

Fabrication of an Undulator for Visible and UV Lasing at FELI

Miyauchi Y., Zako A., Koga A., Tomimasu T., M. Takahashi*, S. Mandai*,
K. Kakuno** and T. Ohashi**

Free Electron Laser Research Institute, Inc. (FELI)
4547-44, Tsuda, Hirakata, Osaka 573-01, Japan

* Ishikawajima Harima Heavy Industries Co., Ltd. (IHI)
1, Shin-nakahara, Isogo-ku, Yokohama 235, Japan

** Shin-etsu Chemical Co., Ltd.
2-1-5, Kitago, Takefu-City, Fukui 915, Japan

Abstract

A permanent magnet undulator for the lasing of visible and UV FEL was constructed and installed. Its period length is 4 cm, period number is 67, and total length is 2.68 m. The K-value covers 0.41-1.97, and expected wave length covers 0.25-1.2 μm. This report describes its design parameter, magnet design and tuning, and mechanical design.

FEL研可視・紫外自由電子レーザー用アンジュレータの製作

自由電子レーザー研究所(FELI)では、昨年発振に成功した赤外および中赤外自由電子レーザー発振系に加えて、今年度新たに可視・紫外自由電子レーザー発振系を建設した。ここではその中で発振部を構成するアンジュレータの概要を報告する。

1. パラメータの設定

可視・紫外発振部では、7本のSバンド加速管によって160MeV以上のエネルギーに加速された電子ビームを、そのビーム特性を劣化させないように22.5°という浅い偏向角のS字型オフセット用格子でアンジュレータラインに導かれる。電子ビームのピーク電流は50~80A、エネルギー分散は0.5%以下、規格化エミッタンスは26π mm・mradである。

永久磁石を用いるアンジュレータの中で、永久磁石だけをを用いるHalbach型アンジュレータには、各素材磁石の特性の誤差が直接組み上げたときの誤差に影響を及ぼすという難点があるが、高調波成分がハイブリッド型に比べて少ないという特徴がある。また一般に、短波長のFELの発振のためには、アンジュレータの周期長をできる限り小さくするという考えが一般的であるが、確実な発振を目指すためには、電子ビームのエネルギーを高くして、アンジュレータは通常の周期長とギャップを確保し、加速器としての運転・実験が行い易いシステムでなければならない。

そこで、今回製作した可視・紫外用アンジュレータは、1周期4cm、周期数67、全長2.68mのサマリウム-コバルト永久磁石を用いたHalbach型とし、式(1)によって軸上ピーク磁場を評価することにより、K値で0.41~1.97、

発振波長で0.25~1.2μmを目指すものとした[1]。

$$B_{\text{po}} = 2B_r \{1 - \exp(-k_u h)\} \exp(-k_u g/2) \sin(\pi/M) / (\pi/M) \quad (1)$$

ここに、各記号の意味は、 $B_r = 10000$ (サマリウム-コバルト) : 残留磁化、 $k_u = 2\pi/\lambda_u$ 、 λ_u : 周期長、 g : アンジュレータギャップ、 h : 永久磁石高さ、 $M=4$: 1周期当たりの磁石数である。

電子ビームおよびアンジュレータの諸元は記号と共に表1に纏め、図1に発振波長、図2に小信号利得を示す。小信号利得の評価には式(2)を用いた。

$$G = C \{J_0(\xi) - J_1(\xi)\}^2 (I_0/377) \sqrt{\lambda/\lambda_u N^2 (K^2/2)/(1+K^2/2)^{2/3}} \quad (2)$$

ここに I_0 : ピーク電流、 λ : 発振波長、 $\xi = (1/4)K^2/(1+K^2/2)$ 、 $K=0.0934B_0 \lambda_u$ の通りであり、さらに修正係数CはFELIXグループが提案した式によって評価した[2]。

