

# ERLドライブFEL

ー将来のブートストラップERLに向けてー

OHO'08 高エネルギー加速器セミナー  
高エネルギー加速器研究機構  
平松成範

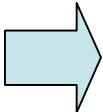
1. はじめに
2. FEL 発振器
3. ERL ビームで駆動する FEL 発振器
4. ブートストラップ ERL
5. おわりに

## 1. はじめに

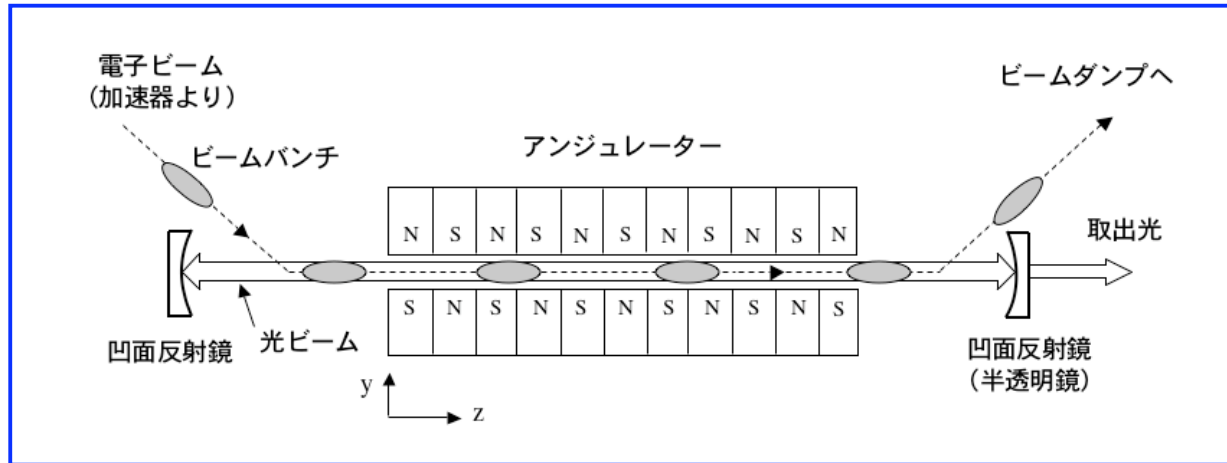
### ERL の性能は電子銃で決まる

- ・短バンチ (1-3 psec)、低エミッタンスビーム ( $\varepsilon_n=0.1-1 \text{ mm}\cdot\text{mr}$ ) 発生のため、フォトカソード・DC 電子銃開発
- ・フォトカソード用レーザーの開発が最重要課題  
(波長  $\sim 750 \text{ nm}$ 、繰り返し 1.3 GHz、平均出力  $>16 \text{ W}$ )
- ・金属フォトカソード開発には波長  $\sim 200 \text{ nm}$ 、出力  $> \text{kW}$  ( $\text{QE} \sim 10^{-4}$ ) のレーザーが必要

### 自由電子レーザー (Free Electron Laser : FEL) の利用

- 
- ・可視光 FEL は既に実用レベル (出力パワー、安定性)
  - ・ERL ビームで駆動すれば自然にビーム同期  
→ クローズドループ型 ERL (ブートストラップ ERL) の可能性
  - ・出力パワーは 1-10 kW (最大  $\sim 100 \text{ kW}$ ) オーダーある  
非線形結晶 (BBO ( $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ ) etc) による波長短縮 (周波数逡倍) を行っても十分なパワーが期待できる → 200 nm、 $>1 \text{ kW}$  の可能性

## 2. FEL 発振器 (自由電子レーザー発振器)



アンジュレーター磁場 (軸上)

$$B_U = B_U \sin(2\pi z / \lambda_U) \cdot e_y$$

FEL 共鳴条件

$$\lambda_L = \frac{\lambda_U}{2\gamma_0^2} \left( 1 + \frac{K^2}{2} \right)$$

$$K = e\lambda_U B_U / 2\pi m c^2$$

FEL ピアスパラメータ (ゲインパラメータ)

$$\rho = \frac{F^{1/3}}{\gamma} \left( \frac{A_{JJ} K}{2\sqrt{2} r_b k_U} \right)^{2/3} \left( \frac{I}{I_A} \right)^{1/3}$$

