

出國報告（出國類別：訪問）

循環經濟多元化林產品國際交流研究 I

服務機關：農業部林業試驗所

姓名職稱：何振隆 研究員兼組長、林振榮 研究員、塗三賢 副研究員兼主任、徐中芃 副研究員、林柏亨 助理研究員、徐光平 聘用助理研究員

派赴國家/地區：日本/福岡

出國期間：113 年 12 月 1 日至 12 月 5 日

報告日期：114 年 2 月 5 日

摘 要

此次參訪日本九州天瀨發電所、日本九州南關發電所與松本系統工程，旨在深入探索林業剩餘資材的高值化利用及多元化能量回收利用，作為臺灣林業循環經濟發展的借鏡。然而，臺灣每年產生之大量農林剩餘資材，其中超過一半被低價值處理無有效利用，浪費資源外，也對環境造成威脅。透過學習日本在林業剩餘資材前處理、熱或能源回收技術及與地電地銷增值利用等領域的成功經驗，我們期望提升臺灣相關技術的研發與應用效能，並借鑒其在與鄰近社區參與和公私協力文化融合模式，多元應用推廣農林剩餘資材，最終達成減廢和能源回收的目標。

參訪日本 FOREST 株式会社南關發電所，深入了解其農林剩餘資材利用及發電模式。該發電所主要以當地產生的農林剩餘資材為原料，結合高效的燃燒與能源轉化技術，不僅提供穩定的綠色電力，還有效降低了廢棄物對環境的影響。南關發電所的運營體現了資源本地循環利用的理念，透過地電地銷模式，促進區域經濟發展及資源高值化應用。此外，其完善的資材收集與處理系統，確保了原料供應的穩定性，同時有效解決了當地農林剩餘資材處置問題，為我們提供了一個可供借鑒的示範案例，同時啟發我們重新思考農林剩餘資材的潛在價值，並認識到以綜合技術和區域合作模式推動資源循環利用的重要性。

此次參訪日本九州天瀨發電所，深刻體驗到其在農林剩餘資材高效利用與綠色能源生產方面的創新實踐。該發電所獨特之處在於結合先進的熱能回收技術與高效率燃燒系統，不僅提升了能源轉化效率，還將資材處理過程中的副產物進行資源化利用，實現全方位的零廢棄目標。天瀨發電所的設施強調智能化與自動化管理，再符合法規前提下減少人力需求的同時提升運營效率。此次參訪啟發我們思考如何將資材利用的技術創新與社區參與模式結合，進一步促進臺灣農林剩餘資材的綜合利用。特別是天瀨發電所的高效系統與區域合作模式，為臺灣林業資源轉型提供了寶貴經驗，並為實現低碳發展與永續經營提供先行的經驗與有效之實行方式。

在參訪松本系統工程協助運營的久大林產株式會社林地，充分展現了生物質收穫機與選別分類技術在林業中的應用，體現了高效、安全的作業模式。林作業過程中，生物質收穫機針對不同地形與木材特性進行精準作業，減少木材損耗的同時確保作業安全。此外，透過選別分類技術，能夠根據木材的種類與用途進行精細分類，確保資源以最高價值方式利用。剩餘的枝條與樹皮等副產品則被轉化為生物質能源，實現全方位的資源回收與利用，避免浪費並降低環境負擔。此次參訪讓我們深刻體會到機械化作業與高效分類對林業發展的重要性，為臺灣林業的升級提供了寶貴經驗與啟發，也為推動資源循環與可持續發展提供了全新思路。

目次

摘要.....	1
壹、 前言及目的.....	3
貳、 參訪行程概要.....	4
參、 參訪單位交流紀錄.....	6
肆、 心得與建議.....	26
伍、 附錄.....	27

壹、前言及目的

臺灣木竹產業每年產生約 70 萬公噸剩餘物，卻有超過半數被低價值處理或廢棄，其再利用率僅約 5%，不僅造成資源浪費，也對環境與產業經營構成困境。林業循環經濟是以林業資源的高能效循環利用為核心，以「再利用、再循環、減量化」為基本原則，透過低消耗、低排放、高效率的模式，實現資源永續管理及對環境影響的最小化。為提升剩餘資材的高值化利用及技術應用效能，本次參訪聚焦日本在林業循環經濟中的成功經驗，深入學習其於剩餘資材利用、綠色能源轉化及社區參與模式等領域的創新實踐。

此次參訪涵蓋九州天瀨發電所、南關發電所及松本系統工程運營的久大林產株式會社林地，全面探索日本在林業剩餘資材循環利用的多元策略。天瀨發電所結合高效燃燒與熱能回收技術，達成能源轉化與副產物資源化的雙重效益，並以智能化管理提升運營效率。同時，發電所透過與社區合作回收剩餘資材，促進區域經濟與環境的雙贏發展；南關發電所則以地電地銷模式體現資源本地循環，並有效解決農林剩餘物處置問題。這些成功案例顯示，結合技術創新與區域合作的綜合模式，是推動林業循環經濟的有效途徑。此外，久大林產株式會社展示了先進的生物質收穫機與選別分類技術，從伐木到資源轉化的全流程實現高效與環境友好。

通過本次參訪，我們期望學習日本在林業資材高值化利用、資源回收及能源轉化方面的經驗，並探討如何將這些成功模式應用於臺灣，以提升本地林業剩餘資材的科技研發與產業效能，逐步實現減廢、能源回收及永續經營的目標，推動林業資源的循環利用與高值化發展。

