

# 日大における赤外 FEL 用アンジュレータ磁石列の放射線減磁とその修復

早川 恭史

日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設 〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1

境 武志

日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設 〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1

## 要旨

日本大学電子線利用研究施設では125 MeV 電子リニアックを用いた共振器型自由電子レーザー (Free Electron Laser, FEL) を運用している。2001年5月に波長1.5  $\mu\text{m}$  でファースト・レーズングを達成して以来、近赤外領域で FEL 光をユーザー利用に供してきたが、2017年にアンジュレータ磁石列上流部の減磁が発覚し、アンジュレータ入口付近では半分程度まで磁場が低下していた。放射線による減磁と考えられ、FEL 発振強度と安定性に深刻な影響を及ぼしていた。その修復として新しい磁石列を製作し、2020年2月に磁石列交換を実施した。更に損傷していた光共振器ミラーの交換を行った結果、FEL は本来の発振強度が得られるまで回復し、バーストモードにおいては導入以来最大強度の発振を確認した。今後の減磁対策として、アンジュレータ上流部に対する放射線遮蔽を強化すると共に、シンチレータ型放射線モニターを設置し、アンジュレータ周辺での線量をリアルタイムで監視することにした。これらの対応に加え、ゲル線量計のような積分型の線量計の導入も検討している。

## 1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設は125 MeV 電子リニアックを基盤とする加速器光源施設として運営され、学外からの利用者も受け入れる学内共同利用施設と位置付けられている<sup>1)</sup>。日本大学における加速器施設は、1970年代の $\pi$ 中間子によるがん治療計画に端を発して1980年代に設置された。当初は35 MeV ダブルサイデッド・マイクロトロンが加速器として採用されたが、がん治療研究に関わる実験には至らず、自由電子レーザー (Free Electron Laser, FEL) による放射光計画に転換された。既存のマイクロトロンの利用も検討されたが、FEL に要求される電流量なども考慮し、電子リニアックを新設して進めることになった。これは高エネルギー物理学研究所 (現高エネルギー加速器研究機構, KEK) と共同研究契約を締結し、KEK の陽電子発生用 S-band リニアックを移設することで実現し、1997年に125 MeV 電子リニアックが完成した<sup>2)</sup>。1998年には100 MeV の電子ビームの加速に成功し、加速器施設も「電子線利用研究施設」(Laboratory for Electron Beam Research and Application, LEBRA) を正式名称とし、現在に至っている。FEL 施設としては当初、可視から紫外領域を目標とし、後に近赤外 FEL に方針転換したが、当施設ではこれまでに2回アンジュレータ磁石列の放射線減磁とそれに対する修繕を経験しており、2度目の修復作業は2019年度末に実施されている。これらの顛末について報告したい。

## 2. 日大 FEL 計画の開始と可視光用アンジュレータ磁石列の減磁

LEBRA リニアックの仕様は Table 1 のようになっているが、加速管の仕様上の最大エネルギーは125 MeV であるものの、放射線施設としての使用条件として100 MeV を上限としている。FEL ビームラインは2回45°偏向した後の下流に設置されている。現在はパラメトリック X 線放射 (Parametric X-ray Radiation, PXR) を原理とする X 線源用の PXR ビームラインが追加され、また FEL を放射線管理区域の外にある実験室まで輸送するビームラインも設置されているため、Fig. 1 のような配置となっている<sup>3,4)</sup>。FEL 用アンジュレータおよび光共振器系の建造は川崎重工が担ったが、磁石列には信越化学の Nd-Fe-B 磁石が採用された。典型的なハルバック型であり、当時は可

Table 1 Specifications of the LEBR-linac.

Accelerating RF Frequency	2856 MHz
Electron Energy	40–100 MeV
DC Gun Voltage	–100 keV
Macropulse Duration	5–20 $\mu\text{s}$
Repetition Rate	2–12.5 pps
Macropulse Beam Current	$\leq 200$ mA
Average Beam Current	$\leq 8$ $\mu\text{A}$
Energy Spread (FWHM)	0.5–1%
Normalized Emittance	$\sim 15\pi$ mm $\cdot$ mrad

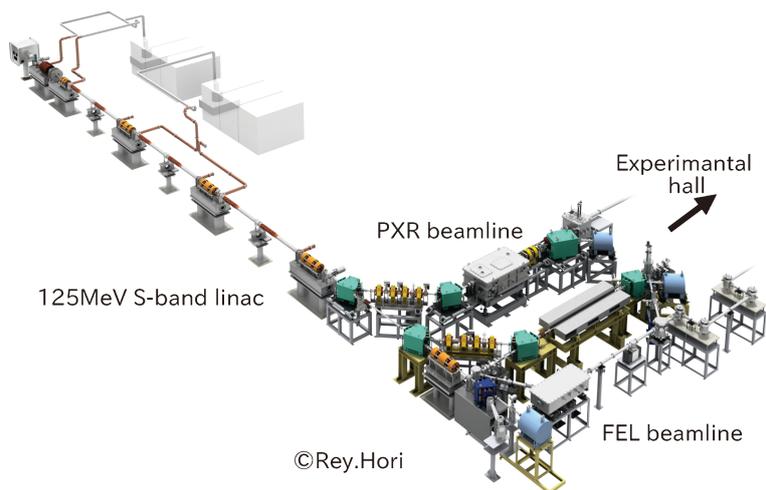


Fig. 1 (Color online) Layout of the LEBRA-linac and the 2 beamlines for light sources.

