

赤外FEL開発の現状

加藤龍好

大阪大学 産業科学研究所

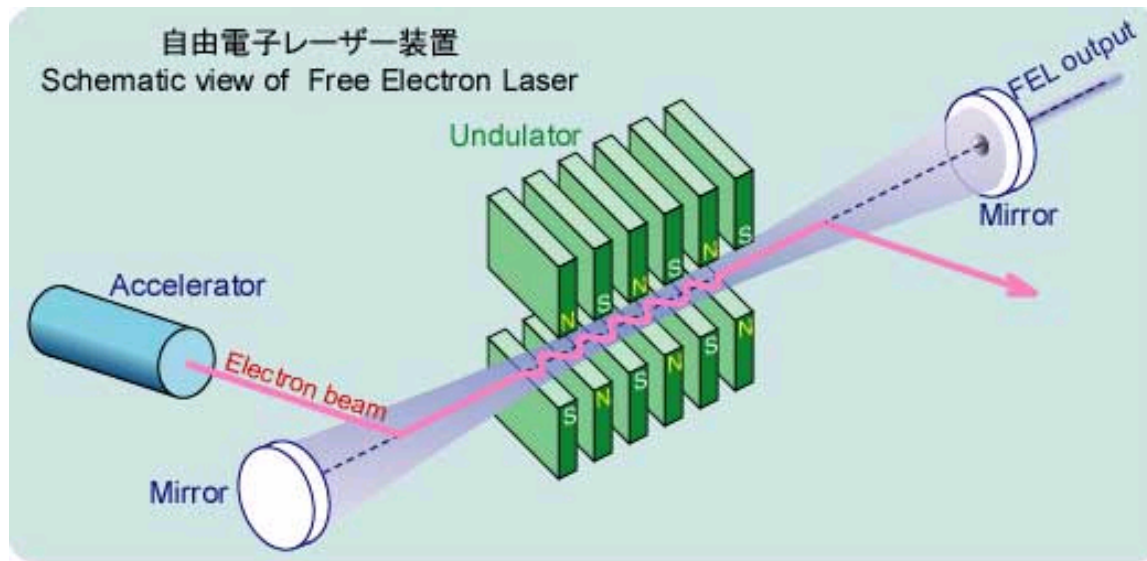
Outline

1. FELの原理、特徴
2. 日本における赤外FEL開発の経緯
3. 赤外FELの波長範囲
4. FELの構成要素
5. FELの特性（時間構造、増幅利得、共振器損失）
6. 赤外FEL開発の現状

7. もうひとつのFEL - SASE -
8. SASE光の特徴
9. 赤外SASE - FELのまとめ

自由電子レーザー (Free-Electron Laser)

- 自由電子レーザー
 - 束縛状態にない“自由な電子”によるレーザー
 - Madayにより1970年ごろに命名
- 1977年、Stanford大学で超伝導リニアックとヘリカルアンジュレータにより、世界で最初のFEL発振（波長 $3.4\ \mu\text{m}$ ）
- FELの構成
 - 加速器（電子ビームを相対論的なエネルギーに加速）
 - アンジュレータ（交番磁場により電子ビームを蛇行させ、横方向の速度成分を与える）
 - 光共振器（光を往復させることにより、後続の電子バンチと重畳させ、相互作用させる）

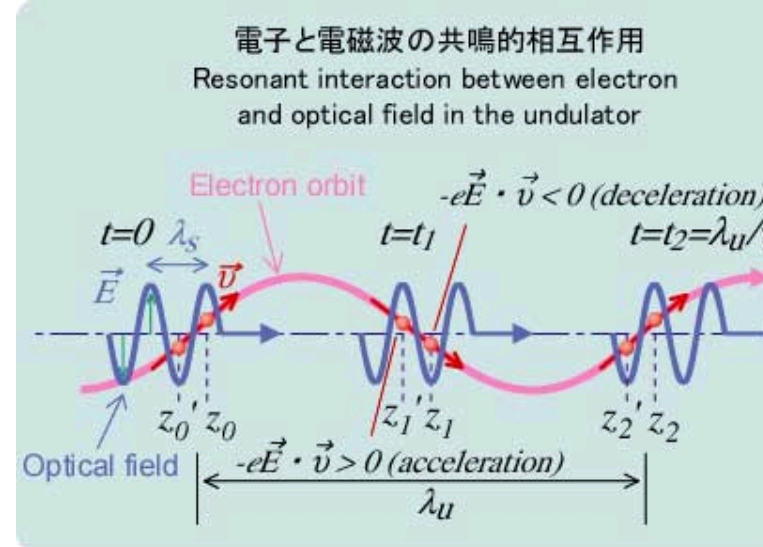


自由電子レーザーの原理

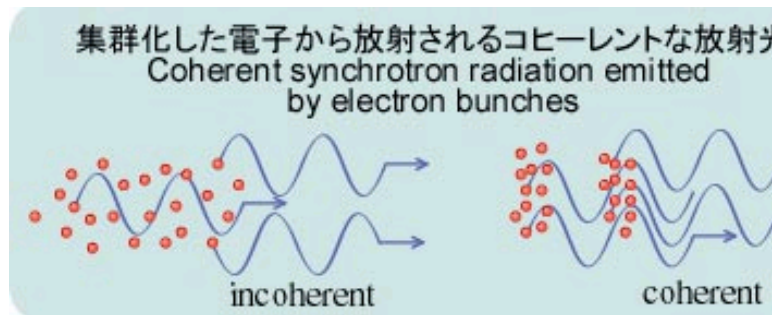
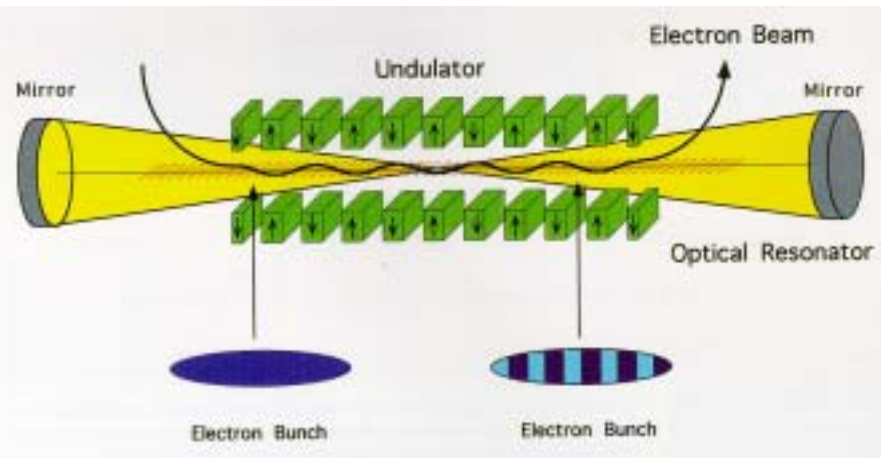
電子バンチの繰返しと光パルスの往復時間を一致させることにより、電子バンチと光パルスが重畳
 電子バンチは蛇行により光パルスに対して遅れを生じる

電子が1周期進む間に光に対して1波長だけ遅れる電子(共鳴条件を満たす電子)は、蓄積された光により常に減速(誘導放射)または常に加速(誘導吸収)される

速度変調は磁場中を進むことにより、密度変調に転化



- 光の波長での密度変調により、放射はコヒーレント化



自由電子レーザーの特徴

- 電子ビームのエネルギー（ γ ）、アンジュレータ磁場の周期（ u ）、磁場強度（ K ）で波長が選択できる
 - 発振波長に原理的な制約がない

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} (1 + K^2)$$

- レーザー媒質での代わりに電子ビームと磁場の相互作用
 - 熱損失がなく、電子ビームのエネルギー損失がそのまま光に転化（高効率）
 - 高出力化が可能
- コヒーレント
- 高い指向性

