

3.8 挿入光源

3.8.1 放射光源としての ERL パラメータ

挿入光源の立場からは、ERL は非常に性能の良い電子ビームの供給源である。光源加速器としての ERL は電子ビームを 1 回だけ使用することによって、放射励起によるエミッタンス (ε)・エネルギー拡がり (σ_E/E) の劣化 (増加) を極限まで小さく抑えることができる。従って、電子ビーム源の性能を十分に良いものにすることができれば、通常のリニアック型光源の特性 (エミッタンス, エネルギー拡がりともに加速エネルギーに逆比例して減少する) によって、我々が利用したい数 GeV 領域の電子ビームから回折限界に達した放射光を得ることが可能になると考えられる。

しかしながら、現状では数十 MeV の試験加速器において ERL の原理的利点が確認されている状況にとどまっている。今後、数百 MeV から 1 GeV クラスの ERL において、真に有効なエネルギー回収が可能であるか、電子ビームの ε および σ_E/E の劣化は無視できるほど小さくできるか、といった原理検証実験 (または、それらを可能にする研究開発) がなされなければならない。

一方で、将来計画の立場からは ERL が可能な道具立てとなった場合にどのような光源が実現できるかを検討しておくことは非常に重要であろう。ここでは数 keV 領域の回折限界光を得るために必要な電子源の性能として、規格化エミッタンス $\varepsilon_n = \varepsilon\gamma = 0.1 \times 10^{-6} \text{ m}$, および 1 GeV におけるエネルギー拡がり $\sigma_E/E = 2 \times 10^{-4}$ が実現されたもの (ともに電流値 100 mA において) として光源性能を検討することにしたい。

現状では、ERL の加速器性能は確定していないので、ここでは検討中の目標パラメータを用いて検討を行うことにする。表 3.18 に PF-ERL 計画における光源パラメータを示した。ここでエミッタンスとエネルギー拡がりは、上記の電子源性能が達成され、それが理想的に 5 GeV まで加速された場合に達成される値である。現在の加速器案では 12 箇所 (標準長 5 m) アンジュレータ用直線部, 4 箇所 (中尺 30 m) アンジュレータ用直線部, および 1 箇所 (長尺 200 m) アンジュレータ用直線部が用意されている。この ERL 光源がどのようなものかを示すために図 3.60 に標準長アンジュレータから得られる放射のスペクトルを掲げた。基本波で数 keV 以上の放射エネルギーをカバーするために、1.6 cm から 4.0 cm の比較的短い周期長が必要になる。挿入光源の立場からは 7 GeV 程度のビームエネルギーが望ましいが、加速器建設のコストをより現実的なものにするために、現状では 5 GeV を最高ビームエネルギーとして検討を行っている。

表 3.18: PF-ERL 計画の光源パラメータ

Beam energy	5 GeV
Beam current	100 mA
Normalized emittance	0.1 μm
Horizontal emittance	10 pm @5 GeV
Vertical emittance	10 pm @5 GeV
Energy spread	4×10^{-5}
N^*	6250 ($k=1$), 2083 ($k=3$)
Bunch length	1 ps ~ 100 fs
Undulators	Standard (5 m) \times 12 Medium (30 m) \times 4 Long (200 m) \times 1

また、アンジュレータから得られる放射のバンド幅は周期数 N に逆比例して減少するため、多周期（長尺）アンジュレータのスペクトルは非常に鋭いものになるが、この効果は電子ビームの σ_E/E によって鈍化する。有限の σ_E/E に対して、 N を増やすことによってバンド幅を減少させることのできる臨界値は、

$$N^* = (4k\sigma_E/E)^{-1} \quad (3.65)$$

で与えられ、 N^* 以上ではスペクトル幅はほとんど変わらない。各図（および表 3.18）の中には $\sigma_E/E = 4 \times 10^{-5}$ の場合の N^* を示してある。

