



鋼鐵爐石於海事工程

日本應用及國內展望

許伯良 / 中聯資源股份有限公司 經理

葉建偉 / 中聯資源股份有限公司 工程師

日本將鋼鐵爐石應用於海事工程，主要包含港灣工程用人工石材、海洋牧場應用、氧化鈣改質土之海洋修復、填海造陸及地盤改良，且依其需求發展出各式鋼鐵爐石產品，將鋼鐵爐石有效及妥善地進行資源化運用。

台灣與日本同為一海島國家，其港口為國家重要建設及經濟命脈。港區之土地來源除早期少數天然港口之土地為自然地形既有外，其餘港口土地均為圍堤造地而來，造地後土地須進行地盤改良後方能使用，本文蒐集日本鋼鐵爐石於海事工程幾項應用方向，並進一步分享於地盤改良相關實績及研究，可做為台灣未來鋼鐵爐石海事工程應用之借鏡。

前言

隨著全球人口數持續成長與經濟發展需求，資源的耗用與日俱增。有別於傳統的線性經濟發展思維，循環經濟以資源妥善循環利用的角度切入，重新思索各物品的可用價值，以最少自然資源投入、最少廢棄物排放以及最少環境危害發展經濟，故「循環經濟」已成為全球永續發展的熱門議題及潮流。台灣自然資源匱乏，海事工程面臨砂石短缺之問題，在必須大量仰賴國外資源進口的現況下，如何透過思維的轉型創造或保留住更多可用資源，締造新的經濟發展契機，實為必須面對的議題，故政府也在推動產業創新計劃項目中，將循環經濟列為重要的項目。鋼鐵爐石應用於海事工程範疇，在同為島國的日本實績眾多，不僅創造國土，增加土地資源之利用，並可減少外海抽砂量，降低對海域生態之衝擊。在循環經濟的潮流下，做了最佳之示範。

鋼鐵爐石產源及種類

台灣鋼鐵產業產出之爐石大致可分為高爐石、轉

爐石及電爐渣三種，一般常稱呼之製鋼爐石（Steel Slag）係包含轉爐石及電爐渣之統稱。煉鋼製程及產出爐石種類如圖 1。

高爐石為一貫作業煉鋼廠（如中鋼公司、中龍公司）在煉鐵過程產出之副產物，高爐石經急速水冷卻即形成所謂之水淬高爐石，經研磨成粉即為爐石粉，爐石粉與水泥摻配成為高爐水泥，取代一般水泥應用於營建工程。另約 3% 高爐石則以空氣自然冷卻方式產出，此部分氣冷高爐石大都用於道路級配使用。

一貫作業轉爐煉鋼過程中自鐵水吹煉成鋼時亦須加入生石灰及白雲石等石材當助熔劑，以除去鐵水中的雜質，其所形成的即為轉爐石。

電弧爐煉鋼可分為碳鋼（如豐興、東和、海光公司等）與不銹鋼（如唐榮不銹鋼公司等）製程；電弧爐煉鋼係以回收之廢鐵、廢鋼為原料，經電弧爐高溫熔煉後製成鋼材，生產過程所產生之爐石，統稱為電爐渣，電爐渣又可細分為氧化渣與還原渣。電弧爐煉鋼於電爐煉製過程排放的懸浮微粒及氣態污染物，經空氣污染防治設備收集後稱為電爐集塵灰。電弧爐煉鋼製程如圖 2。

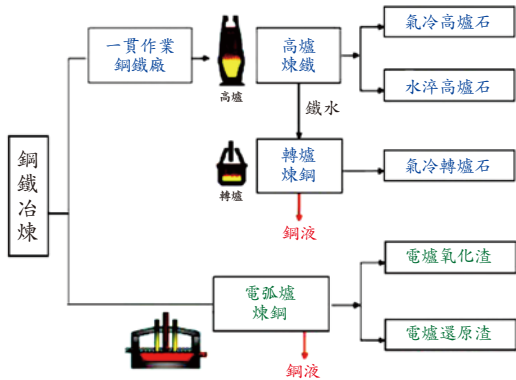


圖 1 煉鋼製程與爐石產出種類^[1]

