

出國報告（出國類別：實習）

渦輪燃氣噴流試驗、葉片真空電漿
PVD 及葉片定向性凝固真空鑄造
技術之研究

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：鐘震洲；機械研究專員

派赴國家：德國、瑞士、波蘭

出國期間：107 年 9 月 25 日至 10 月 8 日

報告日期：107 年 12 月 3 日





出國報告審核表

出國報告名稱：渦輪燃氣噴流試驗、葉片真空電漿 PVD 及葉片定向性凝固真空鑄造技術之研究

出國人姓名(2人以上,以1人為代表)	職稱	服務單位
鐘震洲	機械研究專員	台灣電力公司 綜合研究所
出國類別	<input type="checkbox"/> 考察 <input type="checkbox"/> 進修 <input type="checkbox"/> 研究 <input checked="" type="checkbox"/> 實習 <input type="checkbox"/> 其他_____ (例如國際會議、國際比賽、業務接洽)	

出國期間：107年9月25日至107年10月8日 報告繳交日期：107年12月3日

出國人員 自我審核	計畫主辦 機關審核	審核項目
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1.依限繳交出國報告
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2.格式完整(本文必須具備「目地」、「過程」、「心得及建議事項」)
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3.無抄襲相關資料
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4.內容充實完備.
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5..建議具參考價值
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6..送本機關參考或研辦
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	7..送上級機關參考
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	8..退回補正,原因:
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(1) 不符原核定出國計畫
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(2) 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(3) 內容空洞簡略或未涵蓋規定要項
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(4) 抄襲相關資料之全部或部分內容
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(5) 引用相關資料未註明資料來源
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(6) 電子檔案未依格式辦理
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(7) 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	9..本報告除上傳至出國報告資訊網外,將採行之公開發表:
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(1) 辦理本機關出國報告座談會(說明會),與同仁進行知識分享。(107.11.5 完成)
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(2) 於本機關業務會報提出報告
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(3) .其他
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10.其他處理意見及方式:

報告人：  單位主管：  主管處主管：  總經理：  副總經理：

說明：
 一、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
 二、審核作業應於報告提出後二個月內完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「公務報告資訊網為原則」。

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：渦輪燃氣噴流試驗、葉片真空電漿 PVD 及葉片定向
性凝固真空鑄造技術之研究

頁數 47 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台電 人資處/陳德隆/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

鐘震洲/台灣電力公司/綜合研究所/機械研究專員/(02)8078-2219

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：107.9.25~107.10.8 出國地區：德國、瑞士、波蘭

報告日期：107 年 12 月 3 日

分類號/目

關鍵詞：優化設計、多重圓角、電漿 PVD、PS-PVD、方向性凝固、
單晶

內容摘要：(二百至三百字)

本次出國分別至德國、瑞士及波蘭進行三個主題之研習。在德國 Aachen 拜訪 Dr. Anis 期間，從 CAD 設計、CAE 優化到實際製造後的效能驗證，學習並了解渦輪機組件的優化概念。而在拜訪瑞士的 Oerlikon Metco 公司期間，學習並了解近年來較新的真空電漿噴鍍技術，即 PS-PVD 製程，此製程的特色可以幫助解決傳統葉片熱噴塗時所遇到的技術瓶頸。最後則是拜訪波蘭的 SECO/WARWICK (RETECH) 公司，從基本的鑄造凝固理論、凝固的巨觀與微觀偏析，到 SC/DS/EC 真空澆鑄爐的設計原理，可以對定向性凝固真空鑄造之製程原理有更加深層之認識。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網

目 錄

出國報告審核表.....	I
出國報告提要.....	II
目錄.....	III
一、 出國緣由、行程及主要任務.....	1
二、 先進渦輪組件之噴流實驗及原理.....	3
三、 真空電漿 PVD 技術實習.....	10
四、 先進定向性凝固真空鑄造之技術實習.....	19
五、 心得與建議.....	46
六、 參考文獻.....	47

一、 出國緣由、行程及主要任務

出國緣由：

近年來國外 Gas turbine 製造公司或研究中心，追求高效率燃燒及低 NOx 含量，使機組所使用之超合金葉片易因高溫潛變、高溫疲勞及熱疲勞等問題而引起相關損傷及龜裂問題。希望經由此次出國實習，學習國外先進真空電漿 PVD 及定向性凝固真空鑄造對於葉片先進塗層及新製葉片之實務應用，並了解渦輪組件之流體實測過程，藉以提昇本所葉片再生技術及葉片新品製作之品質。此次出國研習的重點如下：

- 一、 至德國 Aachen 之先進渦輪噴流實驗室，學習新製或再生後之渦輪組件之熱流實驗方式。
- 二、 至瑞士 Wohlen 之 Oerlikon Metco 公司，了解國外先進真空電漿 PVD 之技術發展，藉由國外之技術與經驗交流，學習真空電漿 PVD 技術對於渦輪機葉片再生及新製造之核心應用技術。
- 三、 至波蘭之 Retech 公司，了解國外先進定向性凝固真空鑄造之技術發展，包含鎳基超合金材質之等軸晶及方向性凝固之技術，收集並吸取國外專家之相關經驗技術，以提升本所未來發展精密鑄造之技術能力。

本次出國案件係應用 107 年度出國計畫第 17 號，出國核定書為 1070171 號，電人字第 1078099663 號函。

出國行程及主要任務：

本次出國期間自 107 年 9 月 25 日至 10 月 8 日，主要的任務為了解國外先進渦輪噴流實驗、真空電漿 PVD 技術、定向性凝固真空鑄造技術之發展，以應用於日後本公司發展燃氣渦輪機組件之新製需求。主要任務內容概要說明於下表：

項次	前往機構	工作內容概況
1	Ingenieurbue ro Dr. Anis Haj Ayed	學習先進渦輪組件之噴流實驗及原理。
2	Oerlikon Metco	學習真空電漿 PVD 技術對於渦輪機葉片再生及新製造之核心應用技術。
3	SECO/WARWICK (RETECH)	學習國外先進定向性凝固真空鑄造之技術發展，包含鎳基超合金材質之等軸晶及方向性凝固之技術。

二、 先進渦輪組件之噴流實驗及原理

(一) Dr. Anis Haj Ayed 介紹

Dr. Eng. Anis Haj Ayed 是一位氣(汽)力渦輪相關領域的專家，2005~2017 年之間在德國的 B&B AGEMA GmbH 當任上述相關領域之技術總監。目前獨立當任顧問之角色，於 Aachen 工業大學(RWTH Aachen)附近之研究聚落中心開設顧問辦公室，與歐洲、亞洲區域之先進渦輪及燃燒等研究中心一起進行專案，並為世界各地的電廠客戶提供客製化顧問之服務。

(二) 顧問服務之簡介

1. Upgrade / retrofit of existing gas turbines and steam turbines
2. Review of maintenance schedules
3. Review of repair and refurbishment procedures
4. Review of repair and refurbishment procedures
5. Development of repair concepts for gas turbine parts
6. Audit & evaluation of supply chains (new parts and repair)
7. Development, review and evaluation of tender specifications
8. Review and evaluation of technical proposals
9. Customer defense based on detailed technical knowledge

(三) 德國 Aachen 附近研究資源的整合

德國有許多與先進能源或製造相關的研究機構或設施都集中 Aachen 工業大學(RWTH Aachen)附近。與氣(汽)力渦輪相關領域的研究資源有高壓噴射燃燒實驗室、金屬積層製造中心

(ACAM)、先進鑄造(單晶、熱處理、鑄造模擬等)研究中心及致力於低熱傳導絕熱塗層技術的 Forschungszentrum Jülich 研究機構。Dr.Anis 有提到德國政府也是會有提供補助經費來贊助企業或研究機構的研發活動，但德國政府會有一個名叫 FVV 的機構來負責整合大型的研究專案，把大型專案區分成沒有重複的中小型專案再依各企業或研究機構的專長屬性交由他們去申請經費執行。這樣的好處是可以資源整合、不會有重複研究的情形，整個國家的科技發展也可以朝一個很明確的主方向進行。

(四) 優化燃氣渦輪機之概念討論

在與 Dr. Anis 討論的過程中，理解先進的燃氣渦輪機通常會透過一系列有系統的優化過程來探索其設計及工程極限，圖 1 所顯示為燃氣渦輪機經常被優化研究的主題，同時需要不同組件間的完美匹配，才能將整體效率最大化。在先期設計階段就必需要考量到不同組件的交互作用及多重參數的優化，譬如以下幾個面向：

1. 空壓段、燃燒段、渦輪段的主氣流道及二次風系統(Second Air System, SAS)之交互作用。
2. 空氣動力學 1D/2D 設計、二次風系統及熱力學的交互作用。
3. 二次風系統與冷卻動靜葉片的交互作用。
4. 動靜葉片的冷卻技術及材料強度的相互關係。

5. 燃燒器外部冷卻及二次風系統風量的相互關係。
6. 機組啟動期間於特定邊界條件的參數變化。
7. 二次風系統的暫態情況(包含啟動順序和加載率)對間隙和疲勞壽命的影響。

以上每個面向都可以透過 3D 模型完成共軛熱傳(CHT)、計算流體動力學(CFD)、有限元素法(FEM)等計算，以進行詳細設計，並使用分析結果來調整或擬合初始設計，以達到優化的目的。此外，運用更先進的工具可以更進一步解決艱深工程問題，譬如葉片運轉的震動和阻尼問題、熱聲振盪(thermo-acoustic oscillations) 問題、跨音速壓縮級葉片的逆向設計、渦輪機氣流流線的優化設計等。

(五) 葉片鑄件強度設計概念

有關葉片的翼型負載和壽命特性的關聯知識，特別是動態運轉時所承受的溫度與應力的三維分佈，為製造高品質葉片提供了實用的參考資訊。譬如圖 2 翼型 leading edge 根部易受低週疲勞(LCF)影響的翼型區域需要獲得較小尺寸的晶粒以更好地承受低週疲勞損壞。而翼型 trailing edge 根部易受潛變影響的區域則需要獲得較大尺寸的晶粒以更好地承受潛變破壞。類似這樣的關聯知識對於新製作葉片的設計思維是有價值的，並且提供了接近 OEM 等級的製造過程的可能性。