貳、參訪行程概要

(一) 參訪人員名單

中文姓名	服務單位/職稱	學歷	專業領域
何振隆	林產利用組/研究員 兼組長	博士	生質材料與能源開發、溶劑製漿研究、造紙濕端化學研究、林產物化學利用研究
林振榮	林產利用組/研究員	博士	樹木危險性檢測、建築木質構件的非破壞性檢測及材質評估、樹木非破壞性檢測及材質評估、複合材料之開發應用研究、木質廢棄物之回收再利用研究、木質材料的物理性質檢測
塗三賢	六龜研究中心/副研究員兼主任	博士	工程木材加工技術研究、複合材料之開發應用研究、3D 列印及數位化加工研究、木結構設計及維護研究、木質廢棄物之回收再利用研究
徐中芄	森林經營組/副研究員	博士	景觀評價、景觀偏好、環境心理、日文翻譯
林柏亨	林產利用組/助理研究員	博士	林產物利用研究、生物質轉化利用、綠色製程開發應用
徐光平	林產利用組/聘用助理研究員	碩士	林產物利用研究、生質材料與能源轉化開發、製漿漂白技術研究

(二) 參訪行程概要

為執行本所 113 年行政院國家科學技術發展基金管理會補助計畫「人才培育與研發成果推廣計畫」(計畫編號：NSTC 113-3111-Y-061-001)，於 2024 年 12 月 1 日至 12 月 5 日前往日本福岡、熊本，進行參訪與國際交流。此次參訪將包括南關竹業能源有限公司、大分綠能發電株式會社大分天瀨發電廠及松本系統工程公司等地，旨在瞭解日本以林木林業剩餘資材的高值化利用及多元化能量回收利用，以及生物質收穫優化技術之最新發展。

日期			起迄地點	任務
月	日	星期		
12	1	日	臺灣→日本福岡	於桃園國際機場搭機前往日本福岡國際機場。
12	2	一	日本福岡→熊本	上午為搭乘新幹線（JR）由福岡前往熊本
			熊本→南關竹業能源有限公司	<ol style="list-style-type: none"> 參訪南關竹業能源有限公司，與公司社長森山和浩先生和發電廠廠長牧嶋隆光先生等人會談。 瞭解日本南關地區剩餘資材的利用、木竹材資源的綜合應用及生質能源廠的發展現況等，以提升林產業永續發展能力。
12	3	二	大分綠能發電株式會社 大分天瀨發電廠	<ol style="list-style-type: none"> 參訪大分綠能發電株式會社大分天瀨發電廠，與電廠廠長石田博光先生等人會談並參觀發電廠。 瞭解發電廠如何進行熱能回收技術與高效率燃燒系統，不僅提升了能源轉化效率，還將資材處理過程中的副產物進行資源化利用，實現全方位的零廢棄目標。
12	4	三	松本系統工程公司	<ol style="list-style-type: none"> 與松本系統工程公司的社長松本良三先生也和技術長中島晃也先生進行會談。 瞭解生物質收穫機與選別分類技術在林業中的應用，體現了高效、安全的作業模式，有助於生物質收穫之發展。
12	5	四	福岡國際機場→桃園國際機場	於福岡國際機場搭機返國。

參、參訪單位交流紀錄

一、12月2日前往南關竹業能源有限公司

南關發電所與天瀨發電所分別在木片來源與處理流程方面展現了不同的運作模式。南關發電所主要使用來自剩餘資材的木片，這些木片來源多為住宅改裝產生的廢棄材，並進行發電與發熱操作，提供學校及公所使用。此發電所屬於小規模發電設施，利用剩餘資材轉化為能源，同時還具備熱能生產功能；而天瀨發電所則以原木作為木片來源，專注於發電，不涉及熱能生產。

在木片製作方面，南關與天瀨的流程有一些共同之處，但也存在明顯的區別。以南關為例，木片的製作首先從剩餘資材進入工廠，這些剩餘資材經過稱重後以重量為單位進行交易，從而計算價格。隨後，木材進入粉碎過程，使用2至3種不同的粉碎機進行粉碎。圖1顯示的粉碎機具有100噸的處理能力，並且是日本製造，該機器會持續旋轉並利用重力作用將木材打碎。粉碎後，木片會根據不同的網目大小進行區分，較大的木片則會被送回粉碎機再次處理。接著，透過磁力分離出木片中的鐵製品（如圖2所示），若有未被去除的雜質，則會利用風力選別。