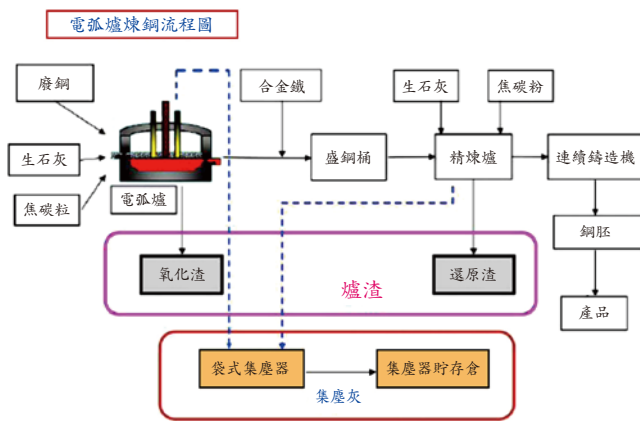


表 1 鋼鐵爐石之化學成份 (單位%)^[1]

鋼鐵爐石產品主要成分

鋼鐵爐石的主要成分為石灰 (CaO) 和二氧化矽 (SiO₂)。其他成分方面，高爐爐石含有三氧化二鋁 (Al₂O₃)、氧化鎂 (MgO) 等，製鋼爐石則含有氧化鐵 (FeO)、氧化鎂 (MgO)。

以上成分存在自然界的地殼或天然岩石、礦物中，化學成分與普通的水泥類似。鋼鐵爐石的形狀與物理特性與一般的碎石和砂礫類似，但可藉由調整冷卻程序，使爐石產生特有的各種不同的性質，詳表 1。

項目	氧化物成分%										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	LOI
氣冷高爐石	33.92	14.88	0.51	40.72	6.27	0.47	1.40	0.51	0.04	0.55	0.33
水淬高爐石	33.46	13.70	0.42	42.69	6.21	0.35	1.48	0.46	0.04	0.39	0.27
轉爐鋼爐渣	11.45	4.48	21.60	39.37	6.39	-	-	0.49	1.97	4.01	3.94
氧化渣 a	19.91	12.05	14.90	36.16	3.32	-	-	0.74	0.90	7.61	0.98
還原渣 a	20.22	10.28	9.79	41.16	10.32	-	-	0.38	0.60	1.78	1.24
氧化渣 b	33.32	4.66	2.47	38.37	17.49	-	-	1.48	0.54	1.21	0.21
還原渣 b	30.34	2.01	2.21	50.49	10.60	-	-	0.15	0.54	0.10	0.56

a: 破鋼電弧爐渣
b: 不鏽鋼電弧爐渣

圖 2 電弧爐煉鋼製程^[2]

鋼鐵爐石於海事工程日本相關應用

日本應用鋼鐵爐石於海事工程技術成熟且材料溶出量均符合日本國內「土壤環境標準」、「海洋污染防治法水底土砂標準」等各種環境標準，故應用類別眾多，於日本鋼鐵協會及新日鐵住金の鐵鋼スラグ製品 NS スラッグズ刊物中提到，主要將鋼鐵爐石應用於港灣工程用人工石材、海洋牧場應用、氧化鈣改質土之海洋修復、填海造陸及地盤改良，以下說明。

1. 港灣工程用人工石材

日本創造出鋼鐵爐石加工產品，稱為方堤石 (Frontier Stone) 或方堤碎岩 (Frontier Rock)，用來作為海洋工程用的非液化填埋材或碎鵝卵石、護背石，甚至是潛堤或緩坡海堤用資材，如圖 3 所示。

方堤石、方堤碎岩為製鋼爐石和高爐水泥和水等混合後固化製得的人工石材。方堤石為直徑 300 mm 以下的小型人工石材；方堤碎岩為直徑 100 mm 到直徑 1,000 mm 大小的人工石材，如圖 4 所示。