2. 磁石設計

本アンジュレータは、ビームモニターの放射線による損傷を避けるために縦型としている。永久磁石は軸方向長さ1cm、奥行き9cmである。また、高さは式(1)の $\{1 - \exp(-k_u h)\}$ の項がほぼ飽和するに必要な長さである周期長の0.6倍すなわち2.4cmに設定した。自由電子レーザーの利得は、波長の平方根に比例するため、可視・紫外FELの発信は赤外の場合よりも困難である。従って、アンジュレータ部では、ピーク磁場の誤差をできる限り小さくして増幅率を確保しなければならないため、目標誤差を±0.1%以下に設定した。そのために各永久磁石の特性の誤差を数パーセント以内に納めた後、各磁石のシム調整および突き出し調整によって誤差を小さくした。

表1 電子ビーム及びアンジュレータのパラメータ

Electron beam

Energy	T	160 MeV(nominal)
Frequency	f_{RF}	2856 MHz
Peak current	I_0	50-80 A
Emittance(normalized)	ϵ_n	26π mm ² ·mrad
Energy spread	σ_E/E	< 0.5 %
Micro pulse duration		5 ps
Macro pulse duration		24 μ s
Macro pulse frequency		10 Hz
Average power		2.5 kW

Undulator

Type	Pure permanent magnet, Halbach type	
Material	Sm-Co	
Magnet dimensions	l:10 x h:24 x b:90 mm	
Period length λ_u	4 cm	
Period number N	67	
Total length L	2.68 m	
Gap distance	16-150 mm	
Peak field $B_{\gamma 0}$	5260 G(g=16 mm)-1085 G(g=36 mm)	
K-value	1.97(g=16 mm) - 0.41(g=36 mm)	

磁石材質には、放射線による部分的な磁場の低下による誤差の増大を最小限度にとどめるために、サマリウム-コバルト系のものを選択したが、この材料はネオジウム系永久磁石に比べて残留磁化および保磁力が小さいため、材料選択を慎重に行う必要がある。すなわち軸に平行に磁化される磁石では、周囲の同種永久磁石が作る約1400Gの逆磁場による減磁効果のためにアンジュレータとして組み立てたときの動作点が特性曲線(減磁曲線)の低パーミアンス側にずれてBHカーブの直線部から外れ、単体では特性が揃っていても組み上げたときの各磁石の特性のばらつきが大きくなり易い。このような見地から、磁場特性および焼結特性が安定している材料の中で保持力が大きくBHカーブの直線部の長いものを選び、電子ビーム軸方向に磁化されるものには信越化学R26HSを、軸に垂直方向に磁化されるものには信越化学R32Hを使用することとした。表2には、使用した永久磁石材料の材料特性を纏める。

表2 永久磁石材料特性

Material No.	R26HS	R32H
Remanent magnetization B_r [G]	10800	11570
Magnetic coercivity H_{bc} [Oe]	10130	10500
H_{ic} [Oe]	24600	21220
Maximum energy product $[BH]_{max}$ [MGOe]	27.5	30.5
Temperature coefficient α [%/°C]	-0.03	-0.03

