

出國報告（出國類別：進修）

心臟影像光子計數能譜 CT 的 高階訓練與研究

服務機關：國立臺灣大學醫學院附設醫院

姓名：李文正

派赴國家：法國

出國期間：114 年 5 月 19 日至 114 年 8 月 18 日

報告日期： 114 年 10 月 16 日

摘要

本次於法國 Lyon University Hospital 進修光子計數能譜 CT (Spectral Photon-counting CT, SPCCT) 之心臟影像。該院使用全球唯一投入臨床研究的 Philips SPCCT 原型機，我參與冠狀動脈非鈣化斑塊標註、能譜參數視覺化與資料驗證研究，並熟悉偵測器原理與影像重建流程。後期並延伸觀摩 Siemens Naeotom Alpha photon-counting CT 的臨床應用，以比較不同偵測器設計與工作流程整合。SPCCT 具備超高空間解析度與材料分解能力，可改善傳統 CT 在斑塊組成分析與鈣化假影處理的限制；惟資料量龐大、參數敏感度高，臨床使用仍需標準化流程與明確分工。在醫院制度面，Lyon 醫療團隊職責清晰、會議節奏穩定且品質監控嚴謹，展現研究與臨床並行的成熟模式。本報告彙整實務心得，並提出技術驗證、教學模式與團隊分工等具體建議，以供未來臨床與研究發展參考。

目次

目的	 P. 1
過程	 P. 2
心得	 P. 7
建議事項	 P. 8

目的

本次出國進修主要目的為前往法國 Lyon University Hospital (Hospices Civils de Lyon, Louis Pradel Hospital)，學習與觀摩光子計數能譜電腦斷層 (Spectral Photon-counting Computed Tomography, SPCCT) 在心臟影像學的最新發展與研究應用。此技術結合高解析度偵測器與能譜分析能力，能同時提供形態與能量資訊，可望改善傳統心臟 CT 在斑塊組成分析、影像雜訊與空間解析度方面的限制，對冠狀動脈疾病的診斷與風險評估具有重要潛力。

本次進修的目標包括三項：

- (一) 深入了解光子計數能譜 CT 的物理原理、影像重建流程與臨床應用方向；
- (二) 學習歐洲心臟影像研究團隊在研究影像的建立、標註與能譜分析上的方法與制度；
- (三) 觀摩法國大型醫學中心放射科的運作架構與專業分工，特別是放射師與醫師在臨床與研究整合中的角色。

綜合而言，本次進修的目的在於透過實地學習與觀察，掌握光子計數 CT 技術的研究現況與臨床應用潛力，同時了解歐洲醫學中心在研究制度與臨床整合上的運作方式，作為本院未來引進新一代能譜 CT 與推動跨部門影像研究的重要參考。

過程

（一）進修機構與指導團隊

進修單位為法國 Lyon University Hospital（Hospices Civils de Lyon, Louis Pradel Hospital），該院為全法國最具代表性的心臟專科醫院之一。指導團隊由心臟影像中心的 Dr. Philippe Douek 以及 Dr. Sara Boccalini 帶領，其團隊長期參與多項國際合作研究，重點領域包括心臟 CT、冠狀動脈斑塊定量與能譜影像分析。本次進修期間，主要學習對象為該中心研究團隊的影像分析與標註流程，並觀察歐洲研究機構在臨床與研究整合上的實務運作。



圖一：法國 Lyon University Hospital 目前擁有全球唯一投入臨床研究的 Philips 光子計數能譜 CT（Spectral Photon-counting CT, SPCCT）系統。