3. 海洋牧場應用

日本創造出鋼鐵爐石加工產品「必茂麗 (ビバリー) 混合營養素」，透過混合轉爐石 (鐵) 與人工腐植土 (腐植酸)，使其能以腐植酸鐵的型式提供海藻生長所需要的「鐵離子」給海洋，幫助藻場形成，為海藻專用維他命，如圖 5 所示。

此外，由鋼鐵副產物亦即轉爐石和高爐石粉等製造而成的「塊狀必茂麗」和「必茂麗碎石」是可用作藻類、生物附著生長的基材，相關產品混和使用可建造藻場、漁場，如圖 6、圖 7 所示。



圖 3 作為海岸石材的使用案例^[4]



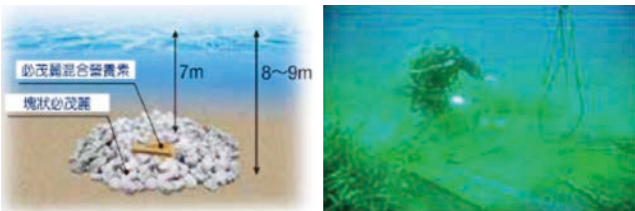
圖 4 左為方堤石 (Frontier Stone)、右為方堤碎岩 (FrontierRock)^[4]



圖 5 必茂麗混合營養素^[4]



圖 6 左為塊狀必茂麗、右為必茂麗碎石^[4]



人造丘內設置必茂麗混合營養素的示意圖(左)與實際圖(右)(2007.11)

7個月後真昆布茂密生長在整片人造丘

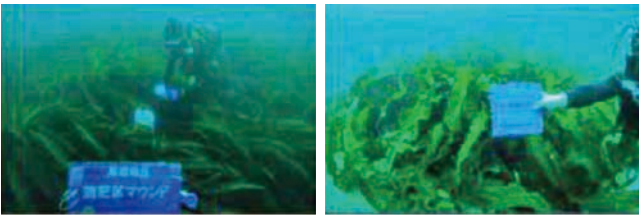


圖 7 塊狀必茂麗和必茂麗混合營養素的組合使用案例(北海道函館市)^[4]

3. 氧化鈣改質土之海洋修復

日本創造出一應用技術，藉由將港灣的疏濬土與氧化鈣改質材（鋼鐵爐石作為原料）混合形成氧化鈣改質土，如圖 8 所示，可提高疏濬土的強度，也可抑制疏濬土中的磷及硫化氫等高營養物質產生。藉由加入改質土，可施行原本只有疏濬土不易施工的人工淺灘和深掘窪地的回填，以進行海域環境的修復，已實際應用於日本濱堺區域，如圖 9 所示。

4. 填海造陸及地盤改良

日本填海造陸實績眾多，將高爐石與轉爐石等鋼爐渣應用於填海造陸作為海上機場建設，主要應用地點包含北九州機場（Kitakyushu Airport）、中部國際機場（Central Japan International Airport）、神戶機場（Kobe Airport）、關西國際機場（Kansai International Airport）、東京國際機場（Tokyo International Airport），

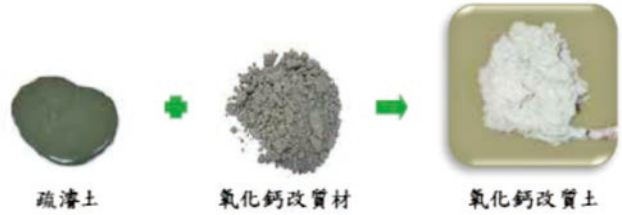


圖 8 氧化鈣改質土^[4]



圖 9 海域施工示意圖與實際海域應用(濱堺 2007 年 10 月)^[4]

Haneda Airport) 等重要國際機場，2000 年～2010 年合計使用量超過 800 萬噸，詳表 2 及圖 10 所示。

此外，日本創造出鋼鐵爐石加工產品「環保蓋亞石 (Eco-Gaia)」作為地盤改良材料，如圖 11 所示。將高爐漸冷爐石或者水淬爐石的質量混合比以 15%～50% 的範圍混入製鋼爐石中製成，具有單軸壓縮強度（齡期 28 日）60 kN/m² 以上的凝固性。與傳統自然砂相比，能有更優異的抗剪強度，增加支撐力或是降低地震時斷裂變形的風險，進而能夠縮減材料費並且減少需地盤改良的面積，達到降低成本效果。