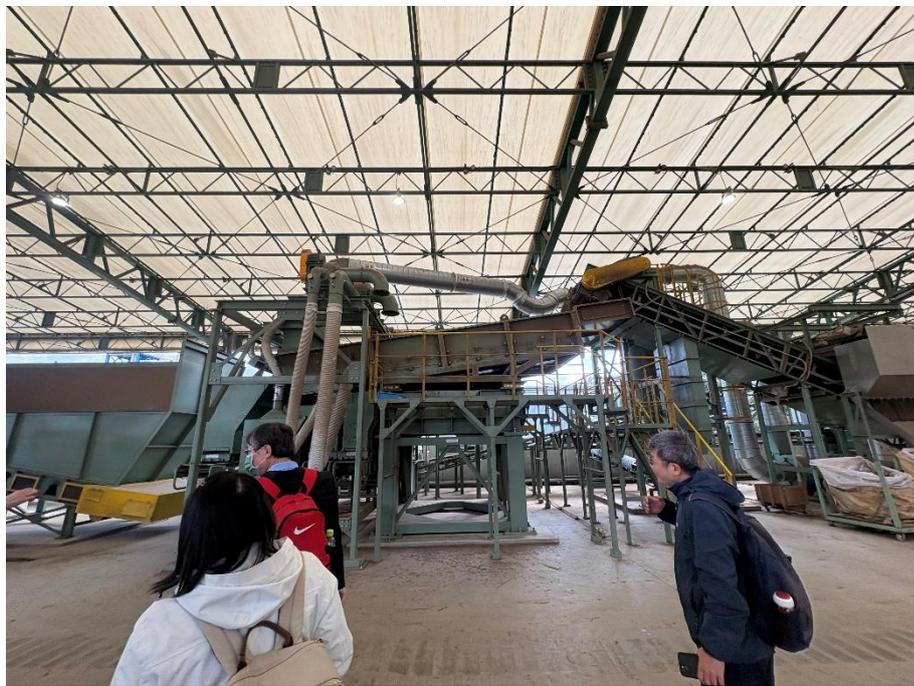


圖 1. 高效能生物質粉碎機及搖晃式篩分通道

此外，南關的木片製作還包含了從外部購買的木片，這些木片會經過相同的磁力選

別，去除雜質後再投入使用。九州地區有五家木片廠及兩家發電廠，木片的年流通量可達 200,000 噸，其中有相當一部分的木片會被出售給附近的其他廠商。南關的年使用木片量為 20,000 噸，而長瀨發電廠則為 70,000 噸。剩餘的木片會賣給其他工廠或子工廠，形成一個良性的木片市場，使資源有效流通。



圖 2. 磁力選別篩分金屬匣道

木片的分類與客製化需求也是其中的一環。根據其他廠商的需求，南關會對木片進行分類，這些木片也可能根據不同廠商的特定要求進行客製化處理。對於鐵類及廢鐵類物品的處理，南關則會委託專業廠商來進行處理。另外，南關的剩餘資材來源不僅限於本地，也能夠從其他地方收取剩餘資材進行處理（圖 3）。這樣的作法不僅有助於節約資源，還能帶來額外的收入。剩餘資材製作成木片後，可以賣給其他廠，進一步創造利潤。而天瀨發電所的木片則完全來自原木，並且由於場地限制，南關會暫時存放來自天瀨的原木，並將其轉化為木片後出售。與南關相比，天瀨的木片價格較高，這是由於其使用的是原木而非剩餘資材。



圖 3. 多元化生物質來源及木質建築循環資材供應

南關與天瀨兩家發電所の木片來源和製作流程各有特色。南關發電所通過使用剩餘資材製作木片，不僅實現了能源的回收與利用，還通過賣木片獲得經濟效益。相對地，天瀨發電所則專注於使用原木進行木片製作，雖然成本較高，但其發電效益也十分可觀。這兩家發電所的經營模式為綠色能源的發展提供了寶貴的經驗。

日本的生質能源市場透過 FIT（Feed-in Tariff，固定價格回購制度）制度來支持可再生能源的發展，這對於木片的來源與價格有著深遠的影響。根據 FIT 制度，木片來自於原木的價格相對較高，這是因為原木の木片能夠享受固定的回購價格。FIT 制度的簽約期限為 20 年，這樣的長期合約保障了固定價格的回購，對於木片的販賣商來說，能夠確保穩定的收入。

相比之下，使用剩餘資材製成的木片價格較低，因為剩餘資材的處理成本較低，且沒有 FIT 制度的保障。因此，南關發電所為了獲得更多的收入，除了販賣電力外，還會增加熱能的銷售量，特別是將熱能賣給木材乾燥廠，這些熱能以熱水或熱油的形式出售，而不是以蒸汽形式供應。

天瀨發電所由於採用了 FIT 制度，能夠以較高的價格賣出電力，並且得到政府補助。這樣的價格保障使得天瀨發電所的經濟效益更加穩定。相比之下，南關發電所未使用 FIT 制度，這使得它需要依賴其他收入來源，例如剩餘資材收取費用。剩餘資材處理的利潤相對較高。

FIT 制度的設立目的是為了鼓勵生質能源的使用以及促進山林資源的循環利用。日本的山林面積佔國土的約 70%，50 年前的大規模造林計劃後，森林未能得到充分的撫育，導致了林木生長不良，特別是在陡坡地區，這使得水土保持效果差，並且容易發生土石流等自然災害。為了解決這些問題，FIT 制度在約 14 年前推出，希望通過這一政策，激勵林農進行有效的森林管理與撫育。至於竹材的利用，雖然過去曾有一段時間南關發電所專注於竹材的處理與利用，但由於品質問題，竹材業務最終停止了。竹材的利用在當地幾乎消失，然而，隨著木材需求的增加，南關發電所仍然考慮將竹材重新納入生質能源的利用範圍。九州地區的竹材產量十分豐富，運輸也非常便利，這使得竹材的利用成為一個可行的選項。竹材燃燒會釋放出 Na 和 K 等物質，這些物質對燃燒過程不利。

FIT 制度對木片價格的影響深遠，它促使木片來自原木的價格上升，並且為生質能源市場提供了穩定的經濟回報。南關與天瀨兩家發電所的運作模式展示了 FIT 制度對發電行業的重要作用，並且在能源製作與木材利用方面，兩者各自根據市場需求進行調整，推動了生質能源的發展。

竹材的燃燒過程是一個精細的過程，為了最大限度地提高能源利用效率並減少有害物質的排放，這一過程涉及多步驟的控制與技術應用。首先，竹材在燃燒之前會與其他物料混合，特別是樹皮，這樣可以有效地降低竹材中所含有害物質的釋放，尤其是竹材中含有的鈉 (Na)、鉀 (K)、矽 (Si) 和氯 (Cl)。隨著技術的進步，工廠還會加入來自當地社區和道路樹木修剪的殘材，這些殘材便宜且易於收集，也不會增加有害物質的產生。

在竹材的燃燒過程中，所產生的熱量會被充分利用。燃燒過程中，有些熱能會被回收並用於其他用途，尤其是加熱溫水。燃燒的灰分不會粘附在鍋爐內壁上，這是由於先進的燃燒技術已經成功解決了這一問題，並且有效地降低了竹材燃燒所帶來的腐蝕問題，採用熱油加熱系統（圖 4），這樣可以保持穩定的溫度，並利用較高粘度的矽油來