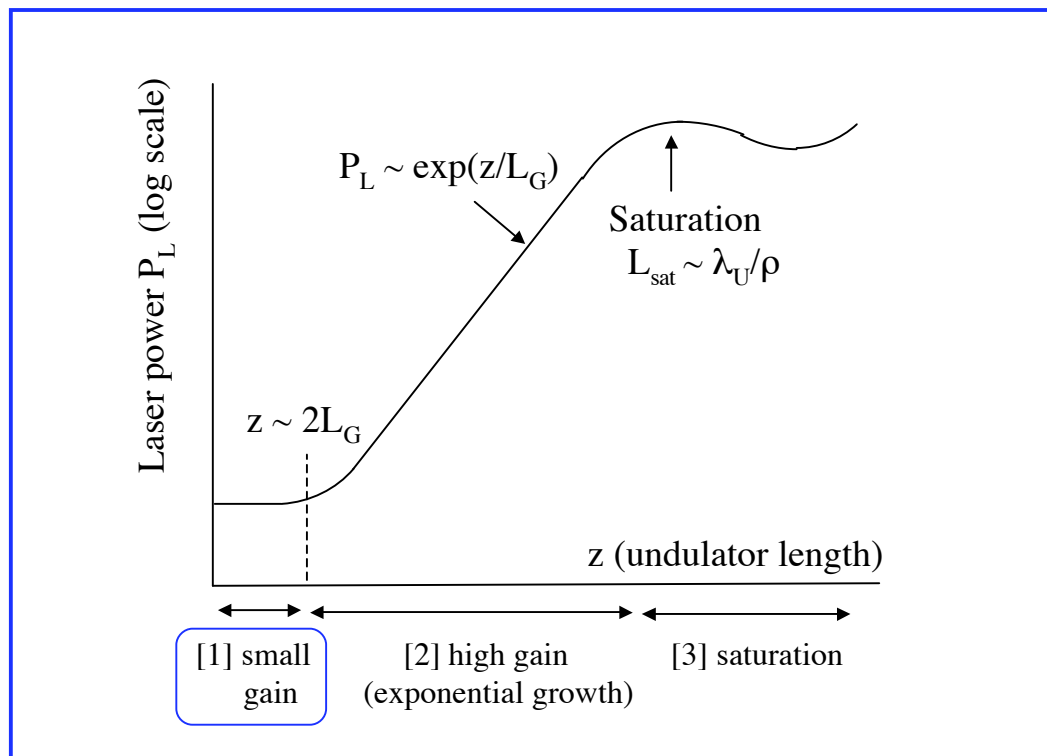
$$I = Q_b / \sqrt{2\pi\sigma_t} \quad \text{ビーム電流 (バンチピーク)}$$

$$I_A = 17 \text{ kA}$$

$$A_{JJ} = J_0(\xi) - J_1(\xi), \quad \xi = \frac{(K/2)^2}{1 + K^2/2}$$

$$(A_{JJ} = 1 \text{ 円偏光アンジュレーター})$$

## アンジュレータ内でのレーザーの成長（共鳴条件下）



$$L_G = \lambda_U / (2\sqrt{3}\pi\rho) \quad \text{ゲイン長}$$

$$P_L = (P_0/9)\exp(z/L_G) \quad (z > 2L_G)$$

$z < 2L_G$  : スモール・シグナルゲイン領域

## スモール・シグナルゲイン FEL (FEL 発振器)

ワンパスゲイン:  $G(z) = \{P(z) - P(0)\} / P(0)$

$$\frac{\sigma_E}{E} \ll \frac{1}{2N_U}, \quad \varepsilon_n \ll \gamma \frac{\lambda}{4\pi} \quad \text{の場合}$$

$$G = -32(\pi\rho N_U)^3 \frac{d}{d\theta} \left( \frac{\sin\theta}{\theta} \right)^2$$

$$\begin{cases} \theta = \frac{1}{2} \lambda_U N_U \Delta k = 2\pi N_U \frac{\gamma - \gamma_0}{\gamma_0} \\ \Delta k = k_U - \frac{\omega/c}{2\gamma^2} \left( 1 + \frac{K^2}{2} \right) \end{cases}$$

