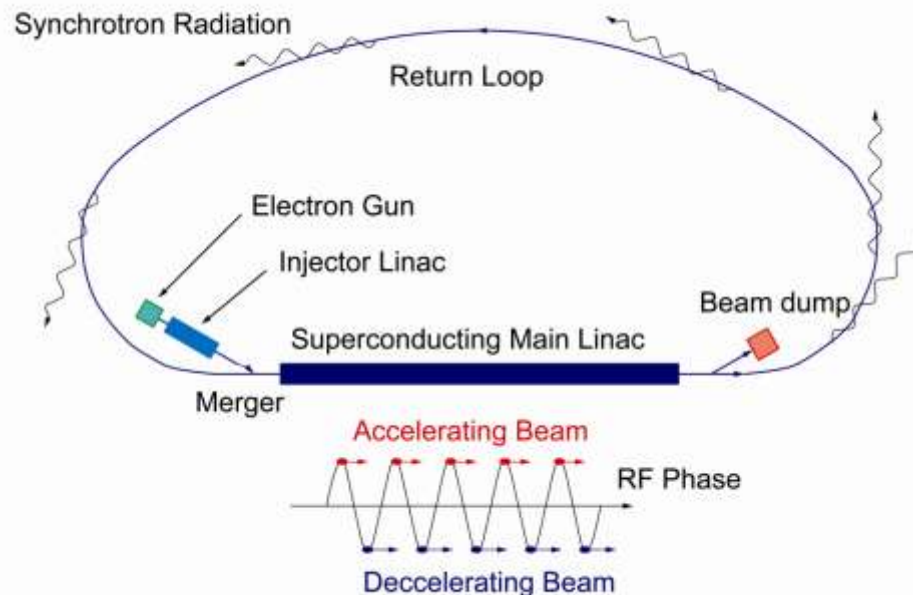


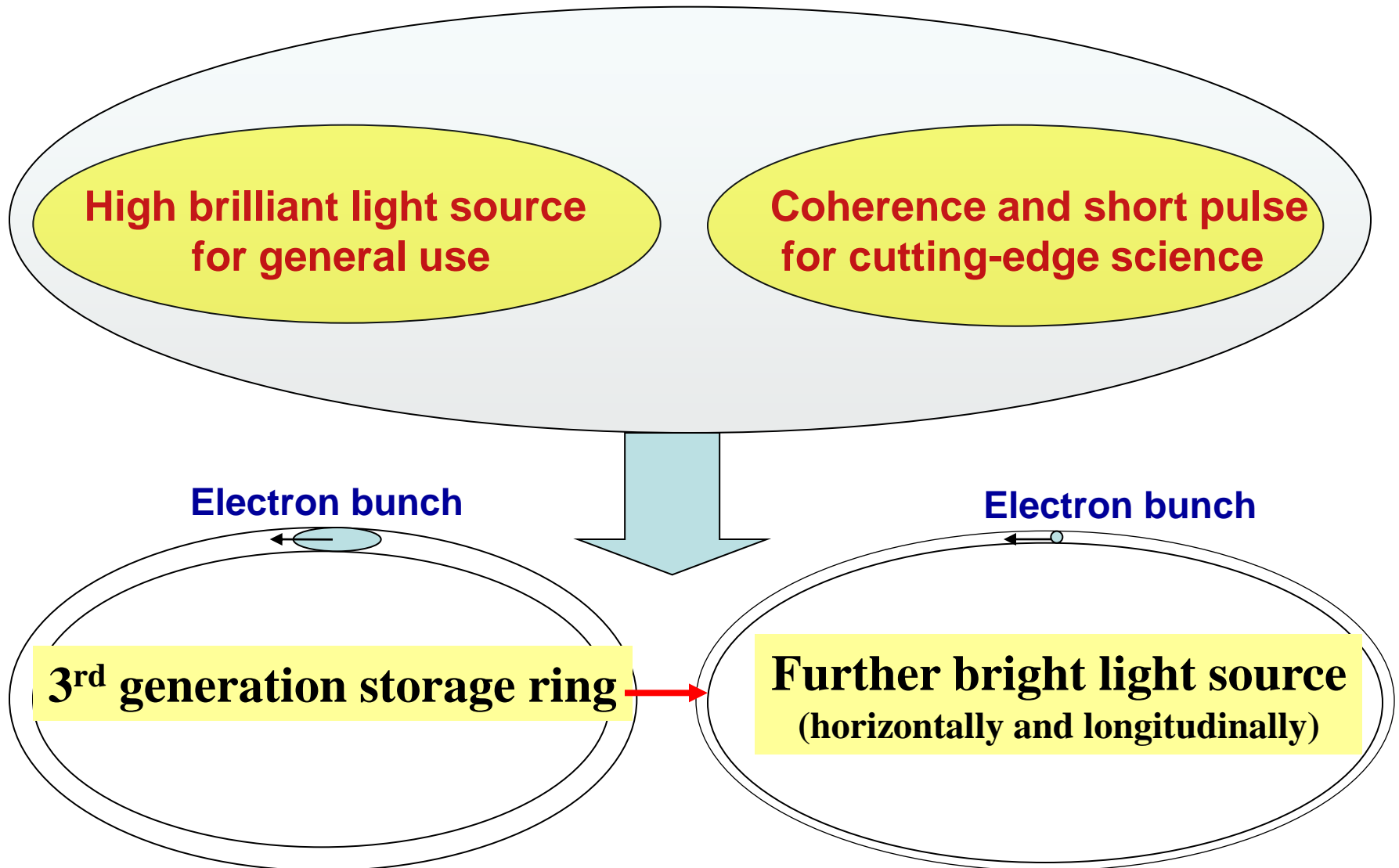
- ERLプロジェクトの概要 -

河田 洋

高エネルギー加速器研究機構・ERL計画推進室



What kinds of accelerator are needed?



**High brilliant light source
for general use**

**Coherence and short pulse
for cutting-edge science**

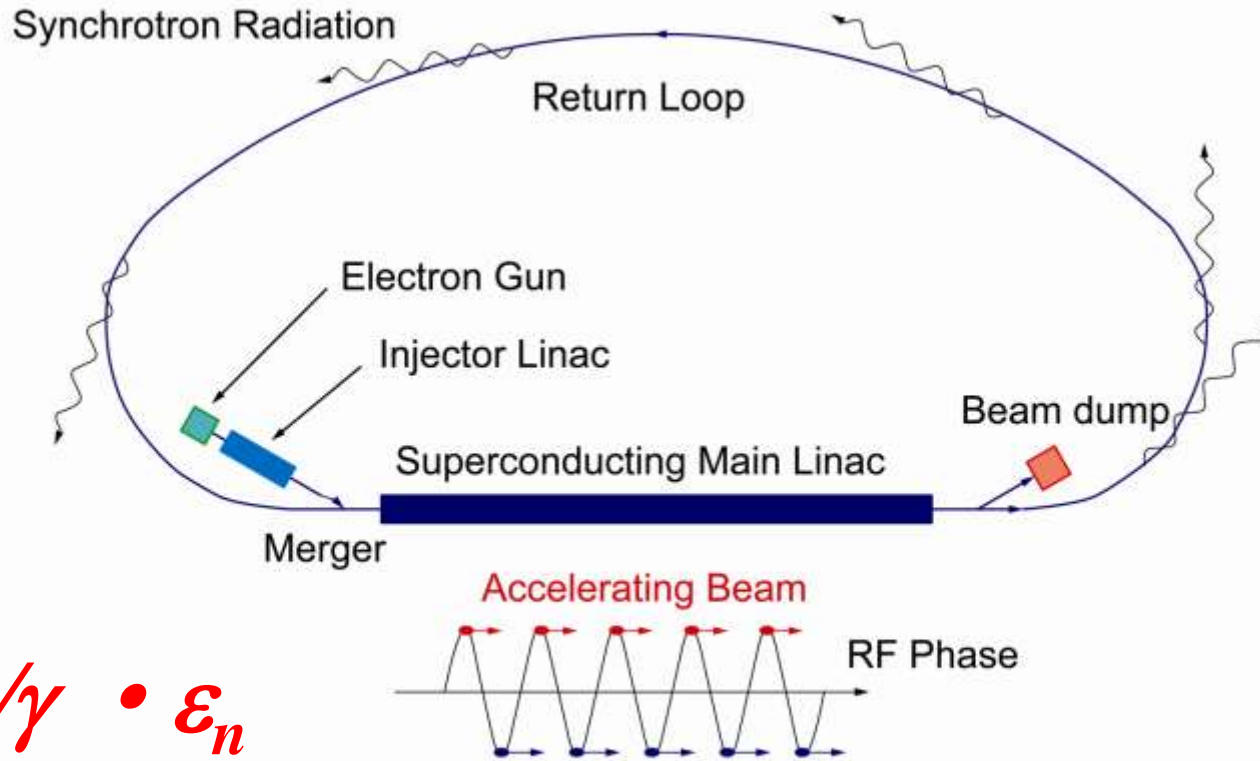
Electron bunch

Electron bunch

3rd generation storage ring

**Further bright light source
(horizontally and longitudinally)**

Energy Recovery Linac(ERL)



$$\varepsilon = 1/\gamma \cdot \varepsilon_n$$

2~3 orders of magnitude!

© *Linac based light source:*

- 1) *Emittance* : **10pmrad** (3rd generation source : 1~10nmrad)
- 2) *Short pulse* : **0.1~1 pico-second** (3rd generation source : ~0.1nano-second)

