

結合牡蠣養殖與轉爐石應用於 淨水與二氧化碳封存之構想

張引¹ 劉景毅² 李紅春³ 張西龍⁴

¹ 國立成功大學水工試驗所副研究員

² 國立成功大學水工試驗所組長

³ 國立臺灣大學地質科學系教授

⁴ 中鋼公司助理副總

摘要

臺灣近年來由於部分近岸、河口海域水質遭受污染，衍生綠牡蠣問題，導致牡蠣養殖受到衝擊。然而，根據本研究團隊先前在二仁溪口進行之牡蠣淨化水質與固碳養殖試驗成果顯示，牡蠣的可將河口水域環境中的多項重金屬與二氧化碳濃縮蓄積在肉與殼體，成長後的綠牡蠣，雖不可食用，然其對於水質改善與二氧化碳封存，有其正面助益。此外，在先前實驗室的牡蠣養殖實驗成果亦顯示，若要促進牡蠣成長，需有以下四項養殖環境條件：(1)水中需有足夠的鐵，以提供牡蠣主食，浮游藻類成長之所需；(2)水中需有足夠的鈣，以提供牡蠣殼生長所需；(3)酸性水質會影響牡蠣成長，需添加鹼性物質；(4)牡蠣代謝廢物含大量磷酸鹽，需有效移除。轉爐石為轉爐煉鋼過程中之副產品，其成份含有大量活性氧化鈣與鐵，為優良之磷酸鹽吸附劑，能同時滿足上述四項促進牡蠣成長之條件。據此，本文提出結合牡蠣養殖與轉爐石應用於水質淨化及二氧化碳封存之構想，冀能協助減輕河口水域的有機懸浮物及重金屬污染，提供二氧化碳封存之途徑，也創造轉爐石資源化之價值。

關鍵詞：牡蠣養殖、水質淨化、二氧化碳封存、轉爐石

The Concept of Using Oyster and BOF slag Combination System for Water Purification and Carbon Dioxide Sequestration

Yin Chang^{*} Jiing-Yih Liou Hong-Chun Li Shi-Long Chang

^{*} Associate Research Fellow, Tainan Hydraulics Laboratory, National Cheng Kung University

ABSTRACT

In recent years, as the contamination problem occurred in coastal and estuarine waters, which caused oysters turned green and impacted oyster farming industry in Taiwan. However, according to our previous study on water purification and carbon dioxide sequestration by cultured oysters in the estuarine waters of Er-Ren River, oysters can absorb and accumulate heavy metals and carbon dioxide from environment. The growing up green oysters, although not edible, but it has positive benefits for environment governance. In addition, our previous laboratory experiment results also shown that the following four specific environmental conditions were necessary to accelerate oyster growth: (1) There is sufficient iron in water for the necessary of planktonic algae growth, which is the main food of oyster; (2) The water must have enough calcium for the growth of oyster shell; (3) Acidic water would adversely affect the oyster growth, it was need to be neutralized with alkaline substance; (4) The metabolic wastes of oyster contains large amounts of phosphate, which need to be

removed effectively. BOF slag is by-product of the steelmaking process, which contains active calcium oxide and iron, can be used as phosphate adsorbent. Theoretically, the BOF slag should be able to meet the above four specific environmental conditions for accelerating oyster growth. Accordingly, in this paper, we bring up a concept of using oyster and BOF slag combination system for water purification and carbon dioxide sequestration. Wish to help relieving the contamination problems in estuary waters, providing a method of carbon dioxide sequestration, but also creating the practical value of BOF slag.

