國家同步輻射研究中心
出國報告

出國人姓名：薛心白、李安平

出國日期：115 年 2 月 3 日至 115 年 2 月 6 日

目的地 (國家、城市)：

日本、茨城縣筑波市(Tsukuba, Ibaraki, Japan)與栃木縣大田原市 (Otawara, Tochigi, Japan)

參加會議名稱或考察、研究訓練地點：

- Canon Klystron 工廠驗收測試

(E37310,C S/N 26A003 / 26A004, Factory Acceptance Test)

- 參訪 KEK

(Inter-University Research Institute Corporation High Energy Accelerator Research Organization)

一、目的：

為了執行 TPS LINAC Klystron 強健計畫，中心於 2025 年初進行採購了 Canon E37310 Klystron 一套與單獨一支。為了能了解製作完成的 Klystron 效能，而安排參加工廠測試。並於此行程中順道安排參訪日本高能加速器研究機構設施。

二、行程安排

行程 2026-2-3 ~ 2026-2-6

2026-2-3 (二)：

中心六號門 06:45 出發至桃園機場。

台灣桃園機場第一航廈出發(10:40 MM626 樂桃航空) → 日本東京成田機場第一航廈(14:55)，與 KEK 松本浩教授出關後會合，與松本教授一同前往 KEK 附近下榻旅館並共進晚餐。

2026-2-4 (三)：

與 KEK 谷本育律(Yasunori Tanimoto)教授會合一同前往 KEK，在 KEK 加速器第六研究系大組會議前向大組成員(約 20 人左右，大組長帶名崇(Takashi Obina)教授)報告中心太赫茲設施現況，之後拜訪 KEK PF、 LINAC、ATF、並進入參觀 cERL 設施，與 KEK iCASA 中心主任阪井寬志(Hiroshi Sakai)會談。傍晚與松本教授會合出發前往 Canon 附近那須鹽原市下榻旅館。

2026-12-5 (四)：

前往栃木縣大田原市的佳能電子管器件株式會社(Canon Electron Tubes & Devices ,CETD)，進行 klystron factory acceptance test。

2026-12-6 (五)：

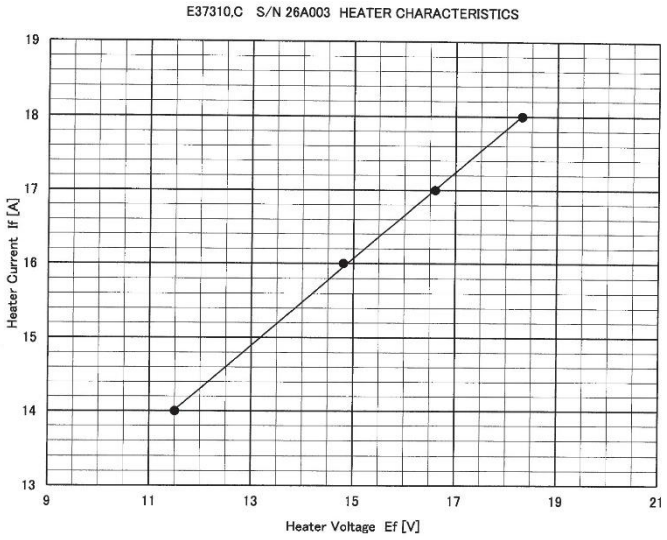
栃木縣那須鹽原市→ 東京都上野→日本東京成田機場第一航廈回程(16:35 MM625 樂桃航空)，與薛心白一同回至中心六號門。

三、Canon Klystron E37310,C 製造與測試狀況：

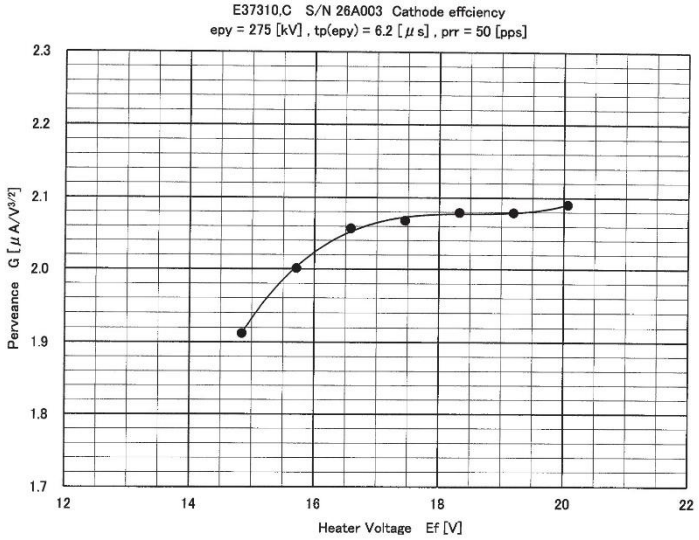
2026/12/5 一早在佳能電子管器件株式會社公司的營業部人員 佐藤周平 先生帶領我們進入工廠區。拜會了 Electron Tube Engineering 多位負責 Klystron 製造的相關工程師及已退休貢獻卓著的大久保良久先生(他是與松本浩教授合作發展 klystron 的重要工程師，並獲得日本政府頒獎)，還有負責測試的安武浩人，並聽取 CETD 公司的近況簡報。在簡報之後進行了初步的信息交流後，進入 Canon Klystron E37310,C S/N 26A003 與 26A004 的測試報告。