視から紫外領域の基本波発振を狙ったため、周期長24 mm, 周期数100であった<sup>5)</sup>。シンクロトロンと異なり、リニアックを用いる場合はアンジュレータ・ギャップを垂直方向に取る必要がないことから、架台や駆動機構の負担の少ない水平方向に設置している。電子ビーム加速の成功後まもなく、波長488 nmのアンジュレータ自発放射光の観測には成功したものの、FEL発振には至らなかった。可視より短波長領域では十分なFEL利得が得られるピーク電流値の要求が厳しく、また当時はクライストロン真空窓の放電に苦慮しマクロパルス幅を目標の20  $\mu$ sまで広げられなかったことも要因ではあったが、アンジュレータ放射光のスペクトル幅が想定より広く、徐々に悪化する傾向が見られたため、アンジュレータの性能劣化が疑われた。1999年9月に磁石列表面の磁場測定を行ったところ、Fig. 2のような結果となった。横軸は上流からの磁極番号であり、磁場の値はホール素子で計った磁極のピーク値を磁石列の両側で平均したものである。また、GMサーベイメータを用いて計測した磁石の放射化もプロットしている。放射化と相関のある形で磁場の劣化が認められたため、放射線による減磁が生じたことが判明した<sup>6)</sup>。アンジュレータ入口付近での放射化と磁場の低下が激しいが、これはギャップ間隔を狭めたままリニアックの調整運転を行い、上流の磁石でのビームロスが多かったことによる。磁石列中央付近も同様に放射化と減磁が大きくなっているが、当時はこの付近にアルミナ蛍光板のビームモニターが設置されており、ビーム調整に用いられていた。ここでのビームロスと放射線の発生が、下流部分の磁石列減磁の原因と考えられる。またアンジュレータ中のビームラインには内径7 mmのダクトが用いられていたため、アンジュレータ全長に渡ってダクトによるビームロスが生じていたと思われる。当時のNd-Fe-B磁石が耐熱温度が低く放射線に弱いという問題はあったが、電流量の多いリニアックの運転に

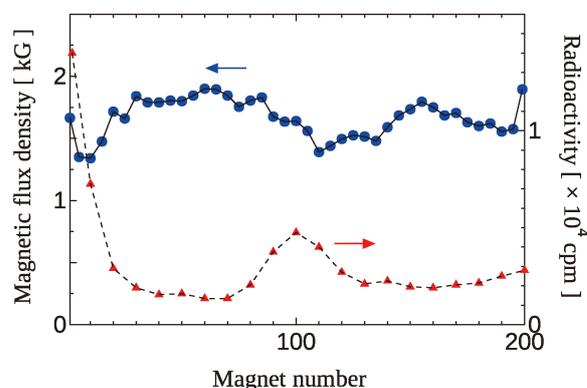


Fig. 2 (Color online) The degradation of the magnetic field and the radioactivity of the first LEBRA-undulator for visible FEL.

についての知見・認識が不足していたことは否めない。FEL共振器においても光センサータイプのリミットスイッチが多数用いられていたが、全て放射線で故障し使用不能になるなど、放射線対策についての認識の甘さが随所に見られた。

可視光用アンジュレータの磁場劣化は深刻であり、FEL発振を実現するためには何らかの対応が必要となった。磁石の再着磁も検討したが、磁石自身が放射化物となったため管理区域内に着磁装置を持ち込んで作業する必要があった。必要なパルス電源の問題もあり着磁の実施は将来的な課題とし、磁石列交換で対応することとなった。その際、FEL発振の難易度を下げる意味もあって、アンジュレータ周期長を48 mmにし、ターゲットとする波長領域を近赤外領域に変更することになった<sup>7)</sup>。この判断には、可視領域の媒質型レーザーが急速に進歩し、FELの優位性が乏しくなっていたという背景もあった。

### 3. 近赤外用アンジュレータ磁石列への交換とファースト・レージング

アンジュレータの修復に際し、架台と駆動機構はそのまま流用して磁石列のみホルダーごと交換することにした。アンジュレータ全長は変わらないため、周期長を従来の倍の48 mmにしたことから、周期数は100から半分の50となった。この赤外用磁石列も川崎重工を介して、信越化学が製作することとなった。一般に永久磁石の放射線耐性はキュリー温度が高く熱耐性が高いほうが有利とされており、より高い放射線耐性が期待できるサマリウム系磁石の採用も考慮したが、Nd-Fe-B 磁石も従来より耐熱性能が高まっているとのことから、再び Nd-Fe-B を用いることにした<sup>8)</sup>。赤外用磁石列への交換は2001年3月に実施された。それと同時にビームダクトを内径25 mmのものに交換し、蛍光板ビームモニターも撤去した。蛍光板は原則使用しない方針とし、RFピックアップタイプの非破壊型ビーム位置モニター (Beam Position Monitor, BPM) への置き換えを進めた<sup>9)</sup>。この BPM で得られるのは電荷重心に限られ、電子ビームのサイズや形状は確認できなくなったが、マクロパルス内の時間変動を取得できるため、45°偏向部における電子ビームのアクロマト調整に活用される等、有用なものであったことから、2003年までにリニアック直線部と FEL ビームラインには計10台設置された<sup>10,11)</sup>。またリニアックの運転において、アンジュレータ・ギャップを最大に広げて調整し、90°変更後のビームロスが少ない状態になってから、目的の波長に対応するギャップ間隔まで狭めることとし、この手順を厳守するように努めた。

磁石列交換後、駆動機構のトラブルは発生したが、その修正後は順調に FEL 発振実験は進捗した。クライストロン窓の真空強化が実りマクロパルス幅を20  $\mu\text{s}$  まで広げることが可能となったこともあり、2001年5月に波長1.5  $\mu\text{m}$  で初の FEL 発振を確認した<sup>12,13)</sup>。当初はファースト・レージングの達成を優先し、光共振器には反射率の高い多層膜ミラーを用いていたため、波長1.5  $\mu\text{m}$  での発振実験に限定されたが、調整が進み順調に FEL 強度が向上すると市販レベルの多層膜ミラーでは耐久不足で損傷が生じ、FEL 飽和を観測するに至らなかった。FEL の共同利用を開始するためには広範囲な波長可変性が必要なため、多層膜ミラーによる実験は打ち切って金属コートミラーでの実験を開始した。金属コートミラーにおいても耐久性の問題は生じたが、米国 Spawr 社製の銅基板銀コートミラーを採用することで2003年夏に波長1.5  $\mu\text{m}$  付近で FEL 飽和を達成し、マクロパルス強度も5 mJ 程度安定して得られるようになった。その後も発振実験は順調に進み、波長1-6  $\mu\text{m}$  の範囲で発振を達成し、最大強度も波長1.7  $\mu\text{m}$  で60 mJ/macropulse を観測し、通常でも20 mJ/macropulse 程度が安定して得られるようになった。

