

Outokumpu UPCAST® 製程
提供製造商及客戶所需要之最高品質銅條
By: Outokumpu Castform Oy

前言：

對於各種不同工業應用之電線及電纜製造商而言，經證實使用 Outokumpu UPCAST® 連續鑄造製程所生產的無氧銅條是一種最佳的選擇。電線抽線工廠可以裝設 UPCAST 連續鑄造設備，而不必忍受當地銅條供應商無法提供令人滿意的品質，或者是希望能實現多頭及細線抽線加工速度提昇及產能增加的優點。

爲了能夠對客戶群提供更好的服務，一些 ETP 銅條製造商可擴充其產品種類含概無氧銅條；或可投資於小型 UPCAST 設備，如此方能有較大彈性生產不同尺寸的銅條。本文提供一些實例，介紹 UPCAST 製造商藉由投資本身的銅條生產設備所達成的優點。簡介中分別介紹三個地理區域及客戶類別，而所描述的所有 UPCAST 設備都於西元 2001 年期間安裝完成並且運轉。

UPCAST 連續鑄造製程

圖 1 UPCAST® 鑄造生產線示意圖，左邊的自動進料機將銅板進料於一種溝型感應式熔解爐，熔融銅會經由流槽進入溝型熱感應式保溫爐，而鑄造機位於保溫爐之上。銅條之鑄造一開始先將冷凝器組合降低至距熔融銅液表面深度約 10 公分下，如此會產生金屬靜壓力而迫使融熔的銅進入石墨模，然後銅條沿著石墨模的內層表面固化。在連續停止/移動的上引過程中，藉由伺服驅動棘輪將銅條拉出，並且將之引導至捲線機。

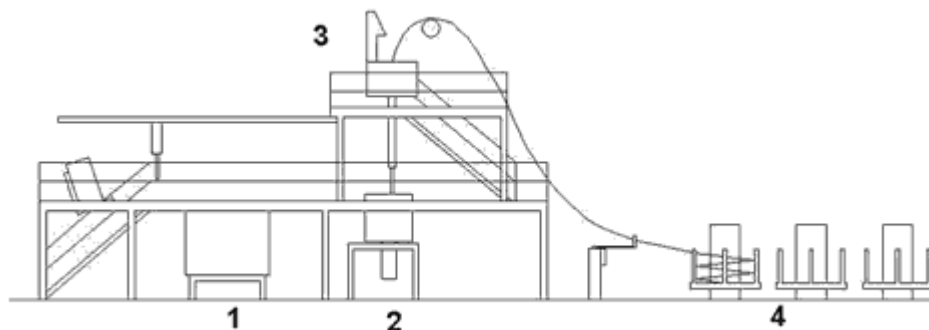


圖 1：UPCAST 系統

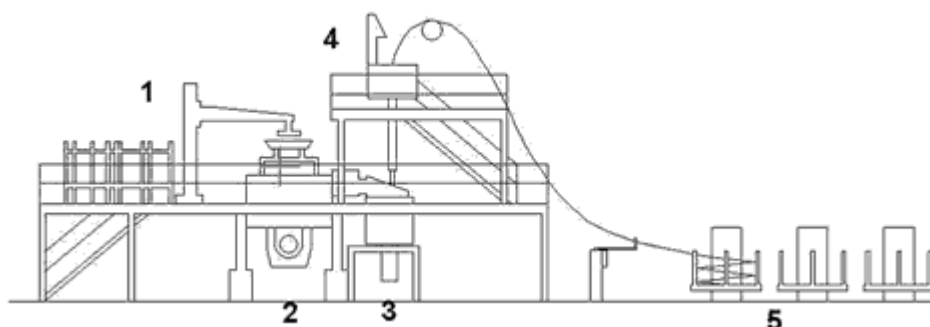
UPCAST 機組是單一感應爐系統（產量最高達到 6,000 TPA）或雙感應爐系統

(產量超過 6,000 TPA) (圖 2)。在單一感應爐系統的案例中，銅板藉由銅板預熱爐及半自動銅板進料機處理，而雙感應爐系統的特色是自動銅板進料設備 (無須預熱)。