1. 速調管 S/N 26A003 測試數據：

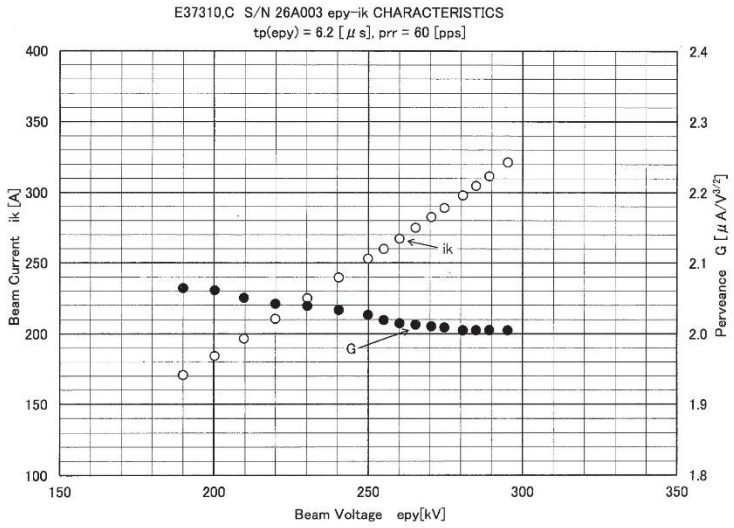
圖一為外加燈絲電壓與燈絲電流的量測數據，電壓/電流在操作區間為線性關係陰，極燈絲電阻為 0.98 歐姆。圖二為電子槍導流係數(perveance)與外加燈絲電壓之關係圖，導流係數的大小在操作區間>1.9 μP，在外加燈絲電壓為 18~20V 的區間內導流係數約為 2.08 μP，符合一般速調管常態運作時值 2μP 左右。圖三為速調管的束流電壓/電流特性與導流係數對束流電壓之關係，在 295 kV 的束流電壓條件下其電流為 322 A。



圖一、速調管 S/N 26A003 燈絲電壓/電流特性量測

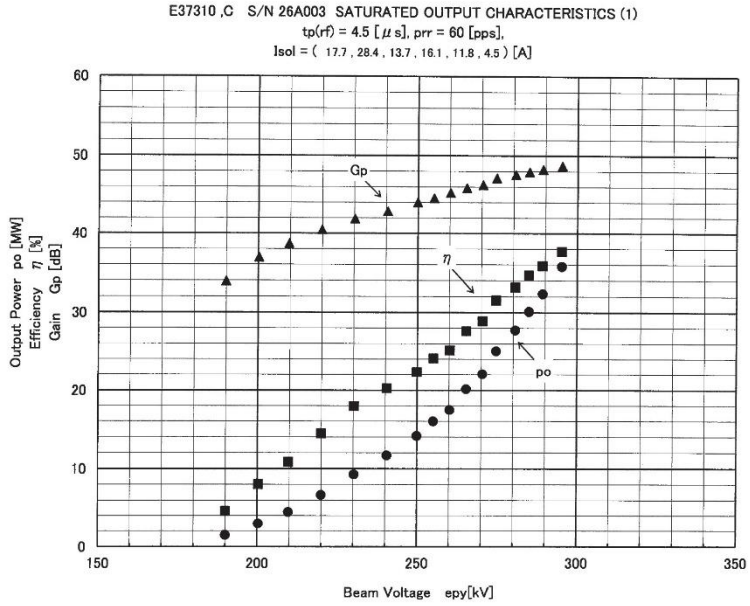


圖二、速調管 S/N 26A003 燈絲電壓/導流係數(perveance)特性量測

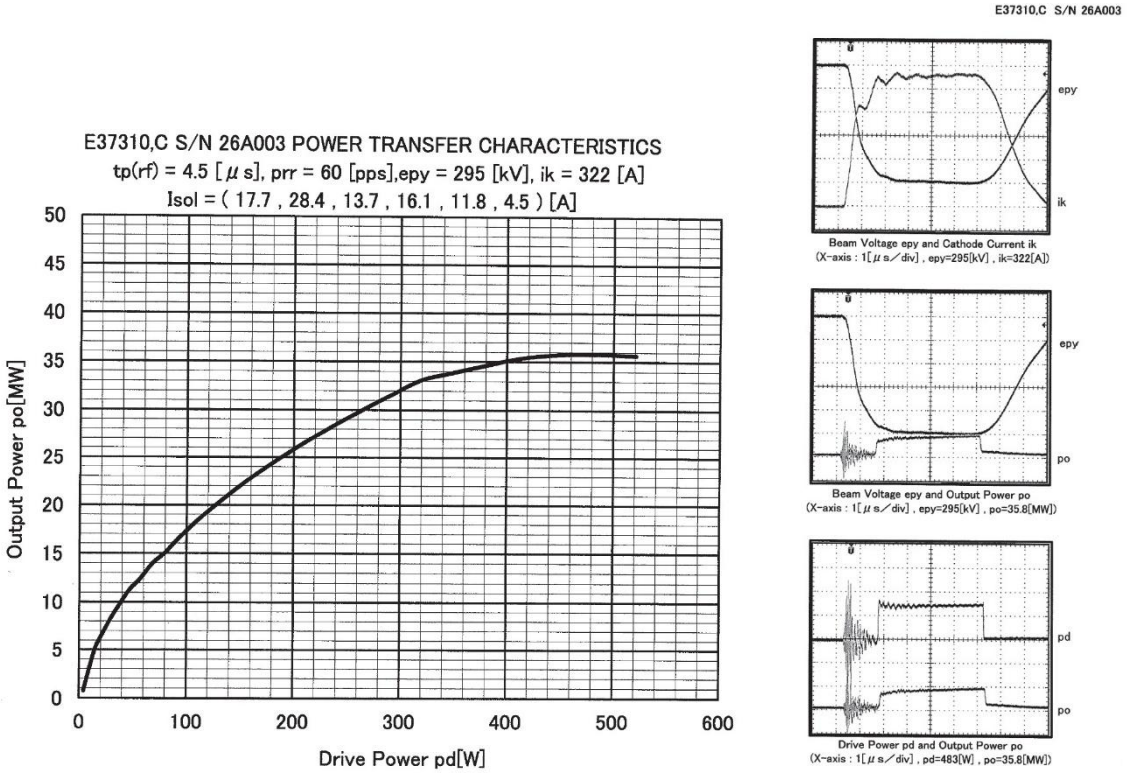


圖三、速調管 S/N 26A003 束流電壓/電流特性與束流電壓/導流係數之量測

圖四為速調管輸出功率、轉換效率與增益對束流電壓之關係圖，當束流電壓操作在 295 kV 時，最大的輸出功率為 36 MW，轉換效率 37.7%，此時速調管的增益為 48.7 dB。圖五的左圖為速調管的功率轉移特性曲線(transfer curve)，當輸入功率為 483W 時，達飽和輸出功率 35.8 MW，右側三幅波形圖由上至下分別為束流電壓/電流，束流電壓/輸出功率以及輸入功率/輸出功率的波型圖，由波形圖可看出有微波功率輸出時波形平坦，且無震盪的現象。