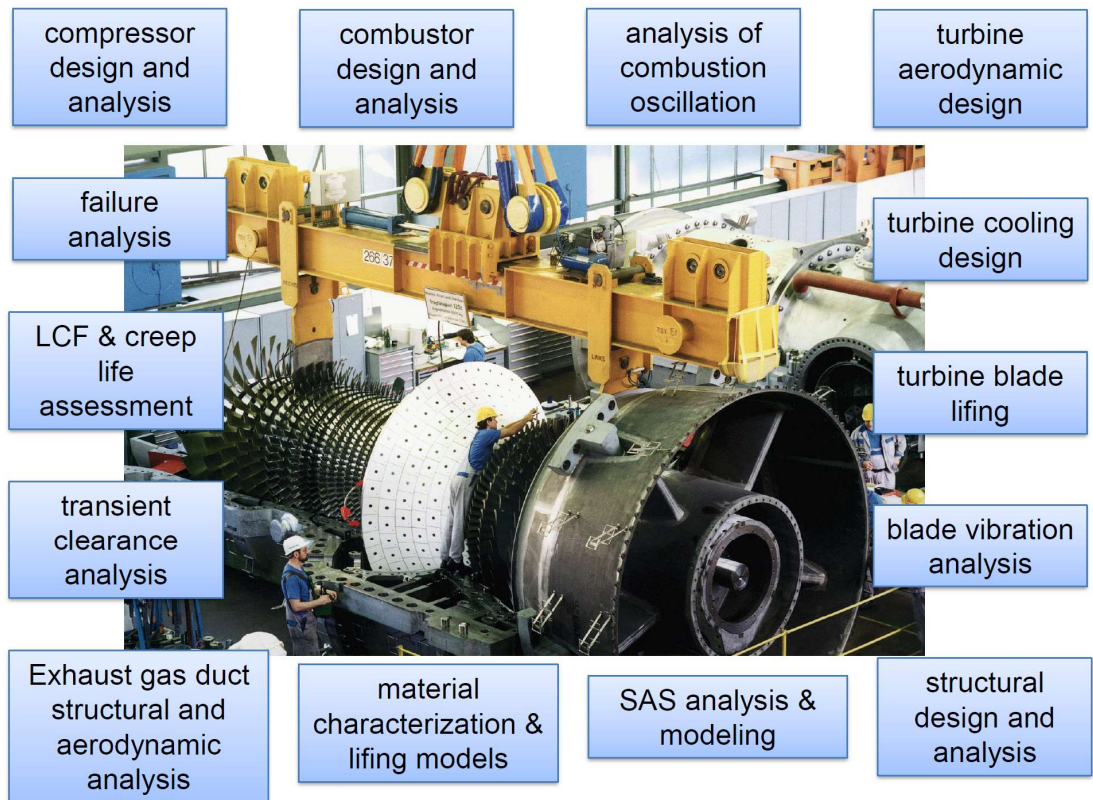


圖 1 優化燃氣渦輪機常見之研究主題。

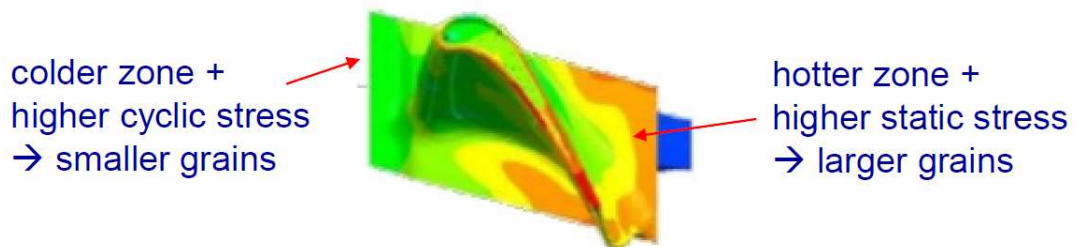


圖 2 渦輪機葉片運轉時之溫度與應力分佈情形。

(六) 優化汽力渦輪機之概念討論

和燃氣渦輪機技術相似，先進的蒸汽渦輪機技術會將材料和設計的潛力充分利用，以使效率和操作靈活性極大化。此外，多級蒸汽輪機的經典設計通常區分為高反動度和低反動度葉片，通常會根據常用的渦流定律來進行設計。譬如在概念設計和細部三維設計時就融入可多重參數式優化之模型，並且要考慮渦輪機入口與出口條件、級與級之間、靜葉與動葉之間的特定要求，以符合最佳渦流定律。如此透過優化可以將獲得最佳級數、最佳軸向負載分佈、各級最佳流動模型、級與級之間的匹配。

蒸汽輪機的結構設計是必須結合壽命、彈性和可靠性的要求，當這些要求越來越高標準時，亦決定了汽輪機產品的競爭力。另一方面是確保渦輪機結構滿足預期的空氣動力學性能，譬如高溫環境中的熱幾何形狀要符合理想的流動路徑幾何形狀，特別是有關於徑向間隙、翼型形狀和流動能力。完善的結構設計通常會考慮到以下幾個面向：

1. 詳細分析熱膨脹以決定暫態和穩態間隙，同時考量到不同渦輪機組件（內殼、外殼、轉子、翼型、軸承）之間的相互作用。
2. 詳細分析熱負荷和機械負荷，以確定疲勞和潛變壽命。
3. 詳細分析機組啟動流程和關鍵部件，以確定啟動的策略和控制邏輯（類似於 X-criteria），並改善機組於冷機、暖機、熱

機時的靈活度及啟動時間。

4. 在滿載和部分負載條件下，詳細分析葉片於獨立及組合後的振動特性，特別是低壓汽輪機葉片暴露在顫振、風阻或是共振的情況下。可以應用特殊的方法去研究這些現象並確保葉片安全，分析方法譬如顫振分析、葉片阻尼分析、風阻分析等。
5. 詳細分析轉子動力學，亦須考慮轉子的連結器(coupling)，軸承特性和密封(sealing)的交互影響。
6. 詳細確定裝配公差和初始間隙，同時亦須考慮極端的操作條件以確保運轉安全。

(七) 於 CAD 設計葉根 R 角的多重相切圓角特徵

在與 Dr. Anis 討論時，他有提出一張投影片說明為了降低渦輪機在運轉時，於翼面靠近葉根部位應力過大的情形，通常會將翼面與平台交接的葉根 R 角再加大，但如果是只有導單一圓角時，會使平台區域的 R 角肉厚過多而提升氣流通過之不穩定因素，所以通常會在導該處的圓角時會用雙相切圓角來進行。

要如何用參數式的方法來導多重相切圓角其實是敝人這幾年來一直在找尋的答案，要多謝 Dr. Anis 的不藏私教學，讓我在那裏很快的領悟設計方法，回國後也成功導出整圈完整 3 個相切圓的葉根 R 角如圖 3。

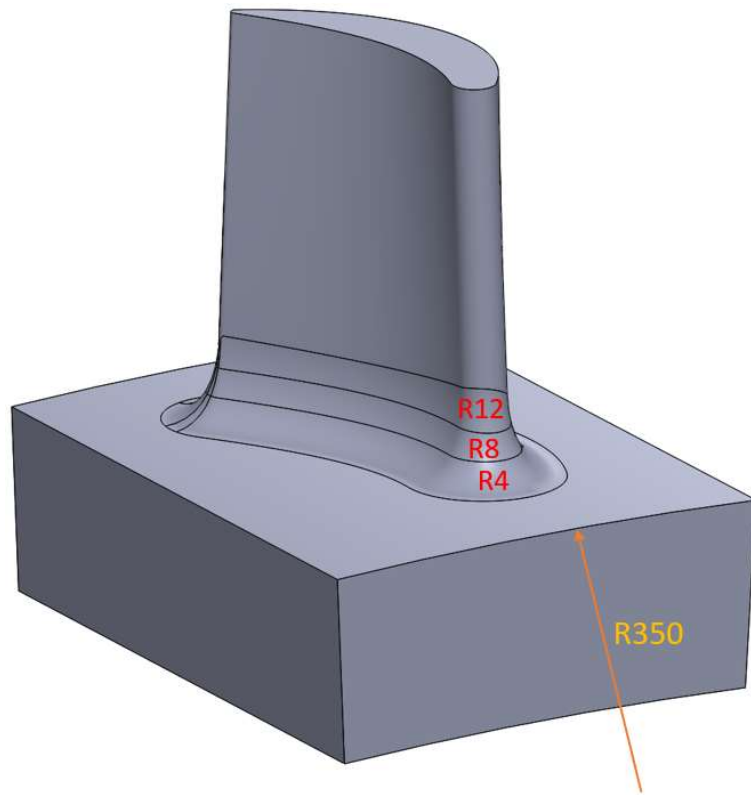


圖 3 葉根 R 角的多重相切圓角特徵示意圖。

三、 真空電漿 PVD 技術實習

(一) Oerlikon Metco 公司簡介

根據 Oerlikon Metco 官方網頁的公司歷史介紹，最初期是由 Rea Axline 和 5 名員工於 1933 年成立 Metco 公司於美國新澤西，經過三四十年的發展，逐漸將熱噴塗相關事業擴張到歐洲、墨西哥、巴西、澳大利亞、日本、新加坡等地。而在 1970 年時期，瑞士的 Plasma Technik AG 創建於 Wohlen，主要產品亦是生產高良率的高效率熱噴塗系統。1985~1991 年，瑞士 Sulzer 集團陸續收購在熱噴塗界知名的 Plasma Technik AG、AMI、EPI (Electro-Plasma Inc)，更在 1994 年完成收購了 Metco 公司，將所有材料和表面技術公司納入 Sulzer Metco 公司旗下，使其成為航空、發電、汽車、紡織、印刷、生醫等行業的熱噴塗供應和服務之全球性公司。1995 年到 2012 年間，Sulzer Metco 公司亦不斷的透過收購在材料和表面技術知名的公司來更加強化各領域的技術布局，被收購的公司譬如有 Salzgitter、QCoat、Eldim、Interturbine Coatings B. V.、Euroflamm Select、DB 薄膜公司、WOKA 公司、Ambeon 公司、OSU 機械製造公司、Wick Specialties 公司、Bekaert 公司類金剛石塗層事業部、CGT Cold Gas Technology GmbH、Aircraft Philipp Ampfing GmbH、LLC、Thermoset 等公司。2014 年，Oerlikon 集團完成了 Sulzer 集團旗

下 Metco 所有事業的收購，於是原本的 Sulzer Metco 公司更名為 Oerlikon Metco 公司，目前整個 Oerlikon 集團約有 12,700 名員工，年營業額約達 29 億瑞士法郎。

(二) 熱噴塗設備分類

Oerlikon Metco 在熱噴塗的領域耕耘了數十年，建立了各式各樣的熱噴塗技術。該公司建立了如圖 4 的分類，將熱噴塗分為三大領域，一個是使用燃料助推的燃燒噴射型(Combustion)，一個是使用高能量密度光束(Beam)，第三個是電極+氣體離子化型(Electrical Gas Discharge)。每一個領域本所都有涉略，譬如 **High-Velocity Oxy-Fuel (HVOF; 高速火焰噴鋸)**、**Laser Cladding (雷射披覆)**、**Atmospheric Plasma Spraying (APS; 大氣電漿噴鋸)**、**Suspension Plasma Spraying (SPS; 懸浮漿液電漿噴鋸)**及 **Low-Vacuum Plasma Spraying (LVPS; 真空電漿噴鋸)**等，每一種噴鋸製程都有其特色和適合應用的場合，以下為這些製程的簡當說明[1]：

1. HVOF: 噴射火焰將金屬顆粒加熱並推動至接近超音速去撞擊工件。此工法可以獲得非常緻密的塗層，但塗層較易有氧化的問題。
2. Plasma Spraying: 在不同的噴鋸需求條件下(譬如真空或大氣環境)，將陶瓷或金屬等原料顆粒溶解於超高溫電漿噴流，並

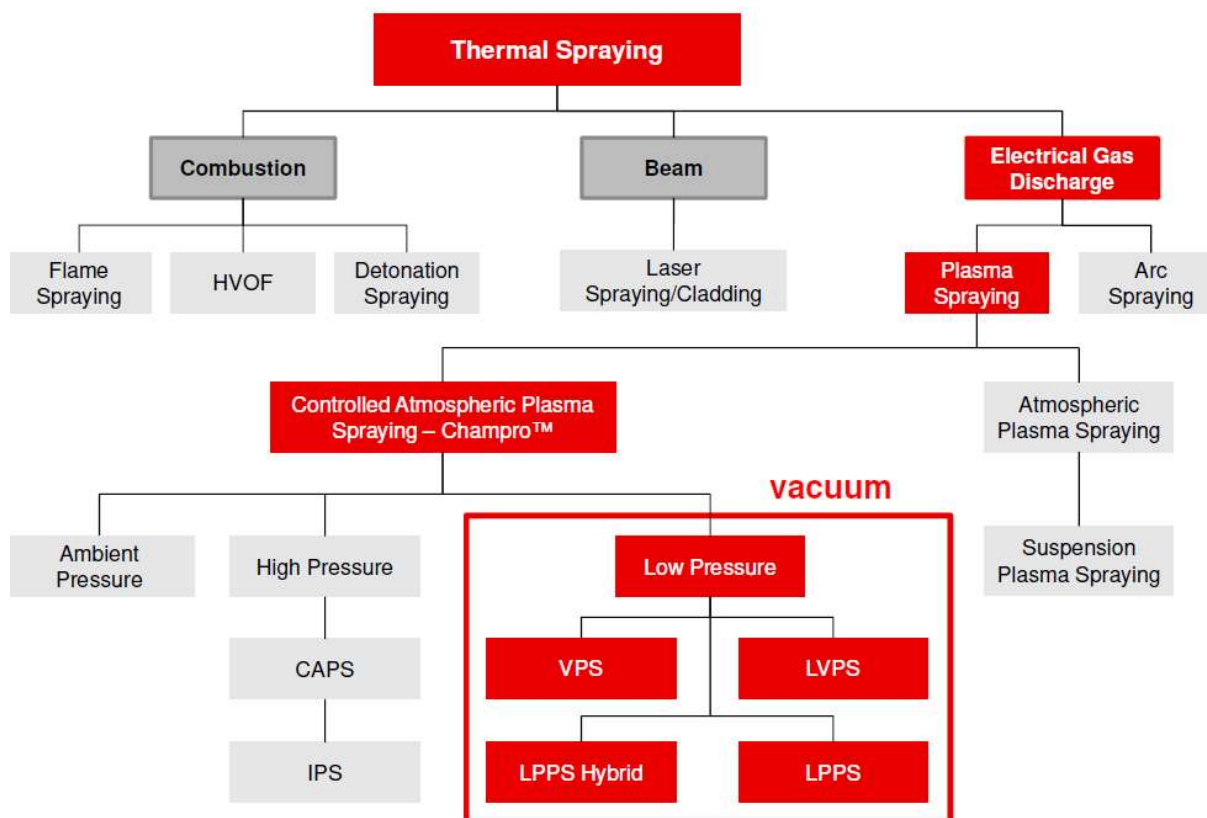


圖 4 Oerlikon Metco 公司對於熱噴塗領域的分類。

噴附於母材表面。電漿噴鋅相較於其他噴鋅更具彈性，因其具有足夠的能量去溶解各種陶瓷或金屬原料顆粒。

3. Suspension Plasma Spraying: 粉體懸浮液由分散在液體介質中的固體顆粒組成。在熱噴塗應用中，這些固體顆粒是待被噴鋅沉積的塗層材料。液體介質的功能是將顆粒從漿料桶輸送到噴鋅槍。噴鋅用的粉體懸浮液必須具有高度的粉體散布均一性，以確保塗層堆積的穩定性、重現性及物理性質。