圖 2：單一及雙感應爐之 UPCAST 機組



A:1. 銅板預熱爐，2. 熔解/保溫爐，3. 鑄造機，4. 捲線機



B:1. 銅板進料設備，2. 熔解爐，3. 保溫爐，4. 鑄造機，5. 捲線機

熔解動力：熱感應器

由熱感應器可獲得銅板加熱、熔化與保持熔融所需之能量。最有能源效率的方法就是利用感應器將電力轉換成能量，熱感應器由下列構成：

- 可自爐體分離的空冷及/或水冷框架；
- 熔融銅在溝型線圈內流動並且用來當成二次感應線圈；
- 耐火襯裏，該襯裏通常由含二氧化矽的材料所製成。

熱感應器並沒有經過媒介，而是直接於感應爐內加熱熔解銅。因此就能量觀點而言，這是最有效率的電熔方式，因此可以達到準確的溫度調節。因為熔解溫度的變動會影響固化，因此溫度控制不僅對於節省能源方面非常重要，而且對於鑄造銅條之品質來說也是十分重要。

許多工業區 (尤其是在亞洲及南美洲) 都飽受電力不穩之苦，而全新 UPCAST 系統的特色在於，其配備穩壓工具，可減少電壓波動。製造商可以從控制室設定必要的參數，UPCAST 製程控制會自動調整搭接設定，使得能夠維持熔化所需

之電力，並且在任何時候都保持全產能，如此亦能確保一定的熔解溫度。

單一感應爐：產量最高達到 6000 TPA

加料進結合式熔解/保溫爐之前，單一感應爐系統須加裝銅板之預熱爐。而在雙感應爐系統中，熔解爐可處理掉銅板上可能的濕氣，而且消除因“冷”銅板進入熔解爐所引起之溫度變化。即使結合式熔解/保溫爐的體積大（最小 5 噸），仍然應該先經過預熱爐處理。銅板預加熱至 200 °C 會稍微熔快一點，而且不含表面濕氣並且可分解累積的結晶水。銅板會於熔解爐之熔化反應室中熔化，該熔化反應室藉由隔板與鑄造室分開，而在該反應室之下熔融銅液從熔化反應室流至鑄造室。由於熔融銅體積大約 5 噸及熱感應式加熱的緣故，即使在結合式熔解/保溫爐中溫度的變動也非常小。

雙感應爐系統：產量超過 6000 TPA

較大產量的雙感應爐系統 (6,000 TPA 至 30,000 TPA (含) 以上) 包括熔解爐及保溫爐，此兩個爐皆裝備熱感應器，以提供銅熔化與維持所需之能量。

此兩個感應爐以氣密澆道相連接，而保護氣體（氮氣或一氧化碳）可防止銅液氧化。鑄造機由電腦控制的伺服驅動系統來運作，該伺服驅動系統控制鑄造轉軸的動作。這給予鑄造銅條沿著石墨模表面適當固化時所需之移動。由於要兼顧產量及品質兩種要求，產能超過 6,000 TPA 以上之系統皆建議用雙感應爐系統。

UPCAST® 的冶金晶相

銅板加入熔解爐（屬於雙感應爐）或結合式熔解/保溫爐（屬於單一感應爐）內，作為原料(含氧量 10-50 ppm)。覆蓋於熔融銅上的木炭去除感應爐內的含氧量。藉由木炭/鱗片石墨從熔融銅去除氧在化學上是一種相當複雜、耗時的質量轉移處理，因此需要長的停滯時間。而且質量的感應爐可將銅板進料時所造成的溫度變化降至最低，並且確保維持較均質的熔融銅。UPCAST 熔解爐的容積大小從 7 至 24 公噸。

在雙感應爐系統中，熔融銅在保護氣體的保護下從熔解爐經由澆道轉移至保溫溫爐，而該保護氣體的作用在於防止氧氣進入。熔融銅在保溫爐內以鱗片石墨加以覆蓋，因此可以微調含氧量。實質上在熔解爐的氧氣大部份已被去除。且在分次倒入鑄造爐之前使銅均質化。熔融銅具有一致性的高品質且含氧量低。UPCAST 銅條一般包含約 1-2 ppm 的含氧量。