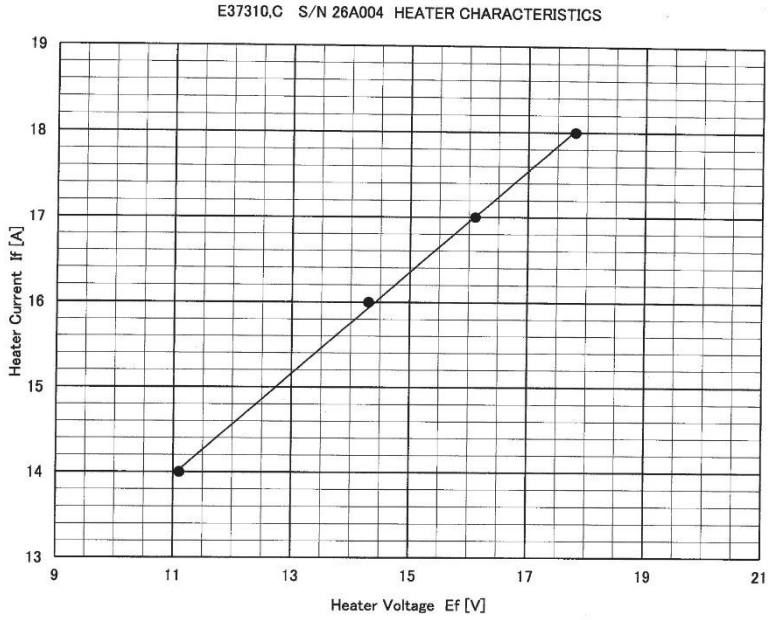
圖四、速調管 S/N 26A003 輸出功率、轉換效率與增益對束流電壓之關係量測



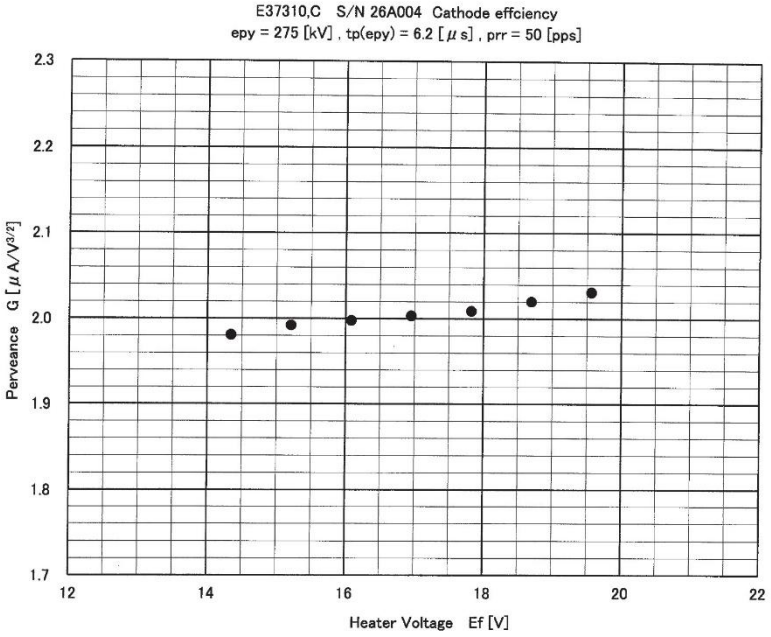
圖五、左圖: 速調管 S/N 26A003 的功率轉移特性曲線，右圖：由上至下分別為束流電壓/電流，束流電壓/輸出功率以及輸入功率/輸出功率的波型圖

2. **速調管** S/N 26A004 **測試數據：**

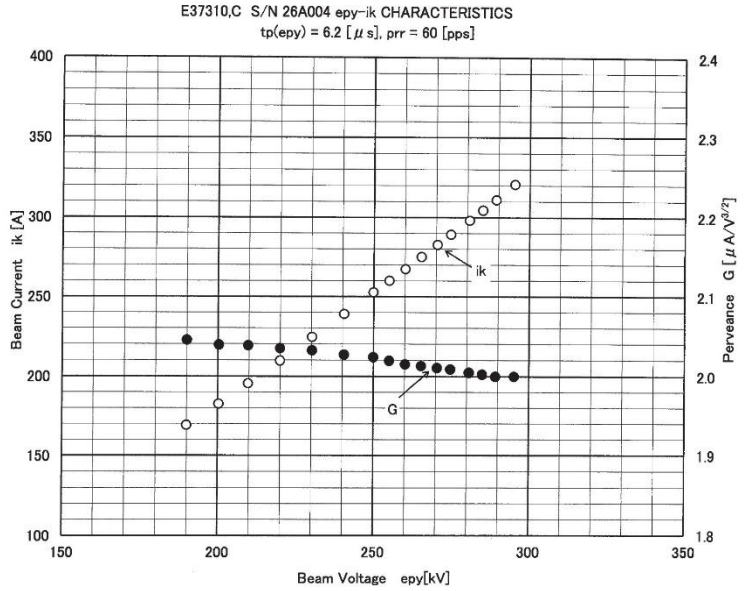
圖六為外加燈絲電壓與燈絲電流的量測數據，電壓/電流在操作區間為線性關係陰，極燈絲電阻為 0.95 歐姆。圖七為為電子槍導流係數(perveance)與外加燈絲電壓之關係圖，導流係數的大小在操作區間內的值落在 1.98~2.04 μP，和速調管 S/N 26A003 的結果相比，導流係數較不受燈絲變化的影響其值約在 2μP。而圖八為圖十二為速調管的束流電壓/電流特性與導流係數對束流電壓之關係圖，在 295 kV 的 Beam Voltage 條件下其電流為 321 A。



