

高エネルギー加速器セミナー OH0'08
 「ビームエネルギー回収型高輝度放射光光源 - ERL -」
 副題: 次世代加速器技術としての可能性を秘めたERL、その原理と応用を学ぶ
 2008年9月2日 KEK 3号館1階セミナーホール

ERL光源の性能と利用研究

物質構造科学研究所
 平野 馨一

1. はじめに ~ERL光源とは何か~
 2. PF-ERLについて
 3. PF-ERLの利用研究
 4. おわりに

Photon Factory (PF) & Photon Factory Advanced Ring (PF-AR)

PF-AR
 $E = 6 - 6.5 \text{ GeV}$

LINAC

PF
 $E = 2.5 - 3 \text{ GeV}$

1. はじめに ~ERL光源とは何か~

1. 1. 放射光について
 1. 2. 放射光源の歴史
 1. 3. 次世代放射光源 (XFELとERL)

Photon Factory (PF)の平面図

電子蓄積リング
 エネルギー: 2.5 - 3 GeV
 エミッタンス: 27nmrad
 電流値: 450mA
 周長: 167m
 真空度: $6 \times 10^{-8} \text{ Pa}$

放射線注入線

蓄積リング

実験ホール

LINACからの電子ビーム

X線ビームライン
 VUV/SXビームライン

1. 1. 放射光について

高エネルギーの荷電粒子(電子や陽電子)の軌道が磁場によって曲げられるときに生じる光を放射光という。

偏向電磁石光源

挿入光源

放射光の特徴

- 1) 指向性が高い
- 2) 輝度が高い
- 3) 赤外~X線の広いエネルギー領域が利用可能
- 4) パルス性
- 5) 偏光性

➡ 物質科学や生命科学に必要な不可欠なプローブ

PFの実験ホール



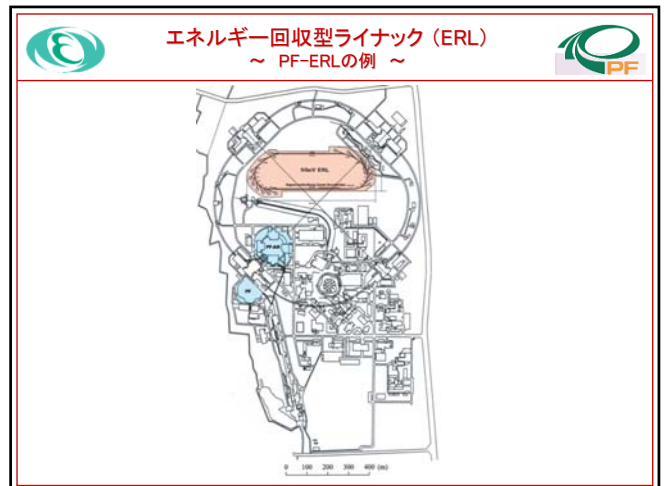
1. 2. 放射光源の歴史

1947年 電子シンクロトロンで初めて放射光が確認される
 1950年代～ 高エネルギー実験に寄生する形で放射光の利用が開始される (第1世代)
 1970年代～ 放射光専用施設の建設 (第2世代)
 1975年 SOR-Ring建設
 1982年 Photon Factory稼働開始
 1990年代～ 挿入光源を主体にした大型放射光施設の建設 (第3世代)
 1997年 SPring-8稼働開始
 2000年代～ 2～4GeVの中型放射光施設の建設 (新第3世代)

蓄積リング型光源
 加速器の規模や電子ビームのエネルギー等によって性能が決まる
 すでに性能限界に達しつつあり、大幅な性能向上は困難

↓

線形加速器をベースにした光源 (次世代放射光源)
 電子ビームは軌道を一度周回するだけなので軌道のボケが生じない
 入射器 (電子銃や低エネルギー領域の加速器) の性能限界までUpgrade可能



1. 3. 次世代放射光源 (XFELとERL)

**X線自由電子レーザー
(X-ray Free Electron Laser, XFEL)**

(TESLA Technical Design Report Part V)

LCLS (米国)、SCSS (日本)
European XFEL (欧州) など

**エネルギー回収型リナック
(Energy Recovery Linac, ERL)**

(Physics Today March 2002 p23-25.)

