧化物穩定又不具水溶性，且矽在半導體工業的發展，已具有深厚基礎，目前太陽電池仍舊以矽為主要材料。台灣是世界半導體與電機電子製造生產國，運用現有半導體與電子製造工業的背景設備與技術，與國際能源潮流相接軌，可為促進經濟再成長立下良好的基礎。

在 1996 年前所生產之太陽能電池，因價昂與普及率不高，其安裝使用量都較小。而太陽能電池使用年限約為 20-25 年，這些電池模組將在 2010 年起陸續因老化而淘汰。因持續研發效率更佳的太陽能電池，在 1999 年市場需求量大增下，每年的成長率都超過三成以上。而由圖 1.2 預測其未來太陽能電池仍以矽為材料佔多數，其數量上相當大，而以矽為主的太陽能電池，佔太陽能電池模組成本相當高的比例，故回收價值相當高，值得研究發展其回收處理技術與相關法令配套措施，鼓勵此產業的發展，也能就近提供矽材料的來源。



資料來源：Sharp, April, 2005

圖 1.2 未來全球太陽能電池生產量

資料來源：Sharp, 2005/04

太陽能發電系統使用年限相當長，但隨技術進步與更新，太陽能電池發電系統並非全然是因年限而淘汰，有相當大原因是其周邊發電模組已達使用年限，維修費用較淘汰更新為高；更因輻射造成太陽能電池的老化使轉換效率降低。故電子廢棄物的特點是體積且構造複雜，產品內部緊密結合了許多不同的材料，其中包括黃金等貴金屬，又有鉛、鎘、汞及六價鉻等有害物質，回收後不能像其它垃圾那樣地掩埋，亦無法以焚化的的方式處理。

未雨綢繆做好妥善規劃，避免屆時其處理設備與技術，相關法令尚未完備，而無法處理此一廢棄物造成環境負擔，實為當務之急，如此可避免因使用太陽能發電的美意，反因廢棄的太陽電池而造成環境負擔。

台灣在這一次能源產業的革命中，因半導體的製造群聚性相當完整，在太陽能產業製造上將可創造出相當可觀的產值。台灣已經進入已開發國家，人民對生活的要求將愈來愈高，對自身相關居住環境的關心程度將大大增加，台灣過去用環境賺取外匯的時代將過去。在這場能源產品製造上臺灣將佔有一席之地，故須考量太陽電池在製造階段或產品壽命結束時，能否得到完善且充分的處理，避免因生產而換取環境永遠的破壞。

俗話說「廢棄物就是錯置的資源」，應避免資源不因人類使用不當，而使資源枯竭，讓資源得以永續利用。透過資源的再利用與廢棄物處理技術的發展，可使資源得以永續使用，更可減少新品製造的能源與成本支出，這是本文研究的動機所在。而發展回收太陽電池技術，回收太陽電池中的矽材，對欠缺矽原料的我國半導體產業而言，將可就近提供價廉的原料來源，使產業競爭力增加。



1.3 研究步驟

為達成本文研究的目的，將採用下列研究步驟，以利研究之進行。

1. 簡介太陽電池原理、製造過程所生之廢棄物與文獻探討。
2. 國內外環保法令與回收理論。
3. 廢太陽電池回收可行性探討與回收處理技術。
4. 結論與建議。

第二章 文獻回顧

太陽能電池在 1954 年時由 Bell 實驗室所製造 [2]，迄今已 50 年，在效率增加與實際應用上仍有許多努力的技術空間。以下將針對太陽能電池發電原理、太陽能電池材料、廢棄物相關法令與國外廢太陽電池回收處理文獻做相關介紹。

2.1 太陽電池發電原理與材料簡介

太陽能電池是一種能量轉換的光電元件，它是經由太陽光的照射後，把光的能量轉換成電能，此種光電元件稱為太陽能電池 (solar cell)，從物理學的角度來看，有人亦稱之為光伏特電池 (photovoltaic)。

關於太陽電池的發電原理 [3]，可以用一構造最簡單的單晶矽太陽電池來說明。所謂的單晶矽，就是指矽原子與矽原子間按照順序規則的排列。矽 (Si) 的原子序為 14，其電子組態為 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$ ，其中內層的 10 個電子 ($1s^2 2s^2 2p^6$)，被原子核緊密的束縛著，而外層的 4 個電子 ($3s^2 3p^2$) 受到原子核的束縛較小，如果得到足夠的能量，則可使其脫離原子核的束縛而成為自由電子，矽原子外層的這四個電子又稱為價電子，而矽的晶體結構是屬於鑽石晶體結構 (diamond crystal structure)，每個矽原子與鄰近的四個矽原子形成共價鍵，如果我們在純矽之中摻入三價的雜質原子，例如硼原子 (B)，此三價的雜質原子，將取代矽原子的位置，因為硼原子只有三個價電子可與鄰近的矽原子形成共價鍵，所以在硼原子的周圍會產生一個空缺，可供電子填補，此一可填補電子的空缺即稱為電洞。電洞在電學中可視為一可移動且帶正電的載子 (carrier)，因為電洞可以接受一個電子，所以摻入的三價雜質原子又稱為受體 (acceptor)，而一個摻入三價雜質的半導體，即稱為 p 型半導體。

同理，如果我們在純矽之中摻入五價的雜質原子，例如磷原子 (P)，此五價的雜質原子，將取代矽原子的位置，因為磷原子具有五個價電子，其中的四個價電子分別與鄰近的四個矽原子形成共價鍵，而多出一個自由

電子，該電子為一帶負電的載子，因為五價的雜質原子可提供一個自由電子，故稱此五價的雜質原子為施體(donor)，而摻了施體的半導體稱為 n 型半導體，在純矽之中摻入三價的硼原子後，就會形成可以自由移動的電洞，此即為 p 型半導體。如圖 2.1 所示。

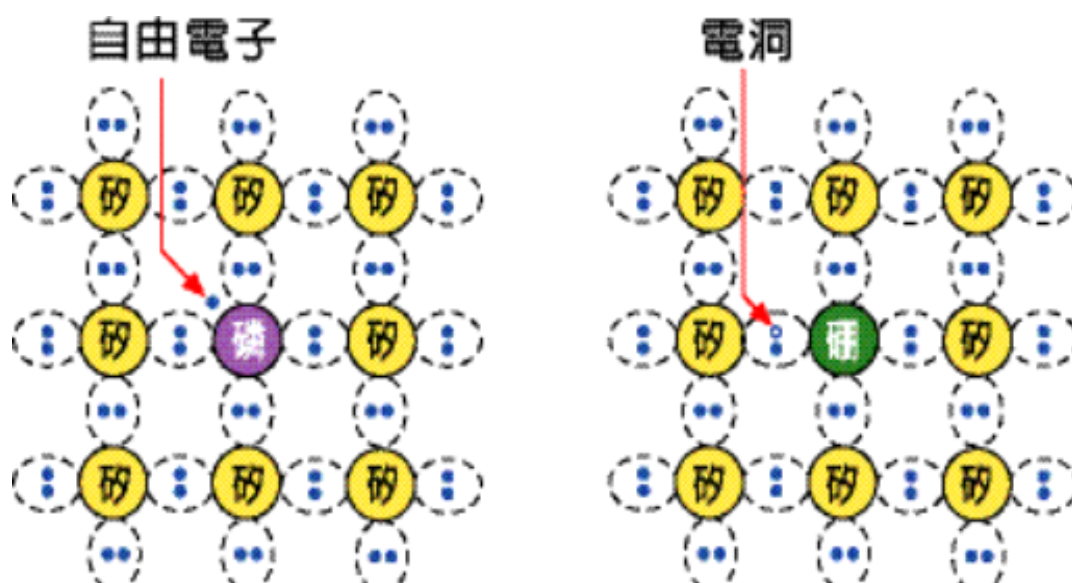
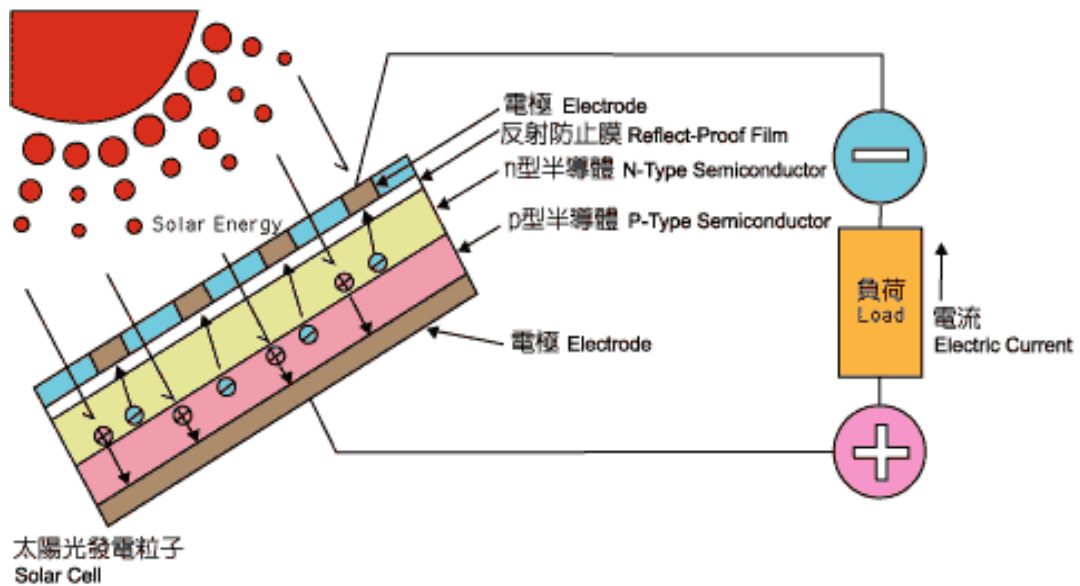


圖 2.1 p 型與 n 型半導體分別

資料來源：熊谷秀，「太陽光電知多少」，科學發展，第 383 期，頁 36，
2004 年 11 月

一般太陽電池是以摻雜少量硼原子的 p 型半導體當作基板 (substrate)，然後再用高溫熱擴散的方法，把濃度略高於硼的磷摻入 p 型基板內，如此即可形成一 p-n 接面，而 p-n 接面是由帶正電的施體離子與帶負電的受體離子所組成，在該正、負離子所在的區域內，存在著一個內建電位(built-in potential)，此內建的電位，可驅趕在此區域中的可移動載子，故此區域稱之為空乏區(depletion region)。當太陽光照射到一 p-n 結構的半導體時，光子所提供的能量可能會把半導體中的電子激發出來，產生電子-電洞對，電子與電洞均會受到內建電位的影響，電洞往電場的方向移動，而電子則往相反的方向移動。如果我們用導線將此太陽電池與一負載(load)連接起來，形成一個迴路(loop)，就會有電流流過負載，這就是太陽電池發電的原理，如圖 2.2。



資料來源：太陽光發電導入ガイドブック(本編)

圖 2.2 太陽能電池發電原理

資料來源：太陽能光電發電網

www.pvproject.com.tw/aboutus/principle1.html

太陽能電池因受到材料，製程與各項發電因素的影響，有其優缺點。

優點：

1. 太陽能電池是經過光的能量轉換成電能，因無傳統發電所需之可動部份，故無噪音與轉換電能之能量浪費。
2. 不因規模大小均有其固定發電效率。
3. 構造簡單易模組化，量產容易。
4. 可直接將電力輸出接近使用端，減少相關輸配電路，適用於山區偏遠地區或電力成本較高處。
5. 發電量隨日照強度而定，對紓解尖峰用電有助益。
6. 可作為屋頂與牆面之使用，兼具隔熱的功能。
7. 當每平方公尺的太陽電池模組，可產生的電力約為 112W，約可減少石油使用約 0.48 公升，也可減少 CO₂ 排放量約 1.104 公斤，可以說效益相當大。(3kw 容量之太陽能電池其安裝面積約為 26.7m²，太陽能電池發電 1MW 發電量相當 400 公秉油當量，燃燒每公秉油會產生 2.33 噸的 CO₂)

缺點：

1. 設備成本與發電成本較傳統能源為高。

2. 輸出為直流電，需轉換成交流電，方能提供家庭的電器設備使用。
3. 發電量受系統面積的限制。
4. 發電量受陽光能量的強弱，天候的變化，夜晚無法發電等因素影響。

太陽能電池材料相當多種，而各種電池材料其製造方式與特性均不同，太陽能電池材料可以大略區分為矽系，化合物半導體系及其他三種類型，如表 2.1 所示。而市面上太陽能電池的佔有率如圖 2.3。以下分別簡單說明介紹：

表 2.1 太陽能電池主要種類與材料

太陽能電池種類		半導體材料	Cell 效率 %	模組效率 %
矽	結晶矽	單晶矽	15-24	12-20
		多晶矽	10-17	10-15
	非晶矽	a-Si、a-SiO、a-SiGe (薄膜型)	8-13	5-10
化合物 半導體	III-V 族	GaAs (晶圓型)	19-32	18-30
	II-VI 族	CdS、CdTe (薄膜型)	10-15	7-10
	多元化合物	CuInSe ₂ (薄膜型)	10-12	8-10
染料敏化 TiO ₂ (Dye Sensitized Solar Cell)			8-11	~8
有機薄膜 (有機薄膜太陽能電池)			3-5	

資料來源：工研院 IEK-ITIS 計畫 (2004/7)

1. 晶矽類：有單晶矽太陽能電池、多晶矽太陽能電池、非晶矽太陽能電池，其特點分別如下
 - (1) 單晶矽電池特徵：原料矽藏量豐富；單晶矽製造技術隨半導體製程進步而良率提高；密度低、材料輕；能源轉換效率高；發電特性安定 [4] 等優點，但因製造成本較高普及性較多晶矽低。而單晶矽的太陽能電池開發方向是朝向提高其效率與

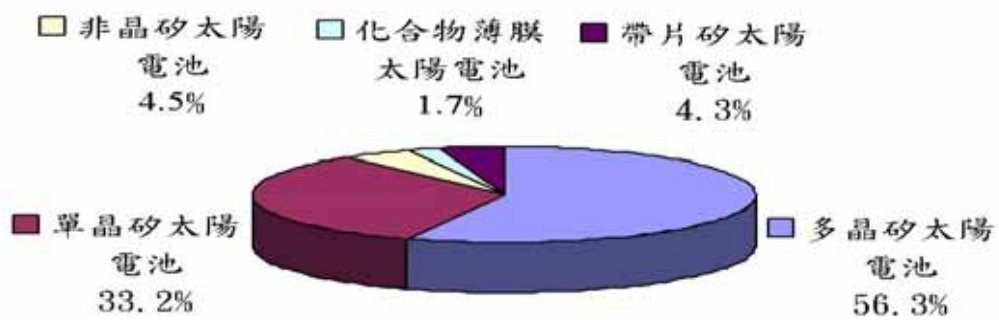
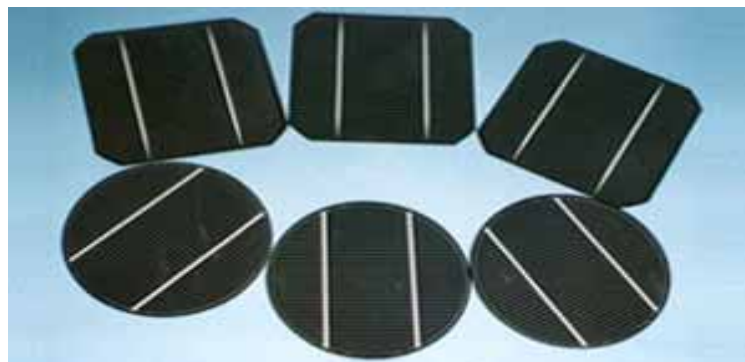


圖 2.3 太陽電池種類與市佔率

資料來源：Photon International，PIDA 整理，2004/04

降低製造成本上著手，單晶矽的轉換效率約為 15-18%，其模組效率則為 12-15%，而通常所知效率是指模組中最低太陽能電池的轉換效率，而非平均轉換效率[5]，如圖 2.4。



資料來源：太陽光發電導入ガイドブック(本編)

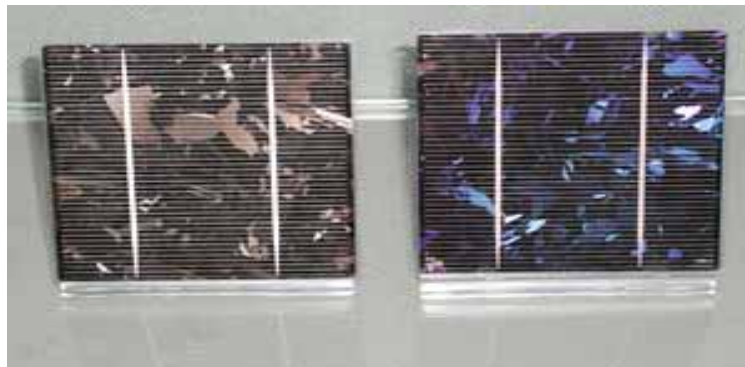
圖 2.4 單晶矽太陽能電池

資料來源：太陽能光電發電網

www.pvproject.com.tw/aboutus/introduction2.html

- (2) 多晶矽電池特徵：因使用品質較低之矽晶材料，成本較單晶矽為低，其以降低成本為考量，在市場上較易推廣佔有率較高。其降低成本的方法有三個，一是在純化的過程中沒有完全將雜質去除，二是使用較快速的方式讓矽結晶，三是避免切片的浪費。多晶矽結構較差的原因有兩個，一是本身有雜質，二是矽的結晶速度較快，矽原子無法在短時間結晶成單一晶粒。其效率差的原因在於晶粒與晶粒之間有結晶邊界存在，結晶邊界存在著許多懸浮鍵，懸浮鍵會與自由電子結合

而使電流減少，而在邊界上的矽原子鍵結情況較差，易受紫外線破壞而產生更多的懸浮鍵。隨使用時間增加，懸浮鍵數目亦增加，光電效率因而衰退。因雜質多半聚集在邊界上，雜質的存在使電子與電洞不易移動。懸浮鍵增加使光電轉換效率衰退，這是多晶矽太陽能電池的缺點，但成本較單晶矽太陽能電池低為其優點[6]。多晶矽太陽能電池的轉換效率為10-15%，其模組化的轉換效率為9-12% [7]，如圖2.5。



資料來源：太陽光發電導入ガイドブック(本編)

圖 2.5 多晶矽太陽能電池

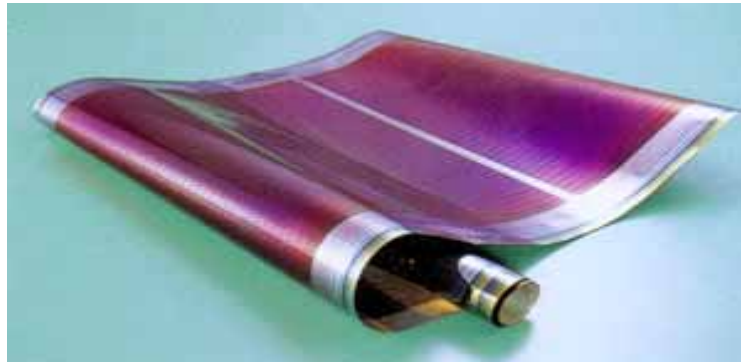
資料來源：太陽能光電發電網

www.pvproject.com.tw/aboutus/introduction2.html

(3) 非晶矽太陽能電池：在可見光範圍內光吸收係數高且光導電性大；省能之低價材料；可在任一基板成長大面積的電池；系統差價 (Balance of System) 低；可量產化；有可控制之價電子存在。因非晶系電池可在任一種基板上成長其應用範圍廣泛，世界各國莫不投入大量經費研究與發展，相信應用此技術將指日可待，如圖2.6。

2. 化合物半導體系類 (亦稱薄膜太陽能電池) 如圖2.7所示[8]其特徵如下：

- (1) 高效率
- (2) 適合薄膜化
- (3) 可有效減緩受輻射線老化的情形
- (4) 各種半導體之組合，可使波長感度帶寬域化，可期待高效率化。III-V族化合物半導體，可以達到30-40%的超高效率，已經在專業實驗室中獲得證實，例如磷化鎵銦 (GaInP)、砷



資料來源：太陽光發電導入ガイドブック(本編)

圖 2.6 非晶矽太陽能電池 (撓曲式)

資料來源：太陽能光電發電網

www.pvproject.com.tw/aboutus/introduction2.html

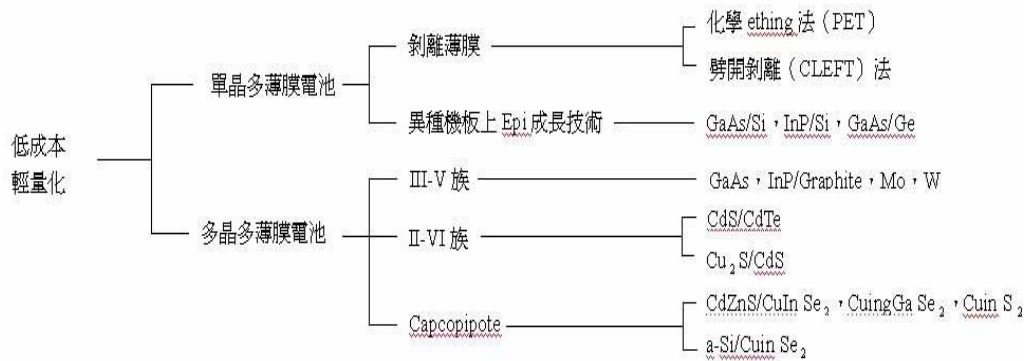


圖 2.7 化合物半導體系類

資料來源：莊家琛，「太陽能工程-太陽電池篇」，全華圖書，民國 86 年 8 月

化鎵 (GaAs)，已可達到將近 30% 的效率。而若再利用聚光方式，則可再將太陽能電池的效率向上提昇，例如若將砷化鎵 (GaAs) 與錫化鎵 (GaSn) 疊層起來，太陽能電池在聚光的轉換效率可達 35.8%，這是目前世界上所得到最高轉換效率的太陽能電池 [8]。但因污染性與成本較矽晶類太陽能電池高，故其推廣不易。此種太陽能電池大多使用在太空計劃上，可提供較佳的轉換效率。

3. 其他種類之太陽能電池：[9]

- (1) 無機太陽能電池：Zn₃P₂系太陽能電池；Se 系太陽能電池；Cu₂S 系太陽能電池；球狀系太陽能電池。

(2) 有機太陽能電池

(3) 濕式太陽能電池

以太陽能電池的材料為例，化合物半導體等係由少量元素所製成，這些少量元素包了鎘、砷、銻、鎘等，但其中砷(As)是劇毒物質，誤用少量將使人致死；而鎘會引發所謂的痛痛病。儘管以它們製成的太陽能電池轉換效率很高，但從材料來源與環保方面來看，因有嚴重的污染問題，這類太陽能電池將來較不可能成為主導地位。而另兩類電池奈米級太陽能電池和聚合物太陽能電池，它們的研究剛剛起步，技術不是很成熟，轉換效率還比較低，這兩類電池還處於探索階段，短時間內不可能替代。因此，從轉換效率和材料的來源來看，今後發展的重點仍是應用矽的太陽能電池，特別是多晶矽和非晶矽薄膜電池。目前太陽電池之應用範圍極為廣泛，除建築外，農業、交通、通訊醫療等許多領域均有使用，其應用範圍整理如表 2.2。



表 2.2 太陽電池應用範圍表

領域	範例
民生消費	計算機、手錶
交通安全	照明、交通號誌、警告標誌燈、緊急電話
通訊	中繼微波站、無線電話、收音機、氣象資料傳送
電力	大型太陽能電廠、偏遠山區及離島供電
居住	發電系統、照明、通風及空調、保全系統
汽車工業	太陽能動力車
農業	灌溉系統、給水系統、溫室、病蟲害防制
海事	燈塔、浮標、太陽能動力船、餵食器、海水淡化系統
工業	獨立發電系統、廣告牌、照明
公共設施	照明、時鐘、裝飾、監視及控制器
醫療	疫苗及藥品冷凍庫、緊急醫療之照明及空調
航太	太陽能動力飛機、衛星

資料來源：張子文，太陽電池應用於建築上之研究，2001，

地球暖化問題受到各國重視，對環保的要求提高，以各種再生能源為輔的發電方式，相較以傳統方式發電為主的發電方式，將可有效減低二氧化碳的排放量，避免溫室效應的發生。利用太陽能發電，每發一度電約可以使CO₂排放量較傳統能源平均排放量下降 525 公克 [10]。而陽光取之不盡，不受有形地域疆界限制，長期而言，仍是許多國家發展再生能源的重要方式之一。隨著半導體製程的改善與奈米技術的發展，各種增加轉換效率與減少面積的太陽電池電池不斷被開發出來，善加利用對於地球的暖化效是有相當大的幫助。

據國際半導體協會 (SEMI) 統計，2003 到 2004 年的全球矽晶圓材料使用量大幅增加 22%，到 2007 年全球使用量仍有 6.2% 的年成長率，太陽能電池未來的發展趨勢，2006 約有 35% 成長，2007 到 2010 年則將維持 30% 成長。隨產量提升與技術的成熟，將有效降低太陽能電池的成本，預期至 2015 年，其發電成本將能與傳統發電成本相抗衡，PV 將會走入另一波產業發展高峰，也更有效減少 CO₂ 對環境的負荷。

2.2 國內外太陽能產業發展現況

受能源價格不斷上漲的壓力，溫室效應產生的天候異常現象，使各國莫不感受到自然反撲帶給人類的衝擊，目前各國均大力開發再生能源，尤其以德國與日本在這方面為領導者，其發展亦較他國為佳，故目前太陽電

表 2.3 世界各國對太陽能光電系統發展規劃及展望

地區	計畫名稱	目標
日本	新陽光計畫	2010 年 12.2TWh
美國	百萬陽光屋頂計畫	2025 年 5TWh
歐盟	再生能源發展白皮書	2010 年 3GWp
中國	能源技術研發計畫	2015 年 300MW
南韓	新能源和可再生能源發展要點	2012 年 1.3GW
台灣	能源會議	2010 年 21MW