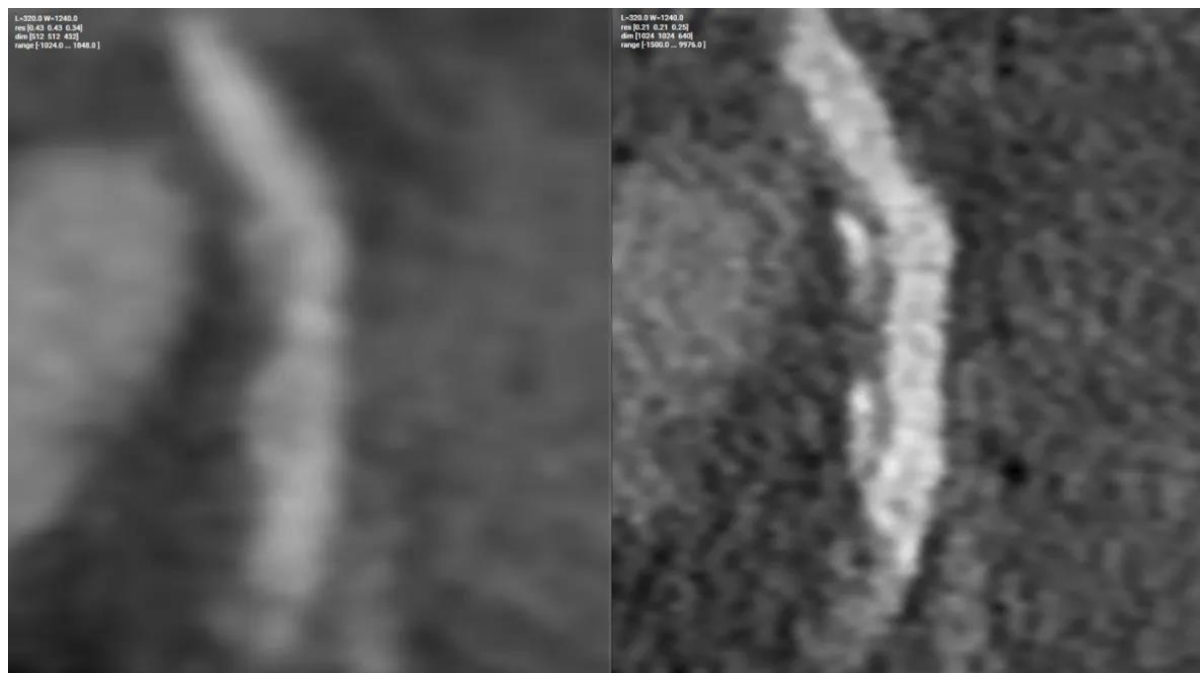
（二）進修內容與階段安排

1. 初期階段（5 月中至 6 月上旬）

初期以熟悉光子計數能譜 CT（Spectral Photon-counting CT, SPCCT）系統與研究環境為主。Lyon 醫院所使用的 Philips photon-counting CT 為研究用原型機，主要用於能譜影像的收集與分析。此階段參與研究會議討論，了解 SPCCT 的影像重建流程、能譜分層邏輯以及研究資料的標註規範。

