

新穎水產品冷凍技術的開發與未來展望

林禹承、蔡慧君
水產試驗所水產加工組

前言

水產品因捕撈及養殖技術的不斷發展下，已成為人們日常飲食中不可或缺的主食之一。無論是來自海洋或是淡水的魚類、貝類、蝦類等，都提供了豐富的蛋白質、不飽和脂肪酸、維生素和礦物質等成分，是我們飲食中重要的營養來源。然而，因為水產品富含豐富營養素，相對也造就容易腐敗之特性，水產品本身因自家消化酵素作用強，死後易分解其體成分，供應體表所附著腐敗菌之生長，且其肌肉纖維短、脂肪少並且含高水分，而加速細菌的分解作用，而導致質變。基於以上特性，水產品的保存和運輸相較一般陸生動植物更具挑戰性。為此，確保水產品的新鮮度和品質，冷凍加工成為了絕佳手段。

冷凍加工現今已是一種成熟的食品保存工藝，為了延緩食品的腐敗，酵素分解、氧化及微生物等作用，被視為食品保存重要的操作單元。在凍結過程中，食品於低溫狀態能夠被降低生化反應速率，有助於改善酵素水解及氧化反應所導致之品質低下，同時，水分會在 0°C 下發生相轉變，流動相的水分轉化為固體冰晶狀態，使食品中的可供微生物利用的自由水下降，令微生物難以生長，達到保存之目的。冰晶的生成包括成核及冰晶生長兩階段，水分子在穩定的環境下彼此

以氫鍵形成六方體晶型後成核，並在凍結過程中周邊水分子持續聚集於其表面生長，此過程會影響冰晶的大小及型態，這些變化被認為會影響最終產品的品質，因此控制冰晶生成是冷凍的重要因素之一 (Köprüalan Aydın et al., 2023) (圖 1)。

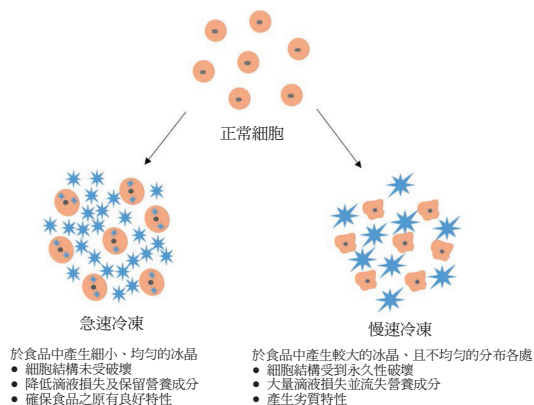


圖 1 冰晶產生對產品品質的影響 (Köprüalan Aydın et al., 2023)

目前水產品在冷凍加工面臨許多問題，傳統的冷凍加工手段可能會導致水產品發生不可抗的物理或化學變化，且冷凍加工耗時較長，機械運轉過程耗能較多，對環境也構成重大負擔，因此學界正在研究並開發許多新穎技術來改善傳統冷凍技術。

傳統冷凍技術

傳統的冷凍技術依其熱傳導方式主要分為氣冷式冷凍、間接接觸式冷凍及直接接觸

式冷凍，其冷凍過程直接由不同的環境介質來傳導熱量，使食品達到低溫狀態。食品因自身導熱係數低，冷凍效率通常較差，因此容易產生相對較大、不規則且分布不均勻的冰晶，而對細胞結構造成破壞，引起水產品滴液 (drip) 的損失及蛋白質變性等品質改變，並持續在冷凍進程影響產品質地及脂質氧化作用。

一、氣冷式冷凍

氣冷式冷凍是透過冷凍機冷卻空氣，使環境達到低溫後使產品凍結，因此又稱空氣式冷凍法，亦可二分為使空氣自然流動之靜止空氣式冷凍，以及加裝送風機之送風式冷凍。以空氣為基礎的冷凍在食品工業中被廣泛應用，舉凡日常見於便利商店、量販店及家用之冰箱皆以此原理建構，但由於空氣的導熱性差，冷凍速率低而導致較長的冷凍時間，且溫度波動較大，容易使水分子形成較大之冰晶。

二、間接接觸式冷凍

間接接觸式冷凍方法是將水產品放置在已被冷媒冷卻的冷卻裝置上，例如置物平台、托盤或輸送帶，間接與冷媒進行熱交換並凍結產品。與氣冷式冷凍相比，間接接觸式冷凍選用之材質多以金屬為主，表面熱傳導速率更高，因此在相同的冷凍溫度下，具有更快的冷凍速率。間接接觸冷凍法雖然成本低廉且便於建置，但由於接觸面冷卻速度較快，冰晶會由食品的接觸面開始生長，造成冰晶生長不均勻，使產品外觀容易有膨脹或變形之問題，因此業界使用間接接觸式冷凍之水產品如蝦類，常以包冰處理來固定形狀後再進行冷凍。

