

114 年度氣候變遷 創意實作競賽

決賽作品說明書

隊伍編號 + 名稱：	016 <u>點渣成金</u>
作品中文名稱：	<u>鋁渣高值化、產品化的方法與應用</u>
作品英文名稱：	<u>Methods and applications of high value and productization of aluminum dross</u>

參賽學校：國立中興大學

指導老師：林啟明

團隊成員：羅紹峰、沈峻名、陳鈺澤

摘要

本團隊成功建立了一套完整的鋁渣的產品化技術，此技術能完全去化鋁渣的危害，達到不影響電爐煉鋼製程與高效率去化鋁渣的冶煉目標。並將鋁渣轉化為 100%可再利用的氧化渣、還原渣，對整體產業環境具有相當不錯的價值。

Abstract

Our team has successfully developed an efficient technology for removing aluminum slag waste. This technology completely eliminates the hazards associated with aluminum slag without disrupting the EAF steelmaking process. It achieves high-efficiency aluminum slag removal. Furthermore, converting aluminum slag into 100% reusable oxide slag、rifining slag. Adds significant benefit to the environment as a whole.

一、現況調查

1. 現有鋁渣之處理方法

台灣目前每年將製造出約 9 萬公噸的鋁渣廢棄物，且尚無低成本、高效率去化鋁渣技術，導致鋁渣非法掩埋與堆置之亂象流竄全台，且鋁渣儲存量持續增加中。自 2011 年監察院進行調查並核定環保署規劃怠失，迄今 2010 年鋁渣廢棄物處理，仍是產業潛在問題，而相關新聞屢見不鮮。國內目前仍缺乏多元暢化的鋁渣去化管道，且在近幾年中，國家監察院調查報告提到國內整體掩埋容量不足，間接造成鋁渣掩埋處理排擠效應與處理費用日趨高漲(35 元/公斤)等問題，造成許多廠商私下進行**非法掩埋或非法堆積鋁渣**，逃避鋁渣後續處理的花費，因此近 10 年鋁渣出現許多負面新聞，如圖 1-1 所示^[1-3]，許多業者因掩埋與堆置這些鋁渣廢棄物，散發出惡臭，引起附近居民抗議。綜合以上調查，鋁渣處理面對一大挑戰，需積極尋找快速且成本低廉解決鋁渣回收處理問題，故應從速籌謀永續發展策略，廣拓鋁渣去化多元途徑，暢化處理管道。



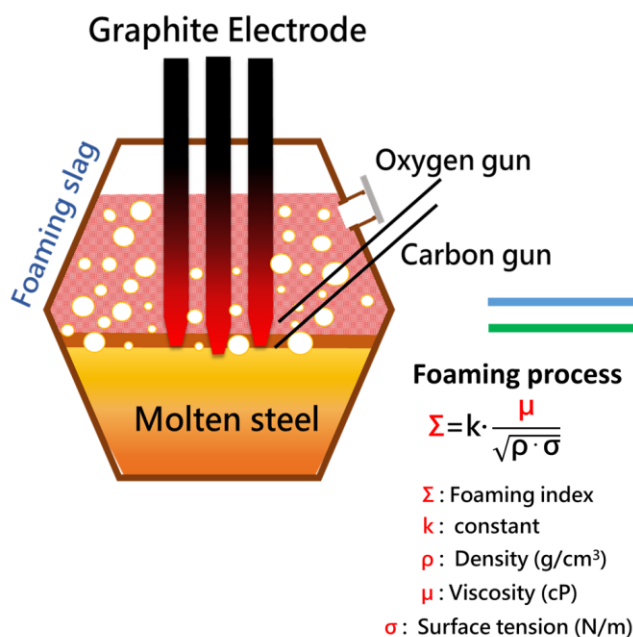
圖 1-1、近 10 年鋁渣負面新聞

在 Lin 與 Lu 的研究^[4]中已指出透過火法處理可以將 AlN 轉變為 N₂ 和 Al₂O₃，N₂ 為空氣中的主要成分，Al₂O₃ 則是構成電爐煉鋼副產物的成分之一，而在電爐煉鋼的高溫下(出鋼溫度可達 1600℃)，AlN 可完全反應為 Al₂O₃，所以可把鋁渣視為高純度的 Al₂O₃ 原料。因此，本團隊期望將鋁渣投入煉鋼環境下將其轉變為高應用價值的 Al₂O₃ 產品，即可達成鋁渣去化與循環再利用之目的。

2. 煉鋼製程簡介

在煉鋼產業中，可分為傳統的高爐煉鋼與較為省電的電爐煉鋼，近期因應碳中和議題，聯合國氣候峰會中通過的巴黎協定內容，需在 2030 年達碳排減少 50% 與 2050 年達零碳排之目標，而目前**電爐製程將是未來 2050 年達到淨零碳排首選之低碳煉鋼技術之一**，因此未來煉鋼趨勢會漸漸的傾向利用電爐煉鋼。電爐煉鋼可以簡略地分為兩個時期，分別為熔化期、氧化期，在熔化期顧名思義就是將廢鋼熔化，待廢鋼完全熔化後隨即進入氧化期的製程，而因為磷會以 Fe₂P 析出物之形式存在於鋼中，此 Fe₂P 析出物會降低鋼的韌性與延展性，**所以脫磷製程極其重要**，在氧化期期間會配合吹氧製程將鋼液中的雜質(如 P、S 等)氧化，並加入 CaO 當作脫磷劑，若 CaO 含量低則脫磷效果差，而後進行發泡製程，產生發泡渣，進而形成一層厚渣來保護電極與保溫達到節能的效果，其電爐煉鋼之重要條件如圖 6 所示。