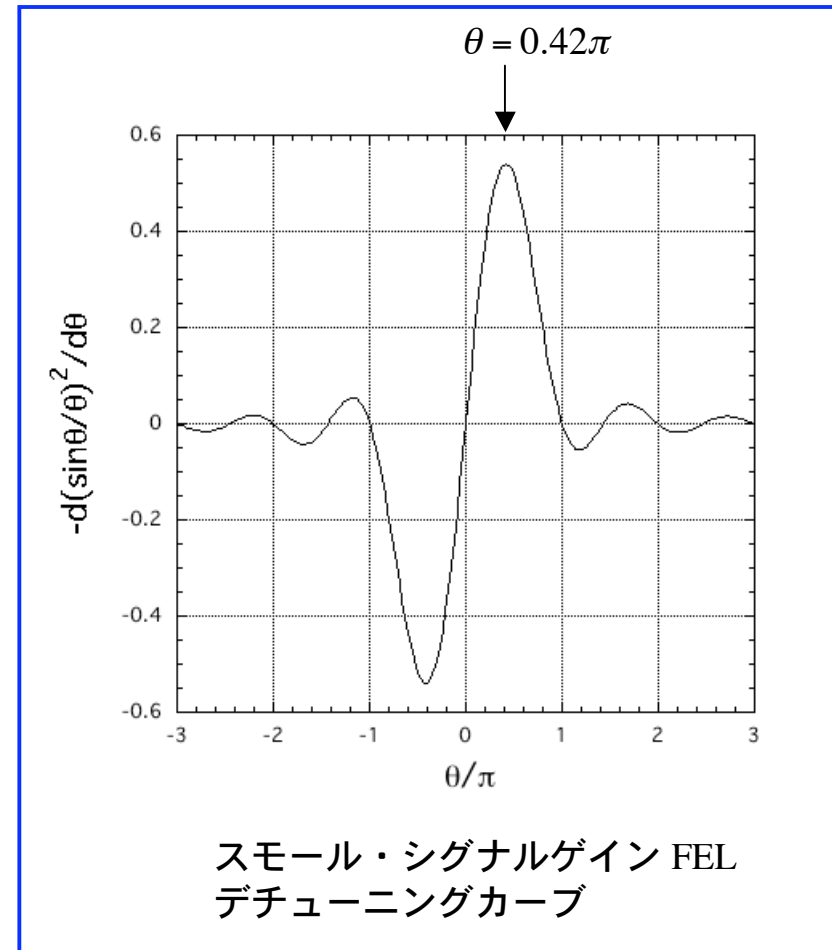
$$\theta = 0.42\pi \rightarrow \frac{\Delta\gamma}{\gamma_0} = \frac{1}{4.76N_U}$$

$$\Rightarrow G_{\max} = 17.3 \times (\pi\rho N_U)^3$$

レーザーパワー:  $P_L = \eta P_b$

$\alpha = 0.21G_{\max}$  (共振器損失含取出効率)