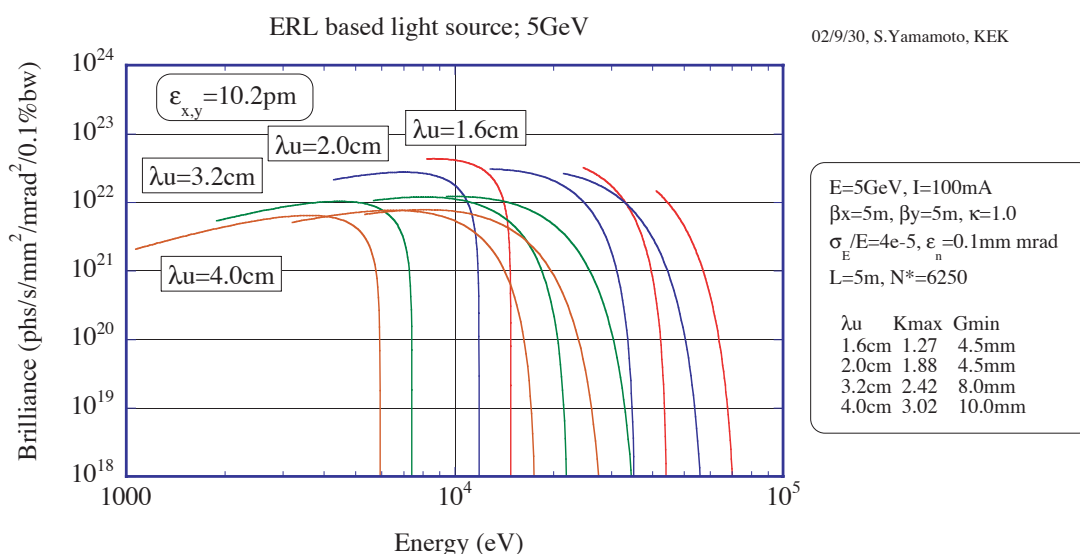


図 3.60: PF-ERL 計画における標準長アンジュレータの放射特性。

3.8.2 アンジュレータ建設の Standardization

本計画では同様の長さで異なる性能のアンジュレータを、長さの総和として 400 m 程度 ($380\text{m} = 5\text{m} \times 12 + 30\text{m} \times 4 + 200\text{m} \times 1$) 製作しなければならない。それらを各々独立に建設するのは経費面から見ても、立ち上げ・運転のマンパワーの面から見ても不経済である。このことから生じる諸問題を解決するために、我々は挿入光源本体をいくつかのコンポーネントに分割し規格化する方針を採用することにした。具体的には、

- 約 5 m 長のユニットアンジュレータ（各ユニットは、共通ベース上に設置される、約 1.7 m 長の規格化された 3 台のサブユニットアンジュレータにより構成される）を建設し、各ユニットが干渉することなくアンジュレータ磁石列の同軸性・平行性を達成できるようにすること、

- および、各ユニットアンジュレータに異なる周期長を持つ磁石列を装着する方式を確立すること、

である。30 m 長および 200 m 長の長尺アンジュレータについては、この 5 m 長アンジュレータを連結することにより同一方式で建設可能となる。

このような方針は、KEK において我々が TRISTAN-MR を用いた超高輝度放射光計画を実現しようとした時に提案したものであり、現在稼働中の第 3 世代光源においても広く採用されている。今後本計画 R & D において、我々は以下の技術的目標を設定して上記問題点の解決を図るべきである。

A) ユニットアンジュレータ内の精度・剛性：

各ユニットがアンジュレータ単体として十分な剛性・精度を持つことは、この方式の挿入光源製作において基本的に重要な問題である。アンジュレータにおいて特に重要な部分である磁石取り付け架台の剛性を最適化して磁石の引付け力による歪みを許容値内に抑えるために、架台にかかる最大の引力を見極めなければならない。

本計画の光源を単なる試験機ではなく、多くの利用者をもつ施設ととらえるならば、利用者に提供する放射の波長選択性を確保するためにアンジュレータギャップは可動なものとしなければならない（永久磁石を採用する場合）。したがって、上記の精度・剛性はギャップ可変アンジュレータとして達成すべきものであるが、ERL が基本的に一回通過型であることを考慮してギャップの駆動方向を従来の鉛直方向ではなく水平方向とする方式も検討に値する。

B) ユニットアンジュレータ間の規格化：

各ユニット相互の同一性・干渉性が必要である。各ユニットアンジュレータは、機械的に磁石ギャップの送りまで同一となるように製作し、さらに、これを共通ベース上に設置する時に各ユニット間に干渉が生じないようにする技術を確立しなければならない。

C) 磁石の取り付け法：

同一のアンジュレータ機械部に異なる λ_u の磁石を取り付ける方法を確立しなければならない（項目 A と関連）。具体的には磁石取り付け架台（全ての可能な λ_u に対応する取り付け穴を設けることはできない）と磁石列（ λ_u に対応した取り付け穴が必要）の間に λ_u に対応したスペーサーを装着する。