資料來源：IEK，2005 年 7 月

註：美國係依能源部對未來展望之預測

池以歐洲的德國與日本為主要的生產地，各國也都有相關的推展計畫與目標如表 2.3。藉由政府在經濟上的補助與誘因，來推動太陽發電的產業發展，更盼藉由能源政策的推動，使能源效益增加與減少對他國的能源依賴，更藉由促進太陽產業發展，掌握下一階段的國家成長機會[11]。

太陽光電於最近幾年之成長快速，自 1999 年起太陽電池的全球產量以 30~40% 的年增率持續擴大。根據 renewableenergyaccess 的調查，2005 年全球太陽電池銷售量較 2004 成長了約 50%，達到 1727MW，歷年主要太陽光電生產國之市場銷售量詳如表 2.4。日本、歐洲大廠仍為主要供給者，前十大廠商生產量佔全球超過八成。工研院 IEK 更樂觀的預期，直到年 2010 為止，將以年複合成長率三成的步調成長，以此成長率預估，2010 年全球太陽能電池市場規模可望達 6412MW。

表 2.4 主要國家歷年太陽電池市場銷售量 (單位：MW)

國家	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005*
美國	16.2	17.9	21.0	25.6	38.9	38.9	53.0	53.7	60.8	74.79	100.3	120.6	103.0	139	289
日本	18.7	18.3	17.0	16.5	16.4	21.2	35.0	49.2	80.0	128.6	171.2	251.1	363.9	618	833
歐洲	13.0	13.0	16.0	21.7	20.1	18.8	29.3	33.5	40.0	60.66	86.4	135.1	193.4	308	452
其他	6.0	6.0	6.0	5.60	6.35	9.75	9.4	18.7	20.5	23.42	32.6	55.1	83.8	129	153
合計	54.0	58.2	61.1	69.4	77.6	88.6	125.8	154.9	201.3	287.7	390.5	561.8	744.1	1194	1727

資料來源：Photovoltaic News，March 2005

* <http://www.renewableenergyaccess.com/rea/news/story>

根據太陽能專業網站 Solarbuzz 近日所提出全球太陽能光電市場供需成長動態報導，由於多晶矽 (Polysilicon) 材料供貨持續嚴重短缺，全球太陽能市場的成長將因而受到限制，預估 2006 年市場僅達 10% 的成長率。根據 Solarbuzz 市場評估 [12]，2005 年全球太陽能模組系統安裝市場成長率為 34%，已突破 1,460 百萬瓦 (MWp)，其中德國市場已達到 837MWp，年成長率為 53%，亦占全球太陽能市場的 57%，也是美國市場的 8 倍。在全球太陽能電池產能方面，從 2004 年的 1,146MWp 成長到 2005 年的 2,656MWp，2005 年日本仍是位居市場供應的領導地位，有 46% 的市佔率，歐洲則佔 28%，而美國的總產能為 156MWp，詳見圖。

德國於 2000 年通過再生能源法 (Renewable)，新能源法和補貼政策加速推動了德國太陽能發電計劃的執行，以固定優惠收購電價鼓勵提供綠色電力之再生能源事業；2004 年四月德國通過再生能源法之補充修訂，2005 年起對新設備收購電價費率每年減少 5%，但裝設目標量上限由 350MW 提高為 1000MW；由於條件優惠且大幅放寬，因而使德國 2004 年太陽光電系統裝設大幅增加，並一舉超越日本成為全球最大太陽光電系統裝設地區 [13]。正因太陽能發電技術的快速成長，未來五年，太陽能光電發電成本將大幅降低 30%~50%。或許在未來的五年，太陽能光電發電成本將比燃油成本低 [14]。

不同於日本及德國市場，美國 PV 市場的推動主要著力於州政府及地區性電力公司，缺乏國家統一的推動政策及法令。西岸的加州是最主要的市場，約佔全美市場的八成。美國西部的幾個州在 2004 年制定了開發地區再生能源的計畫，在未來 20 年提高再生能源發電量。目前西部幾個州政府計畫在未來 10 年至 20 年內，將再生能源發電占其總發電量的比例提高到 10%。各州政府在計畫中採取包括稅收優惠、政策法規傾斜政策和其他獎勵措施，鼓勵能源系統開發與利用更多的再生能源，以減少對石化能源的依賴。而加州在 2006 年 1 月在公共電力委員會通過創建全美歷來最大規模的太陽能發電計畫。美西的加州太陽電池板已出現缺貨，產業界估計嚴重缺貨的情形將持續，供需平衡將在 2007 年以後，2010 年前將達到 300MW [15]。

透過太陽能發電較一般傳統發電方式的成本來的高，故各國政府先期大多採用補貼設備設置的方式，補助太陽能發電設備的裝設，再藉由修改相關電力法令，將設置後太陽能所發的電除供自用外，還能將所發的電透過電力公司的輸電網路用高價格賣回，增加民眾申裝的意願。國內目前在太陽能發電的推廣與建設上均落後先進國家相當多，起因電價相較其他國家便宜，在能源使用上較無省能觀念，故推行上相當不易，大都為公家機關的示範計畫。國內的太陽能政策是補助設備購置，卻未修改相關的配套法令，無法將所發的電賣給台電得到收益，故民眾裝設的誘因不大推廣效益不佳，因有利可圖才有申設的意願，也才能進一步帶動國內太陽發電的產業發展。

經濟部能源局在 2000 年啟動「太陽光電示範推廣計畫」，截至 2004 年累計設置發電容量為 1272KW，其設置大多為機關團體為主，較少民眾申請。因油價上漲壓力依舊存在，對於電價與經濟的衝擊相當大。台灣的能源都靠進口。2005 年的全國能源會議上，經濟部將太陽能發電推廣目標由 2004 年的 0.056 萬瓩，提升到 2010 年 2.1 萬瓩、2015 年 32 萬瓩、2020 年 57 萬瓩、2025 年 80 萬瓩為目標。希能在 2010 年將整體再生能源發電量提高到占總能源 3%~5%，或再生能源發電設置為 500 萬瓩佔整體能源 10%，而太陽能發電將佔 0.04%，這個目標將較現行太陽能發電佔整體發電量的 0.007% 高出許多 [16]，故太陽能的發展是相當令人期待。

綜觀各國對太陽能推廣計畫，油價上漲與二氧化碳排放限制是使太陽能發電普及的因素，但各國在法令上配合與補助措施，更是使普及增加的重要手段。隨太陽能產業蓬勃發展，未來 20 年廢棄太陽電池也將有大幅的增加，先行研究其廢棄處理技術與法令，有助減少因淘汰造成的環境影響。回收所得之矽材，更能有效降低製造成本與廢棄量。

2.3 國內外廢棄物法令簡介

經濟學上環境屬於環境財，環境財的特色在於不具有排他性與公共財的特性，因有此種特性存在，在生產過程中廠商並無將之計算於成本中形成外部成本，人人得坐享其成。若生產者無需考量環境成本，社會大眾需付出對環境破壞的成本，造成市場不均衡 [17]。故需要政府的介入，藉由公權力實施，將清理費用外部成本給予內部化，使廢棄物的產生不會因為是公共財，而使製造者未將這種社會成本計算於其中，達成社會均衡的狀態。

廢棄物的管理需要公權力的介入與法令上配合，故必須瞭解相關法令，才能針對廢棄物的性質差異做不同的處理。而日本與美國的制度與規劃上偏向 PDCA (Plan-Do-Check-Action) 的運作模式；而歐盟屬於「巴塞爾公約」的締約國，故歐盟所屬會員國均遵循與配合公約做出相關法令規範；我國是採用兩者的管理與立法模式，使廢棄物在有效管理的追蹤與稽核下，能減少對環境造成的破壞。

廢棄物大都分類成一般廢棄物與事業廢棄物。一般廢棄物因是民眾所生產，環境是公眾財且無排它性，若無公權力介入將會造成環境的負擔，故都由政府介入清運處理。而事業廢棄物是因為事業為了營利所產生，若隨意棄置將造成社會負擔，造成整體社會成本增加。在考量避免增加社會成本下，應要求事業負起相對的處理成本，使社會不因事業得到利益，而使社會成本增加，使市場得到均衡。

2.3.1 日本、德國與美國廢棄物法令

日本將廢棄物分為一般廢棄物及事業廢棄物兩種不同之管理方式，其中事業廢棄物中又將具爆炸性、腐蝕性、感染性及特定有害事業廢棄物，列為「特別管理事業廢棄物」，其中並定有需特殊管理之廢棄物項目，茲就日本的管理制度簡略說明如下：

法令規定事業廢棄物之儲存、集中、運輸、中間及最終處理等階段皆須符合法令公告標準，並取得營業執照；指定事業廢棄物之中間處理與最終陸上掩埋設施，上述設施興建與施工、維護保養皆需符合相關法令，在動工興建之前，須向縣（市）政府核備；產生「特別管理事業廢棄物」之事業機構或委託清理機構代為處理必須將其廢棄物之型式、數量及處理情況每年向縣（市）政府申報。在廢電子電器的回收處理方面，著重資源回收再利用、資源減量等方向。

日本在 2000 年與 2001 年間施行了八項法規，以建立回收導向的社會 (Recycling-Oriented Society, ROS)，藉以促進永續發展。此八項法規分別為：(1)推動創造 ROS 的基本法，(2)資源有效利用推動法，(3)容器與包裝回收法，(4)家用電器回收法，(5)食品回收法，(6)建材回收法，(7)綠色採購法，(8)廢棄物管理修訂法。


上述第一項是仿效德國，說明建立 ROS 須遵守的基本原則；第二項要求企業在其相關上下游製造商中進行減廢、回收與再利用。第三至第六項強制要求相關機關對特定產品施行回收。第七項從源頭著手，推動政府的綠色採購，以回收為導向的社會目標，為日本進入 21 世紀建立一個融合環

境與經濟的「社會經濟系統」，以提高日本的經濟與資源效率。

德國認為無所謂的廢棄物，只是錯置的資源，故使用特殊廢棄(Special Waste)來代表。在其「廢棄物消滅及管理法(Waste Avoidance and Waste Management Act)」中對特殊廢棄物定義為”因為類型及數量無法與生活廢棄物共同處置”和”產生自工業、商業或公眾來源，因其本質、狀態及數量對健康或環境品質可造成特別之危害或導致病原之滋長散佈”，其種類則採特定源、非特定源及化學品名稱列表方式，亦不採用認定不易方式判別特殊廢棄物。

1. 法規沿革

德國於1972年制定廢棄物處置法(Waste Disposal Act)，此法明訂廢棄物清理的定義、權責、處理與處置之相關規定，並於1986年頒定了廢棄物消滅管理法，其管制方向為：

- 
- (1) 事業機構應儘量減少事業廢棄物的產生
 - (2) 如無法避免產生之廢棄物，須儘可能予以資源化。
 - (3) 而無法資源化之廢棄物，需以無害處理方式妥善處置。

此部份條文提示了廢棄電子電器產品之回收清除處理，必須由生產買賣相關產品業者，擔負起回收處理與消費者付費的概念。

1993年德國修訂為廢棄物回收與處置法(Waste Recycling and Disposal Act)，是將廢棄物資源化與經濟面相結合，使其產生的資源化產品透過檢驗標準於社會中再行利用。該法令明定製造與因商業活動所生廢棄物，應儘量避免產生，若產生則在廢棄前進行回收，若避免產生或回收成本高時，須儘可能將其危害特性移除，使廢棄物的管制有預防性的概念。在所有廢棄物都需儘量回收的前提下，其法令與管理方式均導向成「資源循環利用的經濟體系」。法案的重要精神有：

- (1) 污染者付費原則。
- (2) 「導向成具預防觀念」的責任體系(在尚未回收熱值或回收材料之

前)。

- (3) 對廢棄物的資源化方式訂出其優先順序。
- (4) 生產者對其產品有照顧的責任。
- (5) 廢棄物的清運與處理走向民營化。

透過法令規範生產者責任與結構的調整，產品生產者有責任使產品與附產物之再利用更具有整合性，在生產階段將廢棄物減少至最低。產品的資源化及處理工作，也必需符合環保的要求。因此產品其重複使用性高，使用壽命長，易於修復與更換零件時間短等更具經濟價值與成本的特性，而污染性更低。

德國聯邦政府認為在經濟上的誘因，可增加產業界和消費者對有害廢棄物處理的創新，在政策與管制上採取積極的態度，在廢棄物管理法規和推動計畫的研擬趨勢上，特別重視綠色誘因的設計。

2. 廢棄物分類



為使廢棄物分類明確實及掌握其發生源，使廢棄物產生者及管制單位在實際運用上有所依循，德國聯邦政府於 1974 年制定廢棄物目錄，為 7 大類、24 中類、79 小類，凡 620 項廢棄物。依處理設備之不同區分為三大種類。

3. 管理制度

其管理制度是要求事業機構以不污染環境，為處理事業廢棄物的最高指導原則。事業廢棄物產生與處理機構授權各邦可因需求不同，訂定不同管理法令與管理方式，而可分為下列四種型態：

- (1) 聯邦法授權成立之獨家壟斷處理機構。
- (2) 行政區互相合作共同投資成立之處理機構。
- (3) 民營專業處理公司。
- (4) 以上三種型態之混合。

除大型生產事業機構有能力可依照法令自行成立處理中心外，更可接受委託處理他廠之廢棄物。一般中小型工廠多委託公、民營之廢棄物處理機構代為清除與處理，而廢棄物產生者則加以監督及輔導。此優點是一方面廢棄物產生機構有權瞭解並要求作妥善處理，另一方面依其廢棄物的殘餘經濟價值，而產生收付免的經濟行為，得以維持處理機構之正常營運。

事業機構依法有義務向主管機關申報，其生產廢棄物的種類、特性及數量，並載明對廢棄物產生的改善措施及廠方處理或委託處理之主要方法。德國政府為掌握事業廢棄物之動向，確保廢棄物經正確路線處理，乃於廢棄物處理法內規定「運送聯單制度 (Trip-ticket-system)」，此聯單提供政府與事業機構，對其廢棄物流向有效追蹤，亦對處理機構產生有效的管理。

美國廢棄物管理之法規依據為 Resource Conservation and Recovery Act (RCRA)，該法於 1976 年開始實行，經過多次修法之後，目前主要掌管固體廢棄物、有害廢棄物及特定地下儲槽之管理，其管理原則係自產生至最終處置為止，整個生命週期均需確保安全性，以保護環境及人類之健康。美國環保署廢棄物管理局 (Office of Solid Waste) 總管全國廢棄物政策擬定與推行，但州政府可依所需制定更嚴格法令規章，以下就美國廢棄物認定方式及管理制簡單說明：

1. 廢棄物之認定及分類

美國對於廢棄物認定上採用「固體廢棄物 (Solid Waste)」來統稱廢棄物，再由其中分出「有害廢棄物 (Hazardous Waste)」及「特殊廢棄物 (Special Waste)」，其認定及分類說明如下：

(1) 固體廢棄物之認定：

固體廢棄物 (Solid Waste) 包含了任何經由工、商、礦、農業或社區活動而產生之固體、液體、半固體或容器裝之氣體等均稱之。

(2) 有害廢棄物之定義：

凡對人體健康或環境造成顯著或潛在性的危害，足以使死亡率、

罹病率等顯著增加，或因不當的處理、儲存、運送、處置或管理，則稱為「有害廢棄物」。

2. 廢棄物管理之法規

1976年美國國會為確保有害廢棄物控制與處理的安全，通過了資源保育及回收法案（RCRA，1976）此法案的目的為：資源回收、一般固態廢棄物管理及災害性廢棄物管理。

3. 管理制度

由於美國環保署針對各類有害事業廢棄物，已經制定出較嚴格的「土地處理限制」管理準則，所有有害事業廢棄物雖經有效的中間處理而達到減量效果，但仍無法確保所有的處理設施皆能將有害廢棄物進行處理完成，並達到零排放的目標。所以對有害廢棄物的處理，仍須制定出一套合理的標準值，用以判定不同處理技術的處理效果。在此前提下，美國環保署因應不同類別的有害廢棄物，共制定出三種不同的判定法則：1、處理技術標準、2、廢棄物污染物萃取濃度標準（Constituent Concentration in Waste Extract, CCWE）、3、廢棄物危害成份的濃度標準（Constituent Concentration in Wastes）。

事實上，此三種有害廢棄物處理判定標準並非獨立而互不相關，某些有害廢棄物必須符合多種處理標準，或雙重標準才可進行最終土地處置。且大部份表列的有害廢棄物，其處理後的萃取溶出試驗標準值，比危害成份的濃度標準值為低，不同的表列有害廢棄物，對同一種危害性污染物，亦有不同的處理標準值。

2.3.2 國內廢棄物法令

1. 法規沿革


我國廢棄物清理法（以下簡稱廢清法）首次於民國63年公佈施行，因社

會環境快速變遷及廢棄物種類越趨複雜，而進行四次的修改，因有毒、有害事業廢棄物隨意棄置事件層出不窮，因此於修正條文中針對事業廢棄物清理責任有明確規範，並明定各目的事業主管機關之權責。

在法令修改過程中，因應工業化與經濟上的須求而增加的廢棄物，分別增加了對廢棄物的認定標準與貯存清除處理方法及設施標準。有害事業廢棄物認定標準中，則由特定行業別之“特定認定屬性”改採“特性與列表雙重認定”方式，並重新規定及建立毒性特性溶出試驗方法(TCLP)。

2. 廢棄物分類

在廢棄物認定中，以一般廢棄物與事業廢棄物做分類，一般是指由家庭產出之廢棄物，並非因營利所產生；而事業廢棄物又分為一般與事業廢棄物，而一般是指員工生活上產出的廢棄物，事業廢棄物則是在製造過程中所產生的廢棄物。其判定標準如下：

- 
- (1) 列表之有害事業廢棄物：製程有害事業廢棄物，指附表所列製程產生之廢棄物。混合五金廢料：依貯存、清除、處理及輸出入等清理階段危害特性之不同，其認定方式如附表。
 - (2) 有害特性認定之有害事業廢棄物：毒性有害事業廢棄物、溶出毒性事業廢棄物、腐蝕性事業廢棄物、易燃性事業廢棄物、反應性事業廢棄物、感染性事業廢棄物、石棉及其製品廢棄物、多氯聯苯有害事業廢棄物、單一非鐵金屬有害廢料等共九種經認定之有害廢棄物。
 - (3) 其他經中央主管機關公告者。

而依此這三項有害廢棄物認定標準的廢棄物，其處理技術則依認定標準可分為中間處理，最終處置與再利用三種方式。

3. 廢棄物管理

配合時勢與環保政策，在民國 88 年增加電子網路申報規定，將廢棄物

管理由源頭管制，對廢棄物的產出情形與流向，經由網路申報勾稽與核對，使廢棄物有效管理與處理，這與德國的遞送聯單制度相近；對廢棄物認定標準則由行業改依 TCLP 所規範的標準認定，與美國的判定標準相近。事業機構須建立清理計畫書的各項內容並申報，使產出的廢棄物接受到管制；對清除處理業者，則要求在運輸機具上，加裝 GPS 使廢棄物管理更有效追蹤與管制。

國內廢棄物法令大都參照先進國家法令與管理模式，並配合科技與國內廢棄物現況，進行廢棄物的規劃與管理。國內廢棄物清除處理法的發展趨勢，其管理重點從早期的一般廢棄物管理，增列事業廢棄物管制、有害事業廢棄物認定、清除處理方與網路申報等。從源頭對廢棄物的分類、管理制度的設計等，都顯示出廢棄物管理與處理上的進步。為因應各種不同廢棄物被大量產生，政府亦隨時公告其應回收處理項目，使廢棄物的回收上更見彈性。

而資源的價值性與相關回收處理技術進步，更在 92 年通過”經濟部事業廢棄物再利用管理辦法”，依此法設立的再利用機構，其主管機關則由環保署改成經濟部工業局，藉由工業局的協助、研發等相關促進產業發展的政策施行，使廢棄物透過有效率的處理與回收，變成資源且增加經濟效益的產業。

2.3.3 WEEE、RoHS與EuP指令

WEEE (Waste Electronics and Electrical Equipment, 2002/96/EC, 廢電子電機設備指令) 指令的目的在於提高報廢電子電氣產品的回收及再循環率，從而降低最終處理的電子廢料的數量，以此減少對環境的污染，提高對自然資源的利用率。該指令適用於工作電壓小於 1000V AC，以及 1500V DC 的所有設備，這些設備有 10 大類，見表 2.5。

表 2.5 RoHS 和 WEEE 指令管轄的電子電氣設備分類表

序號	產品類別	產品名稱
1	大型家用電器	大型製冷器具、冰箱、冷凍箱、其他用於食品製冷、保鮮和儲存的大型器具、洗衣機、幹衣機、洗碗機、電飯鍋、電爐灶、電熱板、微波爐、其他用於食品烹飪和加工的大型器具、電加熱器、電暖氣、其他用於加熱房間、床和座椅的大型器具、電風扇、空調器具、其他吹風、換氣通風和空調設備
2	小型家用電器	真空吸塵器、地毯清掃機、其他清潔器具、用於縫紉、編織及其他織物加工的器具、熨斗和衣服熨燙、壓平和其他衣物護理器具、烤麵包機、電煎鍋、研磨機、咖啡機和開啟或密封容器或包裝的設備、電刀、剪髮、吹發、刷牙、剃鬚、按摩和其他身體護理器具、電鐘、電子錶和其他測量、顯示或記錄時間的設備、電子秤
3	資訊和通訊設備	中央數據處理器、個人電腦、印表機、複印設備、電氣電子打字機、臺式和袖珍計算器、利用電子方式對資訊進行採集、儲存、處理、顯示或傳輸的其他產品和設備；用戶終端和系統；傳真機；電報機；電話；收費電話；無繩電話；移動電話；應答系統；通過電訊傳輸聲音、圖像或其他資訊的產品或設備
4	消費類產品	收音機、電視機、錄象機；錄音機；高保真錄音機；功放機；音樂儀器；其他記錄或複製聲音或圖像的產品或設備
5	照明設備（包括家用電燈泡和照明設備）	螢光燈具（家用的照明設備除外）；直型螢光燈；緊湊型螢光燈；高亮度放電燈，包括壓力鈉燈和金屬鹵素燈；低壓力鈉燈；其他用於傳播或控制光的照明設備（細絲燈泡除外）
6	電氣電子工具（大型靜態工	電鑽；電鋸；縫紉機；對木材、金屬或其他材料進行車削、銑、砂磨、研磨、鋸削、切割、剪切、鑽孔、衝孔、折疊、彎曲或類似加工的設備；用於打鉚釘、

	業工具除外)	釘子或螺釘或用於去除鉚釘、釘子或螺釘的工具；用於焊接或類似用途的工具；對於液體或氣體進行噴射、傳播、分散或其他處理的設備；用於割草或其他園藝操作的工具
7	玩具、休閒和運動設備	電動火車或賽車；手持電子遊戲機；電子遊戲機；用於騎自行車、潛水、跑步、划船等的測算裝置；帶有電子或電氣元件的運動設備；投幣機
8	醫用設備（被植入或被感染的產品除外	放射治療設備；心臟用設備；透視裝置；肺呼吸機；核醫療設備；玻璃容器內診斷用實驗室設備；分析儀；冷凍機；生殖試驗設備；其他用於探察、預防、監控、處理、緩解疾病、傷痛的設備
9	監測和控制儀器	煙霧探測器；發熱調節器；溫控器；家用或實驗室設備用測量、稱重或調節器具；工業安裝（如在控制板上）中所用的其他監控儀器
10	自動售賣機	熱飲料自動售賣機；瓶裝或罐裝熱或冷飲料自動售賣機；固體產品自動售賣機；錢票自動售賣機；所有自動送出各類產品的器具
<p>說明：(8)、(9) 序號被置括弧之中，表示該項目暫不受 RoHS 指令限制。RoHS 指令案中“電子電氣設備”(EEE) 指正常運行需要依賴於電流或電磁場的設備和上表中列出的能產生、傳輸和測量電流和電磁場的設備，且這些設備的設計電壓是交流電不超過 1000V，直流電不超過 1500V。</p>		

資料來源：WEEE 指令

根據 WEEE 指令，自 2005 年 8 月 13 日起，歐盟市場上流通的電子電氣設備的生產商必須在法律意義上承擔起支付自己報廢產品回收費用的責任。歐盟各成員國有義務制定自己的電子電氣產品回收計劃，並建立相關配套回收設施，以方便電子電氣產品的最終用戶能夠方便並且免費處理報廢設備。簡單來說，WEEE 指令的主要目的，是促使歐盟成員國設立收集點及系統，讓消費者購買新產品時，能交回舊設備，毋須繳付手續費，把無法使用的舊電氣及電子設備，有效地分解和循環再造，達到在 06 年 12 月底前，將廢料回收並循環再造的目標，要求生產廠需承擔廢料回收、循環

再造及處置的財政責任並提供保證。至於法令生效前的廢料，在某些情況下，使用者需與生產商共同分擔處分費用。

RoHS (Restriction of the use of certain hazardous substance in electrical and electronic equipment, 2002/95/EC, 電機電子設備禁用有害物質指令) 指令的目的非常明確，在歐盟市場上禁止含有某些有害物質的產品出售及使用。根據該法案，自 2006 年 7 月 1 日起，所有在歐盟市場上出售的電子電氣設備必須禁止使用鉛、水銀、鎘、六價鉻等重金屬，以及聚溴二苯醚 (PBDE) 和聚溴聯苯 (PBB) 等阻燃劑。施行 RoHS 目的在於從源頭對有害物質有效管制，避免有害物質在其產品使用期間或生命週期結束時，由生物鏈方式影響人類身體健康。其濃度容許標準與應用範圍如表 2.6 所示。