表 2 日本爐石大規模使用案例^[5]

地點	使用量 (噸)	用途 (爐石種類)	使用實例
北九州機場 Kitakyushu Airport	1,500,000	軟弱地盤改良 (水淬爐石製品)	2000 ~ 2002
中部國際機場 Central Japan International Airport	1,900,000	跑道路盤材等 (水淬爐石、 轉爐石等製鋼爐石製品)	2001 ~ 2004
神戶機場 Kobe Airport	1,700,000	跑道路盤材等 (水淬爐石、 轉爐石等製鋼爐石製品)	2003 ~ 2004
關西國際機場 2 期工事 Kansai International Airport	1,100,000	跑道路盤材等 (水淬爐石、 轉爐石等製鋼爐石製品)	2004 ~ 2007
東京國際機場 D 跑道工事 Tokyo International Airport (Haneda Airport)	1,850,000	分區堤、臨時路面材等 (水 合固化體人工石材、水淬爐 石、轉爐石等製鋼爐石製品)	2007 ~ 2010



圖 10 日本填海造陸案例分布圖^[5]

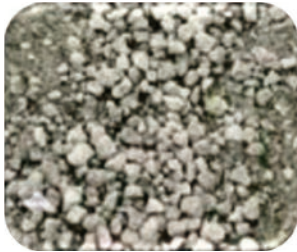


圖 11 環保蓋亞石 (Eco-Gaia)^[4]

日本製鋼爐石應用於 SCP 實績

日本為海島型國家，除了與海爭地之需求外，因日本大地震頻繁（例如 2011 年 3 月 11 日發生的東日本大地震導致東京周圍關東地區海岸線等沿海地區的地面液化），此類型的災難使得日本相對有更迫切的地盤改良需求，又日本天然砂之取得皆仰賴進口居多，需求如此大量的地盤改良填充材料將從何而來？日本鋼鐵爐石協會調查數據顯示，日本將製鋼爐石材料應用於擠壓砂樁（SCP）有許多實績，在 13 處工程應用 SCP 案例中使用製鋼爐石材料總計 148 萬方，詳見表 3，顯見日本發展製鋼爐石材料適用於 SCP 且相關技術已趨成熟。

日本製鋼爐石應用於 SCP 相關研究

製鋼爐石材料適用於 SCP 之幾項特性，除粒度分布良好，為容易壓實的材料外，其顆粒大多富含稜角，具高抗剪角，與天然砂進行比較，詳見表 4。

日本對於製鋼爐石材料應用於 SCP 相關研究成果亦豐，參考日本文獻 Examination of Application of Steel Slag to Sand Compaction Pile Method，文中提到，試驗場

表 3 日本製鋼爐石材料應用於擠壓砂樁（SCP）實績^[4]

SCP 案例	施工場所 / 工事名稱	業主	使用量 (m ³)
1	神戶製鋼所加古川製鐵所 / LDG 儲槽地基改良工事	神戶製鋼所	2,300
2	江戶川區葛西第五工區住宅建設	舊日本住宅公園	101,000
3	新日本製鐵君津製鐵所 / 原料堆積場增強工事	新日本製鐵	7,500
4	川崎製鐵 / 倉庫基礎地基改良	川崎製鐵	21,400
5	新日本製鐵君津製鐵所 / 粗礦堆存場補強工事	新日本製鐵	17,500
6	神戶港六甲海島 / R1 岸壁復舊工事	運輸省第三港灣建設局	1,200
7	名古屋港鍋田埠頭西 5 區地基改良工事	名古屋港管理組合	125,000
8	和歌山下津港本港地區岸壁改良工事	運輸省第三港灣建設局	36,200
9	尾道系崎港貝野地區岸壁工事	廣島縣三原土木事務所	158,000
10	大竹港修築 -5.5 岸壁工事	廣島縣廿日市土木事務所	146,000
11	廣島港出島地區岸壁工事	廣島縣廣島港灣振興局	592,000
12	阿賀掩埋工事	廣島縣吳市	268,000
13	和歌山下津港本港地區岸壁 (-13m) 築造工事	運輸省第三港灣建設局	4,500