### 4. 近赤外 FEL の共同利用とアンジュレータ磁石列の減磁

FEL 発振実験と並行して進められていた、ユーザー実験棟へ FEL を輸送するビームラインの設置も完了したことから、2003年10月よりユーザー利用実験を開始した<sup>14,15)</sup>。Fig. 3 に、LEBRA リニアックの総ビーム加速時間と FEL ビームラインの運転時間の年度推移を示す。2004年度からは X 線用の PXR ビームラインの運用が始まったこともあり、FEL ビームラインの運転時間は総マシンタイムの概ね半分程度となっている<sup>16)</sup>。2007年度までは私立大学に対する拠点形成事業である学術フロンティア推進事業が実施されていたため、学内研究者の利用が活発であり事業終了後数年は維持していたが、2011年度から光源利用に対する課金制度が開始されたこともあり、利用時間は減少傾向となった。2018年以降はクライストロンなど RF 関係の装置故障・不調が相次ぎ、加速器を稼働できる時間自体が減ったことも影響している。

FEL 共同利用開始以降、ユーザー利用実験への FEL ビーム供給は比較的順調であったが、主なトラブルは光共振器ミラーの損傷であった。銅基板銀コートミラーの採用により短時間でのミラー破損は生じなくなったが、やはり経年劣化の類は発生し、数ヶ月~1年程度の使用で FEL 強度が顕著に低下し、ミラー交換を余儀なくされることが続いた。銀コート自体の損傷もあるが、共振器内で成長した FEL を外部に取り出す上流側ミラーの結合孔周辺が酷く損傷し、基板の銅までが痛む放電痕のような形態であった。LEBRA-FEL は共振器型 FEL であり、1パスの FEL 利得は発振条件にもよるが高くとも数10%のオーダーであることから、光共振器損失の増加は安定な発振の大きな障害となる。当時は1組100万円程度の共振器ミラーを用いていたため、FEL の運用において大きな負担となっていたが、短波長領域の実験を実施した後に FEL の強度が

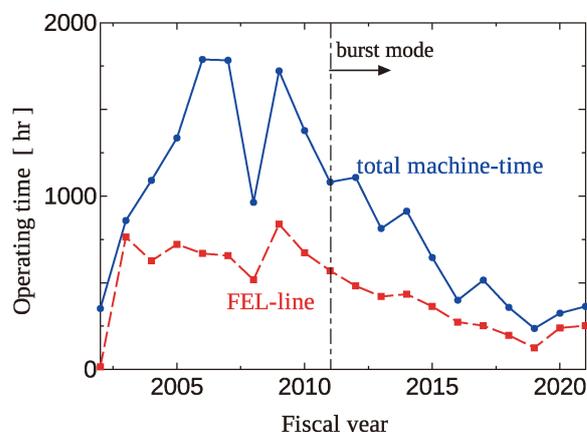


Fig. 3 (Color online) The total machine time of the linac and the operating time for the FEL-beamline as functions of fiscal year.

低下する傾向があることに気付き、2008年1月にミラーを交換した機会に FEL 発振波長を $1.5\ \mu\text{m}$ 以上に制限し短波長で運用しないこととした。その結果、急激なミラーの劣化は生じなくなり、以後の交換は2012年10月、2016年8月と4年程度の使用に耐えられるようになった。結合孔取り出しの金属ミラーの使用は広い波長範囲をカバーする半面、曲率半径が固定で共振器内の光ビーム径が波長に依存する問題がある。短波長ではミラー上での光ビーム径が小さくなり、結合孔の縁で高電場が生じ放電による損傷が発生しやすくなると推測される。共振器型 FEL では FEL 利得と光共振器損失がバランスするところで飽和状態となるが、LEBRA-FEL では波長 $2\text{--}3\ \mu\text{m}$ の領域で飽和レベルが高く強い発振が得られている。この波長領域の基本波に対し、波長変換の変換効率が光のピークパワーに依存する BBO ( $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ ) のような非線形結晶を用いると、高い変換効率で2次高調波を生成することができる。これより波長の短い領域、特に $1.5\ \mu\text{m}$ 以下では波長に依存して FEL 利得が低下するのに加え、光共振器の結合孔径が固定であることから、光ビーム径が小さくなり外部取り出しによる共振器損失が増加する。このような特性を踏まえると、波長 $2.4\text{--}3.0\ \mu\text{m}$ の基本波から非線形結晶で変換された波長範囲 $1.2\text{--}1.5\ \mu\text{m}$ の2次高調波の強度は、基本波発振で得られる強度とオーダーとしては同程度になると期待できることから、波長 $1.5\ \mu\text{m}$ 以下の短波長領域は高調波変換で対応することにした。可視領域も2次高調波をもう一度非線形結晶による変換で4次高調波として生成可能で、 $400\ \text{nm}$ 程度まで利用実験に供給した実績がある<sup>17,18)</sup>。

Fig. 4 は FEL 調整用赤外検出器の出力から換算したマクロパルスあたりの FEL 強度を日毎にプロットしたものであるが、2011年からバーストモードと呼んでいる運転モードでの運用が始まっている。これは電子銃から電子を引き出すグリッドに高速パルサーを導入することで、電子

バンチを間引いた運転を可能にしたものである。Fig. 5 にリニアックで加速後の電子ビームパルス構造を模式的に示すが、元々の加速周波数 $2856\ \text{MHz}$ のままのモードをフルバンチモードと呼んでおり、バーストモードは主に $2856\ \text{MHz}$ を64分周したモード( $44.6\ \text{MHz}$ )と128分周したモード( $22.3\ \text{MHz}$ )を用いている<sup>19)</sup>。FEL においては、光共