感應爐是以高鉛礬土磚作為襯裏且可維持數年，熔解爐的感應器襯裏壽命通常是一年。保溫爐中之襯裏壽命較長。襯裏壽命長是因為在製程開始期間發生於耐火襯裏之化學反應的緣故。襯裏生成氧化物燒結（“玻璃相”）阻擋熔融銅液。圖 3

顯示該案例的一個實例：3a 顯示未反應的含鋁礬土耐火材料之基層結構；3b 是相同的材料，但是來自於已用過的感應爐內鄰近熔融銅區域之材料。熔融的銅藉由毛細現象作用力及固態擴散力滲透基層材料，該現象僅發生於孔洞、新鮮襯裏以及感應爐啓用期間。右邊顯示的是基層材料與銅之間的反應產物；淺色區域是燒結基質，暗點則顯示典型的陶瓷孔。

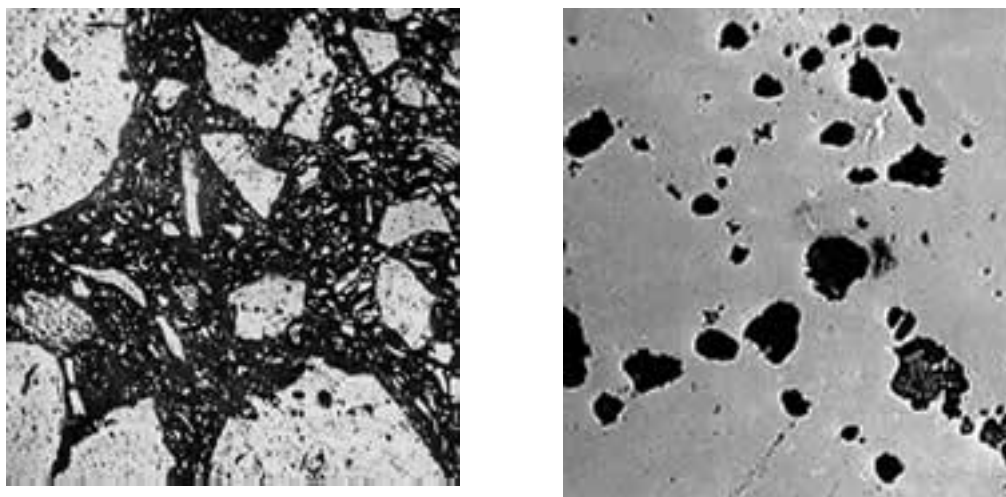


圖 3a：未反應的含鋁礬土之耐火材料基層結構 圖 3b：相同材料，但是為感應爐襯裏之已反應、已燒結形式 (40X)

該層並未發生質量轉移 (除了藉由擴散以外)，而且對於熔融銅而言，感應爐襯裏是化學惰性的環境。從熔融銅除氧僅發生於熔融銅與木炭/石墨層之表面上；氧的還原不會消耗感應爐襯裏。UPCAST 提供最高純度的熔融銅液，因此其銅條就成為非常適合用於製造最嚴格要求產品的原料。以該方式生產之電線，譬如在超細漆包線生產，可連續抽線至 0.015-0.02 毫米 (15-20 微米)。在低溫超導體的製造，則下降至 0.001 毫米 (1 微米)。

以 UPCAST 系統生產的銅條：

UPCAST 銅條是無氧銅且具有如鑄型的結構。其無氧並不需要在抽線機的眼模設定上作任何改變。不過經由冷加工抽線後需要較 ETP 銅桿較高的退火能量 (ETP 銅條事實上由熱滾軋成爲銅條)。這是因爲再結晶發生於顆粒邊界附近。當抽線及成型時，在大顆粒之鑄造結構 (顆粒大小甚至數毫米) 仍然有些許的顆粒邊界，因此需要更多的能量啓動再結晶。在第一階段退火期間，退火要求較 ETP 銅多約 10-15% 的退火能量，因爲 ETP 銅在 8 毫米已經是再結晶的形式。稍後的退火階段僅需求多 2-3 % 的能量，這是因爲無氧銅的再結晶溫度稍高的緣故。