本次實習除了了解各式的熱噴塗技術外，亦著重於較新技術之發展應用，以下 LPPS-Hybrid 為此次拜訪 Oerlikon Metco 學習的重點。

(三) LPPS-Hybrid

以圖 4 來看，LPPS-Hybrid 是屬於紅色框區域的真空電漿噴鋅系列之製程。根據此次拜訪的 Dr. Alexander Barth 之解釋，VPS 系列是屬於批次(Batch)生產，而 LPPS 和 LVPS 是屬於 in-line 型的生產，以上的真空度都在 30mbar 左右。而較新一代的製程是 LPPS-Hybrid，腔體型式類似於 LPPS，主要差異在於真空度要求更高，約在 0.5~1 mbar，且噴槍的自由度也增加至 5 軸，相關之比較整理如圖 5。

而 LPPS-Hybrid 之所以有” Hybrid”的字樣，表示其有多種複合的功能，包含 PS-TF、PS-PVD 以及 PS-CVD 等。PS-TF 的



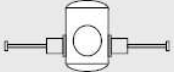
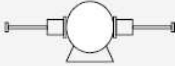
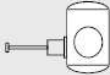

	Plasma gun	Vacuum chamber arrangement	Pressure range	Gun manipulator, loading process
VPS	F4-VB	horizontal 	>30 mbar	Process: batch Parts: planetary Gun: robot
HC-VPS	F4-VB	horizontal 	>30 mbar	Process: in-line Parts: load lock, sting Gun: robot
LPPS	O3CP	vertical 	>30 mbar	Process: in-line Parts: load lock, sting Gun: 3-axe CNC
LVPS	O3CP	horizontal 	>30 mbar	Process: in-line Parts: load lock, sting Gun: 4-axe CNC
LPPS Hybrid	O3CP	vertical 	>0.5-1 mbar	Process: in-line, batch Parts: load lock, sting Gun: 5-axe CNC
LPPS Hybrid "VPS System"	O3CP	horizontal 	>0.5-1 mbar	Process: in-line, batch Parts: planetary Gun: robot or CNC

圖 5 各式真空電漿噴鋅製程之分類比較。

TF 是指 Thin Film，較適用於燃料電池(SOFC)的電極板熱噴塗作業。PS-TF 屬於溶滴片狀式的堆疊，其噴塗距離可達 1m 以上，根據文獻的測試結果[2]，使用 PS-TF 熱噴銲後的電極板，因其塗層緻密，可以增加單位面積的發電效率達 15%。另外，PS-TF 對於 LaSrCoFeO (LSCF)、LaSrMnO (LSM)及 YSZ 亦有緻密塗層的表現。

(四) 真空電漿 PVD

根據如圖 6 的文獻資料[3]，過去 45 年間燃氣渦輪機的入口溫度大約從 900°C 提升至 1500°C，其中葉片母材材質的演進貢獻了約 120°C，冷卻相關技術的提升貢獻了約 350°C，絕熱塗層相關技術的提升貢獻了約 120°C。由於冷卻技術需要使用到相對低溫(約 400 多°C)之壓縮空氣，如果能再加強絕熱塗層的隔熱效果及使用壽命，則可以在同樣的運轉溫度條件下，因為減少冷卻空氣的使用量而達到機組效率更提升的效果。

PS-PVD 是在高真空環境下，以一種類似物理氣相沉積的方法去進行電漿噴銲的製程，對於 Oerlikon Metco 而言，是屬於 LPPS-Hybrid 設備的其中一種功能。如圖 7 所示，工件先在左側的預備艙進行預抽真空，待真空度與右邊主艙差不多時，再打開之間的隔閘(Shutter) 將工件推入主艙。工件可以進行旋轉的動作，而上方的電漿噴銲槍則可進行搖擺的動作，主艙的外側則有

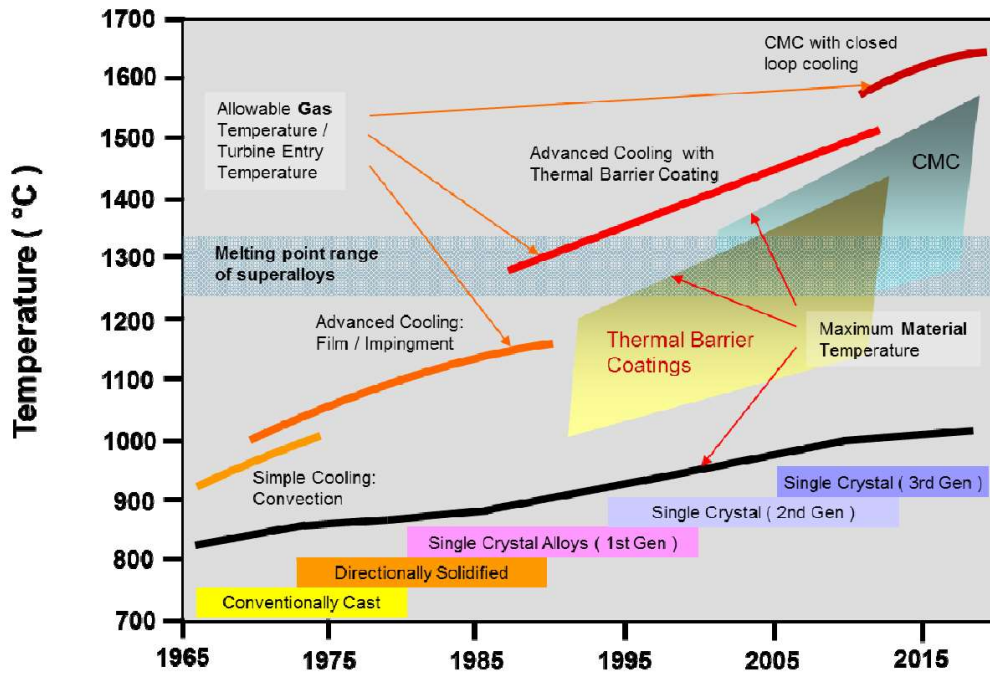


圖 6 渦輪機葉片相關材料技術演進及與燃氣溫度提升之關係[3]。

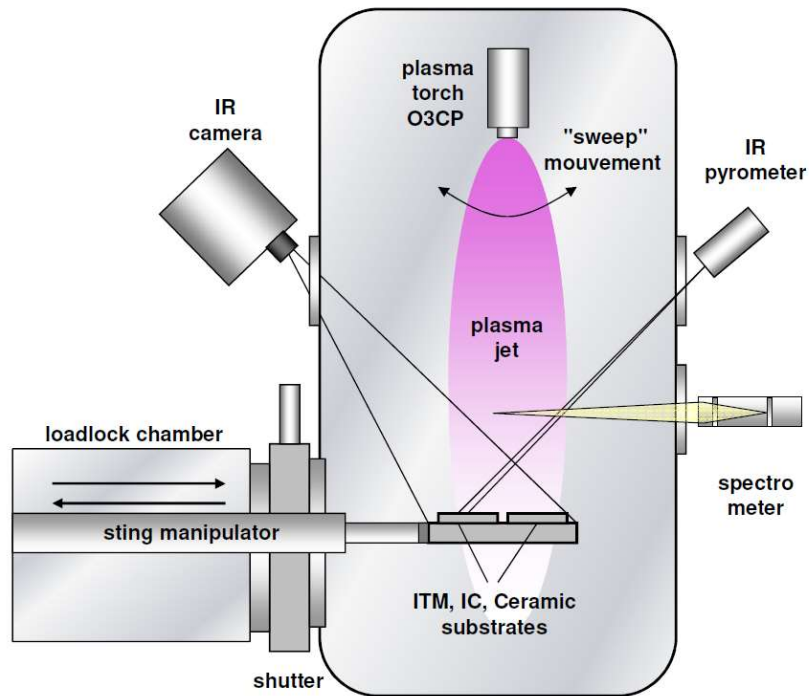


圖 7 LPPS-Hybrid 設備主要元件示意圖。

可穿透特殊玻璃進行工件溫度量測的 IR Pyrometer、進行工件製程監視的 IR Camera 及進行 Plasma Jet 流場觀察紀錄的 Spectro Meter，有以上各種視覺及溫度監控裝置，才有可靠的數據以作為製程改善之參考。

用 PS-PVD 所產生的熱噴塗結果，其塗層有一個很重要的特色，即產生類似 EB-PVD (電子束-物理氣相沉積)的柱狀結構(Column Structure)。此帶有柱狀結構的塗層可以促進在高溫環境中發生垂直微裂縫的情形，而盡量不發生容易使塗層剝落的橫向裂縫，以延長工件在高溫中的使用壽命。

為何 PS-PVD 可以產生柱狀結構的塗層呢？參考圖 8 的示意圖，左圖是把塗層的原料顆粒加熱至液態滴狀，在噴射撞擊至工件表面後會以扁平狀的形貌堆積於工件。而右圖是把塗層的原料顆粒加熱至氣態狀，在適當的噴塗參數及極性控制下，可以讓氣狀的粒子慢慢附著於工件表面，並以垂直的方向生長。

由於 PS-PVD 噴塗距離長達 1m 以上，在適當極性控制及特殊迴轉機構、夾具的輔助下，可以讓噴塗氣流沿著工件表面轉向，進而達到複雜曲面的工件亦能達到均勻噴塗的效果。且對於葉片既有的冷卻孔洞，亦能減少傳統噴鋸會有粉末堆積塞孔的情形。

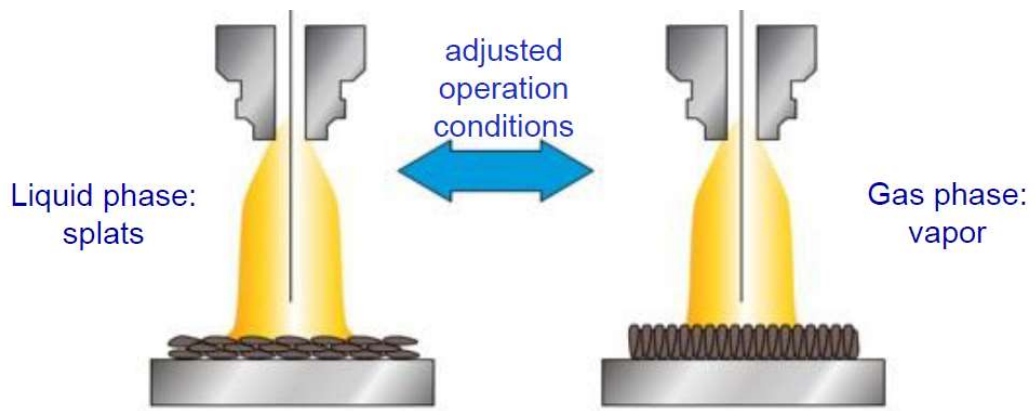


圖 8 液相式與氣相式熱噴塗的結果差異。

四、先進定向性凝固真空鑄造之技術實習

(一) RETECH Systems LLC 和 SECO/WARWICK 的合作關係

RETECH Systems LLC 是一家美國公司，其研發與設備製造總部位於美國加州的 Ukiah。RETECH 成立於 1963 年，是以發展先進鑄造設備為主，SC/DS/EC 真空澆鑄爐為其主力產品，與德國 ALD 等知名同業在單晶與方向性凝固之真空鑄造領域共同競爭。

SECO/WARWICK 是一家波蘭公司，其研發與設備製造總部位於波蘭的 Swiebodzin。SECO/WARWICK 成立於 1985 年，是以發展真空熱處理設備為主。2007 年時，SECO 與 RETECH 簽訂策略聯盟，展開一連串的合作關係。直到 2011 年，RETECH 由 SECO 百分之百收購，礙於國情及各自公司利益，SC/DS/EC 真空澆鑄爐這塊領域依然是兄弟登山，各自努力。

(二) 基本鑄造凝固理論之複習

1. 結晶理論

(1) 凝固(Solidification)過程分為結晶(Nucleation)及生長(Growth)過程。其中結晶過程會決定後續的晶粒尺寸(Grain Size)及晶粒號數(Grain Number)，而成長過程會決定結晶的形態(ex.等軸晶、方向性凝固、單晶等)。

(2) 上述結晶(Nucleation)的種類又分為均質結晶(Homogeneous

nucleation)及異質結晶(Heterogeneous nucleation)。其中均質結晶指的是結晶核心為與液相相同之材質，而異質結晶是指結晶核心為與液相不同之材質，譬如從模壁或雜質開始凝核生長。大部分的鑄造幾乎都是屬於異質結晶。

(3)自由能(G)的概念：(參考圖 9)

$$G = H - TS \text{ (as } T \text{ increases, } G \text{ decreases)}$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$$\text{At equilibrium, } \Delta G = 0$$

$$\text{At } T_m, G_L = G_S, \text{ at } T_b, G_L = G_V$$

The equilibrium phase is the one with lowest G.