表 2.6 RoHS 指令相關影響範圍與濃度

物質	代號	應用	允許濃度
鉛	Pb	錫料、電纜、電線、塑膠元件及元件拋光、鉛酸電池、橡膠固化劑、電機電子設備、CRT、顏料、塗蠟材料	0.1%
汞	Hg	溫度計、感應器、水銀燈、開關、液晶顯示器、繼電器與燈泡、乾電池、防腐劑、電訊設備、醫療器材、電極	0.1%
鎘	Cd	PCB 板上的晶片電阻、連接材料、表面處理、低熔點銲接、保險絲、馬達、螢光管、繼電器、自動販賣機電源線、電線與開關觸點、鹼性電池化學合成材料、油漆	0.01%
六價鉻	Cr VI	顏料、催化劑、墨水、陶瓷著色劑、相片、防腐劑外殼的表面處理	0.1%
多溴聯苯	PBB	熱溶劑、潤滑劑、塑膠與印刷電路板之耐熱劑	0.1%
多溴二苯乙醚	PBDE	連接器、電線、塑膠、橡膠與印刷電路板之耐熱劑	0.1%

資料來源：RoHS 指令，本研究整理

EuP (Ecodesign Requirement for Energy Using Product) [18] 指令目前在草擬階段，但由於屬於架構型指令，仍需後續的相關規範作為施行準則。其範圍涵蓋任何在設計、生產及銷售、使用各種能源（電力或各種型態的燃料油）的電器產品。除最終產品外，本指令亦包含半成品—俗稱零組件範圍。此指令在環境面能助於各個階段如金屬萃取、原料生產、

轉換製造、配送使用及廢棄環境考量面。經濟面方面，提供生產者明確的工程規則、簡化產品上市程式等市場的不確定性。若能結合以上效益，則可兼顧環境與經濟的效益。

2.3.4 各國法令規範小結

綜觀各國法令主要目的在於希望事業機構對於所生產廢棄物，從源頭進行的設計製造回收與有害物質的禁用等，都能夠有益於減少對環境的衝擊與負荷。經研究廢棄物中約有百分之四十[19]的物質都能夠回收再製，且生產產品者應負最大的責任，故大都從源頭將廢棄物的最大來源作管理與流向追蹤，而研究各國有害廢棄物法令及管理後發現[20]：

1. 依不同國情與環境特性，而有不同的廢棄物管理模式，大體來說，對於事業廢棄物的處理，都是要求分類成有害與無害兩種廢棄物，並加以明定與規範，而對環境與人體有害的廢棄物產生時，會有一套更嚴格的管制方式來管理其流向與處理，包括中間處理標準與最終處置設施標準等。
2. 政府除要求法令的嚴格執行，現有市場如有好的回收系統時，在法規上給予配套措施，以解決廢棄物處理問題。更應進一步研擬誘因機制，要求產業界對事業廢棄物的處理更積極，輔導業者妥善解決廢棄物問題。
3. 由先進國家與歐盟相關指令規範，可知對事業廢棄物的管理，已由末端的處理進一步考量前端，在產品在設計時即考量對環境的友善程度，如歐盟的 EuP 指令，而國內現行訂定新的環保法規同時，亦應將這樣的觀念帶入考量，也就是綠色設計的概念，減少相關資源的使用與資源的回收便利性，提高產業競爭力。
4. 國內在廢棄物管理上已轉向資源化方式進行，因廢棄物是錯置的資源，藉由廢棄物交換平台成立與工業局的輔導管理，將廢棄物的產出轉換成產業用料，提升競爭力與降低相關成本，因市場對環保品接受度不高，有賴政府再努力。

5. 國際上對環保的要求已由單一國家轉換成區域性的要求，區域中的國家挾其經濟實力，要求製造或進口商負起回收責任，由源頭管制的觀念也更強。設計上應減少廢棄量產生與對環境更友善，若無提昇則是成本增加，形成另一種貿易障礙，故對環保嚴格要求將是使科技進步的動力而非阻力。

2.4 廢太陽電池相關回收文獻

廢太陽電池因非自然產出，廢棄亦將造成環境負擔，在歐盟的回收指令要求中，太陽電池發電系統亦屬電子電機類的發電設備，在法令的規劃上受到相關管制，太陽電池的需求興盛，對環境影響也將產生，已有許多學者研究廢棄後的太陽電池對環境的影響與相關的回收技術，從法令的符合性要求、預估廢棄產生時間與廢棄量、廢電池處理技術等相關研究。

2.4.1 法令的要求與回收探討

在歐盟環境政策的一項重要的觀念是延長生產者的責任，要求生產者在產品生命週期結束時負起回收的責任。在歐盟的環境行動規劃裡製造商須負起回收責任與義務，製造商和進口商須負起回收與處理到生命盡頭的產品所需費用。在此觀念下 WEEE、RoHS 與 Eup 等相關對電子電機要求的環保指令便產生，歐盟要求各會員國將指令轉換成國內的法令，使回收量達到每人 4kg/年的目標。因廢太陽電池仍在推廣裝設階段，產生廢棄的量不大，若要求 WEEE 製造或代理商負起回收責任其成效不大，但 RoHS 則可以要求廠商禁用有害物質，因指令的連貫性，規定四年檢討廢棄物的種類與範圍，目前太陽電池、軍事與醫療電子等項目仍是排除在外，仍可不受有害物質禁用所影響未須進行回收，若歐盟改變規定納入規範中，對產業衝擊相當大，應及早因應。

太陽電池模組有 85%的元件都是可以回收再利用的，回收價值高但用較少回收成本回收，若用破碎加熱熔融等方式回收，只能回收材料中不純的部分 [21]。製造太陽電池晶片需消耗許多能源，目前在生產時使用能源的多寡未在立法與經濟上鼓勵，以目前草擬的 Eup 是對產品要求節能規範指

令。因Eup屬架構型指令，仍需相關規範作為其施行的準則，其主要目的在於將產品生命週期所消耗的能源納入評估範圍，亦限定不得追求節能設計而削減其功能，或增加對人體與環境負面的影響程度。

PV 工業已經開始一些回收活動以促進PV模組的收集和再循環，在這方面一些太陽能電池製造公司已經採取主動回收太陽電池系統。德國的FIRST SOLAR公司，他們已建立起回收發電模組的保證[22]，他們並為產品與再生的模組提供資金保證[23]。此外Deutsche AG公司建立回收太陽能電池和模件的流程[24]。根據廢棄物法令，在廢棄物中不能有未經處理的廢電池模組 [25]。現今的廢電子電機的回收體系適用於太陽電池，製造商運用回收基金給付集中回收與處理模組廠商必要的費用（即太陽電池板不專有）以及材料回收者。製造者在產品銷售時即繳交處理費用，並開立證明，回收再利用業者可使回收業者向發電機，製造商請領回收費用，因回收費用已內含於產品中[26]。

零售與安裝業者在回收系統並拆卸有價值的發電設備時，廢棄模組等各項零件的拆卸必須仔細，避免產生更進一步的損害，降低模件的再利用價值。但從回收業者的回收過程了解，回收業者對需要進行再回收處理的模組無興趣，將用最少的費用處理廢模組，回收者對金屬價值所知甚詳，將分離有價與易拆卸的金屬，價值高但須再處理的模組卻選擇丟棄，反而造成環境受影響，除須加以教育回收業者，避免破壞價值高的模組外，更需建立起回收的相關技術與設備[27]。

太陽能電池模組與發電設備仍未受有害物質管制，其產生有害物質的零組件有：印刷電路板有高濃度的有毒的金屬，例如在焊接過程中的鉛與溴化耐燃劑（避免因高溫燃燒）等；太陽能電池與引線連接的焊點的鉛，若太陽能電池以 TCLP 的方式檢驗，則會溶出有害物質；其他電子零組件因表面需電鍍處理，可能含有六價鉻，故可知太陽能電池發電設備含有許多有害物質的重金屬。

廢棄的太陽能電池發電系統，其太陽能電池模組與發電設備未受禁用有害物質的管制，發電設備與太陽能電池仍可運用現有製程製造生產不受影響，

其優點在於使用舊製程其成本較低，工程可靠度佳，產品良率高。因禁用有害物質的指令已施行，當製造業者導入無害製程時，若為成本與可靠度等原因，回到使用有害物質時，產品仍須重新檢測與產線從新驗證，因生產驗證時間將耗費許多成本，使太陽電池的各項電子電機設備也將採用無害的生產方式。

法令尚未對太陽電池發電的設備管制與仍在推廣使用階段，隨指令實施禁用有害物質與回收要求，太陽電池相關製造商雖仍在排除之外，不須負起回收與禁用有害物質，但由以上法令的探討，禁用有害物質與回收已是大勢所趨，除研究回收方式與技術外，禁用有害物質的太陽電池生產也需研究。

2.4.2 廢太陽電池產生量

因應工業化的經營模式，大量生產將可以有效的降低成本，製造端如此廢棄物端亦如此，廢棄量多才足以支撐處理場的的相關營運。廢太陽電池亦是如此須要有量的產生，才能使業者設置處理場。廢太陽電池量逐年成長，產量是呈上升趨勢，其廢棄產生時間與廢棄成長曲線將如圖 2.8。如圖 2.9 所示以德國為例，在Stephanie Zangl的研究中[28]，廢太陽電池壽命約 30 年，在 2002 年有 290 噸、2010 年 1110 噸、2040 年 33500 噸的廢太陽電池產生，可知廢棄量將在 2015 年成緩慢成長，隨技術進步效率增加，除正常更新淘汰外，有更多是因電池成本降低效率增加而遭淘汰，

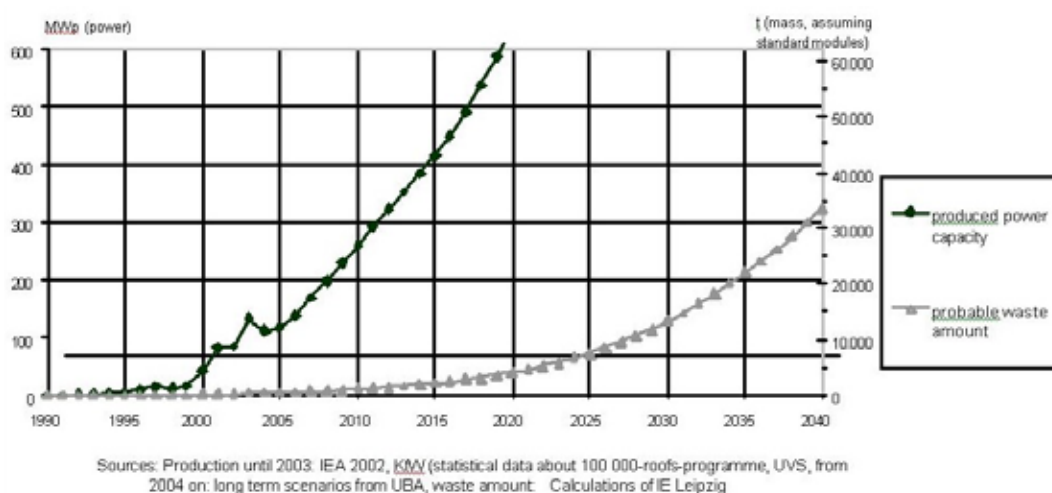


圖 2.8 德國廢太陽電池預估產生量

廢棄量呈現快速上升趨勢，而非緩慢增加。

Year	Spent PV	Glass	Cells	EVA	Backside Foil	Frame	Junction Box	Sum
	MWp	t	t	t	t	t	t	t
2002	2.8	183	12	21	7	65	3	291
2010	10.6	693	44	79	28	244	13	1,102
2020	39.8	2,597	165	297	104	916	48	4,126
2030	128.5	8,377	531	959	334	2,953	154	13,308
2040	323.4	21,088	1,338	2,413	841	7,435	387	33,502

圖 2.9 德國廢太陽電池廢棄成分與廢棄量

資料來源：K.Wanbach, S.Schlenker "A voluntary take back system for pv module in Europe", Solar material, Barcelona

2.4.3 國外回收太陽電池技術

太陽發電發展最快與興盛是德國與日本，因政府有良好政策與相關技術能力，能夠引領世界在太陽電池領域上相關研究，太陽電池效率將朝向更佳與應用面更廣前進。正因德日兩國在太陽電池領域的研究，使用太陽電池後產生的廢太陽電池，如何回收再利用廢太陽電池，減少廢棄太陽電池對環境的破壞，以符合相關環保法令，也有相當成果。

在德國太陽AG (SolarWorld公司的子公司)對PV 模件的再循環實驗工廠已被提出設置 [29]，並致力發展任何可能回收的技術。此外Deutsche AG公司建立回收太陽能電池和模件的流程[24]，並試運轉多晶矽的模組與電池的再循環 [30]。在德國的實驗室，太陽電池的再生已證實可行，從回收的多晶矽太陽能電池中，如圖 2.10 之示意圖。使用熱處理方式燒去電池表面組織，也就是氣化電池表層的EVA，再使用化學蝕刻去除表面的抗反射層等各種物質，處理完成的太陽電池裸晶片，可再太陽能電池生產線再次生產使用 [30]。

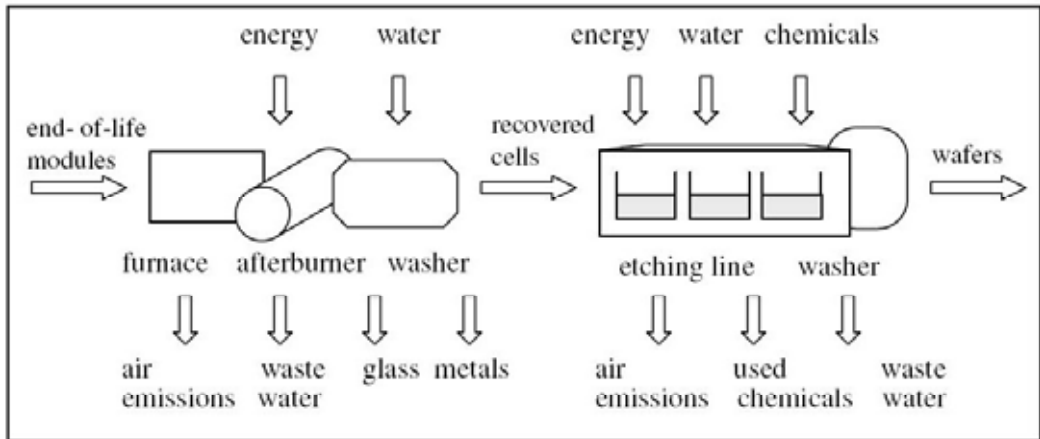


圖 2.10 德國回收廢太陽電池流程示意圖

資料來源：Anja Muller, Karten Wambach and Erik Alsema, "Life cycle analysis of solar module recycling process", Materials Research Society Vol.895, 2006

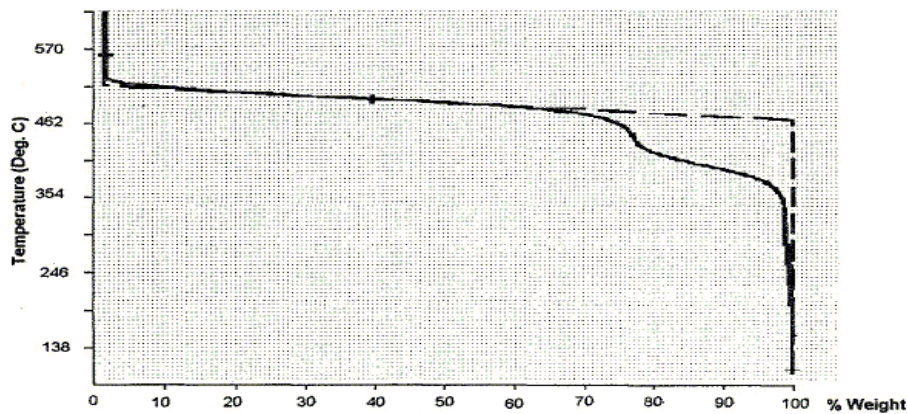


圖 2.11 EVA 氣化溫度與重量關係圖

資料來源：John R. Bohland and Igor I. Anisimov, "POSSIBILITY OF RECYCLING SILICON PV Module", P1173-1175, 26th PVSC; Sep. 30 to Oct. 3, 1997

EVA耐紫外線與透光率高等因素，是太陽電池中表面玻璃與晶片中間介質，回收太陽電池晶片時須將EVA除去，才能得到回收的太陽電池晶片，在研究中有對EVA的分解研究。EVA在一氮氣體空氣內的根據其重量分析如圖 2.11 所示 [31]，其聚合物約在 350°C 開始分解完成在 520°C 左右，使用惰性氣體氣化，例如氮，能防止EVA和銀接觸開極欄的化學氧化，去除晶片間相互聯繫的銀線後，高純潔矽片廢料能被用作矽片原料。

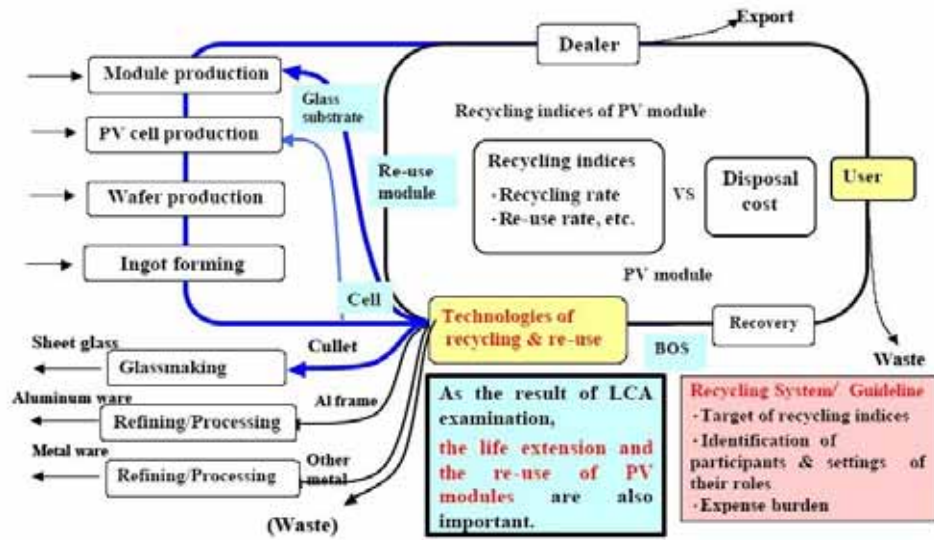


圖 2.12 日本回收廢太陽電池研究示意圖

資料來源：Koichi Sakuta，”PV Recycling project in Japan”，AIST, Japan

而日本發展出另一種方法，將太陽電池浸泡在有機溶劑裡，可導致EVA溶融[32] 使玻璃與晶片容易移動，這個過程的一個關鍵是透過EVA的隆起部分的破損[33]。如圖 2.12 所示日本廢太陽電池回收研究示意圖。圖 2.13 是回收廢多晶矽太陽電池流程圖，回收的矽晶太陽電池經化學蝕刻EVA後，得到太陽電池晶片與玻璃，將太陽電池晶片熔融後再分離切割成新的晶

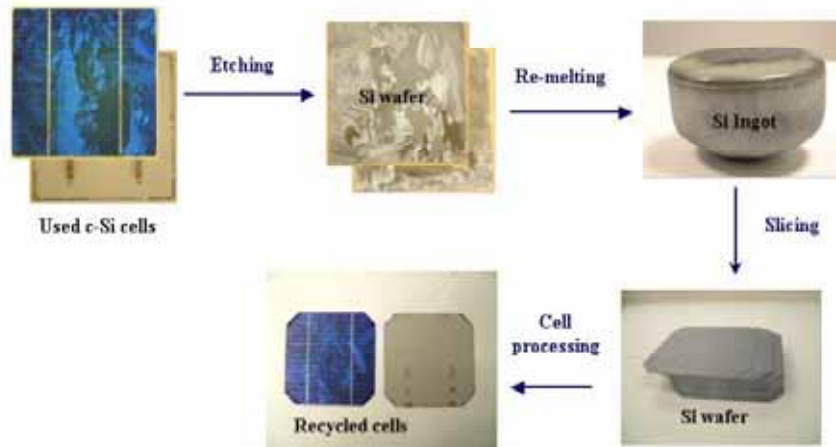


圖 2.13 回收廢太陽電池流程圖

資料來源：Koichi Sakuta，”PV Recycling project in Japan”，AIST, Japan

圓，再經製造可得再生過且新的電池，回收分離出的玻璃其回收流程如圖 2.14 所示。

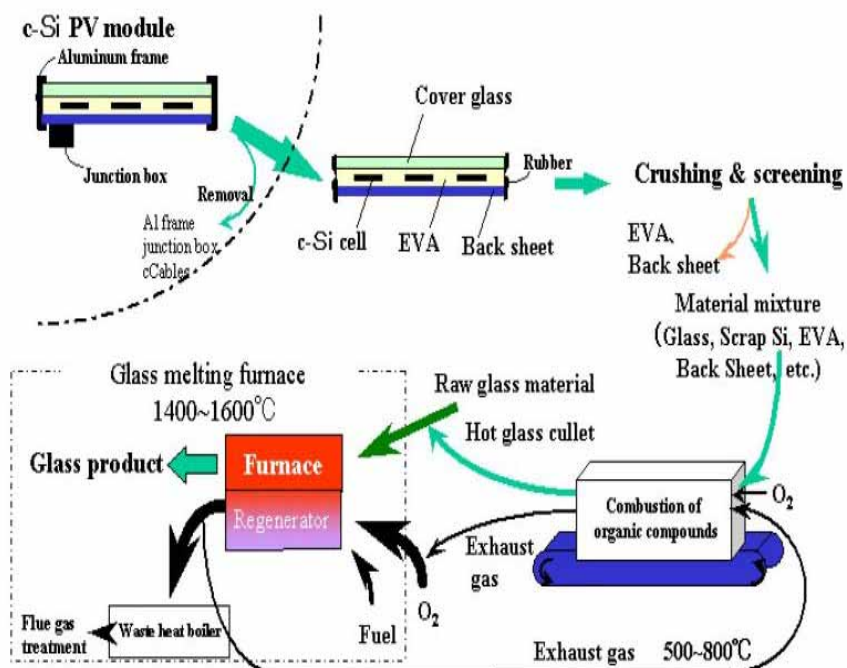


圖 2.14 玻璃回收流程圖

資料來源：Koichi Sakuta, "PV Recycling project in Japan", AIST, Japan

綜觀德日的回收太陽電池技術發展，首要均是將 EVA 去除分離出太陽電池，分離手段有德國的加熱氣化、與日本的化學熔融方式，分離出太陽電池晶片後，再用化學蝕刻方式將表層去除其雜質。廢棄物處理方式有許許多種，究其原理不外乎物理、化學與熱處理等方式，最佳處理方式是處理程序少、成本低與達成要求，本文試研擬其處理回收方式，以達效率高、成本低等相關要求。

第三章 太陽電池結構與回收理論

目前以太陽電池發展趨勢來看，仍是以矽為原料作為主要的發展方向，在其他太陽能電池技術尚未成熟與成本未能降低下，以單晶矽與多晶矽為主的太陽能電池，仍較其他電池佔有優勢，其產量佔太陽電池生產量約 85%，故在廢棄物需求的廢棄量上，能產生足夠的回收量，本文研究著重於矽晶類的廢太陽電池系統處理與回收上。

3.1 太陽能系統結構與製程及對環境影響

太陽能電池相較傳統能源技術對環境的影響較小，但目前太陽能電池製造過程中所使用之大量酸鹼性蝕刻劑，金屬電極所需之稀有金屬銀，及焊接時所使用有毒鉛劑等，在未來都需克服對環境不良的影響，將對環境的影響降到零，才不至於鼓勵使用再生能源，卻造成另一種環境破壞[10]。

在廢太陽電池發電系統中，廢太陽電池所佔的體積比例極小，大都為支撐的機架與發電的周邊設備，但太陽電池卻是佔整體發電系統近一半的成本，回收價值相當高，其成本結構如表 3.1 所示。其他非屬太陽能電池的元件，例如：Inverters，Power Conditioner…等其他電子組件，亦佔系統成本亦高，在目前的回收體系與回收處理技術上，已是相當成熟的技術。

表 3.1 太陽光電系統成本結構分析

零組件		成本結構比%
Solar Module	Solar Cell	40-46
	Inverters	20-26
Power Conditioner (絕緣變壓器，系統保護裝置)		12
Installation (集電箱，電表)		14
其他 (支架、接線箱、配電盤…)		8

資料來源：日本資源總合系統資料(株)(2002)，工研院 IEK-IT IS 計劃 (2004/07)