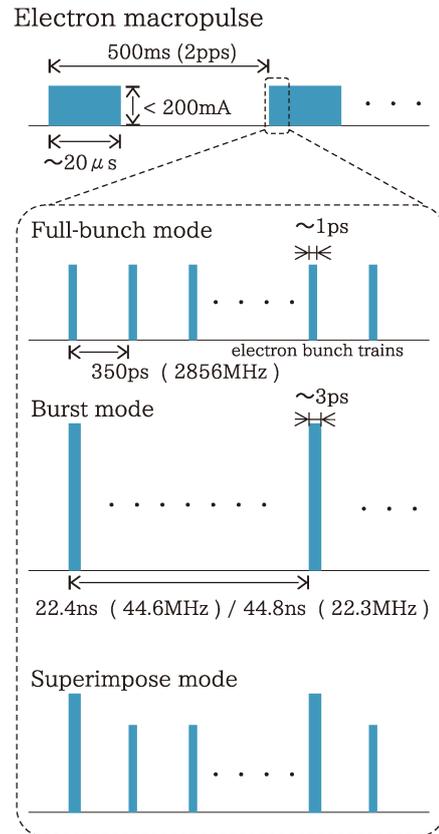


Fig. 5 Schematic explanations for the electron pulse structure from the LEBRA-linac having three operation-mode.

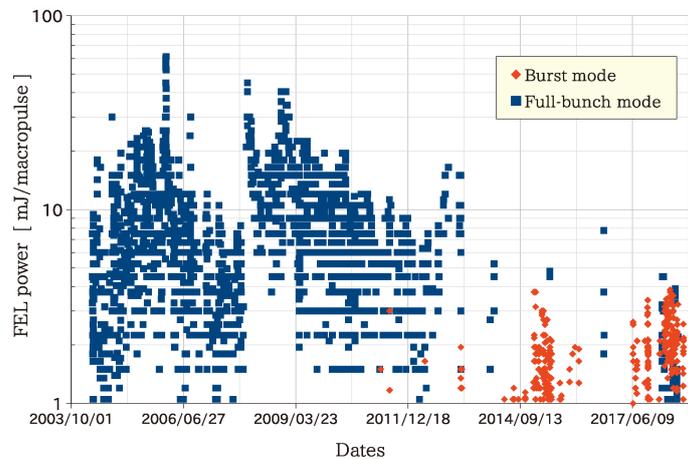
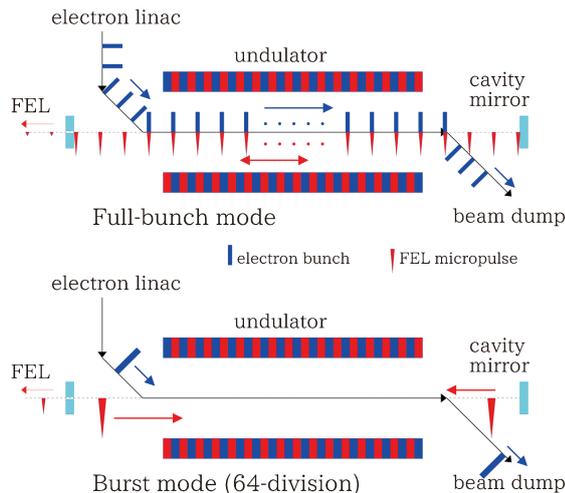


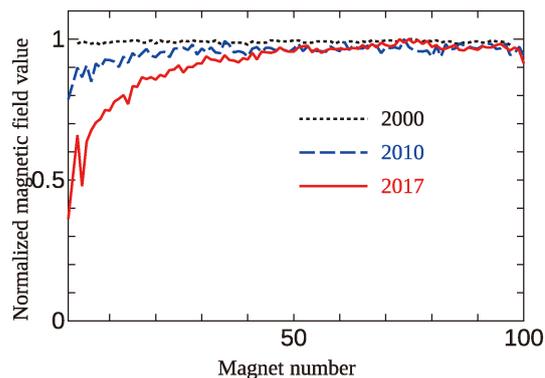
Fig. 4 (Color online) The trend of the available FEL power using the original IR-undulator at the LEBRA facility until the exchange of the magnet-array.



**Fig. 6** (Color online) Schematic drawing for the comparison of the FEL micropulse trains in the optical cavity between the full-bunch mode and the burst mode in the LEBRA-FEL system.

振器 1 往復の周期が128分周のバンチ間隔に相当する44.8 ns であるため、フルバンチモードではマクロパルス中に互いに相関のない128系列の FEL ミクロパルスが連なった状態となる。一方、バーストモードでは光共振器と同期するバンチを残して間引かれるため、相関のある 1 系列 (128分周) または 2 系列 (64分周) のみが光共振器に存在する状態となる。**Fig. 6** は光共振器内の電子バンチと FEL ミクロパルスの様子を模式的に表し、両モードを比較したものである。バーストモードでは電子バンチ数を間引くことによりバンチ当たりの電荷量が 1 桁程度増え、空間電荷効果のためエミッタンスが悪化しバンチ長もフルバンチモードより長くなるが、電荷量の恩恵が優越し FEL 利得が向上する<sup>20,21)</sup>。その結果、FEL 飽和レベルが高くなり、飽和に到達するのも早い。FEL ミクロパルスの総数が少なくなるためマクロパルス強度はフルバンチモードの数分の 1 程度になるが、ミクロパルスのピーク強度は強くなり発振の調整も容易であるため、徐々にバーストモードでの運転が増えていった。

バーストモードでの運転が主流になりフルバンチモードで FEL 運転をすることが少なくなったが、従来の強度が得られず発振調整も難しくなっていた。共振器ミラー交換でも十分には回復せず、2017年12月に THz 光源開発のためのビームライン工事の機会を捉えてアンジュレータ磁石列の磁場測定を実施したところ、磁石列の減磁が発覚した<sup>22)</sup>。磁石列 1 周期のピーク値をプロットし、磁石列を製作した2000年および10年経過した2010年に測定した結果との比較を **Fig. 7** に示すが、測定条件がそれぞれ異なるため、磁場の値は磁石列の全長に渡る最大値で規格化したものである。単純な量的比較はできないが、磁場の一様性の悪化から減磁の進行が見て取れる。最初の10年間より



**Fig. 7** (Color online) Comparison of the normalized magnetic field of the original IR-undulator measured in 2000, 2010 and 2017.