品質的基本要素：

下列各點是確保銅條品質符合高效能材料進行進一步製程所需之基本要素

- 無氧銅是單相材料 (在結構中沒有銅氧化物)，因此它的展延性 (也因此其拉

伸能力) 較 ETP 銅佳；

- 因為慢的還原速率，“熔融銅工業”已經公認從熔融銅中氧之碳還原（木炭、石墨、鱗片石墨）需要長的停滯時間（及大的感應爐容量）。大體積的銅將會稀釋氧且幫助達成低含氧量，UPCAST 感應爐的尺寸使得鑄造棒桿的含氧量可以低至 1-2 ppm。國際標準規定在 Cu-OF 中最大含氧量為 10 ppm；
- 最小含氧量也意謂著內部結構有最少的缺陷，在較高含氧量時 (> 4 ppm)，氣體多孔性可能成為進一步製造電線時的問題；
- 由於耐火技術蓬勃發展，因此熔融銅可提供品質優良的銅條基礎。感應爐襯裏的天然惰性本質確保沒有外來粒子能夠進入銅條，因為外來粒子會導致任何大小的電線斷裂；
- 電腦控制的伺服驅動鑄造機器控制實際的鑄造製程，即固化。銅條的鑄造使得它能沿著石墨模的表面固化。為了確保最佳表面品質，Outokumpu 的 UPCAST 特別設計用於處理銅條鑄造的 PLC 伺服驅動系統，可以精確的控制銅條與石墨模表面之摩擦力。相較於前代機械驅動系統，這使得銅條的品質及操作可靠度邁出一大步。

應用實例：

為了闡述說明無氧銅的有效運用，選擇從不同製造商及應用區域的一些案例作為較詳細的說明。

電線及電纜工業將會持續要求無氧銅如此特殊的性質。電線工業將會從 UPCAST 銅條之展延性及其均勻性得到好處，特別是在多頭抽線及極細電線抽線的領域。

我們將引用在西元 2001 期間裝設 UPCAST 設備的三家電線及電纜工業公司作為實例。有一點不同的實例，是關於超導體的應用。這三家公司是：AL-CO (土耳其)、Carabia Metais (巴西) 及 Ta Win 工業 (馬來西亞)。這三家公司都以其 UPCAST 工廠全力量產，並且已經發現生產之銅桿都符合其自行生產及客戶工廠之預期。

第四個實例是 Outokumpu 超導公司 (芬蘭)，該公司利用一種特殊等級的無氧銅 (低溫級) 當作低溫超導體製造的穩定元素。該公司並沒有直接運用 UPCAST 系統，但是作為高純度銅保證之感應爐技術則類似於 UPCAST 系統。

AL-CO (土耳其)：

於西元 2001 年後期安裝的土耳其 AL-CO (Aluminyum Bakir Ve Madencilik Sanayi ve Ticaret A. S.) UPCAST 設備用於本身銅線抽線之銅條原料，其產品包括各式各樣的銅線：裸銅線、鍍錫及鍍銀銅線。該公司之前所使用的銅條來自於各

種不同的來源，主要來自於當地的 ETP 銅條製造廠。

經過安裝 UPCAST 系統之後，AL-CO 已經能夠大幅改善其銅線抽線機的產量，並且開始使用自己的銅條當作銅線抽線的材料。主要的改良有：

- 大幅改善所有銅線尺寸中與材料有關之銅線斷裂情況(表 I)，因為表 I 的圖包括所有電線斷裂情況，不光是與材料相關的。使用 UPCAST 銅條用於銅線抽線所減少的斷線情況甚至優於這裡所見；
- 在精細、超精細及多頭銅線抽線機器中，使用由 UPCAST 銅條製造的銅線可較其他銅條高出 30 % 的抽線速度。

經過安裝生產 8 毫米銅條之 UPCAST 連續鑄造機器及使用該銅條三個月之後，該銅線抽線工廠發現下列的 UPCAST 銅條特性：

	8 毫米 UPCAST 銅條	之前使用之 8 毫米銅條 (不是 UPCAST)
銅條加工及中間抽線導致斷裂 (> 0.45 毫米)	沒有斷裂	大約 9-10 噸斷裂一次
精密電線抽線 (0.10-0.12 毫米 Ø)	680-880 公斤/斷裂	480-580 公斤/斷裂
多線精密電線抽線 (0.10-0.12 毫米 Ø)	3,300-4,000 公斤/斷裂	2,000-2,200 公斤/斷裂

