

# 中國鑛冶工程學會112年年會

專題討論會【鑛冶產業對2050淨零排放之因應與對策】

國立  
中興大學  
循環經濟研究學院  
工業與智慧科技  
學位學程

## 低碳排與資源永續下的鋼鐵 創新冶煉思維

報告人：林啓明 助理教授  
2023年10月13日

◆ **研究專長**：鋼鐵冶煉、造渣劑資源化、鋼鐵製程循環經濟、高溫渣性量測

◆ **獲獎事蹟**：

1) 2022年《高效率去化還原渣之創新綠色製程》榮獲**未來科技獎**。

2) 2021年《環保高效脫硫劑產品開發》榮獲**第十八屆國家新創獎**。

3) 2023年《高效鋁渣去化之創新綠色製程》榮獲大專校院綠色化學創意競賽**銀獎**。

4) 2022年《高效率去化鋁渣的方法與應用》榮獲台灣能永續能源創意實作競賽**銅牌**。

5) 連續九年(2014~2022 年)獲得中鋼集團鋼鐵活力營-worldsteele 鋼鐵大學挑戰賽之**台灣區第一名並奪得二次世界冠軍**。

成份分析	高溫熔煉設備	高溫物性評估技術	渣性模擬
<ul style="list-style-type: none"> <li>● WDS-XRF</li> <li>● EDS-XRF</li> <li>● C-S分析儀</li> <li>● N-O-H分析儀</li> <li>● Spark分析儀</li> <li>● Free-CaO滴定法</li> <li>● 不同價數Fe滴定法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 1公斤級週波爐</li> <li>■ 5公斤級週波爐</li> <li>■ 10公斤級真空週波爐</li> <li>■ 50公斤級週波爐</li> <li>■ 100公斤級週波爐</li> <li>■ 懸浮週波爐</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 高溫黏度量測儀</li> <li>◆ 高溫發泡能力分析儀</li> <li>◆ 高溫影像分析儀</li> <li>◆ DSC熔點分析儀</li> <li>◆ 高溫密度量測儀</li> <li>◆ 高溫表面張力分析儀</li> <li>◆ 高溫導電性分析儀</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Thermo-Calc熱力學性質模擬</li> <li>● FactSage熱力學性質模擬</li> <li>● COMSOL動態發泡能力評估</li> <li>● ANSYS鋼/渣反應動力學模擬</li> <li>● 簡易高溫渣性計算之經驗式建立</li> </ul>

**鋼鐵&爐渣 化學成份定量分析技術**

- WDS-XRF Supermini200**: 爐渣成份定量分析 9F-92U
- C-S分析儀 EMIA-320V2**: 固體塊材與粉末 C&S元素定量分析
- 化學滴定技術**: 1.不同價數Fe 2.F-CaO檢測
- EDS-XRF X-MET 5100**: 不含C金屬&合金成份快速檢測
- SPARK分析儀 Q8 Magellan**: 碳鋼元素定量分析
- N-O-H分析儀 EMGA-830AC**: 固體塊材與粉末 N&O&H元素定量分析

**客製化 高溫熔煉設備**

不同公斤級與功能週波感應熔解爐

- 1Kg 造渣劑配方預熔與實驗型試驗
- 5Kg 造渣劑性能驗證與廢鐵回收試驗
- 10Kg 不同真空度之高溫冶煉試驗
- 50&100Kg 模擬鋼廠現場造渣冶煉製程試驗

**國內唯一 高溫物理性質量測技術**

- 高溫黏度量測技術 (精確度 96% 以上)
- 高溫表面張力量測技術 (精確度 97% 以上)
- 高溫密度量測技術 (精確度 93% 以上)
- 高溫發泡壽命量測技術
- 高溫流動性量測技術
- 高溫導電性量測技術 (精確度 89% 以上)



# 煉鋼即是煉渣

產品  
厚度

鋼板厚度6.00~12.7mm    鋼片厚度1.20~5.99mm    電磁鋼捲厚度0.35~0.65mm



產品  
強度

軟鋼(200~400 MPa)    高強度鋼(900~1400 MPa)    超高強度鋼(>1300 MPa)  
SS400 低碳鋼    JSC980Y 冷軋高強度汽車用鋼    17-4PH 析出硬化型不銹鋼



產品  
組織

組織：(1)肥粒鐵 (2)波來鐵 (3)殘留沃斯田鐵 (4)雪明碳鐵 (5)麻田散鐵

強化：(1)加工硬化 (2)固溶強化 (3)晶粒細化 (4)析出硬化



	高爐石	轉爐石	氧化渣	還原渣
顏色	白色	黑色	黑色	白色
成份	C/S=1~1.3 少量Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C/S>3 多量Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C/S=2 多量Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C/S≥2 少量Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
再利用	OK	OK	OK	NO



# 爐渣的組成物

**氧化鈣 (CaO)**

- 氧化鈣：鹼性氧化物
- 熔點：2613 °C
- 功能：脫磷與脫硫

**氧化鎂 (MgO)**

- 氧化鎂：鹼性氧化物
- 熔點：2800 °C
- 功能：防蝕, 固化相

**氧化矽 (SiO<sub>2</sub>)**

- 氧化矽：酸性氧化物
- 熔點：1700 °C
- 功能：調整組成特性



**氧化鋁 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)**

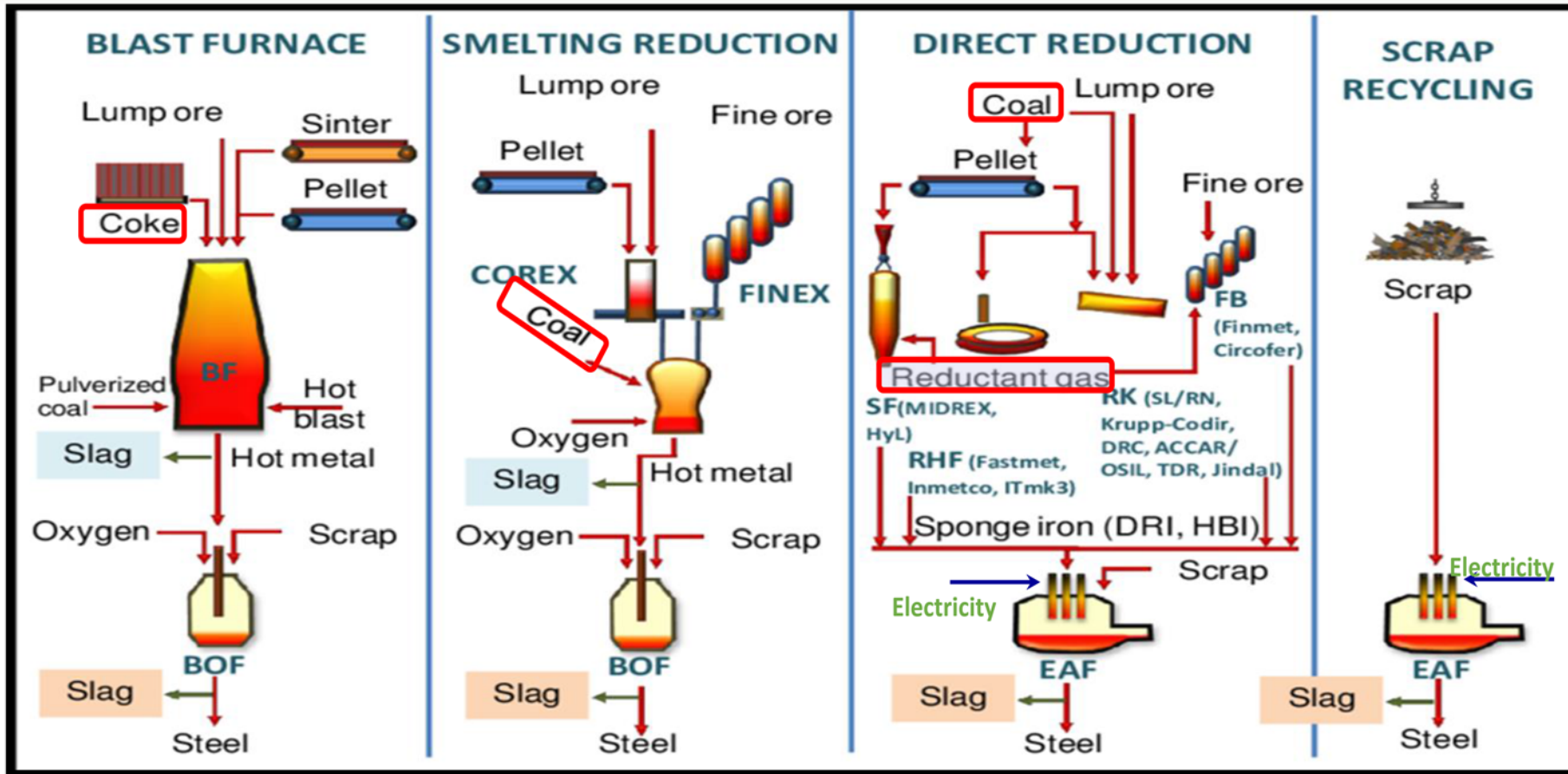
- 氧化鋁：中性氧化物
- 熔點：2054 °C
- 功能：調整組成特性

**氧化鐵 (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)**

- 氧化鐵：中性氧化物
- 熔點：1566 °C
- 功能：脫磷

	高爐石	轉爐石	氧化渣	還原渣
顏色	白色	黑色	黑色	白色
成份	C/S=1~1.3 少量Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C/S>3 多量Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C/S=2 多量Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C/S≥2 少量Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
再利用	OK	OK	OK	NO

# 電弧爐冶煉的機會



## EAF優勢

- ① 低CO<sub>2</sub> 汙染 製程技術
- ② 高循環 低能源 製程技術
- ③ 每年 去化廢鐵 9百萬噸
- ④ 每年 電弧產值 1800億元

CO<sub>2</sub>排放  
強度比值

BF-BOF	COREX/FINEX	DR-EAF	Scrap-EAF
Base: 1	~0.85	~0.55	~0.27

全球粗鋼產量占比依序為(BF-BOF)、(Scrap-EAF)、(DR-EAF)、COREX/FINEX

## 電弧爐冶煉的限制

### 吹O<sub>2</sub>下到底那些元素會被氧化？

- $4\text{Al} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3$
- $\text{Ti} + \text{O}_2 \rightarrow \text{TiO}_2$
- $\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$
- $2\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}$
- $2\text{Mn} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{MnO}$
- $4\text{Cr} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Cr}_2\text{O}_3$
- $2\text{Fe} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{FeO}$