表 4 製鋼爐石與天然砂材料特性^[4]

材料特性	天然砂	製鋼爐石
級配	隨地域具變化	粒度分布良好
磨損率 (%)	25 ~ 27	17.6
比重	2.5 ~ 2.7	3.2 ~ 3.5
濕潤單位體積重量 (kN/m ³)	18	22 ~ 25
抗剪角 (°)	30 ~ 35	> 40

址位於 JFE 東日本工廠 Oihama 區，將天然砂與 5 種鋼鐵爐石應用於小規模現地 SCP 工法，共計有六組 (No.1 養生後轉爐石、No.2 天然砂、No.3 氣冷高爐石、No.4 未養生轉爐石、No.5 人造石、No.6 水淬高爐石)，每一組試驗規劃占地面積為 $8 \times 8\text{m}^2$ ，施作樁體 4×4 支 (第 1 組因土地面積不足，有稍作酌減)，觀察其成效，相

關試驗材料及區位配置詳見圖 12，由施作前後標準貫入試驗之 N-Value 顯示，施作後六組土壤強度皆有明顯提升，鋼鐵爐石與天然砂應用於 SCP 工法皆具成效，無明顯差異，詳見圖 13。此外，文獻中亦針對施作前後進行該地區各深度 pH 測定 (0 ~ 12 m)，結果顯示，施作前後該地區各深度 pH 亦無明顯變化，詳見圖 14。

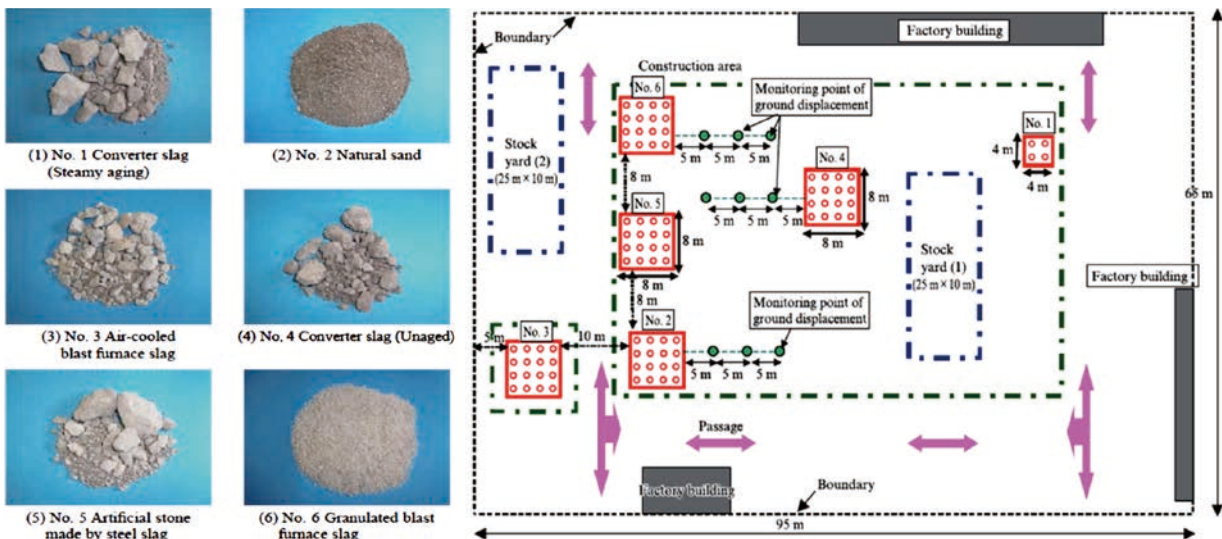


圖 12 日本製鋼爐石材料應用於 SCP 材料及區位配置圖 [6]

