

## 日大アンジュレータ磁石列の更新と FEL 発振強度の改善

野上 杏子、早川 恭史、境 武志、住友 洋介、高橋 由美子、早川 建、田中 俊成

日本大学量子科学研究所

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) では、2004 年より 125 MeV の電子線形加速器を用いた自由電子レーザー (FEL) のユーザー利用を開始し、近赤外領域 (1200~6300 nm) のレーザービームを利用実験に提供している。2007 年からは非線形光学結晶を用いて FEL 光を波長変換することにより、可視光領域高調波 (400~1300 nm) も供給可能となり、多くの実験で利用されている。高調波への変換効率は FEL 発振強度に依存するため、電子銃改造後の 2011 年以降は高い FEL 発振強度が得られるバーストモードでの電子ビーム加速の頻度が増加した。

図 1 にマクロパルス当りの FEL 発振強度の推移を、電子ビーム加速モード別に示す。ただし、一部調整中のデータおよび高調波の強度も含み、途中の光学素子による吸収や加速器の RF パルス幅の違いによる補正はしていない。LEBRA では当初、曲率半径 4.0 m の共振器鏡を使用していた。当時は、比較的短期間で共振器鏡の反射率が低下し、FEL 発振強度が顕著に下がるため、その都度、共振器鏡を交換していた。FEL 取出し用鏡の結合孔近傍で激しい損傷が認められており、これが反射率低下の主な原因と考えられる。そこで鏡表面での光ビームサイズを大きくし光エネルギー密

度を抑えることで、結合孔付近での損傷の低減を図ることとした。2008 年 1 月に曲率半径 3.7 m の鏡へ、2012 年 10 月に曲率半径 3.5 m の鏡へと交換したが、曲率半径 3.7 m の鏡の場合、結合孔近傍に損傷が生じ FEL 発振強度の低下も認められたが、その度合いが緩やかだったこともあり約 4 年半と長期間使用することができた。曲率半径 3.5 m の鏡の場合は、チェンバーに取り付けられたビューポートから観察する限りでは、僅かな変色はあったものの結合孔近傍の深刻な損傷は見られなかった。それにもかかわらず、FEL 発振強度が十分に回復しなかったため、電子ビーム加速条件の丹念な調整や共振器鏡の交換 (2016 年に曲率半径 4.0 m) で改善を試みたが、FEL 発振強度は結局回復しなかった。加えて、この頃はフルバンチモードによる FEL 発振が不安定であり、2013 年から続くクライストロン RF 出力窓での放電対策として RF パルス幅を狭めることを余儀なくされたが、利用実験の実施を優先し、より安定なバーストモードによる FEL 発振を多用した。このような経緯から共振器鏡の劣化以外に FEL 発振強度の低下の原因があると考え、2017 年 12 月アンジュレータ間隙中心のピーク磁場を測定したところ、上流側約 3 分の 1 の永久磁石列が設置当初に比べ最大で約 40 %減磁していることがわかった。そこで、2020 年 2 月にアンジュレータ永久磁石列を新規製作したものに交換し、同年 11 月には共振器鏡を曲率半径 3.7 m のものに交換した。アンジュレータ磁石列を交換したことによりフルバンチモードによる FEL 発振が安定し、電子ビーム加速条件の調整も進んだ。さらにバーストモードでは、これまでで最高の FEL 発振強度が得られるようになった。現在、クライストロン RF 出力窓での放電対策のため RF パルス幅を通常の 20  $\mu$ s より狭めているが (16~17.5  $\mu$ s)、FEL 発振強度は最も状態が良かった頃と同程度まで改善している。

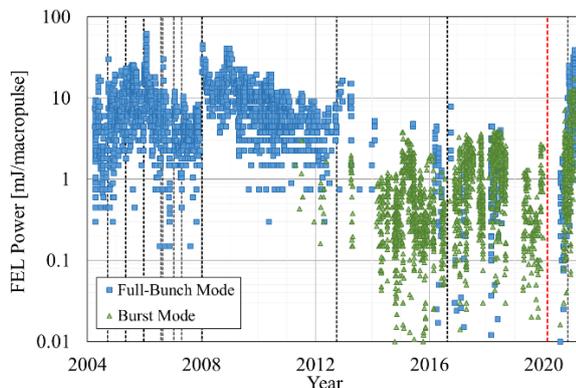


図 1. 2004 年 4 月からの FEL 強度の推移。黒の点線は共振器鏡の交換日を、赤の点線はアンジュレータ永久磁石列の交換日を示す。