

LATTICE DESIGN OF FELI ACCELERATOR SYSTEM

Yasuyuki MIYAUCHI, Akihiko KOGA, Yasutsugu MORII, Shinji SATO,
Tomohiro KEISHI, and Takio TOMIMASU
FELI, Free Electron Laser Research Institute, Inc.
2-7-4 Kyomachibori, Nishi-ku, Osaka 550

ABSTRACT

FELI is constructing an S-band linac accelerator system for generating wide range FEL (Free Electron Laser). The accelerator system has for lasing sections, almost isochronous offsetting lattices, and returning lattices. This paper describes the lattice design.

自由電子レーザー研究所線型加速器系の格子設計

1. 序

自由電子レーザー研究所 (FEL研) では、赤外(20 μ m)から紫外(0.3 μ m)におよぶ広範囲な自由電子レーザー(FEL)を発振する総合的な自由電子レーザー発生装置の建設計画を進めている。このため、加速装置にはS-バンド線型加速器を用い、30, 75, 120, 165MeVの四種類のエネルギー取出部とそれに対応する4台のアンジュレーター・発振部を設置する[1]。ここでは、この加速器系の格子設計についてまとめる。

FELの発振に用いられる電子ビームは、エミッタンスおよびエネルギー分数を小さく抑えながらピーク電流を大きくするという厳しい要求を満たさなければならない。一方、シンクロトロンなどの周回型加速器と異なり、線型加速器では、一度劣化した電子ビームの特性を大幅に改善することはできない。従って、通常の線型加速器系とは異なり、FEL用線型加速器系の設計に当っては、入射部で作上げた電子バンチの特性を劣化させずに発振用アンジュレーターに導くことが重要である。

電子ビームの特性を維持するためには、電子ビームを偏向させないことが基本的に重要であるが、FEL用加速器では、電子バンチをライナックのビームラインから、アンジュレーターのビームラインに導く必要があるため、偏向部をなくすることはできない。

そこで、FEL研の格子設計では反転対称なS字型のアクロマティック格子を採用して、電子ビームを平行にずらせる(オフセット)こととした。これは、偏向角を小さくして各偏向部による電子ビーム特性の劣化を最小限に抑えると共に連続する反対方向の偏向によって個々の偏向部で生じるビーム特性の劣化を相殺するためである。このような格子の有効性は同様の格子を採用している、FELIX[2]がFELの発振に成功していることから予想されることである。

S字型格子をアクロマティックにするためには、幾何学的配置に見合った強い四重極磁場が必要となる上、その組み合わせは任意に調整をすることができないため、この部分での何らかの調整作用を加えて電子バンチ径がビームラインに沿って激しく変化することを防ぐことはできず、電子バンチをそのまま発振用アンジュレーター部に導くと、この部分の電子バンチの径を制御することができない。そこで、電子バンチの形状を予め調整するためにアンジュレーターの上流に3個の強力な四重極電磁石を用いてビームウェストの位置を自由に設定できるものとした。

アンジュレーター部を通過した電子バンチは、2個の四重極電磁石で調整された後再度偏向を受けて、水タンク型のビームダンパーに入射する。

またアンジュレーター部を通過した電子ビームは、上流側で用いたものと同じ形状およびパラメータのS字型アクロマティック格子を通過させることによって、加速管の主ビームラインに戻し、再度FELの発振に用いたり、シンクロトロン入射用や陽電子顕微鏡などの各種照射用電子ビームとして有効利用したりすることができるように計画している。この場合、戻された電子バンチの半径は戻し用のS字型アクロマティック格子の強い四重極磁場のために再び激しく変動する状態にあるため、直ちに次のアンジュレーターに導くことはできない。そこで引き続き設置されている四重極電磁石と加速管を含むドリフトスペースの組み合わせによって整形した後に次段のアンジュレーター部に導くものとしている。