もその後の7年間の劣化が顕著であるが、**Fig. 3** の FEL 運転時間との相関は見られない。時系列的にはバーストモードでの運転が増加したことの影響が疑われる。バーストモードではバンチ当たりの電荷量が増えることからエミッタンスが悪化してビームハローも増加し、放射線遮蔽が不十分な箇所でのビームロスが発生することが考えられる。バーストモードではビーム電流量が少なく電流モニターからロスの推定をすることは難しく、蛍光板を撤去して電荷重心をモニターする BPM に置き換えたことから、日常的にビーム形状を測定してハローの状況を把握するのが困難であった。また両方のモードを重ね合わせた重畳モードでの運用も行っていたが (**Fig. 5**)、このモードでは電荷量の大きく異なるバンチが混在することになるため、偏向部で同じ軌道とならずロスが増加する可能性が高い。FEL の状態についても経験上、強度低下で真っ先に疑うのが共振器ミラーの劣化であり、バーストモードや重畳モードでは電荷量の恩恵でアンジュレータが劣化していても調整により FEL 発振が得られ、運用できてしまう。これらの要因が重なり、磁石列減磁の発覚が遅れたといえる。磁場測定が現状、ホール素子による手動測定に頼っているため、マンパワーが不足する状況で頻繁に測定を実施するのが難しいという事情もある。

## 5. 近赤外用アンジュレータ磁石列の修復と FEL 発振強度の回復

アンジュレータ磁石列減磁発覚後も、大きなビームロスが懸念される重畳モードでの運転は原則取り止め、主にバーストモードでの FEL 利用実験を実施していたが、マクロパルスあたりの強度は高々数 mJ に留まり、フルバンチモードでは発振の調整自体が困難になりつつあった。そのような状況の下、2018年に文部科学省光・量子飛躍フラグシッププログラム (Q-LEAP) がスタートし、先端レーザーイノベーション拠点「次世代アト秒レーザー光源

と先端計測技術の開発」部門の基礎基盤研究として「自由電子レーザーで駆動する高繰り返しアト秒光源のための基礎基盤技術の研究」(代表者:羽島良一)が採択され、日大 LEBRA も参画することとなった<sup>23)</sup>。これは赤外 FEL を希ガスによる高次高調波で変換し、軟 X 線領域の高繰り返しアト秒光源の実現を目指すプロジェクトであり、LEBRA-FEL は日本国内の共振器型 FEL 施設として京都大学 KU-FEL と共に実験研究の実施機関となる<sup>24,25)</sup>。ターゲットとする基本波の波長を  $4\ \mu\text{m}$  としたため、それを FEL 発振波長域に含む LEBRA-FEL は最終的な高調波発生を検証にとって重要な役割を担うことになるが、ここで問題になったのがアンジュレータの劣化である。高調波発生のためには短パルス高強度の FEL ミクロパルスが必要であり、ゼロ・デチューニングと呼ばれるモードでの FEL 発振を利用することになるが、この発振モードは FEL 飽和レベルは高くなるものの 1 パスあたりの利得が小さく、マクロパルス内での成長が遅い<sup>26)</sup>。アンジュレータの健全性が損なわれると利得が更に減少し十分な強度が得られないため、プロジェクト遂行の必要性からアンジュレータの修復を試みるようになった。

磁石列の修復にあたって、ここで元々のアンジュレータ装置の製造元である川崎重工が事業撤退しており、磁石の製造メーカーである信越化学も単独ではアンジュレータ磁石列の取扱いは困難、というのが大きな問題となった。施設内での再着磁も検討したが、前回同様に着磁装置・電源を入手して管理区域内に持ち込んで作業する必要があるところが障壁となった。アンジュレータ架台と駆動部を含めた一式で新調する予算は捻出できないため、NEOMAX エンジニアリング(株)に磁石列およびそれを固定するホルダー・マウント部の製作と、既存のものとの交換する作業を依頼することになった。これは可視用から赤外用に交換した時と基本的には同様の方法となる。材質には熱耐久性が高く放射線耐性が期待できるジスプロシウム (Dy) 添加の Nd-Fe-B を採用し、周期長は交換前と同じ  $48\ \text{mm}$  とした<sup>27)</sup>。ちょうど傾斜磁化による放射線耐性の向上が報告されていたこともあり同様の対応も検討したが、未だ知見不足のところもあり保守的に従来と同様のハルバック型とした<sup>28)</sup>。磁石列端部の磁気回路については、電子ビーム軌道最適化のために従来から変更することを NEOMAX エンジニアリングから提案され、それを採用したことで周期数は 50 から 1 つ減り、49 となった。

2020年2月下旬に磁石列交換を実施し、Fig. 8はその作業中の新磁石列の写真である。磁石列は両側ともマウント部が上流・下流で2分割されている構造であり、その隙間について若干の調整を要したが、その調整と磁場測定を含め、3月下旬に作業が完了した。Fig. 9に表面磁場測定の結果とその上流部の拡大図を示すが、横軸はアンジュレータ入口から測った距離である。また磁場の値から計算した各ギャップ間隔での実効 K 値を Fig. 10に示す。現在



Fig. 8 (Color online) A photograph of the new magnet-array for the IR-undulator during the installation into the FEL-beam-line.