Keywords: Oyster; Water purification; Carbon dioxide sequestration; BOF slag

一、前言

本研究團隊先前執行應用牡蠣養殖進行淨水及二氧化碳封存實驗時(Chang et al., 2011; Chang, Li, 2012; 張, 2012; 張、李, 2012), 曾遇到牡蠣代謝之磷酸鹽廢物過高, 影響生長, 需要有效濾除之技術問題。經查閱文獻, 發現轉爐石對磷酸鹽具有很高的吸附能力(Sakadevan, Bavor, 1998; Xue et al., 2009), 故向中鋼子公司索取轉爐石進行測試。測試結果顯示, 轉爐石不但濾除磷酸鹽之效果良好, 其偏鹼之特性(Cha et al., 2006), 還能有效克服牡蠣固碳實驗進行時, 將二氧化碳打入水中, 造成水質酸化, 影響牡蠣成長之問題。除此之外, 轉爐石中豐富之鐵質(Julli, 1999), 能提供牡蠣主食浮游藻類成長之所需(Yasuhito et al., 2009); 還有, 轉爐石中豐富之鈣質(Julli, 1999), 可提供牡蠣殼生長所需, 增強牡蠣固碳之成效。以上初步測試結果引發研究團隊更進一步嘗試應用轉爐石, 強化牡蠣養殖系統, 進行固碳與淨水兩項環境治理用途之構想。本文首先就此構想之可行性背景進行分析, 再提出整個構想之架構, 提供參考; 並希望能夠與海洋工程界之先進交流, 集思廣議, 使此構想能夠更切合實用。

二、可行性背景資料分析

牡蠣為濾食性生物, 以懸浮於水中之微藻及有機碎屑為食(Dame, Patten, 1981; 雷, 1990), 因此, 養殖牡蠣俱有淨化一般生活及養殖畜牧污水之作用(許 et al., 1982; Hung et al., 1989); 另外, 牡蠣對於重金屬污染物也有很強之耐受力, 且在其成長之過程中, 會經由生物幫浦之作用, 將水中重金屬污染物以數十萬倍之濃縮率累積在其體內(韓, 洪, 1988; Han, Hung, 1990; 陳, 1995), 若能妥善加以利用, 具有潛力可發展成為清除水質重金屬污染之利器。此

外, 近年來由於人類大量使用石化能源, 使得造成全球暖化之二氧化碳濃度快速增加, 如何有效封存空氣中之二氧化碳, 已經為刻不容緩之議題。牡蠣天生俱有非常厚實之碳酸鈣外殼, 每生成 100 公克之碳酸鈣, 需要吸收 44 公克之二氧化碳(Bowen, Tang, 1996; 蘇, 2001); 且碳酸鈣為無機礦物, 在天然環境中為一種非常穩定之物質。所以, 養殖牡蠣所產出之牡蠣殼, 也具有天然、穩定及長效封存二氧化碳之附加價值。為了驗證以上養殖牡蠣對環境治理之正面效益, 本研究團隊在國科會經費之支援下, 曾於 2011-2012 年間, 以臺灣綠牡蠣事件之起源地二仁溪河口為研究範圍, 設計二階段之研究, 探討養殖綠牡蠣之整體價值。第一階段首先嘗試在二仁溪污染較嚴重之河口段進行小型試驗性牡蠣養殖, 以初步測試應用養殖牡蠣淨水與減碳之可行性, 並測量牡蠣在污水中之成長速率及重金屬濃縮效果。第二階段在實驗室內執行能夠進行精確環境控制之定量實驗。

兩階段研究結果顯示: 牡蠣確實能夠在污染嚴重之二仁溪河口進行養殖, 且對二仁溪中銅與鋅等兩種重金屬污染物之濃縮吸附淨化效率最佳, 養殖 51 天之牡蠣肉體銅重金屬濃度已達二仁溪水體中銅濃度之 34,082 倍, 鋅重金屬濃度可達 83,500 倍(表 1)。此外, 關於二氧化碳固存方面, 二仁溪養殖牡蠣個體碳酸鈣外殼之成長速率約為每日 0.3 公克(圖 1), 粗估養殖試驗過程中, 每平方公尺面積每日能夠封存 0.78 公斤之二氧化碳, 封存二氧化碳之速率粗估約為植樹法之 140 倍(Chang et al., 2011)。

然而, 不論是動植物, 在行呼吸作用時, 皆會製造二氧化碳, 此部份必需扣除, 才能計算其封存二氧化碳之淨效益。為此, 研究計畫特別設計出一組測量生物封存二氧化碳淨速率之設備(照片 1 及圖 2), 並已取得專利(李、張, 2011)。該設備主體