2. 反転対称S字型格子

格子設計に当っては、バンチ特性の劣化の原因となる、偏向を含む部分すなわち電子バンチを主加速ビームラインからアンジュレーターノビームラインに平行にずらす反

転対称S字型格子の設計が最も重要である。今回の設計ではこの要請を考慮して、S字格子の偏向角をできる限り小さくするものとし、具体的には22.5degとした。このとき、アンジュレーター内のビームラインは主ビームラインから0.9m平行移動するものとした。S字型格子は、逆向きに配置された偏向電磁石の間に中心対称に3個の四重電磁石を配置したものである。偏向半径は、30, 75, 120, 165MeVの各取り出しエネルギーに対応して、0.5, 0.5, 0.75, 1.0mとした。

一般にバンチを構成する各電子は、位相空間座標値とエネルギー差に応じて格子から異なる影響を受け、その結果としてバンチの長さや構造が変化する。従って、入射部で作られられたバンチ構造とバンチ長を維持するためにはS字型格子はアクロマティックであるだけでなくアイソクロナスでなければならないが、厳密にアイソクロナスな格子を形成するためには最低3個の偏向電磁石が必要である[3]。そこで格子設計に当たって図1に示した2種類の格子を候補として比較検討した。

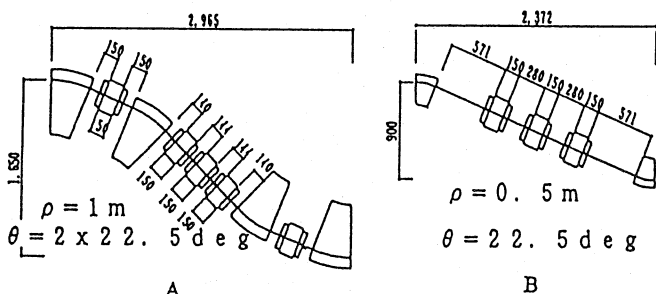


図1 反転対称S字型格子の比較

- A: 4個の22.5deg偏向電磁石を用いたアイソクロナス格子
- B: 2個の22.5deg偏向電磁石を用いたアクロマティック格子

格子Aは4個の22.5deg偏向電磁石を用いたS字型反転対称アイソクロナス格子であり、2個の22.5deg偏向電磁石を用いたBは通常のS字型反転対称アクロマティック格子である。格子パラメーターを求めるために、パラメーターサーベイ機能の強力な格子計算コードDIMAD [5]を用いて表1を得た。

表1 格子特性の比較

Lattice Type	A	B
Total Bending Angle	45 (22.5x2) deg	22.5 deg
Offset	1.65 m	0.9 m
Field Gradient(Ka/Kb/Kc)	(34.0/-40/42.3)m ⁻²	(32.1/-30/*)m ⁻²
Contribution of ΔP/P on Flight Time Difference	0	1.0mm(3.3ps) (ΔP/P=1%)
Total Lattice Planning	Difficult	Possible

各電子が格子を通過する時に受ける影響は一次の範囲で遷移行列を用いて次のように表される。

$$x_i^{out} = \sum_{j=1}^6 R_{ij} x_j^{in} \quad (1)$$

ここに $x_1=x, x_2=x', x_3=y, x_4=y', x_5=l$ (参照電子と対象電子の飛程差)、 $x_6=\Delta P/P$ (参照電子に対する相対運動量偏差) である。なお、 R_{ij} はTRANSPORT[4]の表式に従って物理的次元をもっているものとする。遷移の式(1)を用いると、S字型格子が満たすべき性質は行列要素を用いて次のように表すことができる[4]。

$$\text{アクロマティック} \cdots R_{16}=R_{26}=0 \quad (2)$$

$$\text{アイソクロナス} \cdots R_{61}=R_{62}=0 \quad (3a), R_{66}=0 \quad (3b)$$

また、(2)と(3a)は等価であるから、アイソクロナスな格子は必然的にアクロマティックである[3,4]。なお、電子ビームはy方向には偏向されないため(2),(3)においてy方向の成分を考慮する必要はない。DIMADによって得られた格子Bの遷移行列は次の通りである。

$$R = \begin{pmatrix} 1.20899 & 0.21964 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2.10187 & 1.20899 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.65614 & 3.94337 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.53551 & 2.65614 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0.10013 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