EAF渣氧化物：

CaO

SiO<sub>2</sub>

T-Fe

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

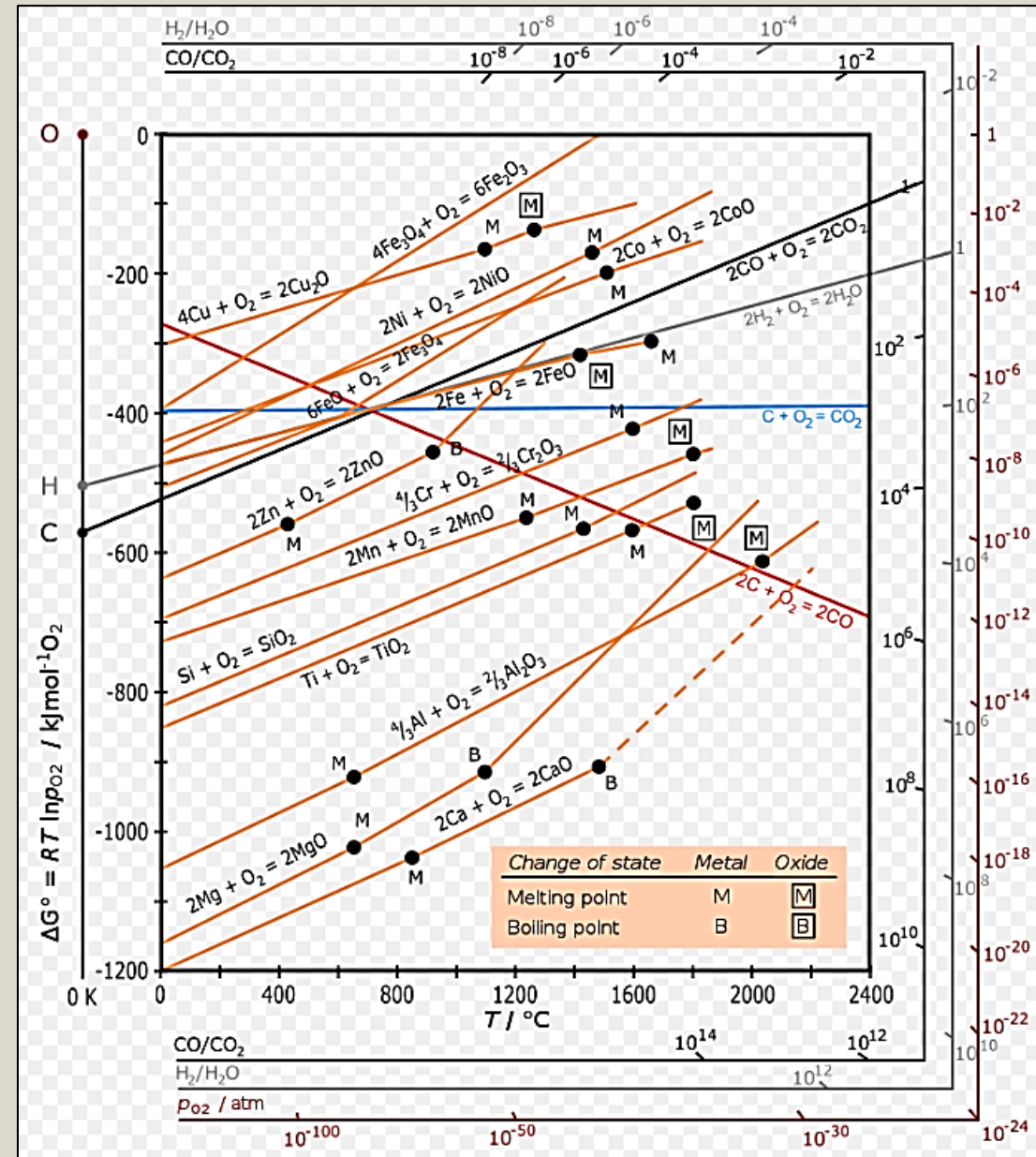
MnO

MgO

### 不能氧化的元素如何處理？

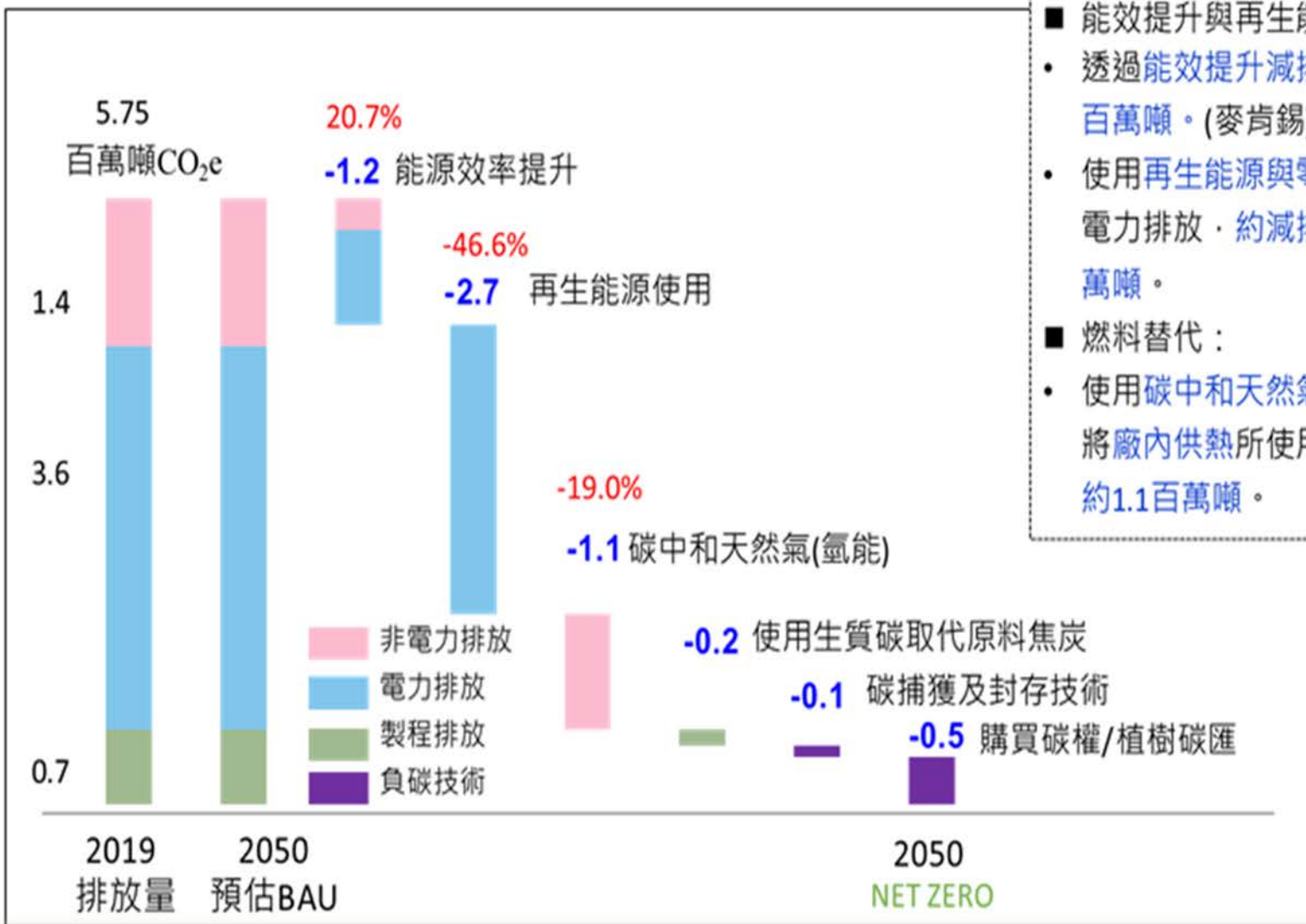
如：Cu, Ni, Co等

添加高潔淨含鐵原料：如生鐵, DRI, HBI等





# 電弧爐減碳的方法



- 能效提升與再生能源：
  - 透過能效提升減排20%·減少1.2百萬噸。(麥肯錫)
  - 使用再生能源與零碳電力·降低電力排放·約減排45%·約2.7百萬噸。
- 燃料替代：
  - 使用碳中和天然氣或部分氫氣可將廠內供熱所使用的排放量降低·約1.1百萬噸。

## 電弧爐的CO<sub>2</sub>排放量 (5.75百萬噸)

製程排放 0.7百萬噸 (12.2%)	電力排放 3.6百萬噸 (62.6%)	非電力排放 1.4百萬噸 (24.3%)
---------------------------	---------------------------	----------------------------

非電力排放 1.4百萬噸 (24.3%)	能源效率提升 -1.2百萬噸 減排20.7%
----------------------------	------------------------------

電力排放 3.6百萬噸 (62.6%)	再生能源 -2.7百萬噸 減排46.6%
---------------------------	----------------------------

製程排放 0.7百萬噸 (12.2%)	燃料替代 -1.1百萬噸 減排19.0%
---------------------------	----------------------------

**電弧爐降低碳排放的未來策略**

**低碳電弧爐冶煉技術**

- 1) 增加Fe產量
- 2) 增加元素回收率
- 3) 降低電力使用量 (渣改質)

# 低碳電弧爐冶煉技術

- 1) 如何增加Fe產量?
- 2) 如何提升元素回收率?

重點(1)

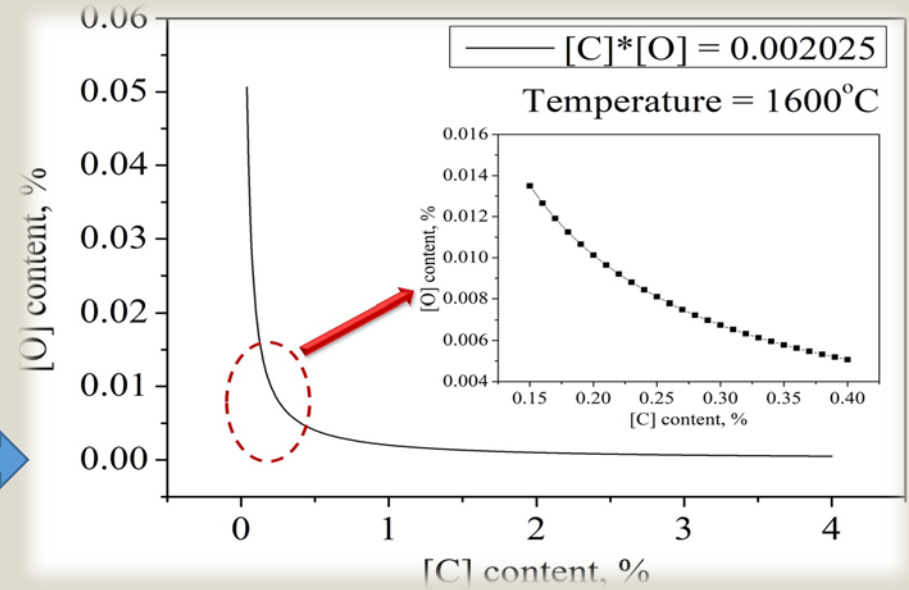
## 石墨電極

增加電弧能源  
轉換效率

### 發泡渣

重點(2)

- (1) 產生CO氣體
- (2) 增加化學
- (3) 過吹氧增加鋼液氧含量



### 排渣口

氧槍 碳槍

### 熔渣

### 鋼液

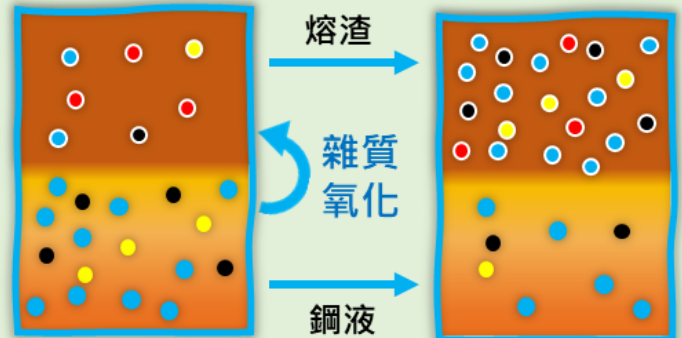
Al, Si, Mn, C, Fe

重點(3)

## 渣 - 鋼界面反應

熔渣 ● SiO<sub>2</sub> ● Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ● MnO ● MgO

鋼液 ● Si ● Al ● Mn



100公噸	C %	O ppm	Si添加量 公斤	C添加量 公斤
1	0.1	202.5	15.1	0
2	0.08	253.1	19.6	20
3	0.06	337.5	27.0	40
4	0.04	506.3	41.8	60
5	0.03	675.0	56.6	70

- 添加Si使鋼液O降至30ppm
- 添加C使鋼液C增加至0.1%

# 低碳電弧爐冶煉技術

- 1) 如何增加Fe產量?
- 2) 如何提升元素回收率?

電弧爐  
高**碳**出鋼

降低鋼液O含量  
增加元素回收率

目標  
C  $\geq$  0.1%

低於0.1%

**低**  
氧化渣量

增加Fe產量

目標  
10~12%

15%

氧化渣之  
**低**FeO量

增加Fe產量

目標  
15~20%

30%

**低**電力  
使用量

優越發泡渣

目標  
低於  
350 kWh/ton

400

- (1) FeO = 15% ; 渣量 = 20公噸 ; FeO = 3公噸 ; Fe = 2.33公噸  
 (2) FeO = **15%** ; 渣量 = **10公噸** ; FeO = 1.5公噸 ; Fe = 1.17公噸  
 (3) FeO = 30% ; 渣量 = 15公噸 ; FeO = 4.5公噸 ; Fe = 3.50公噸



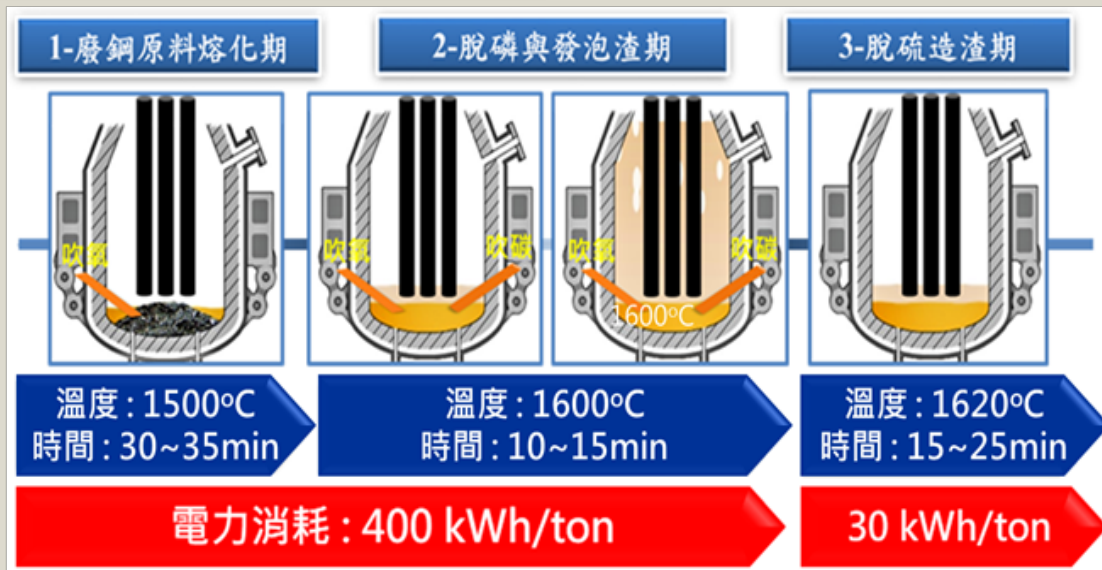
# 低碳電弧爐冶煉技術

## 3) 降低電力使用量 (造渣劑改質技術)

- 方法I: 液態渣改質技術 (20~100cP) 11
- 方法II: 固化相析出技術 (100~1000cP)