在任意溫度下，自由能(G)越低的相越安定。意即在自然情況下，系統會越往自由能(G)越低的相發展。

(4)體積自由能 ΔG_V 、潛熱 L_m 、過冷度 ΔT 、熔點 T_m 之關係：

$$\Delta G_V = \Delta H - T\Delta S \rightarrow \Delta G_V = G_L - G_S = (H_L - H_S) - T(S_L - S_S)$$

$$\text{其中 } H_L - H_S = L_m \text{ (潛熱)}$$

$$\text{當 } T=T_m \text{ 時, } \Delta G_V = 0 \rightarrow S_L - S_S = \frac{L_m}{T_m}$$

$$\therefore \text{當 } T < T_m \text{ 時, } \Delta G_V = L_m - T \times \frac{L_m}{T_m} \rightarrow \Delta G_V = \frac{L_m(T_m - T)}{T_m}$$

$$\rightarrow \Delta G_V = \frac{L_m \times \Delta T}{T_m} \quad (\text{過冷度 } \Delta T \text{ 越大, 體積自由能 } \Delta G_V \text{ 越大)}$$

(5)均質結晶(Homogeneous nucleation)

A. 影響 ΔG 的因素有體積自由能 ΔG_V +表面能量變化。(如圖 10)

$$B. \Delta G = G_2 - G_1 = -V_S \Delta G_V + A_{SL} \gamma_{SL} = -\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_V + 4\pi r^2 \gamma_{SL}$$

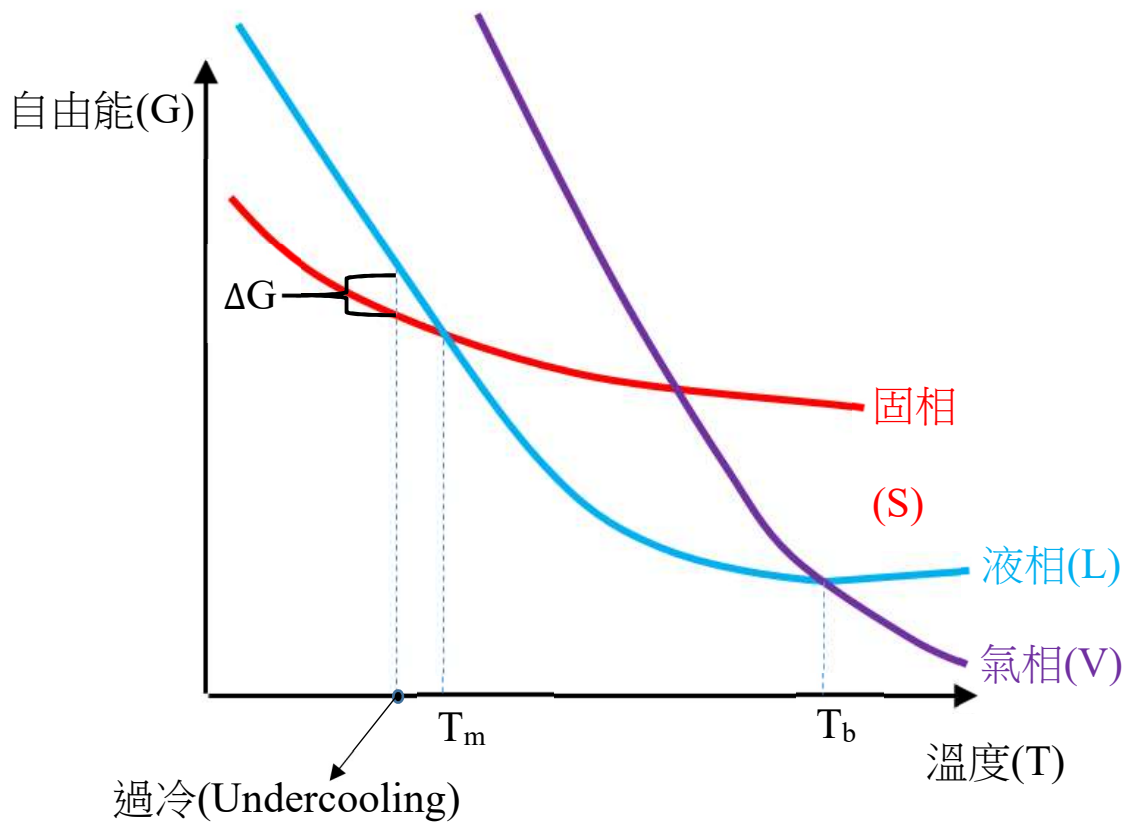


圖 9 三相、自由能與溫度之關係圖。

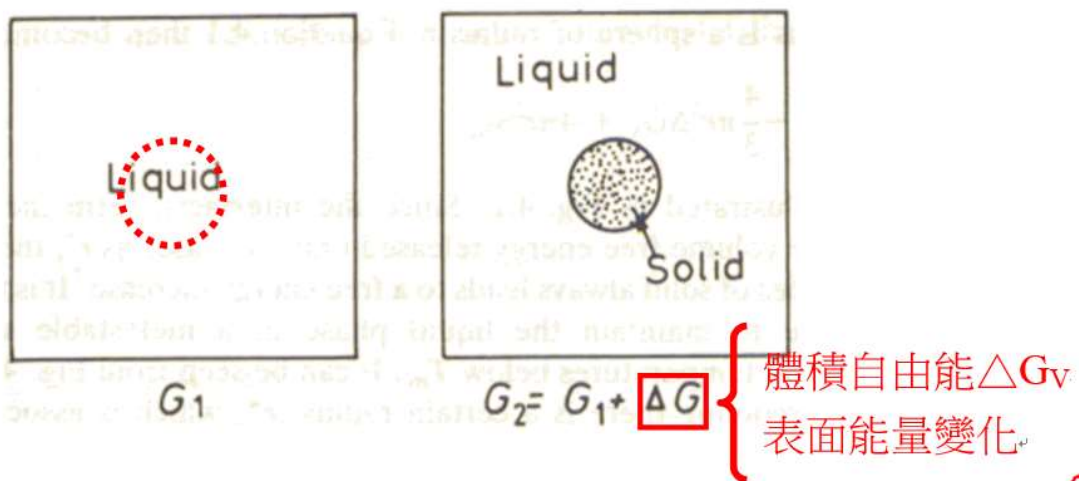


圖 10 均質結晶過程之自由能變化及其組成。

- C. r^* (critical nucleus size) 會出現在當 $\frac{\partial \Delta G}{\partial r} = 0$ 時， $\rightarrow \frac{\partial \Delta G}{\partial r} = -4\pi r^2 \Delta G_V + 8\pi r \gamma_{SL} = 0$ 。所以， $r^* = 2\gamma_{SL} / \Delta G_V$ ，物理意義：若要均質結晶，原子需至凝結到 $r=r^*$ 時，才有機會繼續穩定成長。(可由圖 11 理解)
- D. 又因為 $\Delta G_V = \frac{L_m \times \Delta T}{T_m}$ ，代入上式得 $r^* = (2\gamma_{SL} \cdot T_m) / (L_m \cdot \Delta T)$ ，代回第 1 式得臨界自由能 $\Delta G^* = (16\pi\gamma_{SL}^3 \cdot T_m^2) / 3(L_m \cdot \Delta T)^2$
- E. 可把(D)的方程式繪製成如圖 12，其物理意義為：當 $\Delta T \uparrow$ 時， $r^* \downarrow$ ，表示每個結晶長一點點就過關(成功)了，就可以繼續成長。另外當 $\Delta T \uparrow$ 時， $\Delta G^* \downarrow$ ，表示每個成功結晶所需的臨界自由能變小。
- F. 一般而言，過冷度 ΔT_{homo} 約 $= 0.2T_m$ 時，才有機會發生均質結晶。

(6) 異質結晶(Heterogeneous nucleation)

- A. 如圖 13 所示，影響 ΔG 的因素有體積自由能 ΔG_V 、表面能量變化、介面能量變化(Mold-L \rightarrow Mold-S)。
- B. 異質結晶的臨界自由能 $\Delta G^*_{\text{hetero}} = 4\pi\gamma_{SL}^3(2-3\cos\theta + \cos^3\theta) / 3\Delta G_V^2$
- C. $\Delta G^*_{\text{hetero}} / \Delta G^*_{\text{homo}} = \frac{1}{4} (2-3\cos\theta + \cos^3\theta)$ ，依上式當 $\theta = 180^\circ$ 時(與模壁只有點接觸的圓球狀)， $\Delta G^*_{\text{hetero}} = \Delta G^*_{\text{homo}}$ ，此不太可能。當 $\theta = 0$ 時， $\Delta G^*_{\text{hetero}} \ll \Delta G^*_{\text{homo}}$ ，極易發生異質結晶。
- D. 大部分工程材料的結晶都是屬於異質結晶，較低的接觸角 θ 及較粗的模具內壁，會有助於異質結晶發展。在添加接種劑及矽化劑時是有條件的，其原子鍵結型式、鍵結強度需與溶液材質