$$\Rightarrow \eta_{\max} = 0.29 / N_U$$



### 3. ERL ビームで駆動する FEL

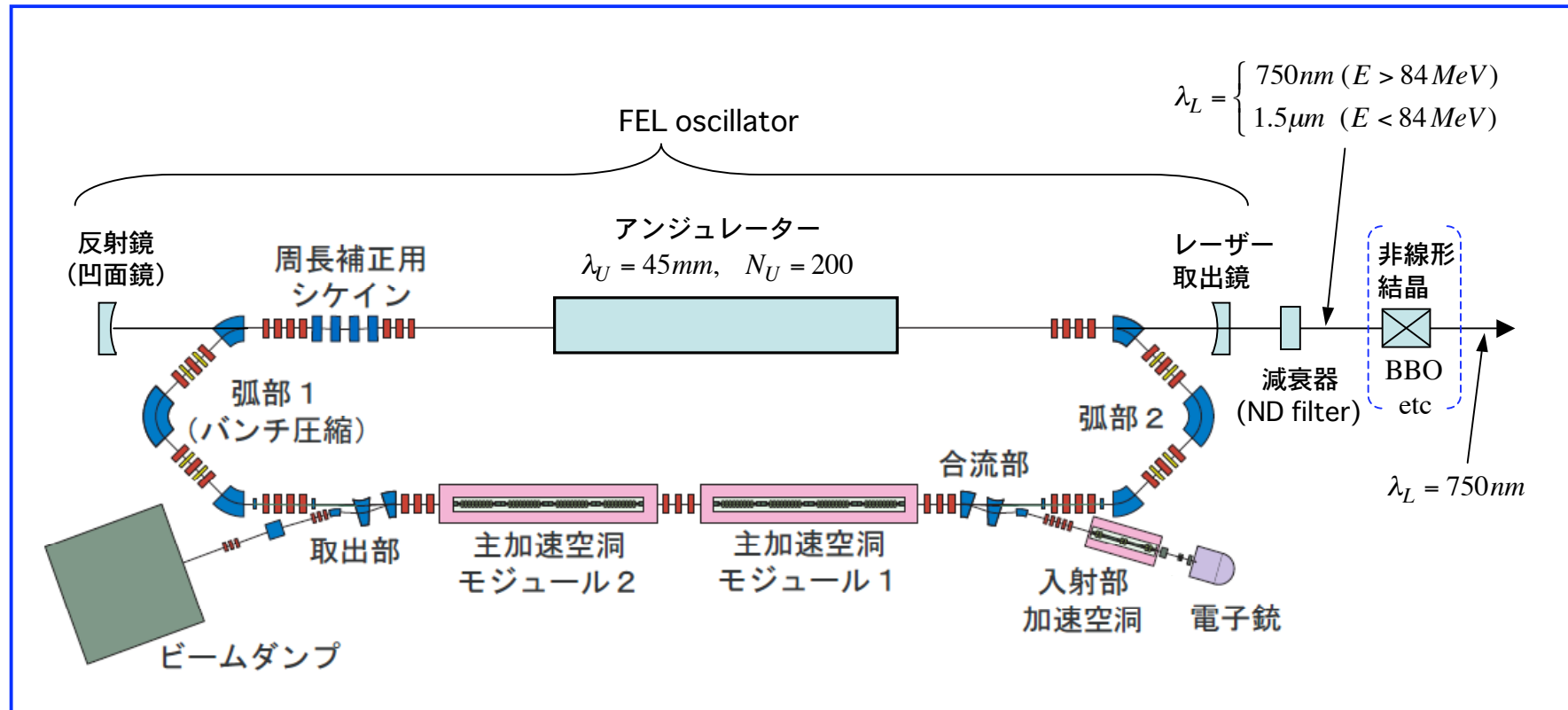
#### コンパクト ERL パラメータ

電子ビーム	
バンチ繰り返し	1.3 GHz
エネルギー $E$	60-200 MeV
エネルギー幅 $\Delta\gamma/\gamma$	$< 3 \times 10^{-4}$
規格化エミッタンス $\varepsilon_n$	0.1-1 mm·mr
バンチ長 $\sigma_t$	1-3 psec
フォトカソード DC 電子銃	
バンチ電荷 $Q_b$	77 pC
レーザー波長 $\lambda_L$	750 nm
レーザー強度 $P_L$	~12 nJ (平均 16 W)
レーザー繰り返し	1.3 GHz