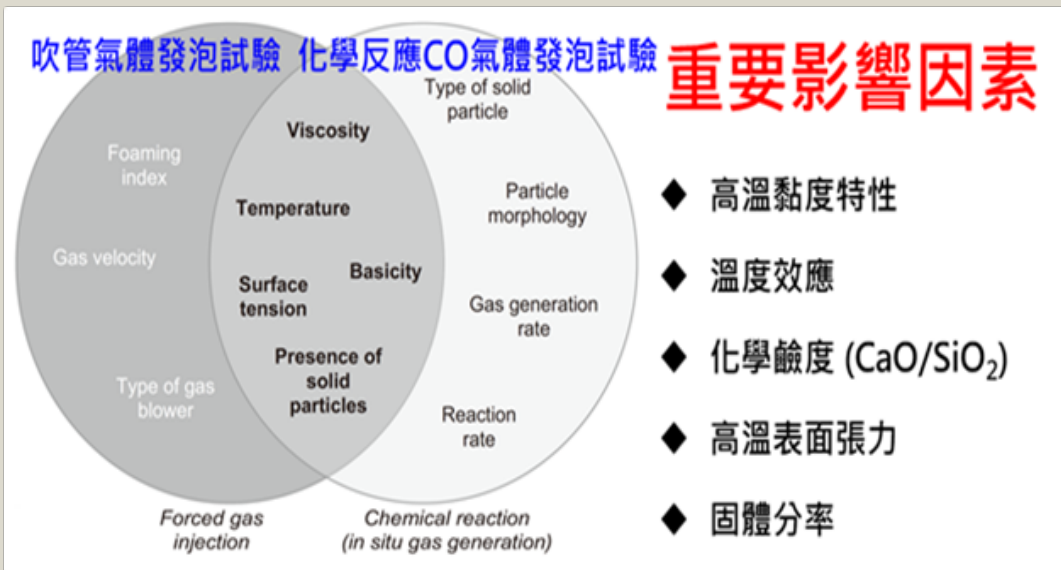
1

電爐製程特性



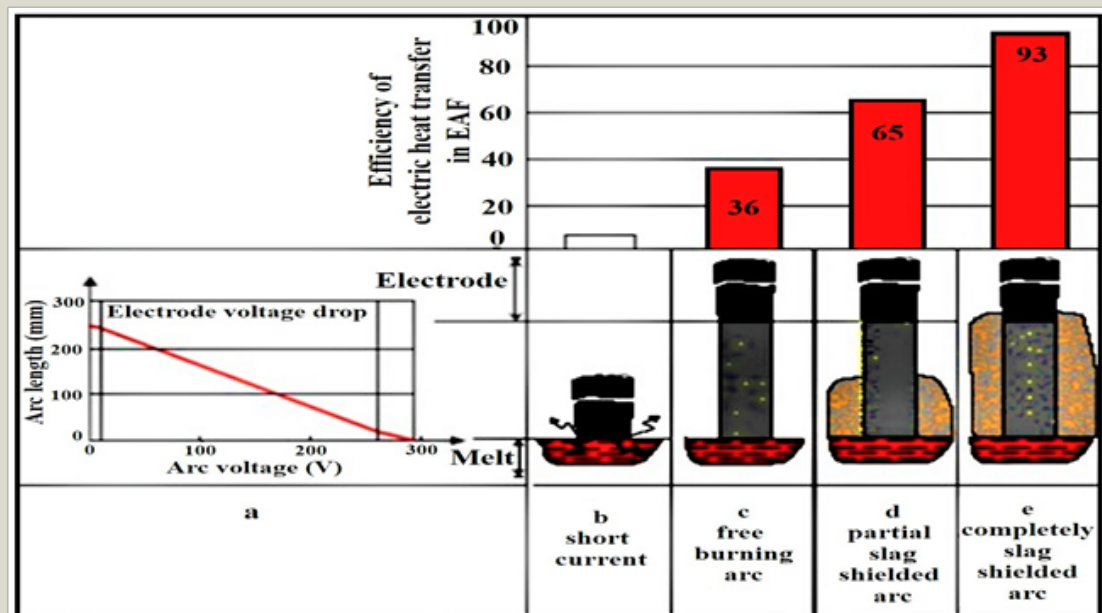
3

發泡渣影響因素



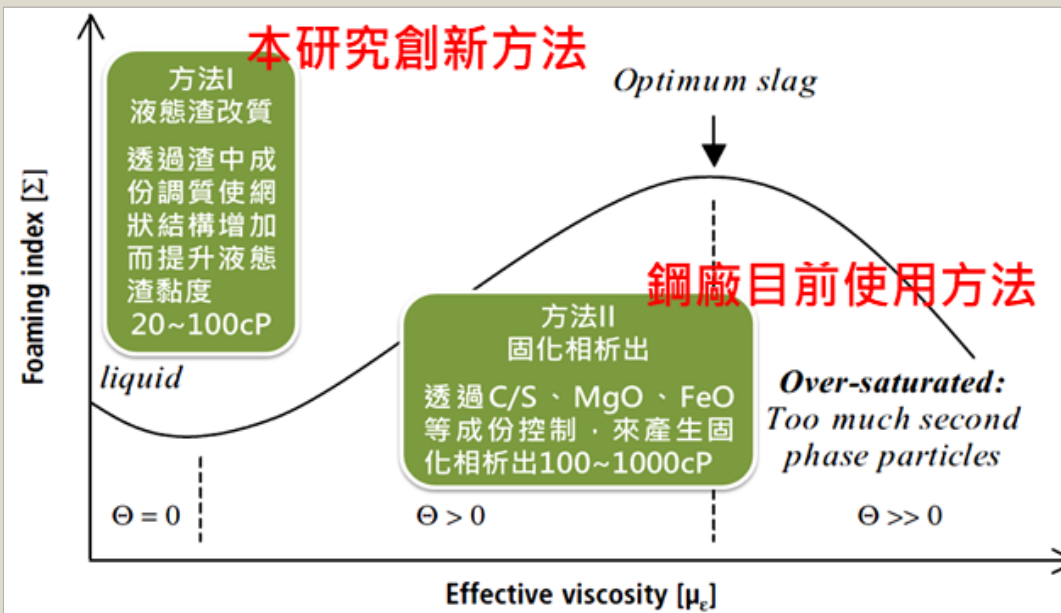
2

發泡渣重要性



4

控制發泡渣方法

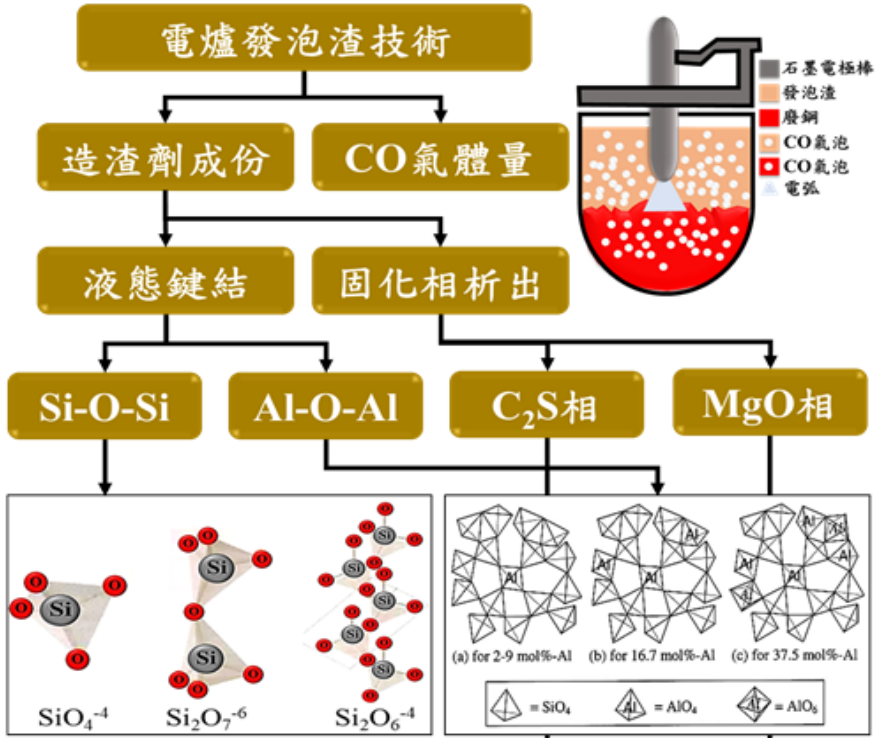


# 低碳電弧爐冶煉技術

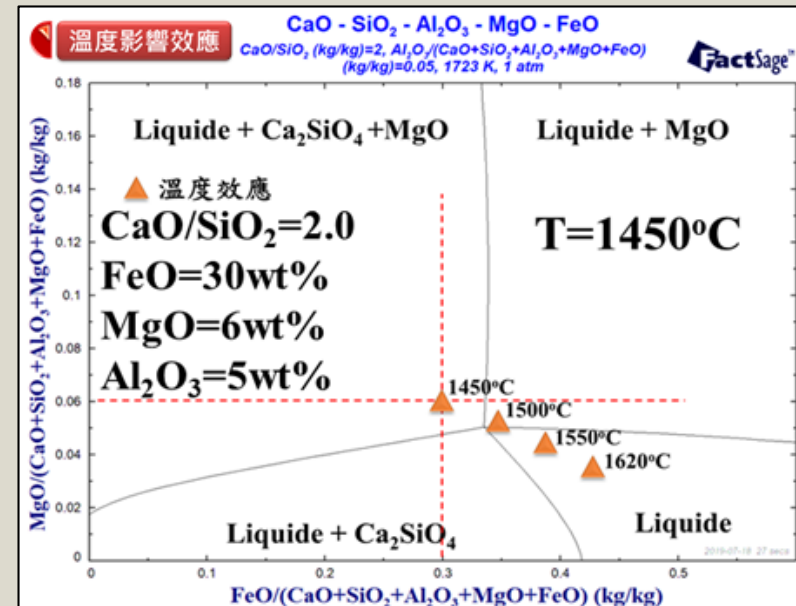
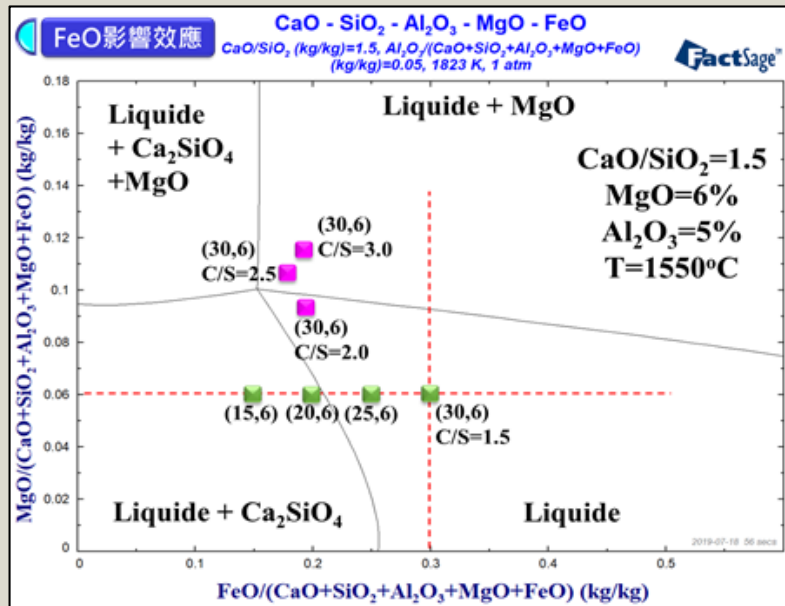
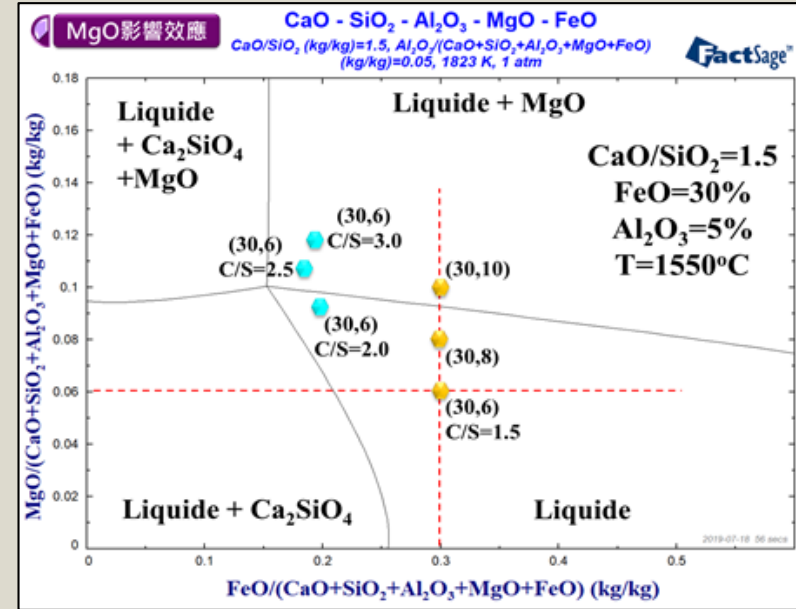
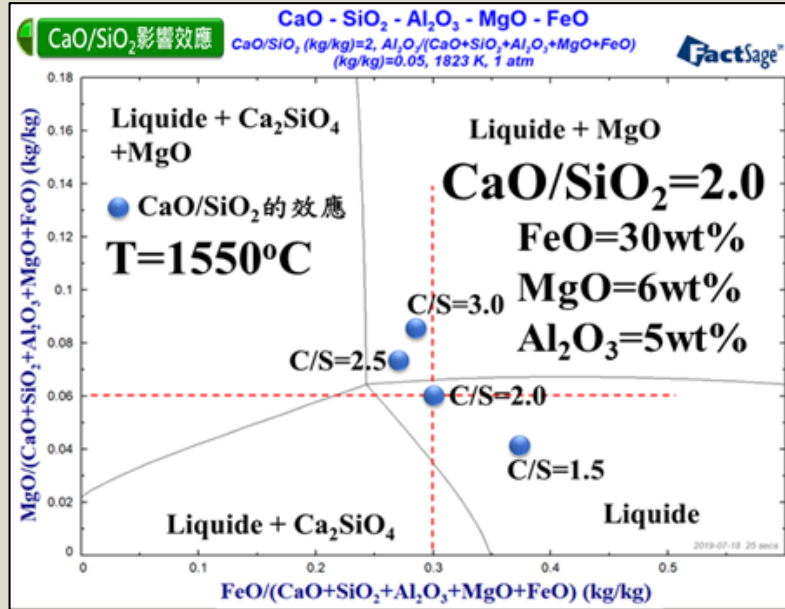
## 3) 降低電力使用量 (固化相析出之造渣劑改質技術)