圖六、速調管 S/N 26A004 燈絲電壓/電流特性量測

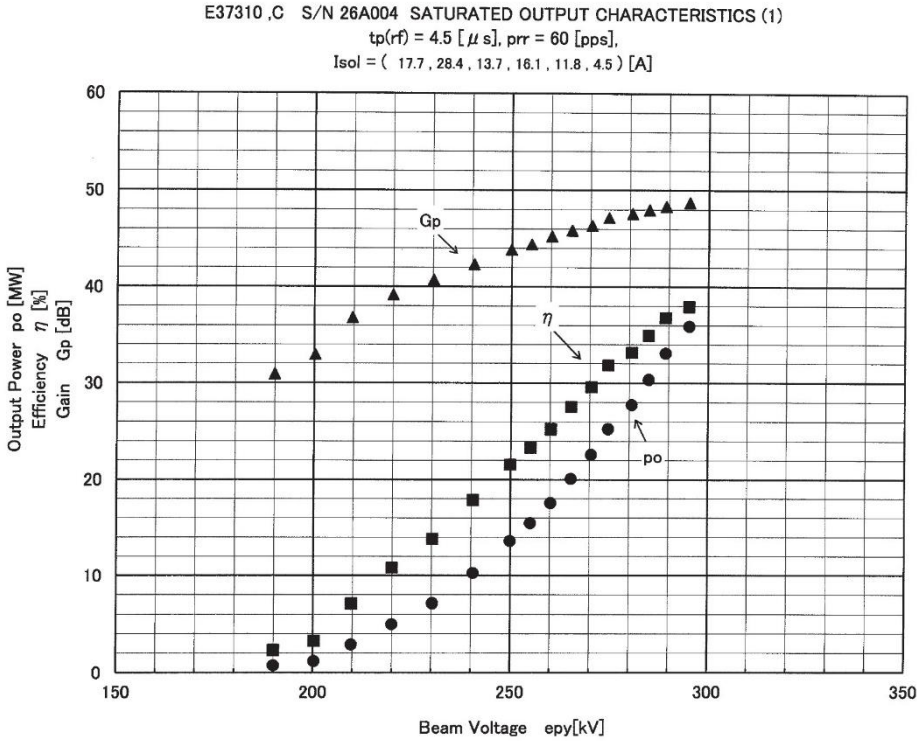


圖七、速調管 S/N 26A004 燈絲電壓/導流係數(perveance)特性量測

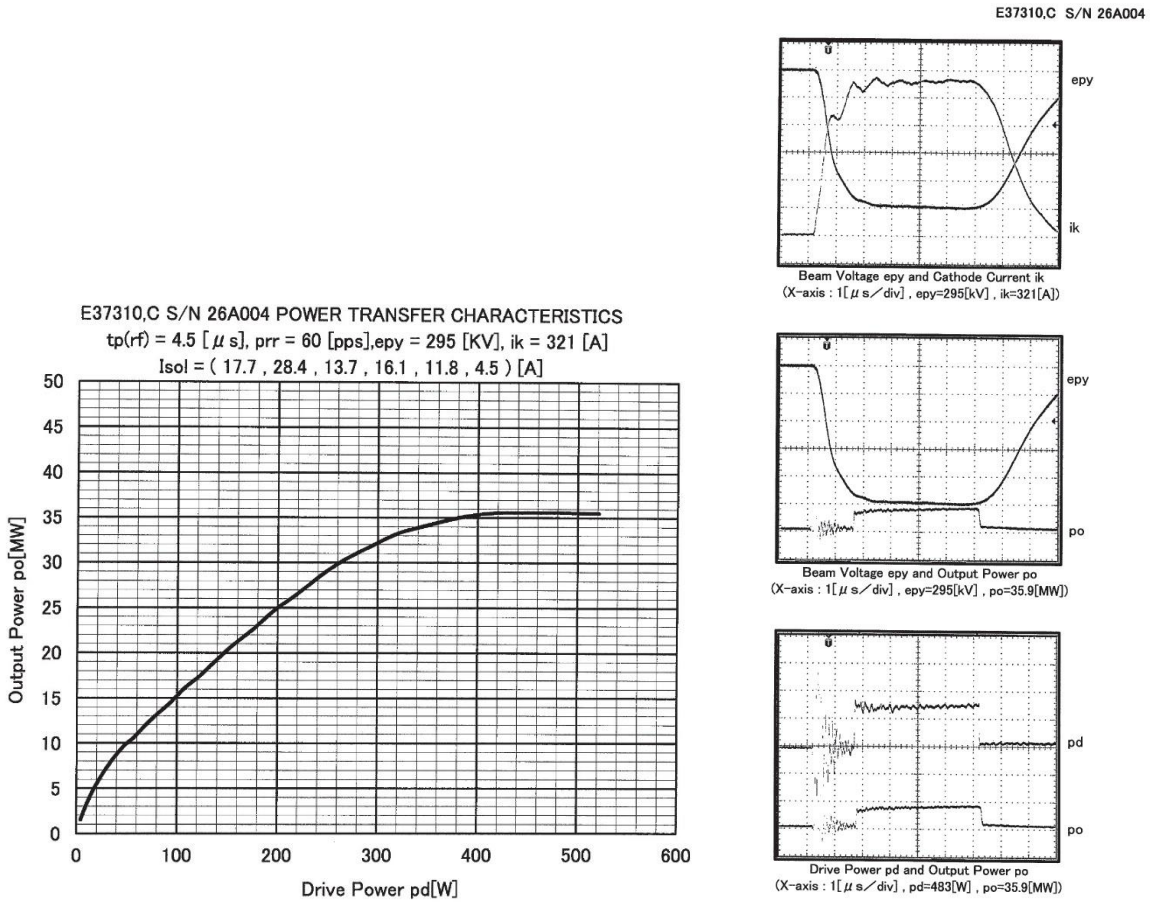


圖八、速調管 S/N 26A004 束流電壓/電流特性與束流電壓/導流係數之量測

圖九為為速調管輸出功率、轉換效率與增益對束流電壓之關係圖，在 295 kV 的操作電壓下，最大輸出功率為 35.9 MW，電子轉換效率為 37.9% ，飽和增益為 48.7 dB。圖十所示左圖為左圖為速調管的功率轉移特性線(transfer curve)，當輸入功率 483W 時，達飽和輸出功率 35.9 MW 與右側三幅波形圖由上至下分別為束流電壓/電流，束流電壓/輸出功率以及輸入功率/輸出功率的波型圖，在有微波功率輸出時，波形平坦，且無震盪的現象。