CHES-ERL (米国)、
PF-ERL (日本) など


- 2. PF-ERLについて**
2. 1. なぜERLなのか？
 2. 2. PF-ERLの仕様
 2. 3. PF-ERLの性能
 2. 4. PF-ERLの特徴 (まとめ)

2. 1. なぜERLなのか？

PF次期光源に要求される条件:

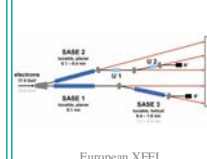
- 1) 先端性: 最先端科学を切り拓けること(既存光源を上回る性能)
- 2) 汎用性: 多数のユーザーに利用の機会を提供できること(多数のビームラインを建設できること)

新第3世代光源



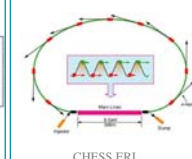
Canadian Light Source

XFEL



European XFEL

ERL



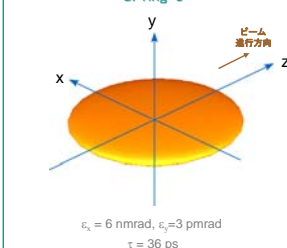
CHESS ERL

	先端性	汎用性	技術	その他(国内情勢)
新第3世代光源	△	◎	◎(容易)	SPring-8稼働中
XFEL	◎	△	○(やや困難)	SCSS建設中
ERL	◎	◎	△(困難)	PF-ERL

2. 3. PF-ERLの性能

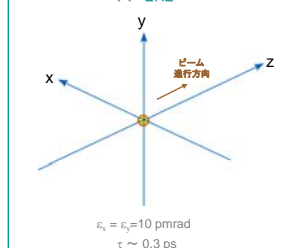
PF-ERLでは電子ビームのエミッタンスが大幅に改善されるため、光源性能が既存光源よりも大幅に改善される

SPring-8



$\epsilon_x = 6 \text{ nmrad}, \epsilon_y = 3 \text{ pmrad}$
 $\tau = 36 \text{ ps}$

PF-ERL



$\epsilon_x = \epsilon_y = 10 \text{ pmrad}$
 $\tau \sim 0.3 \text{ ps}$

2. 2. PF-ERLの仕様

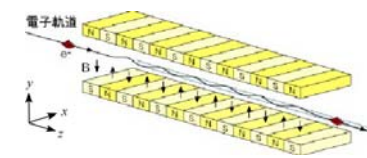
PF-ERLに要求される条件:

現在、PFのユーザーの約8割がX線利用者

- ➡ アンジュレーターで1次光で波長1ÅのX線を生成できること
- ➡ 電子ビームのエネルギー ~5 GeV
- ➡ 約400 mの超伝導線形加速器の必要性

ビーム・エネルギー	2.5~5.0	GeV
入射エネルギー	10	MeV
周長	1253	m
最大電流	100	mA
規格化エミッタンス	0.1	$\mu\text{m}\cdot\text{rad}$
エネルギー幅 (rms)	5×10^{-5}	
バンチ長 (rms)	1 ~ 0.1	ps
加速周波数	1.3	GHz
加速勾配	10 ~ 20	MV/m

アンジュレーター放射の利用

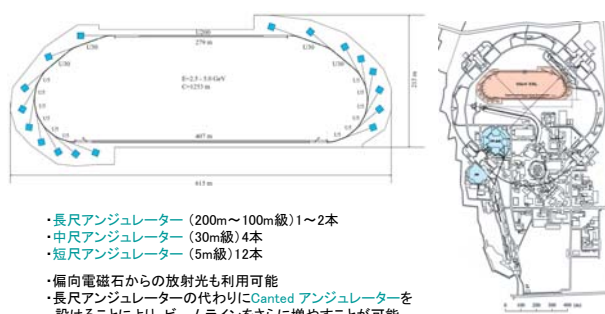


$I \propto N^2$

- 短パルス
- 微小円形光源
- 平行光

} 高輝度、高コヒーレンス...