自由電子レーザーを取り巻く状況と赤外領域

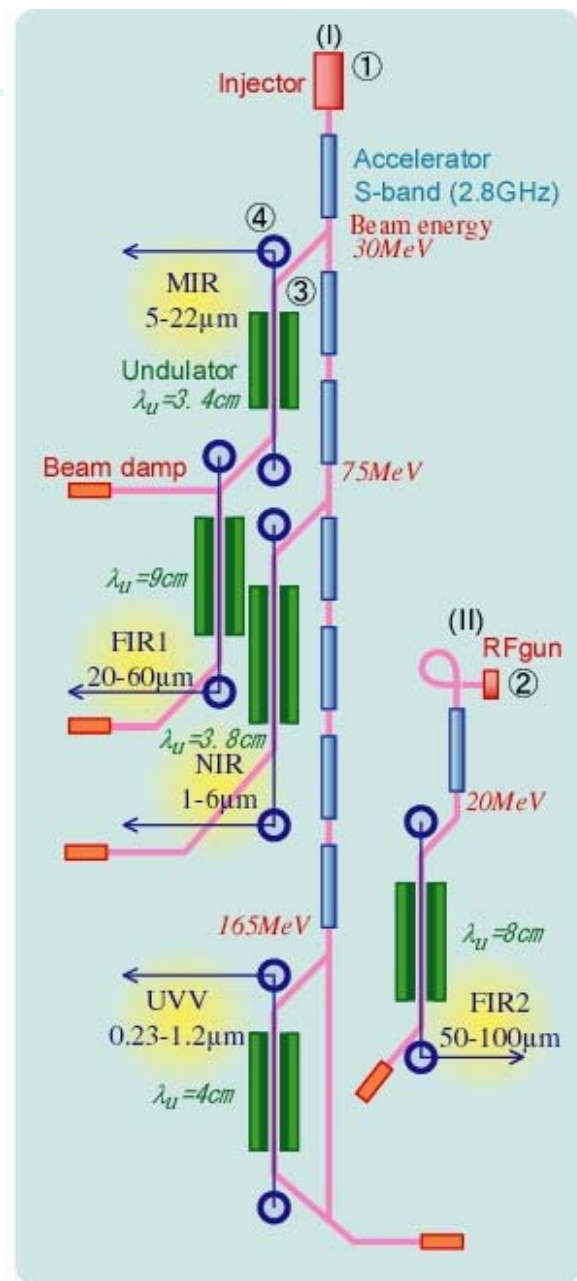
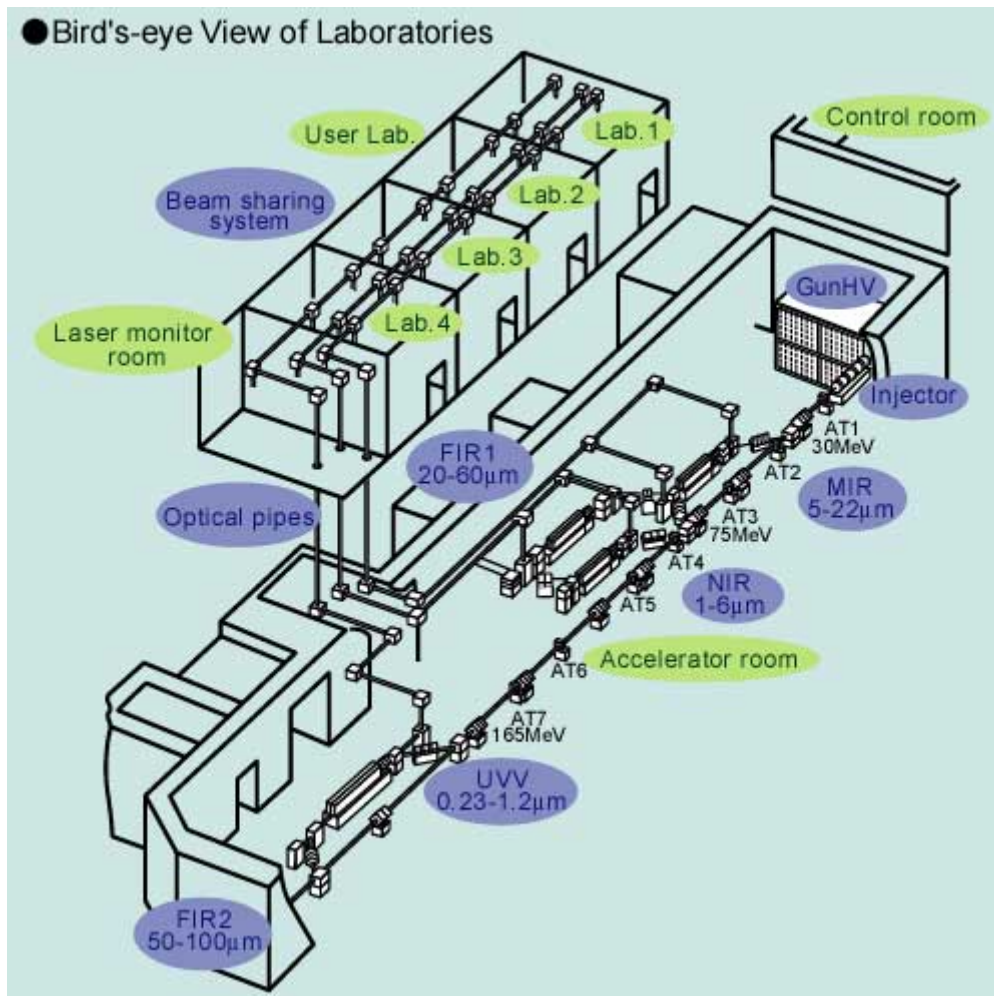
- FELを取り巻く状況の変化
 - 可視～近赤外領域でのフェムト秒レーザーと非線形光学素子の発達
- FELの動向
 - 光共振器を利用しないSASE-FELでX線レーザー
 - 赤外～ミリ波領域でのユーザー利用施設
- 赤外領域では
 - 電子ビームに要求されるエネルギーが低い
 - 小型の加速器で実現できる
 - 長波長ほど高い増幅利得が期待できる
 - FEL発振が得られやすい
 - 競合する高強度の光源が少ない

日本における赤外FEL開発の経緯

日本で最初のFEL発振は電総研のTERAS (1991年3月、0.59 μm)

年月	組織名	加速器	Energy	Wavelength	P_{peak}	P_{ave}	備考
93年	東大・FEL研	Sバンド LINAC	13.2MeV	43 μm	82W		日本で最初の赤外 FEL 発振
94年3月	阪大産研	Lバンド LINAC	17-19MeV	32-40 μm	0.2MW		
94年10月	FEL研	Sバンド,#1(MIR)	33MeV	6-9 μm	3MW	140mW	赤外 FEL 利用施設
95年2月	FEL研	Sバンド,#2(NIR)	75MeV	1.9 μm	2MW		0.63 μm 、0.3MW の3次高調波を 観測
96年4月	住友電工	Sバンド LINAC	25MeV	14 μm		1mW	
96年10月	FEL研	Sバンド,#4(FIR1)	33MeV	18 μm			ハイブリッド
96年12月	FEL研	Sバンド,#4(FIR1)	33MeV	18.6 μm			ハルバツル
97年2月	阪大産研	Lバンド LINAC	18MeV	~50 μm			
97年4月	阪大産研	Lバンド LINAC	14MeV	~126 μm			
98年2月	原研	超伝導 LINAC	15.8MeV	24 μm		100W	超伝導加速器による FEL 発振
98年4月	FEL研	Sバンド,#1,#4	33MeV	4.65 μm ,19.4 μm			タンデム構成のアンジュレータで 2色発振
98年	阪大産研	Lバンド LINAC	13MeV	~150 μm			
99年2月	FEL研	Sバンド,#1(MIR)	33MeV	6.87 μm ,7.03 μm			1パルス 24 μs の前半と後半で2 色発振
99年	原研	超伝導 LINAC		24 μm		360W	
00年2月	原研	超伝導 LINAC		22 μm		2.34kW	世界最高効率&出力
00年7月	理科大	Sバンド LINAC MIR-FEL	32MeV	9 μm	5MW		2番目の赤外 FEL 利用施設
01年5月	日大	Sバンド LINAC	83.6MeV	1.5 μm			

