

# 能量回收線型加速器 自由電子雷射簡介

陳家益

國家同步輻射研究中心 射束動力小組

雷射 (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, LASER) 是英文音譯，原意為「通過受激輻射產生的光放大」，意指通過刺激原子導致電子躍遷釋放輻射能量而產生具有同調性的增強光子束。由於物質反射率特性的限制，傳統光學系統無法提供極紫外光和 X 光波段的雷射，所以如何滿足此波段的運用需求，便成為自由電子雷射 (Free-Electron Laser, FEL) 發展的背景。

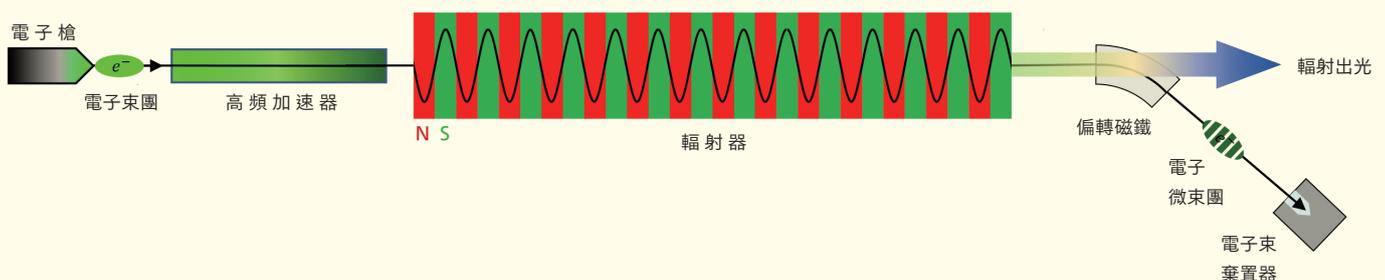
自由電子雷射的結構如圖一呈現，電子束團由電子槍產生後，經高頻加速器加速後進入輻射器準備開始發光，由於電子會受到輻射器中週期磁場的影響進行軌跡的擺盪，在擺盪的振幅最大處會輻射出光，輻射的光會再和電子進行交互作用，若領跑的電子受到輻射光減速則落後的電子便會感受到輻射光的加速電場，一段時間的交互作用後，電子便會群聚成微小束團形成電子微束團，每一個微束團所發的光再進行建設性干涉後，將可以產生具有和雷射相同特性的輻射光，出光後的電子微束團最後則經由偏轉磁鐵導向電子束棄置器，將損失能量後的電子束棄置。

雖然自由電子雷射可以補足傳統雷射無法提供的光波段，但是出光後棄置仍具有高能量的電子微束團，便是能量沒有完全使用的耗能設計。以位於歐洲的 European XFEL 自由電子雷射為例，電子微束團的運行能量是 11.5 億電子伏特，以 1.125 毫安培的平均電流進行出光，這樣的條件之下，整體自由電子雷射將承載大約 13 百萬瓦的功率，如果將此電子束團棄置，相當於丟掉半個水力發電廠的輸出功率，如何改善此問題便成為重要的課題。

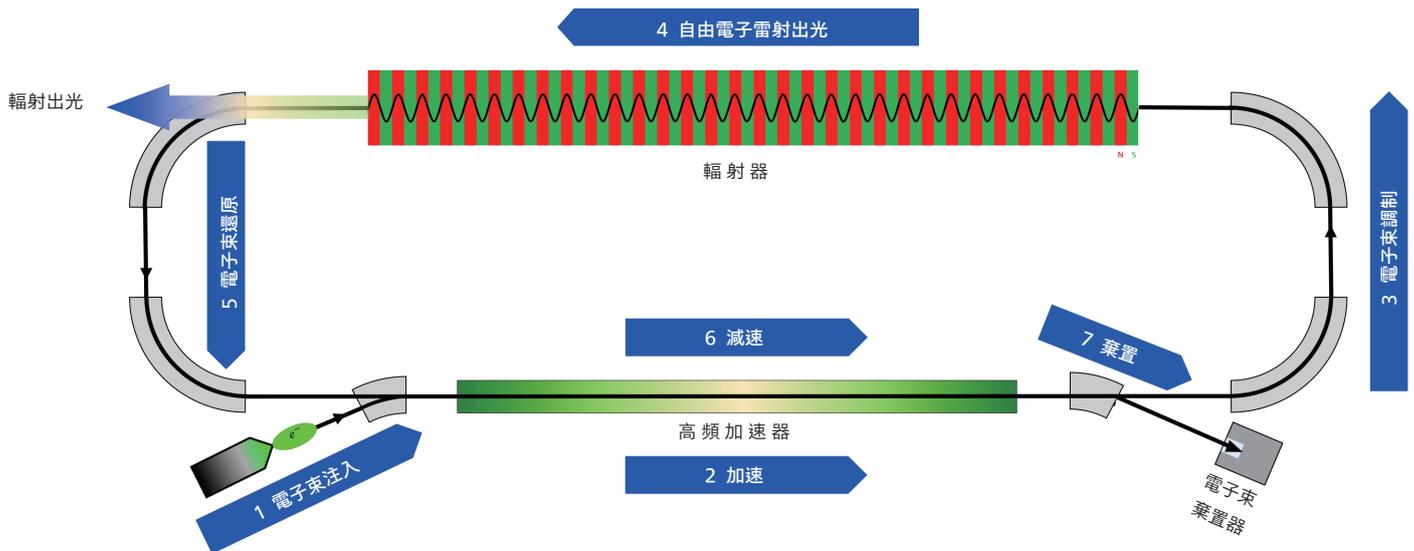
是不是可以將自由電子雷射與環形電子同步加速器結合在一起，成為環型自由電子雷射呢？相關的研究發現環型自由電子雷射須克服以下問題，當電子微束團在完成第一圈自由電子雷射出光後，經偏轉磁鐵再度回到輻射器入口時，因電子微束團無法回復到產生自由電子雷射所需要的條件，因此無法形成生生不息的循環。為了實現能量循環利用的目標，能量回收線型加速器自由電子雷射 (Energy-Recovery Linac FEL, ERL-FEL) 因而誕生。在 2021 年底，本中心已正式提出加入由日本高能加速器研究機構 (KEK) 所主導的極紫外光能量回收線型加速器自由電子雷射 (EUV ERL-FEL) 計畫，接下來，簡要說明 ERL-FEL 其運作的基本原理。