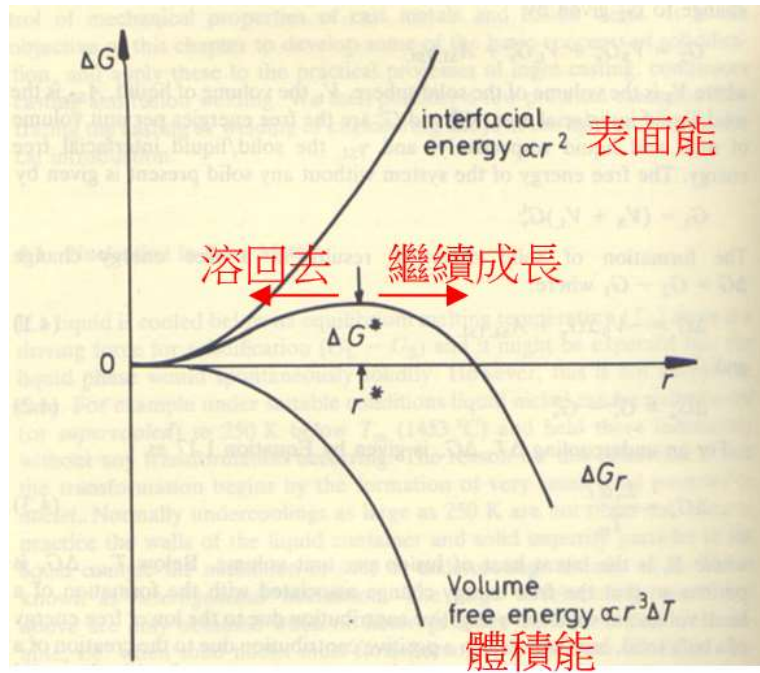


圖 11 均質結晶過程之臨界凝核尺寸及臨界自由能之關係。

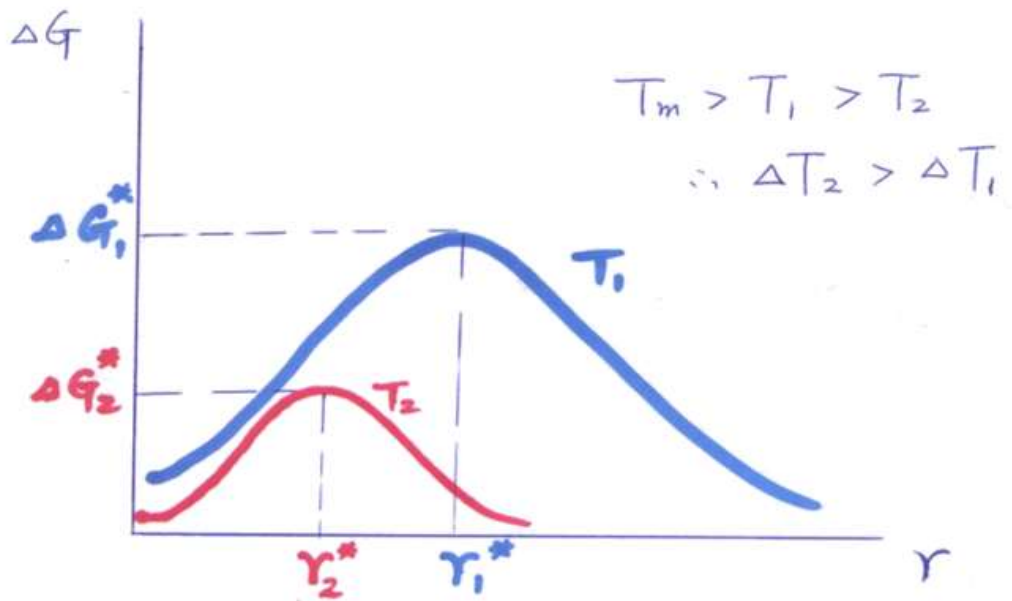


圖 12 降溫過程中，臨界凝核尺寸及臨界自由能之關係。

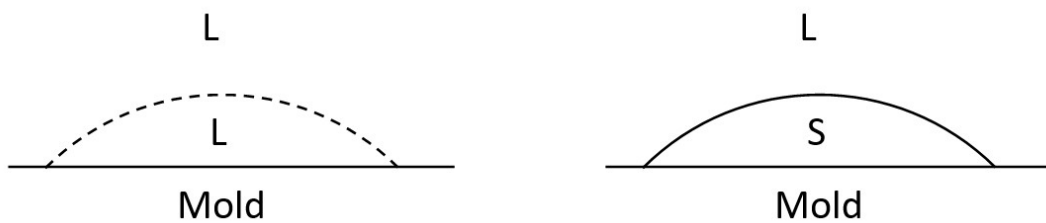


圖 13 異質結晶過程之模具-固態-液態之介面示意圖。

接近才能有好的結晶發展。

- E. 一般而言，過冷度 ΔT_{hetero} 約 $=0.02T_m$ 時，就有機會發生異質結晶。所以一般鑄造的凝固結晶幾乎都是以”異質結晶”的方式進行。

2. 等軸晶：

等軸晶(Equiaxed Crystal)是指巨觀晶粒在凝固生長過程中，由於溫度梯度不明顯，熱傳無固定方向，使晶粒無固定方向向四面八方生長，該區域在凝固完成後，晶粒於各方向之尺寸會大約一致。若觀察類似圖 14 之自然冷卻圓柱形鑄錠，通常在中央區域是最後凝固且為溫度梯度不明顯之區域，大多生成為等軸晶之結構。一般不規則形狀鑄件若希望得到全體較均勻之等軸晶結構，則要確保冷卻速度慢、鑄件截面的溫度梯度小、金屬液澆鑄溫度低、澆鑄速度慢等原則去測試出適合之製程參數。

3. 方向性凝固：

方向性凝固(Directional Solidification)的原理主要是利用溫度梯度創造穩定、一致且同方向的熱傳環境，使液態金屬在凝固的時候是以單方向往熱傳的反方向進行，此凝固方式可以用大野連續鑄造法(Ohno continuous casting process; O.C.C. method)[4]來解釋，根據上述的大野連續鑄造法重繪如圖 15，並以剖面結構來呈現。左圖為一塊有水冷機構的銅板緊貼坩鍋，坩鍋周圍以高週波線圈或電熱器

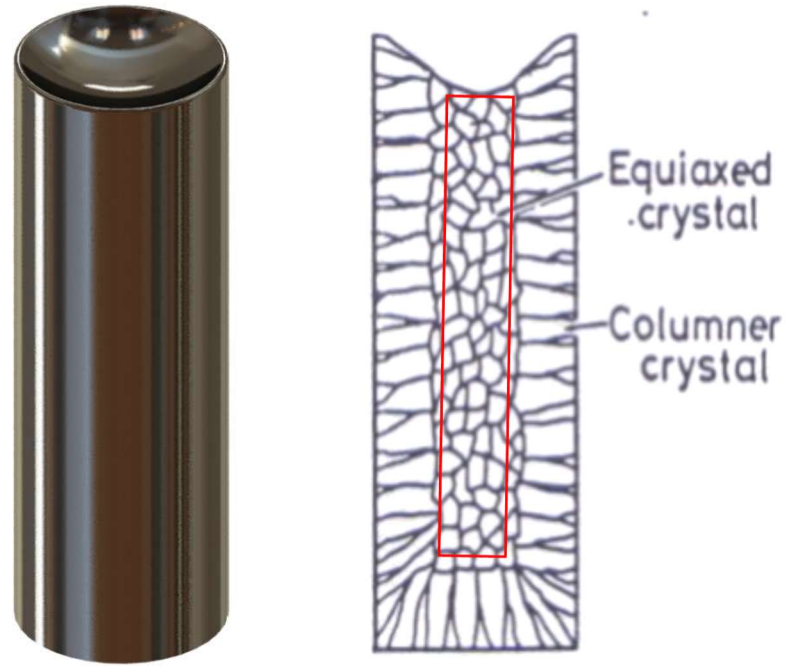


圖 14 採自然冷卻之圓形鑄錠-剖面後之結晶型態示意圖。

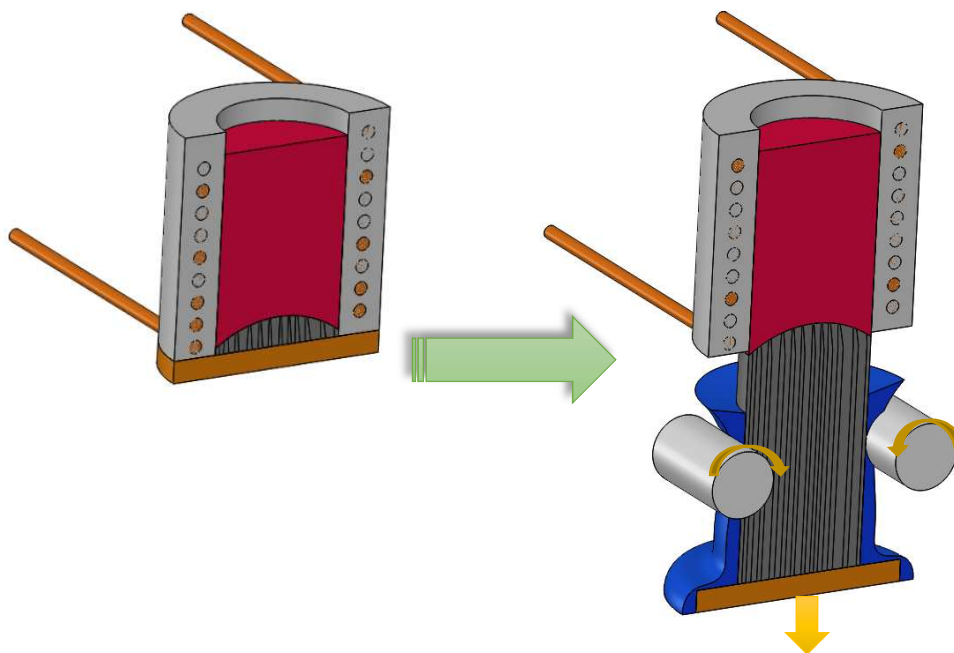


圖 15 根據大野連續鑄造法重繪之剖面動作示意圖。

讓金屬融熔並保持固定溫度，因銅板與金屬液有很大的溫差，且熱傳是單一方向向下，會讓晶粒凝核、成長的現象逐漸在銅板表面發生，並以熱傳的反向往上成長。右圖開始將銅板向下移動，讓固態金屬以固定速度向下移動，並利用噴水冷卻的方式來維持固體與液體間的溫度梯度，如果要連續生產，坩鍋上方則要連續投料，並將坩鍋溫度、噴水冷卻裝置位置(影響 Ingot 往上凝固的速度)、Ingot 往下抽拉的速度等參數做最佳化控制，使固-液介面保持在某高度且得到想要的方向性結晶尺寸。此種方式若參數得宜，甚至可以生產單晶材料。

4. 單晶：

單晶(Single Crystal)的製造方法大致分為3種，分別為布氏法、柴氏法及區熔法。是由1個到少數幾個核種(或模具低溫粗糙點)作為結晶生長的發生源，以液-固介面保持平衡狀態往熱傳的反向凝固生長，最後淘汰掉剩下1個優勝方向的結晶繼續生長，此即為單晶。

(1) 布氏法 Bridgeman-Stockbarger technique

- A. 原理：將圓形坩鍋內裝材料，以固定的速度垂直下降進入及離開穩定功率的加熱區。材料在加熱區變成液態，並於離開加熱區時，因穩定的垂直溫度梯度，使固-液介面沿熱傳的反向往上

生長晶體。搭配特殊的坩鍋造型，可讓晶體生長的方向有優勝劣敗的機制，最終可獲得單晶之成品。

- B. 特殊的坩鍋(或模具)造型：為了以”優勝劣敗”的方式來強制淘汰側長的結晶，坩鍋(或模具)的造型就必須加以設計。早期在學理上有圓錐狀、毛細管狀、圓錐狀+毛細管狀、圓錐狀+擴大部+毛細管狀等造型。近期在實務製造設備則大多採用”螺旋管”設計，目的都是要淘汰側長的結晶，確保最後單晶的生成。
- C. 坩鍋(模具)的選擇重點：坩鍋材料不能與單晶材料產生反應，且結晶生長後的材料不能與坩鍋相黏，可避免結晶材料產生應變點(缺陷) 並可快速取出結晶產物。若要避免結晶產生應變點(缺陷)，可使用軟模，譬如白金模，外面可再包覆堅固的容器。根據產業實務經驗，可選擇的坩鍋材料包含 SiO₂、貴金屬、氧化鋁、石墨(可耐溫至 2500°C)等。