2. 中期階段（6月至7月）

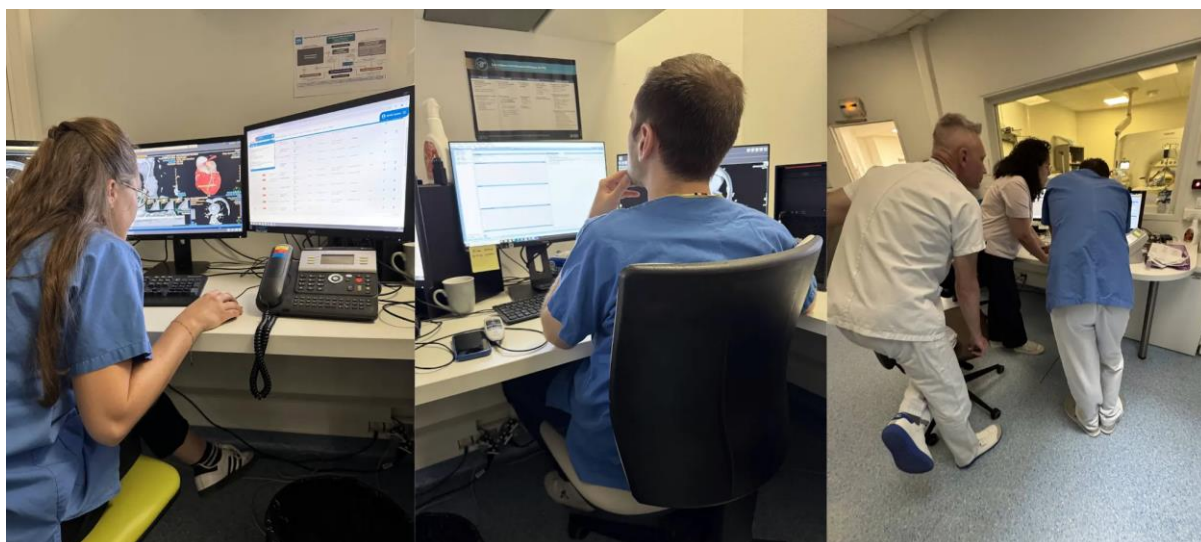
進入研究標註與資料分析階段。實際參與非鈣化斑塊（non-calcified plaque）標註、影像分層、以及能譜參數的視覺化分析。研究團隊採用自建標註工具，以確保斑塊邊界與能量分布的一致性。此階段亦觀察到研究資料的匿名化流程、標註版本管理與交叉驗證制度，對研究品質控管的嚴謹度留下深刻印象。



圖二：同一位病患的冠狀動脈電腦斷層影像比較。左圖為 Philips 7500，右圖為 Spectral Photon-counting CT（SPCCT）。相較於目前最高階的傳統 CT，SPCCT 能提供更高空間解析度與更清晰的冠狀動脈細節。

3. 後期階段（7月至8月）

後期以整合學習成果與制度觀察為主。了解研究進度與影像品質檢討機制。觀察臨床醫師、放射師與研究人員間的協作流程。研究團隊重視跨專業溝通，展現高程度的整合。



圖三：法國 Lyon University Hospital 的電腦斷層檢查與報告流程皆於檢查室內由團隊協作即時完成。左圖與中圖為住院醫師撰寫初步報告；右圖顯示主治醫師於掃描現場與兩位放射師討論病患影像結果，以決定是否需追加掃描。

此外，於後期階段亦安排參觀 **Siemens Naeotom Alpha photon-counting CT** 的臨床應用現場，以實際比較不同系統的偵測器設計、影像重建演算法與臨床可行性。觀察結果顯示，**Siemens 系統**在臨床整合度與影像穩定性上具優勢，而 **Philips prototype** 則於能譜分析的彈性與研究導向上更為突出。這次觀摩補足了 Lyon 醫院仍處於研究階段的限制，使我對光子計數 CT 在臨床應用與發展趨勢上有更全面的理解。

（四）綜合觀察

整體而言，本次進修的過程涵蓋研究學習與制度觀察兩個層面。在研究面，實際參與標註與分析流程，使我深入理解光子計數能譜 CT 於心臟影像分析中的潛力與挑戰。在制度面，觀察到歐洲放射科強調明確分工與標準化流程，放射師專業化程度高、與醫師協作緊密，顯示其研究與臨床能夠有效並行運作。

（五）Photon-counting CT: Principles and Current Developments

To complement the hands-on research experience, the following section summarizes the technical foundation and development of **Photon-counting CT (PCCT)**, with emphasis on the Philips *Spectral Photon-counting CT (SPCCT)* system used at Louis Pradel Hospital in Lyon.

1. Technical Principles

Photon-counting CT represents a transformative advance in X-ray detector technology. Unlike traditional energy-integrating detectors (EIDs), which convert X-ray photons into visible light before electrical readout, photon-counting detectors (PCDs) directly convert individual photons into electrical pulses using semiconductor materials such as cadmium telluride (CdTe) or cadmium zinc telluride (CdZnTe, CZT). CZT is a modified form of

CdTe semiconductor, incorporating a small amount of zinc to improve crystal uniformity and energy resolution. Each photon is individually counted and assigned to discrete energy bins, enabling true spectral separation and multi-energy imaging in a single acquisition.