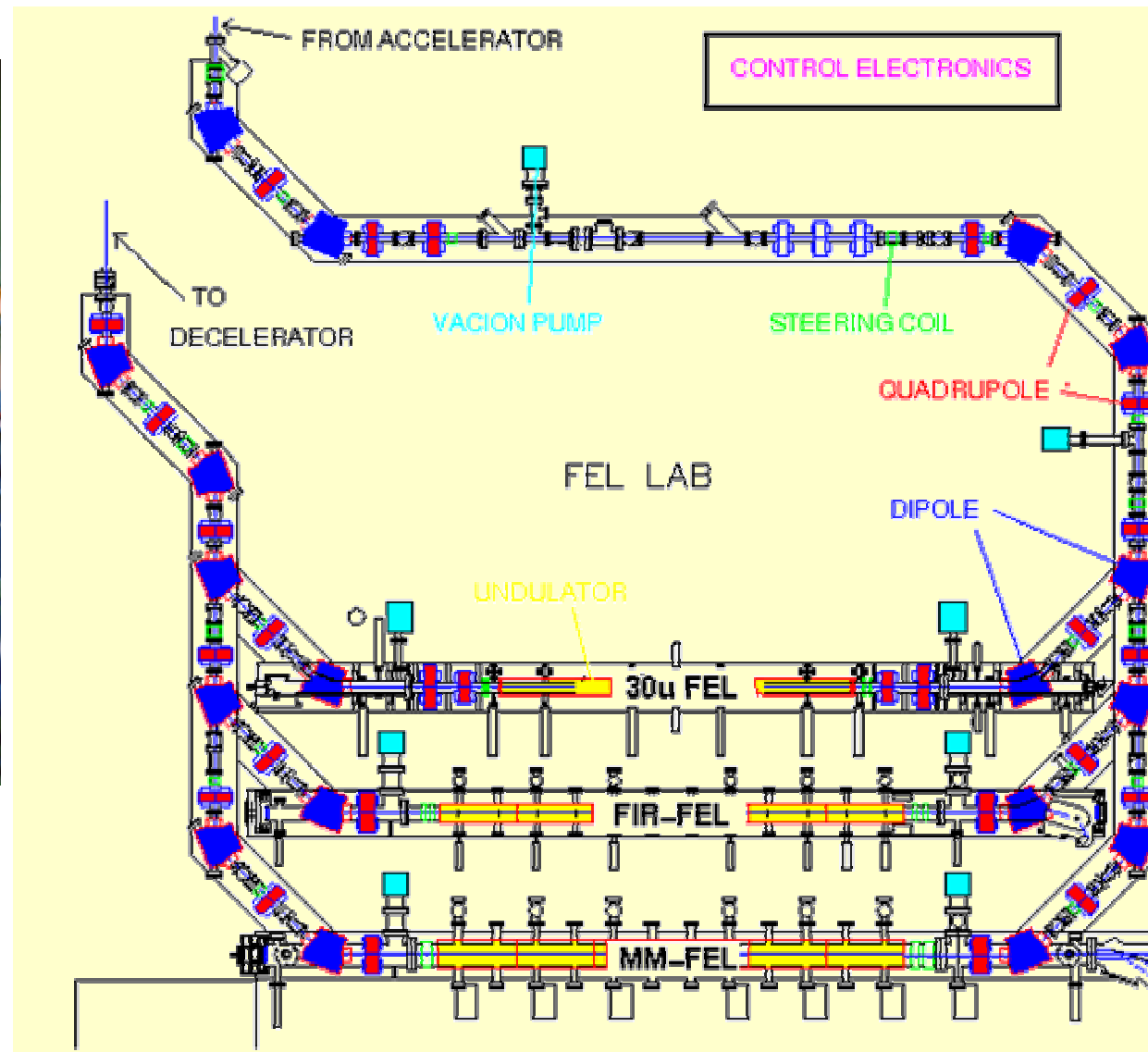
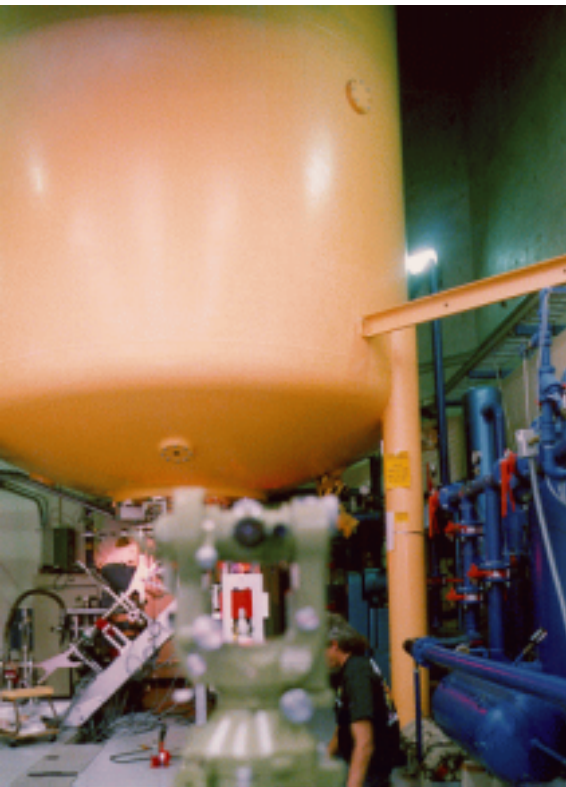
大阪大学iFEL (旧FEL研)の例



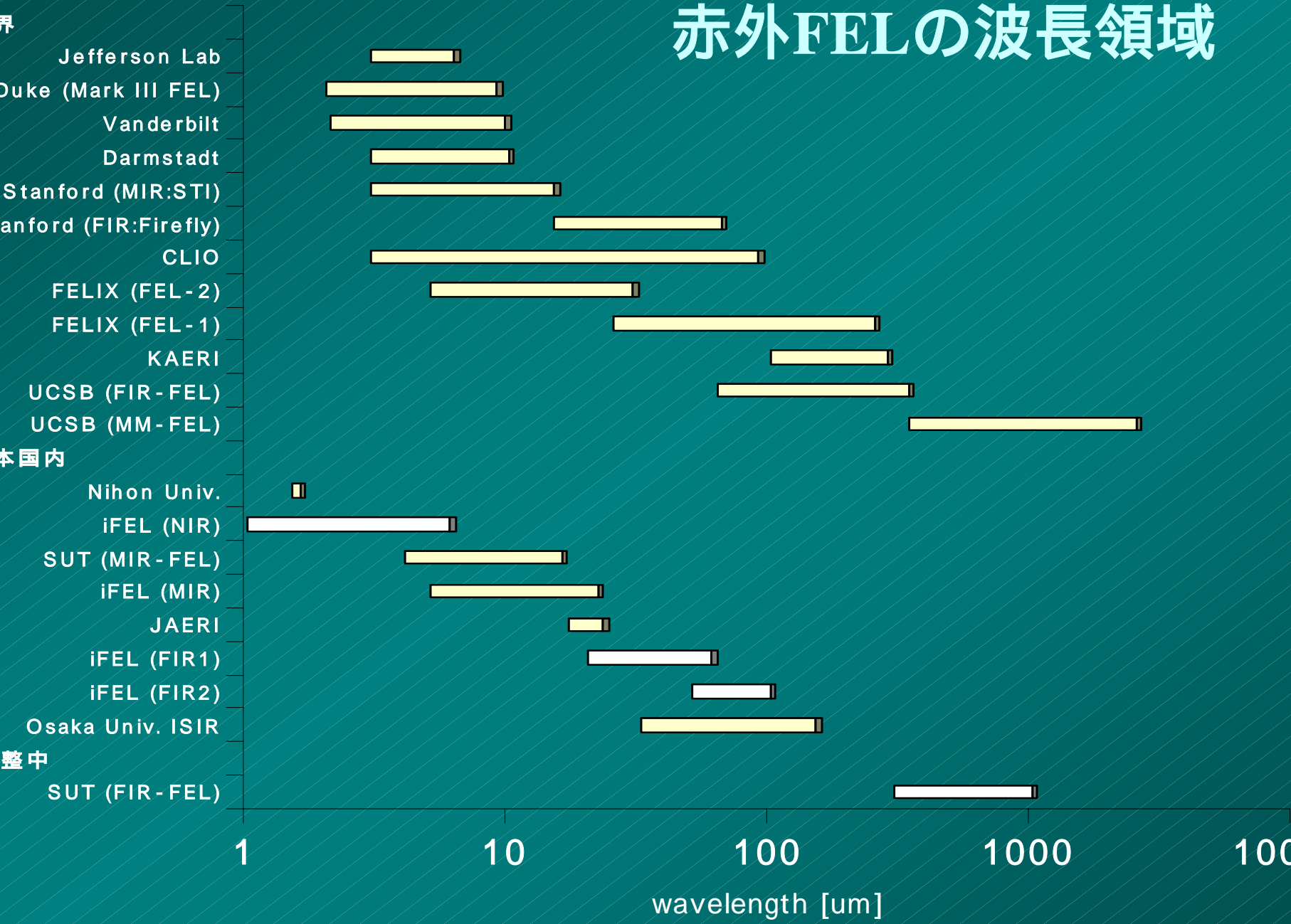
大阪大学「自由電子レーザー研究施設」FEL装置

Schematic view of the FEL facility at iFEL.

UCSB (世界で最初のFEL利用施設)の例



赤外FELの波長領域



Outline

1. FELの原理、特徴
2. 日本における赤外FEL開発の経緯
3. 赤外FELの波長範囲
4. FELの構成要素
5. FELの特性（時間構造、増幅利得、共振器損失）
6. 赤外FEL開発の現状

7. もうひとつのFEL - SASE -
8. SASE光の特徴
9. 赤外SASE - FELのまとめ

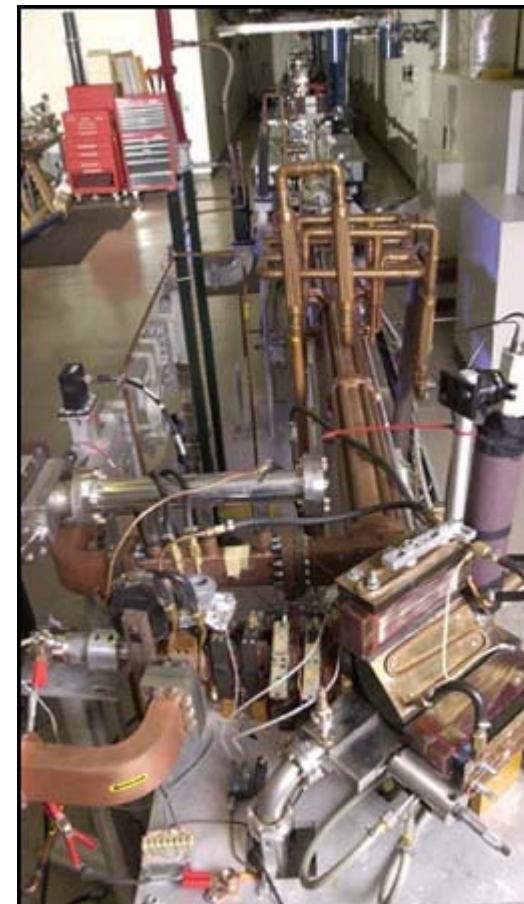
FELの構成要素 - 電子銃



DC熱陰極 (阪大音研)



上: DC熱陰極
下: RF電子銃 (阪大iFEL)



The free-electron laser is 60 feet long and up the entire basement at the FEL center.