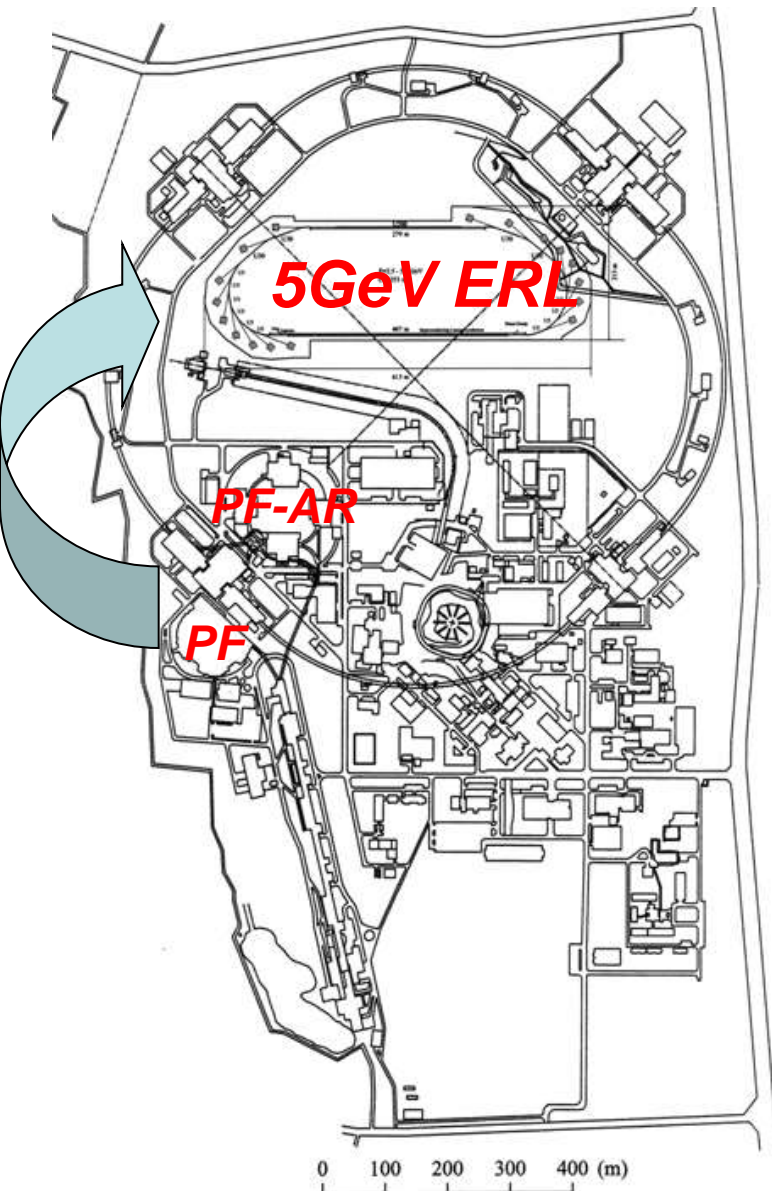
© *A large numbers of ID-beamlines*

超伝導加速空洞と常伝導加速空洞

- 加速空洞ではRF電磁波によって誘起される壁電流による発熱
⇒ 空洞自身の電気抵抗を小さくすれば良い
⇒ **超伝導加速空洞の出番！**
- もしも、超伝導加速を導入しないと？
⇒ KEKの現在のリニアックは常伝導加速空洞
(蓄積リングの入射器としては十分)
⇒ 繰り返し周波数は**50Hzのパルス運転が基本**。
- 超伝導加速空洞を用いれば、MHz、GHzの繰り返しが実現！
⇒ リニアック型の加速器で**CW運転が可能！**
⇒ 高精度のビームコントロールと安定化
- 高いQ値を実現
⇒ エネルギー回収先端加速器が可能。



KEK 5 GeV ERL放射光源(計画)の概要



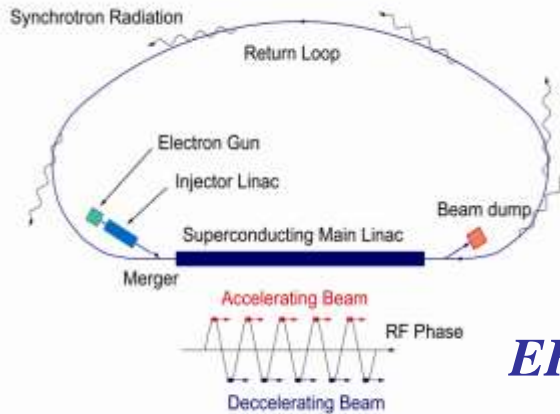
加速器の主要なパラメータ

	パラメータ
ビームエネルギー	5 GeV
平均ビーム電流	10 - 100 mA
規格化エミッタンス	0.1 - 1 mm·mrad
エネルギー幅 (rms)	$(0.5 - 2) \times 10^{-4}$
バンチ長 (rms)	1 - 3 ps (通常モード) ~ 100 fs (バンチ圧縮時)
加速周波数	1.3 GHz

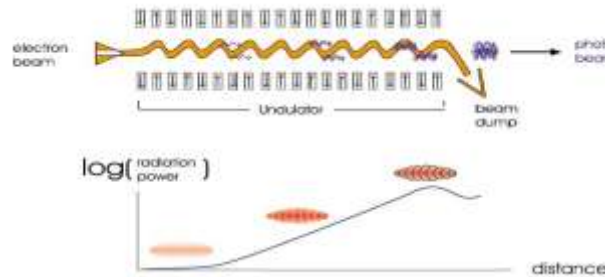
光源の代表的なパラメータ

	パラメータ
スペクトル範囲	30 eV - 30 keV
挿入光源からの平均輝度	$10^{21} - 10^{23}$ ph/s/mm ² /mrad ² /0.1%bw
平均フラックス	$> 10^{16}$ phs/s/0.1%bw
挿入光源台数	- 30 台

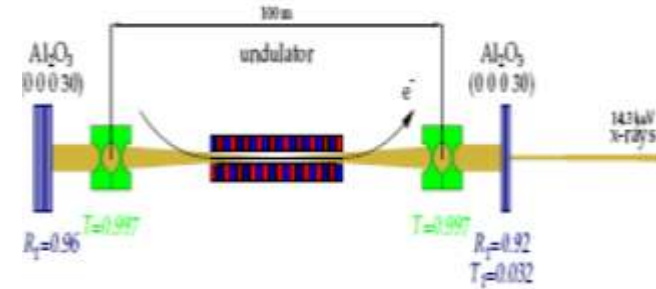
ERL, SASE-FEL & XFEL-O の比較



ERL



SASE-FEL



XFEL-O

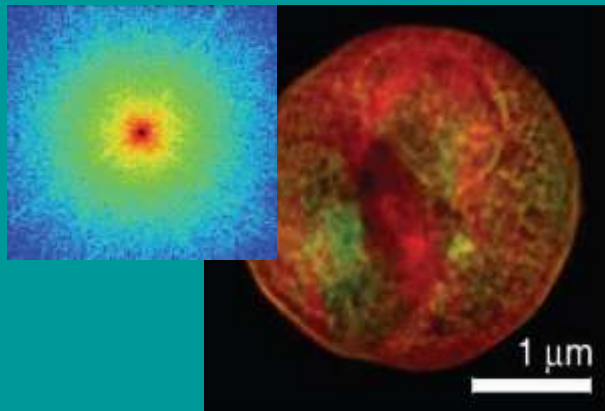
	平均輝度	ピーク輝度	繰り返し周波数 (Hz)	コヒーレント度	バンチ幅 (ps)	BL数	特徴
ERL	$\sim 10^{23}$	$\sim 10^{26}$	1.3G	$\sim 20\%$	0.1~1	~ 30	非破壊測定
XFEL-O (Option)	$\sim 10^{27}$	$\sim 10^{33}$	$\sim 1\text{M}$	100%	1	few	シングルモードのFEL
SASE-FEL	$\sim 10^{22\sim 24}$	$\sim 10^{33}$	100~10K	100%	0.1	~ 1	Oneショット測定
3rd-SR	$\sim 10^{20\sim 21}$	$\sim 10^{22}$	$\sim 500\text{M}$	0.1%	10~100	~ 30	非破壊測定

(brilliance : photons/mm²/mrad²/0.1%/s @ 10 keV)

Grand challenges for sciences (I)

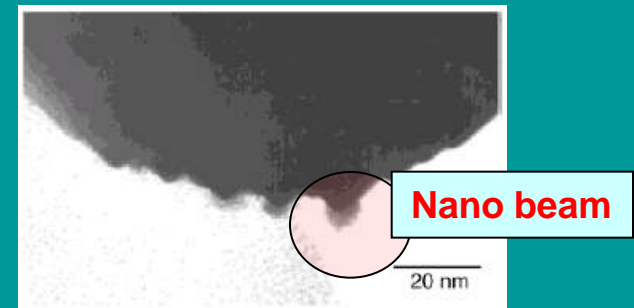
～ 不均一系物質群やナノサイエンス ～

Function in a cell

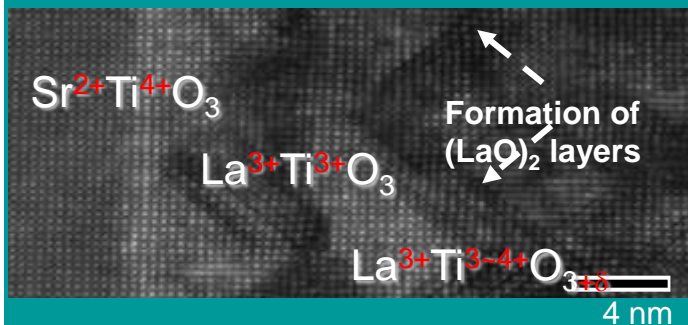


biology
and
chemistry

Catalysis chemistry

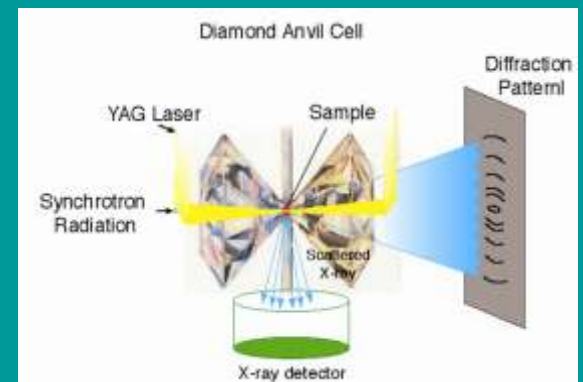


Nano-materials at interface



materials,
energy
and
environment

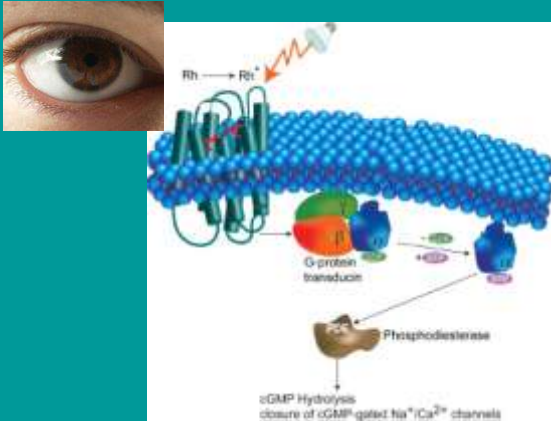
Extreme condition



Grand challenges for sciences (II)