Compared with conventional CT, PCCT provides:

- **Superior spatial resolution** — voxel size around 250 μm , allowing detailed visualization of coronary plaques and stents.
- **Reduced electronic noise** — due to direct signal conversion without light amplification.
- **Improved dose efficiency** — low-energy photons are effectively utilized.
- **Intrinsic spectral discrimination** — material decomposition achievable from one source and one detector configuration.

2. Philips Spectral Photon-counting CT (SPCCT)

At Louis Pradel Hospital, the **Philips SPCCT prototype** utilizes a **CZT-based single-layer photon-counting detector** with a **275 × 275 μm pixel pitch** and **1.76-cm collimation**, operating at a **0.33-second rotation time**. Images are reconstructed at **0.25-mm slice thickness** on a **1024 × 1024 matrix**, generating isotropic ultra-high-resolution datasets.

This configuration enables high-fidelity coronary CT angiography with approximately **30% lower radiation dose** compared with conventional EID CT. The system acquires high-resolution morphological and energy-resolved data simultaneously. Through advanced reconstruction algorithms, SPCCT performs voxel-based material decomposition, allowing differentiation of iodine, calcium, and lipid signals within coronary plaques.

The study by **Fahrni et al. (2025, Investigative Radiology)**, conducted by the same Lyon SPCCT research group with which this fellowship was affiliated, demonstrated the diagnostic performance of this system in very-high-risk coronary artery disease. SPCCT achieved **100% sensitivity** and **90% specificity** for detecting $\geq 50\%$ stenosis compared with invasive coronary angiography, outperforming conventional CT (75% and 50%, respectively). Nearly **40% of stenoses were reclassified** under CAD-RADS 2.0 due to reduced blooming artifacts and improved lumen quantification.

During this fellowship, I participated in the annotation and quantitative analysis of the coronary SPCCT datasets forming part of this study, focusing on non-calcified plaque segmentation, energy-dependent attenuation analysis, and spectral parameter interpretation for tissue characterization.

3. Comparison of Major PCCT Systems

Photon-counting CT technology has now been developed by multiple manufacturers, each adopting unique detector materials and design philosophies to optimize performance:

- **Siemens Healthineers:** The *Naeotom Alpha* (FDA-approved in 2021) employs **CdTe detectors** optimized for high count-rate capability and long-term stability in routine

clinical settings, focusing on robust workflow and consistent spectral material mapping.

- **Philips Healthcare:** The *Spectral Photon-counting CT* system uses **CdZnTe (CZT)** detectors, a zinc-doped modification of CdTe that enhances crystal uniformity, energy resolution, and thermal stability. This design supports quantitative spectral accuracy and advanced plaque composition analysis.
- **GE HealthCare:** Develops **deep-silicon detectors** with vertically structured microchannels designed for high photon flux and linear response, prioritizing throughput and mechanical durability over fine spectral precision.
- **Canon Medical Systems:** Also employs **CdZnTe (CZT)** detectors in its photon-counting platform, aiming for stable energy discrimination and integration into its existing spectral CT ecosystem.

In summary, **Philips, Siemens, and Canon** rely on direct-conversion semiconductors (CdTe or CZT), while **GE** adopts a fundamentally different **deep-silicon architecture**. Despite these material and engineering distinctions, all aim to achieve accurate photon-by-photon energy detection, reduce noise, and integrate morphological and spectral data acquisition within a single scan.

4. Future Perspectives

Photon-counting CT enables concurrent acquisition of **anatomical, compositional, and functional** data within one scan. In cardiac imaging, it enhances visualization of non-calcified plaques, enables quantitative iodine and lipid mapping, and supports AI-assisted reconstruction for improved diagnostic precision.

As detector materials, readout electronics, and spectral algorithms continue to evolve, photon-counting CT is poised to transform from a morphological imaging tool into a comprehensive platform for **quantitative, functional, and tissue-specific cardiovascular assessment**, marking a new era in precision cardiac imaging.