圖九、速調管 S/N 26A004 輸出功率、轉換效率與增益對束流電壓之關係量測



圖十、左圖: 速調管 S/N 26A004 的功率轉移特性曲線，右圖：由上至下分別為束流電壓/電流，束流電壓/輸出功率以及輸入功率/輸出功率的波型圖

3. S/N 26A004 工廠實際測試：

受限於測試台只有一座，更換速調管作業需要耗時一天以上，所以此次僅實際觀看 S/N 26A004 的測試。總共進行了 15 MW (圖十一)、20 MW(圖十二)、與 35 MW(圖十三) 三種輸出功率的條件，進行束流電壓、束流電流與輸入功率與輸出功率的波形量測，藉由示波器的觀察與讀值，可以確認束流電壓符合表格數據並且輸出皆十分穩定。另外根據安裝於速調管輸出端的功率量測計的水溫變化值可以推得實際的功率輸出值，相關數據如表一所示。圖十四為 Canon 使用之橫河資料紀錄器，可高速記錄所有相關資料，包含輸出功率、水溫、氣壓(離子幫浦電流)等等，此為舊款有紙化之記錄器，新款為無紙化紀錄器，KEK 松本教授也推薦同廠牌產品，建議現場測試時使用。

表一、現場實測之束流電壓/輸出功率之量測數據

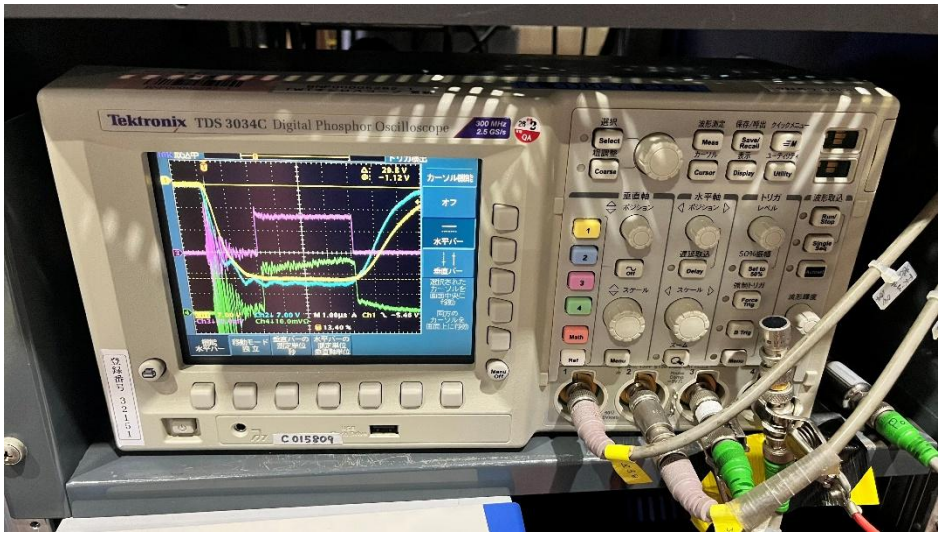
示波器束流電壓值 V_{meas} (V)	實際束流電壓 V_{kly} (kV)	輸出功率計之水溫差值 ΔT (°C)	實際輸出功率 $P_{rf\text{-}peak}$ (MW)
34.6	296	6.12	34.98
31.1	266.1	3.38	19.32
29.8	254.9	2.78	15.89

- 束流電壓計算：

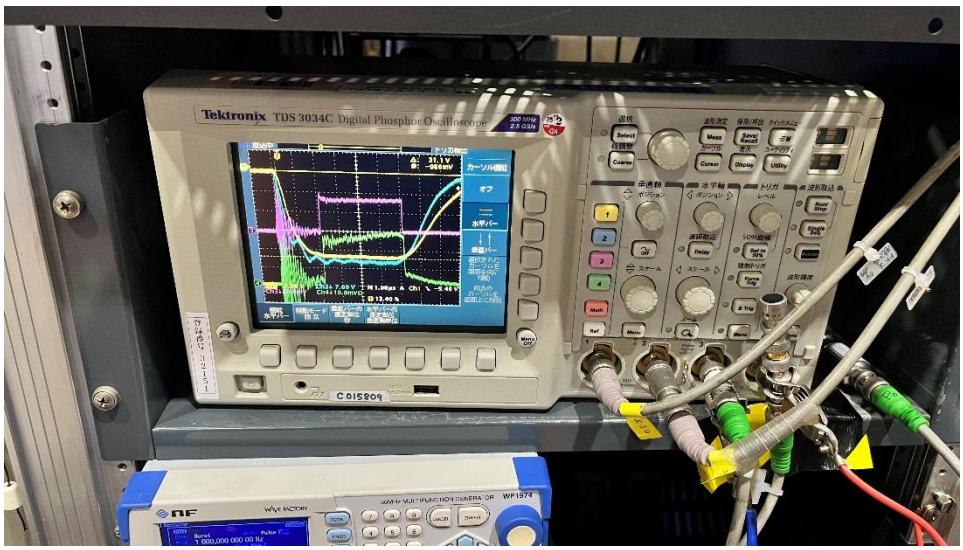
$$V_{kly}^{[volt]} = CVD_{divide-ratio} \times V_{meas}^{[volt]} \quad , CVD_{divide\text{-}ratio} = 8556$$

- 輸出功率計算：

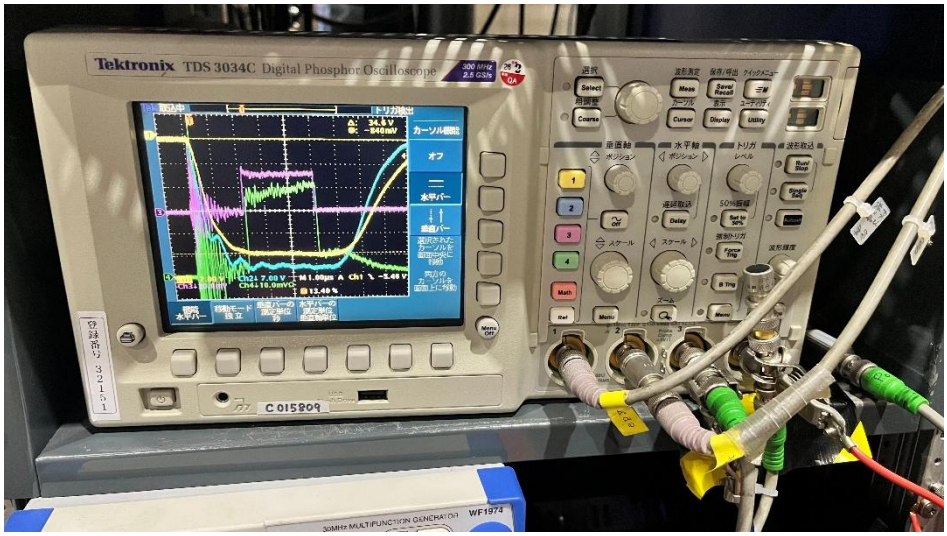
$$P_{rf\text{-}peak}^{[W]} = \frac{P_{HEATER}^{[W]}}{\tau_{rf\text{-}width}^{[s]} \times T_{rf-rep.rate}^{[pps]}} = \frac{\frac{\Delta T\,[℃]}{14.3} \times Q^{[L/min]}}{\tau_{rf\text{-}width}^{[s]} \times T_{rf-rep.rate}^{[pps]}}$$