為一氣密之養殖水缸，在運作時有兩個二氧化碳來源，第一個為牡蠣攝食後行呼吸作用所產生之二氧化碳(主要為碳 12)，第二個為外接氣瓶所灌入穩定同位素二氧化碳(主要為碳 13 或碳 14)。藉由量測養殖系統內飼料、牡蠣肉體、碳酸鈣殼體以及水體的碳同位素比值，即可估測養殖牡蠣礦化生成碳酸鈣時，封存二氧化碳之過程與淨效益。

由於此氣密之牡蠣養殖系統在運作時，需長時間不做任何換水之動作，如何維持良好之水質，為實驗成敗之關鍵。經過測試，若要使牡蠣成長良好，除了如同養殖一般海水生物，需要注意之鹽度與溫度穩定，殘餘食餌及氨氮類代謝廢物濾除之外，水質還需滿足以下四項特殊條件：(1)水中需有足夠的鐵，以提供牡蠣主食，浮游藻類成長之所需；(2)水中需有足夠的鈣，以提供牡蠣殼生長所需；(3)實驗將二氧化碳打入水中，會造成水質酸化影響牡蠣成長，需添加鹼性物質加以中和；(4)牡蠣代謝廢物含大量磷酸鹽，需有效移除。經查閱文獻，發現轉爐石因成份含有大量活性氧化鈣與鐵，能夠提供鐵及鈣，中和酸性，又為優良之磷酸鹽吸附劑，似乎可同時滿足上述四項促進牡蠣成長之特殊條件，值得一試。

轉爐石為煉鋼之副產品，國內規模最大之鋼鐵生產集團『中國鋼鐵公司』每年因煉鋼產出之轉爐石約有 130 萬公噸。由於轉爐石成份中含有大量活性氧化鈣，遇水易起體積膨脹反應，目前尚未開發出有效之資源化途徑。

本研究所使用之轉爐石係由中鋼子公司，中聯資源提供經篩選過之轉爐石五分石產品。並在進行牡蠣養殖實驗時，置於過濾系統中，作為濾材及水質優化劑用途，圖 3 為過濾系統之設計流程圖。經過實際測試，加入轉爐石之過濾系統，確實能夠提供滿足牡蠣生長所需之水質特殊條件。而在作用時效上，加入轉爐石後，約在 1.5 小時內可到達最佳效果，並且穩定持續 4.5 小時，然後轉爐石之效力即開始衰退，約 12 小時後效力完全消失(圖 4)，必需要定時換新才能繼續維持，此為日後在應用上需注意之技術問題。

表 1 二仁溪養殖綠牡蠣肉體重金屬含量

牡蠣年齡	採樣日期	重金屬濃度 (mg/kg)									
		Al	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	As	Co	Cd
中蚵	2010/3/11	705	63	139	383	4	3	4	7	1	1
	2010/3/31	238	70	272	2398	5	6	4	8	0	1
	2010/4/8	301	32	349	3124	2	3	3	7	0	1
成蚵	2010/3/11	165	42	188	587	2	1	4	9	0	2
	2010/3/31	49	38	302	2932	4	3	4	10	0	1
	2010/4/8	43	36	501	4567	6	3	3	8	0	2
二仁溪	2010/3/3	0.306	0.076	0.006	0.135	0.003	0.003	ND	--	ND	ND