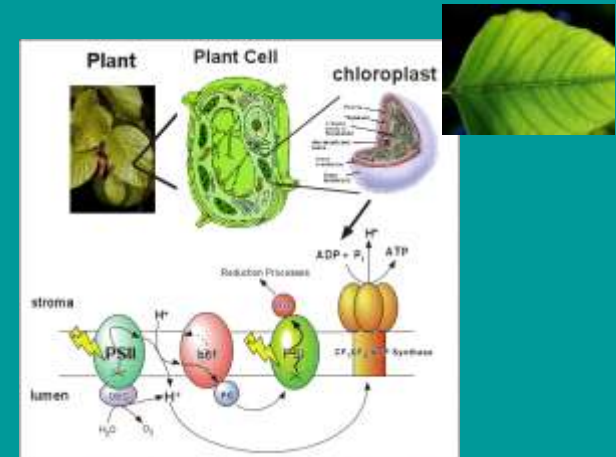
~ 非平衡状態 や化学反応 ~

visual sensing

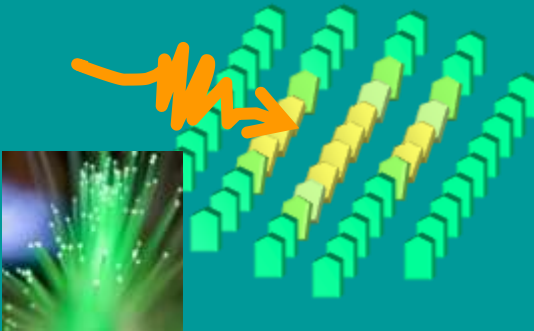


biology
and
chemistry

photosynthesis

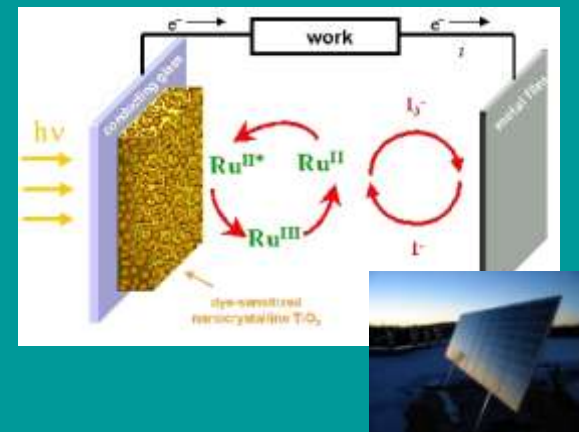


ultrafast photo-switching

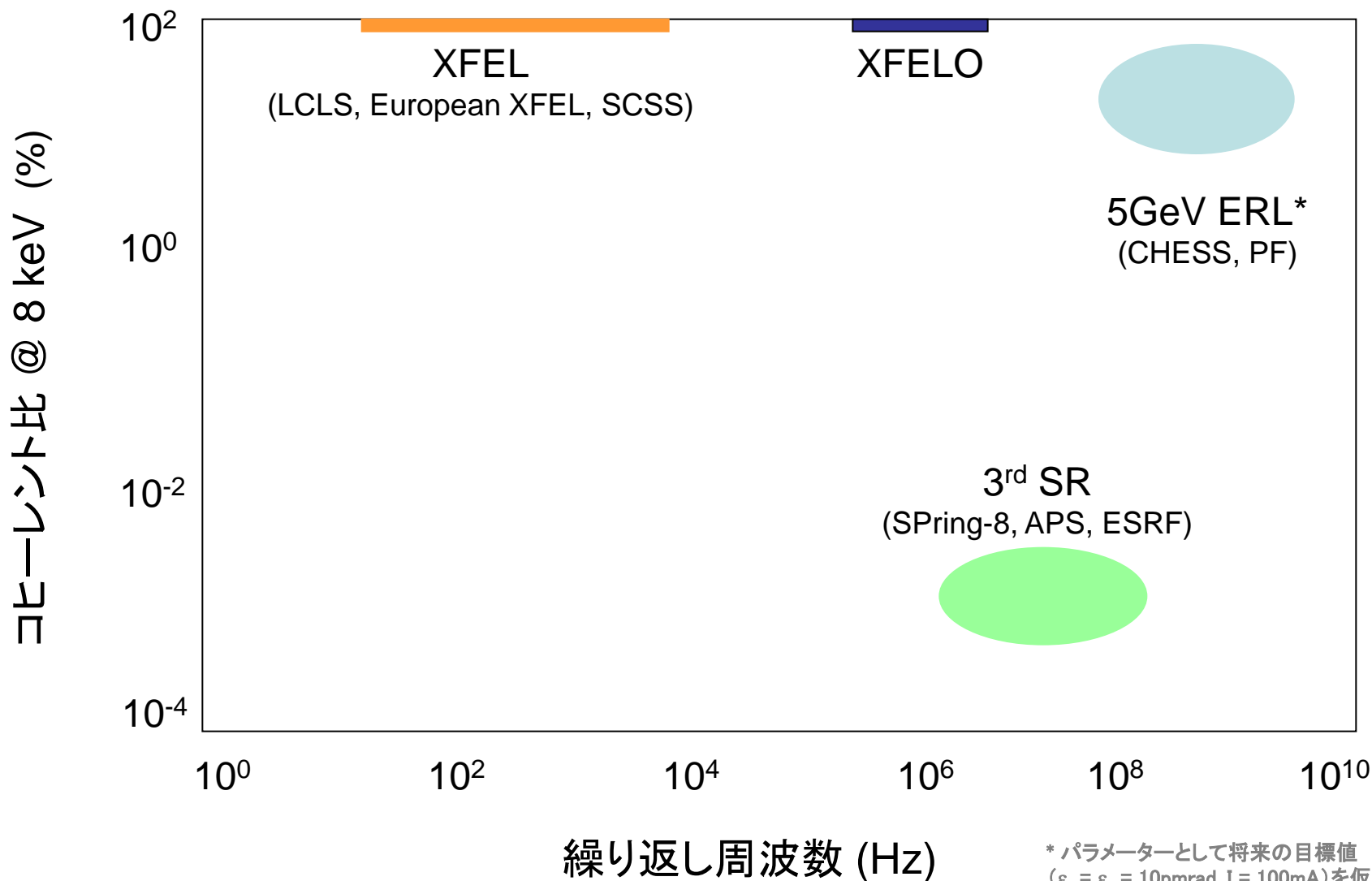


materials,
energy
and
environment

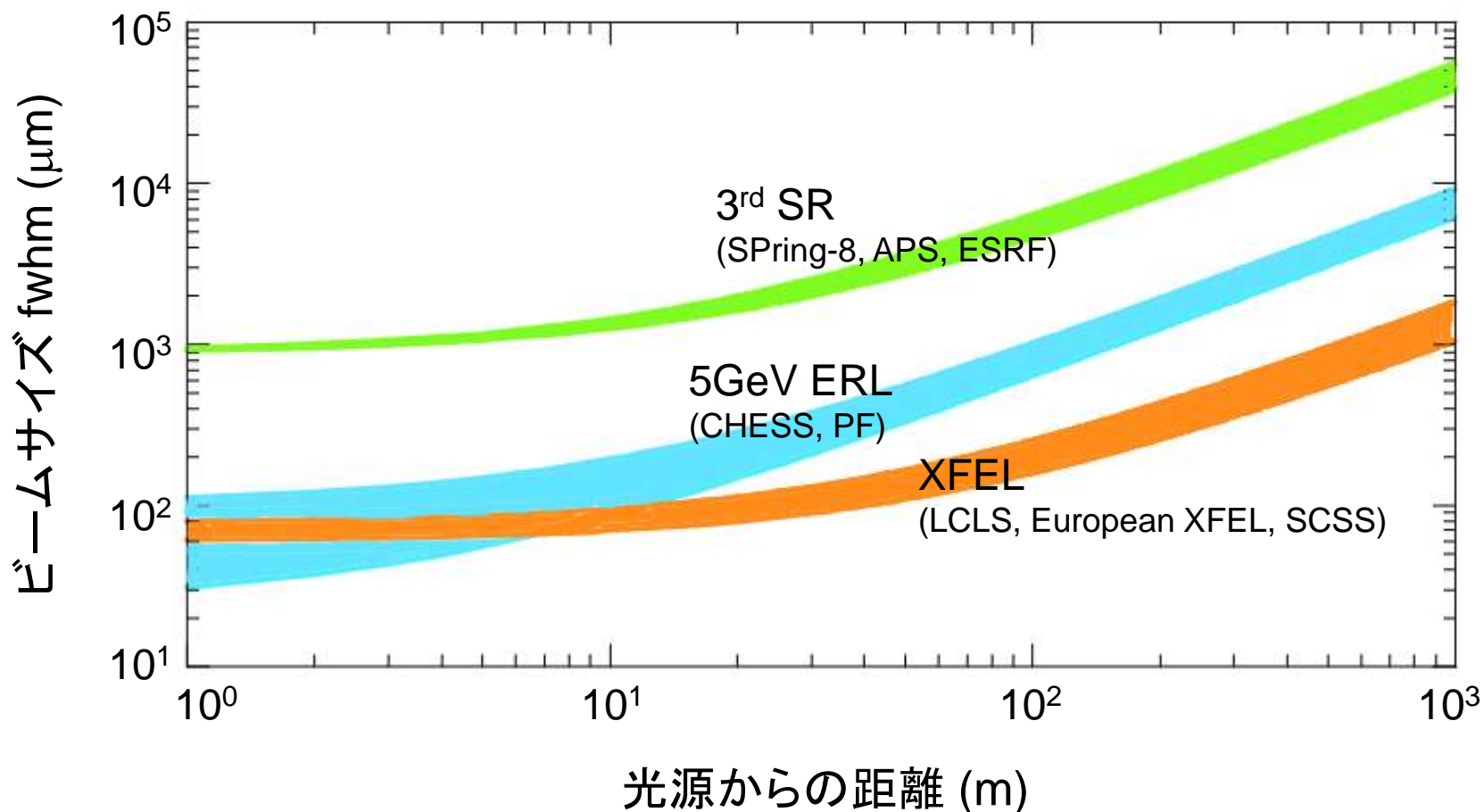
solar cell



次世代光源 コヒーレンスの利用



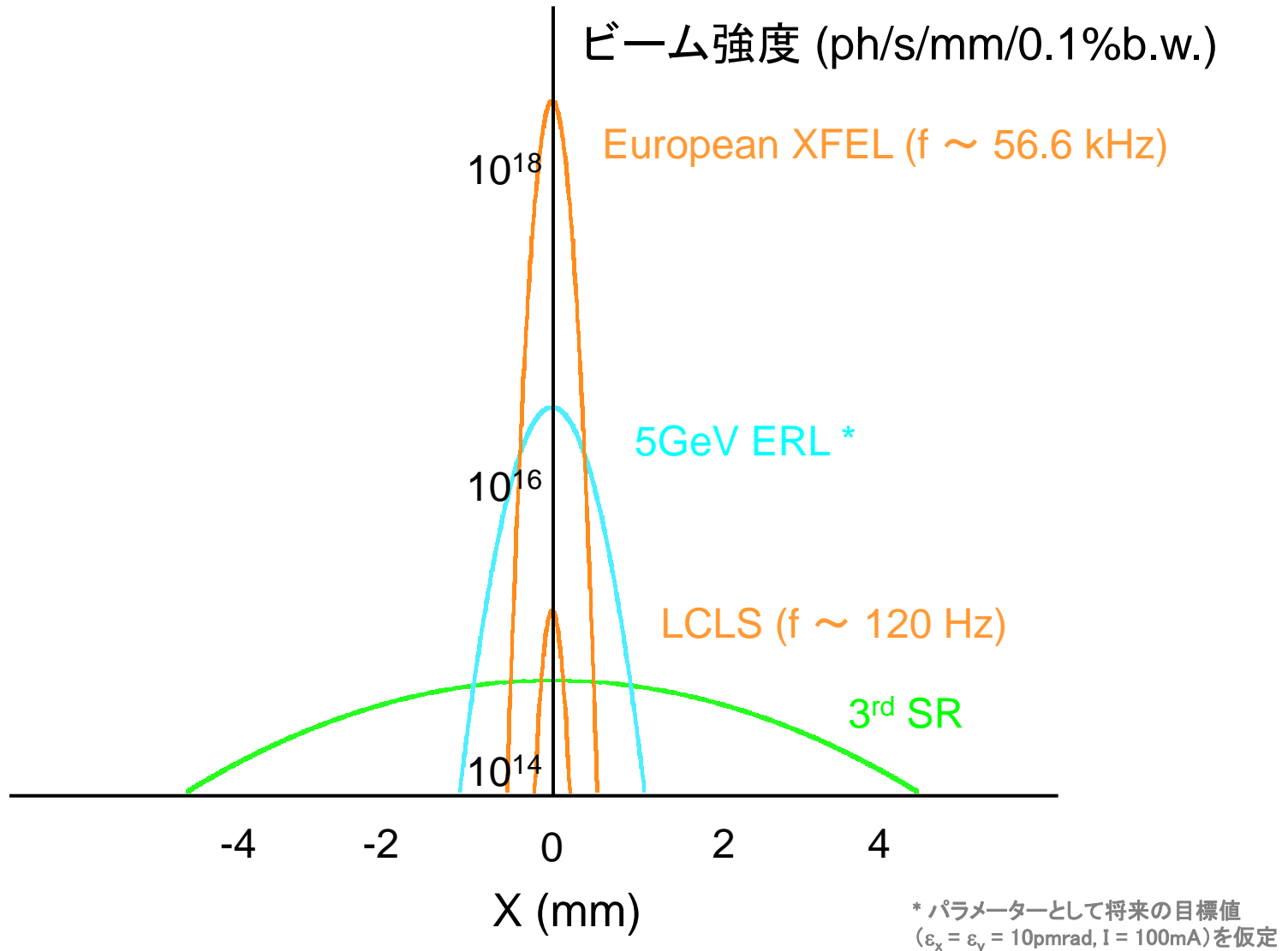
水平方向のビームサイズ @ E=8keV



補注) 垂直方向のビームサイズについて

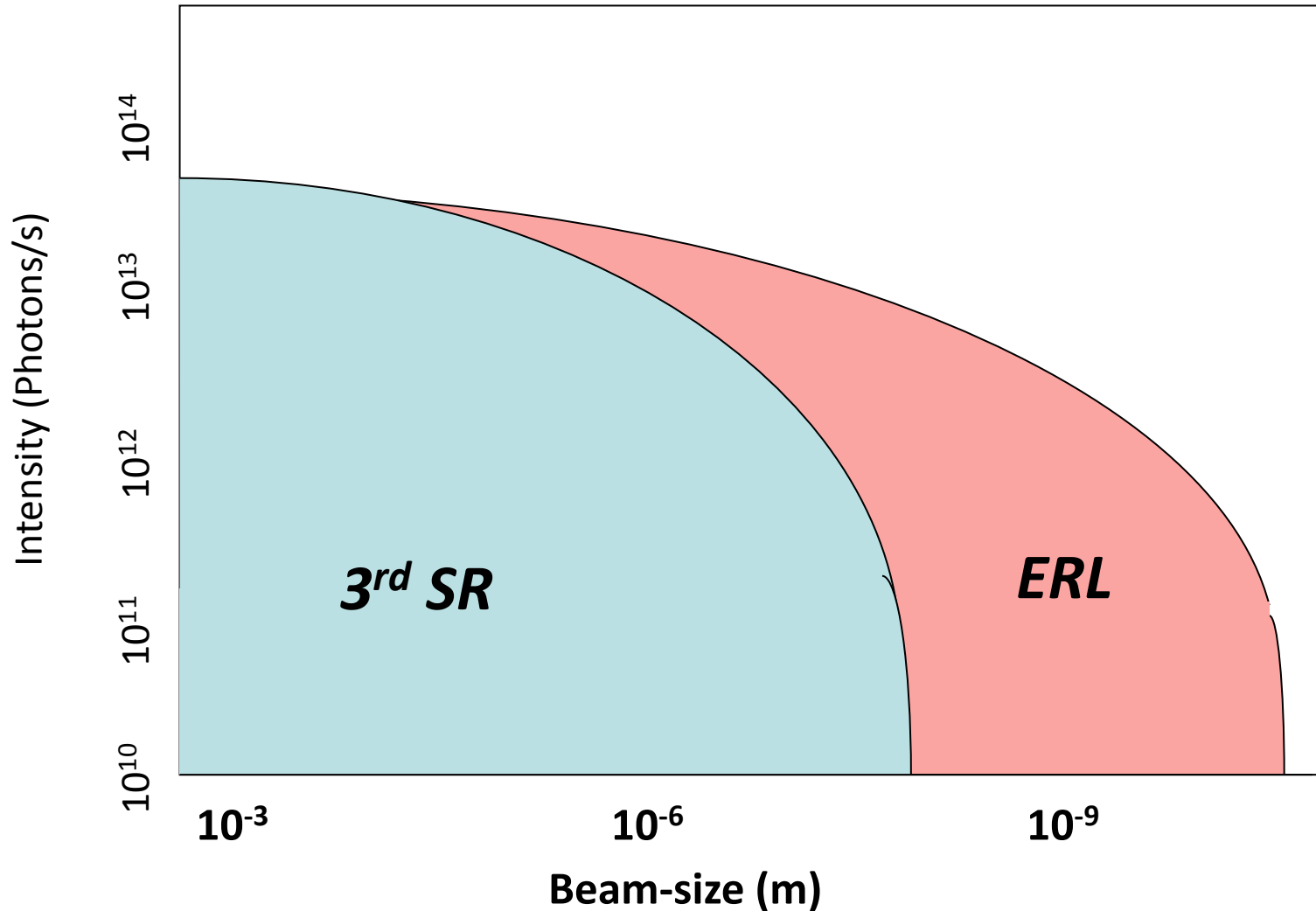
- ・XFELとERLでは水平方向のビームサイズと同じ
- ・3rd SRでは5GeV ERLとほぼ同じ