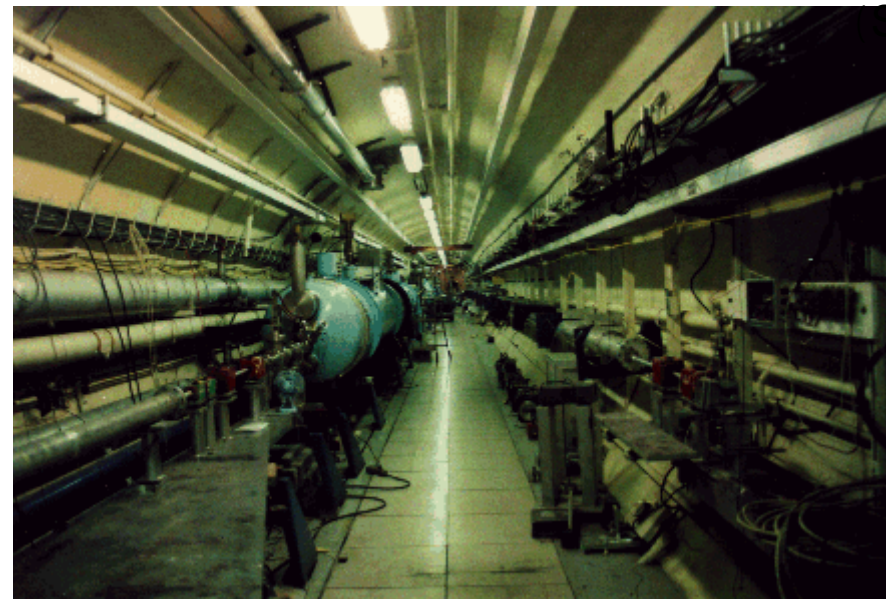
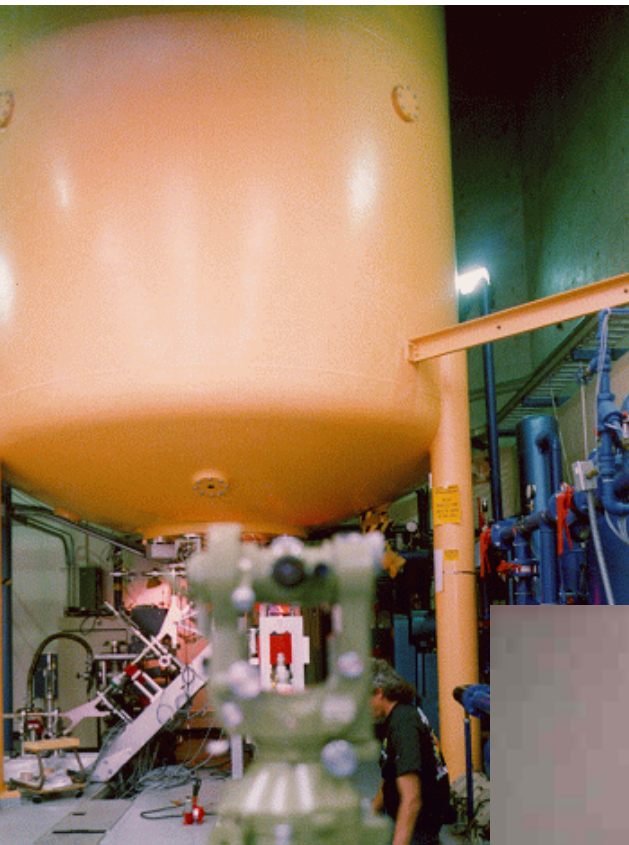
Photo by: Neil

RF電子銃 (Vanderbilt)

FELの構成要素 - 加速管

超伝導リニアック
(Stanford)

6 MeVバンデグラフ(UCSB)



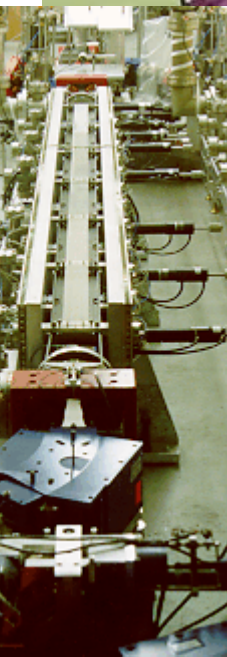
超伝導Sバンドリニアック
(東京理科大)

超伝導リニアック(原研)

FELの構成要素 - アンジュレータ



東京理科大



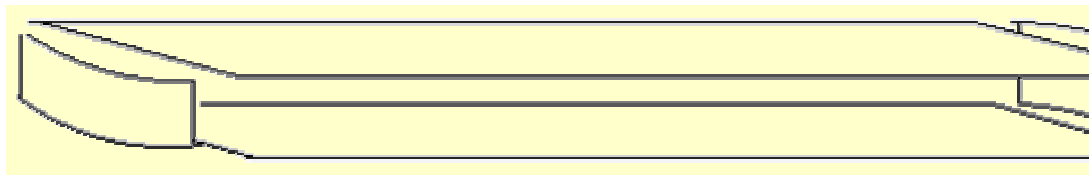
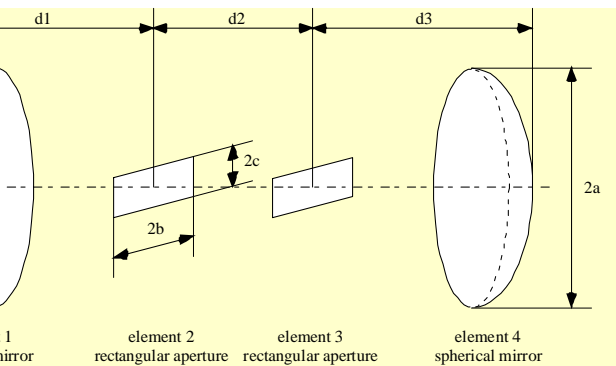
JCSB(FIR)



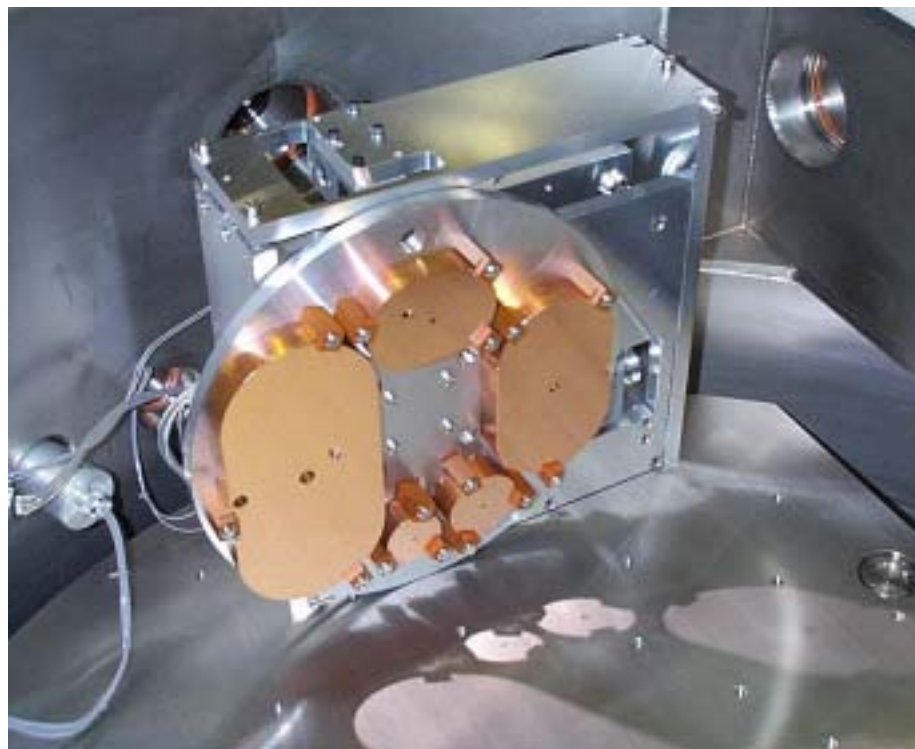
FELIX

CI

FELの構成要素 - 光共振器



Open Resonator モード(阪大産研)



Waveguide モード(FELIX)