驅動渦輪，這比蒸汽系統更為高效。

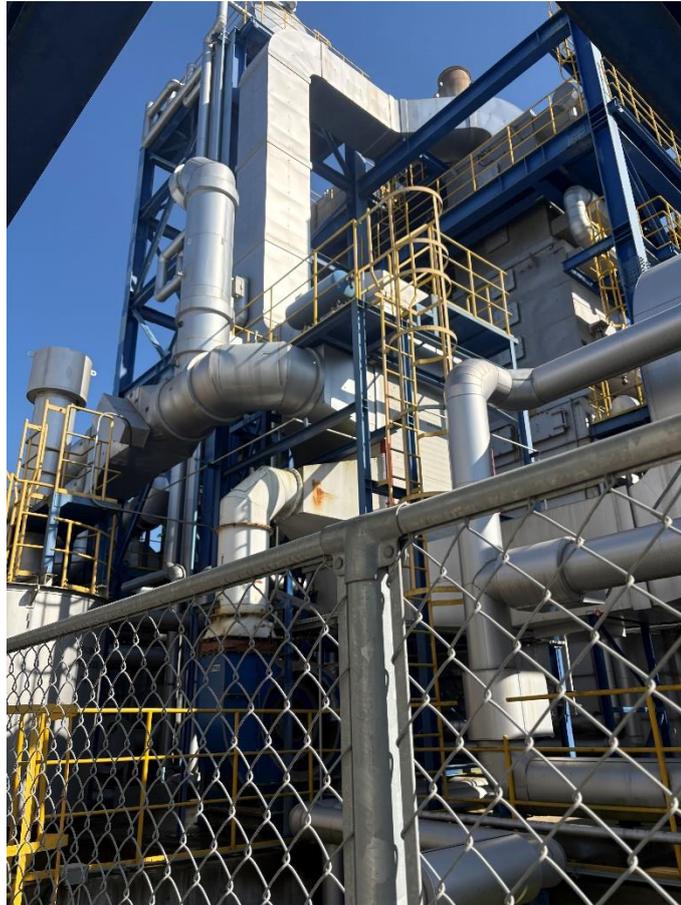


圖 4. 熱油加熱系統運作模式與運輸管道

工廠的鍋爐設備有兩種，分別用於發電和製品生產。燃燒過程中，發電所產生的電力大部分供工廠內部使用。這些設備的運行會依靠冷卻水來協助降溫，同時將多餘的熱量用來加熱溫水，溫度可達 80 度。工廠使用的發電系統為 ORC（有機朗肯循環）系統（圖 5），這一系統的發電功率為 990 瓦，適用於日常工廠運作。為了維持鍋爐的穩定運行並確保後續產品的質量，工廠會額外使用其他鍋爐來提供輔助加熱，這樣有助於平衡熱能的需求。



圖 5. 發電廠負責人講解有機朗肯循環系統

值得一提的是，這個設施的建設總成本為 12 億日圓，其中包含了研究經費。為了促進生質能源的發展，政府補助了三分之二的經費。所有設備均由電腦控制，這不僅減少對人工操作的依賴，還提高了運營的效率。然而，根據法律規定，即使是小型發電廠，也必須有專人進行操作，這一規定有助於確保工廠在運行過程中的安全性。

總結來看，竹材的利用不僅體現了生質能源的可持續發展，還通過先進的燃燒技術和熱能回收系統，提高了能源利用效率並減少了環境污染。未來，隨著竹材利用技術的進一步發展，可能會有更多的應用場景出現，並且灰分等副產品的再利用也有望在未來得到更多的關注和探索。

二、12 月 3 日前往大分綠能發電株式會社大分天瀨發電廠

以地方資源循環為基礎的區域型生質能發電所做為定位的天瀨發電廠（圖 6），綠色發電大分的負責人石田先生簡介了該發電所的背景與運作機制。他指出，該發電所占地約 27,000 平方公尺，發電規模達每小時 5,700 千瓦時 (kWh)，足以滿足約 10,000 戶家庭的電力需求。發電所每年處理 60,000 至 70,000 噸原木，每小時產生約 25 噸蒸汽，鍋爐熱水的溫度可達 453°C，所使用的設備來自日本自己本身技術。



圖 6. 天瀨發電廠發電主要機構及進料前乾燥設施

（一） 發電運作與材料供應

從 2014 年起，該發電所每年平均運行約 8,000 小時，相當於 340 天，遠高於日本其他發電所平均 300 天的運行水準。自設立以來，該發電所的木材運輸量逐年增加，2021 年已達 77,000 噸，供應的電力主要提供給在地之公家單位如市政府、小中學校、職業中心及約 40 個等公共設施，形成地方電力供應鏈，推動「地產地消」的資源使用模式。

（二） 生質能發電的環保與教育價值

為降低木材運輸時的二氧化碳排放，發電所同步進行山林砍伐、植樹與育林等作業。並將發電過程中產生的廢熱供應給鄰近的農業溫室（圖 7），以提高農作物生產效率。隨著部分高齡農戶結束生產活動，發電所正逐步將廢熱供應轉移至新進農業業者。該發電所積極推廣環境教育，協助地方小中學校與大學學生理解電力從生產到使用的全過程，並強調生質能等再生能源取代化石燃料的必要性，強化民眾對環保與能源永續性的意識。



圖 7. 天瀨發電廠廢熱供應給鄰近的農業溫室系統

（三） 經濟效益與環境保護

發電所每年從鄰近地區購買木材，為地方創造約 5 至 6 億日圓的經濟效益。傳統市場上難以銷售的低質木材過去常被廢棄在山林中，不僅造成植林困難，更增加土石流風險。發電所以每噸 7,000 日圓的價格收購各類木材，促進林地清理與環境保護，並穩定了地方木材價格。