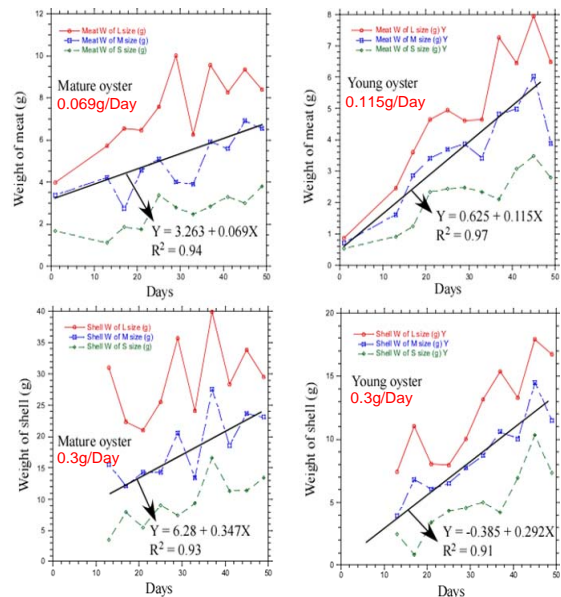


圖 1 二仁溪養殖綠牡蠣之成長速率圖



照片 1 牡蠣封存二氧化碳測量設備實體照片

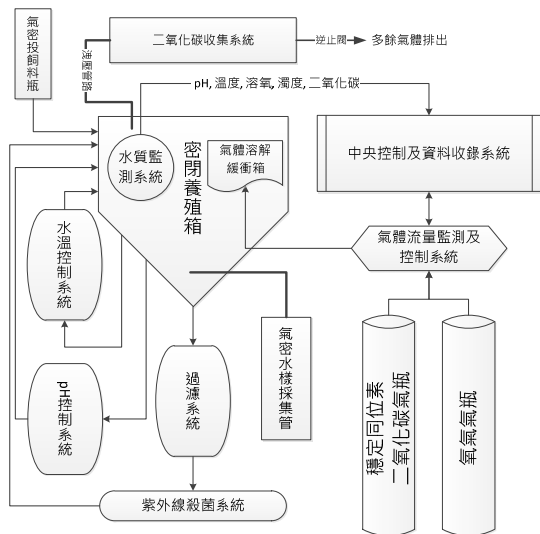


圖 2 牡蠣封存二氧化碳效益之測量設備系統圖

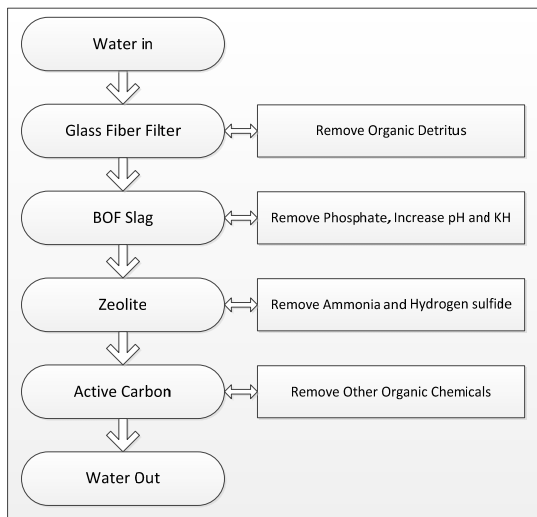


圖 3 牡蠣封存二氧化碳測量設備水質過濾系統圖

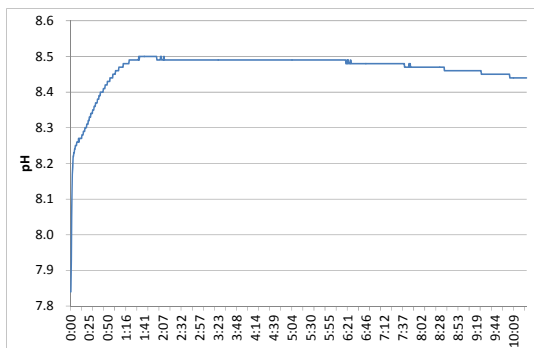


圖 4 轉爐石對提昇牡蠣養殖水質酸鹼度之时效

三、構想架構

應用生物天生之特殊能力進行環境治理，為一種經濟、有效、天然又安全之方式。牡蠣養殖在臺灣已有三百餘年之歷史，養殖技術非常成熟，但是近年來由於水質污染問題，嚴重衝擊牡蠣養殖產業。不過如果換一個角度思考，綠牡蠣事件之發生，說明牡蠣能夠在污染水域生長，並且經由其生物幫浦作用濃縮累積重金屬，對減輕污染應具有正面之幫助。若能以適當之政策輔導漁民，在污染水域養殖綠牡蠣進行水質淨化，並建立管理、收購與回收再利用機制，相對於禁養而言，不但能夠減輕環境污染問題，對於經濟、就業及產業發展皆俱有正面之效益。