如圖 3.1 所示太陽電池裸晶到模組製造流程，太陽電池在製造過程中須使用許多化學物質，如蝕刻液，抗反射膜，有機溶劑等，單獨存在時對

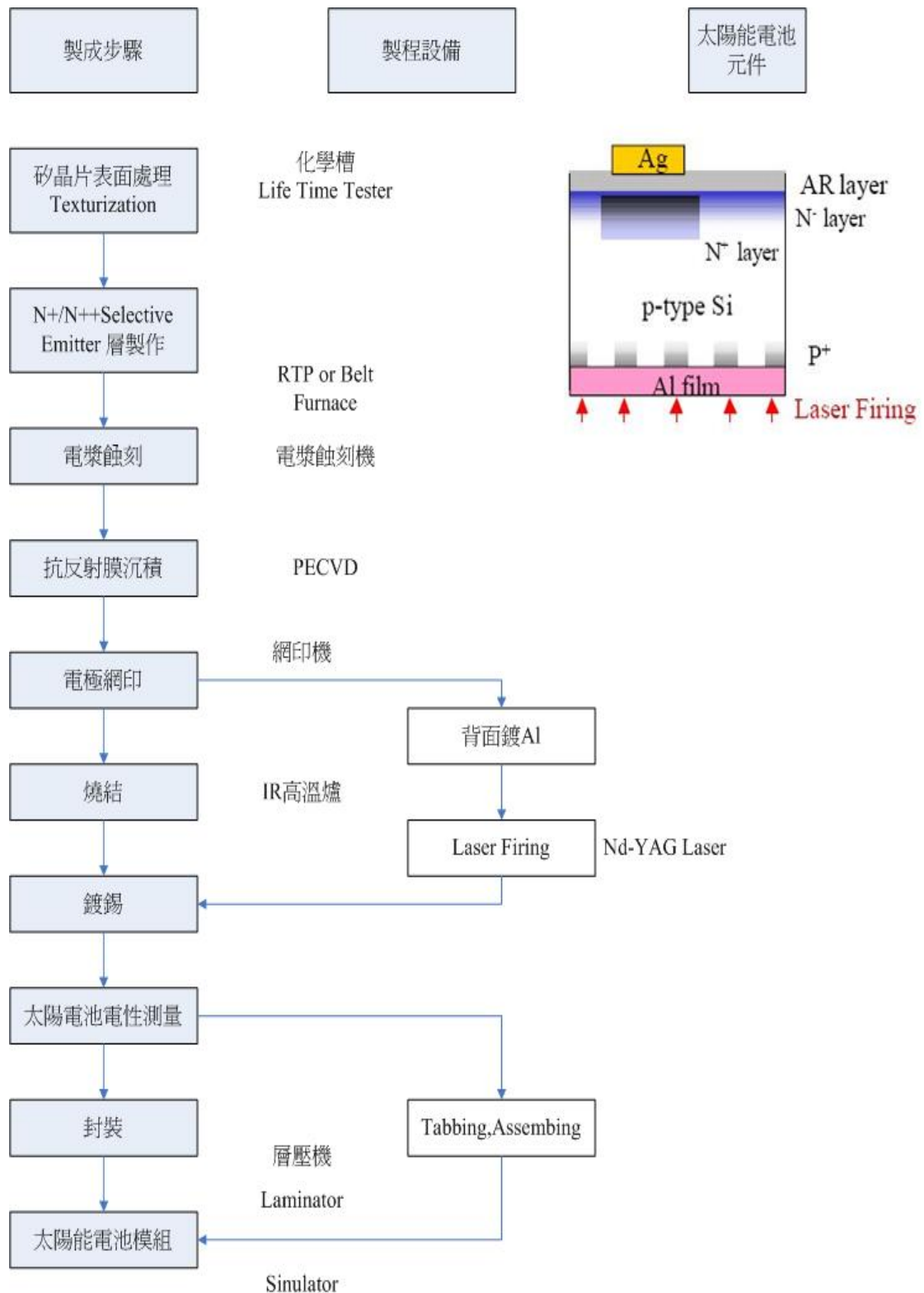


圖 3.1 結晶矽太陽能電池製造流程圖

資料來源：工研院材料所，工研院 IEK-IT IS 計畫，2004 年 06 月

環境有影響，與其他物質結合在電池上則是穩定無害。太陽電池在網印的過程中，使用銀膠與 N 層聯接作出導電電極；在 P 層印刷上含鋁物質，即可完成單一之太陽電池。每一電池再經過錫爐加熱，鍍上焊接用的錫鉛合金，再注入 EVA (Ethylene-vinyl-acetate, 乙烷基醋酸) 將電池固定後，依其需求而有不同封裝方式。一般型在底層注入 Tedlar (Polyvinyl Fluoride Polymer, 聚氟乙烯) 上層則用強化玻璃，半透光型則上下層使用強化玻璃覆蓋，如圖 3.2 所示的太陽電池結構圖。

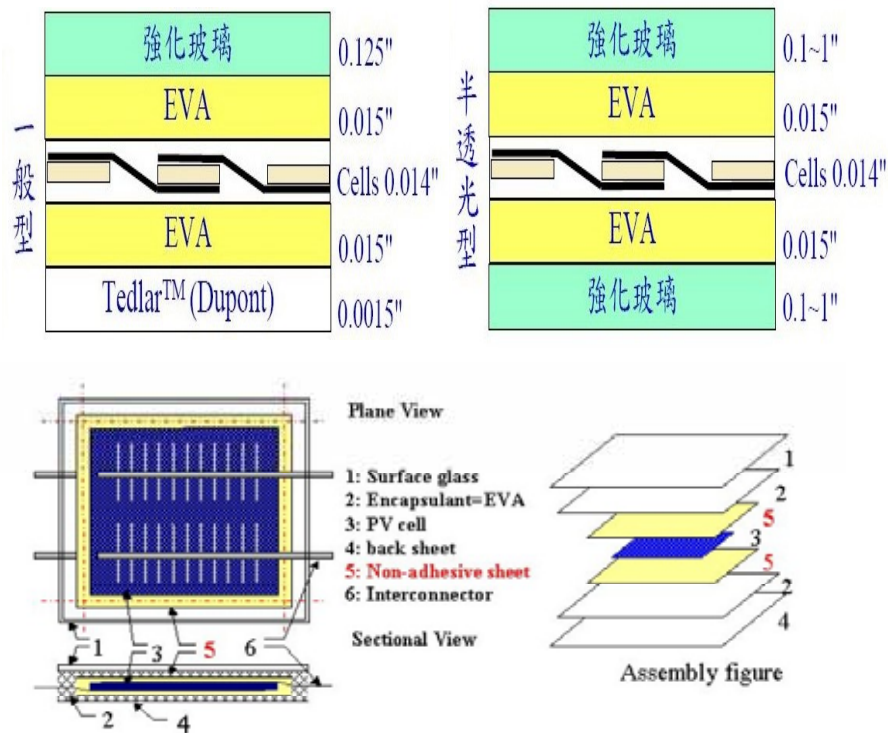


圖 3.2 太陽電池結構圖

資料來源：許國強，「防災型 PV 系統設置」，2005/06/10

Koichi Sakuta, " PV Recycling project in Japan" , AIST, Japan

錫鉛合金其物理性質良好，與異質金屬間結合性與導電性佳，被大量應用於電機電子領域中，成為連接電子零件相當好的媒介，太陽能電池亦用錫鉛合金來連接電極。在其他太陽能發電設備零組件上，也可以見到其蹤跡。而鉛對人體健康影響頗大，大多國家都對鉛做出規範與限制，鉛中毒者會破壞血基質之合成，臨床上會有貧血、神經系統破壞、心臟和呼吸系統及腎功能喪失，嚴重者出現運動神經失調、昏迷、痙攣與智力降低，同時也會致癌、不孕、流產與胎兒死亡。以目前正在使用的太陽電池發電系

統中，都可見到此一合金，作為連接電極與電子材料的介質。而太陽電池中所含的重金屬物質與成份如表 3.2 所示。

表 3.2 太陽電池重金屬物質與成分表

鐳料連接太陽電池			
Pb	Ag	Sn	Cu
0.12%	0.14%	0.12%	0.37%

資料來源：K. Wanbach, S. Schlenker, "A voluntary take bake system for pv module in Europe", Solar material, Barcelona

3.2 廢棄物回收理論與市場工具

廢棄物處理有許多種方式，但環境是公共財產，取之容易故不易珍惜，因而容易造成環境相關的破壞。經濟學之父亞當斯所述市場有雙看不見的手在控制著，而資源回收是逆向的方式，也就是回收的資源需要有價值，才能驅使有回收的意念。而廢棄物的廢棄量要大，才能支撐其企業的運作，透過企業有效率的回收，其資源回收的效益才得以顯現，因有利可圖，才能長久使資源永續再生。



廢棄物的基本特徵就是對於擁有者而言是沒有價值的，但是要丟棄它卻涉及成本（內部成本及外部成本），尤其是有害性廢棄物的外部成本常常是非常高昂的，若不妥善處理，社會成本將相當高，因此各國政府莫不在法令上與以規範與建立回收機制，以達到防治污染之目的。而回收機制的建立包含兩個部分：一部份是廢棄物中回收物質的經濟價值，另一部份則是對回收廠商的補貼，因為回收商生產的回收物質一方面降低了生產該物質的能源成本，而另一方面降低了丟棄廢棄物所增加的成本（包括社會成本）。在永續經營的政策目標下，政府應一方面鼓勵廠商生產低污染、可回收的產品；另一方面則是建立回收的市場誘因，驅使市場自行有效回收。

3.2.1 成本效益分析與延伸製造者責任 [34]

一、成本效益分析

在資源回收中，回收與否決定於回收之淨利益是否為正，若回收之淨利益大於零，則應進行回收工作，反之則不需進行回收。回收所得減回收成本即為回收的淨利益。依機會成本的概念評估，回收利益可視為不回收時所產生的社會成本，故可視為初級原料的投入成本與其對社會造成的垃圾處理成本。回收成本則指進行回收行動所需投入之成本及再生料使用可能造成之污染成本。即

$$\begin{aligned} \text{回收淨利益} &= \text{回收利益 (不回收之機會成本)} - \text{回收成本} \\ &= (\text{初級原料之投入成本} + \text{垃圾處理成本}) - (\text{回收行動之投入成本} + \text{污染成本}) \end{aligned}$$

依 J. H. Dales 之定義，垃圾處理成本等於污染防治成本與污染成本之和。污染防治成本是指有關污染控制、處理之直接支出，如購買污染防治設備、垃圾蒐集處理成本…等。污染成本則是指當污染已發生，或是污染防治成本過高時，為降低其傷害而引發的支出，及污染對整個社會造成的福利傷害。故上式可改寫為：


$$\text{回收淨利益} = (\text{初級原料之投入成本} + \text{污染防治成本} + \text{污染成本}) - (\text{回收行動之投入成本} + \text{污染成本})$$

此式可視為應用成本效益分析而建立的資源回收準則。當效益大於成本時（即淨利益大於零），應進行回收，反之則無回收之必要。此式純為概念性的理論分析，在實際應用時仍有許困難，因為污染成本存在許多無法量化的因素，因此難以有效評估。成本效益分析之主要缺陷即在此。

二、延伸製造者責任

延伸製造者責任(Extended Producers' Responsibility, EPR)一詞最早由瑞典籍的 Thomas Lindqvist 教授所提出。Lindqvist 認為應將製造者的責任延伸到整個產品的生命週期，不論是從產品原料取得、製造、使用乃至廢棄階段，應考量產品於各期對環境的衝擊。此外，更應強調產品回收、再循環與最終處置的相關處理回收流程。EPR 要求製造者對其產品，

於生命週期終點後，對該物品負起材質回收或財務的責任。要求製造商於消費者用過產品後加以取回，並加以回收、再利用、再製等方式處理它們，或由專業的第三者(即所謂的製造者所委託的處理機構)肩負起回收處理的責任，費用則由製造商支付，但可藉由成本轉嫁給消費者，使產品有價值並提高回收誘因。

透過EPR的觀念除了可以有效的減少原料的使用外，更可增加回收再生使用率，因此在產品製造過程中便能減少能源與物質的消耗，以及降低產品中有害物質的使用。正因這些觀念的導入，除了能使工廠減廢的成效增加外，更將環境績效延伸至產品使用階段。EPR不僅可視為將廢棄物質轉向資源化之機制，更是企業永續經營的一項重要策略[35]。

EPR 對資源回收所產生的效應，使得不少跨國企業已重新思考其產品的設計，若回收只是納稅人的責任時，以營利為主業者並不把它當一回事。因此，實施 EPR 時，應規劃與要求業者對其產品付出回收成本，或有強烈的誘因去設計材質，使其具備再循環的能力，例歐盟的 EuP 與 WEEE 指令可說是 EPR 的概念延伸。

另外、EPR 也可視為一種以市場為本的操作，因為一旦廢棄物管理成本轉成內部化，市場會決定其費用價值。EPR 的目標是傳遞正確的經濟訊號，然後由業者自行訂出合理的回收價格。EPR 將產品消費後的回收階段，交由專業回收處理業者去執行回收處理，這給廢棄物減量成為競爭的利益，開創設計出經濟上可行，且可回收的產品，使產品的資源利用更有效率，並提供重要的經濟誘因。

Palmer and Walls[36]認為產品鏈中的每一個體都應該為該產品對環境所造成的影響，包括產品的最終處理負責。延伸的產品責任把責任加諸於生產者，且將主要的焦點置於消費者使用後的廢棄物處理上。作者證明瞭向上游結合的產品稅與回收補貼政策，其較單純的回收制度更具成本有效性，且交易成本較低。

3.2.2 市場工具 [34]

廣義的廢棄物管理應涵蓋廢棄物減量與資源回收兩個層面，亦即針對整個產品的生命循環過程進行規劃。在管理及規劃背後的理論層次上，市場的建構必須透過成本及效益來進行分析。有關廢棄物清除、處理、與回收之成本及效益的衡量，則應分別包含廢棄物清除、處理、與回收過程中的所有內、外部成本及效益。環境外部成本的估算著重在：因處理廢棄物導致之環境品質污染、佔用公地、以及改善環境品質等的活動成本。

所以解決廢棄物問題的最佳經濟對策是針對產品製程、消費習慣、及廢棄物形成等三階段分別建立污染者付費制度：

1. 徵收產品費 (product charge)：係針對製造廢棄物較多的產品或包裝在其生產、批發、或零售階段時課徵的一種特種銷售稅，是事前的收費。課徵的對象原則上應包括所有會製造廢棄物的產品，但對所有產品均課徵不同稅率之產品費將大為增加管理上的困難，且交易成本太高，所以多數國家只選擇性地針對占廢棄物製造量比重較大、不易回收清理、對環境危害較大、或具有毒性物質的產品課徵。
2. 押金制度 (deposit systems)：與產品費的觀念有些相近，但不完全相同。押金依銷售者與消費者的合意決定，不一定依產品的重量或數量計算。當消費者將商品退還給銷售商時，銷售商須返還押金給消費者。有效利用押金制度一般能使消費者產生足夠的回收誘因，唯要注意不當設計之押金制度本身也會對回收體系造成額外的社會成本，需相當審慎。
3. 使用者付費 (user charge)：此觀念可同時適用於家庭廢棄物與事業廢棄物，是一種事後的收費。當住戶或廠商製造廢棄物後，交由清潔單位清運處理。清潔單位則依廢棄物體積或重量決定清理成本的高低，而收取相當的費用。可鼓勵廠商回收使用再生料，減少使用新生料，亦可鼓勵廠商改變產品的包裝，降低廢棄物密集程度。

當社會中的所有商品皆依其邊際總成本（包括內、外部成本）定價時，市場達到「經濟效率」，此時社會資源達到最適的配置；而且使用資源者付費，亦符合「社會公平」。

所以，理想的「一般廢棄物回收清除處理費」(disposal fee)收費體系具有以下幾個目標：1. 須根據各種產品的不同廢棄物回收清理成本收費；2. 須能夠允許消費者與生產者自由地選擇其消費與生產的水準，誘使其朝向消費或生產低廢棄物量的產品；3. 各地方政府可充分地利用一般廢棄物回收清除處理費的收入，推動廢棄物全面管理活動。徵收「一般廢棄物回收清除處理費」是基於污染者付費的精神，要求廠商對其生產的各項產品消費後所製造的最終廢棄物負擔清除與處理的成本，以及分擔部分回收與再生處理的成本，包括傳統內部與環境外部等成本。希望藉此鼓勵廠商研發與採用較易回收清除與處理的材質，同時生產廢棄物製造量較少的產品。

就消費者言，邊際回收效益等於廢棄物清理成本（傳統內部成本、環境外部成本）減回收廢棄物零售價格之和；邊際回收成本等於交通成本與不便利成本之和。就生產者言，邊際回收效益亦等於廢棄物清理成本減少與回收廢棄物零售價格之和；邊際回收成本則等於內部回收成本與外部環境成本之和。此處所指之廢棄物回收清理成本包括傳統內部成本與環境外部成本：前者為廢棄物收集、清運、回收與處理的成本；後者為掩埋場滲透水與臭氣的成本，以及焚化爐廢氣的成本。

3.3 廢棄物處理再生技術

從生產的過程到生命週期結束，每個階段都有不同廢棄物會產生如圖 3.3 所示，越接近原料端其廢棄物性質愈單純，其回收的價值愈高；原料經過製造過程與各種原料混合製成半產品後，製造過程中將有廢棄物產生，包含原料與製程中因品管不合乎要求而產生的廢棄物，此廢棄物較單純原料複雜，需透過處理分離成原料再使用；產品經過消費者使用後，在生命週期結束成廢棄物時，再透過回收體系回收，交由處理體系處理回收，此階段需要較多的人力需求進行各種分類處理，其人力成本較高，故回收價值較原物料直接回收低。廢棄物的來源要廣泛與廢棄量大，才能支撐企業有效運作，處理體系在產能需求下，將對各階段所產生的廢棄物進行處理，以達成經濟規模，廢棄物對人力需求量高低而有所不同，而產生不同的回收價值。

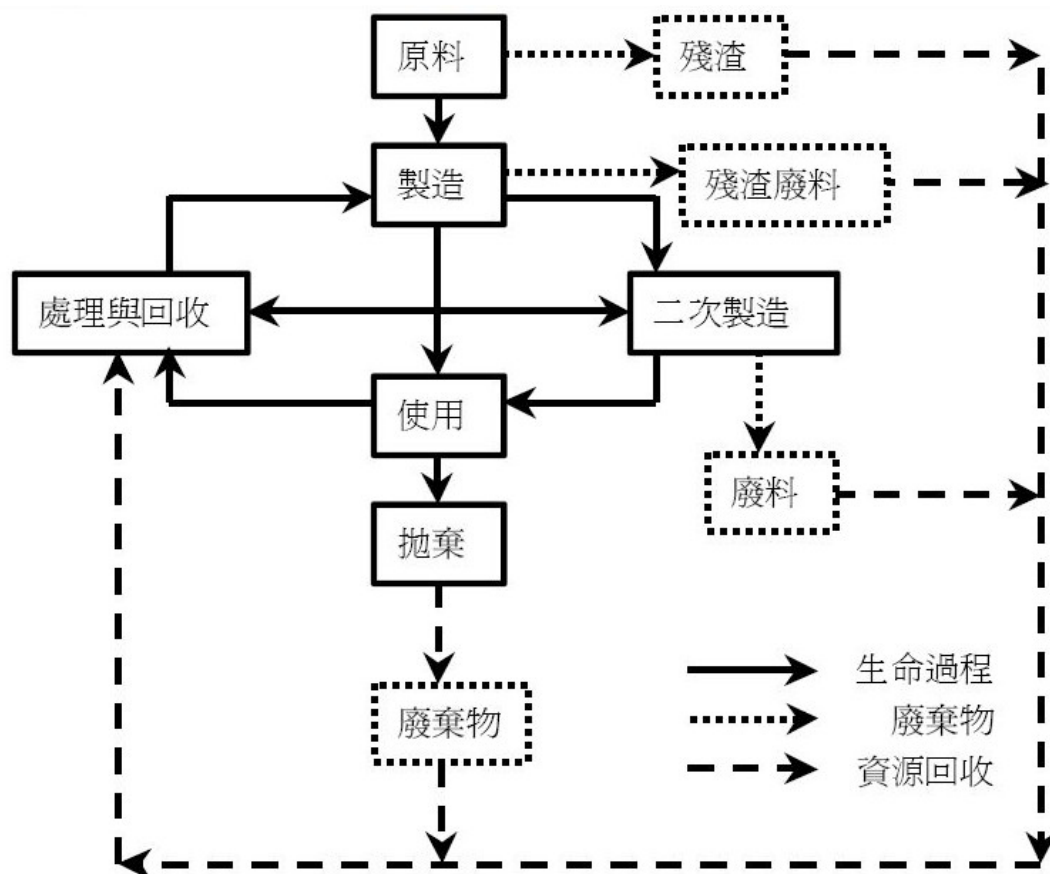


圖 3.3 產品生命週期與所產生廢棄物示意圖

資料來源：黃正義，”減廢技術與資源回收之演進”，資源廢棄物回收再利用管理，pp.1-6，行政院環保署，2000年

如圖 3.4 所示為廢棄物產生與清理過程中的管制和技術條件，由圖中可以顯示出若要求工業廢棄物的合理與妥善解決而不污染環境，有賴於從產生源、資源化、再利用、清除、處理及處置等各個不同環節，均有合理的管制措施，包含管理作業上的申報、許可、稽核；同時，在對於事業廢棄物特性的瞭解與掌握之後，在技術上優先利用清潔生產、回收再利用、資源化等選擇，以及不得已情況之下才進行清除與處理處置的相關技術條件的選用，以達成最有效率的事業廢棄物解決策略，並且避免二次的污染 [37]。

而廢棄物處理資源化方式：

物理資源化技術：破碎、分選、造粒、混鍊。

化學資源化技術：中和、離子交換、電解還原、酸溶、萃取、薄膜分離、

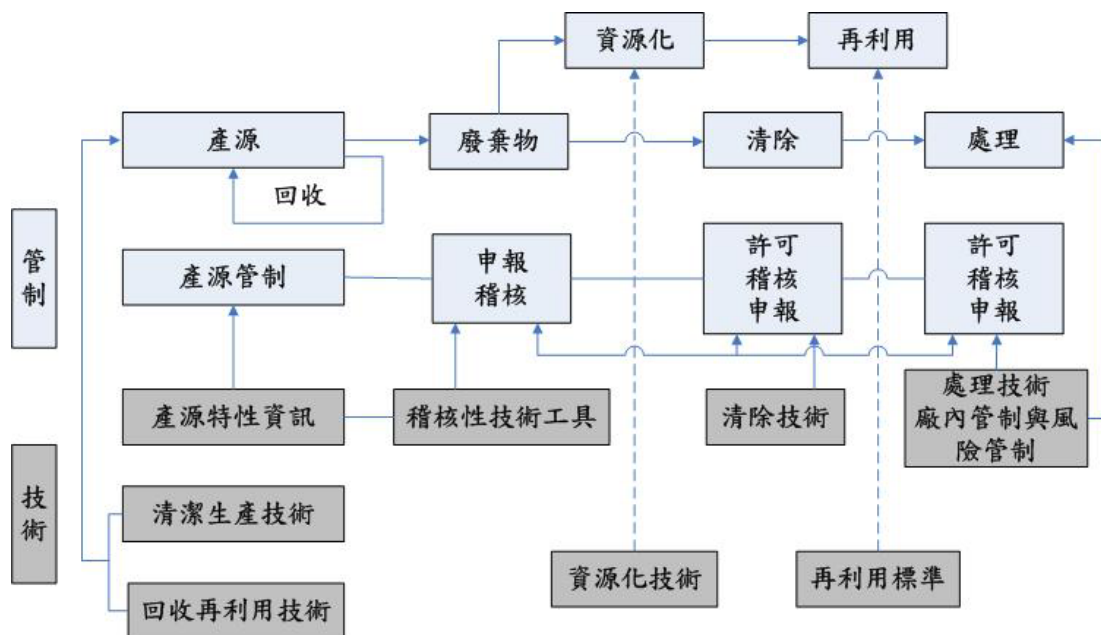


圖 3.4 廢棄物管制與技術處理示意圖

資料來源：楊致行，「工業廢棄物之回收與資源化」，經濟部情勢評論季刊，第八卷第二期，91年9月出版

置換、蒸餾、吸脫附。

特殊資源化技術：堆肥、燒結、熔融、金屬冶煉。

廢棄物因其性質不同，其處理方式亦不同，處理方式則依經濟效益來做最有效的處理，避免因處理過程傷害環境與浪費資源。依據事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準所認定之處理技術有：滅菌處理、化學處理、堆肥處理、熱處理、焚化處理、物理處理、固化處理、穩定化處理這幾種廢棄物處理方式。

化學處理：主要使用化學方式進行廢棄物處理者，包括化學中和、化學氧化還原反應、化學萃取、化學調理及電解氧化等各式技術者。

熱處理（除焚化處理外）：主要以加熱方式進行事業廢棄物處理者，但不包括焚化處理技術者。常見的處理技術包括有：熱解、熱熔、熔煉、熔融、燒結、蒸餾、熱蒸發及濕式氧化處理等。

焚化處理：指利用高溫燃燒，將事業廢棄物轉變為安定之氣體或物質

之處理方法。常見的處理設施包括有固定床式、流體化床式、液體噴注式、旋轉窯式等各式焚化爐。

物理處理：使用物理方式進行處理者，包括油水分離、薄膜分離、分類回收、研磨、破碎、拆解、分離、分選等各式技術者。

固化處理：指利用固定劑與事業廢棄物混合固化之處理方法。

穩定化處理：指利用化學劑與事業廢棄物混合或反應使事業廢棄物穩定化之處理方法。

以廢電子零組件處理方式為例，其過程大都先進行物理處理，將廢棄電子零組件，先經人工簡單分類篩選，將體積較大的金屬先分類與分離出來，再經過物理方式破壞粉碎，此階段可得混合類與單類的金屬，單類金屬可直接再利用，而混合類則再進行後續處理，如化學還原析出或是熱熔煉方式將混合金屬取出成單一金屬，相較於製程中所產生的廢棄物，此一處理成本較高。每階段的廢棄物處理方式都不同，回收與否端看市場價值與回收成本是否符合其經濟效益。

每種廢棄物都有最佳的處理與回收方式，但因處理成本與回收價值所影響，使理論與實際上有所差異。以企業角度上觀察，如何將成本降低且符合法令並能追求利潤的極大化，時為處理業最大的挑戰。

第四章 廢太陽電池處理方案與再生技術

本章將試探討四大主題：一是太陽電池生產過程廢棄物。二是對太陽電池廢棄量作出預估與法令分析。三是試探討其回收可行性與建立一完整的回收體系，希望找出廢太陽能電池的最佳回收處理體系，提供產官學研界作探討。四是關於廢太陽能電池的相關處理技術，將廢太陽能電池的污染降至最低並進行再利用，使太陽電池成為最有效率與最不污染環境的發電方式。

4.1 太陽電池生產過程之廢棄物

2004年起太陽光電產業對於矽材料有高度需求，起源於先進國家對太陽能產業積極推廣，而太陽能電池其使用年限約在20-25年間，屆時這些廢太陽電池系統將都遭到淘汰，必需處理這些廢太陽電池系統。現階段對於太陽能系統上所使用的化學物質，都尚未加以規範。若以目前歐盟環保法令 WEEE 與 RoHS 法令在 2005 與 2006 年全面施行回收與禁用，雖說太陽能電池系統暫時不在管制指令中，仍能使用指令規範中的有害物質與無需對此產品進行回收，但可預期終究會納入管制，這些在法令管制前所生產的產品，其有害物質的使用都未經過規範與限制，對環境影響大，需先行思考因應解決之道，並規劃禁用與回收處理方式。