乍看之下，ERL-FEL 的輪廓 (如圖二) 看起來像是長方形的同步加速器，亦或是封閉的自由電子雷射，然而細看之下就會發現，ERL-FEL 承接了自由電子雷射的出光概念，但又滿足能量循環利用的目標，其設計精神是一個單趟式的加速器，下面介紹 ERL-FEL 的運行概念。

1. 電子束團產生後，經由調整抵達高頻加速器的時間，來達到被加速的效果。
2. 電子束團由高頻加速器中的電磁場獲得能量，加速到預定的能量。
3. 高能量的電子束團經由一系列的偏轉磁鐵，轉彎來到輻射器入口，並符合產生自由電子雷射需要的電子束條件。
4. 符合自由電子雷射出光條件的電子束團通過輻射器後，



圖一 自由電子雷射簡圖。



圖二 能量回收線型加速器自由電子雷射簡圖。

發出所需要的光。

- 出光後的電子束團經由一系列的偏轉磁鐵，返回高頻加速器的入口，利用調整抵達時間，來達到被減速的效果。
- 電子束團再次進入高頻加速器中，由於電子束團處於被減速的狀態，在行進的過程中，將會把自身攜帶的能量轉回給高頻加速器，此能量將提供下一次注入的電子束團加速之用，因此達到能量循環利用的效果。

- 減速後的電子束團能量相對較低，由於已經不再具備再次出光的條件，則被導引進入電子束棄置器。

相較於電子同步加速器，ERL-FEL 採用自由電子雷射的出光機制，所以可以提供亮度更高的光源，雖然仍無法重複使用電子束團，但已達到重複使用加速能量的節能目標，因此世界各國，正努力的發展此種具備高亮度且節能的加速器設施。

## 用戶資訊

### 1. 實驗計畫申請

#### ■ 2022-2 期實驗計畫申請目前審核中

2022 年第二期 (2022 年 7 - 12 月) 實驗計畫申請目前正陸續進行初複審中，核定的光束線排程後續將於 6 月初公告於用戶入口網首頁。

#### ■ 2023-1 期實驗申請預告

2023 年第一期 (2023 年 1 - 6 月) 光束線使用預計 2022 年 7 月初開放申請，截止日期為 2022 年 8 月 15 日 (一)，歡迎計畫主持人踴躍上網 (<http://tpsportal.nsrc.org.tw/>) 提出計畫申請 (新用戶須先完成註冊)。

- 實驗計畫申請為一年兩期，每期 6 個月，計畫有效週期為兩年，請於規定期限內上網申請計畫。(詳請參閱「第 118 期簡訊」或「用戶入口網」：[如何寫實驗申請計畫書](#))

### 3. 近期開放光束線如下

- TPS 07A1 Micro-focus Protein Crystallography (微聚焦蛋白質結晶學)
- TPS 19A1 High-resolution Powder X-ray Diffraction (高解析度粉末繞射)
- TPS 27A1 Soft X-ray Nanoscopy (軟 X 光奈米顯微術)
- TPS 31A1 Projection X-ray Microscopy (奈米 X 光顯微術)
- TPS 39A1 Nanometer Angle-resolved Photoemission Spectroscopy (奈米角解析光電子能譜)
- TPS 45A2 Submicron Soft X-ray Spectroscopy (次微米軟 X 光能譜)