D) アライメント法：

ユニットアンジュレータの共通ベース上に各サブユニットを同軸性・干渉性を保ちつつ、十分な精度で配置する方法を確立しなければならない（項目 B と関連）。さらに、ユニットアンジュレータを複数配置し、長尺アンジュレータとする方法の確立をめざす。

さらに、アンジュレータの規格化とは別の問題であるが、加速器本体からの独立性を高め、挿入光源運転の自由度をできる限り大きくするために、次の事項が重要である。

E) 磁石列の片持ち支持法の採用：

挿入光源本体の構造を C の字型にすることによる磁石列の片持ち支持方式の採用は、加速器本体の真空を破らずに挿入光源本体の現場設置・取り外しを可能にするという点で、非常に大きな利点を持っている。しかしこの方法を採用すると、磁石列の駆動軸摺動面に要求されるクリアランスのために、磁石列間の吸引力が高い（狭いギャップ時の）場合には、対向する磁石面間の平行性を確保することが困難になる。この問題を解決するために、これまで我々は、

- 特殊な荷重 - ストローク関係を持つパネシステム（これによって磁石引力を相殺して磁石面間の平行性を保つ）の開発，
- および，従来型より精度の高い摺動機構の開発等，

を行ってきた。今後もこの方向に沿った技術開発が重要である。

F) In-vacuum 方式への対応可能性：

大型真空槽，および磁石列のビーム軸方向摺動機構の設置を考慮した本体設計とする。AR に設置した 3 台の真空封止型アンジュレータの成功において示されているように，in-vacuum 方式を採用できることによって得られる利点は，挿入光源を設置すべき加速器の運転上の自由度が，いわゆる通常型挿入光源設置の場合に比べて著しく増加するという点である。これは，この方式で磁石列を直接加速器の真空内に持ち込むことによって電子ビームに対する開口（ギャップ）を自由に設定でき，放射光を利用する場合のみ非常に狭いギャップを使用し，入射やマシンスタディ等広い開口が要求される場合にはギャップを開けばよいからである。ERL のように超低エミッタンスビームを作るために，非常に高度かつ繊細な加速器調整および運転が要求される場合には，この方式の必要性はますます重要になる。

また，本計画の利用実験が最も重視する放射のエネルギー領域をカバーするためには，加速エネルギーが 5 GeV の場合， $\lambda_u = 1 \sim 2$ cm の磁場周期長の採用が必要になる。このような短周期磁場を必要な強度で達成するためにも in-vacuum 方式の採用が重要になる。

G) 磁場測定調整法の開発

磁場測定法は基本的に現行の高精度ホール素子によるビームパス上の精密測定を応用したものとなる。しかし，現状でも使用されている 1 点毎の磁場測定の他に，長尺アンジュレータへの応用を目指した“フライ方式”の開発が今後の課題となる。この際の測定精度は，ホール素子の位置決め精度・測定中の温度効果等を含めて全体として， 10^{-4} から 10^{-5} である。

一方で，磁場調整の目標精度は，アンジュレータ各極毎の 1 次積分磁場のばらつきで表現して 10^{-3} 程度であるが，アンジュレータ放射の強度を最適化するには同じく各極毎の光学位相のばらつきを最適化することの方が効果的である：この目標値は位相のばらつきとして 3 度程度。さらに，一電子からの放射（波長 λ ）が理想的な空間コヒーレンス（放射の角度発散 σ'_p ，および光源サイズ σ_p ）を持つために，電子軌道が満たすべき，サイン型軌道包絡線の折れ曲がり角度 θ_{def} ，および段差 δ に対する条件はアンジュレータ長を L として以下のように与えられる。

$$\theta_{def} \leq \sigma'_p = \sqrt{\frac{\lambda}{L}} \quad \text{及び} \quad \delta \leq \sigma_p = \frac{\sqrt{\lambda L}}{4\pi} \quad (3.66)$$

アンジュレータ放射の 1 次光で 12 keV ($\lambda=1 \text{ \AA}$) をカバーすることを目標にする場合， θ_{def} および δ の許容値は，各々 $4.5 \mu\text{rad}$ および $1.8 \mu\text{m}$ という非常に小さな値になる。