由圖 3.3 產品生命週期與產生的廢棄物，推得圖 4.1 所示由矽原料製成太陽電池晶圓的過程，由流程圖知矽原料到太陽電池晶片，需進行許多的加工步驟，才能得到太陽電池裸晶片，其耗費的資源與製造成本相當高昂，由圖中了解若將製程中的廢棄矽材料回收，其矽材需再再經加熱熔融即可長晶再製；而回收的廢太陽電池去除表面反射層，即可直接成為太陽電池裸晶片，成本效益高。

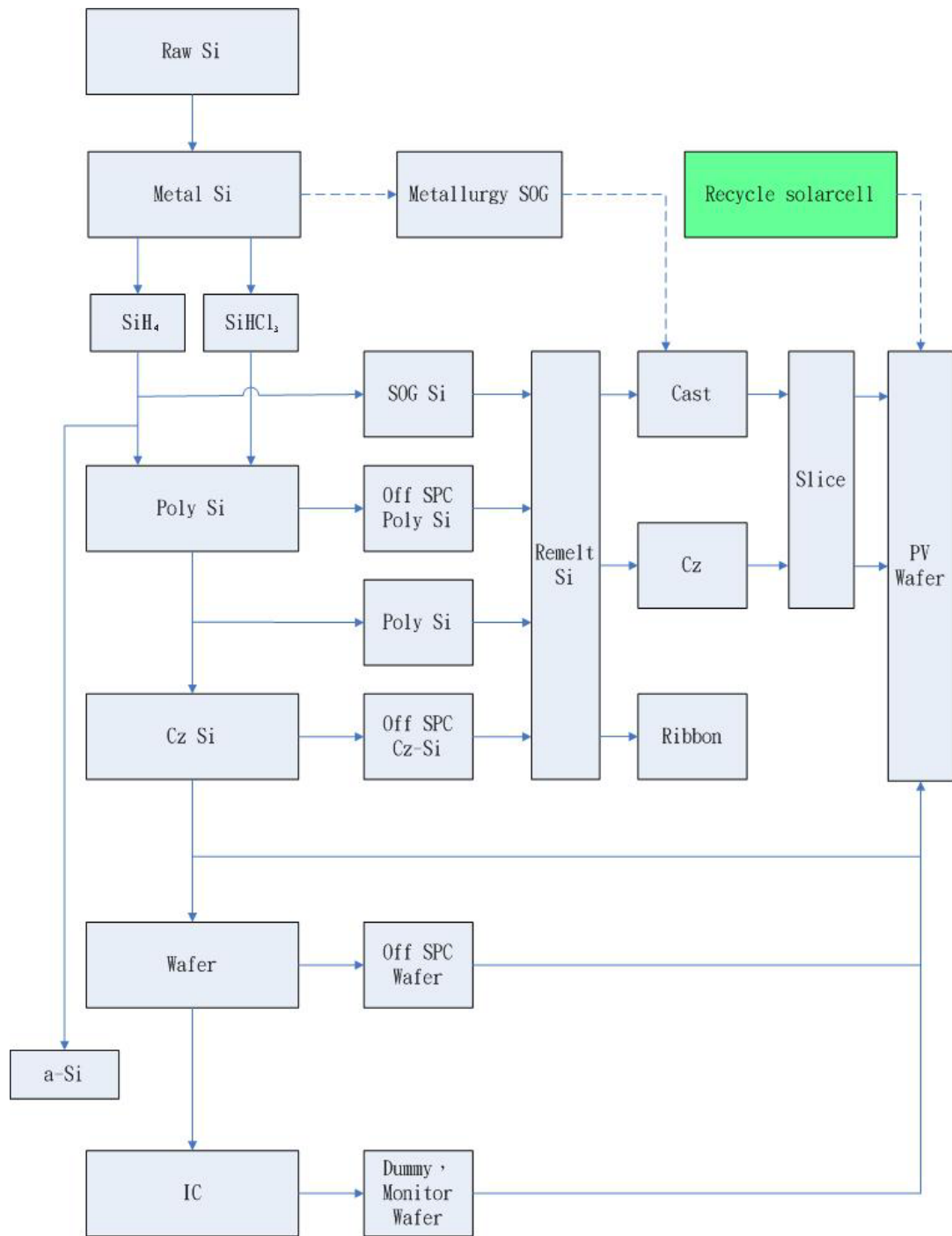


圖 4.1 多晶矽原料成為太陽電池晶圓過程

在圖 4.2 所示矽原料到太陽電池系統與流程中所生廢棄物，在製程中所生的廢棄矽材，愈接近原料端其效益越高，其廢棄物性質單純，可直接在製程中再製。在製造過程中產生的廢棄物分別有：純度不足的矽砂、廢棄的晶棒、製程中廢棄的晶片與廢電子零組件等。其中不純的矽砂，廢棄的晶棒與廢棄晶片，均可在製程中直接再次加工，成為太陽晶片的原料來源。

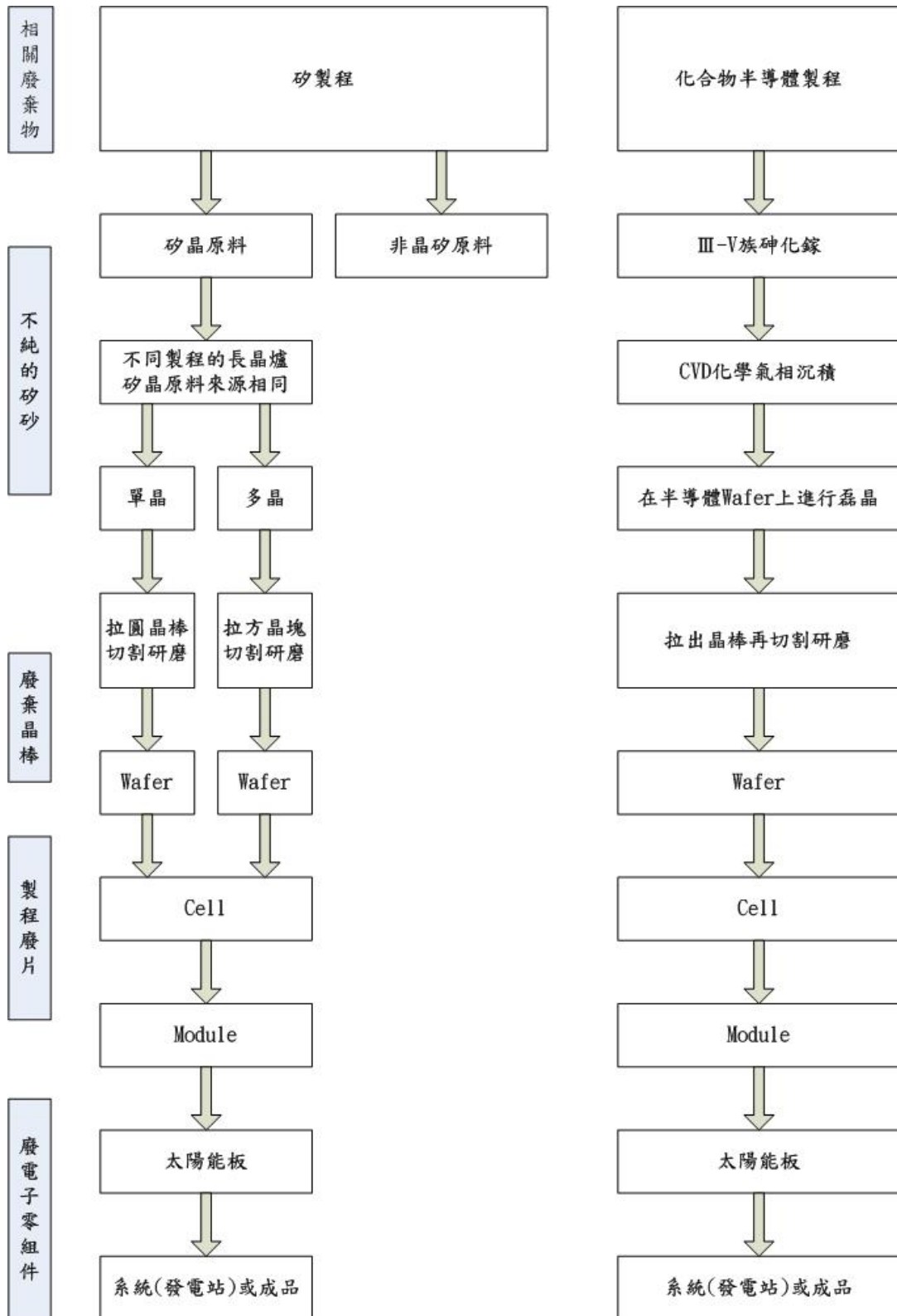


圖.4.2 太陽能電池製造流程與相關廢棄物

資料來源：本研究整理

太陽電池矽晶來源有單純太陽電池矽晶材與半導體級淘汰下的矽材，

在半導體級矽晶製造過程中，矽砂純化成 10^{-9} 純度的矽晶原料，切割取出中段的單晶原料，供半導體產業製成積體電路，其價值最高；而在切割過程中純度較差的廢棄矽晶棒，可再供製成太陽電池晶圓。太陽電池的矽材純化至 10^{-6} 後，取出單晶製成單晶矽太陽電池，切下的餘料與半導體級廢棄的矽材，混合再經加工融熔可製成矽晶原料，不但能省下成本與時間，更大幅減少廢棄物產生。以下將對矽砂到太陽電池的生產過程與產生廢棄物做介紹。

4.1.1 矽砂到晶棒（磚）階段

矽砂經過矽石還原、反應純化等過程後能得到晶棒或晶磚，如圖 4.3 所示。此階段由矽砂經過還原與純化方式得到多晶矽材，多晶矽材用柴氏長晶法（CZ）長晶，在石英坩鍋中放入純化過的多晶矽原料，加熱至 1420°C 讓多晶矽融化，置入晶種再經過拉晶程序，即成為單晶的晶棒；而多晶矽磚不需經過拉晶，即可得方形的矽磚。多晶矽磚其來源有多晶矽材與單晶矽棒的頭尾廢料。單晶矽棒需透過長晶過程，其煉製過程較多晶矽磚繁複，故在能源耗用上較多晶矽材為高。

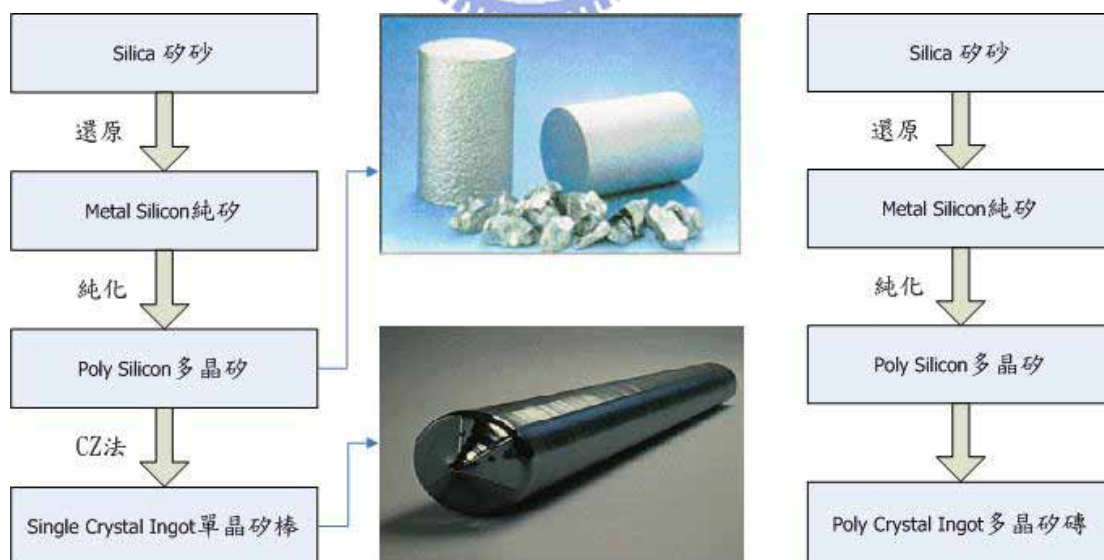


圖 4.3 矽砂到晶棒流程-單晶與多晶

資料來源：潘正堂，”Silicon Materials”，中山大學

由矽砂到長成晶棒或晶磚的過程中，須加熱純化多晶矽材，在坩鍋中會殘留約 10-15% 因雜質因素、溫控因素的多晶矽溶液。這些多晶矽的純

度相較原始矽砂高，仍可經過再次純化，將雜質除去後，再次進行長晶，亦可成為多晶矽磚的重要原料來源。

4.1.2 晶棒（磚）到晶片階段

經過晶爐的長晶過程，得到單晶與多晶的晶棒與晶磚，而晶棒與晶磚長成後須進行切割成晶圓片與晶磚片。以半導體級單晶製程為例，單晶矽在拉晶過程中，單晶矽在晶棒中間生成，因純度與價值較高，大多直接應用在半導體業中，進行晶圓加工成為積體電路。晶棒的頭尾則是在長晶過程中，因雜質與缺陷的產生，無法使用在半導體產業中，故將有雜質的頭尾切除不使用。舉例來說生產 300 mm 晶圓，有 1/3 的矽片用來測試，有 8 % 用來研展，剩下的可能在製程中受損而報廢，因此只有約一半左右的矽片可用來製成半導體用晶片。但有些矽片雖只使用一次但仍非常完整，能再生使用將可節省下可觀的成本 [38]。

在晶棒與晶磚切割成晶片的過程中，除切割過程中切下的頭尾料外，因切割所造成的矽材損失也相當大，這些切割下的矽材，可在製程中回收集中再經融熔長晶，亦成為矽晶原料的來源。

而太陽光電產業發展剛起步，導致供給面供應不及，此相較於半導體產業對於晶圓片之需求較小，加上成本考量，使太陽電池所用之晶圓片多由半導體產業之廢次晶矽和頭尾料再處理後所提供 [39]。在上游矽原料廠商擴產不及下，使廢次晶矽和頭尾料炙手可熱，因只需進行再生加工，即能使純度較低的矽材料應用在太陽電池上。故晶圓的回收再生，可視不同半導體業者所製出的晶片定出適當的回收再生作業，如此再生的產品不僅品質如全新貨、且最重要的是價格只有新貨的一半。

4.1.3 晶片到太陽電池階段

單晶的 wafer 是從圓形的晶棒中切割出來的，為了要放入方形的太陽能板上，必須裁切部份以適合方形的設計；而多晶的 wafer 是從方形晶磚切割出來的，放入方形的太陽能板上，其裁減量較單晶的晶圓少。「愈大

面積的電池板，多晶就愈有利！」在矽原料短缺下，使用多晶矽原料愈見其效率，如矽晶圓切得更薄、每片 Wafer 使用矽原料更少、轉換效率更高，矽原料短缺反形成技術進步主要動力。

目前太陽電池 Wafer 大多使用 4 到 6 吋多晶矽晶圓或晶磚，其厚度約 220~350 μm ，單晶轉換效率約 15~16%，多晶轉換效率約 14~15%，每瓦電力約需使用 5-15 克矽原料，依太陽電池的尺寸大小與厚度有所差異。由於多晶矽材缺貨，矽原料價格持續上漲，廠商除積極提升研發及技術能力外，希望以更有效率方式使用多晶矽，使 Wafer 更薄、電池轉換效率將更高、每瓦電力使用之矽原料將更少。

晶片切割成方形後，須先進行表面處理與切割後，依太陽電池的製造流程製造，才是完整的太陽電池。在切割過程中因製程產生的破損廢料，與切割下的矽材，其純度與晶棒（磚）純度相同，可與前段所產生的廢次晶矽和頭尾料混合，透過再次融熔方式進行長晶。

4.1.4 太陽電池到模組與系統階段

矽材經過太陽電池製造流程後，已成可供發電的單一太陽電池裸晶片，仍須將太陽電池串聯與封裝，始可成為有效發電的模組。在封裝組裝成模組過程中，因製程上的變數多，在製程中因品質或製造因素，產生廢棄的太陽電池或是廢棄模組。此階段產生的太陽電池，因表面已有含銀的導線與鋁等相關使太陽電池產生作用的金屬物質，處理上需進行繁瑣的處理過程，將表面物質去除乾淨，得到乾淨的裸晶片，始得進行再生與利用。

太陽電池因裝設地點的需求規劃不同，封裝成半透光型與不透光型等發電模組。太陽電池模組要能用來供電，還需加上電源轉換器與相關的發電控制設備，始能供作發電控制之用，太陽電池模組與發電模組組裝時，過程中因加工組裝方式不同，會產生廢電子零組件下腳品及不良品等廢棄物的產生，因組成元件相當多，與單純只有太陽電池晶片或太陽電池模組相較，其處理方式將較為繁瑣與耗時。

4.1.5 太陽電池生產過程小結

綜合太陽電池生產過程所生廢棄物可知，其越接近原料端愈是單純，可直接在製造過程中逕行回收再利用的比例愈高，回收再製將較廢棄為佳，以減少生產所造成的浪費，提高資源的使用。由矽砂到晶棒（磚）的階段，因雜質、溫控、缺陷等，所產生的廢矽原料，經純化能再次供長晶使用；從晶棒（磚）到晶片階段，將矽棒中的中段單晶部份切下供半導體業使用，其餘廢晶矽和頭尾料則可再切割，成為太陽電池的基材，供製造太陽電池使用；由晶圓或晶磚封裝成模組，因切割下的廢邊料仍單純，可在長晶階段再次融熔成矽漿再次供拉晶使用；晶片到模組與系統階段，所需的功能增加，晶片上的各種因發電而使用的物質，處理上無法單純直接再利用，需更有效率的處理方式處理。

4.2 廢太陽電池量預估與法令分析

廢棄物處理與否除取決於對人體的危害程度外，廢棄量更是重要的因素，由廢棄物的產生量與時間，除可提供政府應建立管制的時間與處理技術研發時程外，更是處理業者設置各項計畫的依據，故在廢棄物中廢棄物的量與產生時間，是項重要的評估因素。

目前太陽光電在 2005 年產量約有 1,727MW，而 IEK 更樂觀的預估在 2010 年前以太陽能產業每年約以 35% 的速度成長，可推得到 2010 年前每年預估的電池銷售量。以廢太陽電池壽命約 25 年，每投入一千瓦，其模組約有 103.6 公斤，其中 4% 在電池如表 4.1。由 1994 年起的太陽電池銷售量可

表 4.1 太陽電池模組重量成分表

Glass	Frame	EVA	Solar cell	Back sheet foil	Junction box	Weight/power
62.7%	22.0%	7.5%	4%	2.5%	1.2%	103.6 kg/kw

資料來源：K.Wanbach, S.Schlenker "A voluntary take back system for pv module in Europe", Solar material, Barcelona

推得 2019 年的廢棄量，其餘依此類推。舉例來說：1994 年銷售量 69.44MW，若淘汰則 2019 年廢棄太陽電池量約 287.82TON；05 年銷售量 1726MW 則 2030 年約有 7156.7TON。其換算方式如下：

$$2019 \text{ 年 } 69.44 * 1000 * 103.6 * 0.04 / 1000 = 287.82 \text{ TON}$$

$$2030 \text{ 年 } 1726 * 1000 * 103.6 * 0.04 / 1000 = 7156.7 \text{ TON}$$

本研究由每年世界太陽電池的銷售量經換算，可推得太陽電池成長量與廢棄量的關係，在 2019 年前廢棄量則依資訊消費產品週期為經驗，推得每年約有 10% 的淘汰量如圖 4.4 所示。此圖未考量人的因素，只單純將銷售量轉換成淘汰量，與 Stephanie Zangl 的推論不同。由圖可知廢棄的太陽電池約在 2021 年開始成長，廢棄量相當大。在 2006 年 RoHS 指令生效未被納入規範中的太陽電池，實施時因太陽電池仍屬排除項目，電池仍以使用舊製程方式生產，未納入指令規範管制仍可使用有害物質於產品上，淘汰時將對環境影響大。

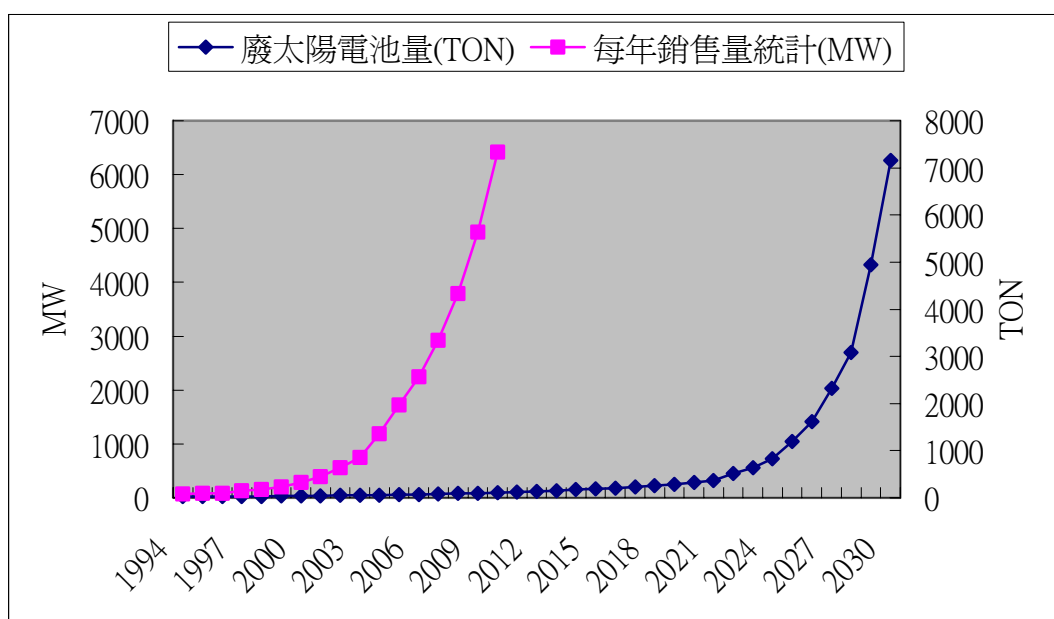


圖 4.4 太陽電池成長量與廢棄量比較

資料來源：本研究整理

太陽電池發電相較其他發電方式所佔的比例仍小，因量少與推廣階段，太陽電池目前並未在歐盟指令或其他國家中有規範或限制，隨產量與使用增加，其製造與消費的歐盟、日本等國家，太陽電池將因使用有害物

質而納入管制；當技術進步發電效率提升，更新效率佳而淘汰效率低的太陽電池將是趨勢，使廢太陽電池產生時能有效處理。目前最大產生源是來自製程中的廢棄矽材與品管下所淘汰的廢太陽電池，矽材價值高廢棄機率低，但隨矽材大量生產成本降低廢棄量將增加，應建立其管制目標。

目前國際上受環保規定而影響其產品銷售，莫過於歐盟所主導推行的WEEE與RoHS指令，指令詳細規範電子廢棄物的預防與處理方式，此二指令是延伸製造者責任最佳解釋。在世界各國對環保的要求上，歐盟是居領先地位，其所推出的相關法令遠見與政府的方式，常成為其他國家所效法。在此潮流趨勢下，除歐盟外日本與美國也積極制定更嚴謹的環保法規，就連大陸也積極到歐洲取經，準備推出大陸版的廢電機電子指令及危害物質管制指令。

歐盟的指令與德國法令在相互參照下，有許多精神相似之處，德國所制定的法令在歐盟中具有指標性作用，參照德國法令將可瞭解歐盟所欲規範的精神。在德國工業及商業廢棄物，應該儘量避免產出，若是已經產出則必須在廢棄前先行回收，當廢棄物無法避免產生或是無法進行回收時，則必需儘可能的將其危害特性移除，依此精神來看太陽電池因能源的需要被製造出來，在製造過程中的成本與效率的要求下，廢棄物產生已是無法避免，但能透過製程上的原料改變，減少使用有害物質。

依WEEE指令規定，在電力設備方面，尚未在10項的電子電機設備管制中的產品仍有寬限期，尚未納入回收的要求。但在歐盟WEEE指令第13條[為適應第7條3款、附件IB(尤其是考慮到可能增加家用燈具、絲芯燈泡和光電產品，如太陽電池板)、附件II(尤其是考慮報廢電子電氣設備的新處理技術發展)和與科技進步相關的附件III和IV而必須進行的修改將按照第14條2款的程式進行]清楚指出光電類產品，也就是太陽能板，是被包括在其中，太陽能產業也必須為其產品模組建立回收系統與再循環設施。依此指令規範，太陽電池產業終須得依指令執行回收責任，也因此給太陽電池製造業者壓力，凡銷售至歐盟會員國的產品，亦須負擔起回收處理的責任，將回收後的廢電子物品須移轉至合格的處理機構中，進行廢棄物處理，這些被回收的廢電子物品須可被再利用或再製造的條件下進行。

而 WEEE 的回收要求，使輸往歐盟地區的電子電機產品，須負起回收責任，其處理費的繳納依國家不同而有不同管理方式，但對回收率的要求則是相同。受此趨勢影響，國內以代工為主的廠商，屆時需建立產品回收的管道與處理費用。在回收方面，廢太陽電池因體積大運輸拆卸不易，更換或更新時仍需專業人員拆裝設備，交由回收廠商回收是可行的辦法，但在回收規劃上需公權力介入，規範回收管理的各項需求，對其回收管制法令、回收方式、回收資格、回收比例、回收基金等方面做規劃與要求。

以歐盟的電子電機廢棄物回收體系為例，以德國與荷蘭的回收體系為代表性指標，德荷兩國遵照歐盟指令建立起回收制度與合格處理設施，雖二者在回收管理制度上，因其國情與法令等制度面上有所差異，但仍為歐盟會員國的表率。未來若加入太陽電池發電系統的回收要求時，應能藉其優勢發揮回收處理的功能，其周邊發電設備可直接套用現行廢電子電機設備處理，廢太陽電池模組則需建立處理回收專責機構進行回收重製。其廢棄物的管理模式，都可成為他國的制定廢棄物管理體系的重要參考模範。

國內回收體系以廢家電與廢資訊物品，主管機關為基管會，依環保署公告應回收廢棄物進行回收管理，對處理廠的設置，稽徵處理廢與核撥都已累積相當經驗，於 87 年公告實施廢資訊物品與廢家電以來，已達成 4 公斤/年的要求，我國的廢棄物管理處理模式亦成為其他國家的學習對象。