圖十一、飽和輸出功率為 15 MW 時的測試結果，四個波形分別為，黃色：束流電壓、藍色：束流電流、紛紅色：輸入功率、與綠色：輸出功率的波形



圖十二、飽和輸出功率為 20 MW 時的測試結果，四個波形分別為，黃色：束流電壓、藍色：束流電流、紛紅色：輸入功率、與綠色：輸出功率的波形



圖十三、飽和輸出功率為 35 MW 時的測試結果，四個波形分別為，黃色：束流電壓、藍色：束流電流、紛紅色：輸入功率、與綠色：輸出功率的波形

圖十四、橫河(YOKOGAWA)資料紀錄器

參訪心得

薛心白：1. 此次參與 Klystron 的廠測，對於較低功率(15MW 與 20MW)的測試曲線，Canon 工程部門提出建議，建議以較低之磁鐵線圈電流進行測試並運行。磁鐵電流之降低，則統一以百分比統一降低，例如全部降低 1%、2%、3%、4%、與 5%，建議最多 5%，再從中取用最佳化建議值。詳細內容亦可見松本教授建議報告。2. 此次參訪，也見到許多正在製造或剛完成之各式加速器用電子管，例如 J-PARC 使用之 4.5 米長 klystron(E3740A)，其使用之五米高真空硬銲爐剛好在裡面銲完開啟，還有 ESNS 使用之 klystron(E3736)也在現場，上述皆為長脈衝 klystron(>500 μsec)。

李安平：本次參與速調管如同前次廠測之流程，Canon 公司對高功率速調管的製造品質的管控已是十分精熟的公司，對速調管本體之功能皆能確保其出廠時之功能正常，符合規範要求。另外工廠驗收完畢之後，在松本教授的協助之下，直接與工程部門人員進行討論有關在同步輻射研究中心運作速調管系統時所遇到的一些測量問題，並提出解決方

案。所以此趟行程除了完成工廠驗收測試，之後對 Canon 的速調管系統在同步輻射研究中心運作時更能掌握其運作特性。

圖十五、 大久保良久先生得獎證書

圖十五、 Canon Klystron E37310,C S/N 26A003 與 FAT 結束後合影

四、KEK 參訪報告：

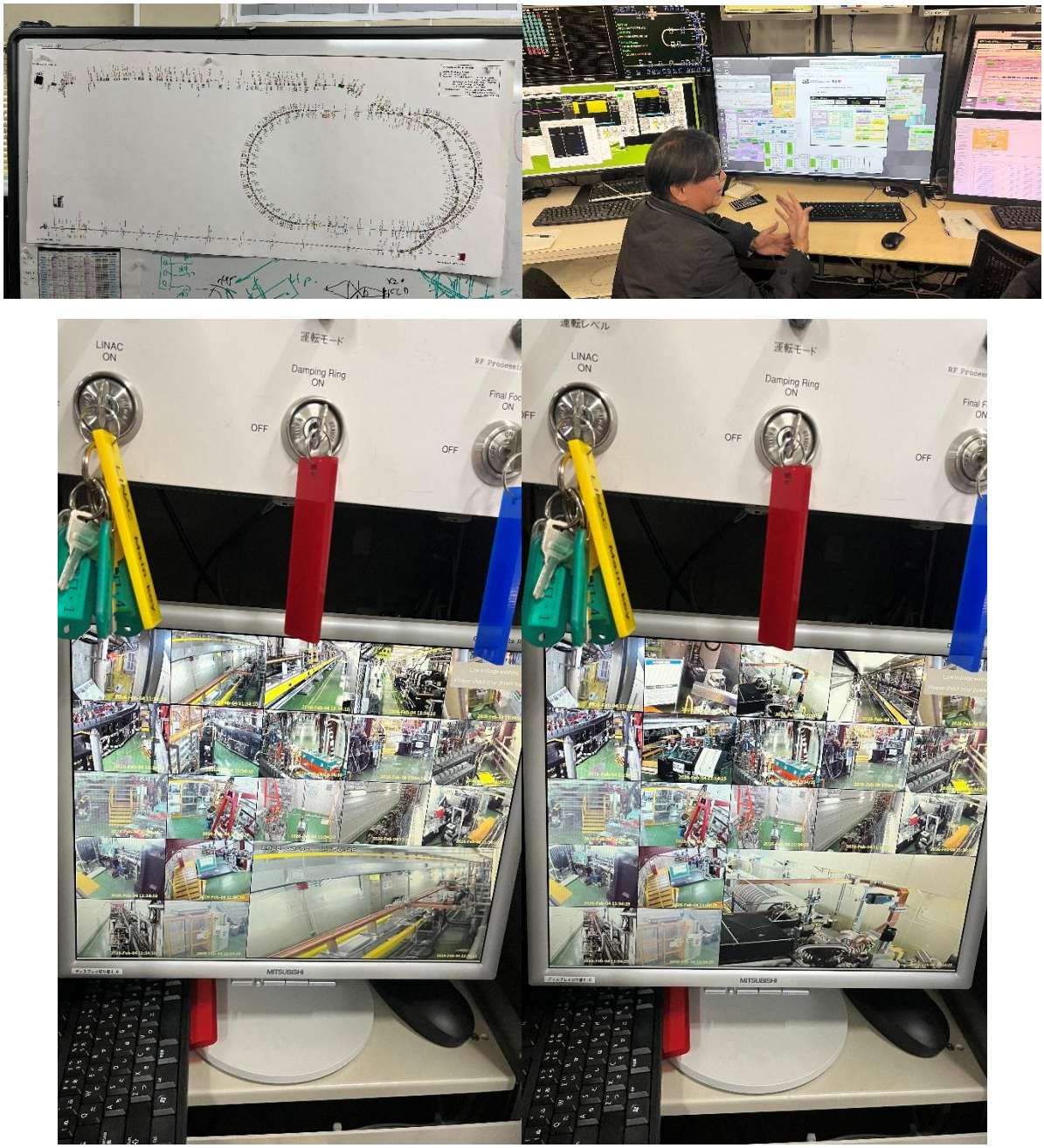
1. KEK 加速器第六研究系大組會議前向大組成員(約 20 人左右，大組長帶名崇(Takashi Obina)教授)報告中心太赫茲設施現況(30 分鐘)，報告資料由周明昌提供。