Remark: 4 periods of inlet and outlet point are omitted

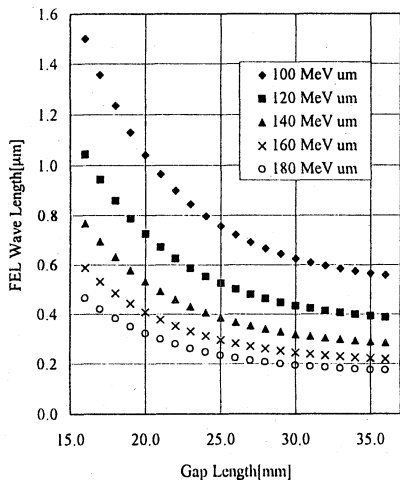


図1 発振波長(ギャップ長及びビームエネルギー)との関係

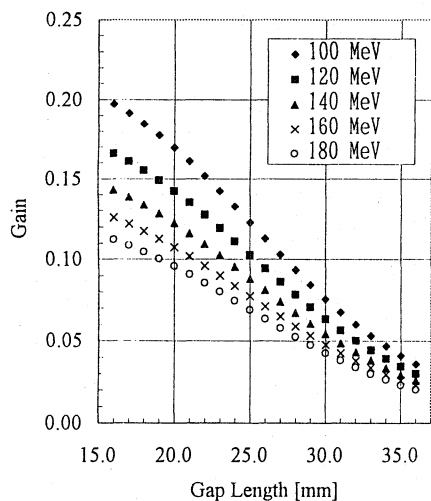


図2 小信号利得(ギャップ長及びビームエネルギー)との関係

3. 機械設計

永久磁石は、ビーム軸方向に2分割の台座に組み付けた後、駆動架台の梁に固定される。この梁は、背後側が大きく開放されており、ギャップを狭めたままで永久磁石の突き出しによる微調整が容易にできる構造となっているため、発振実験のギャップ長に固定したままで磁場調整をすることができる。駆動架台は、左右の梁をそれぞれ2個のサーボモータによって駆動することによって開閉する。ギャップ間隔は16~150mm(発振実験は16~36mm)で可変である。次節に示すように、磁場調整を実施したギャップ長22.2mm(K=1.2、 $B_{max}=3210$ G)では、ピーク磁場の0.1%のピーク磁場誤差3Gはギャップ長誤差約10 μ mに対応する。従って、数ミクロンオーダーの機構的再現性がなければ仕様を満たす磁場調整は不可能である。そのためギャップ長はサーボモータとサブミクロンオーダーの光学スケールを用いた閉ループ制御を用いることによりミクロンオーダーで再現可能となっている。

空形式ステアリング電磁石が電子ビーム出入り口部の2式と、アンジュレータ部4式の併せて6式用意されており、これを5台のスクリーンモニターと併せて用いることにより、電子ビームの軌道をほぼ完全に制御することができる。真空ダクトは、矩形断面を有し、ギャップ方向の内寸法は11mmで、コンダクタンスが小さいためイオンポンプは中央部に1台だけ設置している。図3には、本アンジュレータの外形を示す。

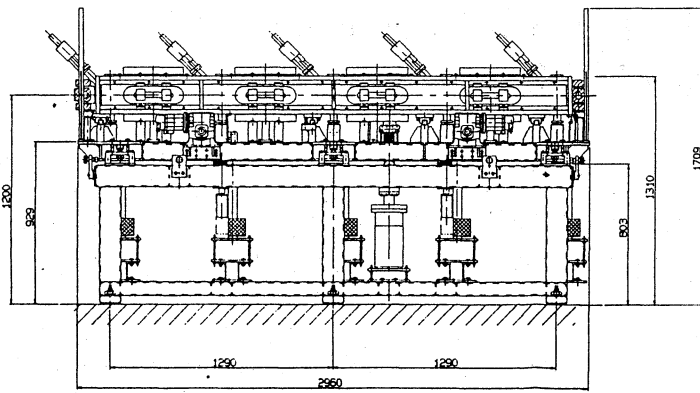


図3 可視・紫外用アンジュレータ外形図

4. 磁場調整

ピーク磁場分布の様子は厳密にはギャップ長によって異なるので、今回はギャップ長22.2mm(K=1.2)で磁場調整を実施した。これは電子ビームエネルギーが160MeVのときの発振波長が当面の目標である0.35 μ mとなることに対応する。

シムおよび付加磁石を用いた粗調整の後、各磁石の突き出しによって仕上げ調整をおこなった。磁場調整に当たっては、ピーク磁場の誤差を小さくするとともに、式(3)に示すように[3]、電子軌道の軸からのずれに比例する軸上磁場の2重積分値を小さくする必要がある。

$$x(L) = \frac{c}{E[eV]} \int_0^L \int_0^L B_{y0}(z) dz dz \quad (3)$$

そのため、まずピーク磁場誤差を小さく追い込んだところ、全幅で0.18%($\pm 0.035\%$ RMS)まで誤差磁場を小さくすることができた。ただし、2重積分値が目標値を大きく上回って電子軌道がアンジュレータ出口で1.2mm軸から離れていたためさらに調整を加え、局部的に補正用に磁場の变化を大きくして、最終的にギャップ長22.2mmで全幅で0.55%($\pm 0.12\%$ RMS)を得た。磁場調整結果は表3に示す通りである。ここに、2重積分値調整のために特に出入り口部の磁場を大きめに調整したので、両端2周期合わせて4周期は評価対象から除いた。図4は、ギャップ長22.2mmのときの軸上ピーク磁場分布を示す。図5は、各ギャップ長、エネルギー160MeVにおける電子