以上の結果より次のことが分る。まず、格子Aを厳密にアイソクロナスにするための四重極磁場は非常に大きく、現実的ではない。実際このパラメーターを用いると電子バンチ径が非現実的に大きくなり、予定しているダクト内径の範囲では電子バンチがS字型格子を通過する解を得ることができなかった。これは、格子Aでは四重極電磁石が5個と多く、上流に配置された調整用四重極電磁石の効果が、電子がS字型格子内の四重極電磁石を一つ通過する毎に間接的になり、最終的に有効なビーム径の抑制が不可能となるからである。次に単純なアクロマティック格子Bでは、加速器系の公称最大エネルギー偏差0.3%のバンチ長さの増加に対する寄与は1.0deg(0.3mm)である。また、格子Bの遷移行列は次の通りである。1個の22.5deg偏向電磁石の R_{66} 成分は0.05007(cm/(ΔP/P)%)であるので、これを(4)の R_{66} 成分0.10013と比較するとこの R_{66} 成分は2個の偏向電磁石の効果を加え合わせたものになっていることが分る。実際、偏向半径ρ及び偏向角θを変えてデータをとると、 R_{66} はρθに比例しており、できるだけ小さなρ及びθを選ぶことが、電子ビームの位相空間内の構造ひいてはその特性を維持するために重要であることが分る。

次に、TRANSPORTを用いて、格子Bを通過する電子ビームのバンチ長さの変化を計算することによって図2を得た。実線は最も極端な場合として長さ0で入射したバンチの長さの変化を示すもので、2個の逆方向の偏向電磁石の影響が相殺し合っていることを示している[6]。

これはバンチ($x \leq 1\text{mm}$, $x' \leq 1\text{mrad}$)中に分布する各電子の軌道が中心軌道からずれることによって起きる効果と考えられる。破線は入射時のバンチの半幅が0.75mmの場合を示しており、この場合も2個の偏向電磁石の効果相殺し合っていることが分る。

また、Bのような格子を用いる場合両端の偏向電磁石の間隔やその間に置く四重極電磁石の位置によらず上に述べた効果や四重極電磁場の強度は実質的に変わらないので、設計が非常に簡単になるという利点がある。

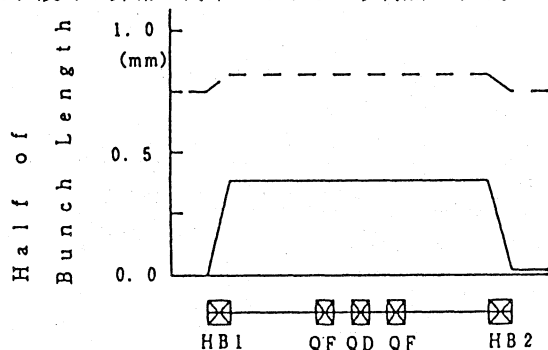


図2 格子Bによるバンチ長の変化
TRANSPORTによる計算結果
入射条件 $x \leq 1\text{mm}$, $x' \leq 1\text{mrad}$
 l (半バンチ長)=0(実数), 0.75mm(確数)

3. 磁気バンチャー

FEL研の加速器では、最終加速段の前に図3に模式的に示したような磁気バンチャーを設置することを計画している。その効果を評価するために、電子の軌道の内電子エネルギーによって変動する成分(5)から、エネルギーに依存するパラメーター ρ による差分をとると(6)を得る。

$$l = 40A + 2AB = 4\rho \sin^{-1}(L/\rho) + 2\lambda \sqrt{1 - (L/\rho)^2} \quad (5)$$

$$\Delta l = -(L/\rho)^3 (2\lambda/L + 4/3) (\Delta\rho/\rho) \quad (6)$$

これに代表値 $\theta = 30\text{deg}$ 、 $\lambda = 0.15\text{m}$ を用いると電子バンチがこの磁気バンチャーを通過することによって受ける位相圧縮は(7)のように評価できる。

$$\Delta\phi = -4.3(\Delta\rho/\rho)\% \quad (\text{for } \theta = 30\text{ deg}) \quad (7)$$