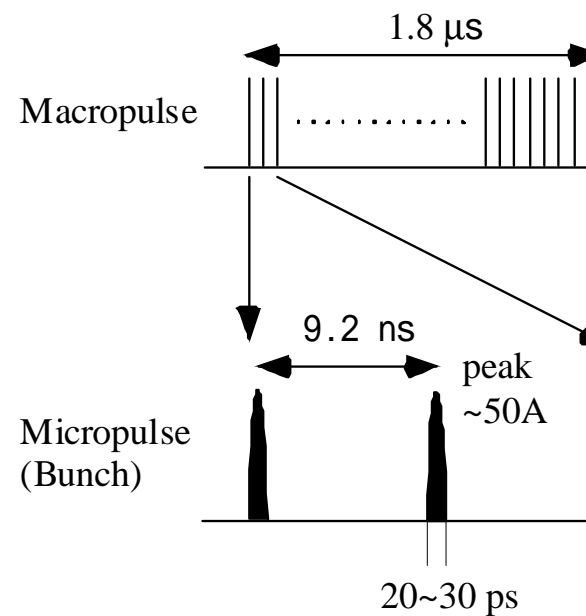
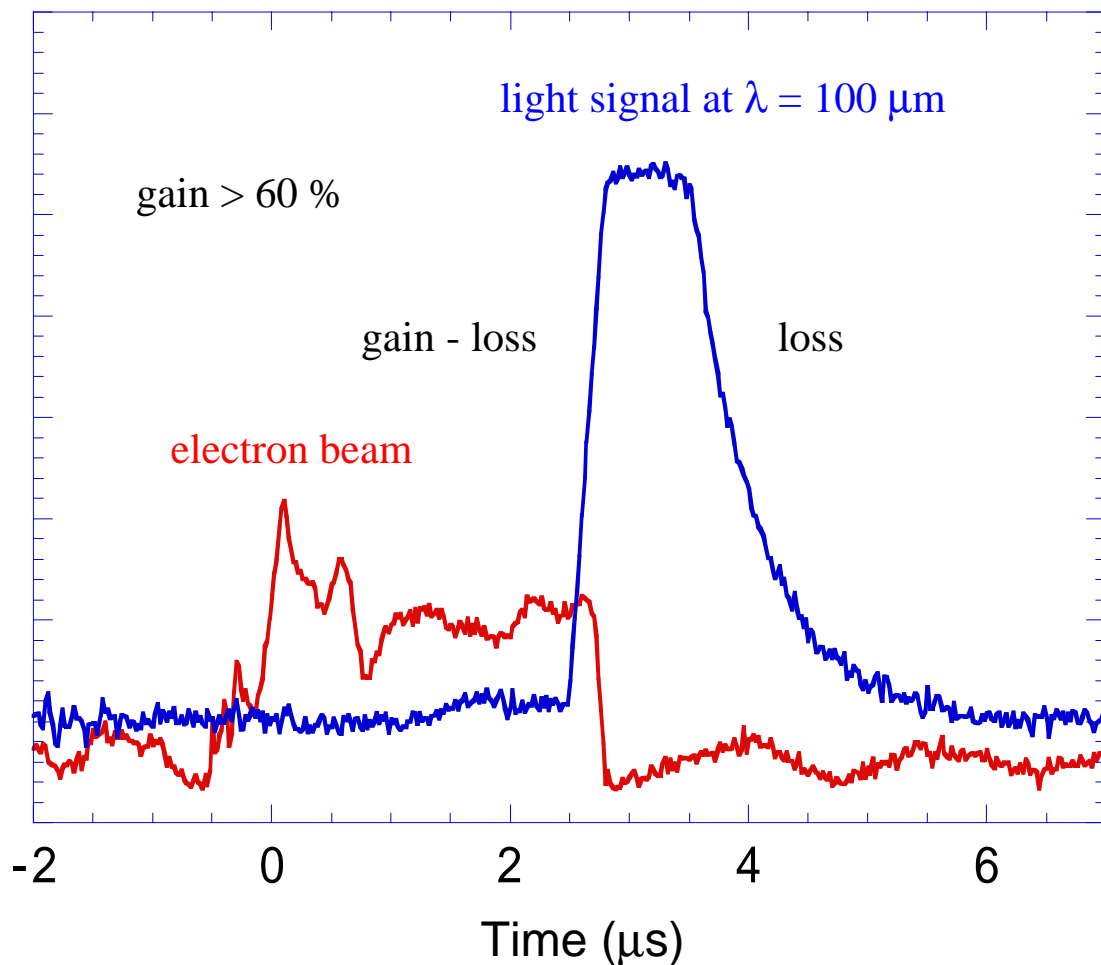
Outline

1. FELの原理、特徴
2. 日本における赤外FEL開発の経緯
3. 赤外FELの波長範囲
4. FELの構成要素
5. FELの特性（時間構造、増幅利得、共振器損失）
6. 赤外FEL開発の現状

7. もうひとつのFEL - SASE -
8. SASE光の特徴
9. 赤外SASE - FELのまとめ

FEL光の時間構造

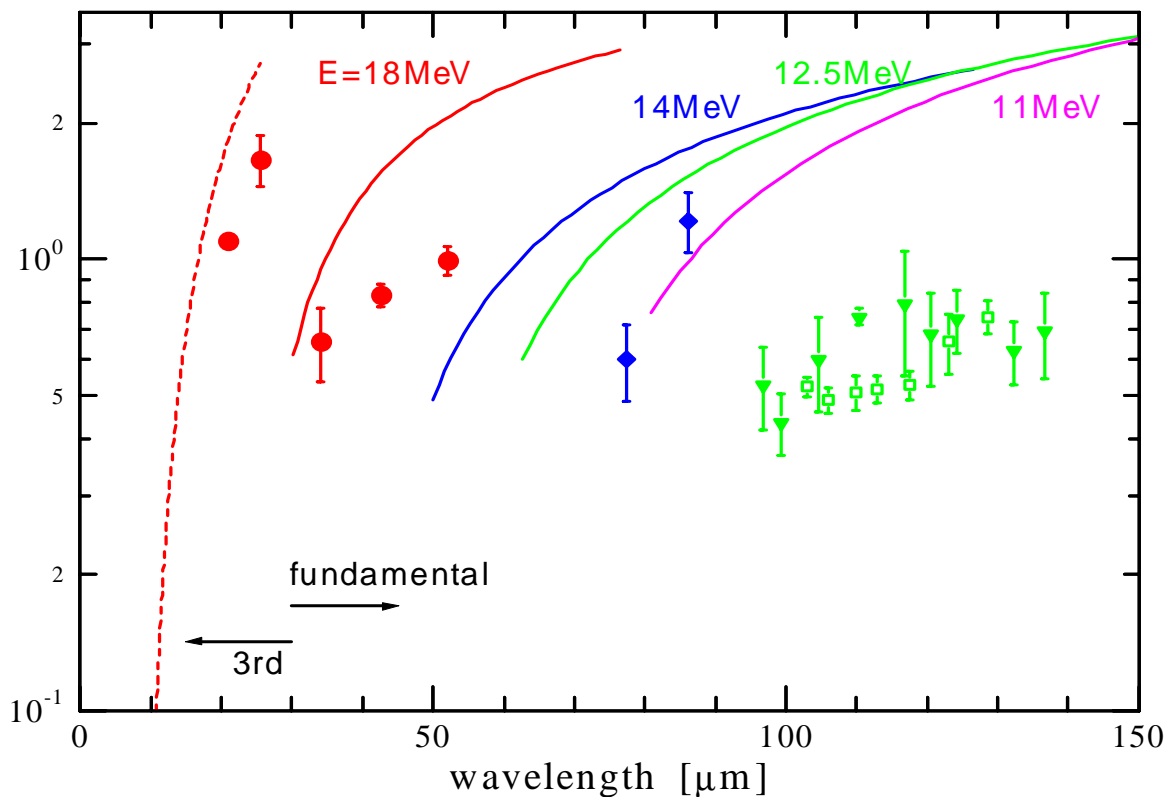
- 常伝導RFライナックを用いたFELはmacropulseの中にmicropulseを持つ、2重のパルス構造



赤外FELの増幅利得

■FEL増幅利得の測定例(阪大産研)

■これまで得られた最大利得 **基本波** ~120%、**3次高調波** > 160%



UCSBの増幅利得
FIR-FEL 35-170%
MM-FEL 60-430%

赤外FELの共振器損失

共振器損失の評価(阪大産研)

回折損失

シミュレーションにより評価

改造前 $\phi 60\text{mm}$ \rightarrow 改造後 $\phi 80\text{mm}$

ミラー表面での散乱・吸収

金の反射率 0.993

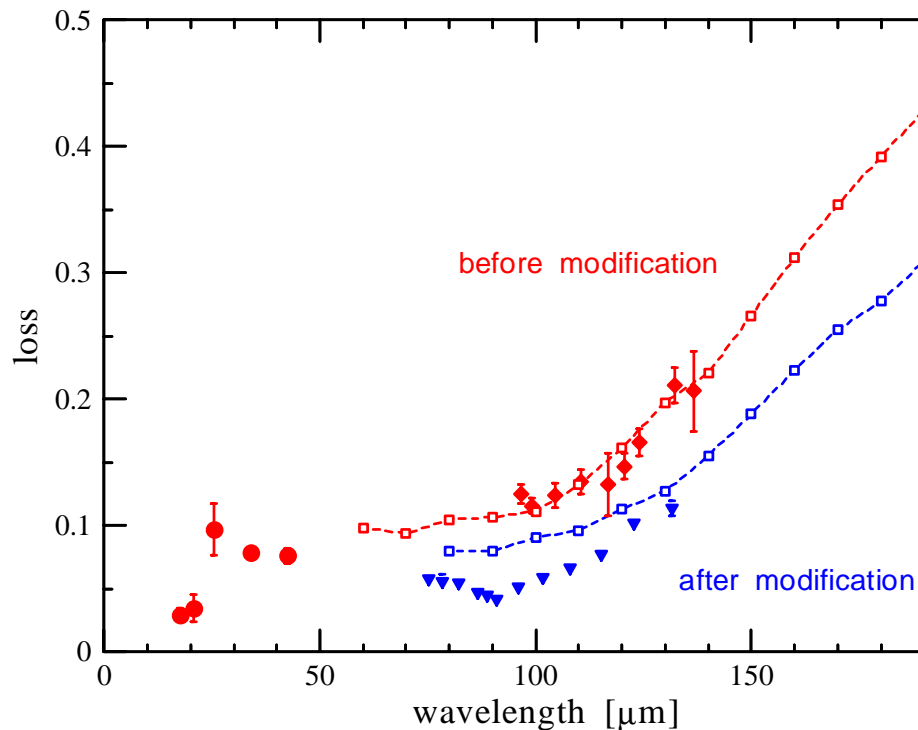
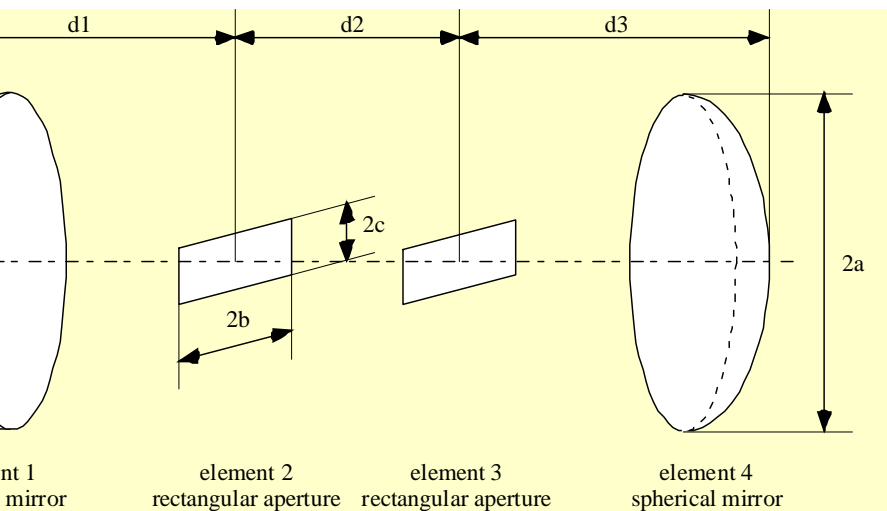
出力結合穴