（四） 地區災害應對與地方共榮

在颱風、豪雨等天災導致停電時，該發電所成為當地的避難中心，提供冷氣、暖氣、熱水淋浴及通信服務，深受當地居民歡迎。此外，該發電所也積極進行新樹種的研究與培育，以縮短育林時間並提高生產效率，進一步強化資源循環利用與地方經濟循環。綠色發電大分的成功模式，展現了區域型生質能發電不僅在電力生產與資源再利用方面的優勢，也體現了其在地方經濟、環境保護與災害應對等方面的重要價值。

（五） 木質生質能發電：可持續發展的能源選擇

九州北部，作為日本的歷史文化與經濟中心，擁有得天獨厚的森林資源。該地區的

森林覆蓋率高達 70%，並且自古以來就與木材種植和森林護理息息相關。這片區域的森林資源為當地的林業發展、能源利用及環境保護提供了重要基礎。以“綠色發電”為代表的木質生質能發電技術，正逐步成為這些豐富資源的有效利用途徑。

（六） 木質生質能發電的背景與挑戰

隨著進口木材的增加以及木質資源利用的不當，傳統林業經濟正面臨困境。特別是大量的間伐材和臨時伐採材未能得到有效利用，這些被稱為“山林未利用材”的資源，大多被擱置在山林中，成為一個重大障礙。為了推動森林資源的可持續利用並促進地區林業發展，森松集團旗下的綠色發電公司在天瀨建設了一座先進的木質生質能發電廠，致力於將這些未被利用的木材轉化為清潔能源。

（七） 木質生質能發電技術

木質生質能發電的核心技術是木質生物質的燃燒發電系統。這些木質資源會被加工成燃料芯片，並通過高效的外部循環流動層鍋爐進行燃燒。在這一過程中，木材經過乾燥處理至適合的水分含量，然後進行破碎、選別與儲存（圖 8）。最終，這些木質芯片進入鍋爐內與高溫流動砂混合，進行燃燒並產生高溫高壓蒸氣，推動蒸汽渦輪機發電。



圖 8. 天瀨發電廠生物質運送破碎儲存一貫化系統

這一系統的優勢在於其對環境的低影響，排放的二氧化碳量相對較少，且由於使用的木材來自於持續種植的森林，實現了碳排放的“零增長”或“碳中和”。木質生質能的發電不僅有助於改善能源結構，還能推動地方經濟發展和森林可持續經營。

（八） 生物質發電的環保效益

與傳統的化石燃料發電相比，木質生質能發電具有顯著的环境優勢。傳統火力發電利用化石燃料進行燃燒，釋放大量的二氧化碳，進一步加劇氣候變遷問題。而木質生質能發電，通過燃燒木材來產生能量，其排放的二氧化碳是來自於大氣中吸收的，實現了碳的循環再利用。這樣的碳中和特性使其成為一種可持續的能源選擇。此外，木質生質能的利用有助於減少森林未利用材的堆積，並且通過林業的良性循環管理，推動森林資源的持續利用。這不僅能夠減少野火風險，還有助於保持生物多樣性和改善水土保持。

（九） 發電與社會貢獻

2013 年，天瀨發電所正式啟用，成為日本西部首座商業化運營的木質生質能發電廠。這座發電所的建設，得到了地方政府、林業協會及地方社區的全力支持，並成功吸引了各界合作伙伴。發電所的運行，不僅為當地提供了穩定的電力來源，還推動了地方林業的復興。每年，該發電所可生產約 7 萬噸的木質芯片，並通過專業的能源系統將其轉換為高達 5700 千瓦的電力，足以供應約 1 萬戶家庭的電力需求。此外，發電所運行過程中的排放水被利用於當地農業，助力實現低碳、低成本的農業發展。這些協作式的綠色計畫，不僅促進了地方經濟的發展，也改善了當地居民的生活質量。

（十） 未來發展與可能面臨挑戰

儘管木質生質能發電技術在環保和能源供應方面具有巨大的潛力，但仍面臨一些挑戰。首先，木質資源的供應必須保障穩定且高效的物流體系，才能滿足大規模發電的需求。其次，如何進一步提高發電效率，降低成本，是未來技術進步的關鍵。此外，政策層面的支持和激勵措施也對木質生質能發電的普及至關重要。

未來，隨著技術的進步和市場需求的增長，木質生質能發電有望成為更加普及且高效的

可再生能源形式。若能結合更高效的能源管理技術及林業資源的科學規劃，木質生質能將在全球能源轉型和減碳目標實現中扮演重要角色。

（十一）循環流動床技術與木質生質能源利用的討論

在生物質能源領域，特別是木質能源的利用上，循環流動床技術（CFB，Circulating Fluidized Bed）已逐漸成為有效解決低品質燃料燃燒問題的重要方法。這項技術能夠在多種挑戰中有效運行，並為燃燒過程中的優化提供了理論基礎。以下將針對循環流動床的運作原理、砂的使用及其對木質能源燃燒的影響進行詳細探討。

（十二）循環流動床技術的基本原理

循環流動床技術利用流動的熱砂來進行木質生質燃料的燃燒。此過程中，經過加熱的砂與木屑一起進入燃燒爐，並在高溫環境下持續燃燒。這種方式的優點之一是可以處理低品質的燃料，例如含水量較高的木質碎屑（木質芯片），這類燃料通常較難燃燒。砂在此過程中充當了熱載體的角色，通過其高熱容量來幫助燃料更有效地燃燒（圖 9）。