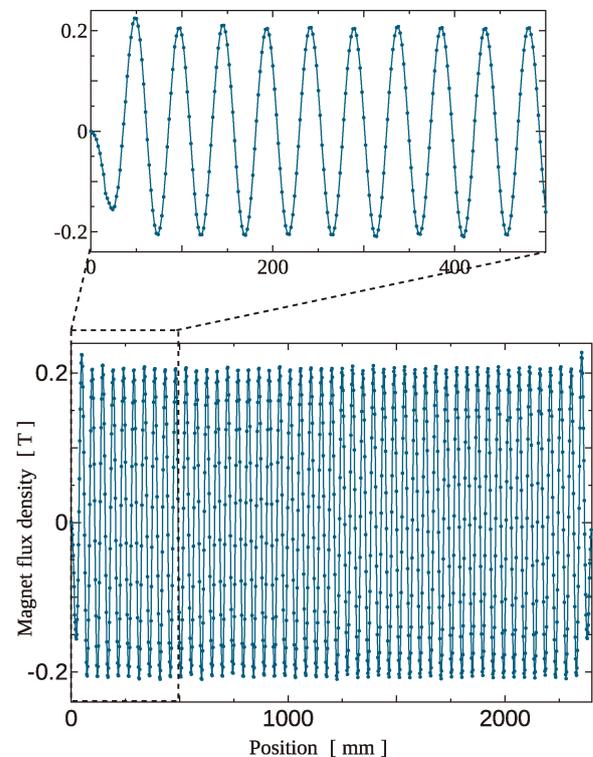


Fig. 9 The magnetic field of the repaired undulator measured as a function of the longitudinal position along the magnet-array, attached with a magnified plot around the upstream region.

は長波長領域での利用が多くなったことから、ギャップを  $24\ \text{mm}$  まで狭められるようにし、回折損失を減らすため矩形ダクトにしている。現在の LEBRA-FEL の仕様を Table 2 にまとめる。

磁石列交換後、2020年4月に発令された新型コロナウイルス感染症に対する緊急事態宣言や空調設備の故障のため、しばらく発振試験を実施することができなかったが、7月末に FEL 発振を確認することができた。再開当初は

十分な FEL 強度が得られなかったが、これは2016年に交換した共振器ミラーの劣化が進んでいたことが原因と考えられた。近年、短波長域の基本波発振をしない運用となっていることを考慮し、銀コートではなく金コートミラーを採用し11月に交換を実施した。現在は曲率半径3.7 m、結合孔直径0.44 mm のものを使用している。ミラー交換後2022年末までに得られた FEL 発振強度を、横軸を基本波波長にしてプロットしたものを Fig. 11 に示す。フルバッチ

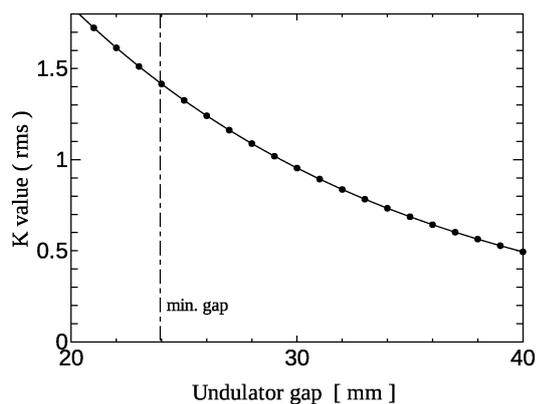


Fig. 10 The effective K-value of the repaired undulator as a function of the undulator gap width.

Table 2 Specifications of the LEBR-FEL system.

Undulator Configuration	Halbach-type Planar
Magnet Material	Dy-doped Nd-Fe-B
Perion of Undulator Field	48 mm
Number of Periods	49
Undulator Gap Width	≥ 24 mm
K-value (rms)	0.7-1.4
Resonator Length	6718.04 mm
Fundamental Wavelength	1.2-6.7 $\mu\text{m}$

モードでは波長2.3  $\mu\text{m}$  で36 mJ/macropulse を達成しており、比較的安定に10 mJ/macropulse 以上が得られている。バーストモードでは64分周で26 mJ/macropulse@3.6  $\mu\text{m}$  を観測しており、これはバーストモード運用開始以来、最高記録である。Fig. 12がその時のFELマクロパルス波形であるが、バーストモードでのマイクロパルス数を勘案してマイクロパルスエネルギーを見積ると40  $\mu\text{J}$  以上となり、希ガス高調波生成に期待が持てる強度となっている。これはクライストロンの真空窓の不調のためマクロパルス幅を17  $\mu\text{s}$  以下に制限した中での記録であり、健全なクライストロンに交換しパルス幅20  $\mu\text{s}$  で運転することができれば、更なる強度の向上が期待できる。

## 6. 今後の放射線対策

最初の減磁と修復の後に対策として取った、蛍光板の不使用やりニアック調整時にアンジュレータ・ギャップを最大にするという運用はアンジュレータの保護に一定の効果があつたが、電子ビームの監視だけでは検知できない状況

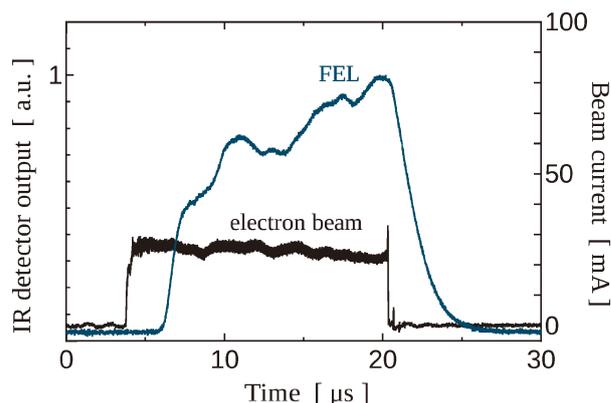


Fig. 12 The FEL macropulse-waveform in the 64-dividing burst-mode when the macropulse energy is estimated to be 26 mJ.