3.8.3 回折限界光の生成（放射光スペクトルの紹介）

電子ビームのエミッタンスを極限まで減少させ，目標の放射の波長 λ に対して次式を満足する電子ビームからは空間的（または横方向）に回折限界に達した放射を生成することが可能になる。

$$\varepsilon_{x,y} \leq \frac{\lambda}{4\pi} \quad (3.67)$$

ここでは、周期長 1.6 cm のアンジュレータの場合について放射スペクトルを紹介する（図 3.61 および図 3.62）。ここで示した例では基本波のエネルギーが 9.9 keV となるように、偏向定数を選定してある（ $K=1.0$ ）。したがって上式より 10 pm よりも小さなエミッタンスに対しては基本波で回折限界に達する（図 3.61）。現在の加速器設計で 5 GeV における実エミッタンスが 10 pm となるよう規格化エミッタンスを選定してある理由はここにある。しかし、3 次高調波に対しては回折限界に達するエミッタンスはさらに小さくなる（ $\varepsilon_{x,y} = 3.3$ pm：図 3.62）。

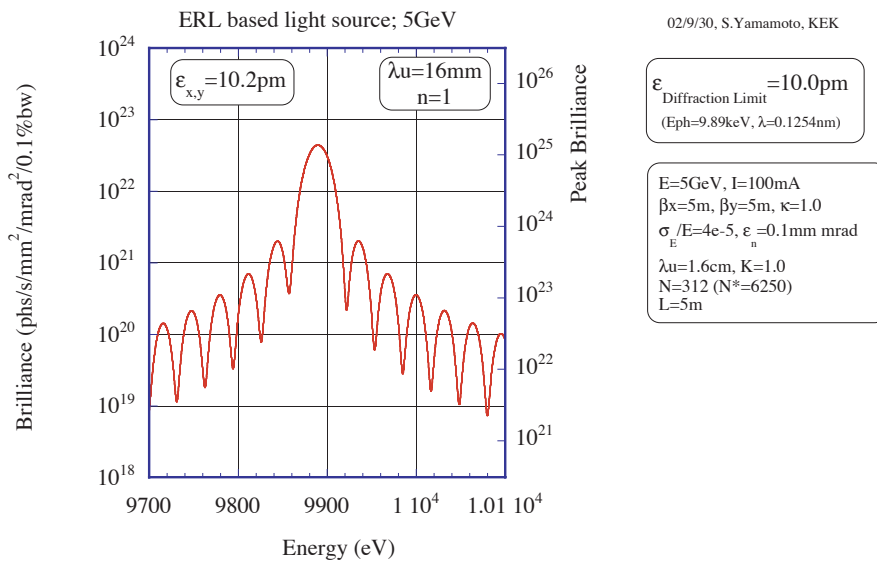
3.8.4 長尺アンジュレータの有効性

アンジュレータ放射の輝度は、 $\sigma_E/E=0$ かつ横方向（ x および y 方向）エミッタンスが回折限界に達している場合には、アンジュレータ周期数 N^2 に比例して増加する。輝度の追求は、長い直線部に設置された周期数の大きなアンジュレータによってなされることになる。しかし、回折限界から遠い場合は、依存性は低下して単に N に比例して増加するのみとなる。さらに有限の σ_E/E の効果によって輝度の増強は妨げられる。この状況を本計画の 200 m 長直線部において示したのが図 3.63 および 3.64 である：図 3.63 ではアンジュレータの長さによらず一定の β 関数（ $\beta_x = \beta_y = 100$ m：その他 $\varepsilon_{x,y} = 10$ pm, $\kappa=1.0$, $\sigma_E/E = 4 \times 10^{-5}$, $\lambda_u = 2.0$ cm, $K=1.0$ ）を仮定した。また、図 3.64 では β 関数には想定したアンジュレータの長さに適したものを仮定した。いずれにしても、200 m のアンジュレータからは 3×10^{26} (phs/s/mm²/mrad²/0.1%bandwidth) に達する peak brilliance が得られる（ここでは 1 psec のバンチ長を仮定した：100 mA, 1.3 GHz の CW 動作時）。これは 6 を越える光子縮退度に相当し新しい光の科学が進展することが期待される。

ERL 光源ではエミッタンス条件が回折限界に近い場合、 N が小さい場合にはほぼ N^2 則に近い輝度の増強が得られる。しかし、 N が大きくなると N^2 則からのずれが顕著になる。これは有限のエネルギー拡がりのために、放射のバンド幅の減少が $N = N^* = (4k\sigma_E/E)^{-1}$ で頭打ちとなるためである。

山本樹（KEK・PF）
平松成範（KEK・加速器）

(a)



(b)