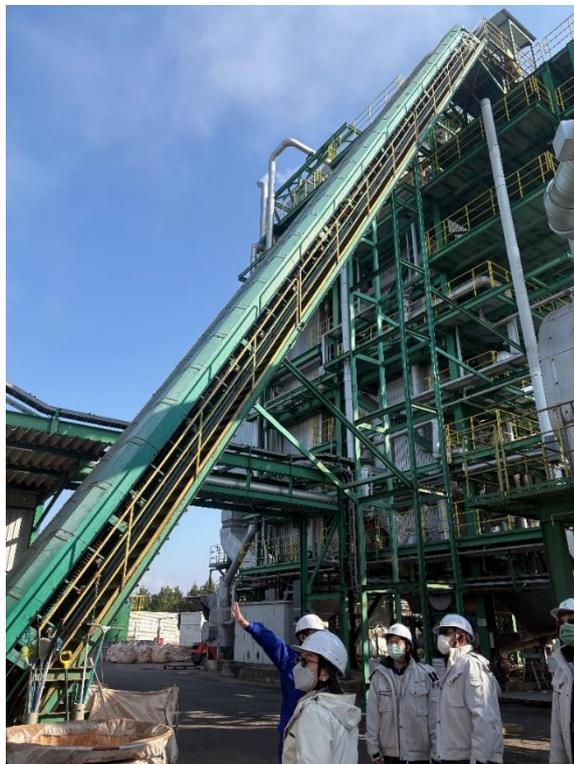


圖 9. 天瀨發電廠循環流動床投料系統

（十三）砂的作用及其回收機制

砂在循環流動床中的兩大主要功能包括：一是作為熱載體，促進低質燃料的燃燒；二是防止木質燃料中的鹼性成分（如鈉和鉀）對設備的腐蝕與結垢。當木質燃料中的鹼性元素與砂接觸時，這些元素會促使砂的硬化，從而影響設備的運行。為了防止這一現象，燃燒系統中會設置循環系統，將砂不斷加熱並回收，並通過鹼性清除過程（即“鹼性沖洗”）來降低這些鹼性物質對設備的損害。

（十四）燃燒溫度及其對生質燃料的影響

根據研究，循環流動床的操作溫度通常設置在 730°C 至 830°C 之間。此溫度範圍有助於提高燃燒效率，特別是當使用經過乾燥處理的木屑作為燃料時。該技術能夠有效地處理各種形態的生質燃料，包括水分含量較高的木質原料，並將其轉化為高效的能源。

（十五）燃燒過程中的副產品：炭與灰的處理

在燃燒過程中，儘管主要產物是熱能，但少量的炭和灰也會產生（圖 10）。炭雖然是燃燒過程中的副產品，但其量通常很少。另一方面，灰和焦油的回收利用則是一個重要的環保措施。產生的灰可以作為農業用途的土壤改良劑，或用於一些特殊的工業應用，如在高爾夫球場作為場地的填料。此外，某些焦油成分也可以進一步加工和利用。



圖 10. 天瀨發電廠循環流動床產生之飛灰與底灰

(十六) 木材燃料的價格與市場

目前，大分縣內有多個燃燒設施在使用木質生質燃料，這些設施使用的木材來源於當地森林。這些木材的價格根據其用途和市場需求有所不同。例如，用於建築材料的木材，價格可達每立方米 1 萬 2 千至 1 萬 3 千日圓；而作為燃料的木材，價格則較為低廉，約為每立方米 7000 日圓。木材價格的變動與其收集的便利性密切相關，尤其是在森林資源豐富的地區，木材的運輸和採集成本相對較低。

(十七) 生物質能源的市場與出口

日本的木材由於生長周期長，通常需要約 40 年的時間才能達到適合利用的成熟階段。這使得日本的木材具有較高的品質，並且在國際市場上有一定競爭力。據報導，大分縣出產的木材中，約 35%至 40%會被出口，主要銷往澳大利亞、中國及美國等國家。隨著市場需求的變化，木材的價格會根據外匯變動有所調整。

循環流動床技術在木質生質燃料的高效利用中發揮了重要作用，不僅能夠解決低品質燃料的燃燒問題，還能有效控制燃燒過程中的有害物質，並將副產品如灰與焦油轉化為有價值的資源。隨著技術的進步和市場需求的變化，這項技術將在未來的生物質能源利用中扮演更為關鍵的角色。此外，木材價格的變動及其出口市場的擴展，也顯示出生物質能源利用在經濟層面上的可持續性。

三、12月4日前往松本系統工程公司

此公司專注於生物收穫之相關機械研發和解決方案，在現場充分展現了生物質收穫機與選別分類技術在林業中的應用，體現了高效、安全的作業模式。林作業過程中，生物質收穫機針對不同地形與木材特性進行精準作業，減少木材損耗的同時確保作業安全。此外，透過選別分類技術，能夠根據木材的種類與用途進行精細分類，確保資源以最高價值方式利用。剩餘的枝條與樹皮等副產品則被轉化為生物質能源，實現全方位的資源回收與利用，避免浪費並降低環境負擔，以下即為介紹具備創新技術的生物質收穫機具。

(一) 無線遙控生質物收穫車

該公司推出的「Shin Raptor II」是一款專為林業作業設計的高性能機械設備(圖 11)，能夠進行樹木伐倒與搬運，適合單株、列狀或集材狀態的樹木處理。該機械具備遠程操作功能，允許操作員即使在遠距環境已擴增實境方法下也能準確控制樹木伐倒施業的方向與操作。其最大傾斜角可達 45 度，並根據不同作業場景靈活調整，以確保安全高效的作業。藉由擺動變式輔助系統的應用，設備能在斜坡上保持穩定，防止車體側傾，進一步提升作業安全性。「Shin Raptor II」每天可自動校正設備狀態，保障作業期間的穩定性能。其具備 60 公分最大伐倒直徑，支援的伐倒角度涵蓋車體後方的左右 ± 30 度與上下 ± 45 度，確保作業過程中的靈活性與高適應性。此外，頭戴式控制器為設備提供更高的操作精準度與安全性。該控制裝置結合視角擴增系統，讓操作員可在螢幕中以 180 度全景觀察現場，實現高精度的視覺反饋與控制。若目標樹木被視覺系統捕捉到，操作員可在安全區域內進行遠距作業，進而保障作業者的安全。該設備的結構設計也展現了卓越的性能與效率。其全長為 2.4 公尺，具備單層及雙層履帶設計以因應不同地形需求。行駛速度達每小時 6 公里，並搭載 55.4 kW 輸出功率的引擎，為作業提供強大動