Foaming property



Dephosphorization

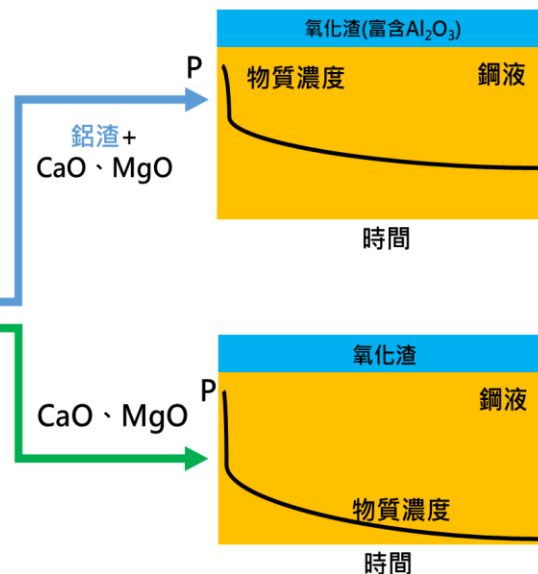


圖 1-2、電爐煉鋼之必備兩條件

而在電爐製程後緊接著是精煉製程，其目的是利用投入CaO純淨鋼液中的雜質S，而CaO的熔點高達2200℃，因此煉鋼廠還會額外再投入CaF₂作為助熔劑，藉此快速液化CaO，以達到高效脫硫的目標。

3. 本案之產品目標

首先，本案之產品目標一為**電爐煉鋼用的高鋁節能發泡劑**，透過前研究之成果可以得知鋁渣是具有作為電爐造渣劑的潛力，因而本團隊進一步將鋁渣與金屬鋁混合製成**電爐煉鋼用的高鋁節能發泡劑**，期望透過金屬鋁與FeO反應(鋁熱反應，ΔH=-850 kJ/mol)，藉由本案創造之良好發泡渣性能保留其熱量並傳遞給鋼液，使鋼液升溫，最終達到減少電爐的電力消耗與噴碳量之效益。

首先，本案之產品目標二為**精煉製程用的低熔點鋁酸鈣助熔劑**，以取代精煉常用的CaF₂，雖然CaF₂可以使脫硫劑兼具高CaO的脫硫能力與低熔點的脫硫效率，但它卻存在著無法避免的缺點。首先，在高溫熔煉下，氟化鈣會產生有毒的氟化物如HF、SiF₄等等，這些氟化物都是有毒的氣體，會對人體的健康造成嚴重的傷害，此外，若人畜吃了累積有氟化物的農產品，也會造成間接的傷害，會引起氟慢性中毒的現象^[5]。

有鑑於此，本研究期望可開發出可取代CaF₂助熔劑之前瞻產品。最具潛力的鑄溶劑為Al₂O₃，且目前已有許多研究證實^[6-8]，在脫硫劑中適當添加Al₂O₃不僅可以降低黏度亦可以提升脫硫能力，而鋁渣有望做為高純度之Al₂O₃原料。

氧化物之光學鹼度(Optical Basicity, Λ)特性可以作為選擇助熔劑種類的指標。在1976年時Duffy等人^[6]將光學鹼度的觀念導入冶金工程學並應用於評估爐渣性質，其常用造渣劑之化合物的光學鹼度特性如表1-1所示。再結合式1-3的脫硫劑之硫分配比(Ls)與光學鹼度成正比的趨勢結果得知，具備優越脫硫能力的脫硫劑亦將擁有較高的光學鹼度特性。由表1-1的化合物之光學鹼度特性證實，能媲美CaF₂之首選助熔劑為Al₂O₃，且目前已有許多研究證實，**脫硫劑中適當添加Al₂O₃不僅可以降低黏度亦可以提升脫硫能力**。

表 1-1 常用造渣劑之化合物的光學鹼度

Oxide	Λ	Oxide & compound	Λ
K ₂ O	1.40	MgO	0.78
Na ₂ O	1.15	CaF ₂	0.67
BaO	1.15	Al ₂ O ₃	0.61
ZnO	1.03	SiO ₂	0.48
Li ₂ O	1.00	B ₂ O ₃	0.42
CaO	1.00	P ₂ O ₅	0.40

$$\text{Log Ls} = \text{Log f}_s - \text{Log a}_{[\text{O}]} + 42.84\Lambda - 23.28\Lambda^2 - 12645/T - 0.02223(\text{wt\%SiO}_2) - 0.02275(\text{wt\%Al}_2\text{O}_3) - 12.538 \dots \dots \dots (\text{式 1-3})$$

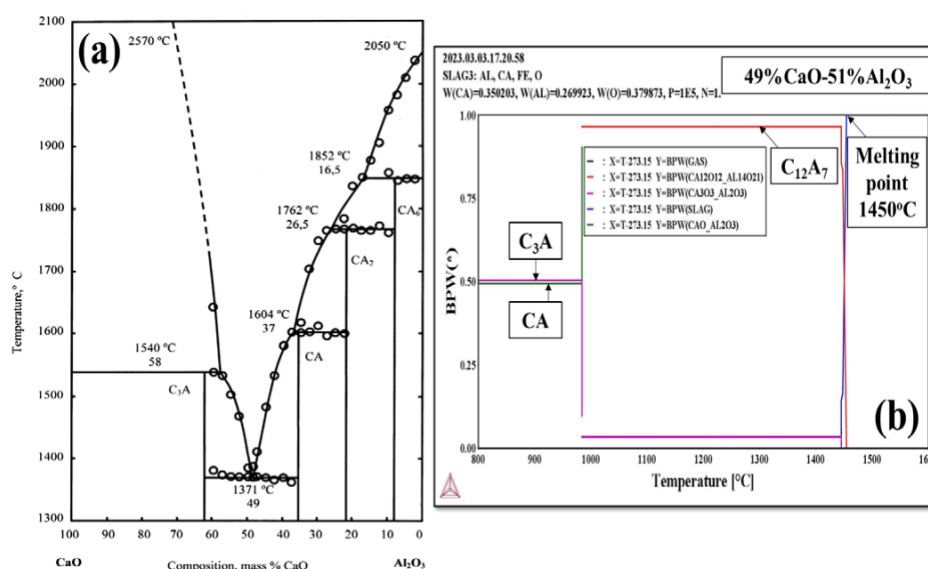


圖 1-2 (a) CaO-Al₂O₃ 二元相圖^[6]；(b) 49 % CaO-51 % Al₂O₃ 之溫度與相分率關係圖

為了開發低熔點鋁酸鈣助熔劑，可以透過CaO-Al₂O₃二元相圖來設計配方，根據圖1-2(a)的CaO-Al₂O₃二元相圖^[6]顯示鋁酸鈣相種類繁多，包含Ca₃Al₂O₆ (C₃A)、CaAl₂O₄ (CA)、CaAl₄O₇ (CA₂)、CaAl₁₂O₁₉ (CA₆)相等，並再進一步針對49 % CaO-51 % Al₂O₃組成物，利用ThermoCalc