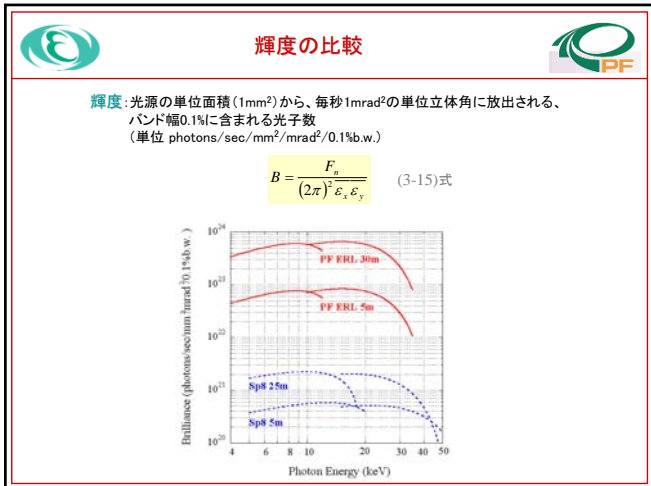
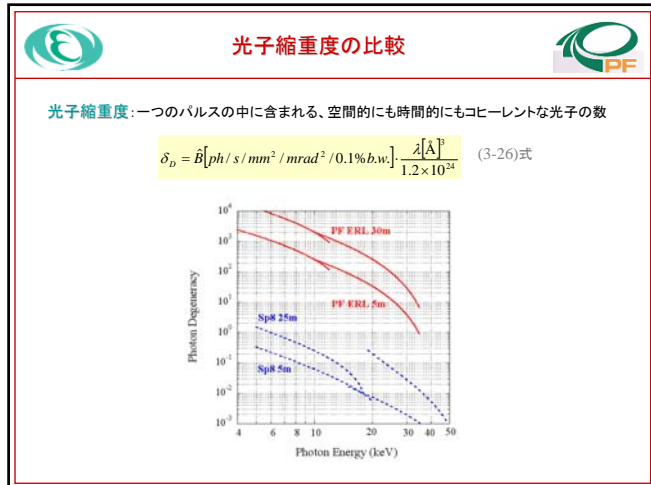
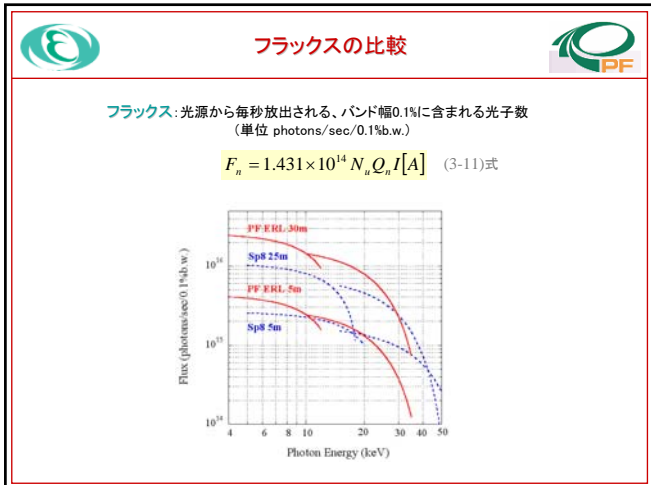
PF-ERLの仕様



- ・長尺アンジュレーター (200m~100m級) 1~2本
- ・中尺アンジュレーター (30m級) 4本
- ・短尺アンジュレーター (5m級) 12本
- ・偏向電磁石からの放射光も利用可能
- ・長尺アンジュレーターの代わりにCanted アンジュレーターを設けることにより、ビームラインをさらに増やすことが可能

