

大規模製造鈣鈦礦量子點

日本的研究人員已開發出鈣鈦礦量子點的大規模生產技術，為其在 LED 顯示技術、農業技術等多個領域的廣泛應用做好準備。



伊勢化學工業股份有限公司 (日本, 東京) 生產的發光鈣鈦礦量子點。

可以將紫外線轉換為可促進作物生長波長的塑膠薄膜，是由鈣鈦礦量子點 (PeQDs) 製成的一種突破性材料的潛在應用之一。鈣鈦礦是一種可印刷或塗佈成薄膜的晶體材料，應用範圍廣泛，包括太陽能電池、催化劑和感測器。奈米級的 PeQDs 具有優異的光學與電學特性，為鈣鈦礦材料的另一種應用方式。這些量子點的光學特性，包括高光致發光效率與優異的色純度，使其非常適合用於電子與光電子應用，例如 LED 顯示器、光轉換薄膜和螢光油墨。為了推動這些材料的更廣泛應用，日本山形大學的增原陽人 (Akito Masuhara) 教授所領導的團隊正在研究 PeQDs，涵蓋從材料設計與合成到元件製造的各個方面。擁有利用有機奈米晶體製造有機元件經驗的奈米技術專家增原教授表示，該團隊的目標是開發可擴展的 PeQDs 生產製程。目前，他的研究團隊正與總部位於東京的伊勢化學工業股份有限公司和瑞翁股份有限公司合作。

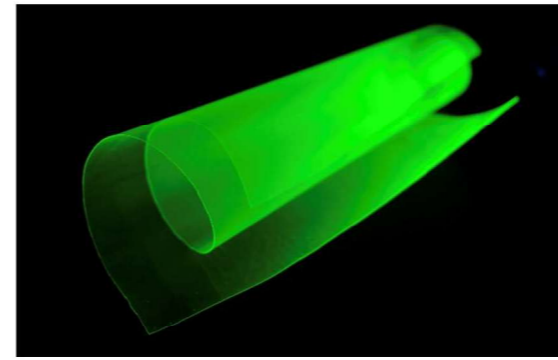
大規模生產

一種常見的 PeQDs 合成方法是配體輔助再沉澱法 (LARP)，這是一種簡單的單釜合成技術，增原表示。由於 LARP 不需要精確的溫度或氣氛控制，因此比現有方法更適合 PeQDs 的大規模生產。然而，使用 LARP 進行 PeQDs 的生產並非沒有挑戰，他指出：「將 LARP 與傳統的規模化

方法結合時，顆粒會發生聚集，導致 PeQDs 的品質下降。」「維持無顆粒聚集的均勻反應環境至關重要。」在伊勢化學工業股份有限公司的專業技術支持下，增原團隊成功地透過一種稱為「強制薄膜微反應器」(FTFR) 的製備方法實現了量產。FTFR 是一種設備，能夠使薄膜強制通過微尺度流道。與傳統的批次合成不同，FTFR 方法透過快速混合與均勻的生長環境，使奈米材料的合成更加均勻。根據增原團隊開發的方法，鈣鈦礦前驅液與適當的溶劑持續供應至反應器。在反應器內，液體展開形成薄膜，促進高效的熱與質傳輸。薄膜的形成確保了均勻的反應時間與溫度，從而產生尺寸分佈窄的量子點。透過調整流速來控制反應時間，研究團隊能夠精確地調控奈米晶體的尺寸。「我們的薄膜反應器為 LARP 方法的規模化提供了理想環境，使得高品質、低成本的 PeQDs 合成成為可能。」伊勢化學工業股份有限公司的研究員，淺倉聰 (Satoshi Asakura) 表示。

提升耐久性

PeQDs 在實際應用中面臨的挑戰之一是其耐久性，因為當其暴露於濕氣、高溫及空氣時，其發光特性會下降。為此，增原向以樹脂產品聞名的瑞翁股份有限公司尋求技術支援。雙方合作發現，將 PeQDs 嵌入聚合物樹脂中，可以有效保護材料，提高其耐久性與穩定性。「為了保護 PeQD 的表面，我們合成了一種特殊的配體，然後在下一階段將其與聚合物結合，」瑞翁股份有限公司的柏木幹文 (Motofumi Kashiwagi) 表示。透過混合 PeQDs 與透明樹脂，研究團隊成功開發出光轉換薄膜的原型。柏木指出：「樹脂能夠保護 PeQD 表面，顯著降低其在外環境下的劣化速度。」增原表示，這種高性能樹脂具有低吸水性、高透明度和良好的柔韌性，是 PeQD 光轉換元件的理想材料。「透過修飾核心奈米晶體的表面配體，並將其嵌入樹脂中，可以顯著提升鈣鈦礦量子點的耐久性，」他補充道。「一般來說，當我們將 PeQDs 與聚碳酸酯 (polycarbonate) 或聚甲基丙烯酸甲酯 (poly(methyl methacrylate)) 等聚合