改造前(上流側ミラー 穴なし、下流側ミラー

$\phi 3\text{mm}$)

\rightarrow 改造後(上流側ミラー $\phi 3\text{mm}$ 、下流側ミラー

$\phi 1\text{mm}$)



UCSB(FIR)で行われた測定では
Waveguideモードの共振器損失は波長
140 μm で4.3%

赤外FELの現状と問題点

- 日本国内では2つのユーザー利用施設が稼動中
 - 大阪大学(iFEL、MIR) 5-22 μm 、5MW(peak)、1W(ave.)
 - 東京理科大(FEL-SUT、MIR-FEL) 5-16 μm 、5MW(peak)、1W(ave.)
- 建設・調整中
 - 東京理科大(FEL-SUT、FIR-FEL) 300-1000 μm 、0.1MW(peak)
- 赤外FELの光出力
 - 常伝導RFリニアック ~MW(micro peak), ~kW(macro peak), ~W(ave.)
 - 超伝導RFリニアック ~kW(ave.)
- FELの欠点
 - 駆動源となる加速器本体の熱損失が大きい
 - 超伝導化
 - ビームから光へのエネルギー変換効率が低い
 - ビームエネルギーの再利用 2色発振、エネルギー回収
 - FELの利用形態は、1ビーム - 1波長 - 1ユーザー
 - 小型加速器 (RF電子銃 + 加速管1本) で利用
 - 円形加速器の入射器を空いてる時間で利用
 - ERLに組み込む

Outline

1. FELの原理、特徴
2. 日本における赤外FEL開発の経緯
3. 赤外FELの波長範囲
4. FELの構成要素
5. FELの特性（時間構造、増幅利得、共振器損失）
6. 赤外FEL開発の現状

7. もうひとつのFEL - SASE -
8. SASE光の特徴
9. 赤外SASE - FELのまとめ

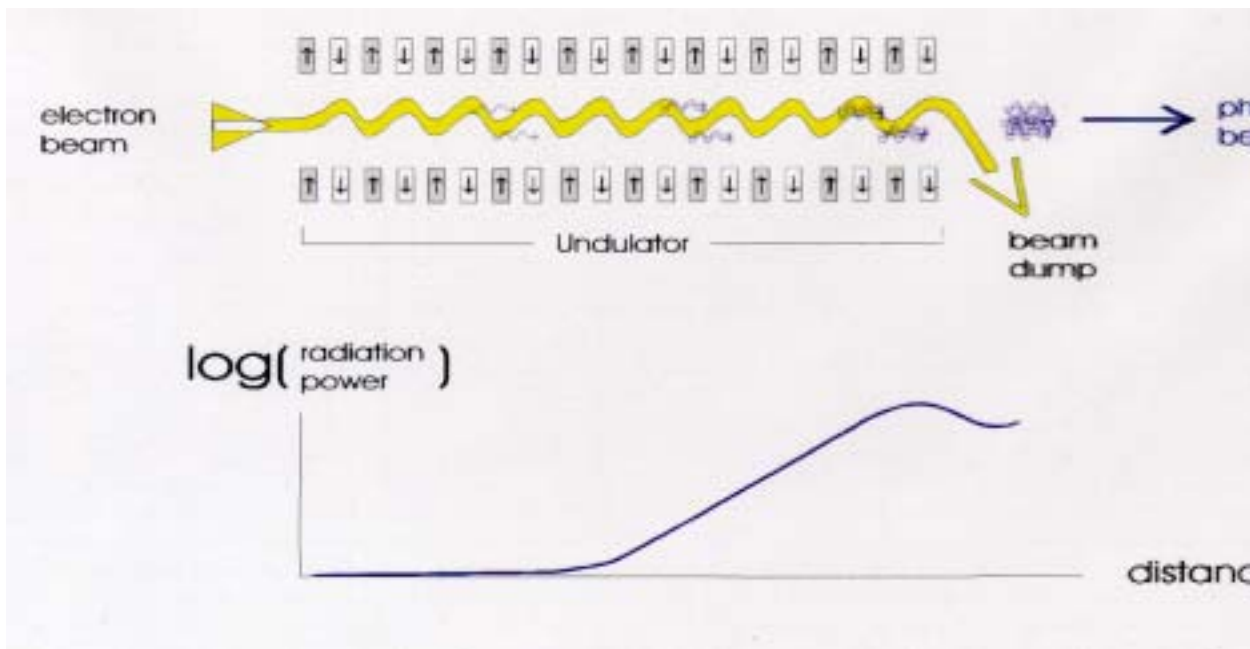
もうひとつの自由電子レーザー (SASE)

- SASE(Self-Amplified Spontaneous Emission)とは？
 - 光共振器を用いないタイプの自由電子レーザー。
 - 単一通過型高ゲインFEL
 - 高ピーク電流の電子ビームにより生ずる集団不安定性により高ゲインを実現し、ウィグラーを1回通過するだけで高出力のコヒーレント光を得ることができる。
 - X線領域では光共振器を構成できるミラーが存在しない。
 - 第4世代光源 (X線レーザー) を実現するもっとも有力な候補のひとつ。

SASE を短波長領域で実現するためには、

- 高品質高エネルギーの電子ビーム (数~数十GeV)
- 長尺ウィグラー (50 ~ 300m)

が必要。



SASE計画と赤外領域で行われたSASE実験

■ 短波長領域で進められている SASE-FEL 計画

- LCLS (Linac Coherent Light Source @ SLAC) 1-15
- TESLA-FEL (TESLA @ DESY) 1-15

■ 可視光と真空紫外領域での実験

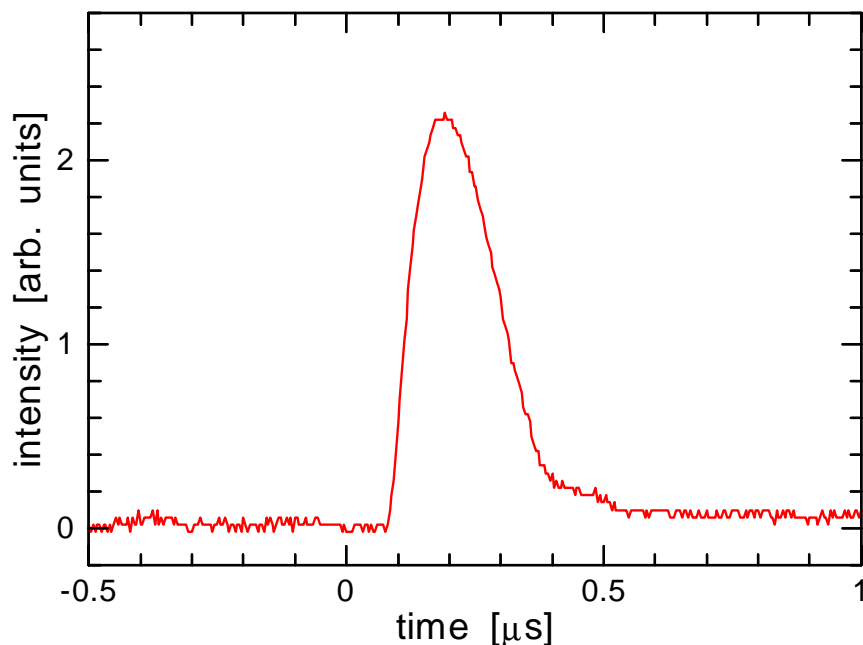
- DESY (TTF-FEL) 108nm, 80-180nm (2)
- ANL (APS, LEUTL) 530nm, 385nm (1)
- BNL (ATF, VISA) 830nm