表 I : AL-CO 拉絲工廠的電線斷裂資料

如表 I 所顯示的，因為銅條加工及中間抽線導致之斷裂，當尺寸大小超過 0.45 毫米的所有電線斷裂情況都消失。相較於使用非 UPCAST 所生產之銅條比較，這些製造資料顯示製造廠有顯著的改善。

Caraiba Metais (巴西)：

該集團是巴西國內的大型銅製造商，一開始使用 Outokumpu 之銅冶煉技術生產 blister 銅精礦。

經過各種不同的製程階段，如轉換 blister 銅精礦來鑄造陽極銅，目前 Caraiba 已生產自己品牌的陰極銅板。該公司亦具有用於生產 ETP 銅電線銅條的設備。在西元 2001 年後期，在巴西 Bahia 的 Caraiba Metais 工廠安裝一 6,000 TPA Outokumpu UPCAST 系統以擴充其產品範圍。生產包含 8 毫米、10 毫米及 12 毫米之無氧銅條。一些 Caraiba 客戶要求無氧銅條，其他



圖 4 : Caraiba Metais : 預熱爐 : 銅板預熱 (前半部) 位於結合熔解/保溫爐---單一感應爐

一些客戶則有直徑非 8 毫米銅條的經常需求。爲了服務該區段市場，該公司決定安裝 UPCAST 系統 (圖 4)。

Ta Win 工業 (馬來西亞)

Ta Win 製造及銷售漆包線及磁性塗膜電線給電力及電子產品/元件市場之末端使用者。在西元 2001 年夏天，位於馬來西亞 Malacca 的 Ta Win 工廠安裝 UPCAST 設備 (圖 5)

該公司每個月生產 900-950 公噸的 8 毫米 UPCAST 銅條，作爲抽線的原料。銅條抽線機生產介於 1.78 毫米至 2.6 毫米的電線。這些銅線賣給其他銅線抽線廠及電纜製造客戶，或者是再抽線爲細線、極細線及漆包線。



各種不同漆包線及絕緣銅線產品每個月大約耗用 500 噸範圍在 0.12 毫米至 1.0 毫米的銅條。每月另有大約 100 噸的 UPCAST 銅條抽線至大小介於 0.04 毫米及 0.1 毫米之間。Ta Win 及其客戶已經發現，即使當銅條抽線至最小尺寸時，該銅線仍能於進一步製程中運作良好，該公司現在計劃修改其銅線抽線加工，以便能抽線至小於 0.04 毫米的尺寸。

圖 5：馬來西亞 Malacca 的 Ta Win 工業 UPCAST® 工廠運作情形

低溫超導公司：

低溫超導公司 (LTS) 提供無氧銅的一個不同應用實例。在該案例中，銅並不是實際的導體而是結構元素。Outokumpu 是低溫超導體的領先製造商，其主要產品爲含 NbTi 的低溫超導體。

LTS 的主要商業應用是作為超導磁鐵，例如在醫藥工業上的 MRI (磁共振造影)。該實例闡述說明在製造 LTS 電纜生產時使用之“低溫等級”(非標準型 Cu-OF)，銅的純度要求非常高且表示成 RRR 值 (殘餘電阻比值)。