References

1. Hoe J.W.M. *Current Status of Coronary Computed Tomography Angiography Using Ultra-high-resolution Computed Tomography Scanners Including the Use of Photon-counting Computed Tomography*. **Journal of Radiological Science**. 2024;49(2):93. doi:[10.4103/jradiolsci.JRADIOLSCI-D-24-00010](https://doi.org/10.4103/jradiolsci.JRADIOLSCI-D-24-00010).
2. Fahrni G, Boccalini S, Mahmoudi A, et al. *Quantification of coronary artery stenosis in very-high-risk patients using ultra-high resolution spectral photon-counting CT*. **Investigative Radiology**. 2025;60(2):114–122. doi:[10.1097/RLI.0000000000001109](https://doi.org/10.1097/RLI.0000000000001109).

心得

本次於法國 Lyon University Hospital (Louis Pradel Hospital) 進修，除獲得光子計數能譜 CT (Spectral Photon-counting CT, SPCCT) 技術的理解，更深刻體會歐洲醫學中心在研究制度、臨床文化與工作節奏上的成熟運作。

在**專業學習面**，透過參與非鈣化斑塊標註與能譜分析，我了解光子計數 CT 在冠狀動脈影像中的優勢與限制。SPCCT 的高空間解析度與能譜資訊能改善傳統 CT 在微小斑塊組成辨識上的不足，但實際研究過程也顯示其資料量龐大、重建流程複雜、且對參數設定高度敏感，顯示臨床導入仍需嚴謹的標準化策略。進修期間我實際參與的分析工作屬於醫師層面的專業任務，研究助理的角色主要集中於資料整理與流程協調，放射師並未直接參與影像重組或能譜分析，這與臺灣的臨床與研究角色劃分不同。

在**研究制度與文化面**，法國放射科展現出高度的系統化與職責清晰。各職類分工嚴謹，醫師獨立完成影像重組、標註與初步分析，研究助理則確保資料管理與匿名化流程一致。這種模式雖強調個人責任，但也透過制度化的會議與品質監控，確保研究進度與成果穩定推進。對比臺灣部分仰賴個人熱忱與臨時協調的研究文化，Lyon 醫院的做法在效率與一致性上更具制度性，提供了可供參考的組織模式。

此外，於後期安排觀摩 Siemens Naeotom Alpha photon-counting CT 的臨床應用現場，使我得以從研究原型延伸至臨床實務。Siemens 系統已展現高度的臨床穩定性與流程整合，而 Philips prototype 在能譜分解與研究分析上具更高彈性。這次對照使我更清楚光子計數 CT 的發展正由研究導向逐步邁向臨床成熟，也體會不同產業策略在技術導入階段的互補性。

在**文化與生活層面**，法國的臨床工作節奏較為穩定，醫師多能保持專注而不受臨時性任務干擾，這種制度性專注文化對我產生深刻影響。相較之下，臺灣臨床環境的高壓與頻繁中斷，使持續專注成為挑戰。此行讓我重新思考「專注與節奏」對專業表現與長期可持續性的意義，也促使我思考如何在臺灣醫療體系中建立更健康的工作節奏與團隊互動模式。

這次進修不僅讓我獲得光子計數 CT 的專業知識與實務經驗，更讓我理解制度成熟與文化穩定對研究與臨床發展的重要性。未來我將持續推動以明確分工與制度化支持為基礎的研究環境，並在臨床與教育中實踐「專注、有節奏、可持續」的醫學工作文化。

建議事項

綜合本次在法國 Lyon University Hospital 的進修經驗，光子計數能譜 CT（Spectral Photon-counting CT, SPCCT）技術、歐洲研究制度與臨床文化均對本院未來的技術導入與制度發展具有重要啟發。以下提出具體建議：

（一）臨床技術導入與驗證

光子計數 CT 是下一代高解析與能譜影像技術，未來將成為臨床冠狀動脈影像的重要方向。建議本院在採購與導入時，預先建立跨部門工作小組（放射科、心臟內科、醫工與資訊部門），共同規劃臨床應用與研究主題。