- 固定溫度下容易獲得穩定固化相析出 12
- 溫度增加固化相會溶回渣液中

### 電爐發泡渣技術



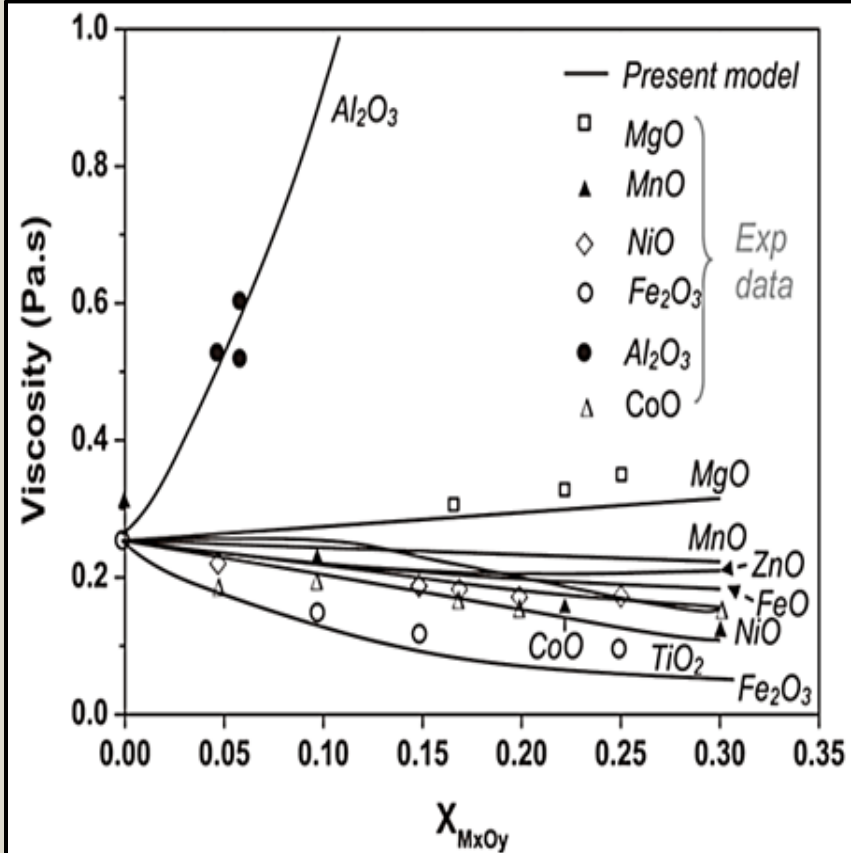
模型類型	模型名稱	計算公式
愛因斯坦模型及其改進模型	Einstein	$\eta = \eta_0 (1 + 2.5f)$
	Roscoe	$\eta = \eta_0 (1 - 1.35f)^{-2.5}$
	Krieger	$\eta = \eta_0 (1 - f/f_m)^{-[\eta]_0}$
單胞模型	Toda	$\eta = \eta_0 (1 + 0.5kf - f) / [(1 - kf)^2 (1 - f)]$ $k = 1 + 0.6f$
	Happel	$\eta = \eta_0 \{1 + f(22f^{2/3} + 55 - 42f^{2/3}) / [10(1 - f^{1/3}) - 25f(1 - f^{1/3})]\}$ $\eta = \eta_0 (1 + 2.5\lambda f)$
	Simha	$\lambda = 4(1 - y^2) / [4(1 + y^{10}) - 25y^2(1 + y^4) + 42y^2]$ $y = (f/f_{max})^{1/3} / [2 - (f/f_{min})^{1/3}]$
半經驗模型	Ruiz	$\eta = \eta_0 \{1 + 10f(1 - f^{1/3}) / [4(1 + f^{1/3}) - 25f(1 + f^{1/3}) + 42f^{1/3}]\}$
	Zholkov	$\eta = \eta_0 \{1 + 10f(1 - f^{1/3}) / [4(1 + f^{1/3}) - 25f(1 + f^{1/3}) + 42f^{1/3}]\}$
	Brule	$\eta = \eta_0 [1 + (3\pi/16) \cdot (1 - \epsilon) / \epsilon] \cdot \epsilon = 1 - (f/f_{max})^{1/3}$
	Thomas	$\eta = \eta_0 [1 + 2.5f + 10.05f^2 + 0.00273 \exp(16.6f)]$
Batchelor	Batchelor	$\eta = \eta_0 (1 + 2.5f + 5.2f^2)$
	Mooney	$\eta = \eta_0 e^{2.5f(1+1.35f)}$



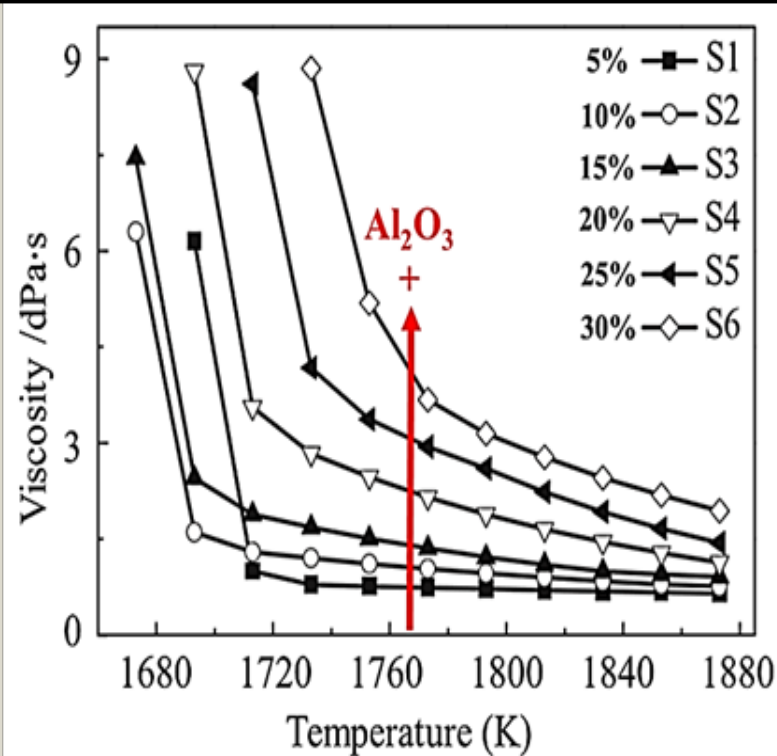


## 3) 降低電力使用量 (液態渣鍵結之造渣劑改質技術)

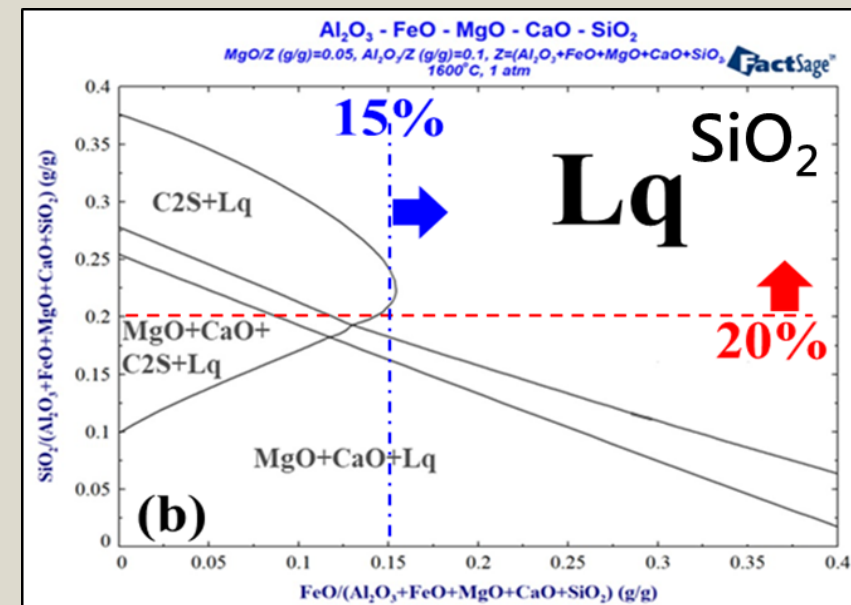
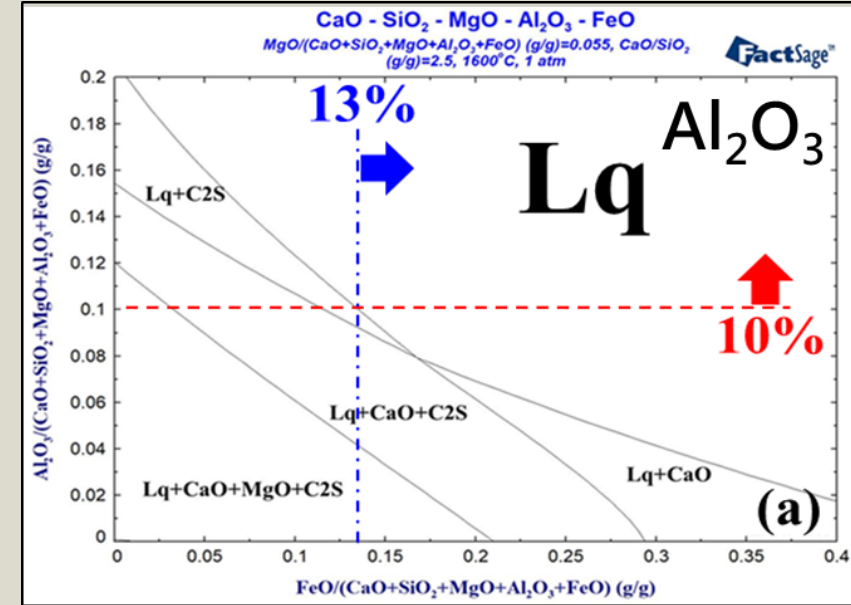
- 渣系選擇 :  $\text{FeO}-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$  13
- 可以獲得寬的液態穩定區域



Effect of the CaO replacement by other oxides in a CaO-SiO<sub>2</sub> slag (SiO<sub>2</sub> molar fraction was kept as 50%) at 1550 °C



Sample No.	CaO	SiO <sub>2</sub>	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Λ/(Λ+F)
1	48.75	16.25	25	5	5	0.17
2	48.75	16.25	20	10	5	0.33
3	48.75	16.25	15	15	5	0.5
4	48.75	16.25	10	20	5	0.67
5	48.75	16.25	5	25	5	0.83
6	48.75	16.25	0	30	5	1

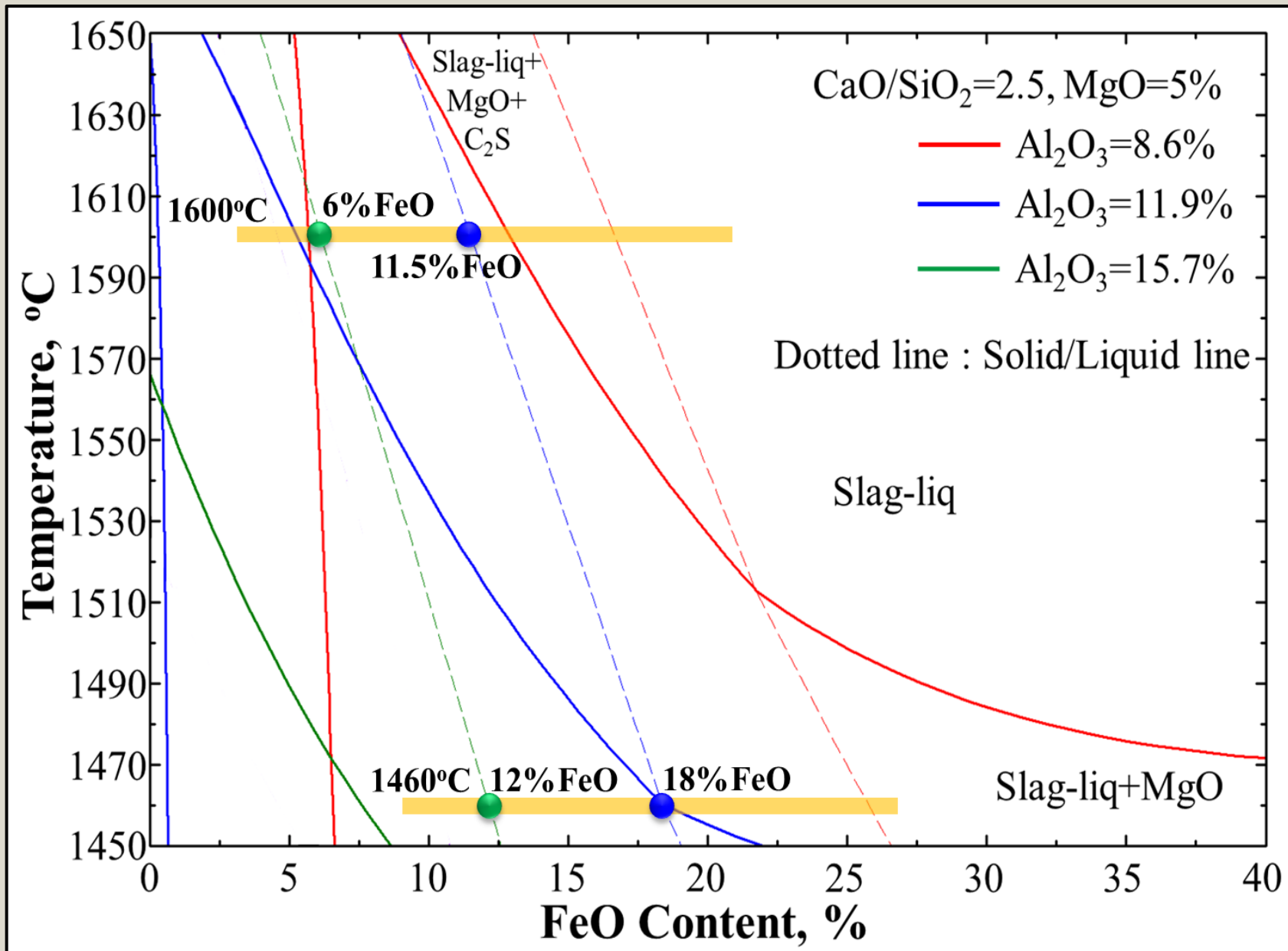


1. A. P. Luz, A. G. Tomba Martinez, F. Lopez, P. Bonadia, and V. C. Pandolfelli, *Ceramics International*, Vol. 44, pp. 8727-8741, 2018.
2. X. Shen, M. Chen, N. Wang, and D. Wang, *ISIJ International*, Vol. 59, No. 1, pp. 9–15, 2019.