■ これまで赤外領域で行われた実験

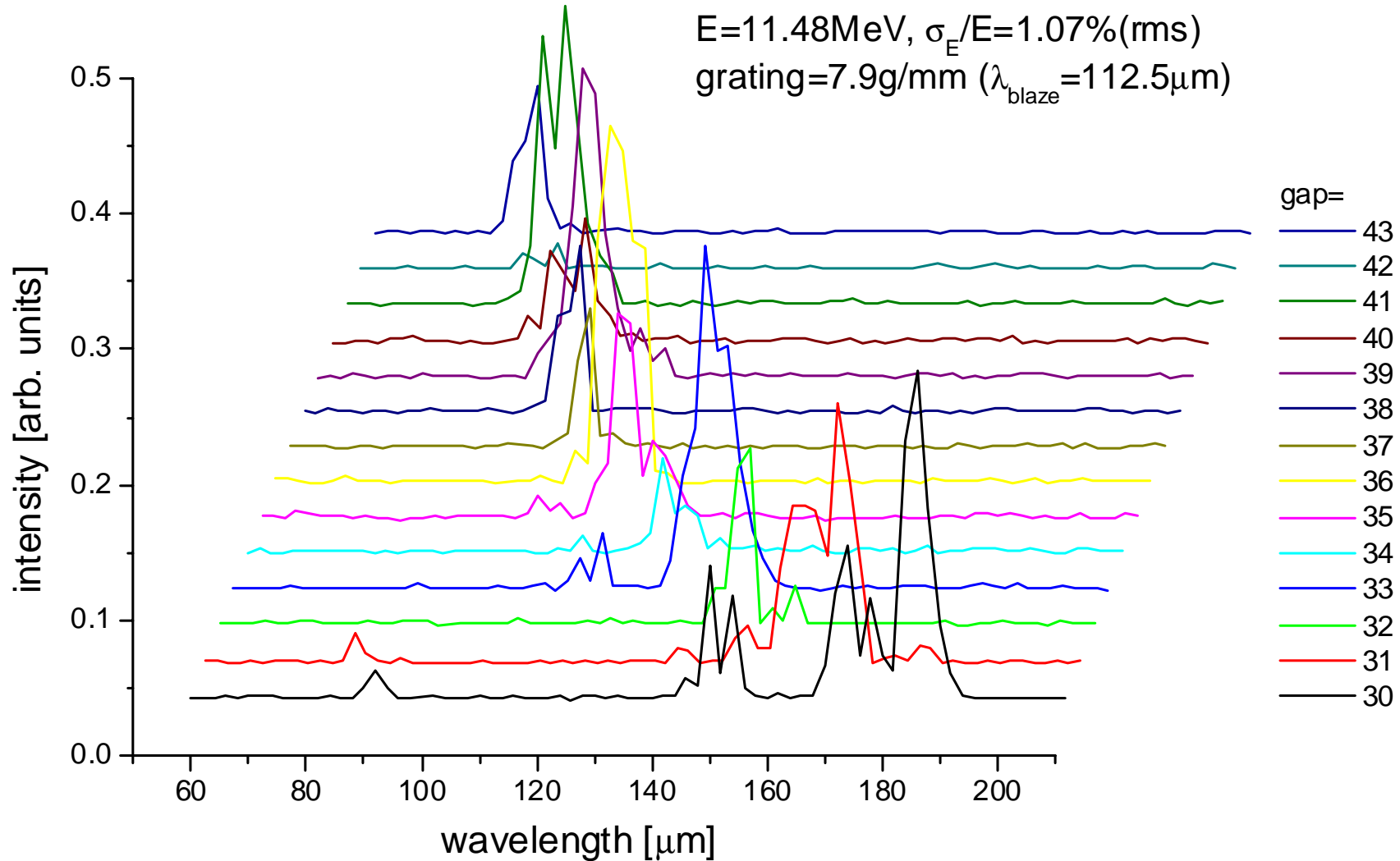
- Lawrence Livermore 10 μm (増幅実験)
- Osaka Univ. (ISIR) 20, 40 μm (1991)
- Stanford Univ.(SLAC) 47 μm (1996)
- Orsay (CLIO) 5,10 μm (1997)
- UCLA 16 μm (1998)
- BNL (NSLS) 1 μm (1998)
- Osaka Univ. (ISIR) 72-157 μm (1999)

SASEの時間構造

- 常伝導RFライナックを用いたFELはmacropulseの中にmicropulseを持つ、2重のパルス構造
- SASE-FELの光は、完全なシングルパルス
- パルスの持続時間は電子バンチの時間幅と同程度（10~20ps）
 - 図中の応答信号は検出器系の応答関数を反映
 - アンプ（~170ns）、検出器（~10ns）



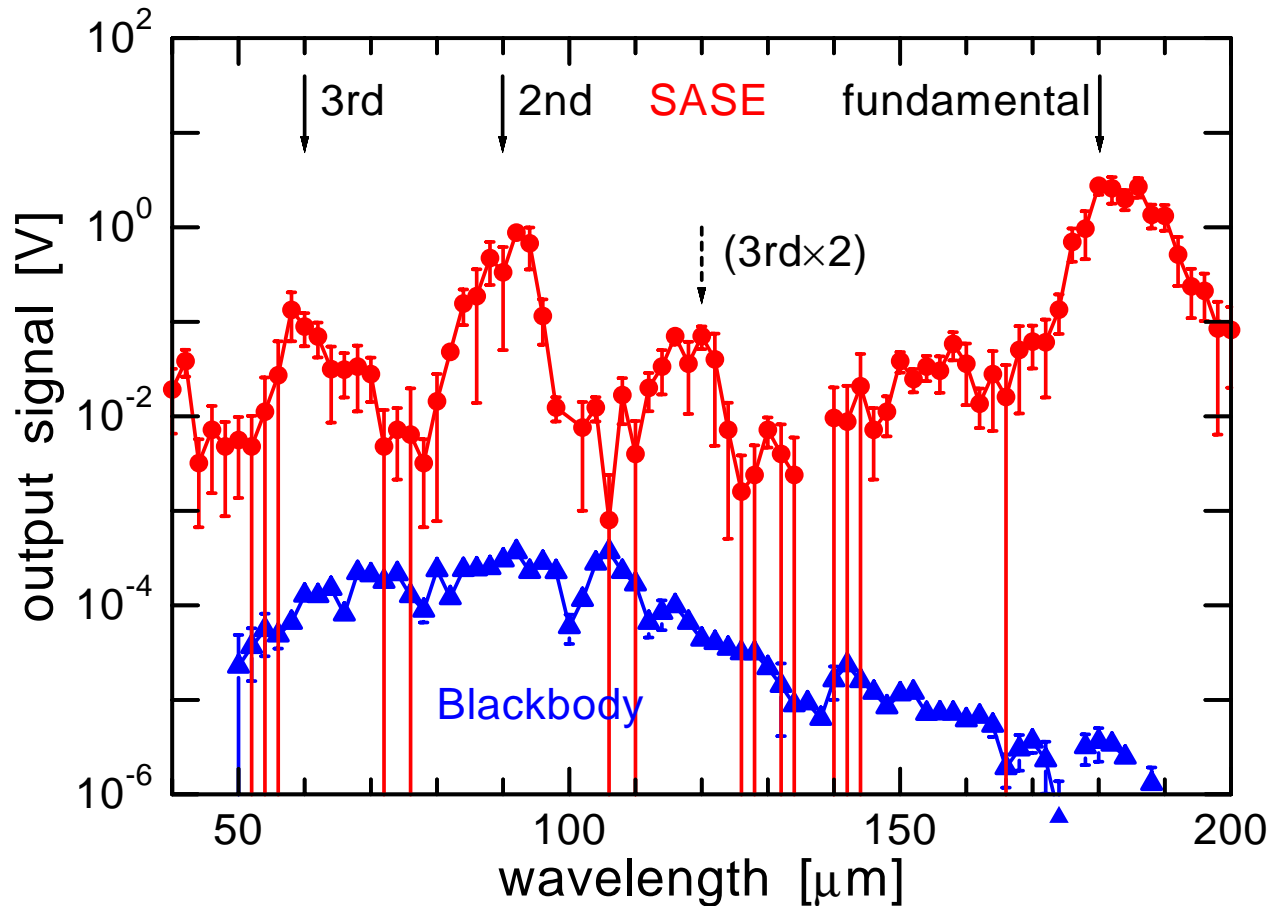
SASE光の連続波長可変性



SASEと黒体炉の光強度比較

$E=11.3$ MeV, $\Delta E/E=3.6\%$ (FWHM), $Q=9.2$ nC, gap=30mm ($K=1.47$)