(2) 柴氏法 Czochralski technique

- A. 原理：如圖 16，此柴氏法主要應用在半導體產業之晶圓製程。

可將製程分為以下幾個步驟說明並了解柴氏法之原理。

(a) 加料熔化：將矽坩鍋內裝材料，以感應線圈或其他加熱器將坩鍋內的單晶材料熔化。

(b) 頸部成長：將<100>或<111>方向的晶種漸漸浸入液中，並逐漸往上拉升，加快拉升速度可使凝固晶體生成頸部，可限縮單體生

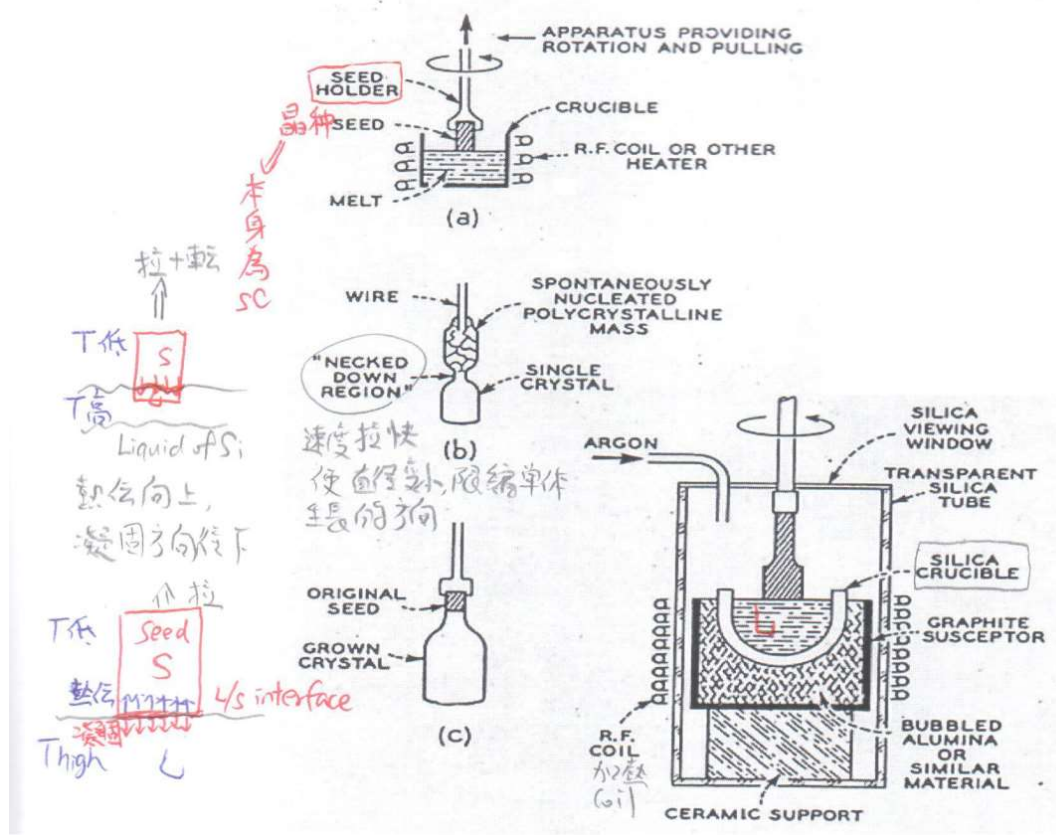


圖 16 以柴氏法拉單晶之動作示意圖。

長的方向。

(c) 晶冠成長：降低拉升速度，使原本頸部直徑逐漸增大到單晶產品

所需的尺寸。晶冠角度(直徑增加速度)會影響後續晶體的品質。

(d) 晶體成長：穩定拉速及溫度，使晶體直徑控制在 $\pm 2\text{mm}$ 。在過程

中，坩鍋需不斷上升以保持液面與加熱器相對位置不變(溫度梯度)。

(e) 尾部成長：晶體直徑逐漸縮小並與液面分離，以避免熱應力使晶

體產生差排及滑移面。

B. 可控制之參數：包含溫度梯度、拉速、晶體轉速、坩鍋升速、

氬氣流量等。

(3) 區熔法 Zone-Melting technique

A. 目的：主要目的是"純化"，重複掃可以得到純度很高的晶體，甚

至有可能幫助單晶的生長。

B. 如圖 17，分為有坩鍋(水平式；船型)及無坩鍋(float-zone process;

熔融區由表面張力支撐)之方法。

C. 凝固的時候會有偏析的現象，當凝固持續往同方向進行時，會

把溶質往溶液趕，隨著加熱器移動，會把高濃度雜質溶質隨著

溶液趕到塊材末端，重複幾次後會有純化材料的效果。

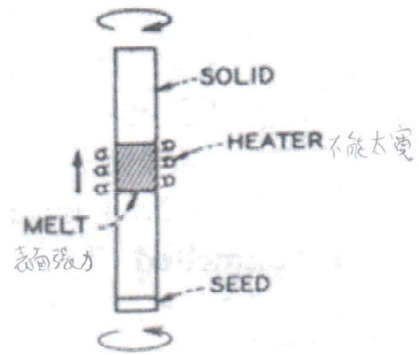
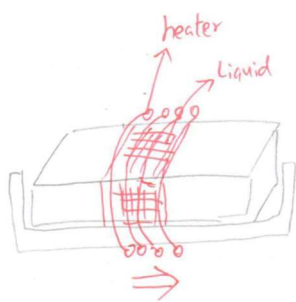


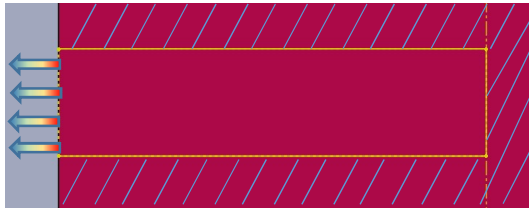
圖 17 有坩鍋及無坩鍋區熔法之動作示意圖。

(三) 鑄造相關之凝固巨觀偏析

金屬從液相歷經降溫而變為固相過程中，在固液共存區(L+ α)通常固相 α 的擴散速度很慢，所以在凝固過程完成後會有溶質成份不均的情形，此稱為凝固偏析。

我們可以利用一個小小的長條形元素(element)，來假設幾個不同的凝固情況，並且衍生出不同的凝固公式。此 element 如圖 18(a)，只有左邊有熱傳，其餘 3 邊均為絕熱(即無熱傳發生)，所以凝固過程是由左向右進行。為何可以做這樣的假設呢？對照圖 18(b)，假設有一個大型圓柱形工件的殼模，從剖面圖來看可以看到殼模內表面及鑄件中心線，我們把圖 18(a)的 element 尺寸放大到圖 18(b)，若不考慮邊際效應，可以假設這 element 的上下面各***點的溫度都一樣而無上下方向的熱傳發生。此外，這 element 的右面臨近鑄件中心線，對稱於中心線的另一個 element 的左面，都是屬於同溫度且為鑄件最高溫區，所以這些靠近中心線的區域亦無熱傳發生。會開始發生凝固的地方是從殼模內表面與金屬液體的接觸面開始，以左邊的 element 來看，熱傳一直同向往左，而固液介面即同向逐漸往中心線移動。通常此類工件最後凝固的區域是在中心線附近，也易有雜質、高濃度溶質相在這區域產生。以下在解釋凝固的各種假設情況，此 element 的尺寸也未必要像圖 18(b)那麼大，也可以縮到很小的尺寸來解釋樹枝晶(dendrite)的形成原理。

(a)



(b)

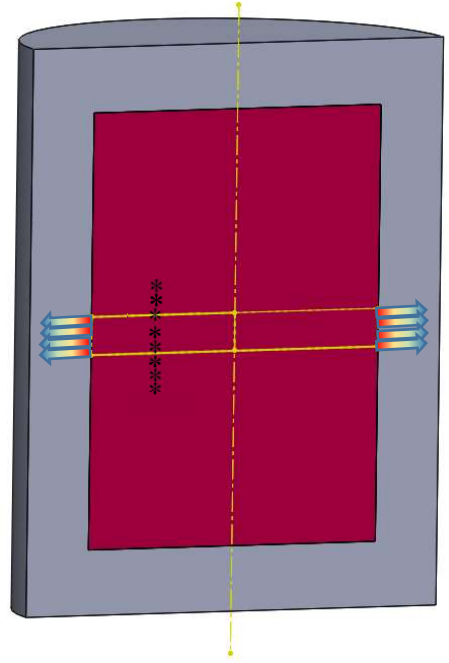


圖 18 (a)解釋凝固過程的小小元素(element)；(b)大型圓柱形工件剖面及熱傳示意圖。

假設液態與固態完全擴散，且固/液介面平衡：為簡化公式，通常會把二元相圖的固相線和液相線視為固定斜率如圖 19。在如此直線化後之相圖，我們可以提出一個平衡分佈係數(Equilibrium distribution coefficient) K ，因為固相線和液相線為固定斜率，會使 $K = \frac{C_S^*}{C_L^*} = \frac{C_S'}{C_L'}$ = $\frac{\text{固相線斜率}}{\text{液相線斜率}}$ 。若將圖 18(a) element 的尺寸比例縮到很小，並且長度為 1，則可以用圖 20 連續凝固過程的成份變化來解釋表 1 的 Case I。此為固態完全擴散之情況，現實生活中幾乎不可能達到這樣的理想情形，因而衍生出表 1 的 Case II~Case IV 固態完全不擴散之凝固偏析情形。

Case II 的條件是固態完全不擴散、液態**完全擴散**。意即在凝固過程，剩下液態的溶質分佈是呈現均勻而無濃度梯度。在此條件下，凝固區域隨凝固方向的溶質成份分佈可由 Scheil equation $C_S^* = kC_0(1 - f_S)^{k-1}$ 來表示，凝固完成後的成份分佈曲線圖如表 1 Case II 的藍線段所示，而紅線段為過程中之液態暫態濃度。

Case III 的條件是固態完全不擴散、液態**有限擴散且無對流**。意即在凝固過程，液態在靠近固態的擴散層 δ 範圍(cm) 是呈現明顯的濃度梯度，然後越遠離固態越趨近於原始濃度 C_0 (ppm)。一般來說， δ 範圍約等於 3~5 倍的 L_c ， L_c 定義為特徵長度即 $L_c = \frac{D_L}{R}$ ，其中 D_L 為擴散係數(cm^2/s)， R 為凝固速度(cm/s)。整個凝固完成後，可以發現除了 Initial state 和 Final state 外，中間大部分區域的固態成份為原始濃度 C_0 。

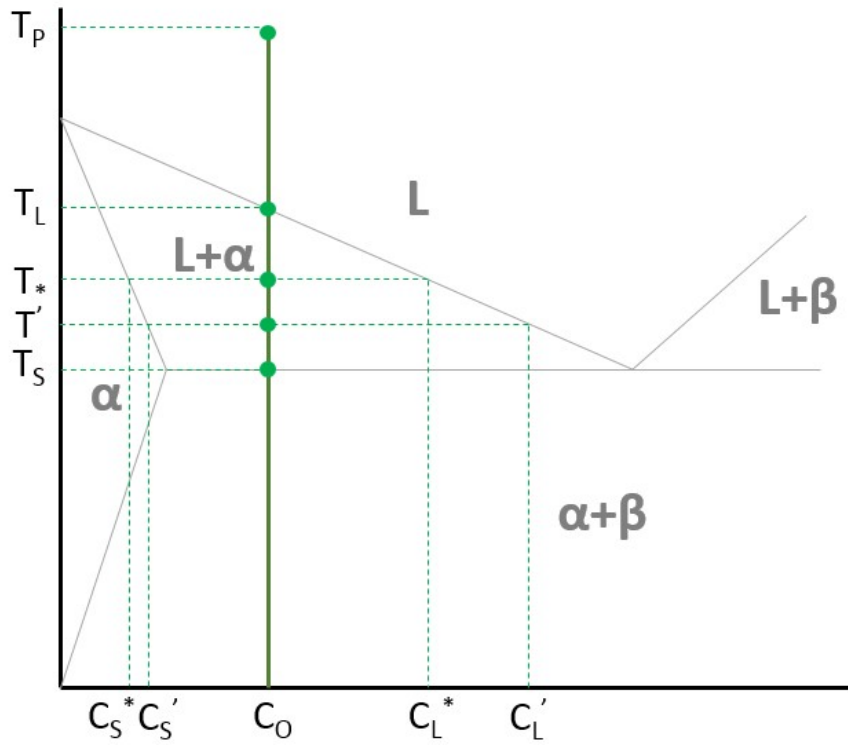


圖 19 相線直線化後之二元相圖及不同溫度之固液成份對應標示。

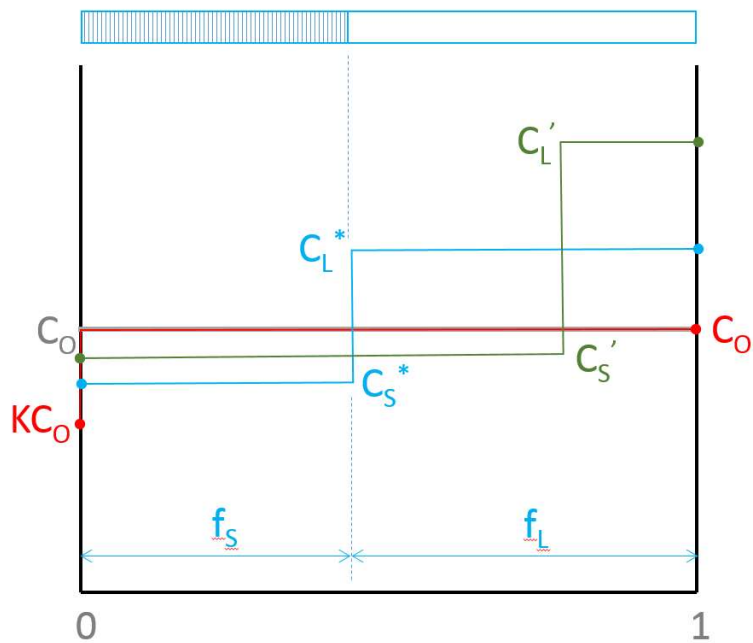
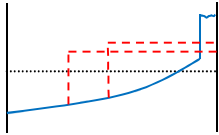
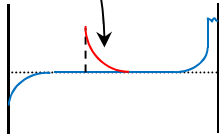