## 3) 降低電力使用量 (液態渣鍵結之造渣劑改質技術)

- 渣系選擇： $\text{FeO}-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$  14
- $1460\sim 1600^\circ\text{C}$ 皆可獲得穩定100%液相

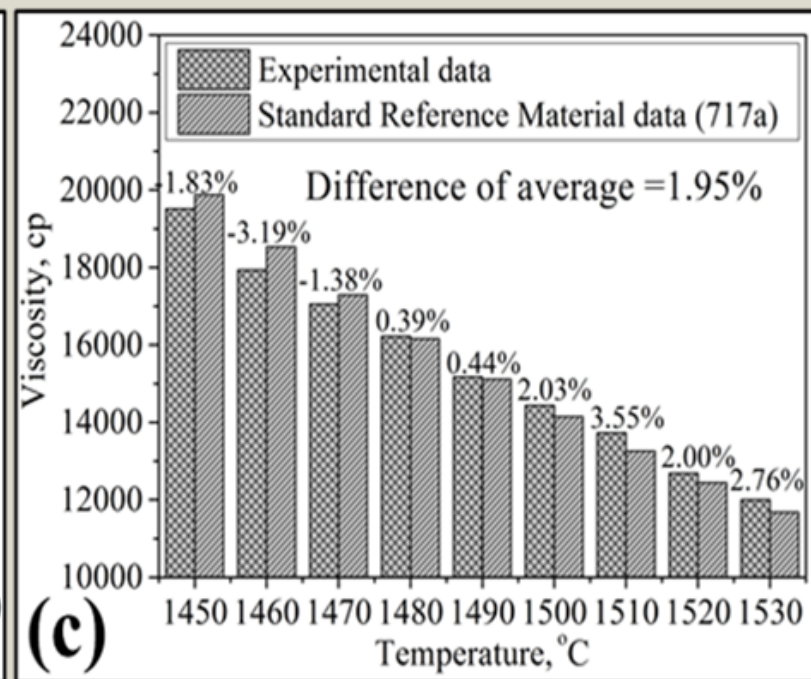
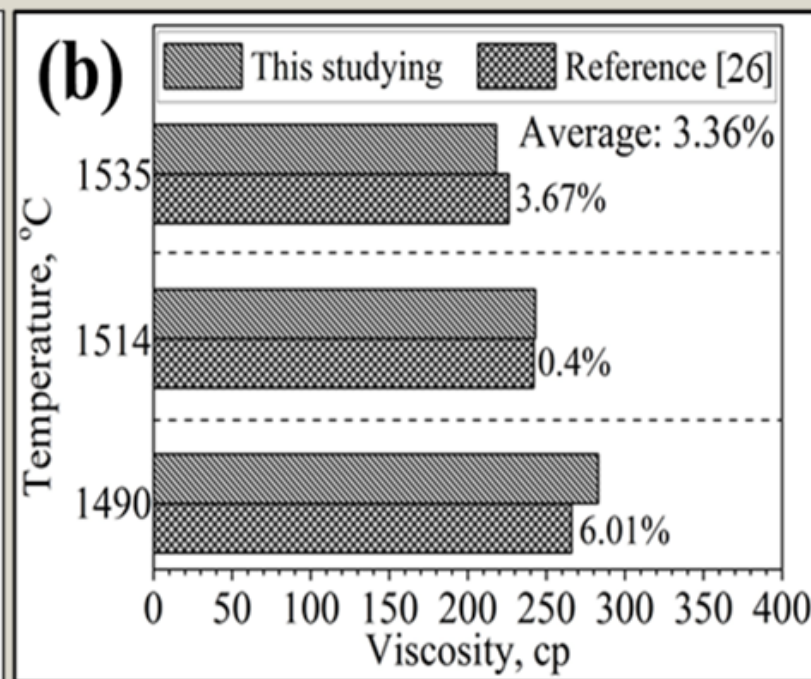
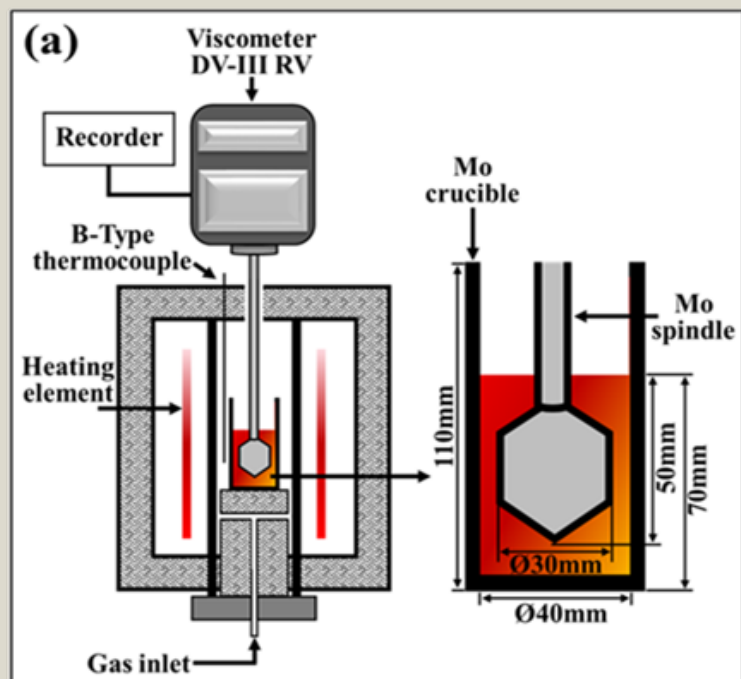


- FactSage模擬 $\text{FeO}-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 渣系之液相區與溫度的關係。
- 隨著 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 增加可快速擴大造渣劑之液態相區。
- 當 $\text{Al}_2\text{O}_3=11.9\sim 15.7\%$ 且 $\text{FeO}>18\%$ 則在溫度為 $1460\sim 1600^\circ\text{C}$ 時皆為液態相。

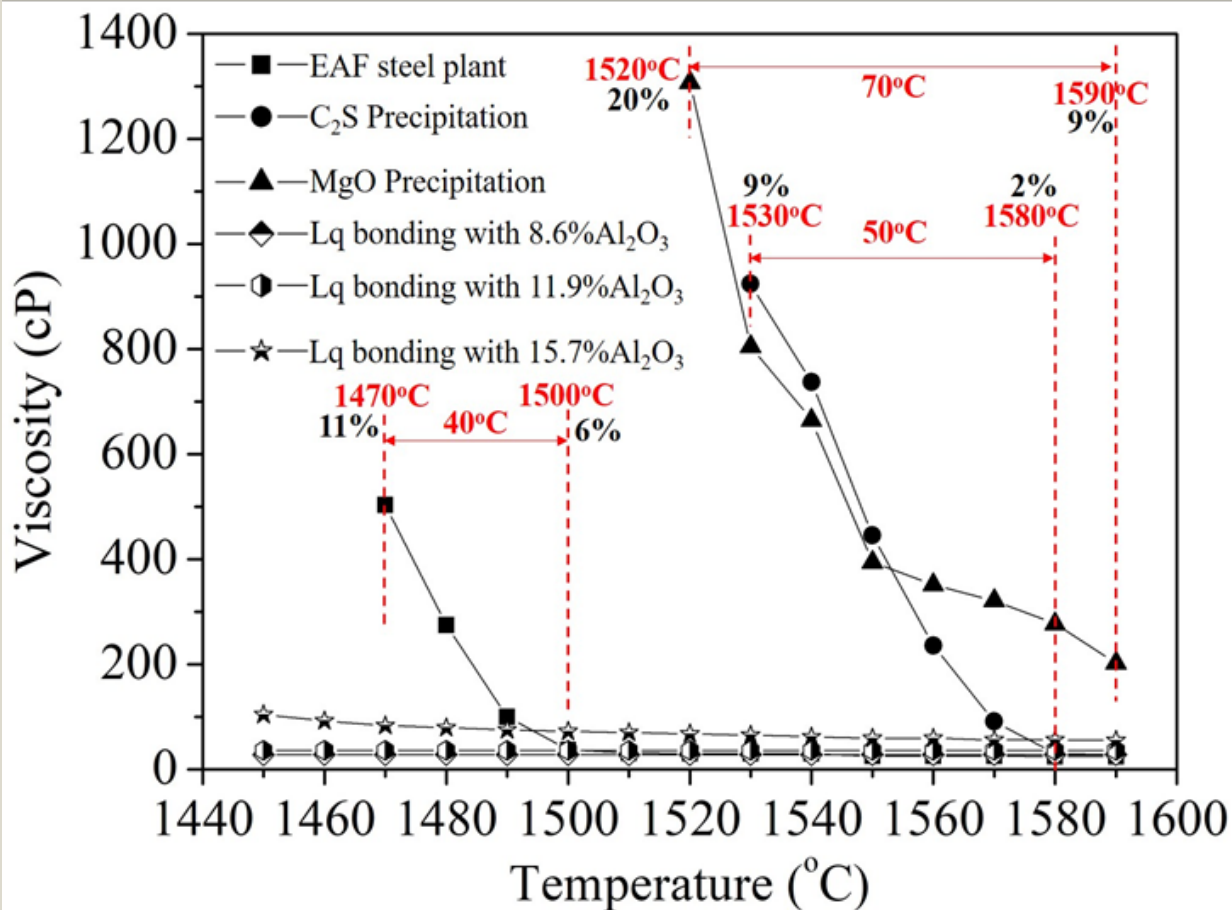
造渣劑配方

Sample	Foaming mechanism	Chemical composition, wt%				
		CaO/SiO <sub>2</sub>	FeO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO
1	No	2.9	22.1	4.5	5.1	6.2
2	C <sub>2</sub> S	3.1	16.4	4.6	5.0	6.1
3	MgO	3.0	12.3	9.0	6.5	4.5
4	Lq. bonding	2.5	23.1	4.5	8.6	5.7
5	Lq. bonding	2.5	18.7	5.7	11.9	5.4
6	Lq. bonding	2.5	15.2	6.0	15.7	5.6