水平方向の強度分布 @ E=8keV, L=100m



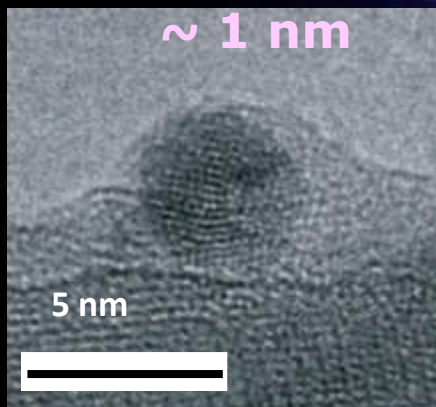
集光ビームサイズと強度

(schematic view)

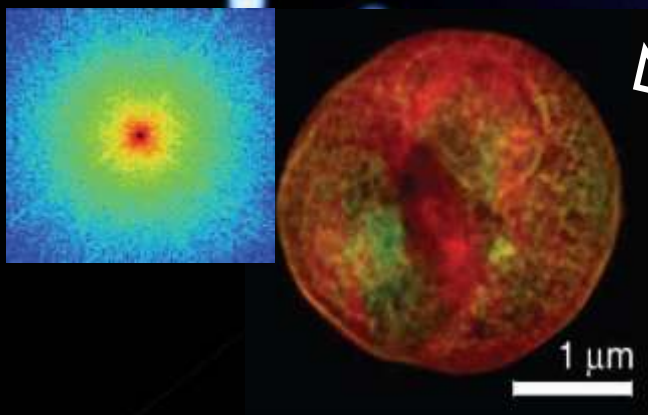


不均一系での 高い空間分解能

catalytic chemistry



cellular structure
and function ~ (1-10) nm



~100 nm

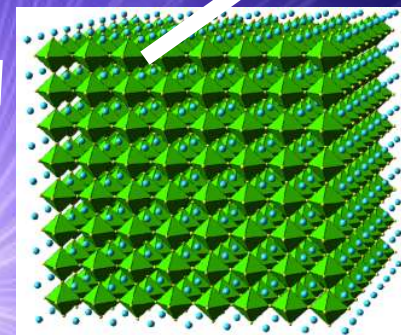
10 nm
current
light
sources

1 nm

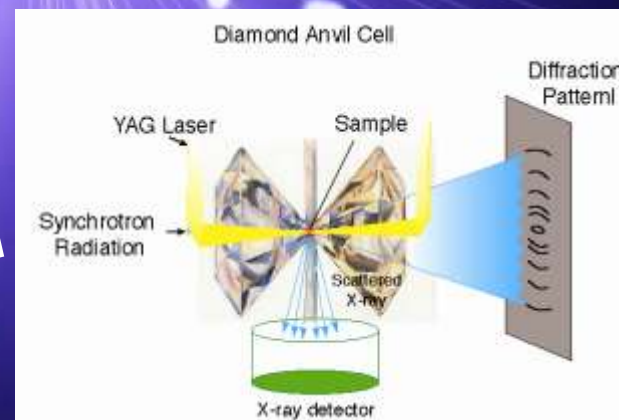
future
light
sources

1 pm

Nano-crystal ~ 1 nm



extreme condition
~ (1-10) nm



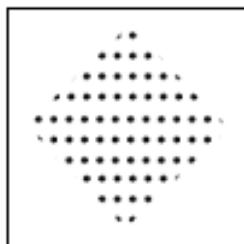
*Nano beam
Technology*

不均一系物質での高い空間分解能

[X線コヒーレント回折顕微鏡]