軟體進行溫度與相分率的關係模擬，如圖 1-2(b)所示，結果證實 C_3A+CA 會在 $1000^{\circ}C$ 以上化合為 $Ca_{12}Al_{14}O_{33}$ ($C_{12}A_7$)相，並於 $1450^{\circ}C$ 達到完全液化狀態，顯示若要開發出低熔點鋁酸鈣助熔劑，則組成相必須優先控制為 $C_{12}A_7$ 相(熔點： $1450^{\circ}C$)，其次為 C_3A 相(熔點： $1540^{\circ}C$)。

最終，本團隊期望透過火法處理將 AlN 轉為無害的 N_2 和 Al_2O_3 ，並將其再製成兩種產品，**其一為電爐煉鋼用的高鋁節能發泡劑**，期望可以利用鋁熱反應來降低電爐煉鋼的電能消耗，**其二為精煉製程用的低熔點鋁酸鈣助熔劑**，本案的兩項產品不僅可以幫助煉鋼業解決取代 CaF_2 助熔劑之問題，亦可以幫助煉鋁業解決鋁渣去化之問題，來大幅降低對環境所造成的危害，獲得共贏的局面。

二、產品之預期成果效益

1. 高鋁節能發泡劑之成果效益

本團隊的前期研究已經指出鋁渣是具備作為電爐良好發泡劑的潛力，因此本團隊進一步將鋁渣與金屬鋁以 7:3 的比例混合製成高鋁節能發泡劑，期望透過金屬鋁與 FeO 反應(鋁熱反應， $\Delta H=-850$ kJ/mol)，藉由本案創造之良好發泡渣性能保留其熱量並傳遞給鋼液，使鋼液升溫，最終達到減少電爐的電力消耗與噴碳量之效益，其製程之理論效益如表 2-1 所示，本案預期利用 650 公斤的鋁渣複合劑(含 195kg 的金屬鋁)能夠鋼液溫度提升約 $57^{\circ}C$ 、節省 96 kWh/ton steel 的電力消耗並且降低至少 86 kg 的噴碳量。

表 2-1、添加鋁渣複合劑之理論效益

添加劑總重 (kg)	650
額外添加劑種類	30%金屬鋁 + 70%鋁渣
金屬鋁總量 (kg)	195
理論可提升之鋼液溫度 ($^{\circ}C$)	57
理論節能效益 (kWh/ton steel)	96
理論可還原 Fe 之總量 (kg)	403
理論可減少之噴碳量 (kg)	86

本團隊將上述之高鋁節能發泡劑投入至東和鋼鐵之 100 噸級電爐，其試驗結果之氧化渣成分則如表 2-2 所示，其中對照組為未投入鋁渣，其 Al_2O_3 含量為 5.4~8.4 wt%，而實驗組為投入 0.65 ton 之鋁渣複合劑，其 Al_2O_3 含量則為 13 wt%，符合原先設計，且鋁渣去化量可達 8.0 kg/ton steel。

表 2-2、添加鋁渣複合劑試驗後之終渣成分分析

	C/S	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	FeO	MnO
對照組-1	2.1	28.7	13.9	5.4	5.9	36.8	
對照組-2	2.3	30.9	13.3	8.4	6.6	35.6	5.7
對照組-3	1.9	22.8	12.1	6.9	5.0	51.4	4.9
實驗組-4	2.3	29.2	12.9	13.0	5.6	39.3	

添加高鋁節能發泡劑試驗之結果如表 2-3 所示，首先，添加高鋁節能發泡劑之製程，其最終鋼液中的 P 含量低於 0.045 wt%，符合低階鋼鐵產品之要求，而利用鋁渣複合劑與 FeO 鋁熱反應產生之熱量，可使電力消耗降低 86 kWh/ton steel，節能效益可達 22.4%，且因本團隊創造之優異發泡性質之氧化渣，可在較低的噴碳量下，依然維持著較佳的發泡能力，因此噴碳量可從原製程的 11 kg /ton steel 降低至 7.35kg /ton steel，噴碳量減少了 31.8%，將電力消耗與噴碳量轉換為碳排放，預計可減少 49.3 kg CO_2 /ton steel，本製程電力消耗與噴碳量之碳

排放約莫為原製程之 71.5%，雖然使用金屬鋁會些微增加原料成本，但其所創造之減碳、節能效益，使得最終的製程成本可減少 **428 元/ton steel**。

表 2-3、添加高鋁節能發泡劑之試驗結果

	額外添加劑,ton	製程		送電數據			
		噴碳量,kg	吹氧量,Nm ³	鋼液溫度,℃	送電量,kWh	出鋼重量,ton	平均電力,kWh/ton
對照組-1	無添加	1297	3980	1561	44500	116	384
對照組-2		1171	3866	1556	46000	121	380
對照組-3		1492	-	1565	48100	123	391
平均	0	1320	3923	1561	46200	120	385
實驗組-4	0.65	875	3960	1562	35600	119	299

總結上述研究成果，本團隊統整了各個冶煉模式之技術特徵，如圖 2-1 所示，僅添加鋁渣之技術特徵為節能效益不顯著，卻能夠達到大量去化鋁渣(16.5 kg/ton steel)之目標，而添加鋁渣複合劑之節能效益顯著(-22.4%)、減碳效益明顯(-31.8%)，也能夠達到大量去化鋁渣(8 kg/ton steel)之目標。