將鈣鈦礦量子點嵌入聚合物樹脂並製造成薄膜(如圖所示)，有助於提升材料的耐久性與穩定性。

物混合時，容易產生顆粒聚集，但在本研究中，我們成功製備了均勻的薄膜。」

更優質的顯示技術

PeQDs 具有廣泛的潛在應用，包括顯示技術、閃爍體、波長轉換薄膜及電晶體等。「我們正在研究各種應用，但主要關注的是顯示技術，」增原表示。研究人員指出，PeQDs 優異的光學特性使其成為電腦與電視螢幕等彩色顯示器的理想材料。與傳統的發光材料相比，PeQDs 能夠呈現更鮮豔的色彩。增原表示，高色彩轉換效率、高色純度、可調節的可見光範圍，以及低生產成本，使 PeQDs 成為超廣色域次世代顯示技術的理想材料。「我們現在可以在不影響光學性能的前提下實現大規模生產，」他補充道。利用瑞翁股份有限公司的高性能樹脂與 PeQDs，研究團隊能夠開發具



含有鈣鈦礦量子點的光轉換薄膜下培養的微藻。

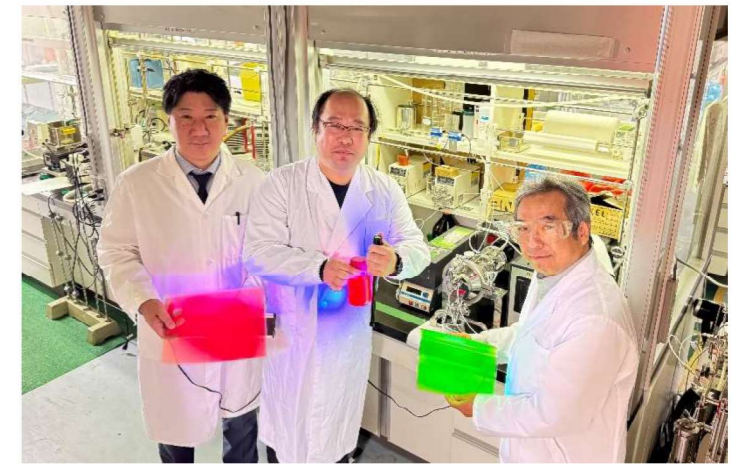
產品諮詢聯絡方式

PeQDs 技術開發： 增原陽人 (國立大學法人山形大學) masuhara@yz.yamagata-u.ac.jp
 螢光油墨與 FTFR： 淺倉聰 (伊勢化學工業股份有限公司) asakura@isechem.co.jp
 顯示器用光轉換薄膜： 柏木幹文 (瑞翁股份有限公司) kashiwa@zeon.co.jp

有高發光特性且易於加工的發光元件薄膜。「我們的目標是製造不影響 PeQDs 發光特性的薄膜，以滿足次世代顯示器的色彩標準，」增原表示。此外，研究團隊還在開發光轉換薄膜，用於在人工光照條件下培養水耕作物 (如葉菜類蔬菜) 或微藻類。「這些應用充分利用了薄膜的寬色域分佈與高色純度，」增原指出。目前，增原團隊的目標是開發最適化陽光利用的農業薄膜。他們的下一步計畫是提升其耐久性，以適應長期的戶外環境使用。

螢光油墨

PeQDs 還可以分散於有機溶劑中，製備具有卓越特性的螢光油墨，例如高亮度效率、銳利的發光光譜，以及可在整個可見光範圍內調節顏色。這類油墨可應用於噴墨列印或印刷塗層技術等領域。「我們已經開發出多種發光顏色的鈣鈦礦量子點合成技術，並成功製備出具有優異光學特性的螢光油墨。我們的量子點分散液可覆蓋約 95% 的色域範圍，」增原表示。研究團隊將持續改良這些油墨，並努力解決薄膜的穩定性與耐久性問題，同時與業界夥伴合作，推動 PeQDs 在各種應用領域的實用化。「克服這些技術挑戰，將是推動這項前瞻技術廣泛商業應用的關鍵，」增原強調。



增原陽人、淺倉聰和柏木幹文 (從左至右) 在實驗室規模的試驗中，使用強制薄膜微反應器製備出鈣鈦礦量子點樣品。

本內容係由本研究團隊翻譯並轉載自 2025 年 3 月 19 日刊登於 Nature.com[※] 的報道廣告「Making perovskite quantum dots at scale」的正文。臺灣華語翻譯及內容皆由上述三個機構負責發布。

※Nature.com 為國際綜合科學期刊《Nature》的線上版本，致力於傳播最前沿的科學研究。

原文連結：<https://www.nature.com/articles/d42473-025-00002-3>