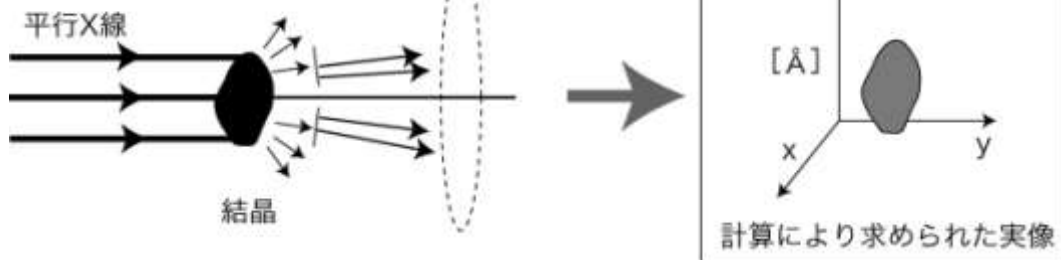
<結晶の場合>

回折像は周期的な斑点となる。



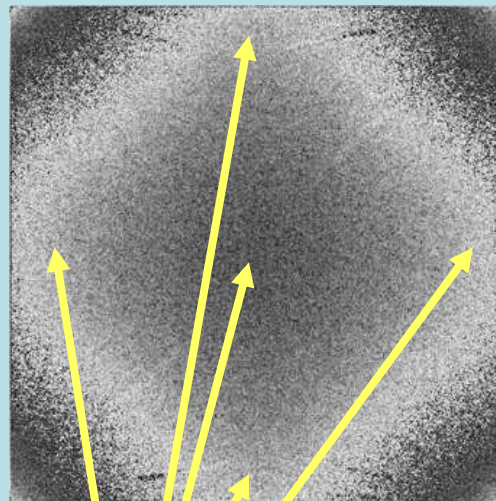
回折像

レンズの代わりに
計算によって
実像を求める



<結晶ではない場合>

回折像は連続的な分布



試料

コヒーレントX線

$\rho(x, y)$ の推定 \xrightarrow{FT} $G = |G| \exp(i\phi)$

実空間
拘束条件

フーリエ空間
拘束条件

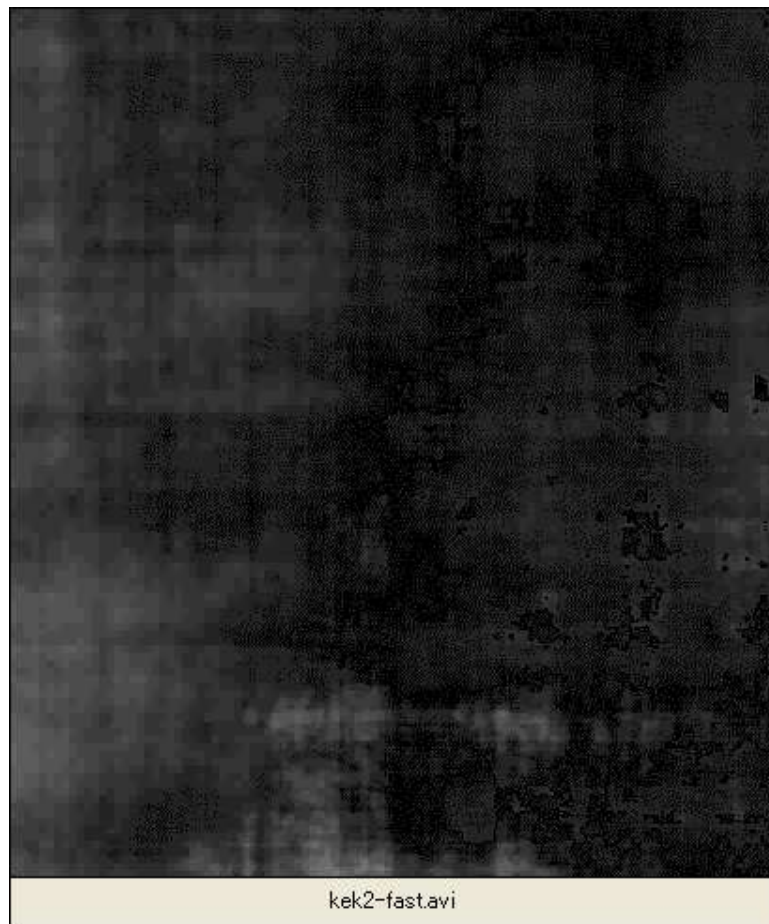
反復法のアルゴリズムによる像再生

新しい $\rho'(x, y)$ $\xleftarrow{FT^{-1}}$ $G = |F| \exp(i\phi)$

平野馨一氏提供



410 pixel x 463 pixel

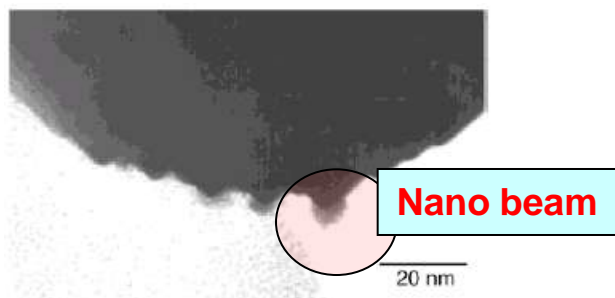


CPU: AMD Athlon XP 2400+
500 iterations, 25 min

Catalysis Chemistry

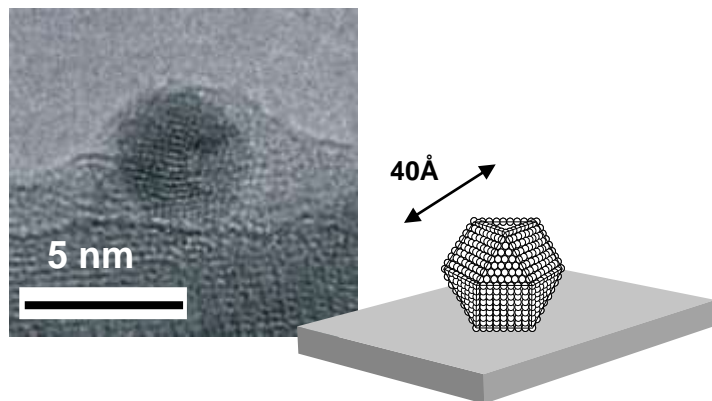
ナノビームを用いて触媒活性部位のみの情報をその場観測

active site (species) of catalysts



NaTaO₃:La + NiO catalyst

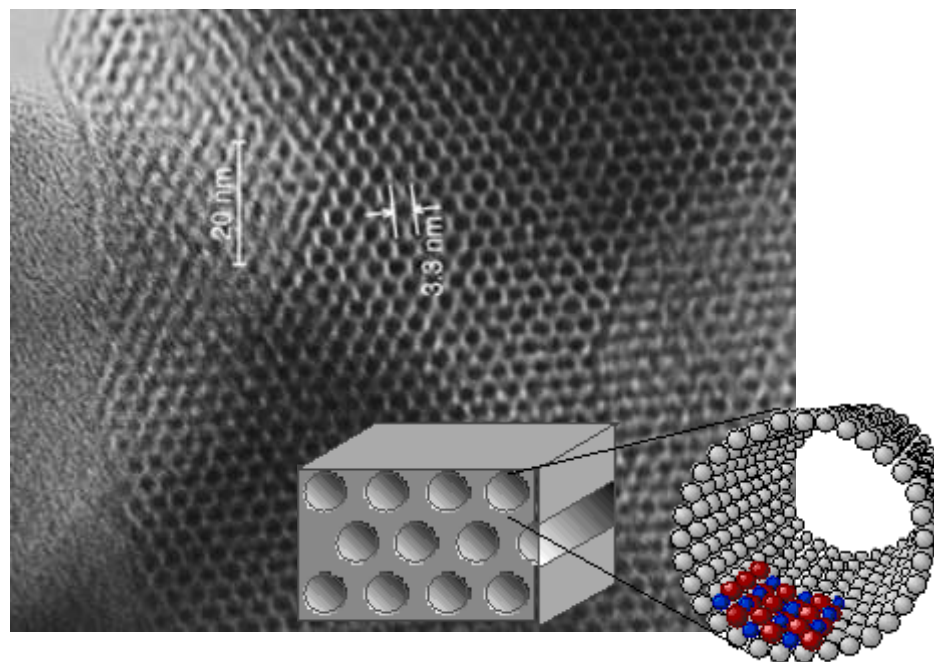
A. Kudo, *et al. J. Am. Chem. Soc.* (2003)



Pd nanocluster

K. Kaneda, *et al. J. Am. Chem. Soc.* (2002)
J. Am. Chem. Soc. (2004)

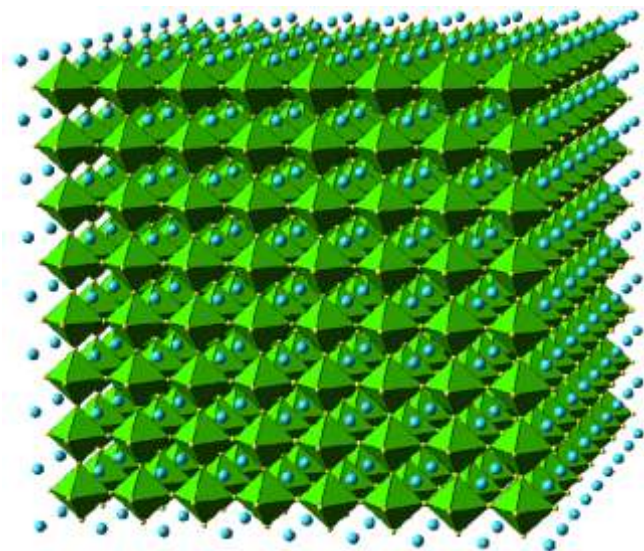
Nano beams enable to evaluate local structure and electronic state of active site (species) for various catalysts



MCM-41 (zeolite)

N. Ichikuni *et al.* (2005)

新機能性材料の鍵となる電荷、スピン、軌道の秩序 (不秩序)をナノ微粒子、原子層で解明



Current SR

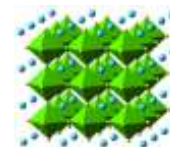
Surface & Interface



Laser MBE



Nano-size

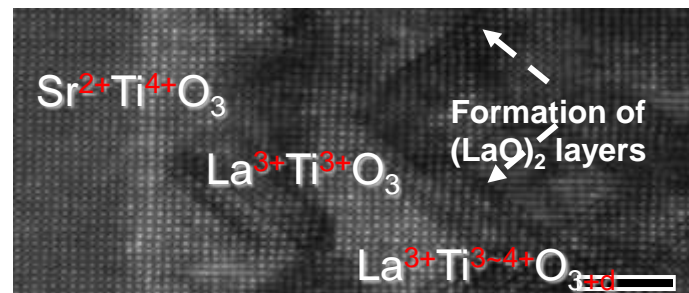
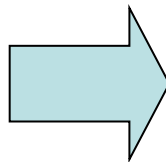


Nano Crystal of $(3\text{nm})^3$

---> 60%: Surface

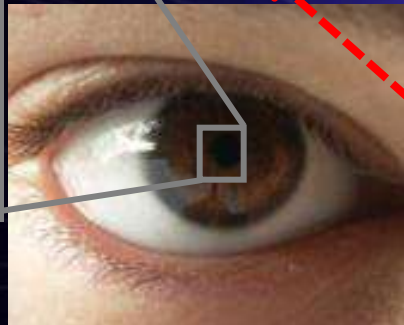
Expectations of Novel Electronic State!

ERL

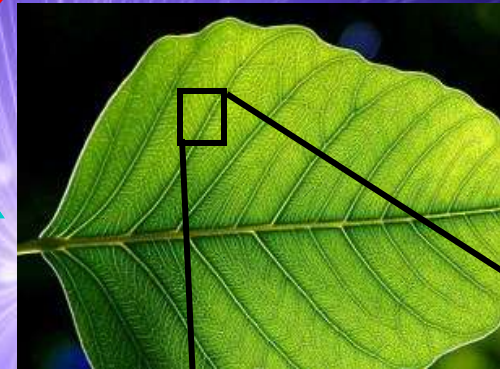




Rhodopsin
~200 fs



Photosynthetic
reaction in leaves
~ 100 fs



1 fs = 10^{-15} s

bunch-
slicing

future
light
sources

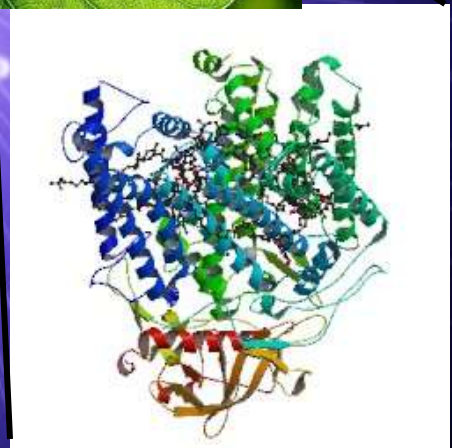
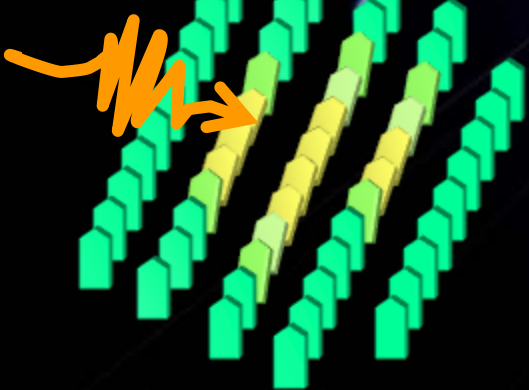
1 ps = 10^{-12} s