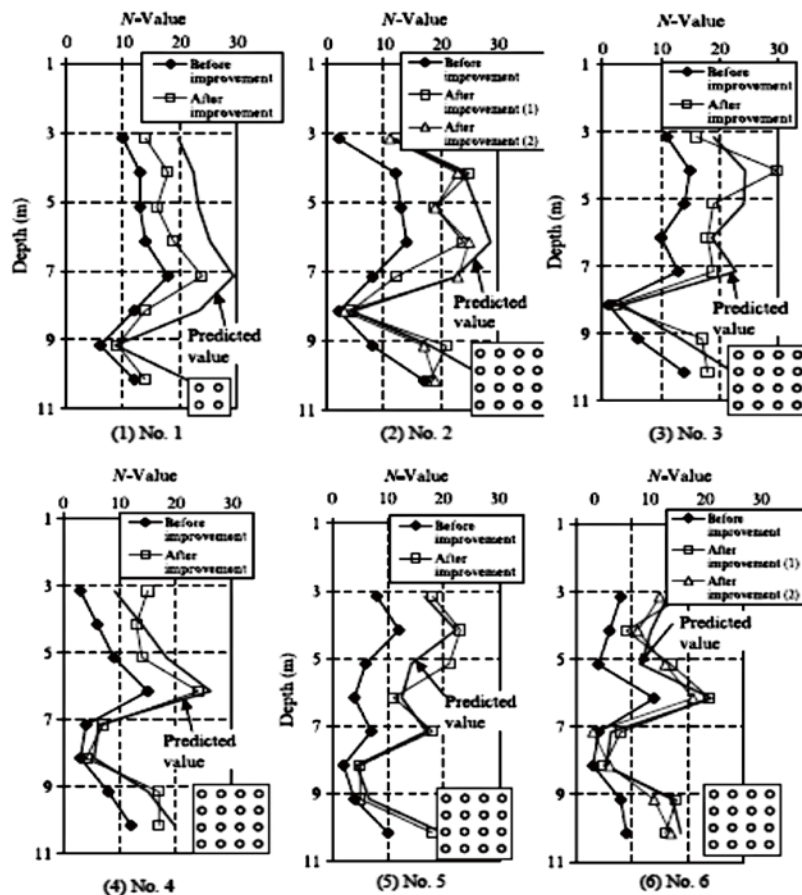


圖 13 施工前後 N-Value (六組材料應用於 SCP 試驗) [6]

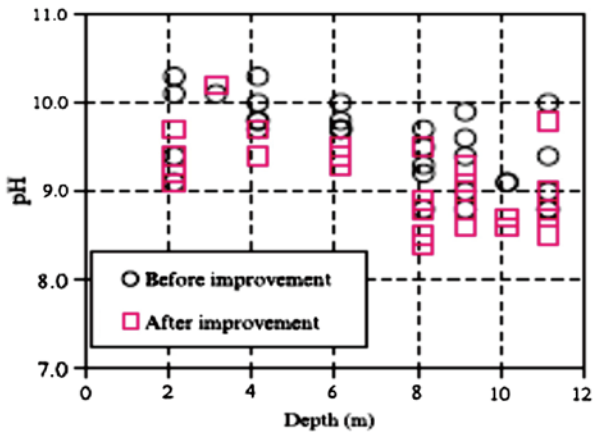


圖 14 施工前後 pH 測值 (六組材料應用於 SCP 試驗)^[6]

鋼鐵爐石於海事工程國內展望

台灣與日本同為一海島國家，其港口為國家重要建設及經濟命脈，目前已具備國際商港 7 座，工業專用港 2 座，如圖 15 所示。港區之土地來源除早期少數天然港口之土地為自然地形既有外，其餘港口土地均為圍堤造地而來，因此幾乎台灣的港口均有圍堤而成之土地。大片造地且廣為人知的港口如臺中港、臺北港、麥寮港、高雄港等。為因應國家經濟發展等因素，目前圍堤造地的範圍已超過 10 m 水深，顯見無論是造地抑或料源需求，皆可謂需求迫切。而藉由此法所形成之土地，稱為軟弱人工地盤 (如港灣回填區或濱海抽砂造陸區等)，通常具鬆軟、高孔隙比、高含水量、低強度、易於壓縮與變形、受地震影響顯著等特性，需要進一步進行地盤改良工程，以利後續國土之利用。