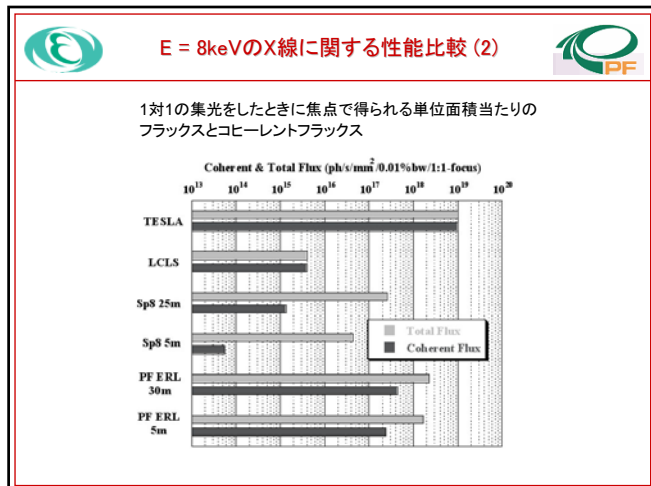
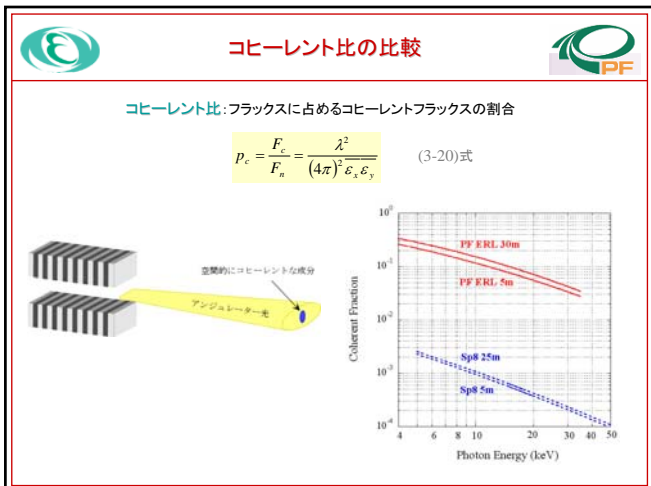
パルス長とビームサイズの比較

- パルス長
 - SPring-8 $\tau \sim 36\text{ps}$
 - PF-ERL $\tau \sim 0.3\text{ps}$
- ビームサイズ@光源 (E = 8keVのX線について)
 - SPring-8: $11\mu\text{m} \times 892\mu\text{m}$
 - PF-ERL: $18\mu\text{m} \times 18\mu\text{m}$



E = 8keVのX線に関する性能比較 (1)

	PF-ERL @ 5 GeV		SPRING-8 @ 8 GeV	
	100 mA	100 mA	100 mA	100 mA
アンジュレーターの長さ	30 m	5 m	25 m	5 m
光源サイズ (μm)	水平 (FWHM)	37.8	18.2	892
	垂直 (FWHM)	37.8	18.2	22.8
発散角 (μrad)	水平 (FWHM)	4.1	9.8	37.4
	垂直 (FWHM)	4.1	9.8	4.3
ビームサイズ @ 50m (μm)	水平 (FWHM)	244	510	2761
	垂直 (FWHM)	244	510	236
平均輝度 B (ph/s/0.1%/mm ² /mrad ²)	6.0x10 ²³	7.6x10 ²²	2.2x10 ²¹	5.0x10 ²⁰
コヒーレント比 p _c	19	15	0.14	0.13



2. 4. PF-ERLの特徴(まとめ)