current
light
sources

1 ns = 10^{-9} s

フェムト秒サイエンス への展開

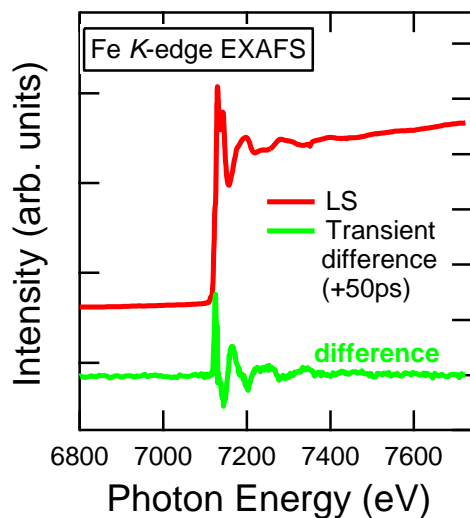
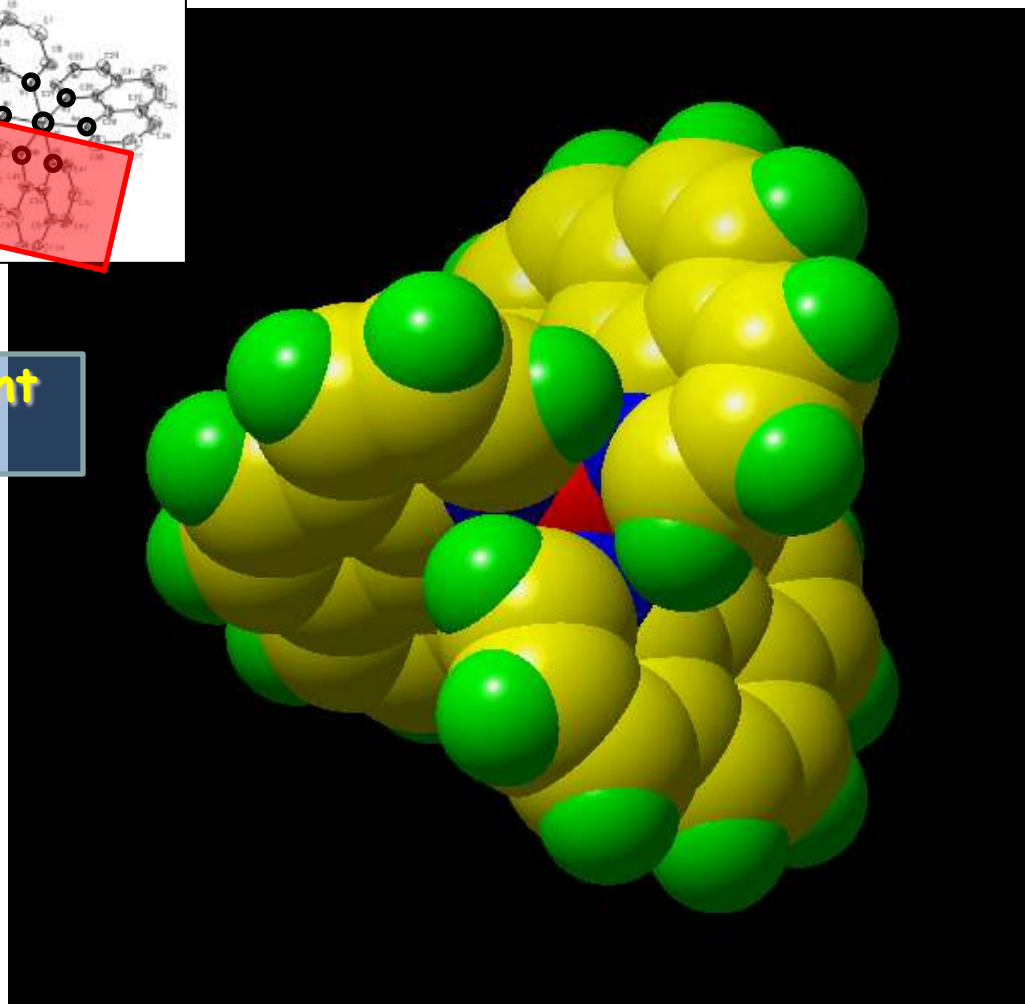
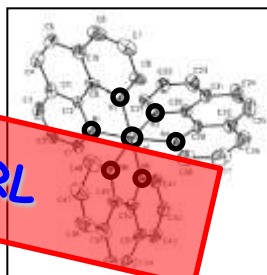
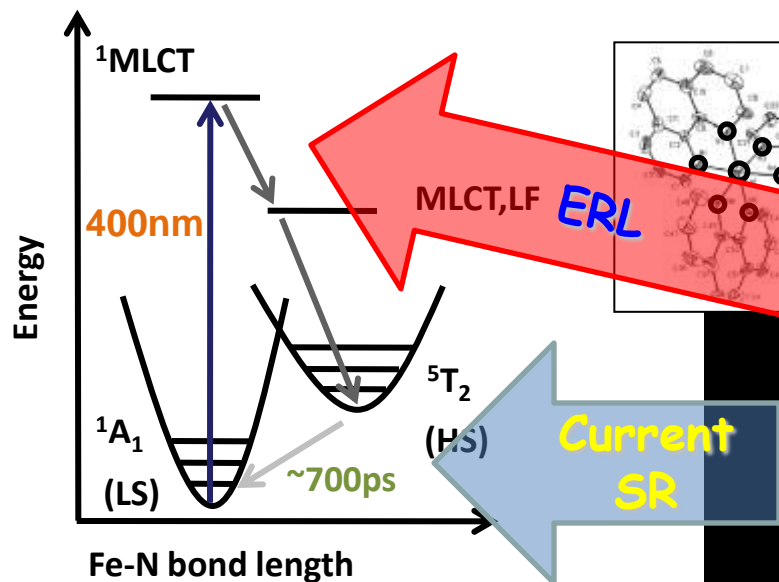
Fast photo-switching
of metal-to-insulator
phase ~ 1 ps



*Femto-sec Beam
Technology*

光触媒の活性プロセスの解明

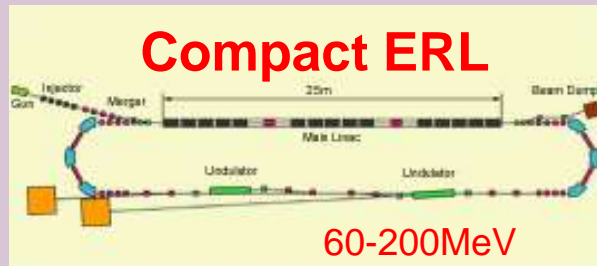
- How do molecules act after absorbing photons ? -



先端的リング型放射光(ERL)へのロードマップ

- ・高輝度電子銃
- ・電子銃励起レーザー
- ・超伝導空洞
- ・実証運転

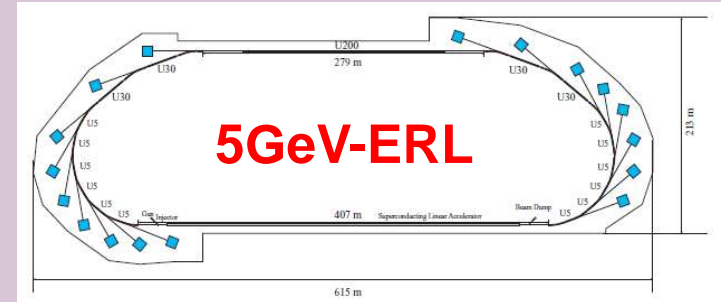
ERL加速器要素技術開発



~2013年

- ・ナノメートルサイズの局所構造解析
(生命科学、電子・磁気デバイス等々)
- ・フェムト秒サイエンス
(高速デバイス、光触媒等々)

先端的リング型放射光源



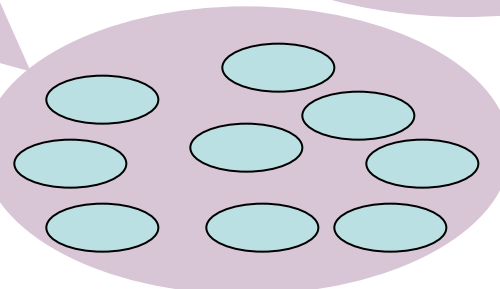
2013年~

テラヘルツ大強度干渉光源

- ・人体を含む大面積イメージング
- ・コヒーレントフォノンの制御

レーザーコンプトンX線源

- ・フェムト秒サイエンス
- ・微小光源X線イメージング



先端的小型X線イメージング装置

(医学臨床応用)

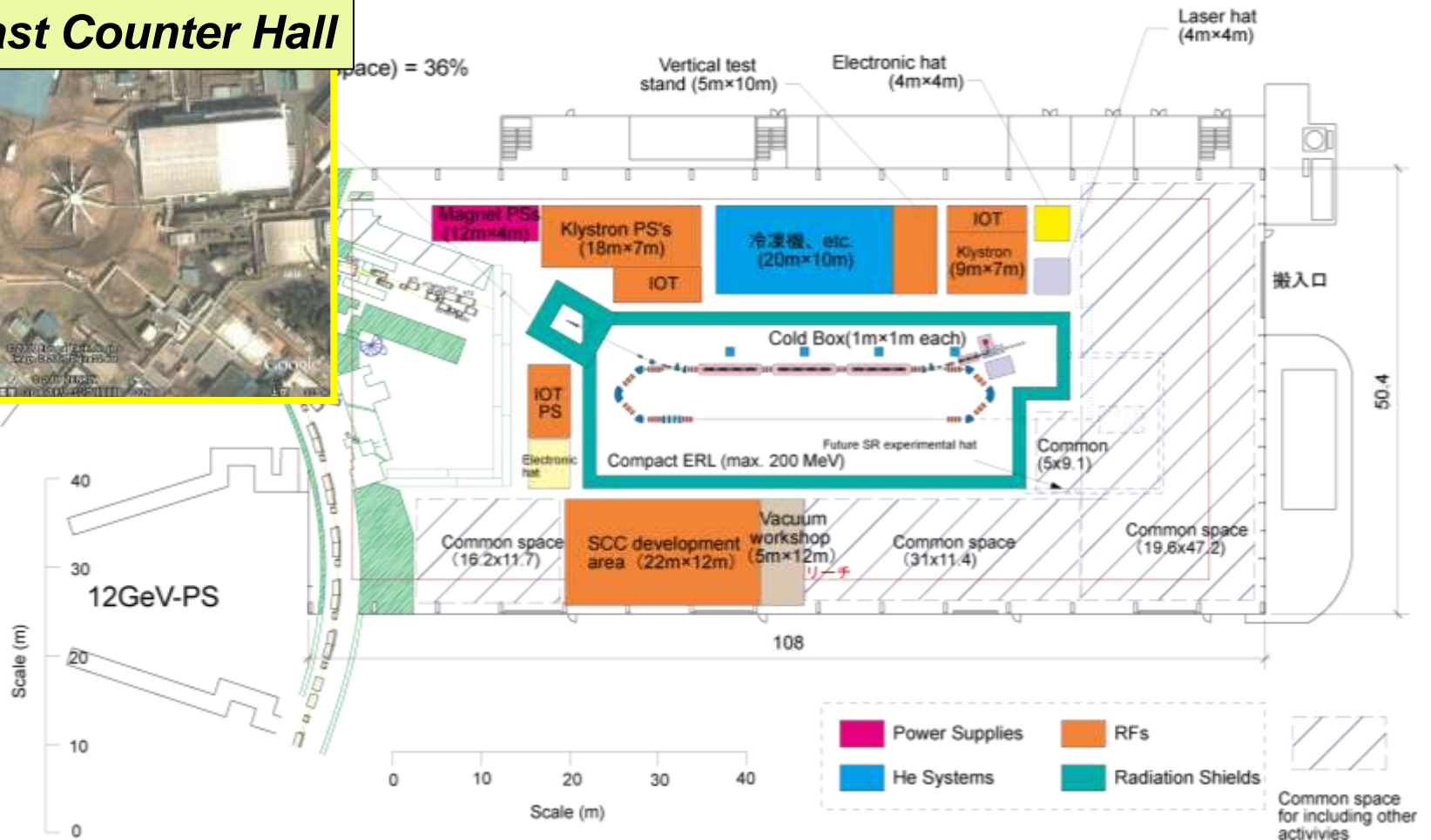
コンパクトERLの建設に向けて (東カウンタホールへの展開)