圖 2-2、圖 2-3 分別為本案之創新鋁渣去化技術的效益評估與成本評估，現今鋁渣的處理方式為**掩埋與濕式處理(成本約 36 元/kg)**，其中掩埋因需要購置土地、濕式處理則是進行低效率純化製程，使得處理成本較高，且兩者皆無法完全去化 AlN，而本團隊所提出的鋁渣去化法**可以完全去化鋁渣**，且可從現今 **36 元/kg 的降至約 10 元/kg**，處理費僅為原製程之 28%，此處理成本也比原來之掩埋(濕式處理)之成本低上許多，**減少了約 36 元/kg**。本團隊所提出之創新鋁渣去化方法相比於原處理方法，**降低 72%的鋁渣處理費用**，此為煉鋁業者執行本團隊方案之一大誘因。

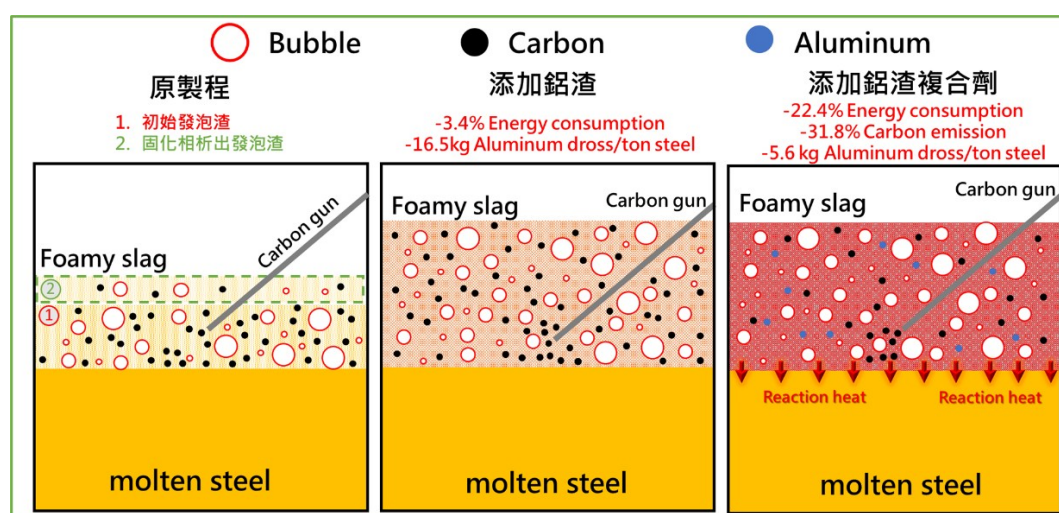


圖 2-1、本案之創新鋁渣去化技術之技術特徵

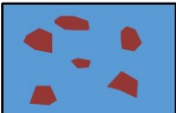
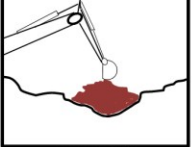
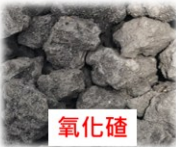
方法	處理廠商	成本	最終副產物	優劣勢
 濕式化學處理	—	~36000元/ton 	 氧化鋁	價格高昂 處理時間長 去化效益差
 掩埋處理	—	~36000元/ton 	 鋁渣	土地購置成本高 土壤汙染 無法有效去化鋁渣之危害
 高值化再利用	 煉鋼業者	~0元/ton 	 氧化矽	低成本 高效率去化 減碳排

圖 2-2、本案之創新鋁渣去化技術效益評估

再者，對於煉鋼業者而言，雖然每噸鋼多出的 5.6~16.5kg 氧化矽生成，約莫會增加 7.6~15.7 元/ton steel 的氧化矽處理成本，而以添加鋁渣複合劑為例，**此技術可節省 22.4% 煉鋼的電能消耗降、減少 38.5% 的噴碳量**，其最終的製程成本**可減少 428 元/ton steel**，其**效益是遠優於所增加的氧化矽處理成本**，因此相信電爐廠是會樂於採用此技術。

最後，將每噸鋼多產出的 5.6~16.5kg 氧化矽製成再生粒料並製成 CLSM 作為道路鋪面材料使用，其與天然粒料的成本、碳排相比較，因再生粒料之原料為電爐煉鋼製程中之氧化矽副產品，因此其**成本為 0 元/kg**，而目前**市面上常用之天然粒料**，其需於自然環境下進行開採，且需經過後續的加工處理，成本較再生粒料貴許多，其**成本為 650 元/m³**，且計算製成 CLSM 的碳排放量，再生粒料的碳排放為 117.5 kgCO₂/m³、天然粒料的碳排放為 157 kgCO₂/m³，再生粒料相比於天然粒料少了約 39.5 kgCO₂/m³，且為天然粒料碳排放的 3/4，**因此使用氧化矽再生粒料當作道路鋪面材料能減少了 25% 的碳排放**，為未來製程要達到淨零碳排目標的較好的選擇。

本案產品一之物質流如圖 2-4 所示，本技術最終可以達到將鋁渣廢棄物高值化、商品化的目標，對煉鋁業者、環保業者、煉鋼業者、回收業者都有相當之益處，相信此技術若推廣成功，鋁渣將不再是一難處理之廢棄物，會轉而變為一搶手的商品。

目前全台電爐的鋼鐵年產量為 700 萬噸左右，且鋼鐵年產量逐漸提升，若全台的電爐廠在製程中採用本團隊提出之鋁渣去化法，**鋁渣每年去化量可達 3.9~11.6 萬噸**，最大去化量是高於鋁渣目前的每年貯存量 8.6 萬噸，因此**有機會完全解決鋁渣去化的問題**，且一共能為煉鋁業者**節省約 9.6 億元的鋁渣處理費**。