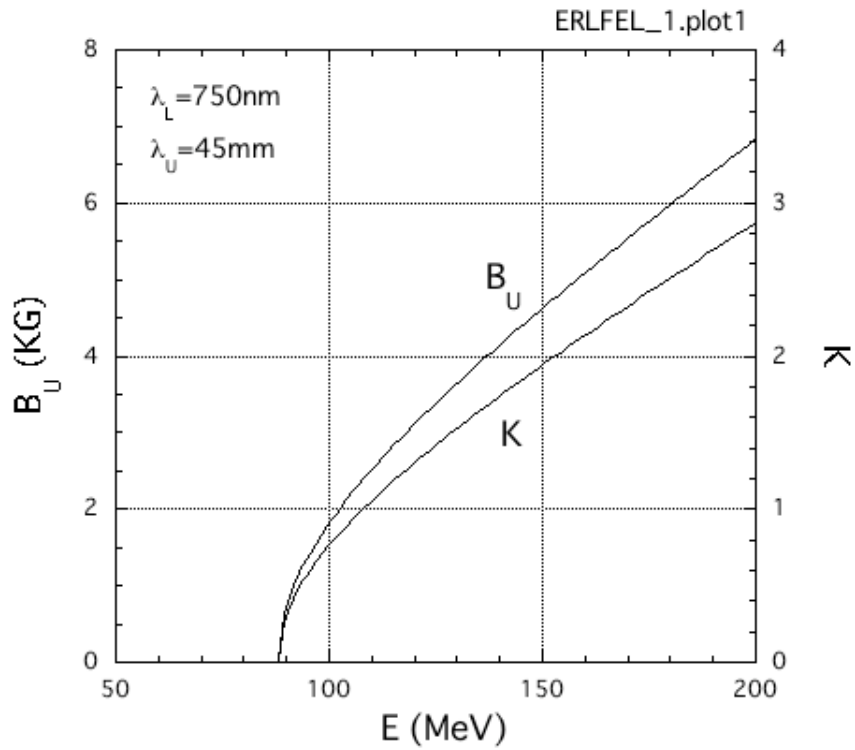


どのような FEL が  
可能か？

# ERL ビームで駆動する FEL 発振器 (1)

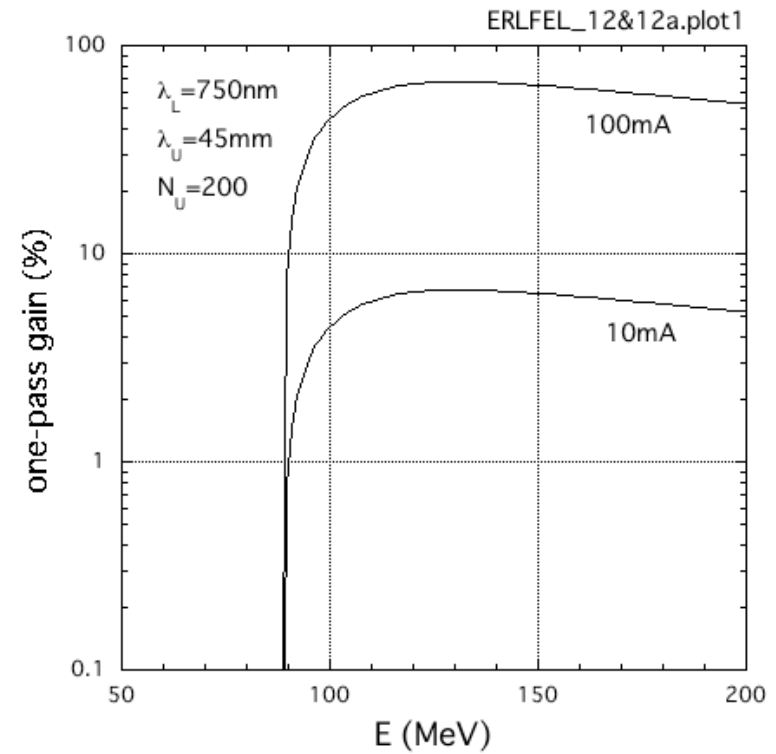


## アンジュレーター磁場 & K 値



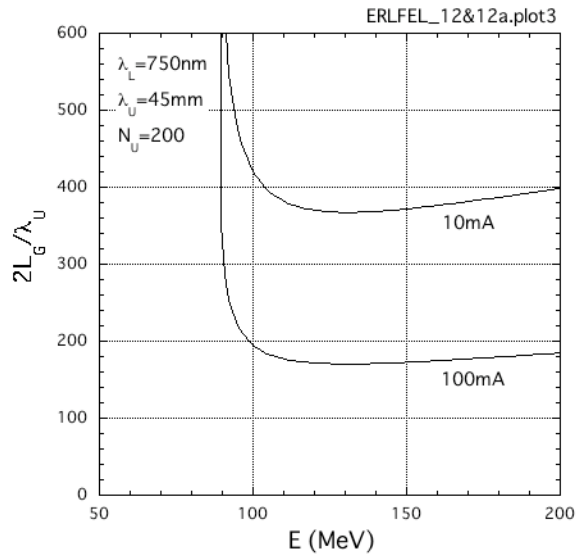
89MeV 以上で発振可

## ワンパスゲイン

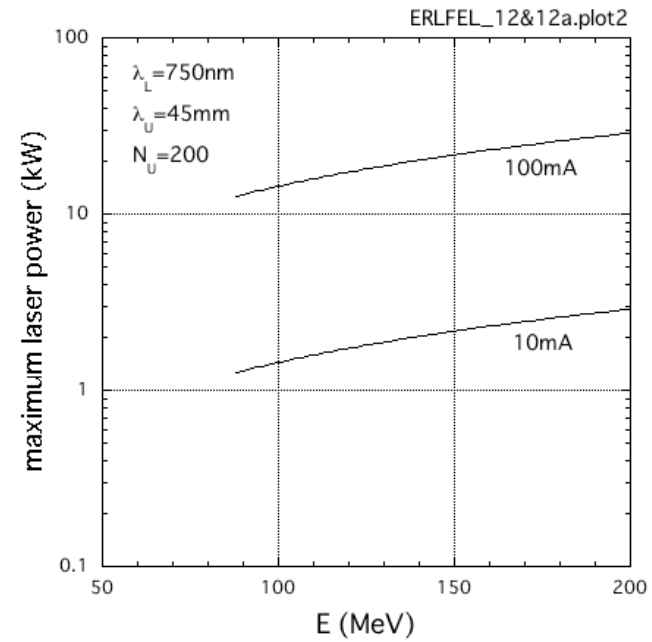




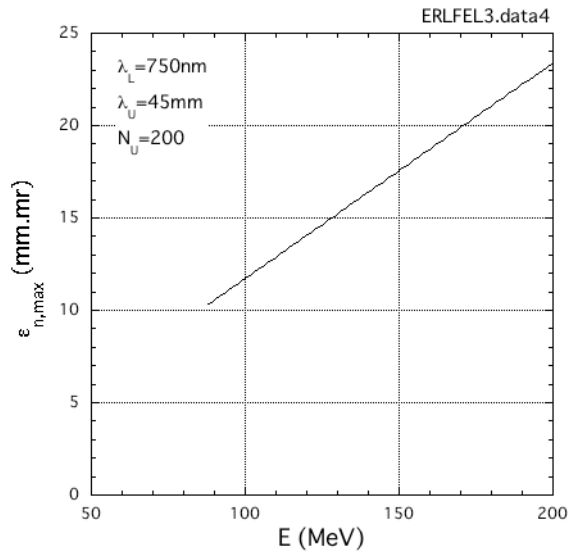
### スモール・シグナルゲイン領域



### 最大取り出し可能パワー



### エミッタンス限界



通常  $\alpha = 0.21G_{max}$  は満たしていない  
 →  $P_{L,max} = \eta_{max} P_b$  の数分の1か？

⇒  $\epsilon_n < 10 \text{ mm} \cdot \text{mr}$  であれば FEL 発振可

## 100 MeV における FEL 発振器

electron beam	
$E$	100 MeV
$\overline{I}_b$	10 / 100mA
$r_b$	0.5 mm (*)
undulator	
$\lambda_U$	45 mm
$N_U$	200
$B_U$	1.86 kG (K=0.781)
$F$	0.1 (*)
laser	
$\lambda_L$	750 nm
$G_{\max}$	4.6 / 46 %
$\overline{P}_L$	1.5 / 15 kW (1.15 / 11.5 $\mu$ J/bunch)