三、直接接觸式冷凍

直接接觸式冷凍係將冷媒降溫後通過噴霧或浸泡等方式與水產品直接接觸，從而進行熱交換並凍結食品。本方法必須確保冷凍液體的食用安全性和無污染性，常見的接觸介質包括鹽水和液態氮。利用冷媒直接接觸水產品，可以獲得最大的導熱面積以加快冷凍速率，然而，由於冷凍介質與漁獲的直接接觸，容易使蛋白質變性或加快脂肪氧化程度，而限制了其在水產品中的廣泛應用。

新穎冷凍技術

一、衝擊式冷凍 (Impingement freezing)

衝擊式冷凍是少數真正實現商業化的冷凍方法之一，衝擊是指將冷卻空氣以極高速度 (高達 50 ms^{-1}) 噴射至食品表面，與傳統送風式冷凍原理相似，是透過氣體擾動而提高食品與環境的熱交換速率，並實現比傳統送風式冷凍更高的冷凍速度。水產品常使用之個別急速冷凍 (individual quick freezing, IQF) 即以此為原理設計，根據產品厚度，與傳統送風式冷凍在同樣溫度下可提升約 60—80% 的冷凍速率，並具有較低的重量損失 (Salvadori and Mascheroni, 2002)。雖然衝擊式冷凍具有上述優點，但本技術仍受產品厚度及大小限制，且因操作所使用的送風機相比傳統送風式冷凍的流速更大，故相對也產生較多的耗能 (表 1)。

二、超音波輔助冷凍

(Ultrasound-assisted freezing)

超音波在近年來因易於應用且不損壞產品等特性，在食品工業中常用於輔助萃取、

乳化等加工技術，依其應用通常被分為三個區段，16–100 kHz 是功率超音波 (power ultrasound)、100 kHz–1 MHz 是高頻超音波 (high frequency ultrasound) 以及 1–10 MHz 是診斷超音波 (diagnostic ultrasound)，但應用於輔助冷凍時，常使用處理頻率為 20–100 kHz。研究顯示，超音波能誘導冷凍成核，使冰晶分布區域更均勻，且超音波因空蝕現象 (超音波作用於流體內時，因作用的壓力令流體內產生不同大小的氣泡) 所產生的大氣泡，在破裂後其壓力可破碎已存在的冰晶，並加速冷卻介質中的熱對流。目前超音波雖應用於輔助冷凍，但業界未廣於實行原因，係因其於空氣中穿透力較差，通常需借助液體作為介質傳導，目前較常施用於解凍相關之應用。

三、高壓輔助冷凍 (High pressure-assisted freezing)

近年來利用高壓輔助加工的食品已成為市場寵兒，常被作為冷殺菌之加工手段而應用於果汁等產品，而 2000 年後學界也開始著墨在輔助冷凍方面。冷凍相關之應用分為高壓輔助冷凍、壓力轉換輔助冷凍 (Pressure shift-assisted Freezing) 及高壓誘導成核 (High pressure-induced crystallization)。在高壓冷凍過程中，壓力會改變水的凍結點，可使水在低溫下仍保持良好的冰晶形態和結晶情形，以減少細胞內冰晶的體積膨脹，並產生細小、均勻分散的冰晶。高壓除改善冰晶形態外，因蛋白質在高壓下也容易產生變性，因此同時具有抑制微生物生長及酵素作用之功能，但應用於水產品時則因魚種不同而產生不同的效果，例如應用於魚排時，過

高的壓力會使魚體表面蛋白質變性，改變原本魚肉半透明之性狀；蝦類在高壓下會則可脫落蝦殼；貝類則因貝柱之蛋白質變性，而產生開殼作用，有鑒於以上情形，選擇合適的產品並探討較適之壓力條件為進行開發的關鍵因子。

四、電場輔助冷凍 (Electrostatic-assisted freezing)

電場在輔助冷凍之研究上主要分為靜電場 (static electric field) 及脈衝電場 (pulsed electric field)，靜電場是在電極間持續輸出電場，其強度或方向不會隨時間變化；脈衝電場則在位於兩個電極之間的施加到具有非常短 (以微秒為單位) 的高電壓脈衝。在一定強度的電場輔助下，可穩定水分子的偶極矩，使食品中的冰晶結構排列更加均勻，易發生冰晶成核現象，縮小冷凍過程中冰晶粒徑，而電場間產生的離子風也可加速熱傳導速率，而提升冷凍速率。電場輔助冷凍在水產品應用上，因脈衝電場在處理時會在細胞膜上形成穿孔作用，可抑制微生物生長，減緩揮發性鹽基態氮上升速度，具有保鮮之作用，但由於電場運作時容易產生臭氧等環境自由基，也可能會影響氧化速率。