在 RoHS 指令規定上，太陽電池發電系統在目前對電力需求高張下，對於禁用有害物質仍未將其納入要求與管制，但歐盟會每四年依現況修改其適用範圍，可預見太陽電池終得依指令禁用有害物質，亦需生產符合歐盟規定的產品，始得銷售至歐盟會員國，廠商在生產電池過程中，需證明與使用無害環境的物質。

目前未有針對廢太陽電池相關法令，太陽電池系統可以在回收與廢棄物處理的法規中規範，也可以在電子廢棄物準則中規範，也就是說太陽能產業在未來須為其產品建立回收系統與再循環設施，製造時亦須禁用有害物質。依照指令目前太陽能產業還有寬限期，電子產品中的太陽能電池，則由現行廢棄物條例規範。

國內的太陽電池產業廠商因國內需求較低，多將生產的產品外銷他國，在 2005 年全國能源會議上，政府已規劃相關能源施行措施，提高太陽能的普及率與使用，希能提升產業競爭力。計劃發展自主能源政策已是必然，在趨勢下對國內太陽能產業將有助益，國內藉由半導體生產基地的優勢，將成為太陽電池生產基地，此趨勢下首先面臨製程中的廢太陽電池半成品矽材，廢棄量將產生許多，而國內對製程中的廢棄物認定依據是有害事業廢棄物認定標準，在此標準認定下，太陽能電池在焊接點上所使用鉛錫合金，與相關週邊的電子零組件中所含的有害物質，在認定標準下是有害的需納入管制。

目前太陽電池大多使用鉛錫合金作為焊接的材料，因其成本與可靠度佳，使製造成本降低普及率提高，但目前指令尚未對其規範，只能對太陽電池製造商柔性勸說，希能減少有害物質的使用。因 RoHS 指令的施行，廠商外銷也因此受到限制，雖說國內並無規範禁用有害物質，僅加以管制其流向，在指令要求下廠商已通過綠色製程的相關驗證時，若因太陽電池而轉換回舊製程，將面臨更大的考驗，其轉換驗證製程不易，不因國內未禁用就使用舊製程方式生產，故在國內能延續禁用有害物質，國內的電子電機生產廠商應更積極研發新的技術，以提升競爭力。雖說環保指令的實施是種貿易障礙，它將排除技術能力不佳的廠商，但換句話說亦是廠商提升技術以達成要求增加獲利的方法。

4.3 廢太陽能電池回收可行性分析與方案研擬

對於廢棄物的處理的政策工具有許多種方式可供利用，但因各國之國情之不同，而有不同的廢棄物處理方式。在我國對於廢棄物的產生與其後續處理，大多採用處理費先行徵收或要求廠商負責回收之方式來進行。後者常因我國是中小企業為主的國家，許多中小企業經常會因管理不善或因其他原因而倒閉，導致廢棄物因廠商已倒閉，無法要求源頭廠商處理，反由政府花費巨大的公帑，出面收拾其廢棄物回收處理責任。但在財源困窘的今日，稅收年年減少，因廠商營利所造成的污染，理應由製造廠商做出相關回收處理責任，而非由全民來支應。

4.3.1 回收可行性分析

回收是一逆物流的方式，回收是有成本存在的，如何將回收的成本極小化，而回收所得的利益極大化，使回收變成有利可圖，在市場經濟法則下，回收體系將自然得以成形。在回收可行性分析上，將試著用技術面分析、成本面分析、社會面分析三方面試探討其回收效益。針對處理技術面分析，由現行的處理廠設備直接進行廢太陽電池的回收可行性探討。成本面上將對廢太陽電池的回收所得到的價值與所需的成本作比較分析。在社會面上探討社會大眾對廢太陽電池回收的預期接受度與相關想法。

1. 技術面分析

廢太陽電池回收處理分析將從技術成熟度、適用條件、處理量及規模、產品用途、以及二次污染防治方面做討論。

在技術成熟度來看，回收的廢太陽電池系統，除了廢太陽電池之外，其周邊轉換電力的設備，在目前回收處理技術上，已可透過現行設置的回收處理場，均可以有效的處理，而無污染產生。而現行的電力設備在技術的進步下，已無使用多氯聯苯這種劇毒的化學物質，來降低發電設備的溫度，在處理上無需再投資設備，由現行的廢棄物處理體系做處理與回收即可。在電子廢棄物處理場直接將這些太陽電池以外的周邊發電設備，藉由人工拆解分離其外部機架與可供回收的單元，將已分類的單元用物理機械方式破碎，回收其相關資源化物品，在技術上已經不是難題。

以目前太陽能產業方興未艾的狀況下，上游矽原料因擴產不及，而使中下游的電池製造業者，因原料極度不足，轉而向半導體廠收購製程中所產生的廢棄晶圓與廢棄料頭，其純度相較太陽能電池所使用的晶圓來的高，可直接製造成太陽電池，在缺料下成為重要的太陽電池矽材來源，在此需求下，廢太陽電池的回收價值變大，使回收有利可圖。由圖 3.2 可知發電用的廢太陽電池模組，其電池是包覆在強化玻璃與 EVA 中，需經過較多處理程序，才得以分離取出太陽電池矽材，故要發展較佳的分離技術，分離去除非矽材的材料，取得太陽電池的矽材，使回收的太陽電池矽材，

成為太陽電池另一種來源。

在適用條件方面，太陽電池模組與周邊發電模組成為發電系統。除太陽電池模組外，每一項的設備幾乎都可回收，經大部拆解分類後，周邊發電模組可直接交由現行電子廢棄物處理廠處理，處理過程可套用現有處理方法，而不需特別改變處理方式適用度高。而分類出的太陽電池發電模組與鉛蓄電池，其中鉛蓄電池交由專業處理電池技術與設備的處理廠，進行相關的處理分解後，可得資源化產品；而廢太陽電池交由太陽電池製造商或專業處理廠進行回收，回收所得之矽材，可供重新製作電池。

目前在處理量及規模上未有量的出現，太陽能發電產業生產成本仍高，轉換效率未顯著提升，仍需各國政府政策上的扶植下，要淘汰更新的機會幾乎是微乎其微，只有在生產過程中所生的廢棄矽材可供回收處理，但廢棄量差距仍大；在科技進步與微利下，減少不良品的產生已是增強競爭力的必要條件下，企業在生產已將廢棄物的產生減到最低。故以目前廢棄物產量與規模上，將無法支撐處理廠相關營運成本。

以資訊產品為例，經過 20 年的發展，在大眾化與行動化的要求下，資訊產品由學校研究單位走向個人，資訊產品更新速度較 20 年前來的快，電子廢棄物變成令人頭痛的問題，有了如此龐大的廢棄物量與規模需要處理，故應運而生的專業廢棄物處理廠，可進行處理與解決電子類廢棄物。

太陽能產業也將依循此模式，未來科技不斷進步下，需求更低的成本與發電效率提升下，促使廠商開發出更便宜與效率佳的發電方式。而能源技術與奈米科技的持續進步，太陽能發電成本將能有效降低，屆時淘汰與更新將更迅速，將有大量且大型的廢棄太陽電池發電系統產生。太陽電池發電系統因體積龐大，回收轉換成資源較丟棄掩埋來的佳，故廢太陽電池發電系統在處理量與規模上，目前無法得到利潤與吸引廠商設置處理場，但應研發處理技術，找到最佳化處理方式使污染降低。

在二次污染防治上，廢太陽電池發電系統經分類拆解後的各項廢棄物，究其本質大多為資源化的資源，其整體回收率將可達到近八成以上的

回收率，因採用物理方式拆解污染程度較少，藉由集塵與噪音等防治設備，即可有效將污染降低，而剩下仍須經過再次處理，也就是熱或化學方式處理才能得到資源化產品。其廢棄物大都是價值較高的金屬資源，如廢電子零組件中的貴金屬。廢太陽電池模組中的太陽電池，經過中間處理過程時，將可能產生較高的汙染，端看處理回收方式，為確保人員安全，仍須防制勿染產生。

以德國與日本拆解廢太陽電池模組為例，廢太陽電池模組經過物理方式，拆解外框固定支撐架等資源性高的金屬後，廢太陽電池被玻璃與 EVA 包覆，需分離取得廢太陽電池晶片。故德國採用加熱氣化方式分離，EVA 在加熱過程中氣化消失，EVA 雖無毒性但氣化有強烈氣味產生；日本則用化學方式腐蝕 EVA，腐蝕廢酸液更須妥善處理；而分離完成的廢太陽電池，需利用酸液清洗太陽電池表面將反射層等化學物質去除，清洗完成的廢酸液，回收到廢液儲存桶，再交由專業的廢液處理商進行處理。大體而言回收廢太陽電池發電系統，在污染防治上所需較少，主因在於經分類拆解破碎後，其已分類等物品即可逕行再利用；若需再次處理廢棄物，在現行的處理設備上都已具備，且防治設備功能已相當完備，故在二次污染防治上需求較低。

經處理過後的廢太陽電池發電系統在產品的用途上，仍可以發揮良好的使用。經處理過的電池已成單純的矽材，可在回收新的矽材上重新製作新太陽電池，而技術的進步將使用較佳的製程製作太陽電池，其發電效率都將較原有的高，且成本也較低。其它經分類出的廢棄物，大都可直接逕行使用的資源化金屬；而電子控制板與其零組件，經過破壞分離出可使用金屬後，剩下的廢粉塵其性質是玻璃纖維，則可當作為助燃的燃料使用，成為發電的來源。故在產品用途上，其再使用性是無庸置疑的，而太陽電池晶片也可藉由此一方式得到再次使用，無須由原料經過一連串過程得到，可有效減少能源消耗與達到資源再利用的目的。

綜何技術面的各項分析與現行電子廢棄物處理現況比較可得表 4.2：

表 4.2 廢太陽電池系統處理與現行廢電子處理比較

	廢電子廢棄物回收處理	廢太陽電池系統回收處理
技術成熟度	純熟	除廢電池外；其周邊模組設備可套用廢電子方式處理
適用條件	已建構完善處理場	除太陽電池外；其周邊模組設備可由現行處理體系處理
處理量與規模	已有固定規模	尚未有量但趨勢向上
產品用途	處理後已成單一資源	廢太陽電池可再從新製作電池，價格高；其周邊模組設備可由現行處理體系處理
二次污染	已經有固定的污染處理設備	須建置防止廢太陽電池的污染設備；其周邊模組設備可由現行處理體系處理

資料來源：本研究整理



2. 成本面分析

半導體大都使用單晶矽材，而太陽電池上因成本因素大多使用多晶矽材，佔整體太陽電池系統比例約六成，其矽材厚度亦較半導體厚度更薄，更省材料成本。以茂迪產品型錄為例，由產品資料知其尺寸、發電瓦數與厚度，其轉換效率各有不同，經由推論可得每瓦約使用 3.22g~4.9g 的矽晶原料如表 4.3 所示。顯示在技術進步下，轉換效率不因尺寸愈大厚度愈薄

表 4.3 太陽電池瓦數轉換重量表 矽密度 0.0023g/mm³

尺寸 mm	厚度 μ m	重量 g	發電瓦數	每瓦重量
103*103	310、260、220	7.56、6.34、5.37	1.52~1.65	3.25~4.97
125*125	310、260、220	11.14、9.34、7.91	2.27~2.46	3.21~4.9
150*150	260、220	13.46、11.39	3.26~3.54	3.22~4.13
156*156	260、220	14.55、12.31	3.53~3.83	3.22~4.12

資料來源：本研究整理

而降低。晶片厚度力求薄化，除了可以有效節省原材料外，因長晶的過程是非常耗費電力的，晶片切得更薄，可切出更多的晶片，製作出更多的電池；換句話說同樣的系統發電量，卻使用較少矽晶原料，也就是減少能源消耗，卻可製作較多的太陽電池，對環境污染也較少，成本也能降低。

廢太陽電池發電系統因體積龐大，在未來回收時將是一項需要重視的問題，以茂迪 M-85W 型號為例，模組發電量 85W 重 7.5 kg，若以家庭使用約 3-4KW 來計算，約佔 24-32 m² 重量約 270-360KG，若拆除報廢在搬運上不但需要多人共同搬運，更因體積大運輸的成本較高，將使回收商直接只拆除廢五金部份，其餘需要再進行處理的部份則隨意棄置，將造成環境的汙染與資源的浪費。

成本的分析與考量將是回收是否應徵收特別捐的重要因素。回收所需成本不外乎人力與物力，依售價 = 成本 + 利潤公式分析，以目前 06 年多晶矽原料價格 80 美元 / 公斤；模組 3.25~3.5 美元 / W，而模組中太陽電池佔成本的 40-46%。

參照廢棄物金屬回收價的與現貨價比較的經驗，其回收價格約新品價格的 70%~80% 之間，若純度不同則價格差異更大。廢太陽電池是整組發電系統回收，須經拆除支架等廢五金部分，廢模組經處理過程後始成為可再製作太陽電池的矽材，廢太陽電池以重量作為計價基準，由表 4.3 取其平均值約 3.8g/w，則每千瓦回收價格可推估為：

$$1\text{kw} = 3800\text{g 矽原料} = 3.8\text{kg} \times 80 = 304 \text{ 美元} \times 70\% = 213$$

利潤以 15% 為基準，則回收成本應控制每千瓦 180 美元之內

此價格是矽晶材原料回收的價格，回收所得的廢太陽電池，需再次進行加工才能得到單純的多晶矽材，回收的矽材只需熔融後再製，減少許多的能源成本，相較原始矽材仍有利潤空間，而周邊相關廢五金收入亦是重要的收入來源。回收所需進行的再加工程序愈少，處理後售出價格愈接近現貨市場價格，回收上有極大的誘因與經濟價值。但此經濟價值是建構在矽晶材價格與回收成本有相當大差價下，回收將有利可圖；若擴產與技術

進步使矽晶材成本降低，回收矽晶材價格與現貨差價減少，回收變成無利可圖。

全球油價上漲與減緩溫室效應帶來的氣候劇變，使太陽能產業需求旺盛，但原料擴產不及使矽材上漲，隨著產量與技術進步矽晶價格因矽材的供給量增加而成本降低，矽材佔太陽發電系統約四成成本，使廢棄物回收價值受原物料變動影響，除原料影響頗大外，人事成本亦是影響回收價值高低的重要因素，回收處理電子類廢棄物的費用約為一般垃圾的 6 倍，其中 80% 來自勞動成本。回收成本亦隨物價年增率上升，使回收價值將由正轉負，更因矽材的豐富相較其他資源的稀少性，當市場擴產使供給需求平衡時，矽材無法因稀少造成價格上漲，平衡人事成本上漲所帶來的壓力，使回收無法藉由市場機制自行運作。

如表 4.4 所示 06 年六月矽晶合約價約每公斤 80 美元 [40] 為例，工資以台灣基本工資每日 20 美元計算（基本工資 06 年每月台幣 15840 元，月休 4 天計算而得），其工資成本佔矽價成本約 25%（未考慮廢棄量增加使處理成本下降），回收矽晶材約有 4 倍的價差空間，故有利可圖（矽晶材價高故廢晶圓回收價格上漲）。若要考量其回收平衡點，需先了解矽晶行情趨勢與工資成本，而物價年增率大約都在 2~3% 之間，依此作計算可推得合理的回收成本。

如圖 4.5 所示為例，太陽電池壽命約 25 年計算，淘汰時其矽材因擴產使成本降低，而太陽電池發電系統使用期間工資隨物價年增率 3% 上漲，矽材成本每年以 5% 下降 [41]，將使回收拆解工資成本提高，依此趨勢推測可知兩者將在 2025 年達到平衡，屆時工資成本將超過矽材現貨價值，回收經濟價值相較 06 年低。

由其它價格下降趨勢線可知，矽晶原料價格愈低或是工資上漲率超過物價年增率，其回收平衡的年限將愈早發生，也代表回收價值降低，回收無法平衡其成本壓力，需藉由補貼回收處理費用等手段，使回收所得成為正值，才能產生回收誘因。而趨勢線是由推測預估得其投資平衡點，但現實中因擴產或是其他因素都將造成此損益平衡點提前或延後，相關景氣的

變化，造成工資與相關成本增加，將使趨勢線有所變化。在經濟的預測上頗為複雜，因產業景氣與人為的操縱等變數上，使預測產生損益平衡點更加困難。

表 4.4 矽價與工資比較表

矽價 us/kg	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
工資 us/日	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
$(1 + 3\%)^n$	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09

說明：物價年增率以每年 3% 計算。N 為年數，此例為 25 年。

以 2006 年七月為計算基準

資料來源：本研究整理

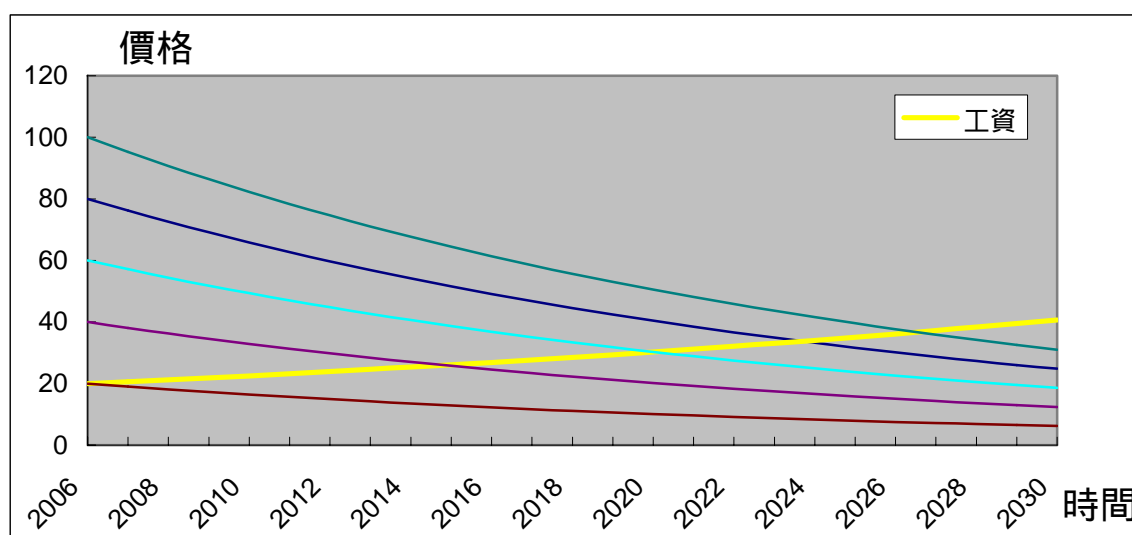


圖 4.5 矽晶價值與工資成本比較趨勢圖

廢太陽發電模組直接棄置進入掩埋場，棄置成本看似相當低，在拆解有價金屬後，與其他廢棄物擠壓因素下，將使廢太陽電池模組破裂變形，若含酸的雨水流過，則產生化學變化，使其中的有害物質析出，再由環境鏈影響生物的生存環境，造成的相關社會成本龐大，非單純廢棄置成本可計算。棄置不回收不但無法獲得高經濟價值的矽晶材，而棄置所需的成本與造成污染的社會成本，兩者相較之下，回收所需成本將較低。由前章的 3.2.1 節成本效益分析來看，回收所得的淨利益相當高，其回收行動所需成本中，透過專業安裝廠商將廢太陽電池模組以逆物流方式回收，省去專案回收所需要的成本，故逆物流的成本不高。

由延伸製造者社會責任的觀念來看，在太陽能電池中的各種物質均是對環境衝擊性較高，如接點的錫鉛合金，印刷電路板中的耐燃劑，但可用無鉛製程與禁用耐燃劑達成改善效果。若能有效回收廢太陽電池，將是延伸製造者社會責任的最佳示範。太陽電池發電體積龐大與架設角度，都須專業人員施工，才有較佳的發電效率。施工廠商在有利（清運回收費）可圖下，將可進行逆物流的回收，回收後製造商可用現有製造設備加以回收矽材，處理後所得的矽晶圓，除減少原料使用，更可增加回收再生率，因技術進步重製的電池甚至比原來的電池價值還高。

由以上分析結果可知，回收廢太陽電池的價值其所得均是正面，前提是建構在矽晶圓與模組的價格仍高，回收將較棄置來的佳。在產能持續開出與成本降低持續進行下，回收所得的高價值將抵銷，甚至成為負值。若不考量整體社會成本與後續所造成的影響，棄置的成本將較回收來的低。製造成本是大量生產就能降低，但回收的成本卻是固定更甚至會提高，雖說回收產生的價值在未來將降低，但在永續保護環境觀念下，及早對此一廢棄物做規劃，運用特別捐方式來籌措處理回收所需的基金，將可有效的面對與保護環境。



3. 社會面分析

在 WEEE 目前規定的 10 項消費及工業用電子電氣設備領域中，因涉及產品清單只是象徵性的，但具體產品還會在指令實施過程中予以進一步修正或補充，廢太陽電池雖未明列其中，但因所含的有害物質與體積龐大回收價值高，終將成為歐盟電子廢棄物規定上所管制的對象；而台灣的廢棄物認定標準，因其含有對人體有害的鉛，亦屬有害需管制與回收。

太陽電池發電的優點在京都議定書與油價高漲下得以彰顯，免費的能源來源與能有效降低二氧化碳的產出，降低溫室效應的氣候變化所帶來的影響，更獲得先進國家的大力支持與補助，各國莫不大力推動此產業。而只要是人類製造的物品，就有可能對環境造成影響。太陽電池發電雖然過程無污染，但畢竟非自然所生，回收人類所製的各種製品，避免污染永續經營環境已是整體社會的共識，故在社會面上將探討回收廢太陽電池的可

能性。

在自然界中並無所謂廢棄物的產生，一物種產生的廢棄物將是另一物種的生活所需，如此循環生生不息。人類文明與科技的進步，創造出許多方便的產品，也因此當廢棄時，無法直接由大自然承受，而產生的廢棄物若棄置，將對環境造成負擔。而使用後的廢棄太陽能發電系統，若未善加處理，將是社會與環境的負擔，廢棄物就是錯置的資源，使廢棄物再生循環，將是人類無可逃避的責任。而在土地稀少與環保觀念提升下，以廢棄掩埋為主的處理方式，其廢棄成本將高昂，製造商使用可回收材質減少廢棄量，若無法回收也將有害的特性移除，使太陽電池有了預防性的概念。

廢太陽電池發電系統也是一樣，雖說壽命可以達到 20-25 年，但是仍會因為先期使用者的使用，更換原因不外乎因電池效率提高，體積變小效率更好等因素，若加上政府的電力補助，因發電成為有利可圖，故淘汰更新速度將加快。物品若丟棄就是錯置的資源，目前大眾對二手物品接受度增加，每個人對物品的需求不同，將資源交換避免物品在可使用的時就丟棄，在太陽電池價格仍高的現在，交換更新的現象較難發生，未來若太陽電池效率提升，價格大幅降低時，此現象將有可能發生。

裝設太陽電池需專業技術，以產生最佳的發電效率，體積龐大的廢太陽電池，需更新舊設備則可交由廠商代為處置，而裝設太陽電池發電設備在先期的導入期，是對環保意識較高的人，對環境的保護的觀念也較強，若需對廢棄設備加以回收，則有相當高的接受度，一來可使資源再利用，二來可降低對環境的破壞，三則藉由回收後的更新設備再出售，使價格降低增加普及率。

政府近年積極推廣廢棄物回收觀念，例如強制資源類的資源回收與宣導，都已有良好的效果。而在民眾的接受度上，都能認同廢棄物需要加以回收再處置，避免資源浪費，故對廢太陽電池回收接受度上應是相當高。

4.3.2 回收可行方案研擬

國內針對廢棄物的管制策略，應考量奉行「管理」比「技術」重要的策略特質；有害事業廢棄物的管控是全球在 21 世紀最重要的挑戰之一，全球都在集思廣益，如何能確實達到兼顧經濟發展和環境保護下，有害廢棄物管理策略的「雙贏」局面。

經濟工具在執行具有彈性設計、應用之特點，可視客觀經濟情勢而定課稅、或指定排放交易來管理；然而在目前各國執行有害廢棄物管制情況來看，比較其他環保費率，顯然比較少，且較無經濟誘因使得廠商願意配合改變其生產行為，因此以他山之石作為台灣有害事業廢棄物管制之借鏡，擴大運用市場機制的環境政策工具，不但符合學理上 tax bad instead of good，且可達到有效管理目的，故以行政管制與兼具經濟誘因之機制實屬必要。

針對廢太陽電池發電系統，在有利可圖與晶圓價格高漲時，回收產生的價值高，可以支應回收所需的相關費用，隨大量生產所造成的成本降低，回收所得的價值也降低，須另闢財源支應處理費用。在可行方案研擬上，我們有許多政策工具可供使用，以達成回收與管制的目標。以下將針對各項污染者付費制度做討論，供各界參考。

1. 徵收產品費 (product charge): 係針對製造廢棄物較多的產品或包裝在其生產、批發、或零售階段時課徵的一種特種銷售稅，是事前的收費。此種收費方式的優點是，它針對所有產生廢棄物的來源，都加以收費，廠商在繳交費用後，就將回收處理責任交給第三者進行，製造商得將成本轉嫁給消費者承擔，對製造商改善製程，減少廢棄物產生並無壓力。

此方式的缺點是，在應用面上有徵收與稽核的困難。現行產品大多是組合式產品，較少單一種類就構成產品，在產品中對資源的認定，回收的困難度與產品壽命等，都不容易釐清責任，分攤比例也無法確認。應用在回收廢太陽電池上，因太陽電池組成組類多，認定上需花費較多心力，而物品決定權在消費者手中，其設配成本與使用壽命，都未能明確計算，使部份設備更新替換，造成收入不同支出，故回收廢棄太陽電池費用須精算，造成管理成本的增加。

2. 押金制度 (deposit systems): 押金依銷售者與消費者兩者之間的合意決定，並非依產品的重量或數量計算。當消費者將商品交付給銷售商時，銷售者則返還押金給消費者。此種方式的優點是，消費時產品已含處理的費用，消費者會在產品無法使用時，退還產品並取得押金，而產品有價，銷售者無須擔心產品回收問題。