エネルギー偏差 $\Delta P/P (= -\Delta\rho/\rho)$ を0.3%とすると、これは1.3degの位相圧縮効果があることを示している。このような効果は、一度アンジュレーターを通過してエネルギー偏差が増大したビームのエネルギーを再度圧縮する際に特に有効である。また、この磁気バンチャーは、偏向角を0degから30degまで任意に変えられるので、エネ

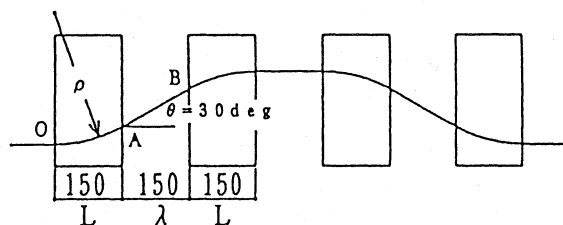


図3 磁気バンチャーの形状

ルギー偏差以外の他の特性をあわせてみながら最適の運転パラメーターを選ぶことができる。

4. 格子計算

今回の格子設計の妥当性を検証するためにMAGICを用いてビームライン全体の格子計算を行った。計算の対称としたビームラインは、バンチャー出口から最終ビームダンプに至るもので、その間に30MeV赤外用アンジュレーター、120MeV可視用アンジュレーター及びそのための4カ所のS字型格子を含み、考えられる運転の中でもっとも複雑なものに分類される。出発点の条件は $E=5\text{MeV}$, $x=y=1\text{mm}$, $x'=y'=1\text{mrad}$ とした。これは規格化エミッタンス $10\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ で $\beta_x = \beta_y = 1\text{m}$ とすることに対応する。

図4(a)は、FEL研の加速器系の全体配置図に、計算に用いたビームラインをA~Lで示したものである。図4(b)がS字型格子を含む30MeV赤外用アンジュレーター近傍の詳細を示したものである。図4(c)は電子バンチの半径(1 σ)を表わしている。同図ではS字型格子部(B~C)でビーム半径が激しく変化し、これをCの直後のトリプレットで調整しアンジュレーター中央部にビームウェストを形成している。次に、電子バンチ半径は戻り用のS字型格子部(D~E)で更に激しく変化するが、Eの直後の5個の四重極電磁石でかなり改善され、それに引き続く加速管(ドリフトスペースとして扱っている)と四重極電磁石によって完全に改善され、次の可視用アンジュレーター部でビームウェストを形成している。ビームウェストでのバンチ半径は、30MeV赤外用アンジュレーターで0.5mm、120MeV可視用アンジュレーターで0.15mmである。

5. 装置設計と現状

ビームダクトは外径/内径がそれぞれ38.1/35.1mmのステンレス管とし、それに対応して偏向電磁石は磁極間隔42mm、磁束密度は公称ビームエネルギーに対応して0.2~0.55Tの範囲であるが、短パルス高エネルギー運転を可能とするため最終部分で1T以上としている。四重極電磁石はボア径43mm、である。更に、S字型格子の偏向電磁石は偏向半径方向にスライド式に移動できる構造として、必要に応じて、電子ビームを直進させる場合に残留磁場の影響を避けるために偏向電磁石をビームラインから完全に退避させたり、スライド量を加減して磁場のしみ出しによる軌道のずれを修正したりできるようにしている。

現在、本加速器系は線型加速器の設計を完了し、製作を開始している。それ以外のビームラインについては、30, 75MeVの2系統については設計を終え今年度中に製作する予定であり、残りの部分は来年度中に製作する予定である。

参考文献

[1] 冨増他、FEL研リニアックと赤外-紫外域FEL施設、
本報文集。
[2] P. W. van Amersfoort, et al., Nucl. Instr. Meth.,
A304 (1991) 173 (Proc. 12th Int. FEL Conf., Paris,
France,1990).
(International Publishers, New York, 1965).

[3] K. G. Steffen, High Energy Beam Optics
[4] K. L. Brown, et al., TRANSPORT A Computer
Program for Designing Charged Particle Beam
Transport System, CERN80-04 (1980) 164.
[5] R. V. Servranckx, et al., Users Guide to the Program
DIMAD, SLAC Report 285 UG-28(a), 1985.
[6] M. Berz, Nucl. Instr. Meth., A294 (1990) 106.