力支援。此外，機器的切割方式為高度先進的液壓驅動系統，能夠適應複雜的林地環境需求。結合多功能機械臂及輔助系統，該設備在效率、安全性與精準度方面均處於業界前沿。這些技術與性能使得 Shin Raptor II 成為現代林業機械中不可或缺的重要裝備。其創新設計與先進功能不僅提升了林業作業效率，也在作業者的安全性與作業環境的適應性方面帶來了顯著改進。



圖 11. 無線遙控生質物收穫車-Shin Raptor 於定向伐倒控制施業

(二) 多功能生質物收穫機

這款多功能生質物收穫機是生質物管理的先進設備，能夠執行道路網絡建設、抓斗作業以及樹木砍伐等多重任務。其設計結合了多功能性與精密工程技術，刀片與鏟鬥之間的相對位置經過反覆檢查與優化，使刀片能平順地切入樹體，進一步提升了作業效率。最大切割直徑提升至 50 公分，即使在應用中切割面也能保持與電鋸切割效果相同的水準。此外，該設備的安全性設計允許在各種林業作業環境中高效而穩定地進行砍伐與生質物收穫作業。透過高效自動化的操作模式，該機器不僅簡化了繁重的林地作業流程，還能減少人力需求，降低現場操作風險。實際測試表明，該機器的作業效率較傳統

機械提高了 30%，有效縮短了每單位作業時間，為林地經營者帶來了更高的生產效益。由於生質物是生物能源的重要來源，這款機器能高效收集樹木殘材、樹枝及其他生質物質，顯著提升生質能產業鏈的原料供應效率。此外，其對作業高度的精準控制能有效減少切割後的木桿高度，確保收集到更多有用的生質材料。由於該機型能精準控制切割高度，並確保切株高度不超過 15 公分，對林地的環境影響降至最低，這也有助於保護林地土壤與生態系統。專用的「抓斗」附件則進一步提升了每日作業能力，使設備能高效處理 0.5 至 0.7 公頃的木材與生質物。這對於生質能產業來說至關重要，因為穩定且高效的木材供應是實現能源轉換與碳中和目標的關鍵。此外，該設備的自動化設計不僅提升了操作安全性，還能降低勞動力需求，使林業作業更加符合現代化與永續發展的需求。透過此高性能機械的應用，林業經營者不僅能提高資源利用效率，也能為生質燃料與生物材料的開發創造更多價值（圖 12）。



圖 12. 多功能生質物收穫機 Feller Bunchasaurus 工作情形

（三） 混合滾輪衝程處理器收割機

混合滾輪衝程處理器收割機是一種創新型的木材處理與生質物收穫設備，其設計結合了高效能油壓系統、精密的自動化控制以及靈活的作業功能，特別適用於林業中的多樣化木材及生質物處理。這款設備的特點在於其精確的操作系統，能夠高效地處理各種尺寸和形狀的木材，並能夠在不同的環境條件下持續穩定地運行，對生質物的收穫起到了積極的促進作用。首先，混合處理器的核心優勢之一是其配備的高扭矩油壓馬達式進料滾筒，這使得設備能夠順利處理各種形狀的木材，包括彎曲或不規則形狀的枝條，這對於生質物的收穫尤為重要。在處理過程中，當進料滾筒無法應對較大或較難切割的枝條時，系統會自動啟動切割單元進行枝條修剪，確保木材的有效處理。此外，混合處理器搭載了 360 度無限制旋轉的強力旋轉器，配合每分鐘 300L 的高流量旋轉裝置，能夠確保進料滾筒在高扭矩下依然能夠順利進行木材的送材，從而提升了生質物的收穫效率。這一特點使得設備能夠在處理大範圍的木材與生質物時，依然保持高效與穩定的操作性能。混合處理器的四片可動刀片結構也極大地改善了木材的支持與切割能力。這些刀片會根據木材的直徑自動調節開閉，並根據木材的大小來調節夾持力，確保木材在各種作業條件下都能穩定送入進料滾筒，從而提升了整體的處理效率與生質物的收穫量。比例壓力閥控制系統能夠在進料過程中根據木材的變化，自動調整夾持力，實現高效且精確的木材處理，這對於生質物的收穫是至關重要的。另外，混合處理器的鏈鋸裝置採用了創新的潤滑技術，能夠在運行過程中持續為鏈條提供潤滑油，從而延長鏈條和鏈鋸條的使用壽命。鏈條的張力會自動調整，並且在更換鏈條時操作簡便，無需額外工具，這大大提升了設備的維護效率。在生質物收穫方面，混合處理器具有顯著的優勢。其精確的自動化系統和高效能設計能夠將各種樹種和木材類型處理得更加高效，無論是用於生物質能源的生產還是作為其他用途的原材料。通過使用混合處理器，林業工作者能夠高效地收穫木材和生質物，並且在提高生質物利用率的同時，減少了對環境的影響。這款設備能夠在大範圍內進行木材收集，不僅提高了收穫效率，還能夠減少不必要的能源消耗，對生質能源的生產起到了積極推動作用。混合滾輪衝程處理器收割機以其高度自動化的設計、強大的處理能力以及高效能的木材處理系統，為生質物的收穫提供了極大的便利，能夠大幅提升收穫效率並降低運營成本，對生物質能源的開發與利用具有重要意義（圖 13）。