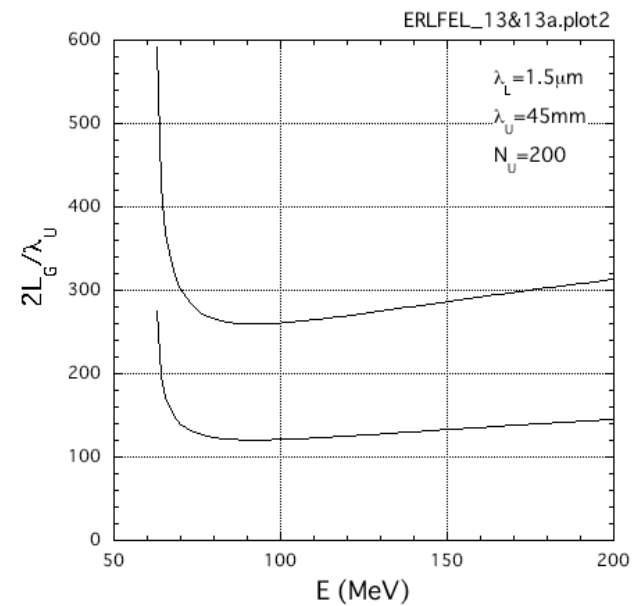
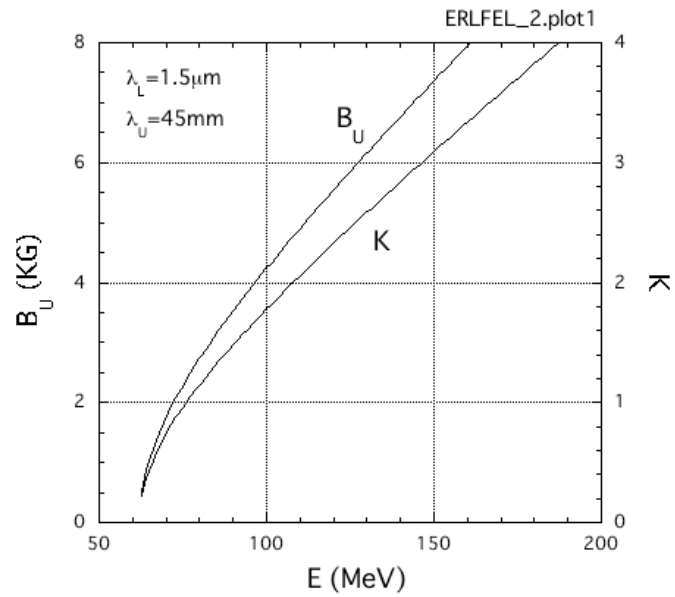
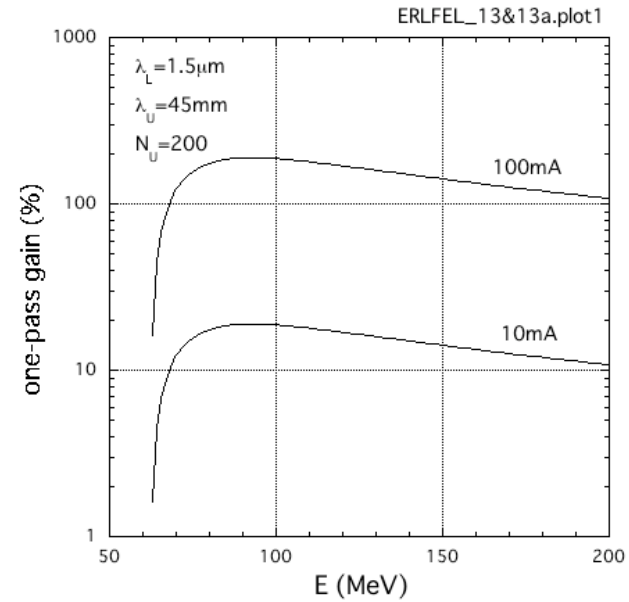
(\*) テキストミスプリント

大出力 → 共振器内パワーが極めて大きい  
 光共振器内レーザーパワー  
 →  $P_{\text{cav}}$  : 100kW ~ MW  
 反射鏡のダメージが問題  
 シミュレーションに基づく詳細な検討  
 が必要