- **短パルス**
SPring-8 $\tau \sim 36\text{ps}$ \rightarrow PF ERL $\tau \sim 0.3\text{ps}$
パルス長が約2桁短くなる。
- **微小円形光源**
垂直方向のサイズはほぼ同じだが、水平方向のサイズが数十分の一になり、ビームの形が円形になる。
- **高輝度**
平均輝度が約2桁高くなる。
- **高コヒーレンス**
回折限界に近い光が得られる。
コヒーレント比と光子縮重度が約2桁高くなる。
- **フラックス**
フラックスはほぼ同じ

参考文献

放射光将来計画検討報告
— ERL光源と利用研究 —
March, 2003

編集
高田昌樹 (KEK・加速器)
船山厚夫 (KEK・PF)

〒305-0801 茨城県つくば市大塚1-1
高エネルギー加速器研究機構
物質科学研究所 事務室 (Tel:029-864-5635)
加速器研究施設 事務室 (Tel:029-864-5205)

ホームページ
放射光研究施設 (<http://pfwww.kek.jp/>)

http://pfwww.kek.jp/outline/pf_future/studyreport1/index.html

放射光将来計画検討報告
— ERL光源と利用研究 —
March, 2003

編集
高田昌樹 (KEK・加速器)
船山厚夫 (KEK・PF)

〒305-0801 茨城県つくば市大塚1-1
高エネルギー加速器研究機構
物質科学研究所 事務室 (Tel:029-864-5635)
加速器研究施設 事務室 (Tel:029-864-5205)

ホームページ
放射光研究施設 (<http://pfwww.kek.jp/>)

3. PF-ERLの利用研究

3. 1. はじめに

3. 2. ナノビーム利用研究

3. 3. 短パルス利用研究

3. 4. コヒーレンス利用研究

3. 2. ナノビーム利用研究

X線集光素子の代表例

Kirkpatrick-Baez (KB) Mirror

Fresnel Zone Plate

光源点の縮小像が焦点に投影される

SPring-8では光源が扁平な形をしているため、ピンホールやスリットなどでビームを切る必要があり、強度の損失が大きい

PF-ERLでは光源は微小円形のため、強度の損失を抑えて、効率よくナノビームを生成することができる

➡ ビームサイズ $\sim 50\text{nm}$ (SPring-8) $\rightarrow \sim 10\text{nm}$ (PF-ERL)

3. 1. はじめに

- ERL光源を使ってはいけない実験
 - 1) フラックスが効く実験
(ERL光源で得られるフラックスはSPring-8と同程度)
 - 2) ピーク輝度や光子縮重度が効く実験
(ERL光源で得られるピーク輝度や光子縮重度はXFELには遠く及ばない)
- 放射光利用研究の将来展望 ~光源性能に応じた棲み分けの必要性
 - 1) XFEL利用研究
ピーク輝度や光子縮重度の高さを利用する研究
 - 2) ERL利用研究
平均輝度の高さを利用する研究 + 微小円形光源 短パルス 高コヒーレンス \rightarrow ナノビーム利用研究 短パルス利用研究 コヒーレンス利用研究
 - 3) 第2世代光源利用研究
フラックスさえあればよい研究

X線顕微鏡

走査型顕微鏡

Crystal monochromator, Zone plate objective lens, Aperture, Sample, Fluorescence detector, Transmission detector, Simple raster scanned

繊維虫類中の元素分布

Mn, Fe, Cu, Zn, C

結像型顕微鏡

Beam steering multilayer, Undulator, Crystal monochromator, Zone plate condenser, Zone plate objective lens, Sample, Spatially resolving detector

藻類の観察例

藻類の観察例

ナノビームによる微小結晶の構造解析 (1)

タンパク質の微小結晶の構造解析

通常の結晶 100 μm 10 ¹² 分子	現在の限界 10 μm 10 ⁹ 分子	サブミクロン結晶 1~0.1 μm 10 ⁶ ~10 ³ 分子
---	---	--

結晶化が困難で小さな結晶しか得られないタンパク質でも構造を解くことができる。

時間分解X線回折 (1)