2. 參觀 KEK Photon Factory 控制室(圖十六)、LINAC 控制室(圖十七)，此 LINAC 同時提供 Photon Factory (PF) 2.5 GeV、PF-AR 6.5 GeV、Super KEKB electron ring 7 GeV(2.6A)、Super KEKB positron ring 4 GeV(3.6A)四個環。

圖十六、KEK Photon Factory 控制室與實時監控影像

圖十七、KEK LINAC

3. 參觀 ATF 控制室(圖十八)。

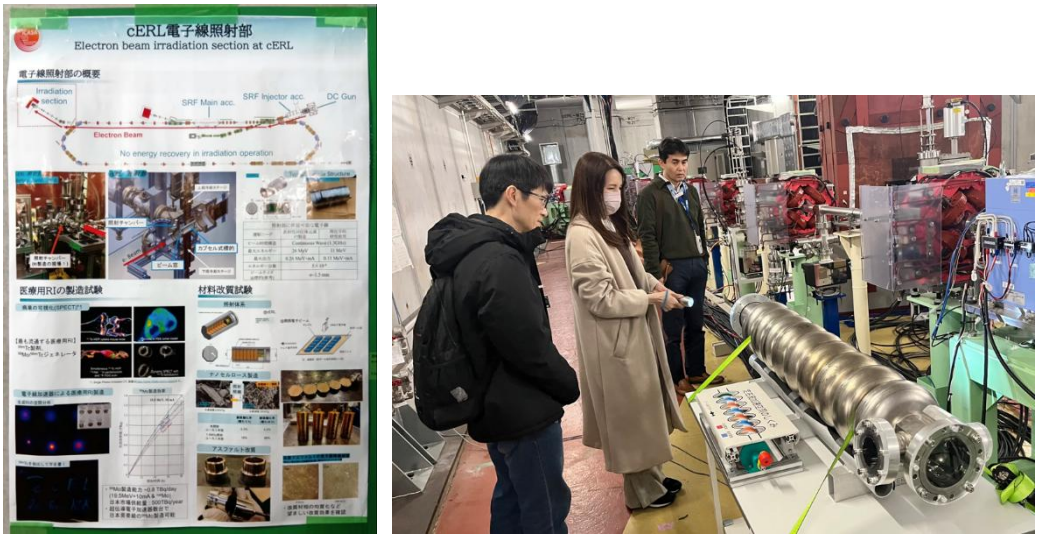


圖十八、ATF 控制室

4. **參訪高能加速器研究機構設施的 cERL (compact Energy Recovery Linac)：**

本次參訪 KEK 緊湊型能量回收直線加速器(cERL)，由 KEK 內的兩名研究人員帶領參觀，如圖十九所示，該系統於 2009 年至 2013 年間建造，旨在向該機構物理和材料科學部門的研究人員展示其作為同步輻射光源的潛力，根據KEK的研究人員的說法，cERL一直致力於尋找更適合的應用，研究人員已證實利用緊湊型能量回收直線加速器可以實現千瓦級光源，所以啟動了極紫外自由電子雷射計畫。2019 年和 2020 年，該研究團隊對現有的實驗加速器進行了改造，正式啟動極紫外光的研發。該系統安置在一個原使用於早期質子加速器(現已拆除)的全混凝土結構房間內，房間長約 60 米，寬約 20 米，該加速器目前尚無法產生極紫外線（EUV）波長。研究人員利用 17 兆電子伏的電子束能

量，成功產生了 20 微米紅外光脈衝形式的自發輻射放大自由電子雷射（SASE），未來目標是在連續波模式下產生更高功率的雷射。



圖十九、左圖：cERL 現場展示海報，右圖：cERL 研究人員(女士為運轉小組成員，右為負責建造真空系統之谷本育律教授)解說超導直線加速器系統

KEK 的緊湊型能量回收直線加速器(cERL)，主要是由高亮度超導光陰極電子槍，超導直線加速腔以及聚頻磁鐵的三個主要器件，亦包含磁鐵彎段與系統診斷工具，在此僅概訴三項主要器件如下：

- 高亮度超導光陰極電子槍：利用脈衝雷射照射光電陰極產生電子束。為了獲得高品質的電子束，cERL 採用半導體陰極，腔體可加至 500 kV 的直流電壓。另外為了達到高量子效率，腔體的真空度維持 10^{-10} Pa 的極高真空(圖二十)。目前，該電子腔已成功產生 1 mA 的高電流電子束，未來目標是獲得更高的電流，現場系統外觀如圖二十一所示。