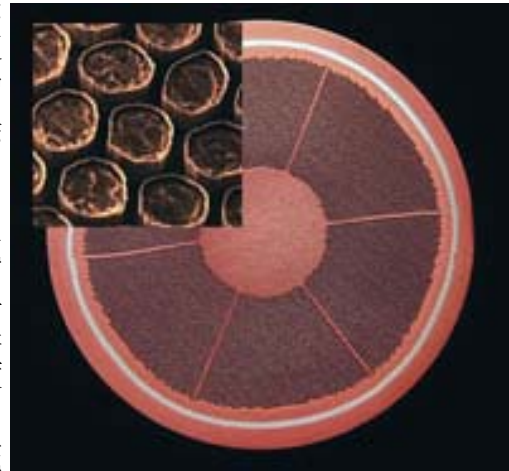


圖 6 顯示精密細線超導的側面圖，精密電線的直徑是 0.785 毫米且包覆著 8800 組超導鈮-鈦 (NbTi) 細線 (插圖)。每一細線厚度約 5 微米 (0.005 毫米) (為人髮細度之 1/101)。在低溫等級之無氧銅基質中，NbTi 細線之間間隔是一微米 (0.001 毫米)。

圖 6：顯示 NbTi 細線 (插圖) 之精密細線超導

當在超導狀態下 (溫度接近於絕對零度 [0 Kelvin])，已經符合其他嚴苛的要求 (磁場及電流密度)，銅基質的功能是作為細線之間的絕緣材料，然而它的主要功能是在當局部擾動發生時可以作為穩定材料，超導體的擾動會使溫度稍微增加，如此將導致超導體超出其工作範圍 (超導狀態)。在局部擾動期間，穩定基質能夠使得超導體藉由吸收其合成熱能，及攜帶短期間的電流而能維持在工作範圍。如果穩定基質無法吸收該合成熱能，則局部擾動會毀損磁場。

銅基質最基本的特性是其純度，當使用高純度銅時，在溫度接近於 0 K 可以達到低電阻值。圖 7 顯示 Cu-OF 之熱導度隨著殘餘電阻比值 (RRR) 變化的情形。標準等級的 Cu-OF 具有 100-200 的 RRR 值；使用於超導體之低溫等級則約 400-500；最高純度 6N (99.9999%) 的銅具有 1,000 或更高的 RRR 值。

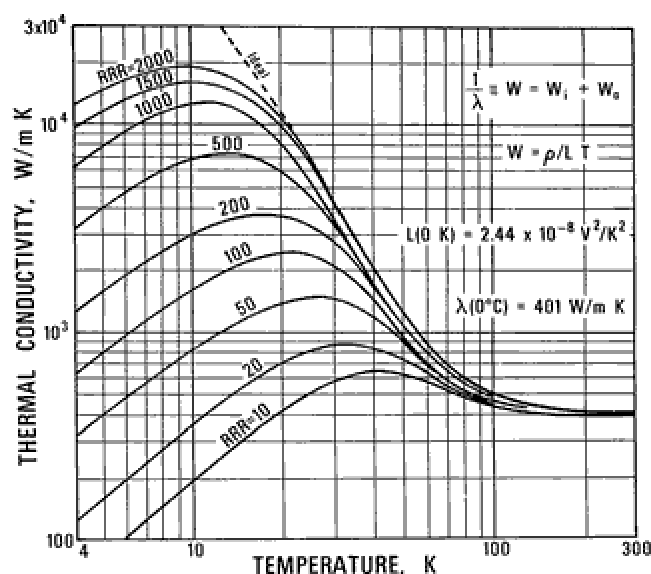


圖 7：在低溫時熱導度對溫度圖

低溫等級之無氧銅使用於超導電線製造之單相及多相兩者之中。LTS 導體之製程須選擇最高品質之銅板。銅板熔解於標準耐火襯裏之熱感應式熔爐中，並在石墨覆蓋下還原移除氧。再將熔融銅鑄造成坯料。將該坯料進一步處理（擠壓，加工）並包圍一 NbTi 細線（單相）或含單一成分之多重 NbTi，經過多相組合之後，將電纜進行熱擠壓及不同的抽線步驟，如多頭及單線抽線，熱處理，超抽線，直至電纜完成。在最終的導體中，低溫等級之 Cu-OF 坯料已拉絲成具有 1 微米厚壁的複雜結構。

誌謝

作者感謝在準備本文時 AL-CO (土耳其)、Caraiba Metais (巴西)及 Ta Win (馬來西亞) 所提供的協助、資訊及圖案說明，亦對芬蘭 Pori 之 Outokumpu 超導公司提供該公司有關於超導體及銅利用製程之協助表示感謝。

作者: Outokumpu Castform Oy