圖 20 相線直線化後之二元相圖及不同溫度之固液成份對應標示。

表 1 凝固偏析公式整理

	Assumptions	Equations
Case I	1. 液態與固態完全擴散 2. 固/液介面平衡	$C_s^* \cdot f_s + C_\ell^* \cdot f_\ell = C_o$, 其中 $f_s + f_\ell = 1$
Case II	1. 液態完全擴散 2. 固態完全不擴散 3. 固/液介面平衡	$C_s^* = kC_o(1 - f_s)^{k-1}$ 
Case III	1. 液態有限擴散+不對流 2. 固態完全不擴散 3. 固/液介面平衡	<p>At Steady State $C_\ell = C_o(1 + \frac{1-k}{k} \cdot e^{-\frac{R}{D_L}X'})$</p> <p>令 $X' = L_c = \frac{D_L}{R}$ 可得 $\frac{C_\ell - C_o}{C_o - C_o} = \frac{1}{e} = 0.37$ $\delta \cong 3 \sim 5L_c$</p> <p>Final state 寬度 $\cong 3 \sim 5L_c$ </p> <p>At Initial State $C_s^* = C_o[1 - (1 - k) \cdot e^{-\frac{kR}{D_L}X'}]$</p> <p>令 $X' = L'_c = \frac{D_L}{kR}$ 可得 $\frac{C_o - C_s^*}{C_o - kC_o} = \frac{1}{e} = 0.37$ Initial state 寬度 $\cong 3 \sim 5L'_c$ </p>
Case IV	1. 液態有限擴散+對流 2. 固態完全不擴散 3. 固/液介面平衡	$k' = \frac{k}{k + (1-k) \cdot e^{-\frac{R\delta}{D_L}}}$ 其中 $k' \cong \frac{C_s^*}{C_o}$ $k = \frac{C_s^*}{C_\ell^*}$ 當 $\frac{R\delta}{D_L} \ll 1$ 時, $k' = k$ --> case II 當 $\frac{R\delta}{D_L} \gg 1$ 時, $k' = 1$ --> case III $C_s^* = k'C_o(1 - f_s)^{k'-1}$
特殊討論	考慮固態擴散因素	$C_s^* = kC_o(1 - \frac{f_s}{1 + \frac{D_s \cdot k}{R \cdot L}})^{k-1}$ 其中 D_s 為固體擴散係數, L 為晶體長度
柴式拉單晶	1. 同 Case IV 2. 液態濃度維持不變	$k' = \frac{k}{k + (1-k) \cdot e^{-\frac{R\delta}{D_L}}}$ $k' = \frac{C_s^*}{C_{BL}} = \frac{C_s^*}{C_o}$
維持 planar 介面的臨界溫度梯度 G_{LC}		$\frac{G_{LC}}{R} \geq -\frac{m_L \cdot C_s^*(1-k)}{kD_L} = -\frac{m_L \cdot C_L^*(1-k)}{D_L}$ ($G \uparrow R \downarrow C_o \downarrow$)

Case IV的條件是固態完全不擴散、液態有限擴散且有對流。此時液態對流的強弱程度將會決定最終固態成份的曲線圖是接近 Case II 或 Case III。在此條件下，凝固區域隨凝固方向的溶質成份分佈可由 $C_s^* = k' C_o (1 - f_s)^{k'-1}$ 來表示，很類似 Case II 的 Scheil equation 公式，其中 $k' = \frac{k}{k+(1-k) \cdot e^{-\frac{R\delta}{D_L}}}$ 。如果 $\frac{R\delta}{D_L} \ll 1$ 時(意即擴散係數大或凝固速度慢)，則 $k' \cong k$ ，凝固結果就會很接近 Case II。如果 $\frac{R\delta}{D_L} \gg 1$ 時(意即擴散係數小或擴散層 δ 範圍大)，則 $k' \cong 1 \cong \frac{C_s^*}{C_o}$ ，凝固結果就會很接近 Case III。Case IV 還有一個很重要的應用，即半導體業的柴氏拉單晶製程。如圖 21，拉出後的單晶固體以 S 表示，單晶固體在液面有一擴散層 δ ，在液面以下就可以想像有一假想的 Bulk Liquid。其引用的公式同樣為 $k' = \frac{k}{k+(1-k) \cdot e^{-\frac{R\delta}{D_L}}}$ ，其中 R 為拉單晶的速度，當求出 k' 之後可由 $C_s^* = k' C_o$ 求出單晶的固體濃度 C_s^* 。

(四) 鑄造相關之凝固微觀偏析

若從金相的微觀組織來看，在凝固的時候會因溫度梯度 G、凝固速度 R、初始濃度 C_o 的影響，會使凝固過程的固液介面保持(1) Plannar (2) Cellular (3) Dendrite (4) Free Dendrite 等四種不同的微觀組織。

在圖 22 中， G_a^1 的情形為在固液介面附近溫度高於熔點(液相溫度)，當固液介面有小凸點生成時會馬上熔掉，所以可以維持 Plannar 的固液介面。 G_a^2 的情形為在固液介面附近溫度略低於熔點(液相溫度)，

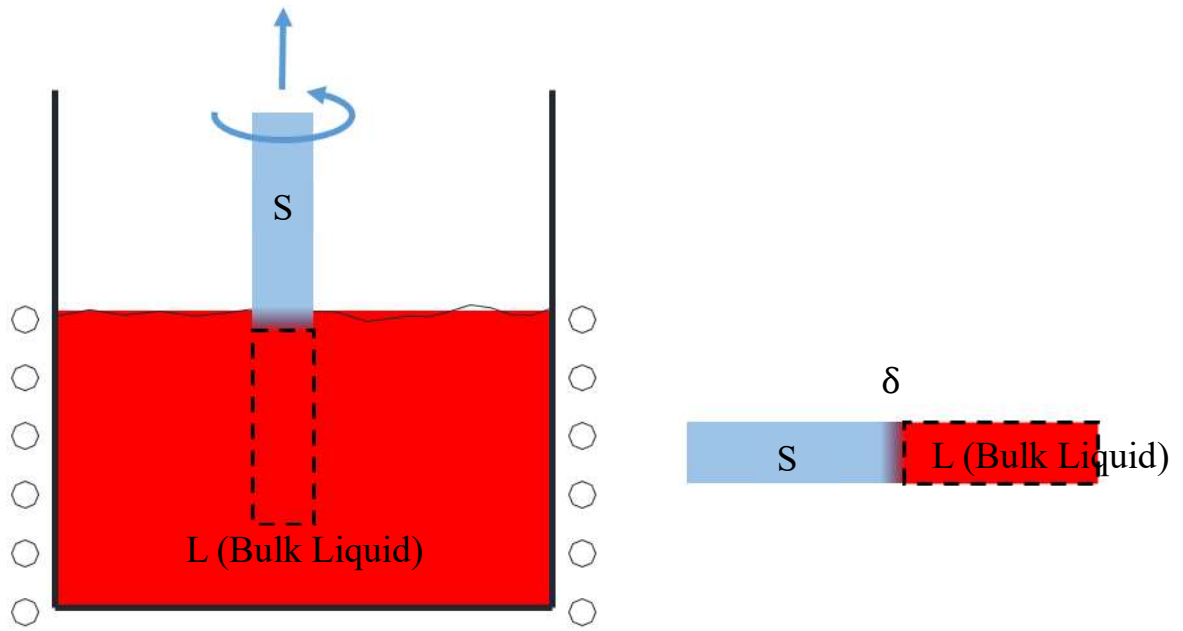


圖 21 柴氏拉單晶製程之固體、擴散層、Bulk Liquid 示意圖。

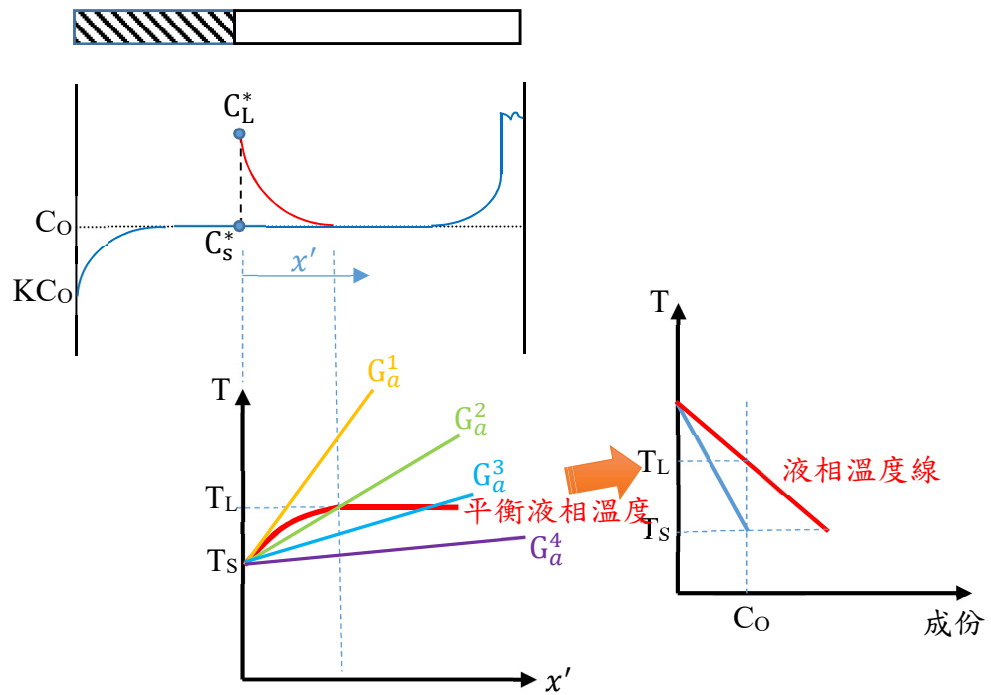


圖 22 凝固過程溫度梯度與平衡液相線之關係。

當固液介面有小凸點生成時會繼續存在，而生成 Cellular 的型態。 G_a^3 是溫度梯度更緩於 G_a^2 ，將會使固液介面的 Cellular 型態往 Dendrite 發展。最後如果是類似 G_a^4 這樣的溫度梯度，在主要的固液介面尚未到達時，已有許多的 Free Dendrite 在液體中生成，圖 23 為 Plannar, Cellular, Dendrite, Free Dendrite 等四種不同的微觀組織型態。此外，溫度梯度 G 越大、凝固速度 R 越小、初始濃度 C_0 越小時，越可以讓固液介面保持 Plannar 的型態，也就越有機會得到方向性結晶或單晶的結果。若把 G/R 和 C_0 作為實驗參數，將實驗結果的微觀組織型態紀錄於 XY 平面上，則可得到類似圖 24 之分佈圖以方便後續之實務應用。

(五) SC/DS/EC 真空澆鑄爐之水平送料和退殘料機構

RETECH 的 SC/DS/EC 真空澆鑄爐有考慮到避免銅坩鍋被污染的問題，有設計水平送料和退殘料機構。其動作過程如下：

1. 銅坩鍋旋轉 90 度，即開口朝向水平方向。
2. 將鑄錠或鑄造原料放入陶瓷 Liner，然後 Liner 以水平方式放入送退料機構並蓋上小艙門。
3. 送退料機構內部開始抽真空，當真空度與銅坩鍋所在的澆鑄艙接近時，兩艙之間的隔離閥門會打開，並使陶瓷 Liner 推入銅坩鍋。
4. 銅坩鍋旋轉回 0 度，即開口朝向上。
5. 開始加熱及進行澆鑄動作。

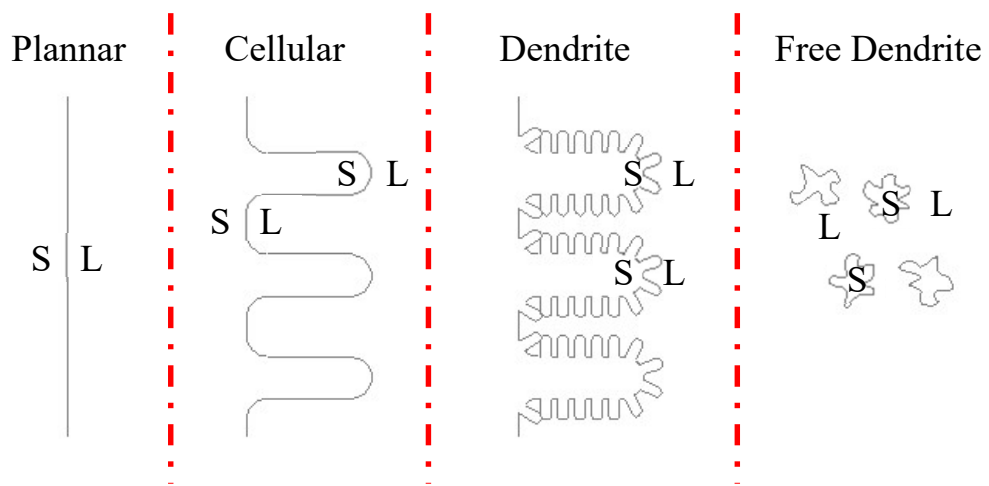


圖 23 Plannar, Cellular, Dendrite, Free Dendrite 等四種不同的微觀組織型態。

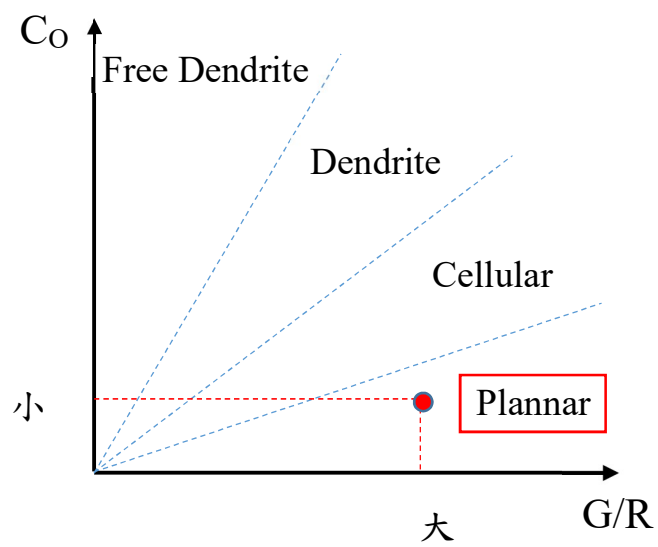


圖 24 G/R 和 C_0 與四種不同的微觀組織型態之相對關係。

6. 澆鑄完畢後，銅坩鍋旋轉 90 度，即開口朝向水平方向。
7. 送退料機構伸入澆鑄艙進行陶瓷 Liner 夾取，當機構退至一半行程時，即放開夾爪讓陶瓷 Liner 掉入下方之廢料收集斗。
8. 每做一爐即重複以上 1~7 的步驟。