光合成反応のダイナミクス研究

光スイッチング素子のダイナミクス研究

光合成反応中心タンパク質に吸収された光のエネルギーは~100 fsで化学エネルギーに変換される

2005年にKEK、レンズ第一大学、東京工業大学の共同研究によって発見された光スイッチ型有機分子EDO-TTFは、光を当てるとO2とCO2は体内という極めて短時間で、光の吸収率が50%以上も変化します。これは現在の有機分子デバイスの実現速度の5000倍で、超高度の光沢性材料として有望です。
M. Choh et al., Science, 307, (2005)

ナノビームによる微小結晶の構造解析 (2)

極端条件下での物質の構造解析

地球中心の高温高压状態 (360GPa, 6000K) という微小領域でなければ地上では実現できない極端条件下での物質の状態や構造を解明できる

時間分解X線回折 (2)

固体の融解過程の研究

FIG. 1: A schematic representation of a typical ultrafast X-ray scattering experiment designed to study the melting of ordered systems. In the first frame the optical laser pulse and the X-ray probe pulse strike the sample at the same time. The diffraction pattern is then used to determine the structural changes that have occurred. The second frame is an intermediate stage of melting. In the third frame the X-ray probe is allowed to strike the structure so that structural energy transfer process is visible, enabling the crystal structure and then allowing the scattering pattern.

3.3. 短パルス利用研究

スタティックからダイナミクスへ
~ 構造の解明から機能の解明へ ~

レーザポンプ・放射光プローブ法
放射光ポンプ・放射光プローブ法 (パルス分割)
放射光ポンプ・放射光プローブ法 (挿入光源2台使用)

Figure 5.3.1: Three schemes for pump-probe experiments employing light as a pump. Either external (femtosecond) laser sources (A) could be used, or split-beam techniques using FEL light at same wavelength (B) or different wavelengths (C) are proposed. In the last scheme, photons labelled "X" are generated with a different wavelength than photons labelled "X-ray" by an additional insertion device using the same electron bunch.

時間分解XAFS



溶液中有機分子のダイナミクス研究

光合成反応のダイナミクス研究

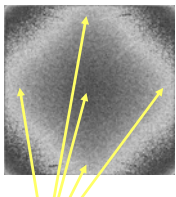
溶液中の有機分子 (cis-stilbene) のコヒーレント振動は~1ps

FIG. 12: Low-spin (LS) Nickel(II) Porphyrin Deactivation Pathway.
光合成のエネルギー変換過程について知るには金属ポルフィリンの励起状態のダイナミクスを調べる必要がある


3. 4. コヒーレンス利用研究 ～ X線コヒーレント回折顕微鏡 ～

フラウンホーファー回折像
(Log scale)



試料



コヒーレントX線

反復法のアルゴリズムによる像再生

$$p(x, y) \xrightleftharpoons[FT^{-1}]{FT} F(u, v) = |F(u, v)| \exp[i\phi(u, v)]$$

$p(x, y)$ の推定

→ FT

$G = |G| \exp(i\phi)$

実空間
拘束条件

↓

フーリエ空間
拘束条件



新しい $p(x, y)$

← FT⁻¹

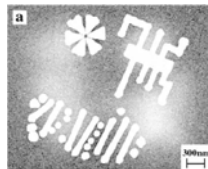
$G = |G| \exp(i\phi)$

結晶の得られない物質でも構造を解くことができる！

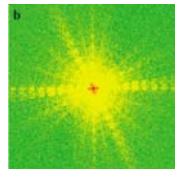
ニッケルの図形パターンの観察例

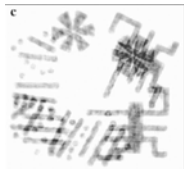
a



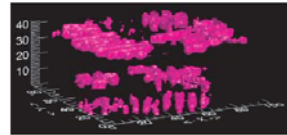
b



c





波長 2 Å
空間分解能 8 nm




空間分解能 50 nm

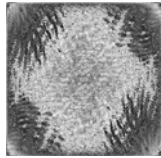
図 2.24: オーバーサンプリング法によって再生された試料の三次元像 (F). 各種の単位は 25nm.
J. Miao et al, Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 088303.