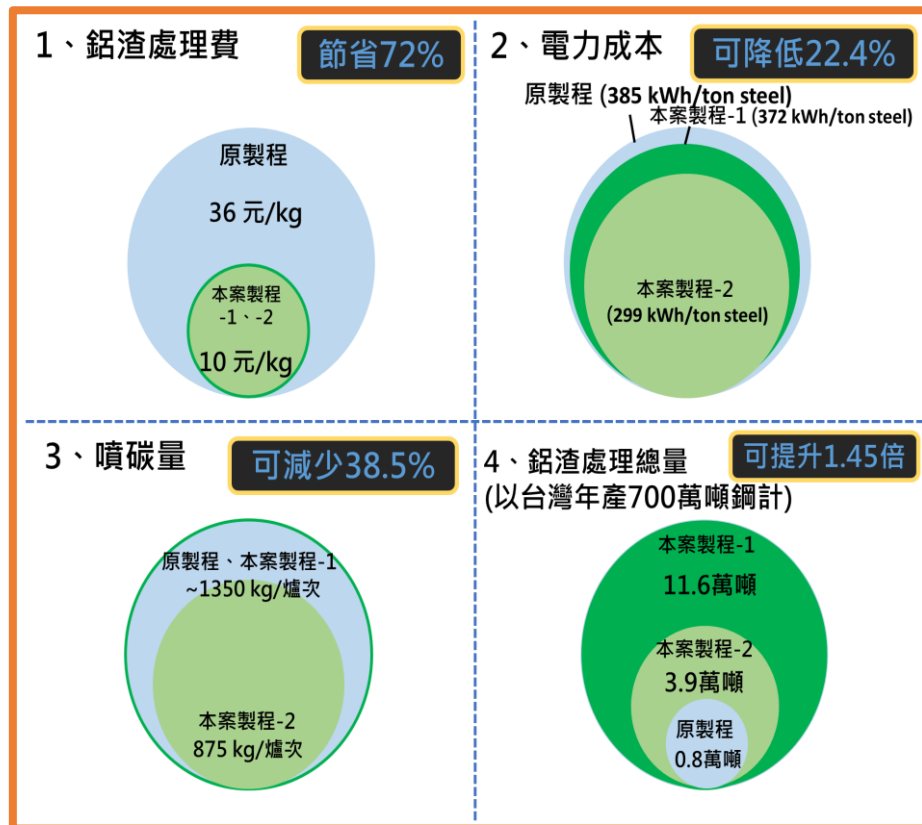


圖 2-3、本案之創新鋁渣技術之成本評估

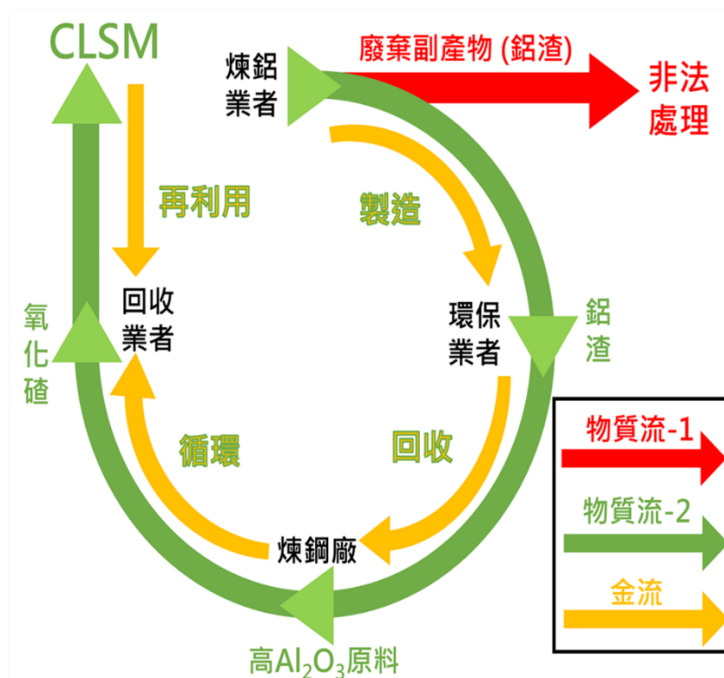


圖 2-4、本案之創新鋁渣技術之物質流

再者，本團隊提出之鋁渣去化法還能夠幫助電爐廠減少 22.4%的電能消耗、31.8%的噴碳量，既提升了其爐渣的性能也降低了煉鋼時的碳排放。而其產出的氧化碓相比於鋁渣，減少了 AIN

對環境的傷害，且增加了附加價值與產品的應用性。

最後，每年多生產出 3.9~11.6 萬噸的氧化矽還能取代天然粒料作為 CLSM 之原料，可以節省約 6000 萬元的粒料成本、並減少約 3770 噸 CO₂ 排放，因此，將鋁渣投入電爐內，將其轉換為氧化矽可以達到循環經濟、降低碳排、增加產品附加價值與減少鋁渣處理成本等目的。

圖 2-5 為本案技術之 SWOT 分析，本案之最大優勢為可以達到高效率、低成本、減碳排之趣化鋁渣之成效，因應淨零碳排與廢棄物再利用之強烈需求，本案創新鋁渣去化技術將會是一前瞻且極具潛力之技術。