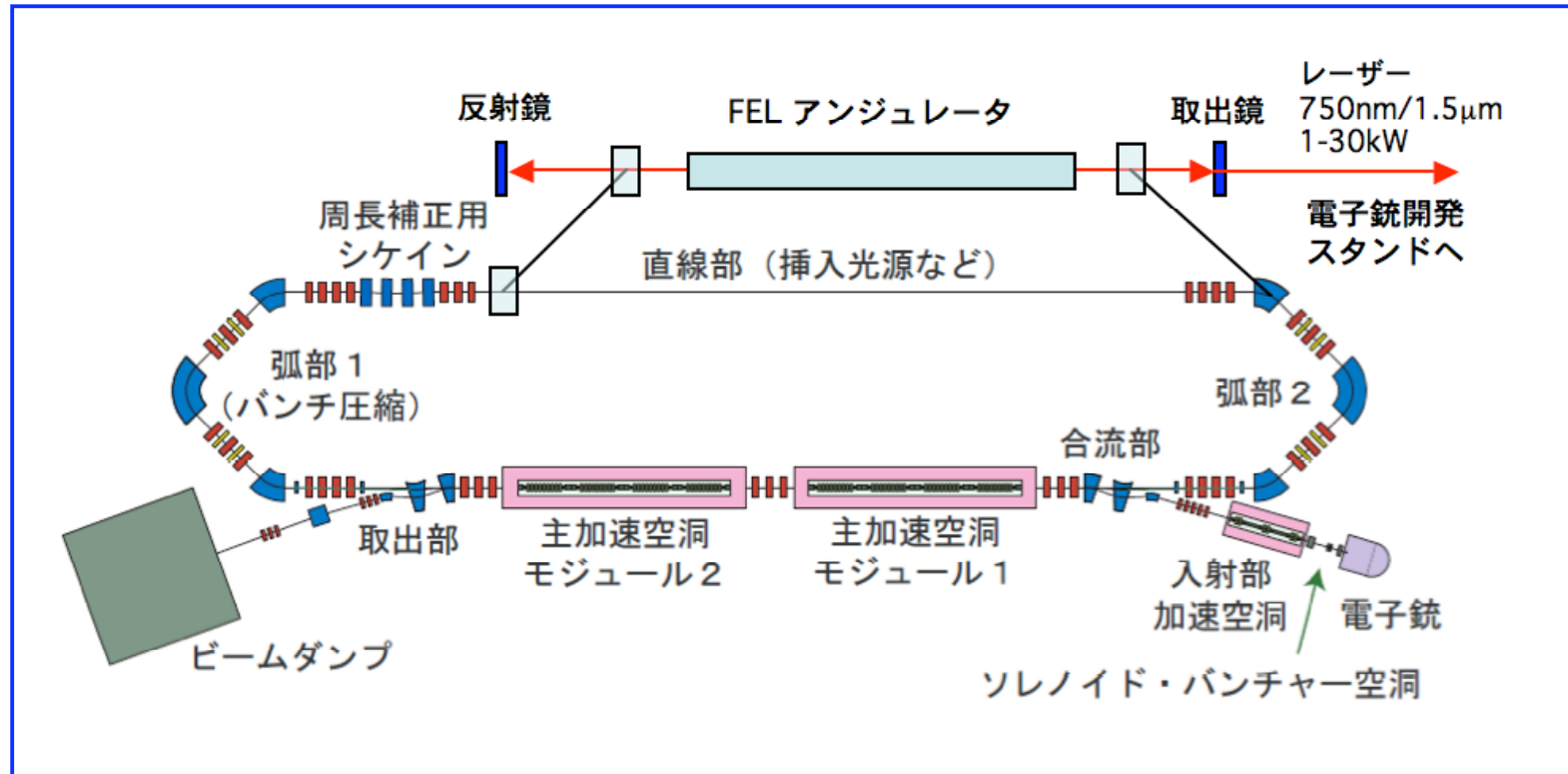
注 : LANL : 波長 10  $\mu$ m FEL  
 レーザー出力 6 kW のとき共振器内の  
 レーザーパワーは 90 kW、最大パワー  
 では 500 kW に達した  
  
 B. E. Newnam et al., IEEE Journal of  
 Quantum Electronics, QE-21(1985)867.

89MeV 以下での FEL 発振 :