本文提出一則構想，以環境治理之觀點，探討應用現有牡蠣養殖技術及設備，結合轉爐石進行水質前處理，強化牡蠣生長，繼續在被污染之水域養殖綠牡蠣以淨化水質及封存二氧化碳，最後設法回收再利用綠牡蠣中 useful 之資源，創造經濟價值，此構想之架構如圖 5 所示。整體而言，此舉不但能治理環境污染，對於促進經濟發展、創造就業機會及延續牡蠣養殖產業皆俱有正面之效益。此構想在執行上可循序漸進，首先在實驗室內進行定性的試驗分析以及可行性評估；若證實可行則可選擇在已受污染河口水域附近之魚塢進行進一步現地試驗；若試驗成果佳，再直接於已受污染的河口水域進行較大規模的現場試驗；最後再根據試驗結果，研擬合宜之運作與管理機制，實現應用轉爐石強化牡蠣養殖系統進行淨水與二氧化碳兩項環境治理之理念。

參考文獻

1. 許東榮、張怡怡、陳美玉、王豐惠 (1982) 「新竹貝類養殖區重金屬及有機物對牡蠣污染之調查」，*中華民國營養學會雜誌*, Vol. 7, 第 1-14 頁。
2. 韓柏樑、洪楚璋 (1988) 「臺灣茄萣海域養殖牡蠣累積重金屬之動力學」，*中華民國環境保護學會會誌*, Vol. 12, 第 92-117 頁。
3. 雷淑芬 (1990) 「彰化蚵寮沿岸產巨牡蠣 (*Crassostrea gigas*) 之食性與成長」，*國立臺灣大學碩士論文*, 第 70 頁。
4. 陳弘成 (1995) 「台灣綠牡蠣之研究」，*台大漁推*, Vol. 5, 第 57-67 頁。

5. 蘇肇偉 (2001) 「養殖漁業廢棄物之有效處理與應用之研究」, *中國文化大學碩士論文*, 第 94 頁。
6. 李紅春、張引 (2011) 「生物封存二氧化碳效益之測量裝置」, *中華民國專利證書*, 新型第 M 416081 號。
7. 張引 (2012) 「應用牡蠣養殖系統進行減碳及淨水兩項環境修復用途之研究」, *水工簡訊*, Vol. 172, 第 8-11 頁。
8. 張引、李紅春 (2012) 「應用牡蠣養殖進行固碳及淨水兩項環境修復用途之研究」, *2012 水利產業研討會暨國科會成果發表會*, 第 B153-B162 頁。
9. Bowen, C. E. and Tang, H. (1996) "Conchiolin-Protein in Aragonite Shells of Mollusks," *Comparative Biochemistry and Physiology*, Vol. 115A, pp. 269-275.
10. Cha, W., Kim, J. and Choi, H. (2006) "Evaluation of steel slag for organic and inorganic removals in soil aquifer treatment," *Water Research*, Vol. 40, pp. 1034-1042.
11. Chang, Y., Li, H.-C. and Yang, R.-Y. (2011) "The preliminary study on the feasibility of water clarification and CO₂ storage by cultured oyster," *Proceedings of the Twenty-first (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp. 849-852.
12. Chang, Y. and Li, H. C. (2012) "The Preliminary Study on the Feasibility of Capture and Storage CO₂ and heavy metals by Cultured Oyster in Contaminated Waters," *2012 Taiwan Symposium on Carbon Dioxide Capture, Storage and Utilization - Road to Cleaner and Safer Prosperity. NTUH International Convention Center, Taipei, Taiwan*, pp. X00-002.
13. Dame, R. F. and Patten, B. C. (1981) "Analysis of Energy Flows in an Intertidal Oyster Reef," *Marine Ecology - Progress Series*, Vol. 5, pp. 115-124.
14. Han, B.-C. and Hung, T.-C. (1990) "Green oysters caused by copper pollution on the Taiwan coast," *Environmental Pollution*, Vol. 65, pp. 347-362.
15. Hung, T.-C., Hanl, B.-C. and Horng, C.-Y. (1989) "A case study of green oysters: dissolved organic matter in the Taiwan coastal water," *Acta Oceanographica Taiwanica*, Vol. 24, pp. 76-95.
16. Julli, M. (1999) "Ecotoxicity and chemistry of leachates from blast furnace and basic oxygen steel slags," *Australasian Journal of Ecotoxicology*, Vol. 5, pp. 123-132.
17. Sakadevan, K. and Bavor, H. J. (1998) "Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems," *Water Research*, Vol. 32, pp. 393-399.
18. Xue, Y., Hou, H. and Zhu, S. (2009) "Characteristics and mechanisms of phosphate adsorption onto basic oxygen furnace slag," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 162, pp. 973-980.
19. Yasuhito, M., Yoshio, S., Satoru, S. and Kumi, O. (2009) "Environment Improvement in the Sea Bottom by Steelmaking Slag," *JFE Technical Report*.