圖 13. 混合滾輪衝程處理器收割機實際操作流程

(四) 電動絞盤機

這款裝置不僅具備多項技術創新，還在生質物收穫的過程中發揮了重要作用，特別是對於提升作業效率、降低勞動強度及提高作業安全性等方面具有顯著的幫助。其高效的牽引系統和先進的控制技術，對於現代生物質能源的收穫和應用起到了不可忽視的推動作用，這款裝置的高扭矩液壓馬達和強大的牽引力系統使其在生物質收穫過程中能夠應對各種複雜的工作環境。生質物的收穫往往涉及大量的木材、樹枝等物料，這些物料的質量和體積往往不穩定，傳統的收穫設備在處理這些物料時常常面臨困難。這款設備的強大牽引力能夠輕鬆拉動重物，並且通過自動同步的主副鼓設計，在處理大批量的生物質時提高了操作的穩定性和效率。其次，這款設備的內鼓結構有效避免了鋼絲繩纏繞問題，這對於提高作業效率至關重要。生物質收穫作業中，纏繞問題會大大延長作業時間並增加維護成本。內鼓結構的設計使得鋼絲繩在使用過程中更為順暢，降低了纏繞風險，確保了設備運行的高效性和穩定性。特別是在大面積生物質收穫或是崎嶇地形中作業時，這一特點顯得尤為重要，能夠大大減少因纏繞導致的停機時間。此外，液壓式離合器和簡便的操作系統使得該設備在使用過程中更加靈活，減少了對操作人員體力的依賴。操作人員可以輕鬆控制離合器的開關，根據需要調節牽引力，無論是進行重物牽引還是進行精細操作，都能夠高效完成，從而大幅提高了作業效率。遙控操作功能是另一大亮點。隨著生物質收穫作業的規模化和機械化，作業範圍通常較大，並且有時需要進行遠程控制。該設備支持無線遙控操作，即使在山區或其他偏遠地區，也能夠輕鬆操作，這使得操作員可以在安全區域內進行控制，減少了高風險環境下的作業時間，進一步提升了作業的安全性。這款裝置不僅提升了生物質收穫的效率，還在節省人力成本、提高作業安全性和減少故障維護方面發揮了重要作用。隨著生物質能量的需求逐步增加，這款設備的應用將對生物質能源的收集和轉化起到關鍵作用，對於推動環保和可持續能源的發展具有重要的意義（圖 14）。



圖 14. 電動絞盤安裝於生物質收穫機增加收穫效率

肆、心得與建議

此次赴日本九州福岡參訪，讓我們對林業剩餘資材的生質能源技術利用及生質物收穫技術有了深刻瞭解。以下為重點摘錄：

一、技術交流與本地化調整：

此次參訪包括九州天瀨發電所、南關發電所及松本系統工程，深入了解日本在農林剩餘資材的高值化利用及能量回收技術上的先進經驗。日本在資材前處理、熱能轉化及地電地銷模式等領域的成功實踐，為臺灣提供了寶貴的學習機會。我們將參考其技術與經驗，針對臺灣的地理環境與產業特性進行本地化調整，特別是在資材收集穩定性及資源高值化應用模式上進行技術適配，最終提升林業循環經濟效益。

二、林業剩餘資材的生質能源：

參訪南關發電所利用當地農林剩餘資材為原料，結合高效燃燒及能源轉化技術，提供穩定綠色電力的同時，有效降低廢棄物對環境的影響。南關發電所以資源本地循環利用為核心，採用地電地銷模式促進區域經濟發展，並藉由完善的資材收集與處理系統，解決了原料供應及剩餘資材處置問題。這些經驗啟發我們思考如何利用臺灣豐富的農林剩餘資材資源，發展綠色能源，並結合社區合作模式，實現高值化與永續利用。

三、生質物收穫技術：

在觀摩了生物質收穫機與選別分類技術的應用。這些機械化設備能根據地形與木材特性進行高效作業，顯著降低木材損耗並提升安全性。透過精細的選別技術，資材可依用途進行分類，最大化利用價值，而剩餘的枝條與樹皮則被轉化為生物質能源，達到全面的資源回收與減廢目標。這次參訪顯示出機械化與分類技術對林業發展的重要性，為臺灣在林業機械化升級與資源循環利用方面提供了具體的操作參考。

四、政策建議與合作推動：

未來建議加強與日本在林業技術及資源利用領域的合作，針對臺灣的實際需求共同開展研究與技術適配。同時，應透過政策支持，推動生物質能源技術商業化發展，並強化產業鏈整合，促進農林剩餘資材的高值應用。此外，建立定期技術交流與示範機制，進一步推進資源循環與綠色經濟的共同發展，實現臺日雙方的永續經營目標。

伍、附錄



附錄圖 1. 南關竹業能源有限公司社長森山和浩先生解說生質能發電概況



附錄圖 2. 與南關竹業能源有限公司社長森山和浩先生等進行訪談，並致贈紀念品



附錄圖 3. 參訪南關竹業能源有限公司多元生質料源-木構件剩餘資材



附錄圖 4. 南關竹業能源有限公司產製之竹製品-竹地板材



附錄圖 5. 參訪參訪大分綠能發電株式會社大分天瀨發電廠解說生質能發電概況



附錄圖 6. 與天瀨發電廠廠長石田博光先生等人進行訪談，並致贈紀念品



附錄圖 7. 參訪參訪大分綠能發電株式會社大分天瀨發電廠發電諸元



附錄圖 8. 大分綠能發電株式會社大分天瀨發電廠針對兒童開發之生質能簡介與實體樣品



附錄圖 9. 松本系統工程公司的社長松本良三先生也進行會談討論



附錄圖 10. 松本系統工程公司的中展示適應各種地形之履帶式生物質運送車



附錄圖 11. 松本系統工程公司的中展示新一代生物質收穫機增加效率之運作模式示範