PS East Counter Hall

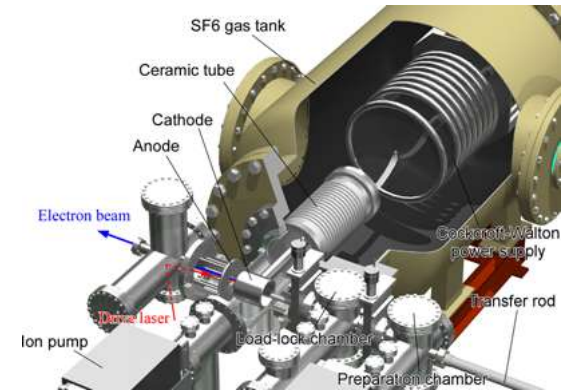
He compressors
(24m×11m)

Plot plan of east counter hall, Dec. 04, 2008, rev.0g

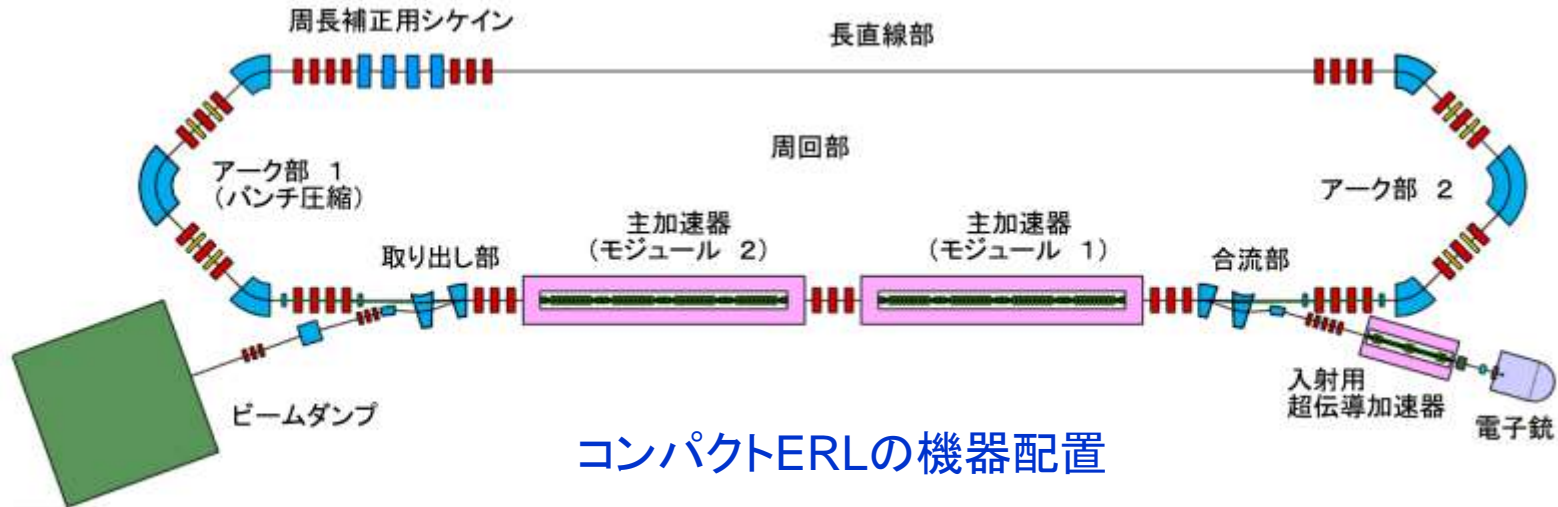


開発のポイント

1. 超高輝度電子ビームの生成
 - DCフォトカソード電子銃の開発
 - ドライブレザーの開発
2. 超伝導加速空洞の開発
 - 入射器用
 - 主リニアック用
3. その他の要素の開発
 - ビーム診断、サブピコ秒タイミング同期、...
4. エミッタンス保存(特に入射器と合流部)
 - 空間電荷(横、縦)、RF focusing、CSR
5. ビーム力学上の諸問題
 - BBU、CSR、resistive wall、イオン、バンチ圧縮
6. 放射線防護



コンパクトERLの設計



主要なパラメータ

ビームエネルギー	60 – 85 MeV (最大200 MeV)
ビーム電流	10 – 100 mA
規格化エミッタンス $\varepsilon_n = \varepsilon/(\gamma\beta)$	1 mm·mrad (77 pC/bunch) 0.1 mm·mrad (7.7 pC/bunch)
エネルギー広がり (rms)	$< 3 \times 10^{-4}$
バンチ長 (rms)	1 – 3 ps (通常周回モード) 約 100 fs (バンチ圧縮モード)*

* CSRによるエミッタンス増大を許容

KEK Report 2007-7/
JAEA-Research 2008-032



Conceptual design report

KEK Report 2007-7/JAEA-Research 2008-032

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)



T. Agoh, A. Enomoto, S. Fukuda, K. Furukawa, T. Furuya, K. Haga, K. Harada, S. Hiramatsu, T. Honda, Y. Honda, K. Hosoyama, M. Izawa, E. Kako, T. Kasuga, H. Kawata, M. Kikuchi, H. Kobayakawa, Y. Kobayashi, T. Matsumoto, S. Michizono, T. Mitsunashi, T. Miura, T. Miyajima, T. Muto, S. Nagahashi, T. Naito, T. Nogami, S. Noguchi, T. Obina, S. Ohsawa, T. Ozaki, S. Sakanaka, H. Sasaki, S. Sasaki, K. Satoh, M. Satoh, M. Shimada, T. Shioya, T. Shishido, T. Suwada, T. Takahashi, Y. Tanimoto, M. Tawada, M. Tobiyama, K. Tsuchiya, T. Uchiyama, K. Umemori, S. Yamamoto

Japan Atomic Energy Agency (JAEA)



R. Hajima, H. Iijima, N. Kikuzawa, E. J. Minehara, R. Nagai, N. Nishimori, M. Sawamura

Institute for Solid State Physics (ISSP), University of Tokyo



N. Nakamura, A. Ishii, I. Ito, T. Kawasaki, H. Kudoh, H. Sakai, T. Shibuya, K. Shinoe, T. Shiraga, H. Takaki

UVSOR, Institute for Molecular Science



M. Katoh

Hiroshima University



M. Kuriki

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)



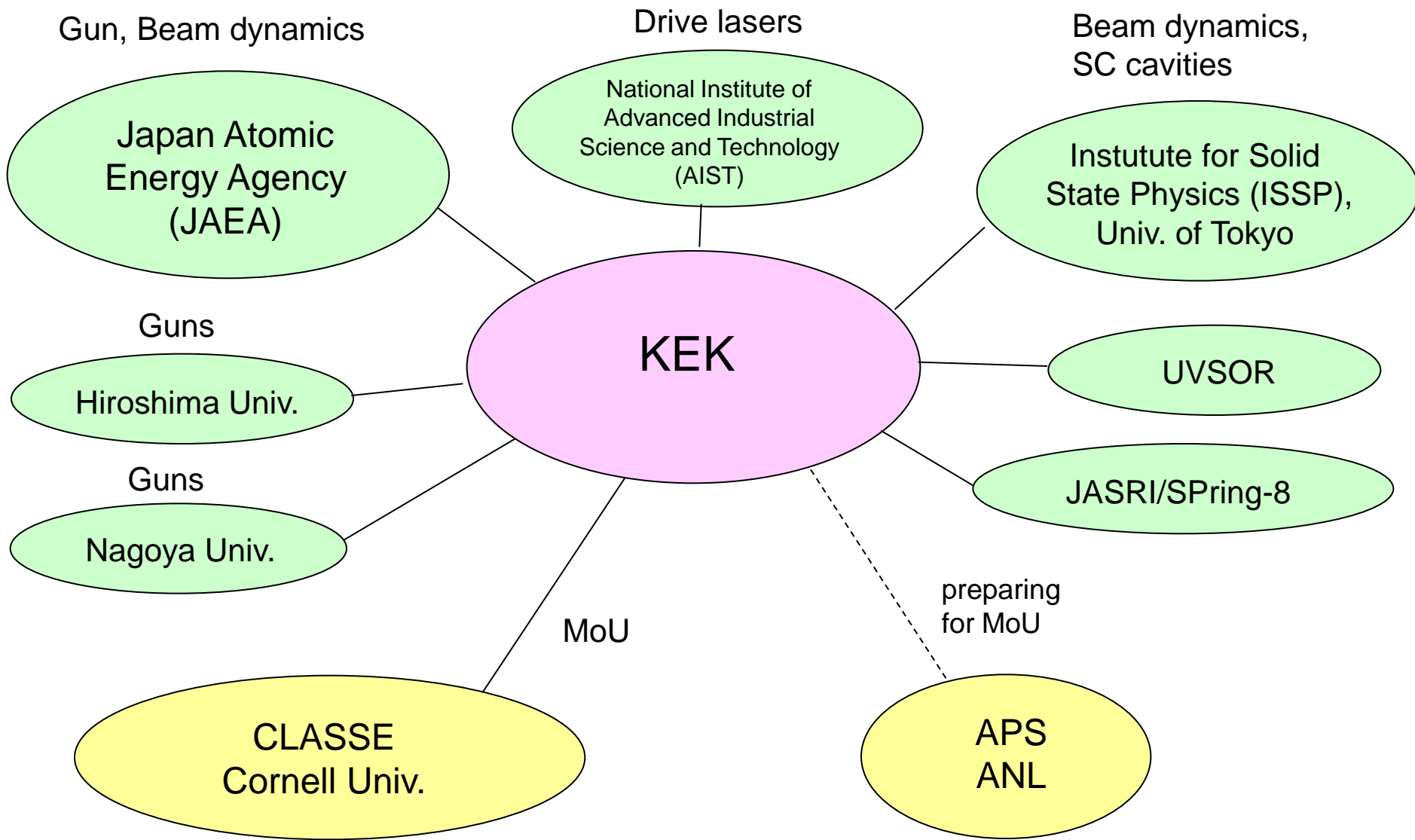
D. Yoshitomi, Y. Kobayashi, K. Torizuka

JASRI/SPRing-8



H. Hanaki

ERL開発に向けた協力体制



ERL開発研究の現状



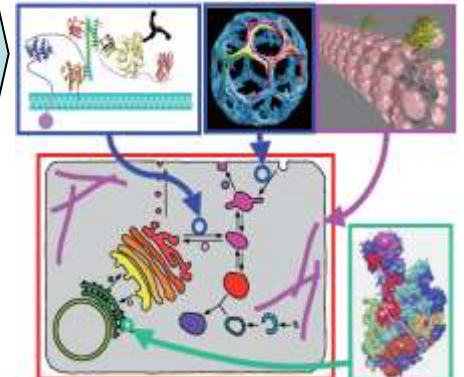
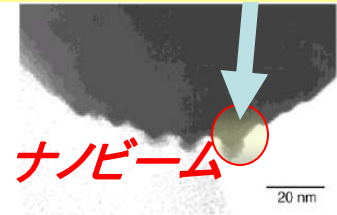
- **主加速部超伝導空洞試作機(主にKEK、ISSP、JAEA)**
(シングルセルモデルから9セル空洞試作し開始へ⇒来年度は実機作製へ)
- **電子銃(JAEA、広島大、名古屋大、KEK)**
(250kV電子銃テストを行いつつ、500kV電子銃の設計をスタート)
- **フォトカソードドライブレザーの開発開始(主にAIST、ISSP、KEK)**
(ファイバーレーザーをベースにした100MHzのオシレーター⇒1.3 GHzのオシレーターへ)
- **前段加速部超伝導空洞試作機の製作開始(主にKEK)**
(来年度から実機のモジュール設計にかかる)
- **冷凍機システムのシステム設計の原案作成が終了(主にKEK)**
(今年度の補正予算で整備開始)
- **RF電源系の開発研究を開始**
(CW/300kWクライストロンの開発、電源は補正予算で)
- **周回部ラティス設計・バンチ圧縮のシミュレーションが終了(主にKEK、UV-SOR)**
- **東カウターホールでコンパクトERLを建設することが決定(KEK内部)**
(今年度の補正予算で東カウターホールの整備開始)
- **コンパクトERLのCDR完成。**