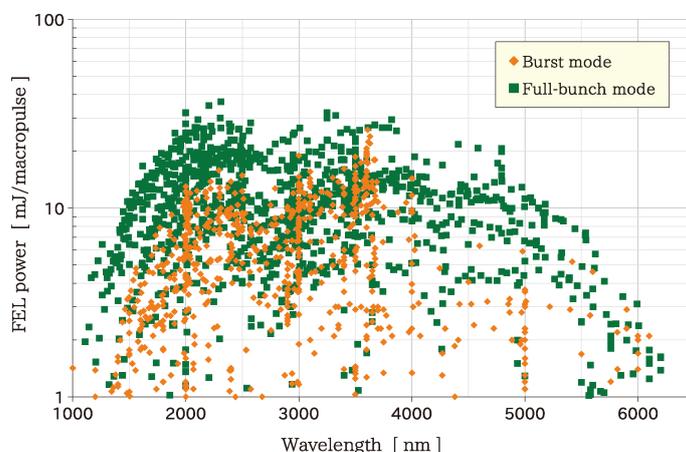


Fig. 11 (Color online) The IR-FEL macropulse power after the exchange of the undulator magnet-array and the optical resonator mirrors as functions of fundamental wavelength.

の悪化には対応できなかった。FEL の発振強度自体は、共振器ミラーや加速器の RF 機器の状態など、アンジュレータ以外の要因が強く影響するため指標とはならず、そもそもアンジュレータ起因で発振強度が得られなくなった段階では手遅れである。大学の附置施設では磁石列の修復は予算の面でも容易ではないことから、更新した現在の磁石列の健全性をできる限り長く維持する必要がある。そのためにはアンジュレータ周囲の局所的な遮蔽強化と放射線量の把握が重要であり、対策として既に実施済み、および現在検討中のものを以下に挙げる。

### 6.1 放射線遮蔽強化

アンジュレータ直前の45°偏向電磁石周辺が放射線源となっている可能性が高いため、空間的な制約はあるが周囲の遮蔽を強化することにした。中性子の発生を考慮し、鉛に加え、ステンレス、ポリエチレン、コンクリートも遮蔽材として追加した。

### 6.2 小型放射線モニターの設定

安価なサンゴバン社製 CsI(Tl)シンチレータと浜松ホトニクス社製光電子増倍管 (H10722-210) を組み合わせた、小型の放射線モニターを数台製作し、アンジュレータ上流部に取り付けた<sup>29)</sup>。後述のゲル線量計と共に取り付けられた様子が Fig. 13 である。あくまでも相対的な放射線量変化の監視用ではあるが、リアルタイムにモニタリングをすることで、リニアックの調整時に危険な状態となる時間を短くすることが期待できる。<sup>137</sup>Cs チェッキングソースを用いた較正を行い、1パルスあたりの吸収線量を評価すると、遮蔽強化後のアンジュレータ上流部周辺での典型的な空間線量は多くとも $10^{-7}$  Gy 程度であった。FEL 運転時のパルス繰り返しは通常 2 pps であり、放射線施設の申請上の運転時間の上限が100時間/週、FEL ビームラインと PXR ビームラインをほぼ交互に運用し、それぞれ年間20週程度の運転であることを考慮すると、年間の吸収線量は

高々 1-2 Gy 程度である。CsI シンチレータでは中性子の測定はできないが、放射線シミュレーションコード PHTS を用いた計算から、中性子の線量は光子による線量と同等かそれ以下と推定している<sup>30)</sup>。製品毎の磁石の性能の違いや放射線の線種に依存するが、100 Gy 以上の照射で放射線減磁が有意に現れることが多いことから、通常のシンチレータ出力を維持することができれば、20~30年の使用で深刻な減磁が生じるリスクは低いと考えている<sup>31,32)</sup>。

### 6.3 ゲル線量計の導入の検討

シンチレータ検出器は、加速器の運転調整時にパルス毎の線量を監視するには有用だが、数年にわたる積算線量の管理には不向きである。特に一時的な電子ビームロスの増加に対して漏れなく測定・記録することは難しいところがあり、結果として線量を過小評価するリスクがある。このような面から、積分型の線量計を用いた管理を並行して行うのが望ましいが、写真フィルム系は加速器周囲の高線量下で長期間用いるには線形性や飽和の問題で扱いにくいところがある<sup>33)</sup>。そのため現在開発が進んでいる、ヨウ素を添加したポリビニルアルコールを用いたゲル線量計の利用を検討している<sup>34)</sup>。この線量計は、Fig. 14 のように吸収線量に応じて赤色に着色するが、その吸光度の吸収線量に対する線形性が優れており、しかもダイナミックレンジが広く飽和しにくい。安価な画像スキャナーを用いた簡易的な線量の定量化が可能で、湯せんによるアニール処理後に再利用することもできる等、加速器施設には有用な特性を備えている。室温に対する依存性、中性子に対する感度、線量較正手順の標準化などの課題はあるが、導入に向けてゲル線量計についての共同研究に着手している。ゲル線量計は破壊読み出しではなく、その都度着色の程度を測り、そのまま測定を継続することができるため、その特性

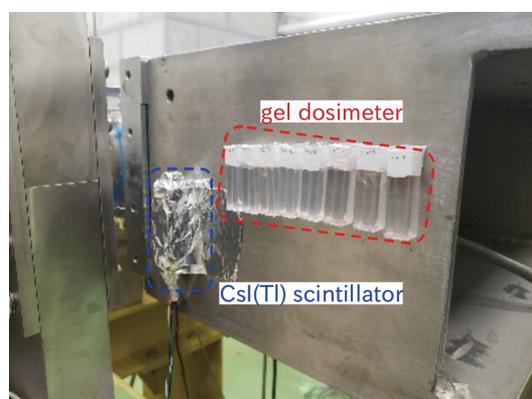


Fig. 13 (Color online) The photograph of a CsI(Tl) scintillator detector and gel dosimeters fixed at the undulator base for radiation dosimetry.



Fig. 14 (Color online) Gel dosimeters after radiation exposure in the accelerator room. The red-color concentration of the dosimeters depends linearly on the absorbed dose.