國內鋼鐵爐石於海事工程應用，可參考同為海島型國家日本之經驗及方向，於地盤改良之範疇進行研究及試驗，做為台灣未來鋼鐵爐石海事工程應用實務之借鏡，故文中分享日本鋼鐵爐石於海事工程相關應用類別，以及製鋼爐石 (steel slag) 應用於擠壓砂樁 (sand compaction pile, 以下簡稱 SCP) 實績及研究成果，供讀者參考。

結論

鋼鐵工業為國家重要產業，鋼鐵爐石為煉鋼鐵過程必然產生之副產物，尤其缺乏天然資源之台灣，面

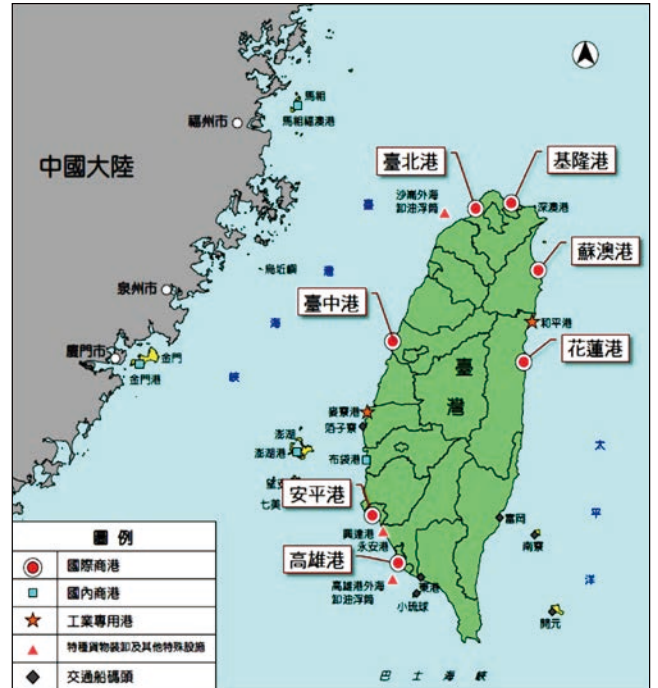


圖 15 台灣各重要港區圖^[7]

對國內海事工程大量砂石之需求 (如填海造陸及地盤改良)，採用爐石資源取代天然資源之開採，才是真正達到保護國土環境之手段，文中分享日本將鋼鐵爐石應用於海事工程相關資訊，供國內讀者參考，期台灣未來能使可用資源適「材」適所，除可實踐循環經濟，亦可為國家及產業創造雙贏。

參考文獻

1. 陳信榮，「轉爐石對環境相容性之探討」。轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面研討會 (2011)。
2. 徐登科，「爐石與應用」。台灣省土木技師公會技師報 (2014)。
3. 王韡蓓，「爐渣作為混凝土粒料的問題及策略」。技師期刊 62 期 (2013)。
4. 新日鐵株式會社，「新日鐵住金の鐵鋼スラグ製品 NS スラッガーズ」產品一覽。
5. Nippon Slag Association，「環境資材鐵鋼スラグ」。
6. ONDA Kunihiko, HONDA Hideki, YOSHITAKE Hideki, Examination of Application of Steel Slag to Sand Compaction Pile Method, JFE TECHNICAL REPORT No. 19 (Mar. 2014)。
7. 國家發展委員會臺灣國際商港及國內商港位置示意圖，「https://www.ndc.gov.tw/News_Content.aspx?n=114AAE178CD95D4C&sms=DF717169EA26F1A3&s=2238B771F0CF3DF9」，網頁資訊 (2016)。 