表3 アンジュレータ磁場調整結果

Gap distance	g [mm]	16	22.2	36
K-value	K [-]	1.97	1.2	0.4
Peak magnetic field				
Average	B_{y0} [G]	5261	3212	1084
Deviation	$\Delta B/B_{y0}$ [%]	+0.6	+0.29	+0.79
		-0.51	-0.26	-0.84
RMS Deviation	σ_B/B_{y0} [%]	0.24	0.12	0.34
Double integral(outlet point)	[Gcm ²]	2400	17480	49270
Deviation of trajectory				
(160 MeV, outlet point)	[mm]	0.05	0.3	1.0

軌道のギャップ長による差を示す。すなわち、ギャップ長22.2mmに対するは、アンジュレータに入射して蛇行し始めた160MeVの電子軌道が出口部で0.3mm軸から垂直方向にずれているが、このずれ量はギャップ長によって大きく異なり、2重積分値を抑制するだけで電子軌道のずれを抑制することは、実用的ではないことが判る。従って、本アンジュレータで採用した様に、きめ細かい軌道調整ができる位置にステアリング電磁石を配置しておくことが、実用上重要である。

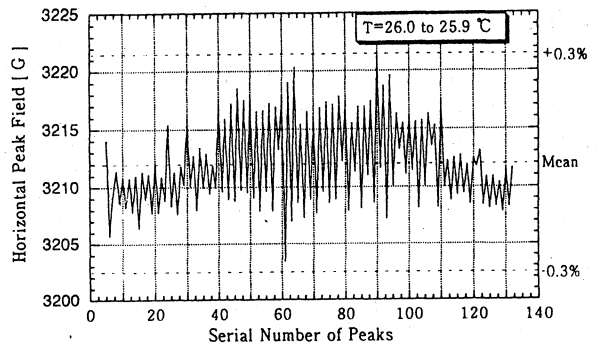


図4 ピーク磁場分布(ギャップ長:22.2mm、K=1.2)

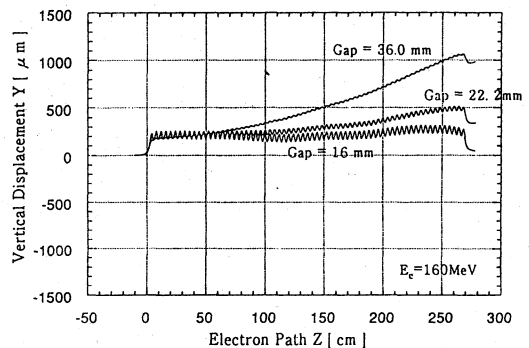


図5 軸上磁場の2重積分値(ギャップ長:16, 22.2, 36mm)

5. 据え付け精度

一般に加速器の機器据え付け精度は、 ± 0.1 mmのオーダーであるが、本アンジュレータにおける実測では、磁石中心から0.15mmずれるとピーク磁場は7G変化し、これは0.2%の磁場偏差に該当する。従って、磁場調整を信号利得に反映させるためには、0.1mm以下の精度でアンジュレータ軸と電子軌道を一致させなければならない。これは、実際には簡単ではないが、アンジュレータ磁場の特性を理解して精度の良い据え付けを実施することが望ましい。運転時に電子軌道をアンジュレータ軸に合わせるには、アンジュレータ部の位置モニターの設置精度も重要となる。

参考文献

- [1] 電気学会:自由電子レーザとその応用、コロナ社、1990、119-220.
- [2] P.W. Van Amersfoort et.al.: Nucl. Instr. Meth., A296(1990)217-221.
- [3] 結石友宏:自由電子レーザ用アンジュレータの最適設計に関する研究(岡山大学学位論文)、1994、47.