（二）研究制度與團隊分工

Lyon 醫院的研究團隊強調分工明確與流程標準化：醫師負責影像重組與標註，研究助理管理資料匿名化與交叉驗證，確保一致性與可追溯性。

（三）專注力與工作節奏文化

法國放射科在時間管理與工作節奏上展現高度自律與制度支持。醫師每日臨床任務明確，避免臨時干擾；報告與研究時段分開規劃，確保專注效率。

建議本院可逐步建立「專注時段」制度，例如報告區與研究區分流、每日固定專注時段不受行政干擾，並於住院醫師訓練中納入「專注與節奏管理」課題。此舉不僅有助於報告品質提升，也能促進長期工作可持續性。

（四）跨機構合作與國際連結

本次與 Lyon 團隊的合作經驗顯示，國際研究團隊在資料管理、倫理與品質控管方面極為嚴謹。建議未來可與友好的國外醫院（如目前我已有接觸聯繫的法國 Lyon、瑞士 Basel、日本 Iwate Medical University）建立長期合作，進行跨國心臟電腦斷層影像研究，並爭取國際聯合研究或共同發表。強化本院在心臟影像領域的國際能見度。

（五）臨床與教學模式之調整

在 Lyon 的 CT 室觀察中，掃描至正式報告平均約 30 分鐘。主治與住院醫師共處同一空間，住院醫師撰寫初稿、主治即時審閱，教學與臨床並行。放射師獨立負責病患準備、顯影劑注射與品質監控，臨床節奏高效穩定。

建議本院可試行「共同工作區教學模式（Co-working Learning Model）」，讓主治與住院醫師於同一工作區處理不同報告，並即時進行討論與教學。可提升報告品質、減少修正時間，並強化臨床即時教學的深度與頻率。

（六）會議與溝通文化

Lyon 的研究與臨床會議具結構化特徵：會前資料流通、會中聚焦討論、會後即時執行。主持人職責明確、與會者依角色發言，確保節奏緊湊而不冗長。

建議本院可逐步導入以下措施：

1. 採行「短而密」的會議模式（30–45 分鐘），每次聚焦單一議題。
2. 強化會前資料準備與共識形成，避免臨時討論。
3. 透過 Notion、email 或 Slack 等平台推行「非同步溝通」，讓正式會議僅保留需集體決策的部分。

可減少會議時間浪費，提升討論深度與執行效率。

（七）放射師專業角色與制度調整

法國放射師制度重視臨床技術品質與流程穩定，與醫師角色分工清楚。相較之下，本院放射師負荷較重且制度不均。

建議未來可逐步推動：

1. **後處理專責化**：設立專責後處理小組，支援心臟 CT、AI 輔助影像分析與品質監控。
2. **工作項目量化與公平獎勵**：建立臨床操作、後處理與行政工作指標，以確保回饋合理。
3. **副技能制度化**：鼓勵放射師在後處理、AI、教育等領域發展次專長，形成多層次專業結構。
4. **跨專業溝通平台**：定期舉辦醫師、放射師與工程師交流會議，討論流程優化與技術導入。

可兼顧專業成長與臨床負荷平衡，並提升整體影像品質。

（八）文化融合與制度演進

法國制度的優勢在於穩定節奏與清晰分工，臺灣則具執行力與靈活調整能力。未來發展方向不應單純模仿，而應融合兩者優勢——以結構支撐效率、以節奏提升創新。

可透過三個層次落實：

1. **制度層**：建立標準化流程與責任界定。
2. **文化層**：強化專注與節奏意識，減少臨時干擾。
3. **教育層**：以案例與觀察培養住院醫師與放射師對制度運作的理解，形成可持續改進的文化。

結語

此次進修提供我對光子計數能譜 CT 技術、歐洲研究制度與臨床文化的整體理解。未來，我將持續推動以制度化分工與節奏管理為核心的臨床與研究架構，促進臺灣影像醫學在國際舞台上以穩定、高效、具前瞻性的方式發展。