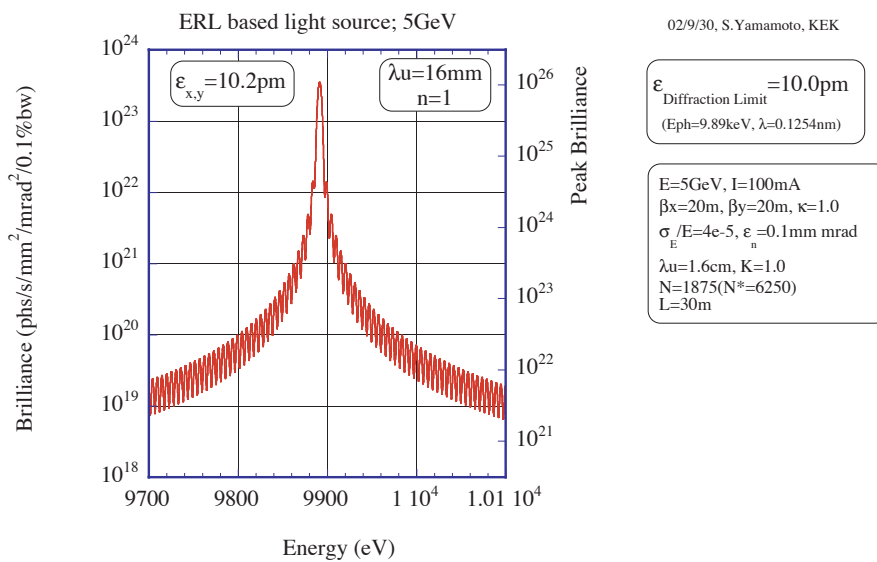
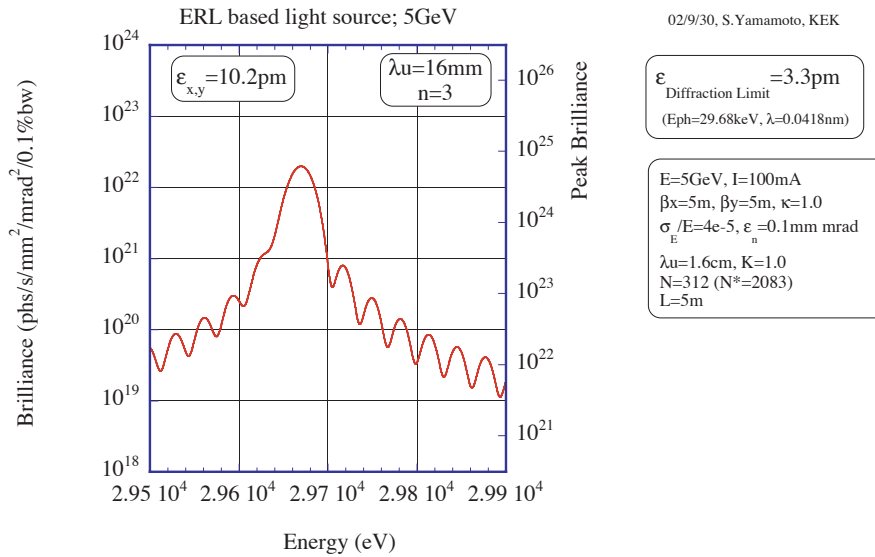


図 3.61: 周期長 1.6 cm のアンジュレータからのスペクトル (基本波 $k=1$): 5 m アンジュレータ (図 3.61(a)) および 30m アンジュレータ (図 3.61(b))

(a)



(b)