黏度量測裝置

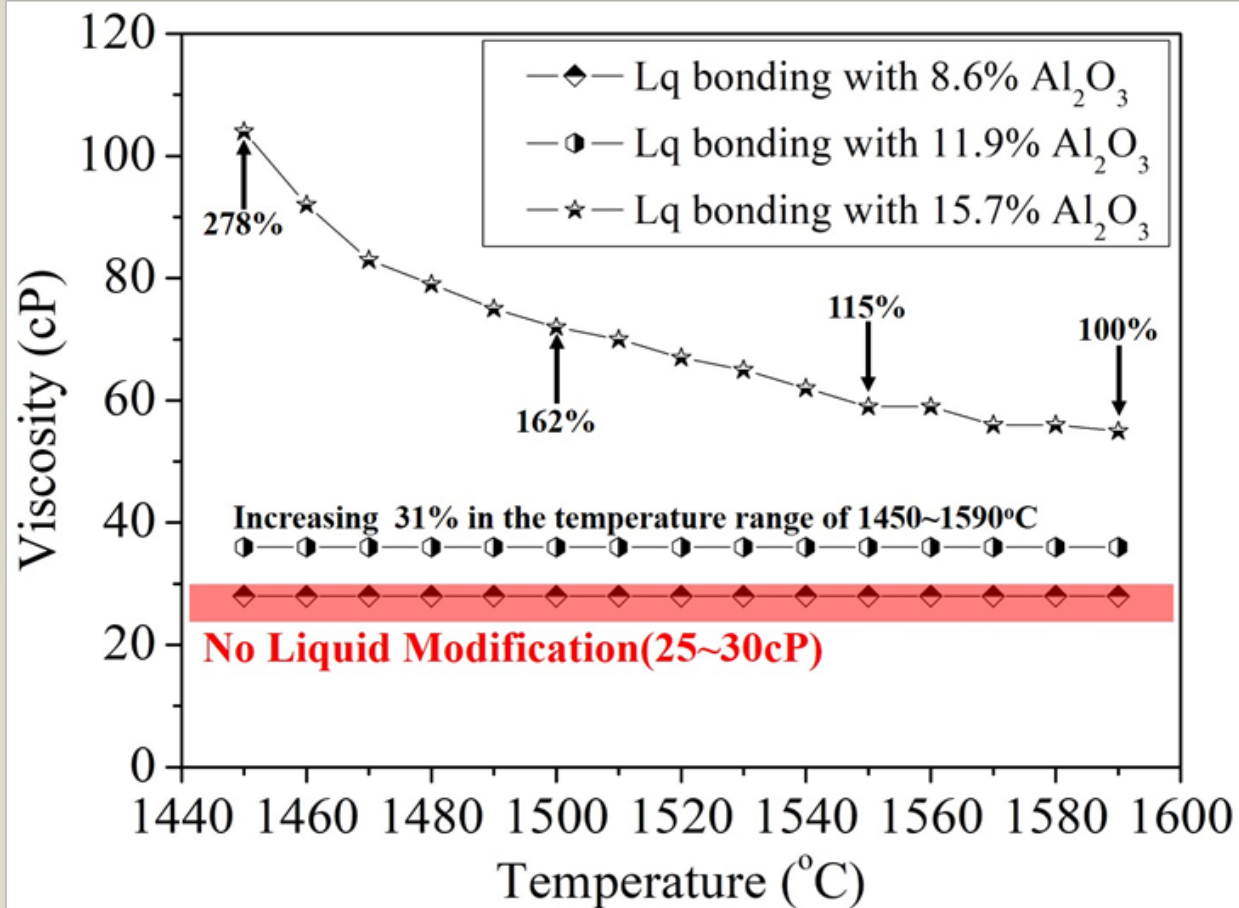


#### 固化相率對黏度的影響結果



- 固化相存在(約大於6%)可以有效提升黏度值
- 隨溫度增加固化相易熔化而導致黏度劇烈變化

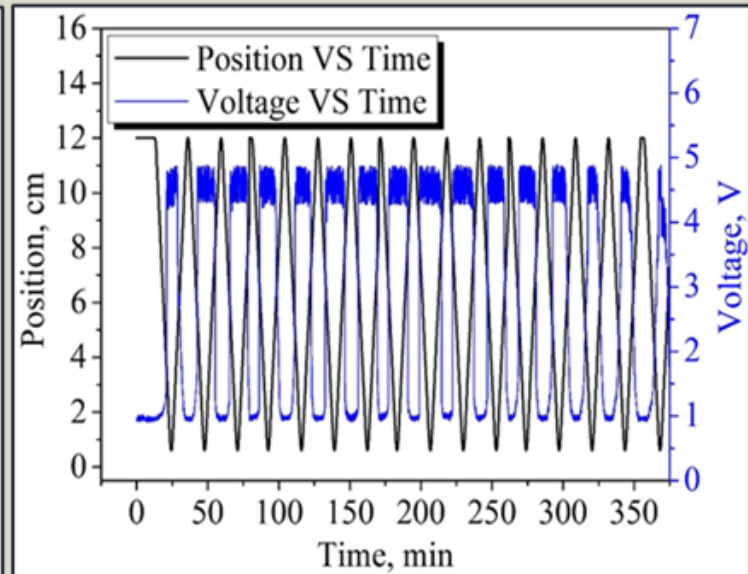
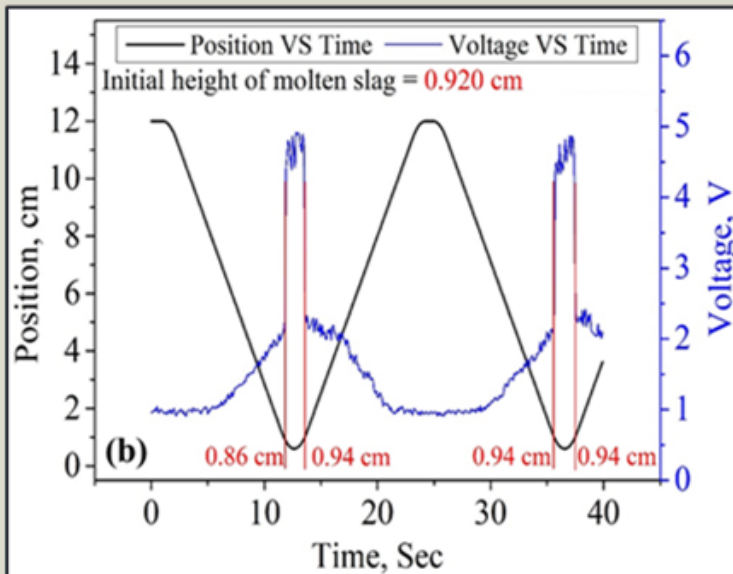
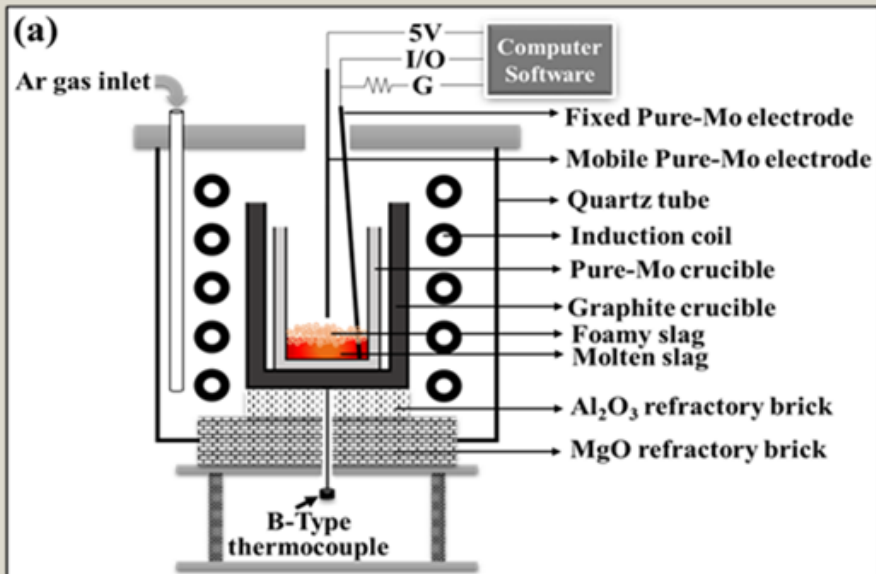
#### $Al_2O_3$ 對液態黏度的影響結果



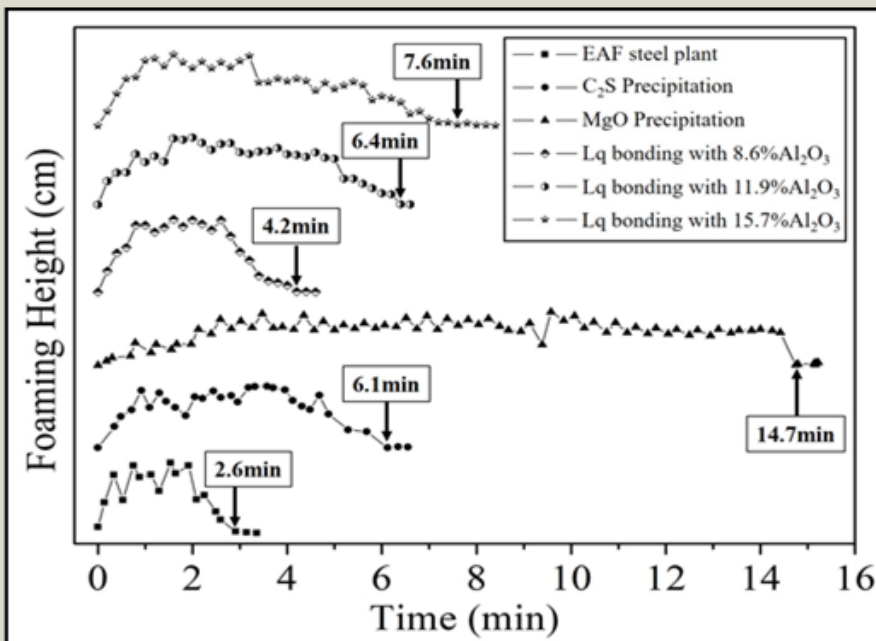
- $Al_2O_3$ 添加量為11.9~15.7%時可有效提升液態黏度
- 具高 $Al_2O_3$ 的造渣劑擁有很寬溫度範圍的高黏度液態區



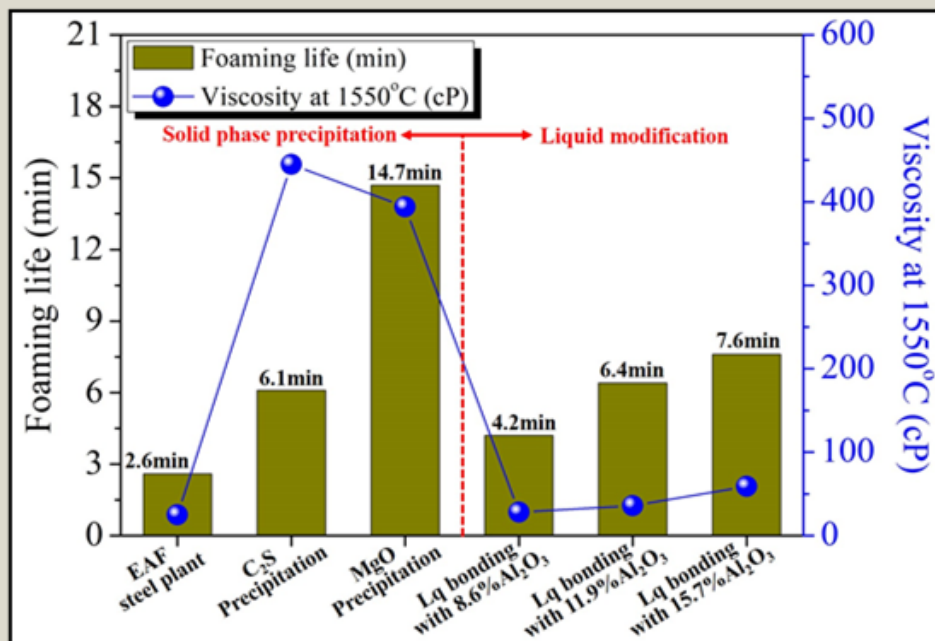
發泡壽命量測裝置



發泡壽命量測結果

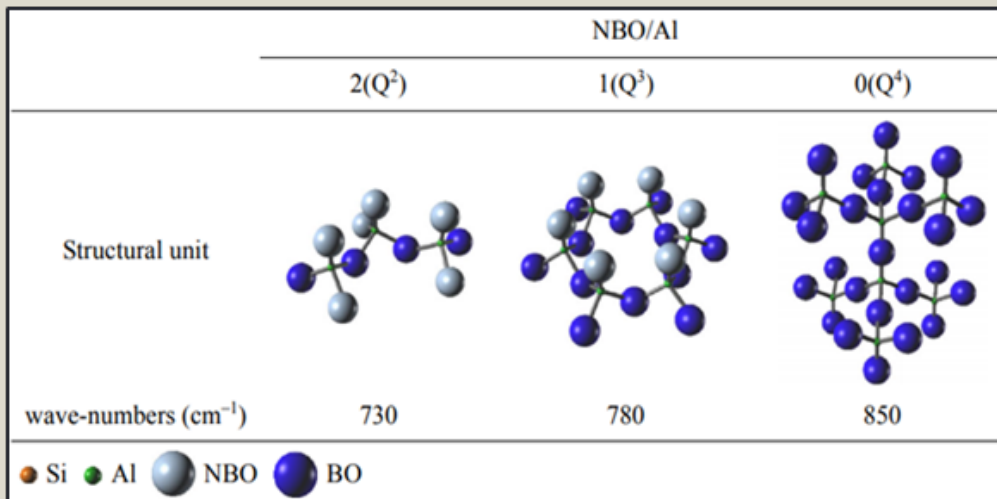
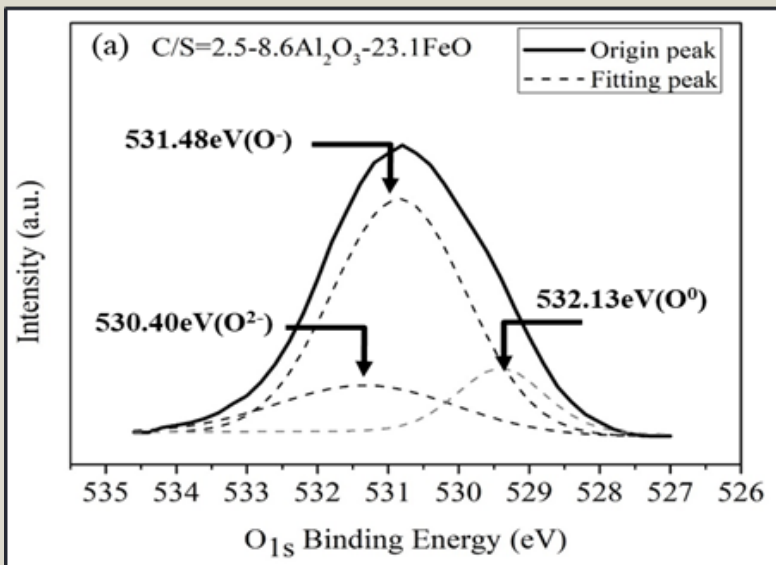