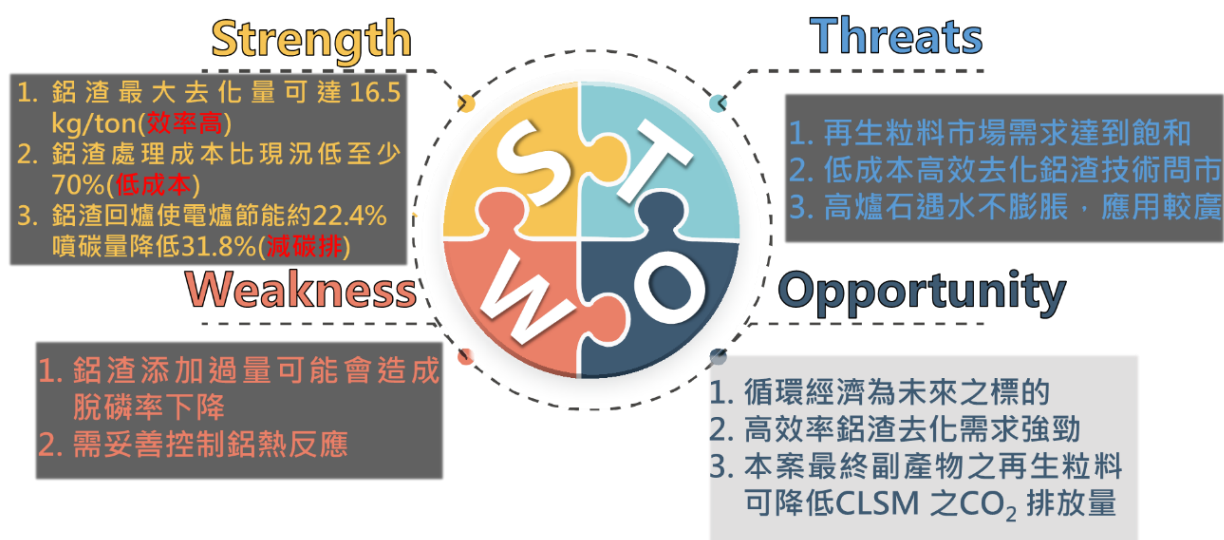


圖 2-5、本團隊產品一之 SWOT 分析

2. 低熔點鋁酸鈣助熔劑之製程與成果效益

2-1. 鋁渣火法移除 AlN 之成份分析

利用 WDS-XRF 進行第 1~5 組鋁渣經 1000°C 持溫 1 小時火法處理後之化學成份分析，其結果如表 2-4 所示，由表中顯示鋁渣經由火法處理後，其 Al₂O₃ 含量從 75.4 wt. % 提升至約 82 wt. %，最具危害的 AlN 含量則從 4.3 wt. % 下降至約 0.7 wt. %，而本實驗室也驗證過只要 **AlN 含量能低於 1 wt. % 就不會產生氣臭味，代表對環境無害**，證實鋁渣廢棄物是可以再利用並轉為高純度的 Al₂O₃ 原料。

表 2-4 鋁渣經 1000°C 持溫 1 小時火法處理後之化學成份

Sample No.	Chemical composition (wt. %)							
	Al ₂ O ₃	AlN	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO	C	其它
1	81.3	0.7	3.5	8.4	1.1	0.9	0.1	4.0
2	81.9	0.7	3.6	7.9	1.1	0.9	0.1	3.8
3	81.9	0.7	3.5	8	1.1	0.9	0.1	3.8
4	81.3	0.7	3.4	8.4	1.1	0.9	0.1	4.1
5	82.3	0.7	3.5	7.7	1.1	0.9	0.1	3.7

2-2 低熔點鋁酸鈣助熔劑之相組成鑑定分析

本團隊將利用較低能耗的燒結法製備低熔點鋁酸鈣助熔劑，並利用 XRD 進行燒結鋁酸鈣助熔劑之相組成鑑定分析，其結晶相繞射結果以疊圖的方式統整如圖 2-6~圖 2-8 所示。首先圖 2-6(a)及(b)主要是固定燒結溫度為 1150°C 下空冷探討不同燒結時間之影響，可以發現其中含有 C₁₂A₇、CA、CaO、CA₂、Al₂O₃ 及 MgAl₂O₄ (MA) 相，且隨著持溫時間的增加 C₁₂A₇ 相的

峰值強度隨之遞增，CaO 相的峰值強度則隨之遞減，另外，亦可發現當調降 CaO/Al₂O₃ 比例後並不影響 CaO 相的產生，而為了釐清 CaO 相的產生是否會影響燒結鋁酸鈣助熔劑，因此將空冷處理後的燒結鋁酸鈣助熔劑在大氣下放置約 30 天，最後發現在 **1150°C 的燒結條件下**，因其有 CaO 相的產生會導致鋁酸鈣粉碎而**無商業化應用價值**，如圖 2-9 所示。

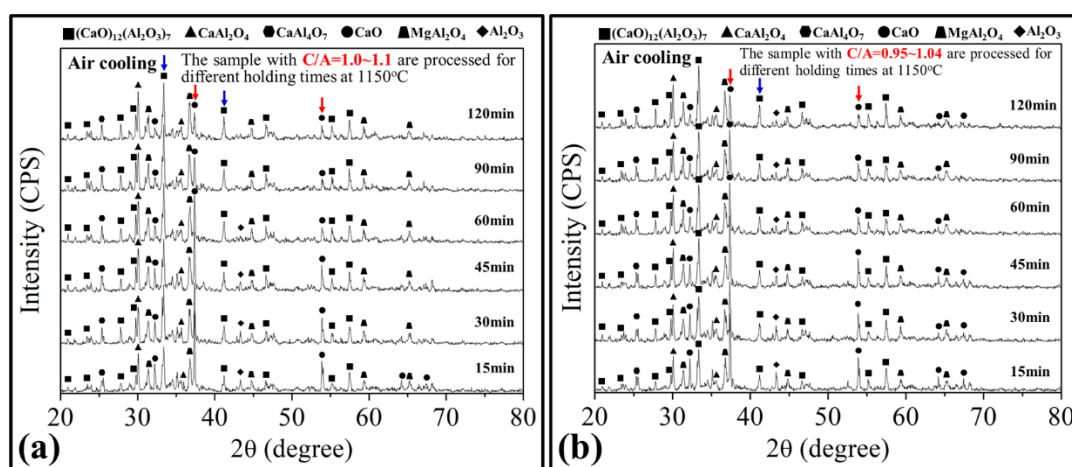


圖 2-6、燒結鋁酸鈣助熔劑以固定燒結溫度(1150°C)經不同持溫時間之結晶相繞射結果疊圖：

(a) CaO/Al₂O₃=1.00 ~ 1.10；(b) CaO/Al₂O₃=0.95 ~ 1.04

圖 2-7(a)及(b)主要是固定燒結時間為 15min，探討不同燒結溫度之影響，可以發現其中含有 C₁₂A₇、CA、CaO、CaO₂、Al₂O₃、MA 及 Ca₂₀Al₂₆Mg₃Si₃O₆₈ 相，且看到在固定燒結時間 15 min 的條件下，當溫度在 1000~1250°C 時，組成相中呈現 C₁₂A₇ 及 CaO 共存，且調降鋁酸鈣中 CaO/Al₂O₃ 比例後並不影響 CaO 相的產生，但溫度增加至 1300°C 以上則有大量的 C₁₂A₇ 相產生，最後找出最佳燒結參數為 **1300°C 持溫 15 min** 可以獲得大量的 C₁₂A₇ 相，且在大氣下**靜置約 30 天仍保持原始狀態，不產生粉碎**，如圖 2-9 所示。