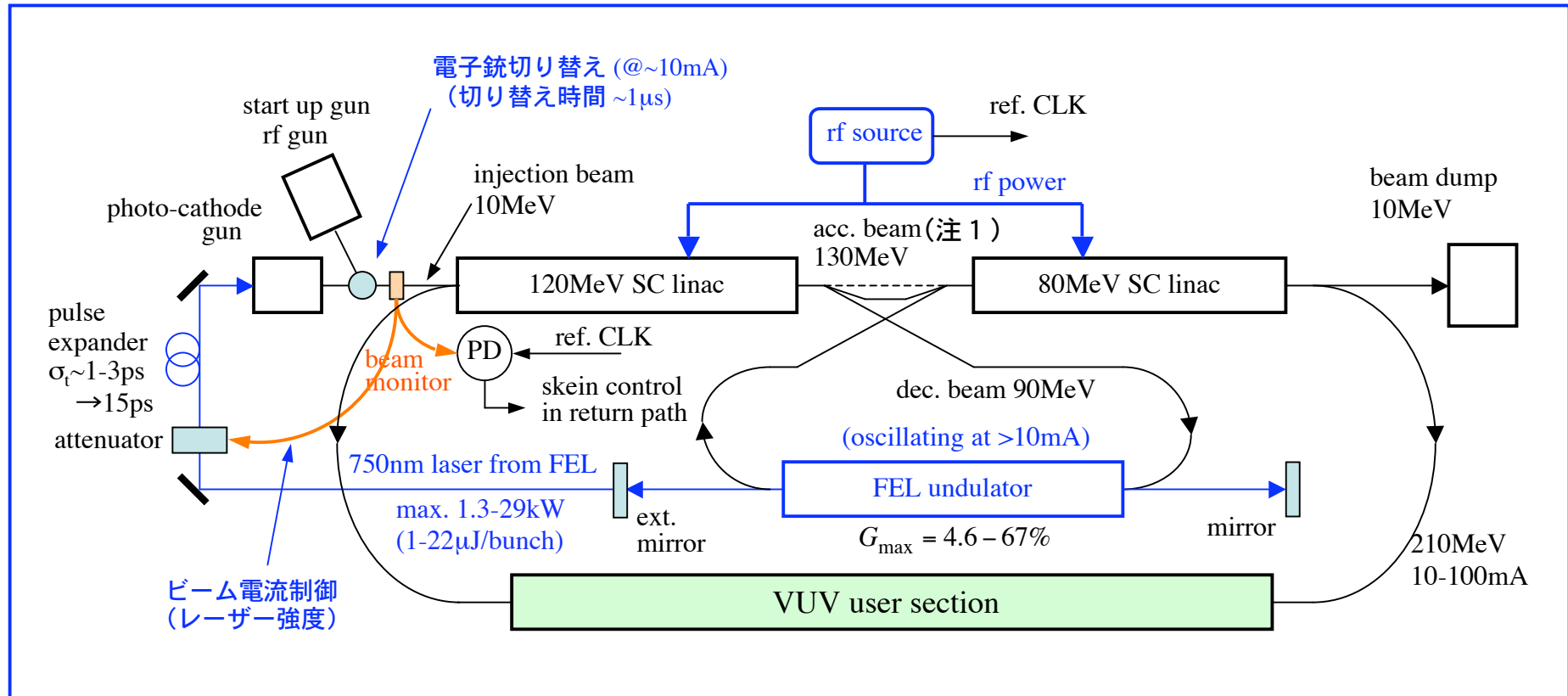
$\lambda_L = 1.5 \mu\text{m}$  で発振させ  
非線形結晶で 2 逡倍する

$$\begin{cases} \lambda_U = 45\text{mm} \\ \lambda_L = 1.5\mu\text{m} \\ N_U = 200 \end{cases}$$


## ERL ビームで駆動する FEL 発振器 (2)



### 3. 210 MeV ブートストラップ ERL (クローズドループ型 ERL)



#### 4. おわりに

- ・ ERLビームによる波長 750nm の FEL は可能  
電子銃開発に有用
- ・ 非線形結晶を用いた逡倍にて波長 200nm、kW オーダーのレーザー可能  
Cu 等の金属フォトカソードに適用可
- ・ クローズドループ型 ERL (ブートストラップ ERL) の可能性  
(アイデア段階)

- ・ 光共振器内のパワー評価が必要 (FEL のシミュレーション計算が必須)  
反射鏡ダメージについて慎重な検討必要
- ・ 短バンチ ( $\sigma_t < 3$  psec) の場合の FEL については検討必要  
( $\sigma_t \sim 0.1$  psec  $\rightarrow$  おまけ参照)

## おまけ

バンチ長  $\sigma_t \sim 0.1 \text{ psec}$  の場合

バンチピーク電流  $I \sim 300 \text{ A}$  ( $Q_b \sim 77 \text{ pC}$ )

ワンパスゲインが極めて大きくなり

スモール・シグナルゲイン近似は破綻 → FEL 発振器は不可能 (反射鏡ダメージ)

ビーム半径を  $r_b = 0.5 - 0.1 \text{ mm}$  程度に小さくすると

$$\rho \sim 0.4 - 1\%$$

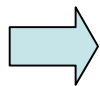
$$L_{sat} \sim N_U / \rho \sim 250\lambda_U - 100\lambda_U$$



シングルパス FEL (FEL増幅器 or SASE-FEL)  
の可能性

レーザーパワー  $P_L \approx \rho P_b \sim 40 - 100 \text{ kW}$

SASE はパワー変動が大きいため電子銃に  
は適用不可



シングルパス FEL 増幅器による 200nm, ~100kW レーザー光の発生  
(200nm, >1W の入力光が必要)