ERLの必要性

ナノマテリアルの機能(反応)解明
(例:光触媒機能の解明)

次期放射光源として何が必要か？

- 1) サブピコ秒パルス: 3rd-SRの2~3桁の短パルス化
- 2) コヒーレントX線: 20%以上 (3rd-SRの2~3桁の向上)
- 3) 非破壊観測: SASE-FELとの相補性
- 4) 高繰り返し(1.3GHz): 非破壊・精密測定
- 4) 実験ステーション数: 30~50 (広い研究分野をカバー)



細胞中たんぱく質の機能解明

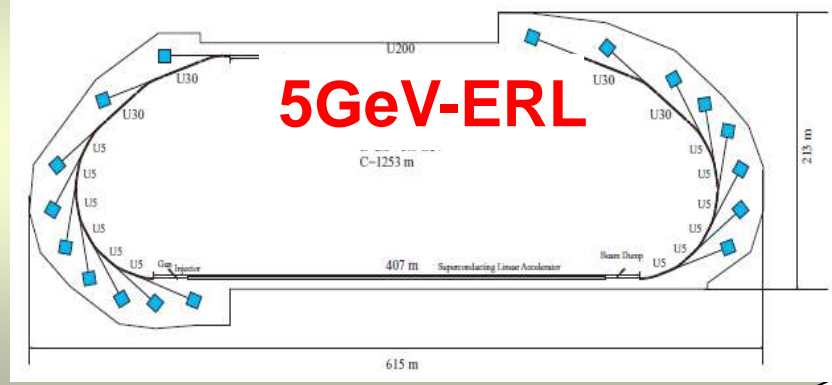
5GeVクラスのエネルギー回収型ライナック(ERL)

日本放射光学会の提言

(「先端的リング型光源計画特別委員会」)

国内ネットワーク: 原研、東大物性研、産総研、UV-SOR、広島大、名古屋大、等々

国際ネットワーク: CHESS (Cornell Univ), APS (Argonne)



5GeV・ERL実現への道筋 (コンパクトERLから5GeV・ERLへ)

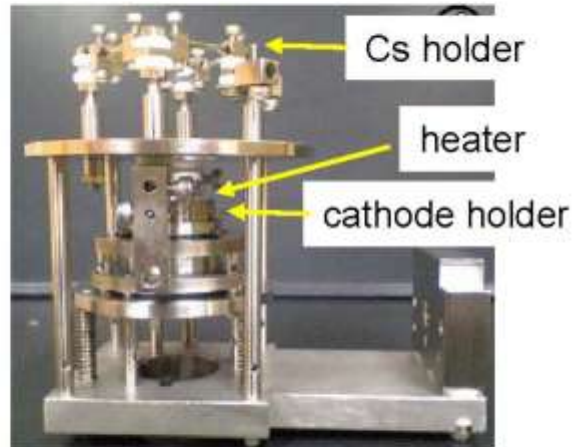
先ず、コンパクトERLの実現

- ERL加速器要素技術開発: 高輝度電子銃、超伝導空洞、ビーム運転
- 大強度コヒーレントテラヘルツ光源: 分子振動選択励起による化学反応促進
- レーザー逆コンプトンX線源
 微小光源X線イメージング: 高精彩X線位相医学イメージング、フェムト秒イメージング
 フェムト秒サイエンス: 超高速光誘起相転移現象の理解

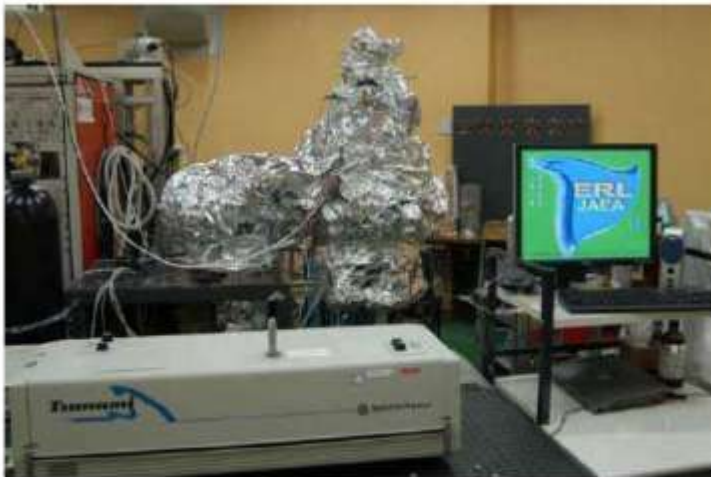
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<u>コンパクトERL</u> 設計	————— CDR —————									
要素技術開発									
建設		東カウンターホール整備 —————								
調整運転									
利用研究									
<u>5GeV ERL</u> 設計			 CDR						
建設								—————		

a photocathode test bench at JAEA

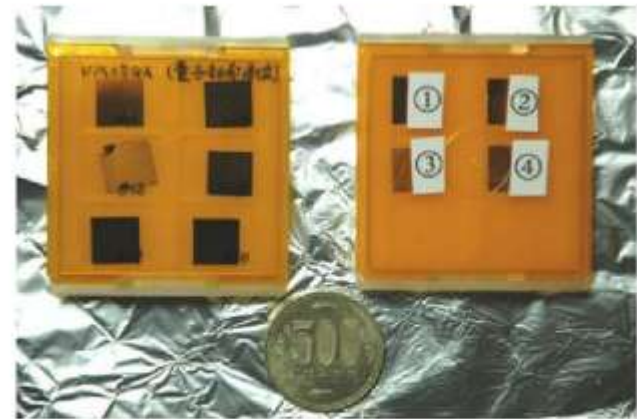
cathode holder



UHV chamber and laser



Optimization of cathode material for the better QE and life.



photocathode prepared at Nagoya Univ⁽¹⁾.

$\text{GaAs, Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

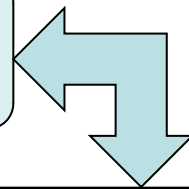
$x=0.17, 0.28$

(1) Venture Business Laboratory,
M. Tabuchi, Y. Takeda et al.

次期光源計画ERLにおけるサイエンスの展開

- ERLのサイエンスに関する戦略会議(ブレインストーミング)
- 参加者
雨宮(東大)、朝倉(北大)、腰原(東工大)、並河(学芸大)、野村(PF)、若槻(PF)、下村(KEK)、春日(PF)、足立(PF)、平野(PF)、坂中(PF)、河田(PF) (敬称略)
- 11月5日(水)、11月28日(金)、12月26日(金)開催。
- ERL光源特性
 - ⇒ 特徴的な測定技法(ERLの潜在的可能性)
 - ⇒ サイエンスの方向性と研究会の組織方針

エネルギー・環境・物質・生命



サイエンスと
研究会の方向性

Instrumentation
(検出器、高速ゲート、
光学素子(X-FEL-O)
etc.)

不均一系の科学(触媒活性点、表面、欠陥、生物 etc.)、
空間スケールの階層構造(生物、ドメイン構造、etc.)
時間スケールの階層構造(非平衡、エネルギー散逸構造、
etc.)
既存測定の高精度化

コヒーレンス

X線スペckル(AB)
X線ホログラフィー(AB)
磁気スペckル(ABE)
コヒーレント回折イメージング

ダイナミクス

光電子ダイナミクス(CE)
核共鳴散乱構造解析(CE)
共鳴散乱ダイナミクス(CE)
回折ダイナミクス(CE)
分光ダイナミクス(CE)

ナノビーム

ナノビーム分析(D)
X線顕微分光(DE)
蛍光X線構造解析(DE)

特徴ある
実験技法

有効な
組み合わせ

A. 時間分解
空間相関

B. コヒーレント
フラックス

C. ダイナミクス

D. ナノビーム

E. 既存測定の高
高精度化

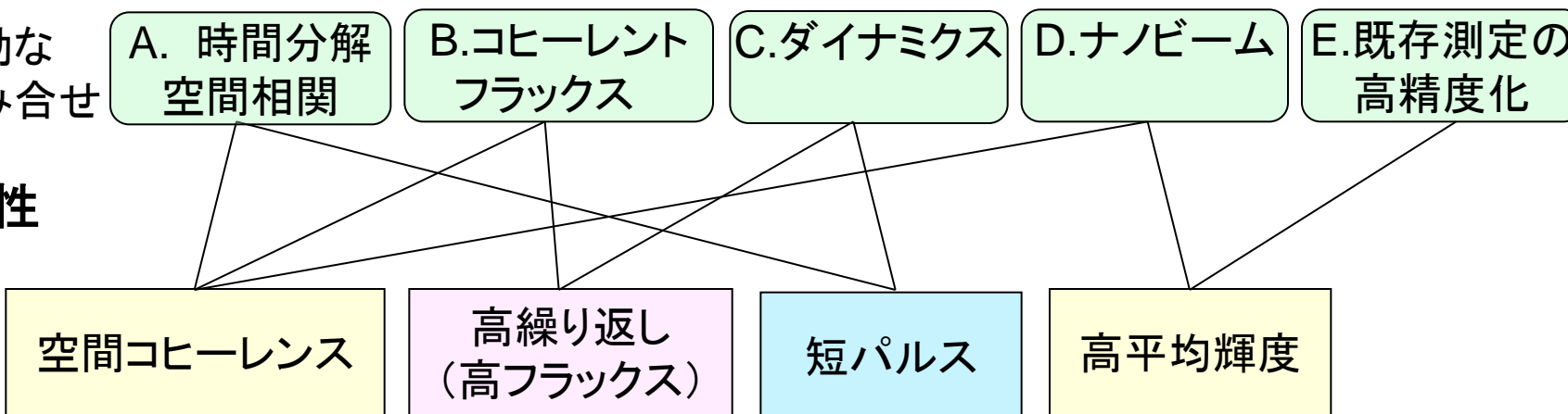
光源特性

空間コヒーレンス

高繰り返し
(高フラックス)

短パルス

高平均輝度



ERLサイエンス検討の場

- ERLサイエンス検討会

外部、内部の研究者を招いてERLのサイエンスに関する話題提供。(2~3週ごとに)

http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/erl_science.html

- PERL (Preparation for ERL)

内部の研究者を中心に2週間ごとに昼休み(主に木曜日)に話題提供(足立氏、稲田氏、次回:中尾氏、次々回:平野氏、、、)

ワークショップの予定

- ワークショップを2009年5月末から遅くとも6月末頃までに以下のテーマで開催予定。

不均一系の科学 (稲田、、、)

空間スケールの階層構造(中尾)

時間スケールの階層構造(足立)

装置(XFEL-Oを含む)(平野)

**ぜひ皆さんの参加を御願ひします。
そしてERLを応援してください**