發泡壽命與黏度關係

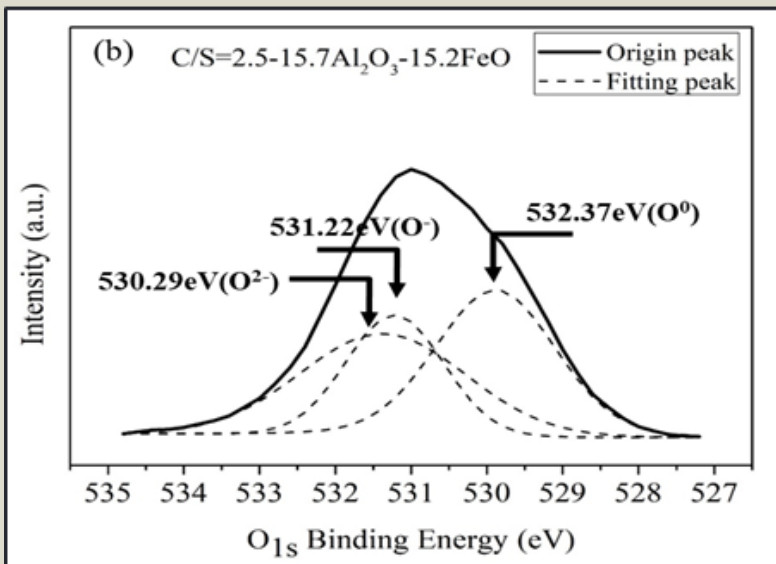


- 高  $Al_2O_3$  造渣劑之黏度特性較不受溫度的影響。
- 較廣的溫度區間 (1450~1590°C) 下擁有適當的黏度特性 (36~104cP)。
- 隨著煉鋼冶煉溫度的連續增加 (1450~1620°C) 下，穩定且長時間製造發泡渣的技術。

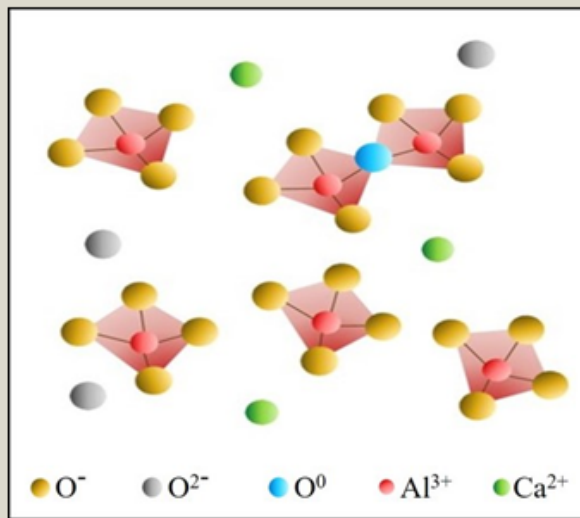
### ESCA 氧鍵結分析結果



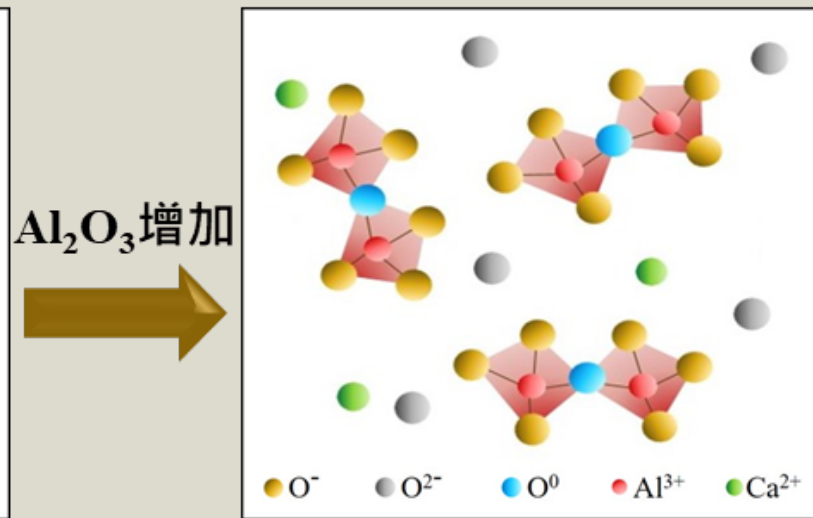
Sample	O <sup>2-</sup> Area(%)	O <sup>-</sup> Area(%)	O <sup>0</sup> Area(%)
8.6% $Al_2O_3$	14.7	67.0	18.3
15.7% $Al_2O_3$	39.2	25.1	25.8



### 低 $Al_2O_3$ 的鍵結特性



### 高 $Al_2O_3$ 的鍵結特性



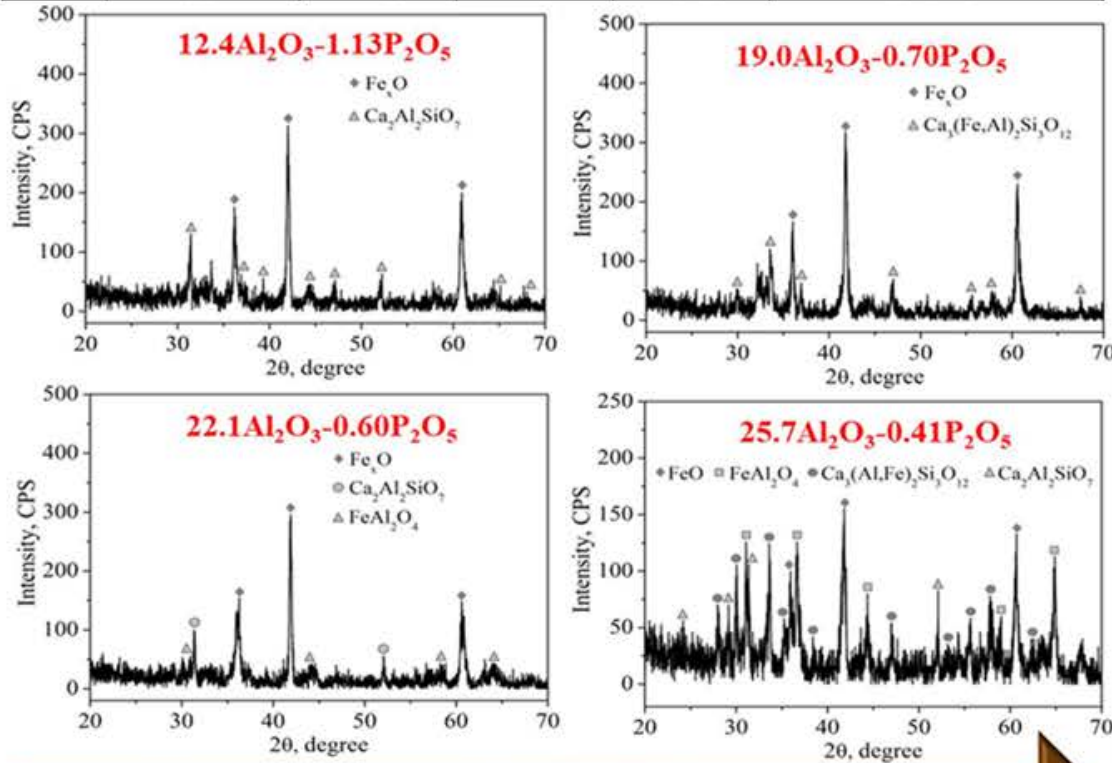


# 低碳電弧爐冶煉技術

## 3) 降低電力使用量 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>液態渣鍵結之研究成果)

### Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>對脫磷的影響

Slag	Chemical composition, wt.%				Dephosphorization
	CaO/SiO <sub>2</sub>	T-Fe	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
1	3.5	12.4	25.7	0.41	34.6%
2	4.2	16.6	22.1	0.60	63.8%
3	3.6	21.5	19.0	0.70	76.0%
4	3.8	21.5	12.4	1.13	82.7%



Low

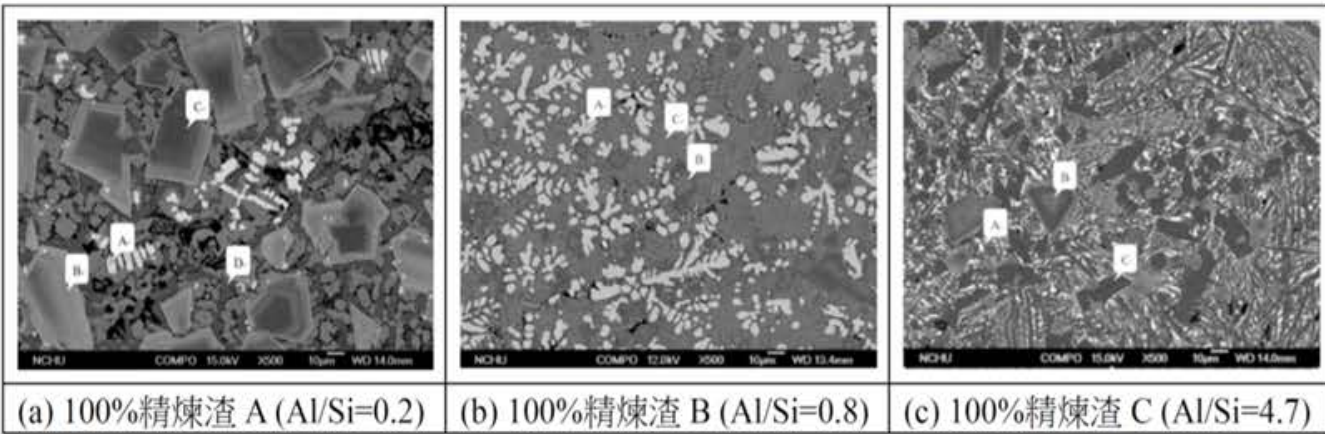
12.4% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
C<sub>2</sub>AS Phase

19.0% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
C<sub>3</sub>AS<sub>3</sub> Phase

22.1% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
FA Phase

25.7% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
FA Phase

High



試片	位置	元素成份 (at%)							相種類
		Fe	Ca	Al	Si	Mg	P	O	
(a) (Al/Si=0.2)	A	41.5	0.68	0.09	-	-	0.35	Bal.	Fe <sub>x</sub> O
(b) (Al/Si=0.8)		30.8	1.10	-	0.88	3.13	0.31	Bal.	
(c) (Al/Si=4.7)		37.0	1.69	0.03	0.24	1.58	-	Bal.	
(a) (Al/Si=0.2)	B	22.3	0.42	10.4	-	1.30	-	Bal.	FeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
(b) (Al/Si=0.8)		7.81	0.04	22.1	0.2	6.84	-	Bal.	(Fe,Mg)Al <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
(c) (Al/Si=4.7)		6.12	0.31	16.9	-	4.43	-	Bal.	(Fe,Mg)Al <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
(a) (Al/Si=0.2)	D	0.15	21.7	7.61	12.3	-	0.51	Bal.	Matrix (CaAlSiO)
(b) (Al/Si=0.8)		3.55	16.4	7.97	6.35	4.25	0.68	Bal.	
(c) (Al/Si=4.7)		0.86	13.8	16.9	6.36	-	0.78	Bal.	



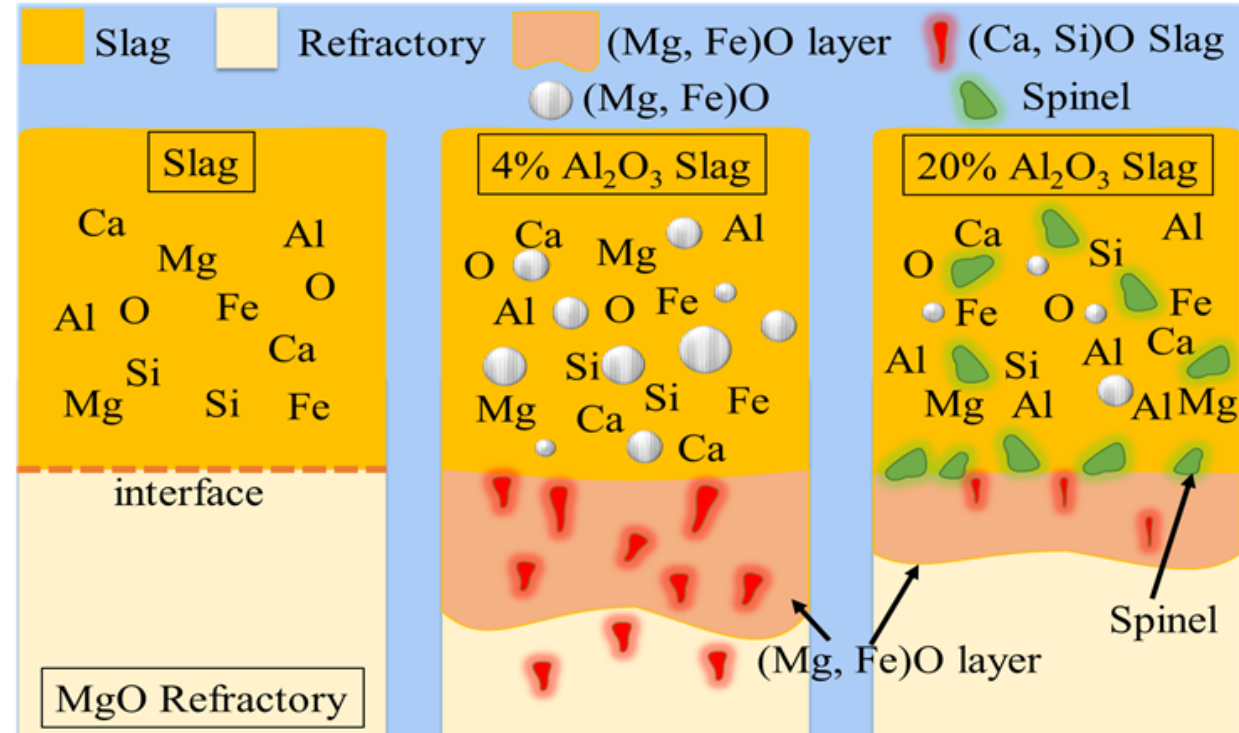
Sample No.	Composition (wt. %)						
	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	Fe <sub>t</sub> O	CaO/SiO <sub>2</sub>	
A	Target	32	4	26	16	22	1.2
	Analysed	31.1	4.1	25.9	15.3	23.6	1.2
D	Target	25	16	21	16	22	1.2
	Analysed	23.9	17.5	20.2	15.2	23.2	1.2
E	Target	22.5	20	19.5	16	22	1.2
	Analysed	21.8	21.4	18.7	15.7	22.4	1.2



- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> correction factor =  $0.615 * [\%Al_2O_3 / (SiO_2 + Al_2O_3)] * (\%MgO_{ref} - 6)$
- $\%MgO_{sat} = \%MgO_{ref}(B_2) - Al_2O_3 \text{ correction factor}$

B <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO <sub>sat</sub>	B <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO <sub>sat</sub>	B <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO <sub>sat</sub>
1.5	10	9.7	2.0	10	6.8	2.5	10	5.6
1.5	15	9.2	2.0	15	6.6	2.5	15	5.5
1.5	20	8.9	2.0	20	6.4	2.5	20	5.4

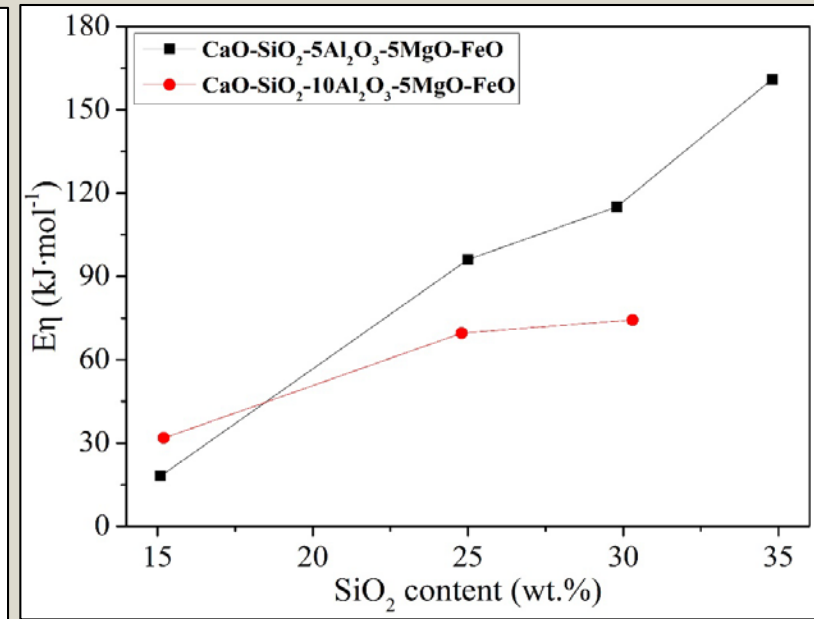
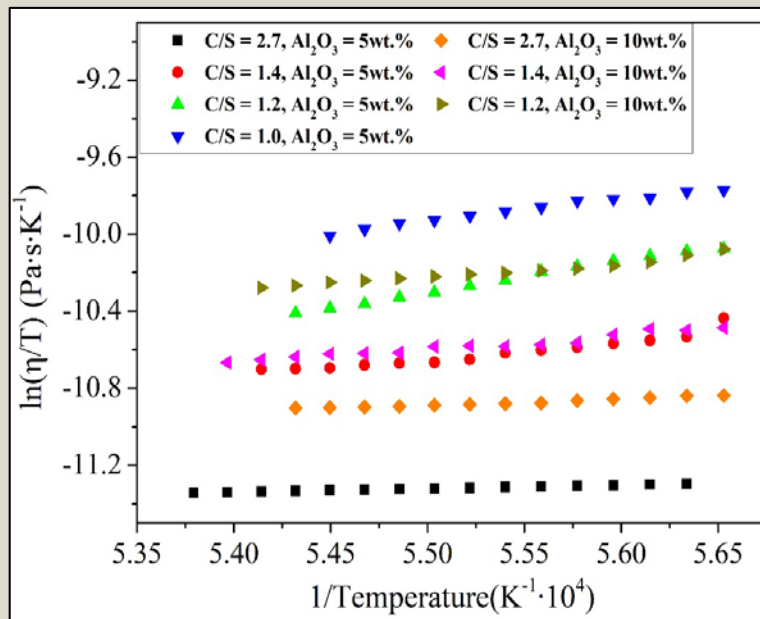
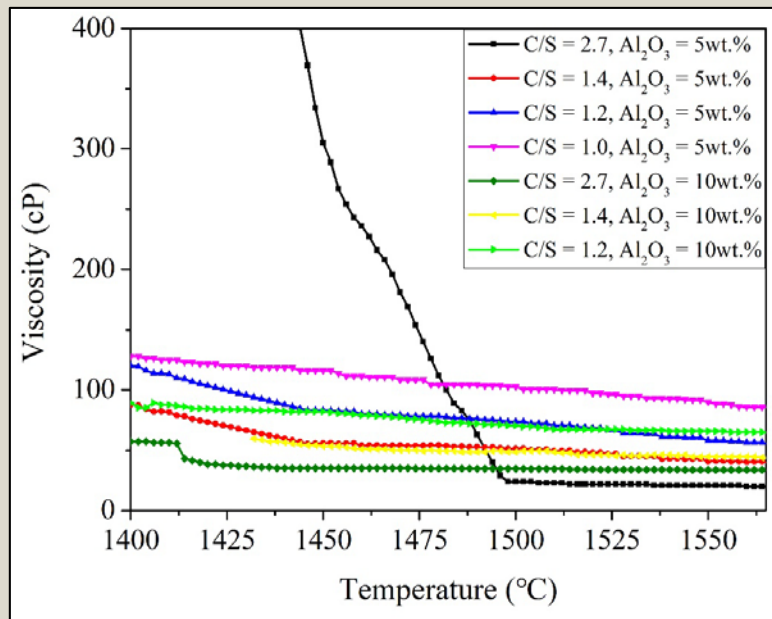
Temperature = 1500°C, FeO = 20%, MgO = 8%



造渣劑配方

Sample	Chemical composition, wt%						Viscosity	
	C/S	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	1550°C, cP	增加比例, %
B1	2.7	40.3	15.1	4.8	5.2	34.6	22	未改質-對照組
B2	1.4	35.4	25.0	5.3	5.4	28.9	42	91
B3	1.2	34.7	29.8	4.8	4.9	25.8	61	177
B4	1.0	35.2	34.8	5.1	4.7	20.2	93	323
B5	2.7	40.4	15.2	5.1	9.8	29.5	25	14
B6	1.4	34.2	24.8	5.5	10.3	25.2	45	105
B7	1.2	35.4	30.3	4.9	10.1	19.3	66	200

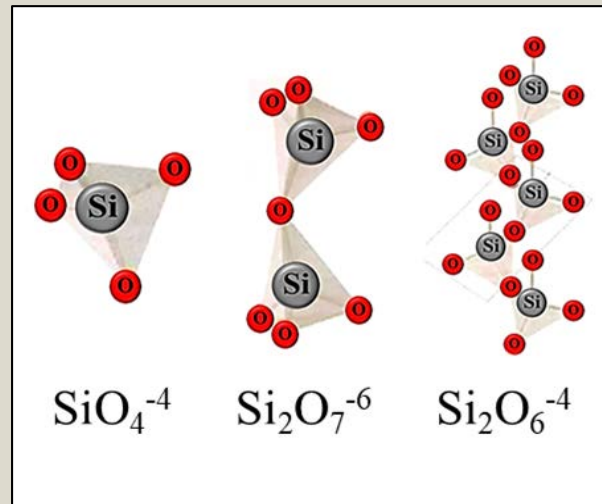
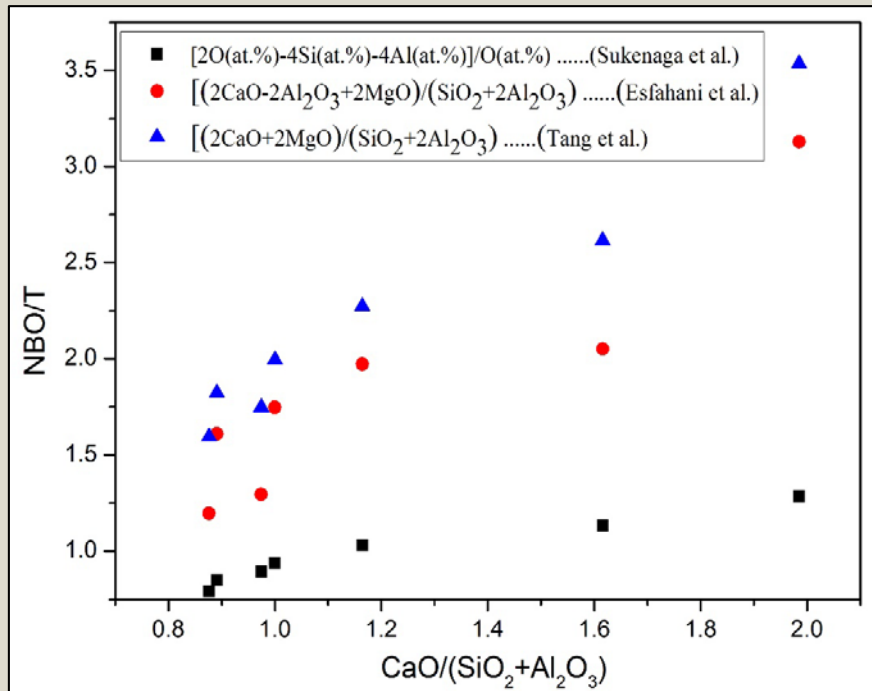
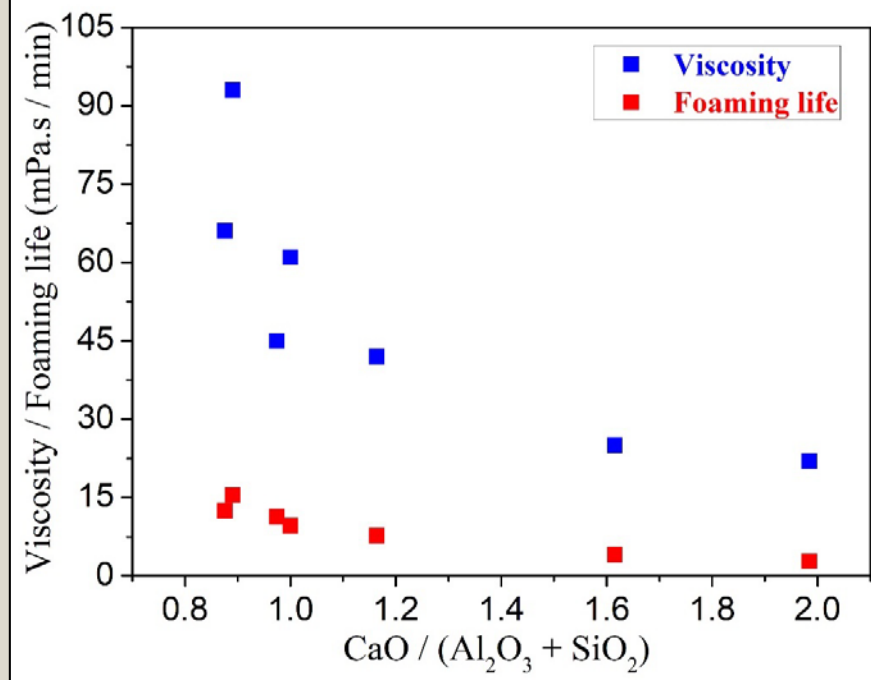
高溫黏度特性



造渣劑配方

Sample	Chemical composition, wt%						Foaming life	
	C/S	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	1550°C, min	增加比例, %
B1	2.7	40.3	15.1	4.8	5.2	34.6	2.6	未改質-對照組
B2	1.4	35.4	25.0	5.3	5.4	28.9	7.7	196
B3	1.2	34.7	29.8	4.8	4.9	25.8	9.6	269
B4	1.0	35.2	34.8	5.1	4.7	20.2	15.5	496
B5	2.7	40.4	15.2	5.1	9.8	29.5	4.0	54
B6	1.4	34.2	24.8	5.5	10.3	25.2	11.3	335
B7	1.2	35.4	30.3	4.9	10.1	19.3	12.4	377

高溫發泡壽命





## 3) 降低電力使用量 (液態渣鍵結之研究成果)

### 非橋氧 液態渣

- 黏度：20~30cP
- 發泡壽命：2.6min

- ✓ 需要大量CO氣體
- ✓ 現場操作簡單
- ✓ 無須考量溫度效應

### 固相析出 造渣劑

- 黏度：100~1000cP
- 發泡壽命：6~15min

- ✓ 無須大量CO氣體
- ✓ 現場操作困難
- ✓ 須考量溫度效應

### Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>改質 液態渣

- 黏度：30~60cP
- 發泡壽命：4~8min

- ✓ 無須大量CO氣體
- ✓ 現場操作簡單
- ✓ 無須考量溫度效應

### SiO<sub>2</sub>改質 液態渣

- 黏度：40~100cP
- 發泡壽命：7~16min

- ✓ 無須大量CO氣體
- ✓ 現場操作簡單
- ✓ 無須考量溫度效應

*Thanks for your attention!*