五、磁場輔助冷凍 (Magnetic resonance-assisted freezing)

磁場輔助係使用永久磁鐵或電磁線圈來施加磁場，其原理與電場輔助冷凍相似，在強磁場下，水分子受外部磁場而被磁化，使其偶極矩方向穩定，使水分子均勻排列並形成冰晶，在食品中形成較均勻的冰晶分布，並具有縮短冷凍時間、減少食品細胞損傷及解凍損失等效果。日本 ABI 公司開發了一種

冷凍生物組織之冷凍技術，該裝置即使用感應線圈及永久磁鐵產生磁場，而市售宣稱使用細胞活存技術 (cells alive system, CAS) 之冷凍水產品即以此為原理來生產。

未來展望

水產品冷凍技術的發展過程中，傳統方法雖然為我們提供基本保存食品的手段，但仍有著諸多限制和挑戰。近幾年來衝擊式冷凍改進傳統送風式冷凍具較慢熱傳的問題後，其高效率的凍結速度也有效地縮短減冷凍的時間，同時保持較高的產品品質和營養價值，因此與技術相關之冷凍設備被迅速商業化。然為追求更高品質的冷凍水產品，新穎輔助冷凍技術帶著改進食品熱傳導能力、冰晶生成狀態等各種額外優勢，也正如火如

荼地進行開發中，如超音波輔助冷凍利用超音波能量誘導冷凍成核，使冰晶分布更加均勻，同時加速冷卻介質中的熱對流，進一步提高冷凍效率，而高壓、電場和磁場等輔助冷凍則通過改變水分子的排列和結構，進一步優化了冰晶的形成，從而有效地減少冷凍過程中的質量損失和品質變化。

然而，這些新穎技術仍面臨著一些挑戰，例如技術成本、設備要求、產品應用多樣性等方面的問題，需要不斷的研究和改進，但它們無疑為水產品的冷凍加工帶來了更多可能性和機遇。期待未來這些技術能夠進一步成熟和普及，為人們提供更加安全、高效、品質優良的冷凍水產品，從而促進水產品工業的健全發展，滿足人們日益增長食安的需求。

表 1 各種新穎冷凍技術的優缺點

新穎冷凍技術	是否已商業化	優點	缺點
衝擊式冷凍	是	<ul style="list-style-type: none"> ● 冷凍速度快、安裝方便、較無安全性問題 ● 技術已成熟，設備費用相對低 	<ul style="list-style-type: none"> ● 耗能較大 ● 受限於產品厚度
超音波輔助冷凍	否	<ul style="list-style-type: none"> ● 空泡可擊碎原有冰晶，使冰晶縮小 ● 空泡破裂產生之壓力帶動食品的熱對流，提升食品熱傳性質 ● 組織破壞程度較小 ● 減少滴液損失 	<ul style="list-style-type: none"> ● 高瓦數超音波輸出易產生廢熱 ● 穿透能力低 ● 空氣中傳導能力低，需借助液體作為介質
高壓輔助冷凍	否	<ul style="list-style-type: none"> ● 高壓下可形成較小且構型良好之冰晶 ● 透過高壓改變水的凍結點，提高冰晶形成速度 ● 抑制微生物生長及酵素作用 	<ul style="list-style-type: none"> ● 現有高壓設備昂貴 ● 高壓容易導致蛋白質變性 ● 不適用於特定水產品
電場輔助冷凍	否	<ul style="list-style-type: none"> ● 電場穩固水分子排列情形，使冰晶分布均勻 ● 電場產生的離子風可提升與環境之熱交換能力，提升冷凍速度 ● 脈衝電場可抑制微生物，延緩揮發性鹽基態氮上升速度 	<ul style="list-style-type: none"> ● 高強度電場產生之自由基可能影響蛋白質及脂質氧化速率 ● 高電壓輸出具有潛在工安問題 ● 機制尚不明確
磁場輔助冷凍	是	<ul style="list-style-type: none"> ● 磁場穩固水分子排列情形，使冰晶分布均勻 ● 提升熱傳導能力及冷凍速度 ● 已有商業化設備 	<ul style="list-style-type: none"> ● 現有商業化設備昂貴 ● 機制尚不明確