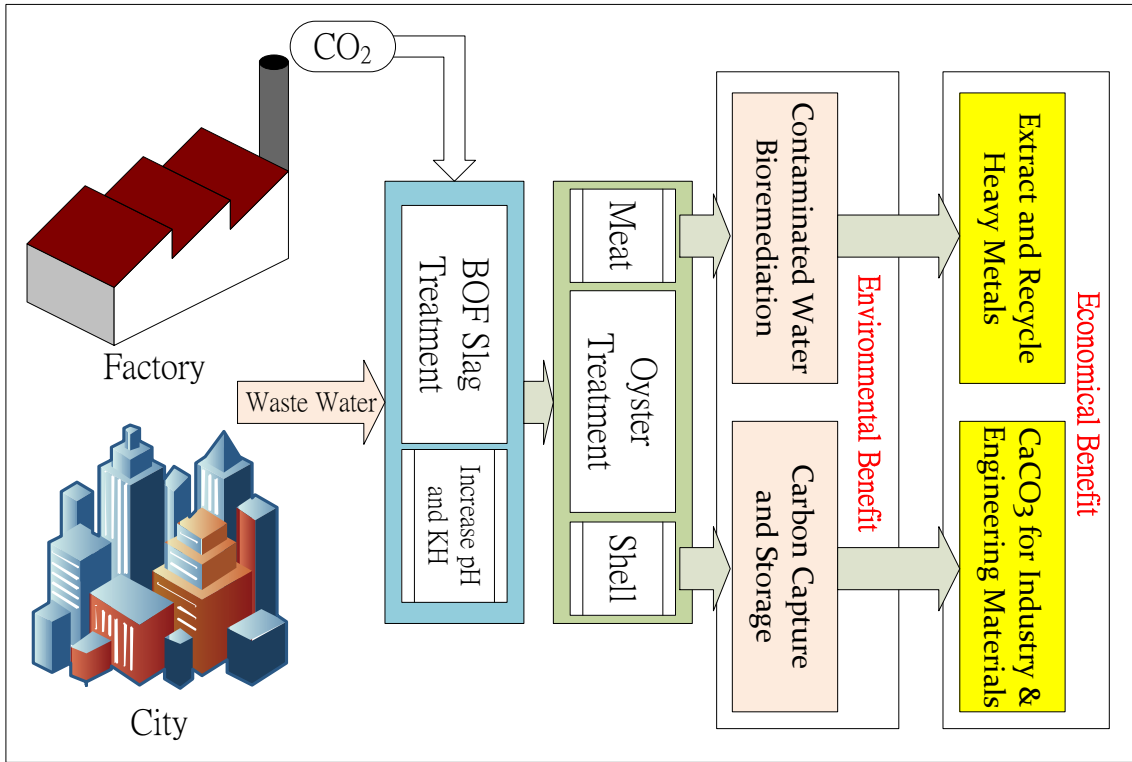


圖 5 結合牡蠣養殖與轉爐石應用於淨水與二氧化碳封存之構想架構圖