此方式缺點在，因是消費者與廠商合意其價格，廠商的信用與財力等保證就相當重要，若因財務發生困難，廢棄物就無價值，無法返還其押金。更因此產品的再使用機會高，可充分減少新品的成本，才有回收的價值，若能長久使用，更應考量其物價上漲的成本與降價壓力，而價格已內含處理成本，在售價上將較相同產品偏高。此方式大都使用在具有獨占性市場時，而回收的價值佔產品相當大的比例，例如公賣局的押瓶費。

若產品使用年限長，回收價值因通貨膨脹率而降低，使回收所得價值無法與當初押金價值相同；而期間因押金所產生的利息，亦增加押金返還的複雜度，必須精確對其廢棄物做計算，此制度適合週轉期快的商品。押金是產品中已內加處理費用，當產品廢棄後仍是有價，此物權是屬於原始消費者所有，非第二者可隨意主張其物權，價高時將引起法律上的糾紛，若第二者以上主張則有法律上的侵占問題產生，所引申的問題層面大。此制度較適合價格低與產品生命週期低的產品。

3. 使用者付費 (user charge): 是一種事後的收費。當消費者或廠商製造廢棄物後，交由清除單位清運處理，清除單位則依廢棄物體積或重量決定清理成本的高低，而收取相當的費用。此方式優點是，可鼓勵廠商回收使用再生料，減少使用新生料，亦可鼓勵廠商改變產品的包裝，降低廢棄物密集程度。缺點為清潔單位在計算清理成本時，廢棄物來源廣泛，在成本計算上將較高，使用廢棄重量與體積計價，將需花費較多人力實行分類處理工作。
4. 回收獎勵金: 是種事前收取處理費用，回收後再給付一定金額的獎勵

金，以鼓勵回收的行為。此優點在於生產者產出產品時，管理單位依產出量與處理成本稽徵處理費，回收後給付回收獎勵金。因是回收獎勵非押金，故是種獎勵性質卻無押金制所產生的問題，因此可有效增加回收的誘因，不會產生因產品生命期長所產生的利息，與通貨膨脹下造成押金價值的降低等經濟問題，更可避免產生侵占等相關法律問題。此方式擷取押金制度的優點而無押金的缺點，因有利可圖將有效驅使回收工作的進行。

廢棄物回收是有成本，逆物流的回收成本更高，廢棄物有殘餘價值，則市場經濟會產生回收誘因；若殘餘價值低時，則須附加經濟價值或透過立法規範，以產生回收行為，而前者的回收效益較後者高，廢棄物含經濟價值趨使市場自行回收較立法強制規範來的佳且符合人性。而廢太陽電池系統回收綜合以上四種的付費回收的經濟機制所述，本文建議廢太陽電池發電系統應該採行回收獎勵金制度方式，較其他三種經濟手段方式來的佳。太陽電池體積大，裝設不易與須調整接收角度等問題，都需專業的安裝人員進行安裝，當淘汰更新安裝效率更佳的系統，亦須專業人員安裝與調整，使效率做最大發揮。拆卸下的舊系統，可交由安裝業者進行回收，可節省等待裝設的時間，藉由裝設業者的拆卸舊設備安裝新設備，裝設業者能由舊設備的回收得回收獎勵金，增加其回收的意願，裝設業者以逆物流方式，送回處理場進行回收。

獎勵金方式就如同買了保險，保證廢太陽電池發電系統在生命週期結束時能被回收處理。管理上仍須由國家成立具公信力的回收管理組織，負責稽徵處理費與處理登記等各種相關管理事宜。除精算其生命週期處理費用等參數，訂出每一階段合理的獎勵金額度，才能確保在生命週期結束時能夠妥善處理。

4.3.3 回收管理架構

國內有三種廢棄物管理體制，一是由環保署成立的基管會，主要業務對環保署公告應回收的項目，建立回收處理體系，並稽徵相關的回收處理基金；二是環保署成立的廢管處，其主要業務為針對廢棄物的產生單位，建立起廢棄物的產生源，流向與清理計畫書審定等管理；三是對成熟的廢棄物處理技術，則交由工業局管理其再利用方式，以促進產業的發展。此三管理機關在廢棄物管理上雖立意良善，希能從源頭到產品週期結束均有

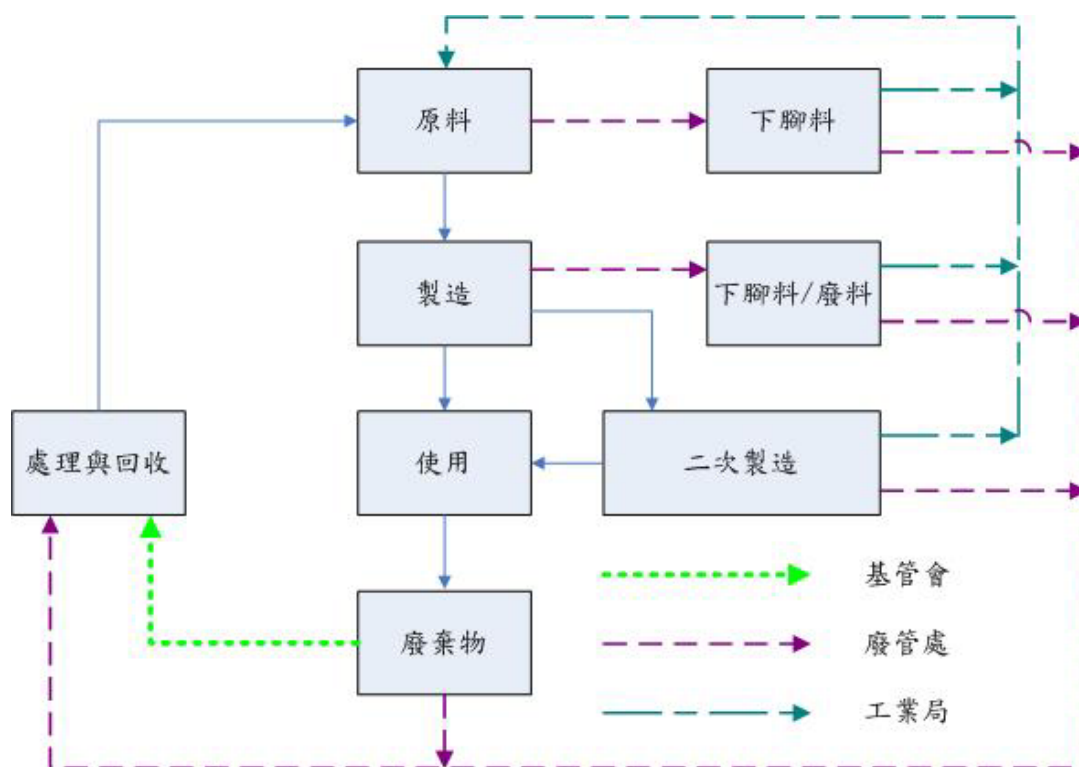


圖 4.6 回收管制流程示意圖

資料來源：本研究整理

效管理，但在廢棄物實務上，因對廢棄物認定不同與處理方式各異，常造成彼此混淆不清，故在管理上有相當大的差異。

廢太陽電池的產生源有兩種，一是生產端產生，一是消費者端產生，因來源不同管制方式各異，修改圖 3.3 生命週期與產生廢棄物示意圖得圖 4.6，二者最大差異在於：消費者端已是組合的成品，種類組合性質多；而生產端將原料進行加工成為成品，因原料來源眾多，特性與加工方式各異。這兩者在管理難度上差異大，故依產生方式其管理效益較高。

基管會的職責是由消費者端回收，中間處理端管制與管理，與處理費用的繳納與撥付。基管會依公告回收廢棄物，在貨品出廠對業者稽徵處理費用，而業者得將費用則轉嫁到消費者身上。此費用徵收後用於處理現階段回收的廢棄物，待產品生命週期結束時，回收再依處理量，經公正第三者稽核同意後，再由回收基金撥付處理費用，如此循環進行，使廢棄物都能被有效處理。

廢棄物管制中心負責產品生產到出場的過程，產品在製造過程中，各種原物料在生產階段經加工製造，其生產方式與品管要求均不同下，每個階段將有廢棄物產生，愈接近原料端性質愈單純回收價值高，換句話說也因原物料單純，其危害性亦較消費者端的產品高，而原料來源與種類複雜，透過管制中心對製造過程中廢棄物的管理，將可有效追蹤廢棄物產生與流向，使製程中的廢棄物有效管制。

廢棄物妥善再利用與回收，不但可減少廢棄物的產生，更因生產者對原料的需求不同，若有效加以利用，不但可減少廢棄量增加其價值，亦可創造成為產業需求。舉例來說：甲廠生產過程中所生的廢棄物，對甲廠是需要花費進行相關處理，但對乙廠只要再加工即可成為產品，是重要的原料來源。此種可供其他業者藉由廢棄而成為原料來源的方式，其經濟價值高，除可有效減量廢棄物外，其原料成本取得較低。工業局責任是促進產業發展，藉由建立廢棄物交換平台與管理，將可達成廢棄物有效交換與減量，使產業得以健全發展。

此三種管理方式為目前國內廢棄管理方式，其管理對象與權責均不同，能藉此三種管理方式使產品產生到結束，都能有效的監控。此種是屬於事後管理，其成本較廢棄低。但在生產過程中的有害物質使用，仍未加以管理，透過產品設計與研發，將有害物質減量或禁用，從源頭管制將較事後管理有效，值得詳細規劃與研究。故在回收系統中亦考量此三種現行管理方式，使太陽電池能用較少的管理成本，透過現行回收管道即可回收。

4.3.4 回收系統架構

本研究參酌廢棄物回收系統制度的措施與管理方式，參照圖 3.3 的產品生命週期與所產生廢棄物示意圖，試擬出廢太陽能電池回收體系制度，從生產的過程到生命週期結束，都納入處理體系管理與管制，太陽電池將能有完善的處置。而其主要的理念目標如下：

1. 廢太陽能電池之回收系統制度從廢棄物產生、清運、中間處理至回收再利用過程，通路中各個環節環環相扣，因此所研擬之回收系統制度必須具有整體性及前瞻性，以收事半功倍之效。
2. 考量目前廢棄物回收處理現況與環境，所研擬之體系制度試圖透過政府公權力（法令）的行使及輔導措施之實施，誘發廢太陽能電池回收再利用之市場機制功能。
3. 考量廢太陽能電池回收系統制度與目前相關法令、社會環境、處理現況及相關法令的設置，所研擬之回收體系以現有體系運作為基礎，在不大幅更動情形下建立，使回收體系於日後運作之可行性。
4. 廢太陽能電池中超過 60%-80%以上為可再利用之各項資源，本研究制度之設計儘可能回收再利用廢棄物中之有用資源，並可配合政府政策訂定回收率，逐年加以提昇。

本研究所研擬廢太陽能電池回收體系如圖 4.7 所示，包括廢棄物產生源、清運過程、中間處理與再利用等四個環節，以下將分別詳加敘述介紹之。

1. 產生階段

由前述太陽電池製造流程可知，廢太陽能電池來源有兩種，一種是在生產製程中所產生的廢棄矽材，另一是消費者淘汰後所產生。管理機關因執掌與立場不同，受三種不同管理機關管理。

在產生廢太陽能電池階段時，要求生產端建立清理計畫書，記載廢棄物

產生與使用原料等相關資料，並於產品出廠時申報出貨數量並繳交處理保

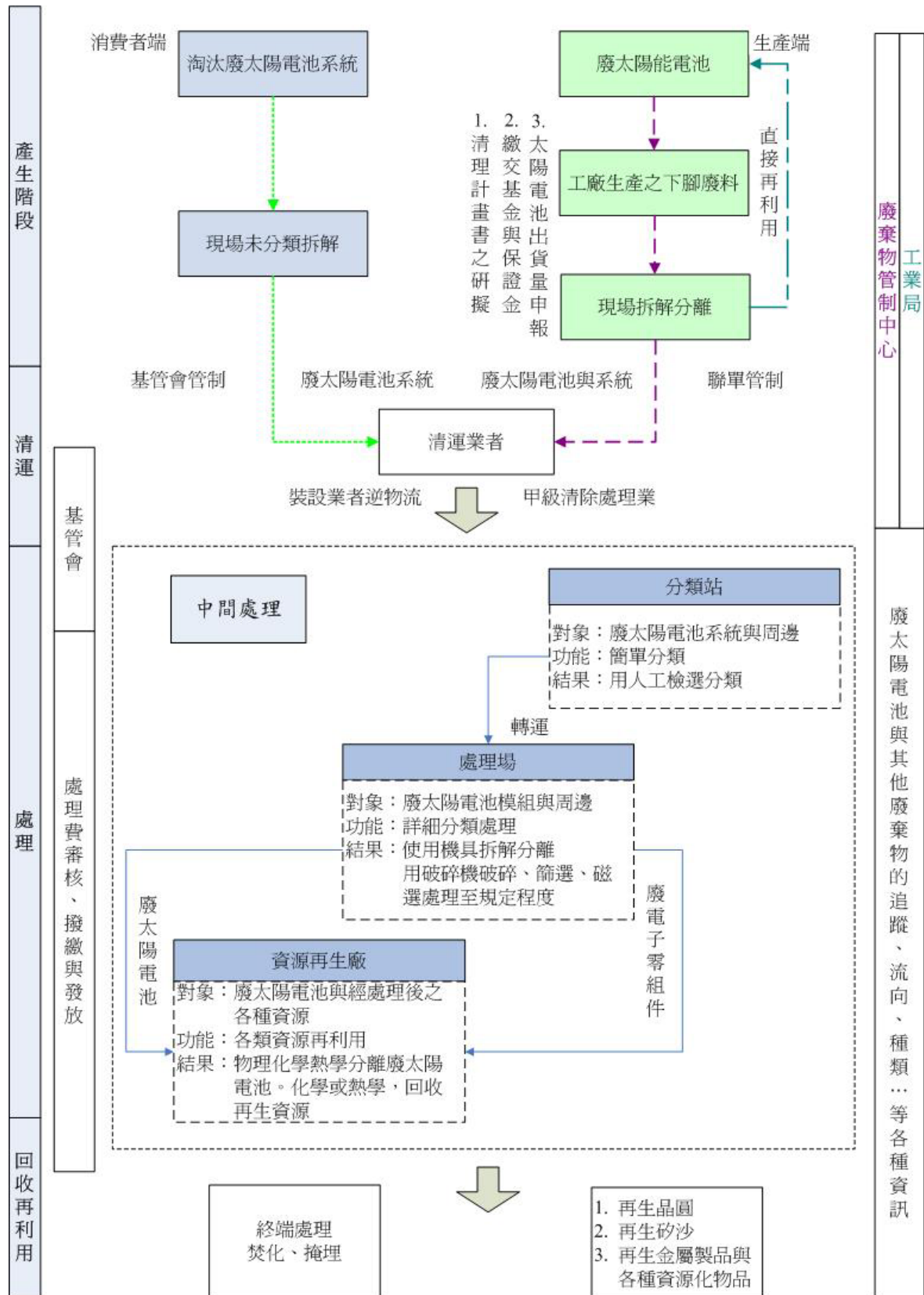


圖 4.7 廢太陽電池回收體系制度

資料來源：本研究整理

證金。生產過程中所生的廢棄物，愈接近原料端加工的過程愈少，其性質單純，可成為其他產業的重要原料來源，故依照圖 4.6 的管理體系，單純的下腳廢料，則可申請通案再利用，受工業局輔導與管制，使下腳料回收成為有經濟價值的廢棄物，可使資源利用率到最大，減少廢棄產生，更因是他廠的原料來源，在經濟上能轉換成另一項收入來源，增加經濟上的價值與誘因。

生產太陽電池過程中需將矽晶切割，而成品良率非 100%，也有廢品產生，分別有原料半成品等，而原物料價格高，在生產的過程中，可直接進行回收再製，使原物料能再次使用，避免因良率低使成本增高。若價值不高，回收再製的成本高昂，則交由清理業者代為處理廢棄物。在生產端因營利產生的廢棄物通稱事業廢棄物，其來源產生與流向，都須由管制中心管制，藉由清運聯單上的紀錄，控管廢棄物各種資訊，使廢棄物納入管理，能確實追蹤其流向，使廢棄物到合法處理場所處理，避免污染環境與方便控管。

消費者端方面，太陽電池經過長年的使用，因效用與成本的降低汰換更新，體積與重量大及安裝角度等因素，而在消費者端無原料來源等相關資訊，卻是廢棄物最大來源。基管會公告應回收資源化物品時，產品出廠時須先行繳付回收處理基金，此時廢棄價值已產生，已非單純廢棄物需大眾買單處理，因有價其回收動力已產生，不須擔心回收管道，市場自然成形。回收將由專業安裝人員安裝新太陽電池與拆除舊電池後，由安裝人員採逆物流方式，集中送回暫存待清運業者自裝設者處集中後，再統一送到處理場處理。

2. 清運階段

清除業者分別從生產端與消費者端的安裝業者收集後集中，雖說廢太陽電池本質都一樣，但廢棄物的來源不同，在管理上故有所差異。從生產端清運的廢棄物，此處所清運的廢棄量大與價值性低，須透過清運聯單管制與追蹤其流向，清運聯單上須註明清運時間、清運者與處理者等流向相關資料，並上網申報勾稽其流向。近來更因網路與 GPS 技術的成熟，在清

運業者車輛上有裝設 GPS，管制中心可藉此設備追蹤與管理車輛，避免再發生違法任意處理廢棄物。

而消費端的所拆卸廢太陽電池發電設備，出廠時已繳納處理費用，在設備上有繳納證明，故消費端無來源證明但有已繳納處理證明。安裝業者可直接逕行拆除回收，消費端因來源眾多且管理不易但已繳納處理費，廢太陽電池如同有價物品，市場會驅動其回收，無需建立來源證明與產量等相關資訊。

綜合以上清運過程可知，清運業者從消費者端清運的，無須清運聯單，此處清運業者亦無需清除執照，因消費者端都是產品，危害性較生產端因製程上所需的原料與所產生的廢棄物，其危害毒性較低，有車輛載具就能清運，消費者端在廢棄數量上也較生產端少，是種多樣少量的清運。因出廠時廠商已代繳處理費，但經轉嫁到消費者身上，故購買時即已支付處理費，此時廢太陽電池系統是有價的，不需擔心廢棄物流向，市場會自行回收，此階段基管會也無須管制，管理成本將可有效降低。由生產端清運的則需要建立詳細的來源與流向證明，是管理單位完整的資料來源，更可供查察與稽核，管理成本較高，但事前管理較事後處理其成本仍較低，亦避免大量有害的廢棄物影響環境。

3. 處理階段

中間處理階段依其處理能力與對象不同，設立各類型中間處理場，轉運站與資源回收廠等機構，而不同功能的中間處理場，應訂定不同設置要求與處理流程，以有效確實掌握處理廢棄物。清運業者在各收集站將廢太陽電池集中，再交由中間處理機構分別進行處理。

中間處理機構因技術與投資成本，在處理上大多採分工方式，且回收過程中因廢棄物種類項目多，須先進行分類以增進處理效率，中間處理是將組成的廢棄物處理成單一資源等行為稱之。清運者集中後送交至分類站，先行過磅取得重量資料，原因是廢棄物種類繁雜，過磅後可依質量平衡原理，推得其入廠量與處理回收所得量是否相符，廢棄物送入處理廠時

須過磅取得廢棄物重量，再與處理完成的資源化物品的重量相比較，檢視其重量差異將能確實掌握到廢棄物處理過程。送入分類站由人工分選，是將處理程序相同者分類在一起，整理後再送交處理廠進行處理，可藉由相同的處理方式減少處理成本。

處理廠則依照分類後排出生產線進行處理，在生產線上將分類後的廢太陽電池系統，利用簡單機具拆解分離廢太陽電池系統，分解成較小的單元集中。廢太陽電池已由系統拆解成為單一模組，在此階段若需向基管會請領處理費者，則須清點其認證的關鍵元件，其關鍵元件認定由基管會訂定，由公正第三者稽核認證數量與重量後，送交至下一站處理。廢棄物管制中心管制廢棄物則是以重量計算；基管會是依關鍵元件與重量做計算，關鍵元件的件數為請領處理費用來源。

廢棄物經拆解、認證與處理過程，處理分類出的廢太陽電池模組與廢電子零件，廢太陽電池交由專業處理廠回收廢太陽電池晶片，其回收處理方式用物理、化學與熱處理等各種方式，如下節所述以取得矽材，取出之矽材依製造流程再行加工，依當時技術可用更新的製程技術，其效能將更佳；而廢電子零組件經處理後，將含有貴金屬成分回收，可獲得較多的經濟價值。

綜何以上中間處理階段的各項處理方式，實務上分類與中間處理大都位於同一場址中，後段的再利用因設備與成本等因素，交由專業的處理商處理，其處理過程非分類、處理、再利用等順序流程，將因廢棄物的複雜程度有所改變其順序。依來源不同各管理單位管理要求亦不同，基管會是以消費者端為來源，由關鍵元件的認定作為處理數量的標準，並以重量為輔以對其處理量能確實掌握，處理完成後並請領處理補貼費；廢管處依生產端進行聯單管制與管理，依流程管理原則，對廢棄物各流向管理，使廢棄物得在管制下，依法令處理廢棄物，對其處理過程所生的廢棄物亦納入管制，使廢棄物產生與處理都能符合要求與規範。

4. 回收再利用階段

經過中間處理後的廢太陽電池與廢電子零組件，分類過程中仍產生資源化產品與相關廢棄物。廢棄物的來源是經處理後，金屬與資源化物品已分離，剩下的非資源化或資源化價值不高的產品，此種產品回收價值較處理成本低故廢棄較佳，而廢棄仍含有熱值可使用，用焚化方式回收使用其熱質以供發電之用，其灰燼則須檢驗其重金屬含量，符合標準則進行掩埋處理。處理完成的非太陽電池廢棄物，除回收有價與資源類的金屬塑膠外，剩餘價值較低的材料，如包覆材料與玻纖粉塵，在經濟面的考量下，採用焚化方式較有效益，可焚化產生熱能發電。

而資源化產品是除了廢棄以外的產品，與中間處理階段所得的各種功能性尚佳，可直接使用的產品相較，其物品仍有回收價值但須經回收處理手續。舉例來說：廢太陽電池系統在回收過程中，太陽電池因回收過程中，因處理可能使太陽電池受損，未受損電池直接可供再利用，受損的電池則可熔融再製；其他資源化物品則可進行再利用使資源再生。製程中不良的廢太陽電池與矽材，或是再生時破裂的太陽電池，因性質較單純，可成為太陽電池矽材的重要來源。

在中間處理階段產生的各種資源化物品與廢棄物，基管會依關鍵元件方式認定其數量後，其處理則依照廢棄物管制方式管理，而自行回收的廢太陽電池亦納入廢管處管理，在廢管處的認定下，其產出是事業廢棄物來源之一，仍須接受相關管制，須申報其流向與相關廢棄物資訊以供查核。其產出的廢棄物，則由廢管處管制，再生的各種資源化物品可由工業局的協助，成為他廠的原料來源。此管理方式，資源化物品的流向將可有效管理，增加其經濟效益的產生，廢棄物流向由廢管處納入管制目標，避免產生取得有價資源，卻造成更大的環境危害。

5. 小結

太陽電池回收體系制度的管理單位是基管會、廢管處與工業局三者為主管機關，依其來源不同而管制單位不同，能將廢棄物的來源有效管制與涵蓋，消費端產生的廢太陽電池，因已繳納處理費用，廢棄時因內含回收獎勵金，回收可由專業拆卸太陽電池公司進行回收，其清運成本可減少，

亦不需擔心廢棄造成的汙染與破壞，但需建立對關鍵元件的條件與認證，避免有價部分拆除，廢棄需要再處理部份；生產端所產生的各下腳料與廢棄物，因下腳料價值高，可作為其他生產單位的材料來源，可取得較低成本原料促進產業發展，此部分由工業局執行輔導與媒介，使原料可獲得最大利用；其餘則由廢管處管理其廢棄物流向，以便確實進入處理體系處理廢棄物。

經清運業者送入處理場後，其管理由廢管處管制，此階段來源不管為消費者端或是生產端均須進行處理，差異只在回收獎勵金的給付，基管會只須認定關鍵元件以作為給付基準，仍需依照中間處理流程對產品進行處理，管制單位由廢管處管理。此時中間處理機構亦成為生產單位，其產出的資源化與廢棄物亦接受管制，經過處理廢棄物大都轉換成資源化產品，其污染校已降至最低。回收再利用是中間處理過程中所產生資源化產品，可供再製成原料使用，其餘所生廢棄物則較廢棄時的成分簡單，再進行焚燒取得熱值以供發電。

由回收體系制度可使廢太陽電池系統從生產到墳墓均能有效管理，透過三個權責不同的管制機關的管制，廢太陽電池終獲得有效處理，但須依法公告應回收廢棄物，使廢太陽電池系統也納入規範，基管會才得以稽徵回收獎勵金，以供未來處理獎勵金發放。

4.4 廢太陽能電池處理再生技術

太陽電池所使用的矽晶原料，在目前供應上有很大的缺口，因太陽電池的矽晶中可以含有較多雜質，除購買太陽電池級的原料外，也使用半導體級矽晶原料切下的下腳料來支應，因半導體級所使用的矽晶純度在 10^{-9} 較太陽電池級用的矽晶純度在 10^{-6} 來的高外，在矽晶缺料的今日，成本價格較便宜也是重要因素。

太陽電池的來源除了由半導體中的廢棄下腳料提供外，應積極由冶金級矽砂，擴大供應太陽電池所需的矽晶材料；另一方面研發回收廢太陽電池技術，使太陽電池來源廣泛而能降低成本。回收好處頗多，除能減少資