を活かし、数年～10年程度に渡って10 Gy オーダーの線量を積算評価できるような線量計の実現が目標である。

## 謝辞

アンジュレータ磁石列の更新の一部は、文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) JPMXS0118070271の助成で実施された。またFEL輸送ラインの整備は、文科省学術フロンティア推進事業「可変波長高輝度単色光源の高度利用に関する研究」(2000-2007年度)によってなされたものである。

日大LEBRAの加速器・光源の高度化と応用の開拓、およびその運用は歴代の施設スタッフ、大学院生、共同利用者の不断の努力によるものである。改めて敬意と感謝の意を表したい。

## 参考文献

- 1) 日本大学電子線利用研究施設: <http://www.lebra.nihon-u.ac.jp/>
- 2) K. Hayakawa *et al.*: Nucl. Instrum. and Meth. A **375**, ABS25 (1996).
- 3) 早川恭史, 高橋由美子: 日本放射光学会誌「放射光」**33**, 87 (2020).
- 4) 境 武志: 日本放射光学会誌「放射光」**34**, 153 (2021).
- 5) I. Sato *et al.*: Proceedings of the 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan, 104 (1997).
- 6) I. SATO *et al.*: Proceedings of the 12th Symposium on Accelerator Science and Technolog, 37 (1999).
- 7) K. Hayakawa *et al.*: Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, 56 (2000).
- 8) 備前輝彦: 博士論文 放射光挿入光源用永久磁石の放射線減磁に関する研究 (京都大学, 2009).
- 9) T. Suwada: Jpn. J. Appl. Phys. **40**, 890 (2001).
- 10) K. Ishiwata *et al.*: Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan And the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, 483 (2005).
- 11) K. Hayakawa *et al.*: Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan And the 31th Linear Accelerator Meeting in Japan, 747 (2006).
- 12) T. Sakai *et al.*: Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, 228 (2000).
- 13) Y. Hayakawa *et al.*: Nucl. Instrum. and Meth. A **483**, 29 (2002).
- 14) T. Tanaka *et al.*: Proceedings of the 2004 FEL Conference, 427 (2004).
- 15) T. Tanaka *et al.*: Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan And the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, 28 (2005).
- 16) 早川恭史: 日本加速器学会誌「加速器」**6**, 166 (2009).
- 17) K. Hayakawa *et al.*: Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan, 803 (2008).
- 18) K. Hayakawa *et al.*: Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 784 (2010).
- 19) T. Tanaka *et al.*: Proceedings of IPAC2011, 3218 (2011).
- 20) K. Yokoyama *et al.*: Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan And the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, 604 (2004).
- 21) T. Sakai *et al.*: Condens. Matter **5**, 34 (2020).
- 22) K. Nogami *et al.*: Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 1343 (2018).
- 23) 光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP): <https://www.jst.go.jp/stpp/q-leap/index.html>
- 24) R. Hajima: Proceedings of 2019 IEEE Photonics Conference (IPC), 8908339 (2019).
- 25) R. Hajima: Atoms **9**, 15 (2021).
- 26) Y. Sumitomo *et al.*: J. Phys.: Conf. Ser. **1350**, 012040 (2019).
- 27) M. Sagawa, S. Hirose, K. Tokuhara, H. Yamamoto and S. Fujimura: J. Appl. Phys. **61**, 3559 (1987).
- 28) T. Bizen, R. Kinjo and T. Tanaka: Phys. Rev. Lett. **121**, 124801 (2018).
- 29) H. Okazaki *et al.*: Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 837 (2020).
- 30) PHITS: <https://phits.jaea.go.jp/indexj.html>
- 31) H. B. LUNA *et al.*: Nucl. Instrum. and Meth. A **285**, 349 (1989).
- 32) 川久保忠通, 他: Proceedings of the 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, 208 (2003).
- 33) M. Shiozawa and T. Obina: Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 743 (2022).
- 34) S. Hayashi, K. Ono, K. Fujino and S. Fujimoto: J. Phys.: Conf. Ser. **1305**, 012031 (2019).

## 著者紹介



### 早川恭史

日本大学量子科学研究所 教授  
E-mail: hayakawa.yasushi@nihon-u.ac.jp  
専門: 加速器科学, 放射線物理学

#### 【略歴】

1998年3月京都大学理学研究科物理学第二専攻修了。博士(理学)。1998年4月日本大学原子力研究所助手, 同量子科学研究所専任講師, 同准教授を経て, 2014年4月より現職。



### 境 武志

日本大学量子科学研究所 准教授  
E-mail: sakai.takeshi@nihon-u.ac.jp  
専門: 加速器科学, ビーム物理学, 量子ビーム科学

#### 【略歴】

2004年日本大学大学院理工学研究科博士後期課程量子理工学専攻修了。博士(理学)。2005年日本大学大学院総合科学研究科助手, 2009年, 高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設研究員。2011年株式会社アキュセラ。2012年日本大学量子科学研究所助手, 同助教を経て, 2020年4月より現職。

# Radiation-induced demagnetization of the undulator magnet-array for infrared-FEL and the repair dealing at Nihon University

**Yasushi HAYAKAWA** Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA), Nihon University, Narashinodai 7-24-1, Funabashi 274-8501, Japan

**Takeshi SAKAI** Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA), Nihon University, Narashinodai 7-24-1, Funabashi 274-8501, Japan

**Abstract** A resonator-type free electron laser (FEL) has been in operation utilizing a 125-MeV electron linac at the Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA), Nihon University. The FEL beam has been supplied for users researches as near-infrared (IR) light source since the first-lasing at 1.5  $\mu\text{m}$  wavelength in May 2001. In 2017, however, we found that the magnetic field of the undulator magnet-array was reduced especially around the undulator entrance to almost half strength. The radiation-induced demagnetization had seriously caused the reduction and the instability of available FEL power. For the repair of the undulator, a new undulator magnet-array was manufactured and was installed as a replacement for the damaged array in February 2020. After the exchange of the magnet-array and the damaged mirrors of the FEL resonator, the available FEL intensity has been normally recovered and the highest output in the burst mode was obtained since the introduction of the mode. For the protection of the undulator against radiation exposure, the radiation shield around the bending magnet in front of the undulator is enhanced and several scintillator-based radiation monitors are placed around the undulator for realtime monitoring. In addition to realtime monitors we consider the use of integral dosimeters based on poly(vinyl alcohol)-iodide complex gel.