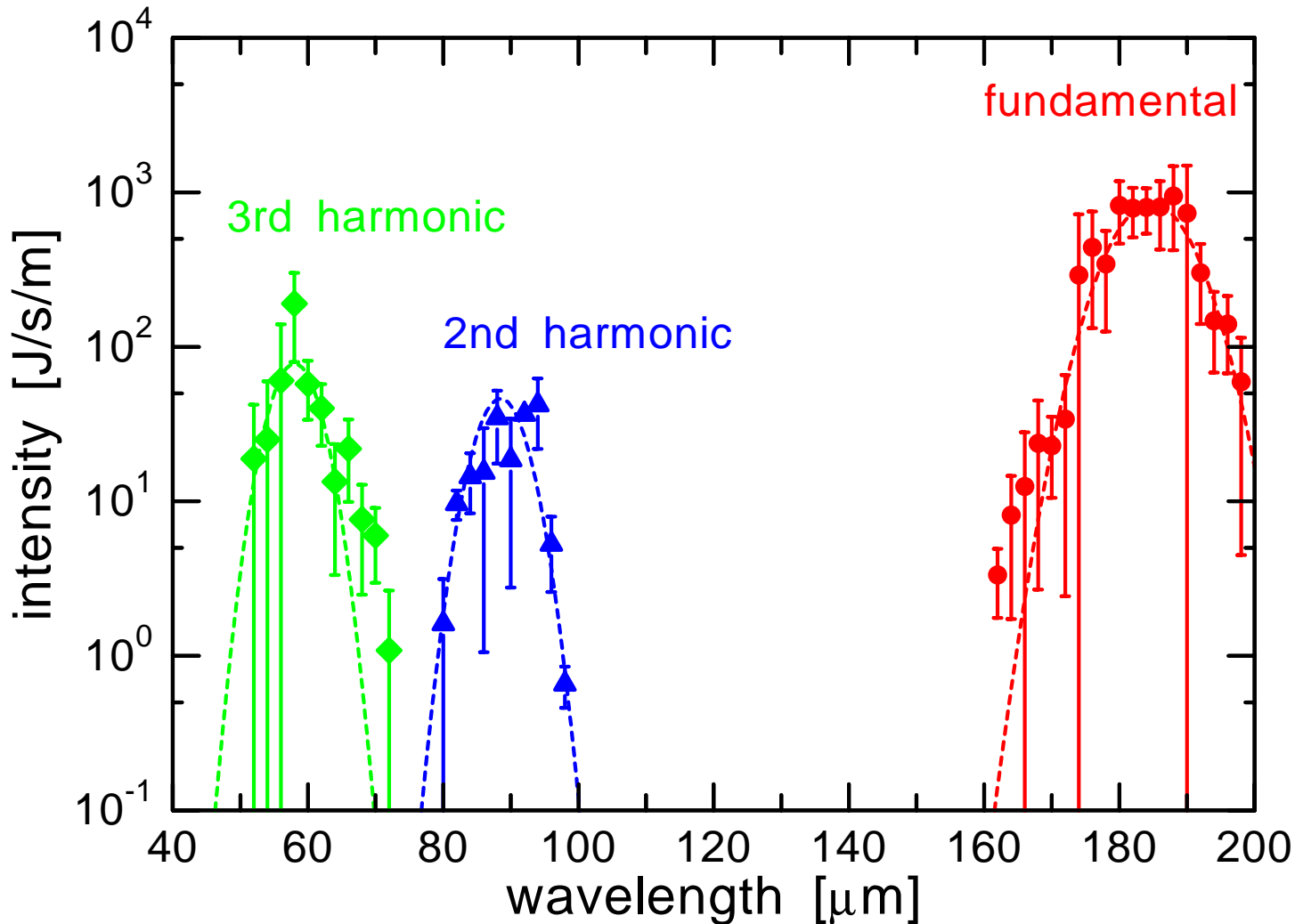
● SASE, ▲ Blackbody (1273K)



Absolute wavelength spectrum of SASE

$E=11.3$ MeV, $\Delta E/E=3.6\%$ (FWHM), $Q=9.2$ nC, gap=30mm ($K=1.47$)

● fundamental, ▲ 2nd harmonic, ◆ 3rd harmonic



SASE光パワーのK値依存性

Peak power of light as a function of K-value (K=0.67-1.47)

Dashed lines : power estimated by **1-D model**,

1-D Peak power

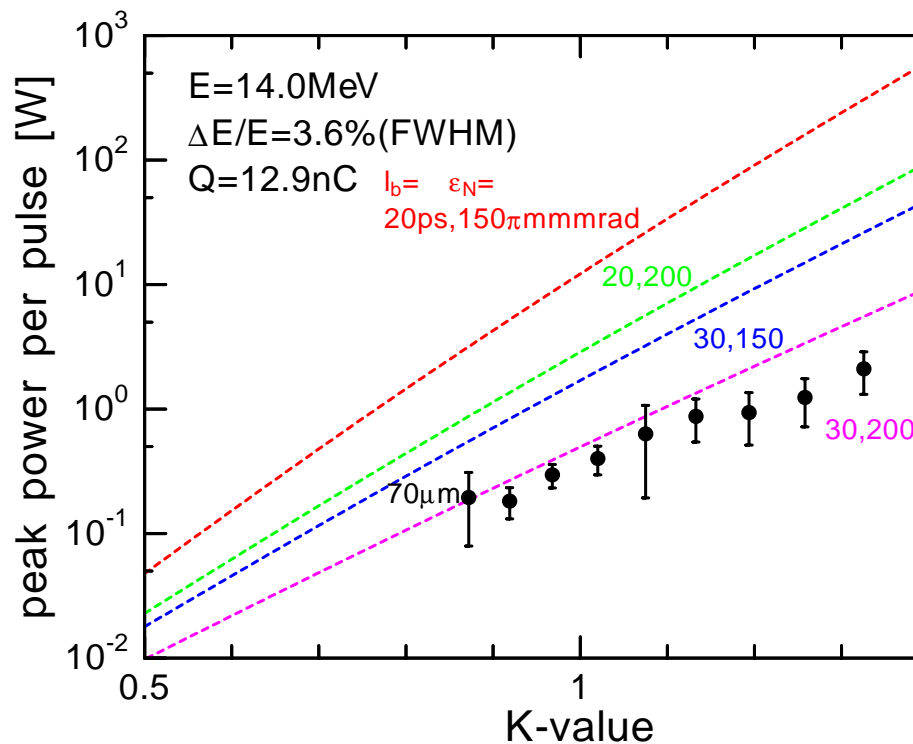
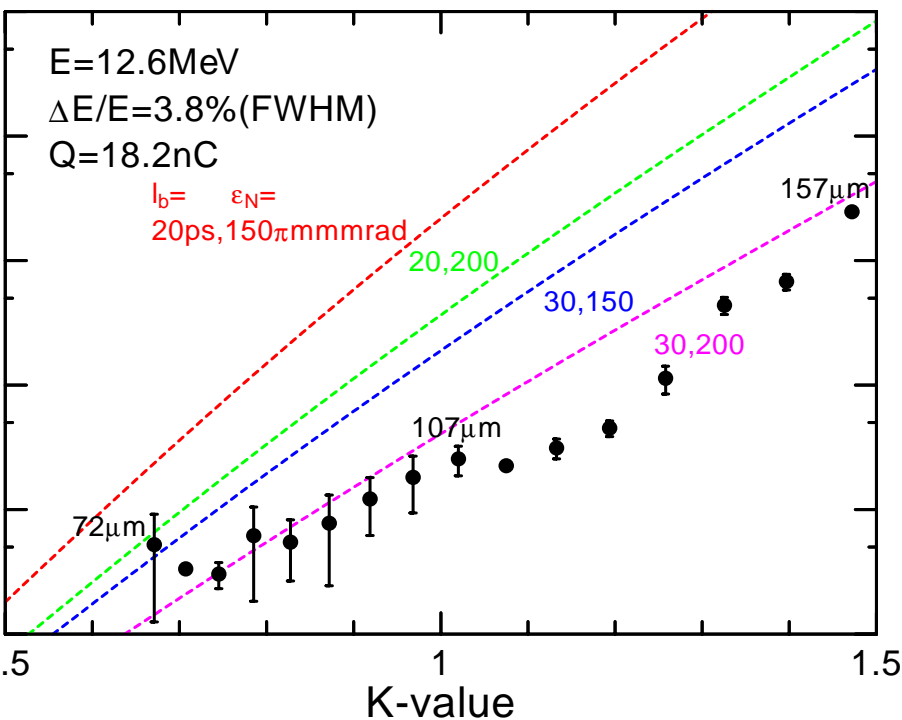
$$P_{\text{sase}} = P_{\text{in}} \exp(L_w/L_e)$$

$$P_{\text{in}} = 3(4\pi)^{1/2} \rho^2 P_b / N_\lambda (\ln(N_\lambda/\rho))^{1/2}$$

P_b : beam power, N_λ : No. of electron per wavelength

$$L_e = \frac{\lambda_w}{4\sqrt{3}\pi\rho} (1 + \Lambda_T^2)$$

$$\Lambda_T^2 = \left\{ (\sigma_\gamma/\gamma)^2 + (\varepsilon\lambda_w/4\lambda\beta)^2 \right\} / \rho^2$$



赤外SASE-FELのまとめ

- 赤外領域でのSASE-FEL実験はSASEの原理検証を目的として行われてきた。
- 光共振器を必要としないため、広い範囲で光の発生が可能。
- SASE光の特性（阪大産研の場合）
 - 波長範囲：70-185 μm (fundamental), 88 μm (2nd harmonic), 58 μm (3rd harmonic)
 - パルス長：10-20 ps (estimated)
 - ピーク出力： ~ 1 kW (fundamental)
 - パルス特性：電子バンチに同期したシングルパルス
 - 阪大産研では他のグループが電子ビームとフェムト秒レーザーの同期によるパルスラジオリシスを行っている。
 - 将来的には、レーザーとの同期照射も可能
- SASEの欠点
 - 光パルスの強度は本質的に不安定（現状で0-100%の変動）
 - アンジュレータを長くすると強度は増加できるが、発振型FELとの同居が困難になる（3~4mでMW以上）