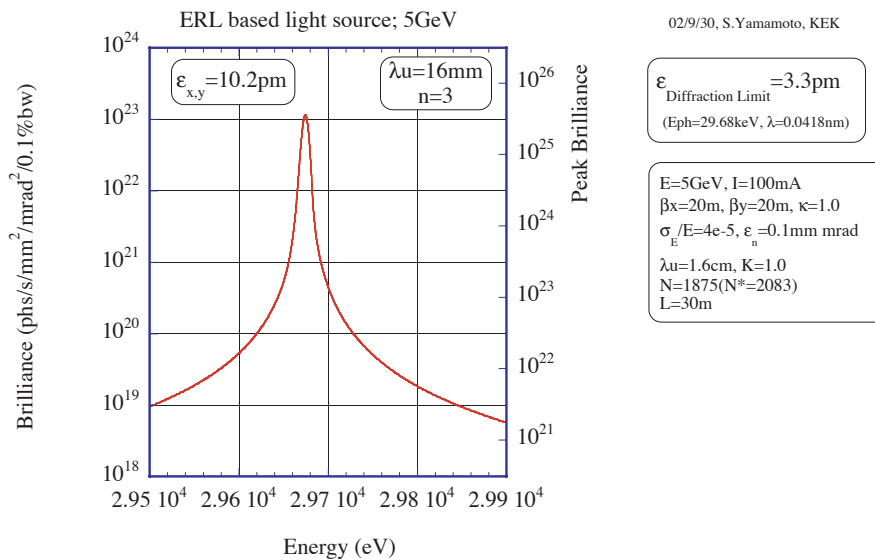


図 3.62: 周期長 1.6 cm のアンジュレータからのスペクトル (3 次高調波 $k=3$): 5m アンジュレータ (図 3.62(a)) および 30m アンジュレータ (図 3.62(b))。

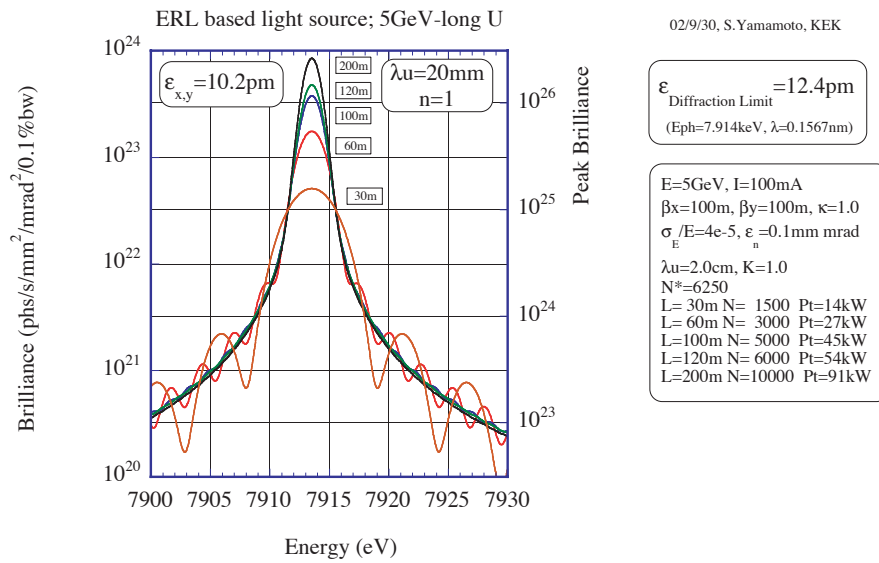


図 3.63: PF-ERL 光源長直線部におけるアンジュレータ長と輝度の関係 ($\beta_x = \beta_y = 100\text{ m}$ の場合)。

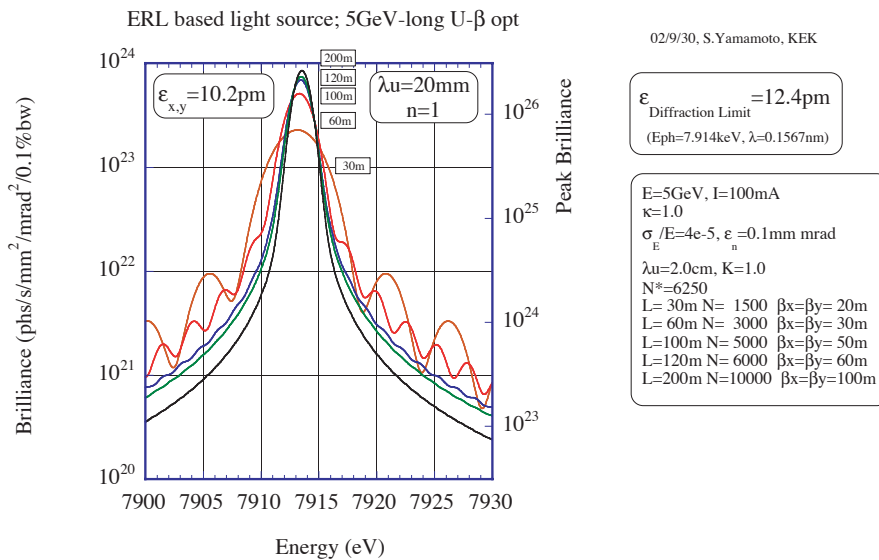


図 3.64: PF-ERL 光源長直線部におけるアンジュレータ長と輝度の関係 (各アンジュレータに最適化した β 関数を用いる場合)。