(六) 金屬湯液測溫及傾倒機構

為確保每爐澆鑄作業都有穩定的品質，金屬湯液的溫控是一個很重要的製程參數。以 RETECH 的 SC/DS/EC 真空澆鑄爐為例，其在爐體上方設有 2 組紅外線測溫儀及 1 組浸入式測溫儀來量測陶瓷 Liner 內部金屬液的溫度。因為浸入式測溫儀的測頭有使用次數限制，故平時不是每次都會浸入金屬液進行測溫，而是利用 2 組紅外線測溫儀進行溫度之即時監控。為避免紅外線測溫儀有故障情形而影響澆鑄品質甚至引起工安問題，可以設定 2 組紅外線測溫儀所各別測得的溫度數據差異達多少度(譬如 10°C)以上時，即自動啟動浸入式測溫儀進行一次金屬液之溫度量測，並自動將紅外線測溫儀的溫度數據進行補償校正。

此外，也是為了確保每爐澆鑄作業都有穩定的品質，RETECH 也針對 SC/DS/EC 真空澆鑄爐開發金屬液自動傾倒的功能。如圖 25，可以將坩鍋的傾斜角度與時間進行圖線化，並據以微調修改，也可以將熟練師傅用搖桿手動傾倒金屬液的過

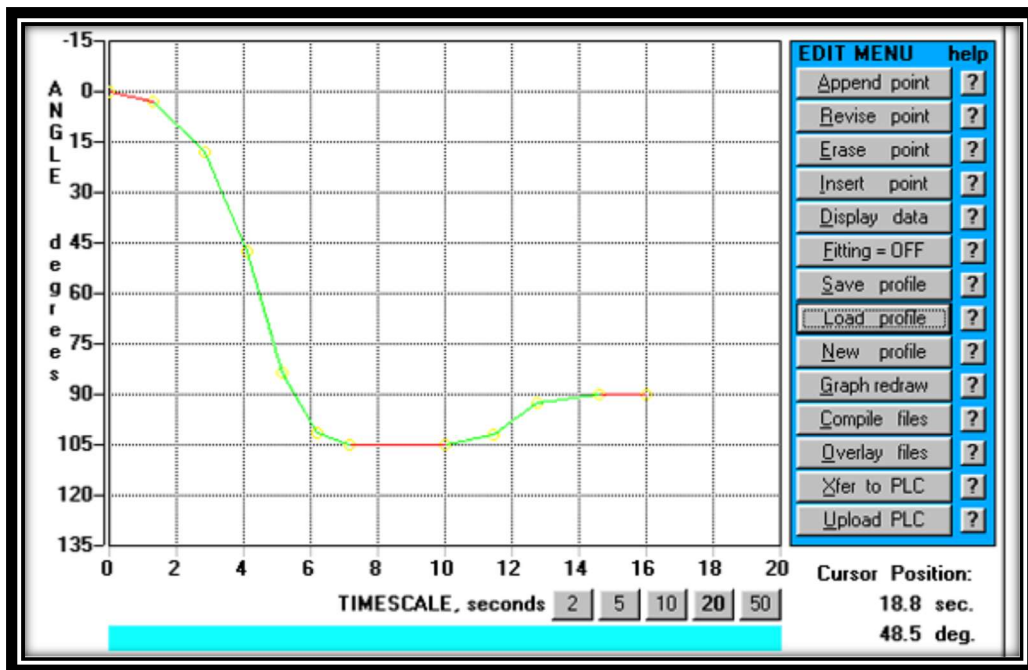


圖 25 澆鑄時坩鍋的傾斜角度與時間可進行曲線化紀錄及編修。

程進行數據紀錄，再轉換成類似圖 25 的曲線圖進行微調修改。

(七) 促進方向性凝固之機構及原理

本次及過去實習有了解方向性結晶或單晶之凝固過程，”溫度”絕對是一個很重要的參數。以往曾經看過一般等軸晶的真空澆鑄，其殼模是在另一個加熱爐進行預熱，再由人工抱殼模至真空澆鑄爐進行抽真空和澆鑄作業，這樣的方法有個很大的缺點，即殼模在真正要澆鑄時的溫度無法完全掌控，會因為人工作業速度、抽真空效率、環境溫度等影響每次澆鑄時的殼模溫度，進而使鑄件良率不好控制。RETECH 和去年參訪的 ALD 一樣，為了穩定殼模在澆鑄前的溫度，在類似圖 26 澆鑄艙之殼模澆鑄位置設計了一種加熱系統，先利用高週波的磁場感應加熱石墨薄片，再以熱傳模式讓石墨薄片的熱能導入至殼模進行加熱及溫控。等殼模溫度到達設定溫度後，即可開始澆鑄作業。

澆鑄時金屬液的溫度、澆鑄時間、傾倒角度等都是會影響品質的參數。在澆鑄完成後，則開始進行凝固之製程。因為在澆鑄艙殼模澆鑄位置仍然有加熱系統在維持環境高溫，所以殼模內的金屬液不會在這裡凝固，要待油壓機構緩緩往下降時才開始進行 Withdraw 的製程。

在 Withdraw 的過程中，殼模慢慢脫離高溫區域，使金屬液從殼模底部開始凝固，且固液介面是相對往上移動。在起初的 Starter 區

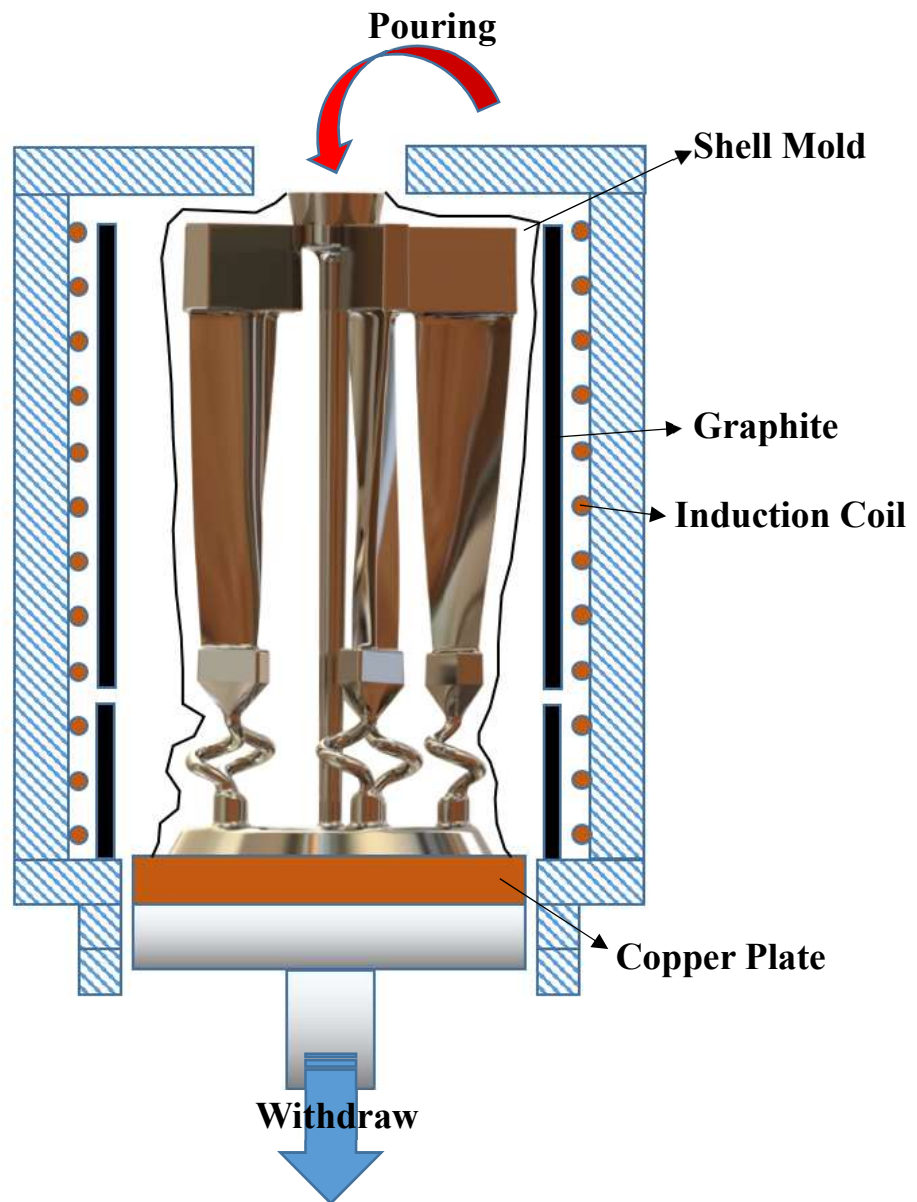


圖 26 方向性凝固及單晶鑄造設備促進方向性凝固之主要機構。

域，會生成柱狀晶結構，經過 Spiral Selector 之後，則會進行類似 Bridgeman-Stockbarger technique 所用到的”優勝劣敗”概念，最後只剩下一個晶粒通過 Spiral Selector，然後再繼續往上往工件部位凝固直到最後。如果只是要製作方向性結晶之工件，在設計組樹方案時要考量結晶方向和工件擺放方向，然後只要有 Starter 設計但不必放入 Spiral Selector 設計。

五、心得與建議

在拜訪德國 Aachen 的 Dr. Anis Haj Ayed 之後，讓我感覺其實我們並不孤單，我們這裡正在進行或研究的主題雖然在國內少見，但在德國 Aachen 這裡有類似的學術機構或公司進行類似的研究，非常值得再進一步之交流。此外，德國政府在研究資源的整合也可以做為我們國家發展高端科學研究的參考借鏡，譬如德國政府會有一個名叫 FVV 的機構來負責整合大型的研究專案，把大型專案區分成沒有重複的中小型專案再依各企業或研究機構的專長屬性交由他們去申請經費執行。這樣的好處是可以資源整合、不會有重複研究的情形，整個國家的科技發展也可以朝一個很明確的主方向進行。

熱噴塗技術在我們綜研所已應用多時，此次有機會前去瑞士拜訪世界知名大廠，學習 PS-PVD 新製程的原理及應用，希望後續能對本所發展類似之新噴塗技術有所助益。

去年曾經參訪德國 ALD 公司，今年則參訪波蘭類似產品的 SECO/WARWICK (RETECH) 公司，使自己對定向性凝固真空鑄造之製程原理有更加深層之認識。回國後藉著撰寫實習報告時重新再整理資料，期望亦有助於我公司日後的材料相關技術發展。

六、 參考文獻

1. " Suspension spraying - an emerging coating technology" ,
Thermal spray technology for microstructured coatings, 2013
2. P. Szabo, J. Arnold, Th. Franco, M. Gindrat, A. Refke, A. Zagst,
and A. Ansar, ECS Transactions, 25(2), pp. 175-185, 2009
3. B. Lakshminarayana, Fluid Dynamics and Heat Transfer of
Turbomachinery; John Wiley & Sons, 1996
4. A. Ohno, Continuous Casting of Single Crystal Ingot by the
O.C.C. Process, pp 14-16, JOM, vol. 38, 1996