像再生の例 (1)



→ FFT







←

反復法による位相情報の
回復と試料像の再生

CPU: AMD Athlon XP 2400+
3000 iterations, 20 min

大腸菌の観察例

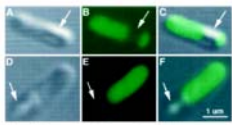
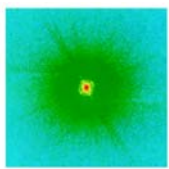


Fig. 3. E. coli expressing the indicator proteins. Individual bacteria are seen using transmitted light (a and d) and fluorescence (b and c). Yellow-green fluorescent protein (green) is seen throughout most of the bacteria except for one small region in each bacterium that is free of fluorescence. (Green), consistent with Fig. 2, c and f show the fluorescence (image superimposed on the transmitted light image).

J. Miao et al.: PNAS 100 (2003) 110.

KMnO₄で染色された蛋白質の分布構造
波長 2 Å、空間分解能 25 nm



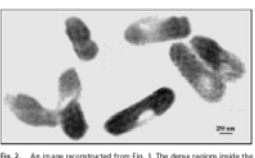






Fig. 2. An image reconstructed from Fig. 1. The dense regions inside the bacteria are likely the distribution of proteins labeled with KMnO₄. The semitransparent regions are devoid of yellow fluorescent proteins.

像再生の例 (2)





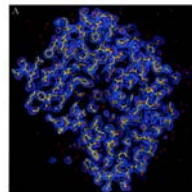
410 pixel x 463 pixel



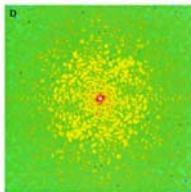
CPU: AMD Athlon XP 2400+
500 iterations, 25 min

単分子イメージングへの挑戦

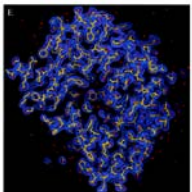





ルビスコ分子



回折像



再生像

J. Miao, K. O. Hodgson and D. Sayre: PNAS 98 (2003) 6641.



4. おわりに



■ コンパクトERL (E = 60~200MeV)の建設が急務！

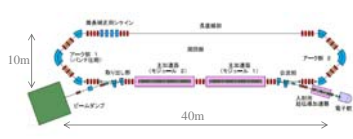


図 4.1: コンパクト ERL 施設の様相



図 4.2: 東山センタービルに近接するコンパクト ERL 施設の様相

- ・原理実証機
- ・要素技術の開発・改良
- ・光源としても魅力的で多くの利用研究が見込まれる
 - テラヘルツ・遠赤外領域の大強度のコヒーレント放射光の利用
 - レーザー逆コンプトン散乱によるX線光源(微小光源から短パルスのX線が得られる)
 - ダイナミクス研究、医学イメージング研究など
- ・汎用光源として一般社会(病院など)に広く普及する可能性あり



■ ERLの可能性のさらなる追求

例) ERLと共振器型X線レーザーの組み合わせ

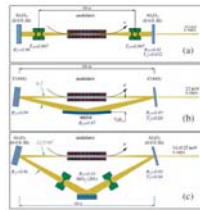


FIG. 2 (color). Schemes of x-ray cavities.

$\lambda = 1 \text{ \AA}$ のとき

$I = 10^9 \text{ photons/pulse}$

$f = 1 \sim 100 \text{ MHz}$

$t = 1 \text{ ps (rms)}$

$\Delta E = 2 \text{ meV (rms)}$

K.-J. Kim et al.: PRL 100 (2008) 244802.

加速器やX線光学等の専門家の英知と技術を結集する必要性

ERL光源実現に向けてご協力をよろしく願います



Thank you!