而圖 2-8 為固定燒結時間為 120min，探討不同燒結溫度之影響，當溫度在 1000~1150°C 時，組成相中呈現 C₁₂A₇ 及 CaO 共存，且調降鋁酸鈣中 CaO/Al₂O₃ 比例後並不影響 CaO 相的產生，但溫度增加至 1200°C 以上則有大量的 C₁₂A₇ 相產生，最後找出最佳燒結參數為 **1250°C 持溫 120 min** 可以獲得大量的 C₁₂A₇ 相，且在大氣下**靜置約 30 天仍保持原始狀態，不產生粉碎**，如圖 2-9 所示。

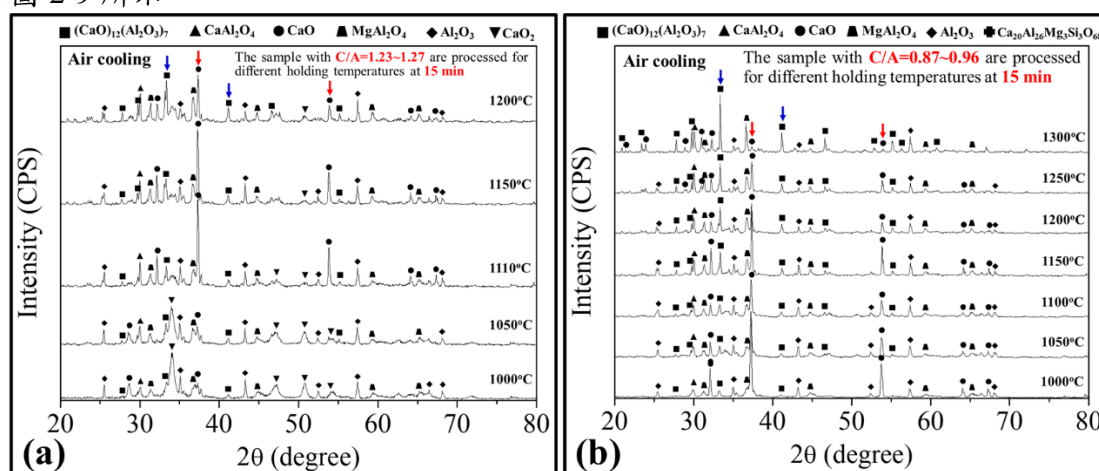


圖 2-7、燒結鋁酸鈣助熔劑經不同燒結溫度下持溫 15 分鐘之結晶相繞射結果疊圖：

(a) CaO/Al₂O₃=1.23 ~ 1.27；(b) CaO/Al₂O₃=0.87 ~ 0.96

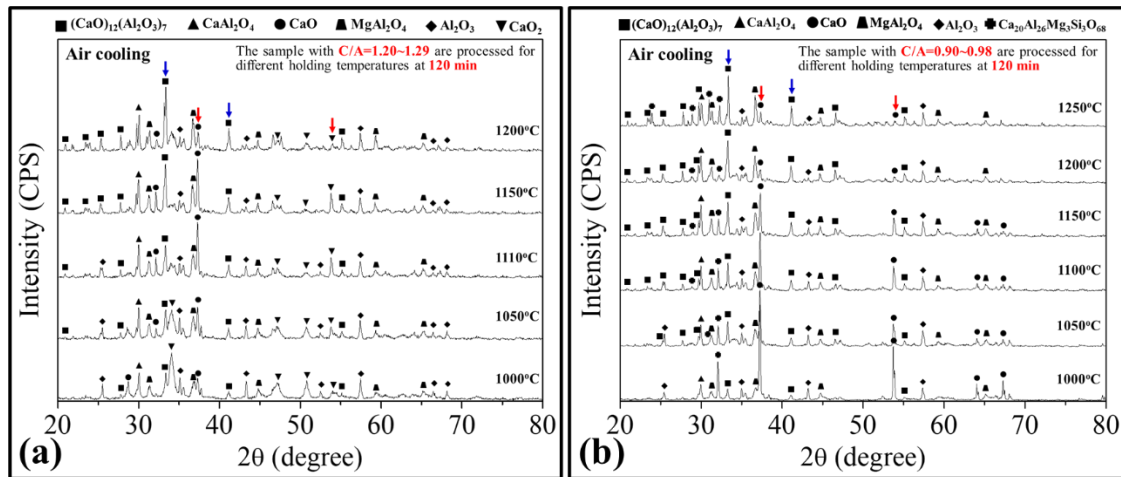


圖 2-8、燒結鋁酸鈣助熔劑經不同燒結溫度下持溫 120 分鐘後空冷之結晶相繞射結果疊圖：
(a) $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3=1.20 \sim 1.29$ ；(b) $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3=0.90 \sim 0.98$



圖 2-9、燒結鋁酸鈣助熔劑經 30 日大氣環境下靜置之結果

本團隊將上述之低熔點燒結鋁酸鈣助熔劑投入至東和鋼鐵之 100 噸級精煉爐，其試驗過程之副料投入量、脫硫結果如表 2-5 所示，而其最終之精煉渣成分則如表 2-6 所示，其中對照組為投入 100~250 kg CaF_2 ，其 CaF_2 平均含量為 6.6 wt%，而實驗組為投入 350~500 kg 之低熔點鋁酸鈣助熔劑，其 Al_2O_3 平均含量則為 16 wt%，且並未有 CaF_2 存在，符合原先設計，且以本鋁酸鈣產品完全取代 CaF_2 ，雖然會些微降低爐渣的脫硫能力，但依然可以在一般精煉製程的時間內(15 min)達到目標鋼種之硫含量要求(≤ 100 ppm)，而副料總投入量則可減少 249kg 副料/爐次的投入，除了能夠達到去除氟化物危害的要求，還可以達到降低精煉成本的效益。