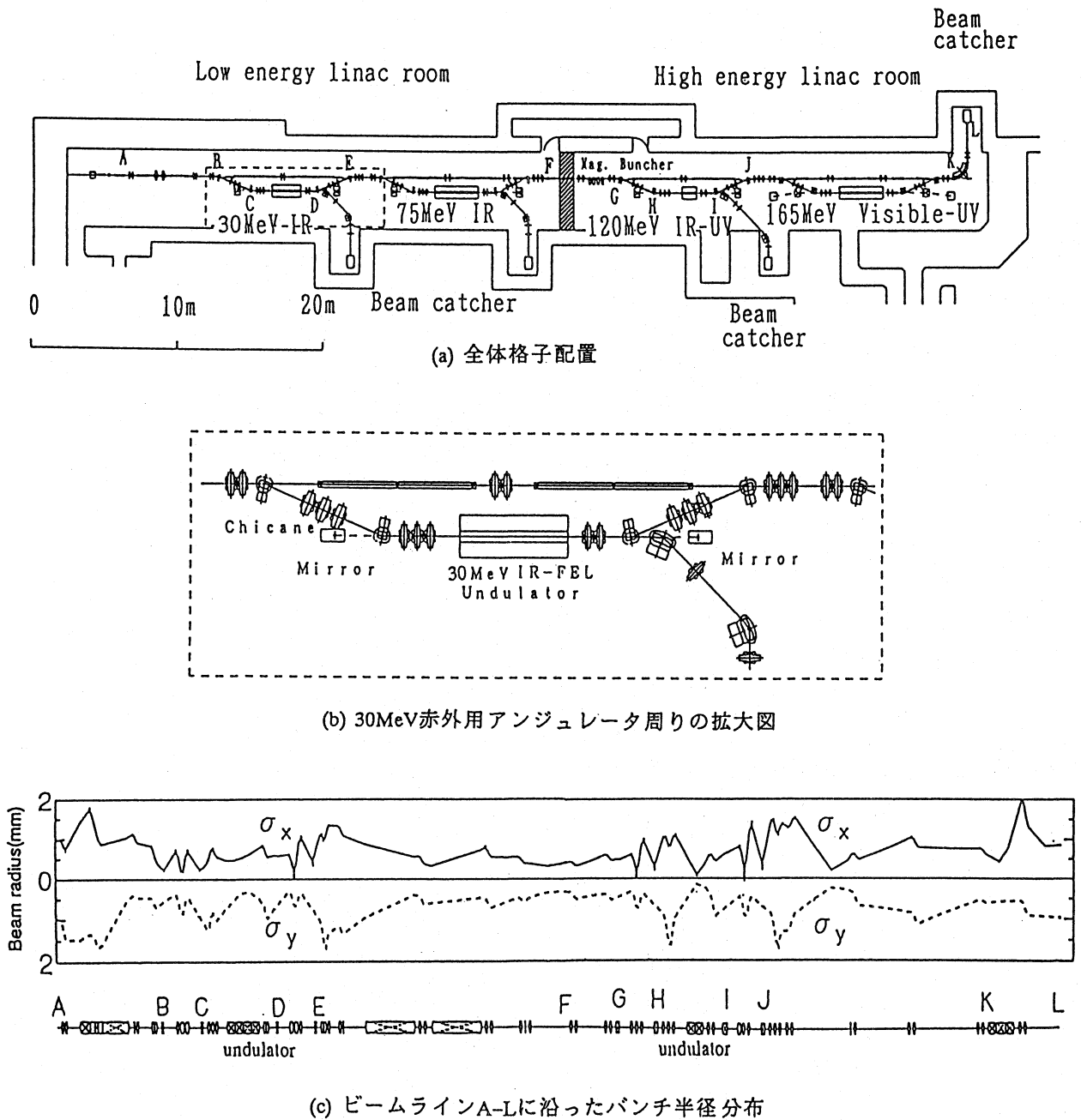


図4 全体格子配置とバンチ半径の分布