源的浪費與棄置成本外，經再生處理即可再使用；減少對環境的污染的可能性；而新品所需耗費的能源與成本都較低；更重要是回收價值相當高，是可以積極研究發展的技術。

4.4.1 周邊廢電子零組件處理

由圖 4.8 所示的太陽電池發電系統可知，廢太陽電池發電系統經回收後，需將周邊發電系統與太陽電池系統分離，將系統大部拆解分離後，再進行拆解成較小單元。如發電系統中的各項組件，充電控制器中有保護機體的機殼與提供運作控制電路機板，先在拆解線上拆解機殼與機板，並分類成機殼與機板電線等元件，將機殼與機板分類集中後，再將機板上所能拆的每一單元拆解分類集中，透過加溫的錫爐，將含零組件的機板，在錫爐加熱使零組件鬆動下，敲下並集中電子零組件，有價值的零組件，經分類後集中再處理；單純的廢印刷電路板，進入破碎機中，將機板粉碎研磨後再透過靜電分離，分離出單一資源化金屬與玻纖粉塵。其他控制單元也是依此方式，進行最佳化處理。如圖 4.9 所示的廢電子零組件與五金拆解流程示意圖。

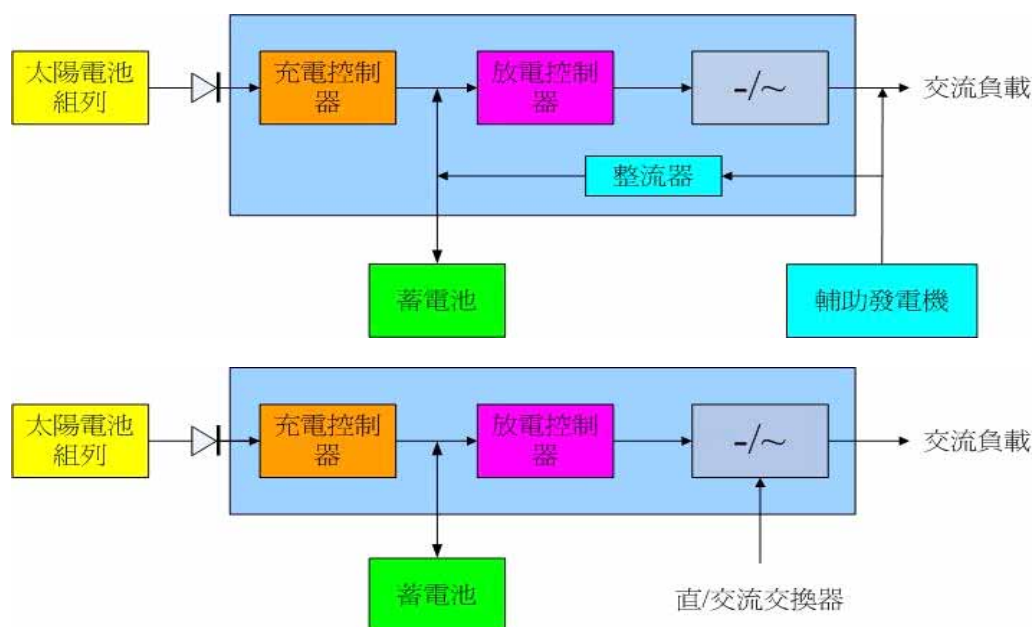


圖 4.8 太陽電池發電系統（獨立與混合型）

資料來源：許國強，「防災型 PV 系統設置」，2005/06/10

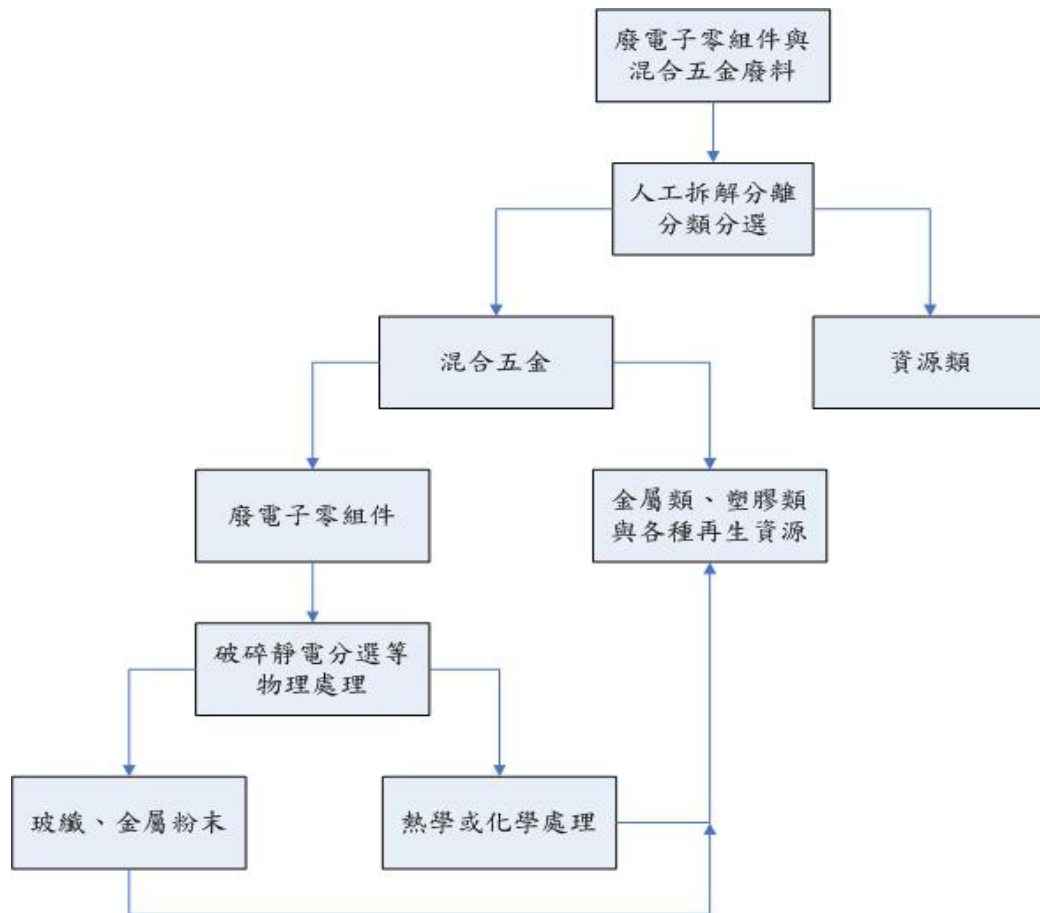


圖 4.9 廢電子零組件與五金拆解流程示意圖

資料來源：本研究整理

電子廢棄物其組成種類多，其各種規格皆不同，也都有不同處理方式，使用自動化分類效率不高，其原則為將大且複雜分成小的零組件，故人工成本較高。經人工分類出的廢棄物，須進行後段處理始成原物料，在單一場地直接進行全製程處理，其投資將較高，現行作法是轉交給專業從事此項業務的處理場，也就是說處理廠依處理設備與能力不同，而有不同處理方式。以獨立型太陽電池發電系統為例，使用鉛蓄電池為儲存設備，若回收蓄電池因其含鉛的導電板與廢酸液，在處理上重視對周邊環境影響。因廢液是屬於強酸，不注意或是未做好環境影響規劃，除造成從業人員的職業傷害外，因酸液中含鉛離子存在，未經處理將可能污染地下水。而蓄電池中的導電鉛板，可回收再製使用於電池中。包覆酸液與鉛板的塑膠，其性質為 PP，此塑膠可耐酸鹼與可重塑性佳，可經粉碎後再重新射出成形，再次使用減少環境的破壞。

由上述例子可知，處理場因資本與專精技術不同，分類後的廢棄物，由專業的處理進行個別再處理，將有效發揮其功能與成本支出。在管理與法令上，更因處理場處理廢棄物的性質單純，較易控管達成管制目標。

4.4.2 廢太陽電池處理

太陽電池由圖 3.2 可知其結構，以矽晶材為主的矽晶矽太陽電池，所佔體積比例少但價值高，回收再製其能源與經濟效益高。太陽電池有一般型與應用在建築物上的半透光型，一般型固定在太陽能機座上，為增加其效益採用杜邦的 Tedlar，而半透光型則是兩面透光度佳的玻璃，大都與建築物結合，但在處理上並無太大的差異。

Tedlar 中文為聚氟乙烯，是杜邦公司研究出來的材料，由物質安全資料表 (Material Safety Data Sheet, MSDS) 得知，其物理性質為：密度 1.38、不溶於水、無色無味、燃燒產生一氧化碳與氟化氫，對人體無傷害。對日照、化學溶劑、酸鹼腐蝕、濕氣和氧化作用的抵抗力和耐久性高。從零下 70 度到 110 度，TEDLAR 均可保證優異的性能，瞬間溫度峰值最高到 200 度亦不會對其造成破壞。最高使用溫度為 120°C，具有氟樹脂中最高拉伸強度和最低的氣體透過係數，在大氣中使用壽命長達 25 年，是一種極優的耐老化材料。

EVA 中文為乙烯基醋酸，產品透光率大於 90%，粘接強度大於 20N/cm，耐紫外老化與環境老化。為無色透明易燃，輕微酯類的特殊氣味，密度 0.93g/cm³，分解溫度約在 400°C 左右，無色可燃性液體，有強烈氣味，其蒸汽對眼有刺激性，自燃溫度 300°C。使用在太陽電池的低鐵質玻璃，有良好透光性與支撐保護，使用壽命長等優點。

廢太陽電池發電模組回收拆卸，去除外框鋼支撐架，剩下太陽電池模組。回收太陽電池由各種處理方式 (化學的，機械的，熱學的)，以評估其處理效益，將協助建立模組回收的基本要求。回收太陽電池是去除矽晶片以外的物質與結構，如金屬導線、接點上的錫鉛焊點、鋁質材料與抗反射層等物質，以返還原始的太陽電池的裸晶片，其流程示意如圖 4.10 所示，

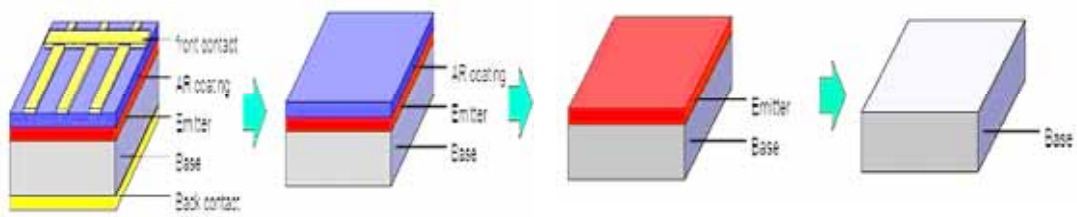


圖 4.10 回收流程示意圖

本研究試研擬其回收處理流程與技術。

由電池結構圖可知，以一般型為例其厚度約在 4.33 mm，太陽電池晶片厚度約佔總體積約 8-10%，處理時需將 EVA、玻璃與 Tedlar 去除，才能回收電池晶片。處理第一步驟均是將 EVA 去除，由文獻探討日德兩國分別使用化學與加熱方式處理 EVA，使太陽電池與玻璃分離。日採用化學方式分離 EVA，優點在於 EVA 溶於液體無殘渣產生，可直接分離玻璃與太陽電池，而電池無破壞，缺點是其廢液須加以再處理；德則採用加熱氣化 EVA，優點在於無廢液處理問題，缺點是氣化有殘渣與廢氣產生，與溫度升高造成玻璃下墜沾黏現象，須建置廢氣處理設施與需人工去除殘渣，始得太陽電池。本文則試研擬物理方式將 EVA 分離，物理方式分離廢棄物其成本較低，以產生效益。

太陽電池厚度約為 350~200 μm ，由圖 3.2 結構圖了解，其 EVA 其厚度約與電池相同，運用切割晶棒與晶磚的砂輪，其切割砂輪厚度約為 100~300 μm ，故使用砂輪切割 EVA，可分離玻璃與太陽電池，因 EVA 厚度較砂輪厚，以 EVA 為刀具切削路徑，使 EVA 成為消耗品，故切割晶圓設備亦可成為物理處理的設備。因設備同屬於晶圓製造上游，其切割技術也相當成熟，而回收所得太陽電池矽料，除可增加原料來源外，若採此方式回收將毋須設置專業處理廢太陽電池廠，與前節廢太陽電池拆解後，交由專業處理廠回收廢太陽電池不同，晶圓切割廠可從事此業務，使成本有效降低獲利增加，見圖 4.11 之廢太陽電池回收流程示意圖。

切割分離後剩玻璃與太陽電池晶片，經人工分離出太陽電池晶片與玻璃，太陽電池晶片表面有銀導線、焊接點與反射層，背面則有導線與鋁塗

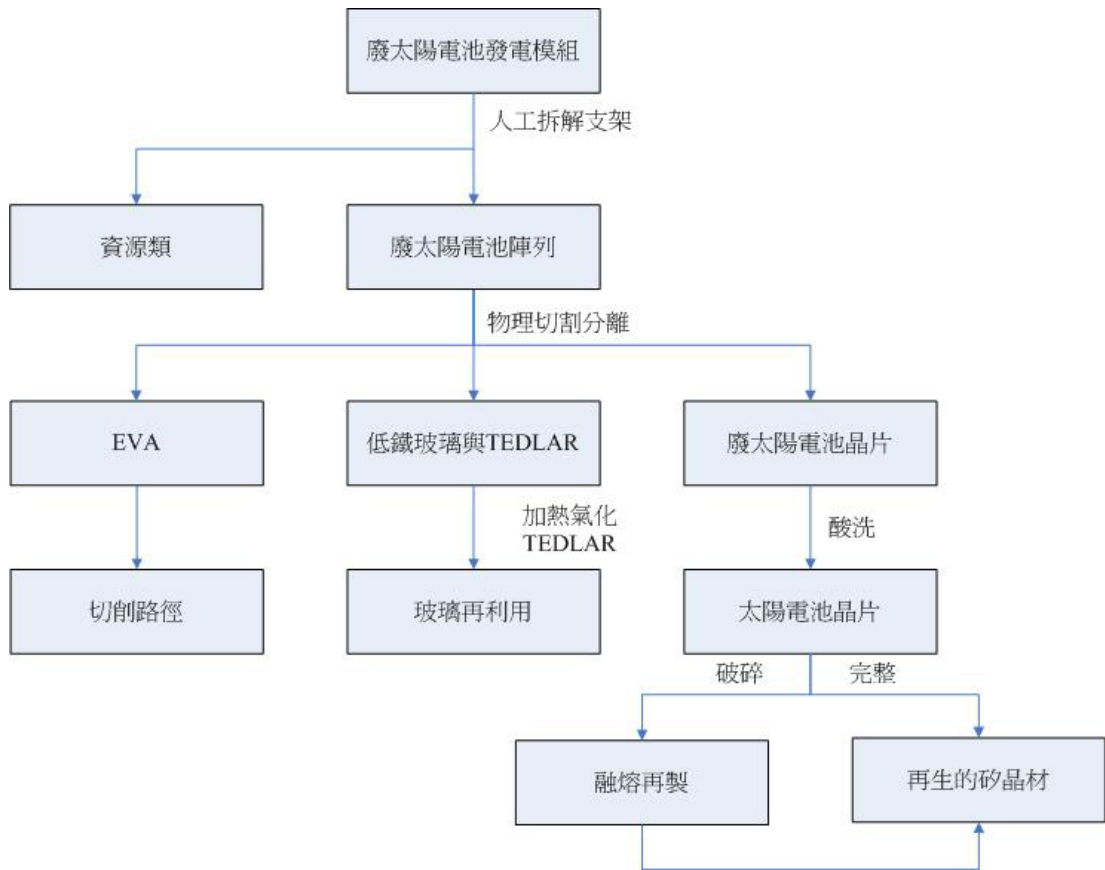


圖 4.11 廢太陽電池回收流程示意圖

資料來源：本研究整理

層，其厚度薄用化學方式去除效率較高，故對太陽電池晶片進行化學酸洗，可將廢太陽電池晶片表面所鍍的物質去除，去除後成為可再使用的裸晶圓。分離的錫鉛合金與金屬導線等，因鉛危害大須分離回收，廢錫鉛合金中的鉛分離後，廢錫可再製成為錫原料來源。

酸洗後的廢液含有銀離子等金屬存在，其廢液價值高，可回收析出銀與其他金屬，透過離子交換樹脂將銀離子吸附，再回收交換樹脂進行處理，回收可得價值高的銀金屬。低鐵玻璃其透光性佳、污染少可再利用性高，在使用過程中不因風吹日曬而發生變化，使用目的單純，其用途是給予太陽電池良好支撐與包覆，經回收重製後可直接再次使用，在處理回收上較有色玻璃來的佳，應用範圍廣泛回收價值也較高。

經過酸洗除去表面的廢太陽電池，已成為單純的廢晶圓，表面並無其他雜質存在，可再將廢晶圓熔融或直接進行再製。經過熔融過程的再生晶

圓，可因太陽能電池技術不斷進步，回收再製的太陽電池可用較進步的技術，使發電效率較原生電池佳，重製的電池甚至比原來的電池價值還高；採直接再製者基材受限等原因，其效率較再熔融差。回收再製對所有參與者都有吸引力，如提供回收廢太陽電池模組廠商，對未受破壞的電池回收程序少價值高；而購買再生太陽電池的客戶，其新品成本較低與品質較佳，使雙方均有利可圖，經濟價值高。

廢太陽電池回收再生價值高，由以上再生方案研擬知，回收是有利可圖，回收的效益較廢棄的成本來的高，使廢棄所帶來的環境影響減到最低，值得努力開發研究回收技術。



第五章 結論與建議

5.1 結論

本研究所建構的廢太陽電池處理與回收模式，能有效利用現有電子廢棄物處理場的產能，回收的電池經處理後能回歸太陽電池生產體系，能增進太陽發電產業的產值；而廢太陽電池回收技術研究，將使回收太陽電池成為可行。具體而言，本研究有下列各項結果：

1. 分析其回收可能性與方案：經技術面、成本面與社會面分析後，回收廢太陽電池是有助於環境保護與產生回收價值，最重要的是社會已經有資源回收的概念，推動回收工作上將事半功倍。
2. 廢棄太陽電池產生量與成本關係：由安裝量產生廢太陽電池量與時間成本關係，矽晶原料成本下降則回收平衡時間縮短，須及早因應回收所需的相關措施。
3. 提出廢太陽電池的處理流程及逆向物流之模式：由裝設業者以逆物流方式，將淘汰的廢太陽電池集中，交由清運業者送回處理場處理，解決消費端回收的難題。
4. 可提供處理廠商與政府訂定環保法規者之參考：在研究處理的流程中，可清楚規範生產端的管制與流向，而消費端由基管會公告管制補貼項目，減少管制成本與增加處理效率。
5. 回收處理流程的藍圖：由物理化學熱處理等方式處理太陽電池，提供新的處理方式回收太陽電池晶片，並將回收的資源化物品充分再利用。
6. 規劃未來此領域的研究藍圖：雖說太陽電池報廢量目前仍不多，但太陽產業在一段時間推廣後，其使用及報廢量將大幅產生，在未雨綢繆與保護環境的考量下，值得再做進一步的探討未來回收方式與相關處理技術。

5.2 後續研究建議

本研究在廢太陽電池的回收通路與法令，廢太陽電池的處理技術上，作一初步的研究，在後續研究方向上其建議方向如下：

1. 太陽電池製造技術與替代材料的研究：

從源頭的管制將較事後回收有效，太陽電池依現今製造生產技術，仍需要使用鉛錫合金等有害的金屬與製程上的蝕刻劑等，政府除及早訂出各種法規及規範外，更應帶頭輔導研發新的製程生產技術，以符合日益嚴苛的環保要求，使生產更節能原料使用更少，達成更高的發電效率，達成綠色生產的目標。故建議後續研究方向：太陽電池錫鉛替代材料、太陽電池製程的改善等供後續研究。

2. 太陽電池的回收製程研究：

在本研究中，依太陽電池結構與廢棄物處理技術，提出回收與處理的概念。依此回收方式將有下列問題供後續研究：

- 酸洗的配方與腐蝕速率研究：廢太陽電池回收後須透過酸洗流程以去除其反射層，其酸洗的的配方將影響其腐蝕深度與時間，如何達成最佳化是研究課題。
- 太陽電池處理技術效益分析：廢太陽電池有日本化學方式，德國熱學方式與本研究的物理方式分離玻璃與太陽電池，再進行後處理，三者效益何者較佳。
- 太陽電池的焊料研究：由錫鉛焊料改用環保焊料時，其焊接溫度會較錫鉛焊料上升，使用環保焊料焊接對太陽電池影響。

3. 回收費率的訂定研究：

回收所得與處理的相關費用，由成本與效益上的分析，可訂出最佳的回收補貼費率。



參 考 書 目

1. 黃秉鈞，「從國外經驗論我國未來太陽能光電發展策略」
<http://lis.ly.gov.tw/npl/hot/answer/nuclear4/newparty/6-6.htm>
2. Tomas Markvart，” Solar Electricity” ，John Willy & Sons，2000
3. 熊谷秀，「太陽光電知多少」，科學發展，第 383 期 36 頁，2004 年 11 月
4. 莊家琛，「太陽能工程-太陽電池篇」，全華圖書，P4-3，民國 86 年 8 月
5. 太陽能光電發電網，
<http://www.pvproject.com.tw/aboutus/introduction2.html>
6. 吳財福，張健軒，陳裕愷，” 太陽供電與照明系統綜論” ，全華圖書，民國 89 年 1 月
7. 劉文漢，” 中壢地區全天候即時太陽光電能發電之監測分析” ，私立中原大學碩士論文，民國 91 年
8. Tomas Markvart，” Solar Electricity” ，John Willy & Sons，1995
9. 莊家琛，「太陽能工程-太陽電池篇」，全華圖書，P4-127、P4-164~P4-170，民國 86 年 8 月
10. 尤如瑾，「世界太陽能光電產業現況與展望」，機械工業雜誌，263 期，P156-166，2005 年 03 月
11. 郭禮青，「全球太陽光電開發現況及國內應用潛力」，台電工程月刊，第 651 期，P38~48，民國 91 年 11 月
12. Solarbuzz 網站，
<http://www.solarbuzz.com/Marketbuzz2006-intro.htm>
13. 李承翰，「旭日初升的太陽光電產業」，P10-P11，2005 年 8 月

14. 陳秀蘭，「太陽能發電 將比石油便宜」，德國-台灣再生能源研討會，臺北，2004/05/19
15. 財團法人光電科技工業協進會（PIDA），「第五章 太陽電池」，P5-27~P5-28，2005
16. 全國能源會議，「我國再生能源及節約能源規劃目標」，2005年06月
17. 林大鈞，「工業廢棄物妥善處理研究」，國立臺灣大學碩士論文，P2，民國90年
18. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on Establishing a Framework for the Setting of Eco-design requirements for Energy Using Products，Cummission of the European Communities，Brussels，2003
19. Segerson， “Property Transfers and Environmental Pollution: Incentive Effects of Alternative Policies” Land Economics, 70(3)，p. 261-72, 1994
20. 黃慧芬，「有害事業廢棄物產生與評估政策效果之系統模擬分析」，國立臺北大學碩士論文，P39-40，民國90年
21. S. Zangl， “Regulation Scenarios for Waste PV Modules” in A Jaeger-Waldau (Ed.)， “Workshop on Life Cycle Analysis and Recycling of Solar Modules - The “Waste Challenge” ， European Communities Brussels 2004, 18-19 March 2004,
22. R. Gegenwart, First Solar environmental program, 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, Spain 2005
23. First Solar, First Solar announces insurance policy to fund solar module reclamation and recycling expenses at end of product life, Press Release 25 May 2005
24. K. Wambach, S. Schlenker, A. Jäger-Waldau, “A voluntary take back

- system for PV modules in Europe” , 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, Spain, 2005
25. Council decision of 19 December 2002: establishing criteria and procedures for the acceptance of waste at landfills pursuant to Article 16 of and Annex II to Directive 1999/31/EC; Official Journal of the European Communities L 11/27
26. Vasilis M. Fthenakis, ” End-of-life management and recycling of PV modules” , Energy Policy 28, 25 May 2000
27. K. Wambach , S. Schlenker , ” A VOLUNTARY TAKE BACK SYSTEM FOR PV MODULES IN EUROPE” , Workshop on LCA and Recycling of Solar Modules , Brussels 18-19 March 2004
28. Stephanie Zangl, ” Regulation Scenarios for Waste PV Modules” , Workshop on LCA and Recycling of Solar Modules , Brussels 19 March 2004
29. K. Wambach, “Recycling of Solar Cells and Photo- voltaic Modules” Paper presented at 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris 7-11 June 2004
30. K. Wambach, E. Bombach, A. Müller, I. Röver, Recycling of solar cells and modules - recent improvements, 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, Spain 2005
31. R. John Bohland and I. Igor Anisimov, “POSSIBILITY OF RECYCLING SILICON PV MODULES” , 26th PVSC, P 1173-1175, Sept. 30-Oct. 3, 1997
32. T. Doi, I. Tsuda, H. Unagida, A. Murata, K. Sakuta, K. Kurokawa, “Experimental study on PV module recycling with organic solvent method” , Sol. Energy Mater, Sol. Cells (67) 2001
33. Asia Pulse Businesswire, “Japanese citrus-based separating agent disassembles solar panels.” (8-10-2004). 27-10-2004.

34. 楊智強，「回收與補貼之理論與實證—以台灣廢電子電器物品為例」，國立臺灣大學碩士論文，P5-P11，民國 89 年
35. 工研院環衛中心，「歐盟環保只對我國產業之衝擊與因應對策」，RoHS 服務團宣導手冊，P1-P2，民國 94 年 6 月
36. K. Palmer., H. Sigman and M. Walls. “The cost of reducing municipal solid waste.” *Journal of Environmental Economics and Management*”, p128-150, 1997
37. 楊致行，「工業廢棄物之回收與資源化」，經濟部情勢評論季刊，第八卷第二期，91 年 9 月出版
38. 陳怡欣，「晶圓也可以回收再利用」，
<http://www.itri.de/index.php>，2003-08-15
39. 劉佳怡，「由太陽光電矽材緊縮因素觀其未來發展趨勢」，工研院 IEK-ITIS 計畫
40. 田村直樹（日本德山化學矽部門多晶矽營業部），台北國際太陽光電論壇，95/07/04
41. Winfried Hoffmann (Schoott solar)，台北國際太陽光電論壇，95/07/04