表 2-5 精煉製程之副料投入、脫硫結果

	副料				鋼液成分 (ppm)		脫硫率
	CaO	MgO	CaF ₂	鋁酸鈣	初始S含量	最終S含量	
對照組-1	1250	150	250	-	279	85	69.5
對照組-2	1250	150	250	-	233	79	66.1
對照組-3	1150	160	100	-	240	55	77.1
平均	1217	153	200	-	251	73	70.9
實驗組-1	850	150	-	350	290	88	69.7
實驗組-2	650	160	-	500	247	89	64
實驗組-3	650	160	-	500	235	82	65.1
實驗組-4	650	160	-	500	193	66	65.8
平均	700	158	-	463	241	81	66.2

表 2-6 最終精煉製程之精煉渣成分

	Chemical composition (wt%)				
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaF ₂
對照組	53.2	18.1	11.7	8.3	6.6
實驗組	54.0	19.0	16.0	9.0	0.0

最終，本團隊統整了不同處理方法成本與優劣勢，如圖 2-10 所示，可以發現本案燒的成本僅為 10000 元/ton，其成本遠低於原有處理方法的 36000 元/ton，再者，原有的處理方法價格昂貴、處理與去化鋁渣的效益差，本案所提出的鋁酸鈣助熔劑除了是一低成本、可以達到廢棄物產品化以及降低精煉時 CaF₂ 之危害，也可以**節省 72% 鋁渣處理費、減少煉鋼精煉製程 15.8% 的副料投入**以及最高可**提升 1.69 倍的鋁渣處理能力**，因此本案的鋁酸鈣助熔劑確實是具備了取代 CaF₂ 與作為循環再生產品的潛力，其效益如圖 2-11 所示。

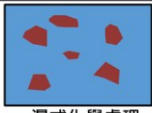
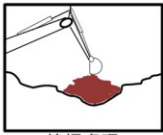
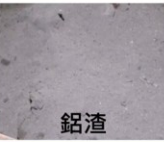
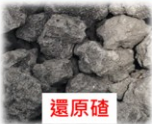
方法	處理廠商	成本	最終副產物	優劣勢
 濕式化學處理	—	~36000元/ton 	 氧化鋁	價格高昂 處理時間長 去化效益差
 掩埋處理	—	~36000元/ton 	 鋁渣	土地購置成本高 土壤汙染 無法有效去化鋁渣之危害
 燒結再製	 煉鋼業者	~10000元/ton 	 還原渣	低成本 廢棄物產品化 減少CaF ₂ 之危害

圖 2-10、燒結鋁酸鈣助熔劑之成本與優劣勢比較

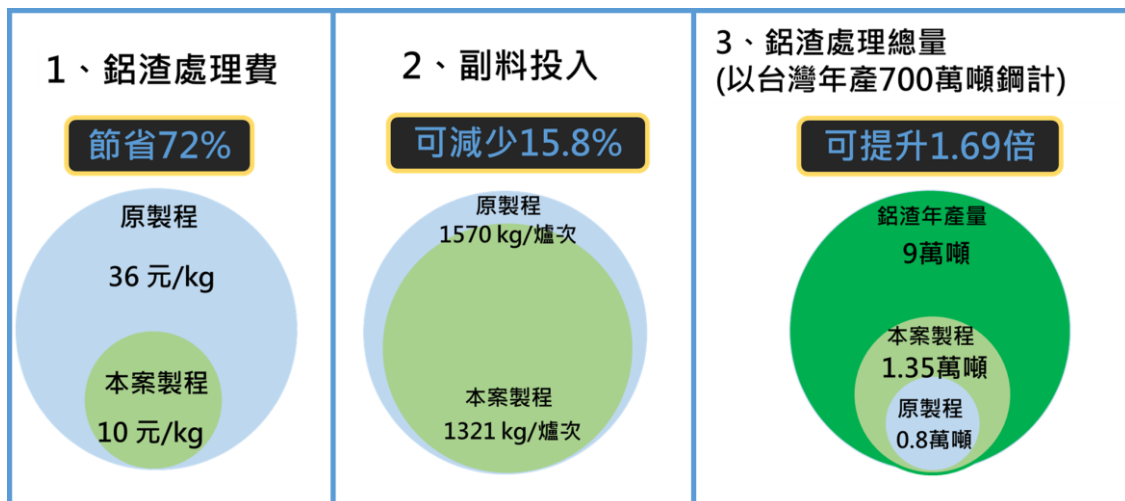


圖 2-11、燒結鋁酸鈣助熔劑之成果效益

三、參考文獻

- [1] <https://www.youtube.com/watch?v=zqA2cUdytnA>
- [2] <https://www.youtube.com/watch?v=Lig03brd-YI>
- [3] <https://www.youtube.com/watch?v=HrAuZ0R0OKw>
- [4] C. Y. Lin and F. H. Lu, "Oxidation behavior of AlN films at high temperature under controlled atmosphere," Journal of the European Ceramic Society, Vol. 28, pp. 691-698, 2008.
- [5] 徐慈鴻、李貽華, "氟汙染與植物", 行政院農業委員會農業藥物毒物試驗所技術專刊第 142 號, 第 1-11 頁, 1993。
- [6] J. A. Duffy and M. D. Ingram, "An interpretation of glass chemistry in terms of the optical basicity concept," Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 21, pp. 373-410, 1976.
- [7] X. Hao, X. Wang, and W. Wang, "Study on Desulfurization Ability of CaO-Al₂O₃-SiO₂ and CaO-CaF₂ Slags at 1600 °C," steel research international, Vol. 86, pp. 1455-1460, 2015.
- [8] J. Liao, Y. Zhang, S. Sridhar, X. Wang, and Z. Zhang, "Effect of Al₂O₃/SiO₂ Ratio on the Viscosity and Structure of Slags," ISIJ International, Vol. 52, pp. 753-758, 2012.
- [9] A. McLean, Y. D. Yang and M. Barati, "Refining fluxes for metallurgical melts based on waste materials of the aluminium industry," Mineral Processing and Extractive Metallurgy, Vol. 126, pp. 1-10, 2017.