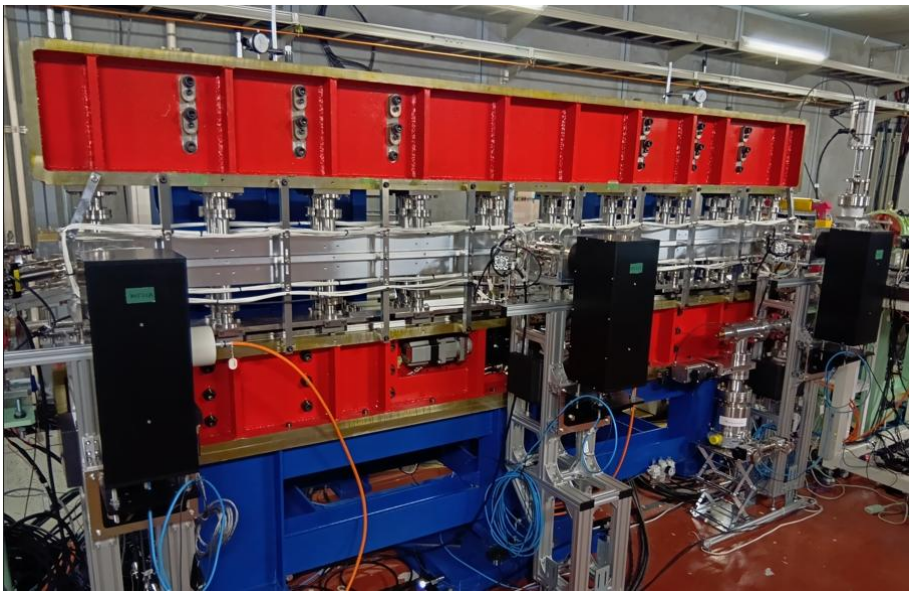
圖二十、cERL 之高亮度超導光陰極電子槍用真空計

圖二十一、cERL 之高亮度超導光陰極電子槍系統外觀照

- 超導直線加速腔：超導直線加速腔是進行能量回收的核心部分。由超導體鈮金屬（Nb）製作的加速腔，經由液態氦在絕對溫度 2 K（攝氏-271 度）下冷卻，進入超導狀態。為了在高加速梯度下運行，加速腔的內部表面粗糙度須光滑至數微米的精度，為此進行表面處理及防止異物混入的潔淨技術等相關研發以在 cERL 的束流運行中，實現高效的能量回收。系統外觀如圖二十二所示，超導直線加速腔置放於照片中間低溫系統之內。

圖二十二、cERL 之超導直線加速腔系統外觀照

- 聚頻磁鐵：在 cERL 中，FEL 的發光機制不使用光共振腔而是使用自發輻射放大（SASE）方式生成。cERL 中共安裝了兩座長度為 3 m 的聚頻磁鐵，磁鐵間隙固定為 10 mm，已安裝在 cERL 環形加速器中並開始運行。這兩台聚頻磁鐵是可調相位聚頻磁鐵（adjustable phase undulator, APU），通過沿縱向滑動下側磁鐵列進而改變聚頻磁鐵參數以調整輸出的 FEL 波長，系統外觀如圖二十三所示。



圖二十三、cERL 之可調相位聚頻磁鐵外觀照

目前 cERL 有幾個開發重點：(1) 利用 ERL 型的 FEL 技術，可以高效率地產生極紫外光（EUV），目標是應用於次世代半導體技術中使用的 EUV 微影微細加工技術。(2) 使用液態氦直接冷卻超導加速腔需要大型的製冷設備。該系統的小型化和低功耗化對於產業應用是不可或缺的。近年來，在與 KEK iCASA(Innovation Center for Applied Superconducting Accelerators、應用超導加速器創新中心，管轄 STF(Superconducting RF Test Facility)、ATF(Accelerator Test Facility)、cERL、CFF(Cavity Fabrication Facility)四個設施)中心主任阪井寬志(Hiroshi Sakai)會談中得知，其主導開發中的鎳鈦化合物(Nb3Sn)超導加速腔，由於其超導轉變溫度較高，可以使用傳導冷卻方式的製冷機，因此可以實現小型化及低功耗化。阪井主任也希望同步能夠一同參與鎳鈦化合物(Nb3Sn)超導加速腔的研發，並提及林明泉博士，其預估最快三到五年內可有成果。

現階段 cERL 已經用在三項材料的研究方面：(1) 核醫學用檢查藥物 ^{99m}Tc 在日本是透過進口海外核反應爐製造的放射性同位素 ^{99}Mo 來生成的。為了日本國內的穩定供應，cERL 進行利用電子加速器製造 ^{99}Mo 的試驗。(2) 從木材製造的奈米纖維素纖維可作為輕巧且堅固的功能性材料。cERL 研究使用電子束照射木材對木材做改質，希望利用電子束提高木材纖維製造效率。(3) 用於道路鋪設的瀝青，其劣化和維護費用已成為日本重大的社會問題。cERL 進行通過電子束照射來改質瀝青的研究以使瀝青壽命延長。

參訪心得

薛心白：KEK 作為日本加速器單位的龍頭(SACLA XFEL 建造之主要四巨頭，Shintake 新竹積、Matsumoto 松本浩、Kitamura 北村英男、Ishikawa 石川哲也，其中前三位皆出身 KEK)，其對標單位為 CERN 與 SLAC 等國際加速器界技術龍頭，長期與各單位有深度合作，另其技術不只提供加速器使用，並支援各項大型計畫如重力波設施(KAGRA)的建造，中心應保持與 KEK 之密切聯繫，持續精進相關加速器技術之成長。尤其 KEK 在各部門幾乎皆為自行設計與建造(如低溫系統、線型加速器、速調

管、modulator 等等)。應學習其青出於藍而勝於藍之精神(KEKB 與 PEP II)，持續在加速器領域更進一步。

李安平：KEK 建置的 cERL，近年來積極研究其作為在半導體製程中所需的極紫外光源(EUV)的潛在方案，因為傳統的雷射電漿極紫外光源光源 (LPP-EUV) 的成本非常高昂而且能量的效率十分有限，cERL 計畫基於 ERL 產生的 FEL 以達到量產晶片所需的千瓦級別的 EUV 光輸出規模。若 cERL 驅動的 FEL-EUV 光源能夠成功運行並且商業化，則可能大幅降低 EUV 微影製程的成本，並提升量產效率。目前 cERL 的主要挑戰是如何提升平均功率並保持光束品質同時產生 kW 級別的功率，ERL 的優勢在於電子束能量可以回收使用，但在高平均功率運行下，如何保持高效率並避免能量損失仍是一個難度極高的工程挑戰。最後我認為對中心而言，雖然未來很難有建置能量回收直線加速器系統的計畫，但是，若對未來發展超導直線加速器系統與極紫外光源技術有興趣與需求時，ERL 亦可以是一個長期發展的評估目標。