



ERL 計画

ERL Project
KEK/IMSS

- ◎ ERLのサイエンス
将来の物質・生命科学に必須となるERL
- ◎ ERLの実現
2020年にユーザー運転開始となるERL

2012年5月12日
放射光学会特別委員会
東京大学本郷キャンパス

村上洋一、河田洋、足立伸一、小林幸則
KEK/IMSS/放射光科学, 加速器科学

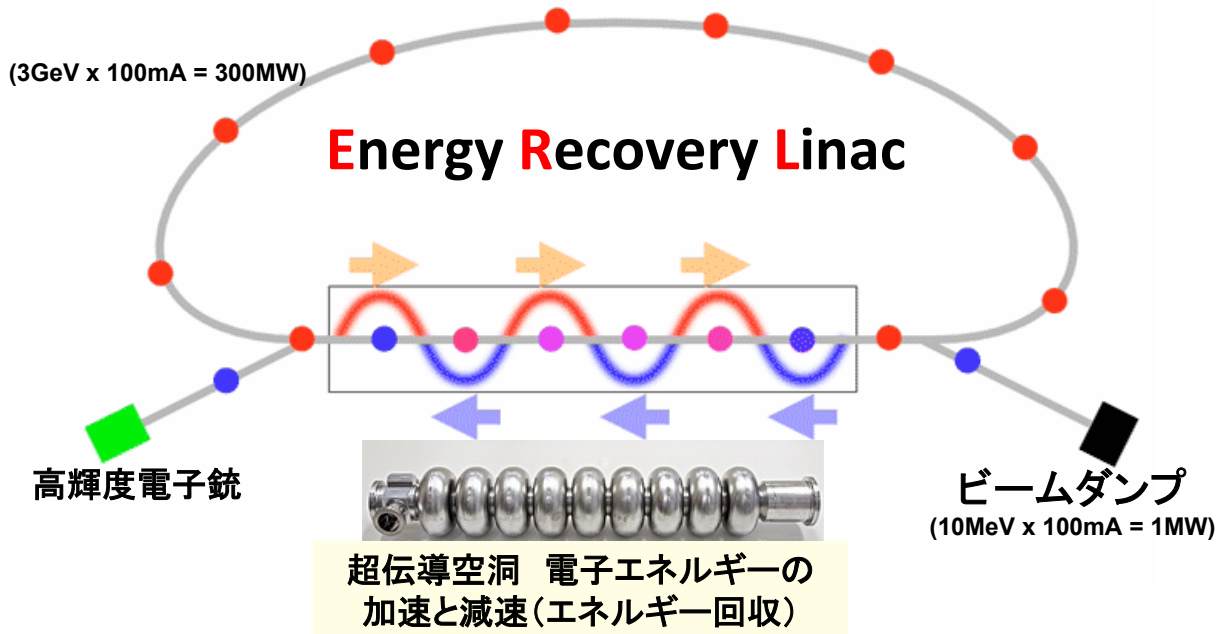
講演概要

1. ERLとは何か？
2. サイエンスが求めるERL ー何故ERLなのかー
 - * 未来を創るERLサイエンス
 - * 進化を続けるERL
3. ERL開発の現状 ーERLの実現は直ぐ近くー
 - * 技術開発の現状と展望
 - * 実現へのロードマップ
4. ERLをどう使うか
 - * 「つくば」に集うユーザー
 - * 国際的な建設・利用コミュニティの形成
 - * 放射光・中性子・ミュオンの相補利用
 - * 10年～20年後の世界の放射光を牽引するERL



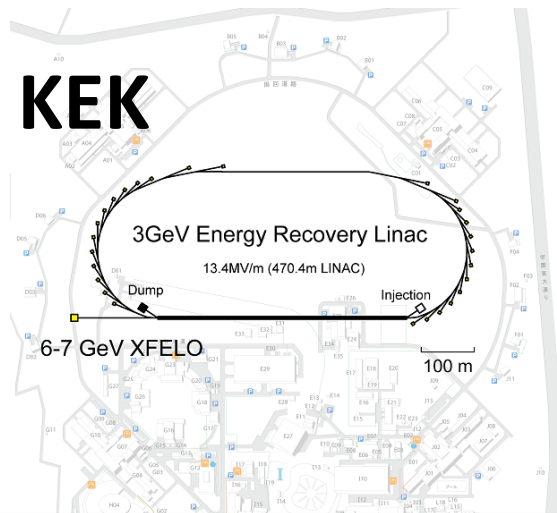
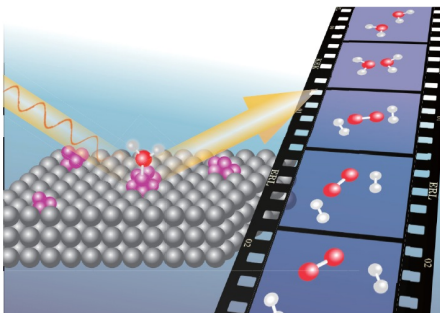
1. ERLとは何だろう？

http://pfwww.kek.jp/erl_info/



ERL計画の概要

Energy Recovery Linac
Preliminary Design Report
(Digest version)

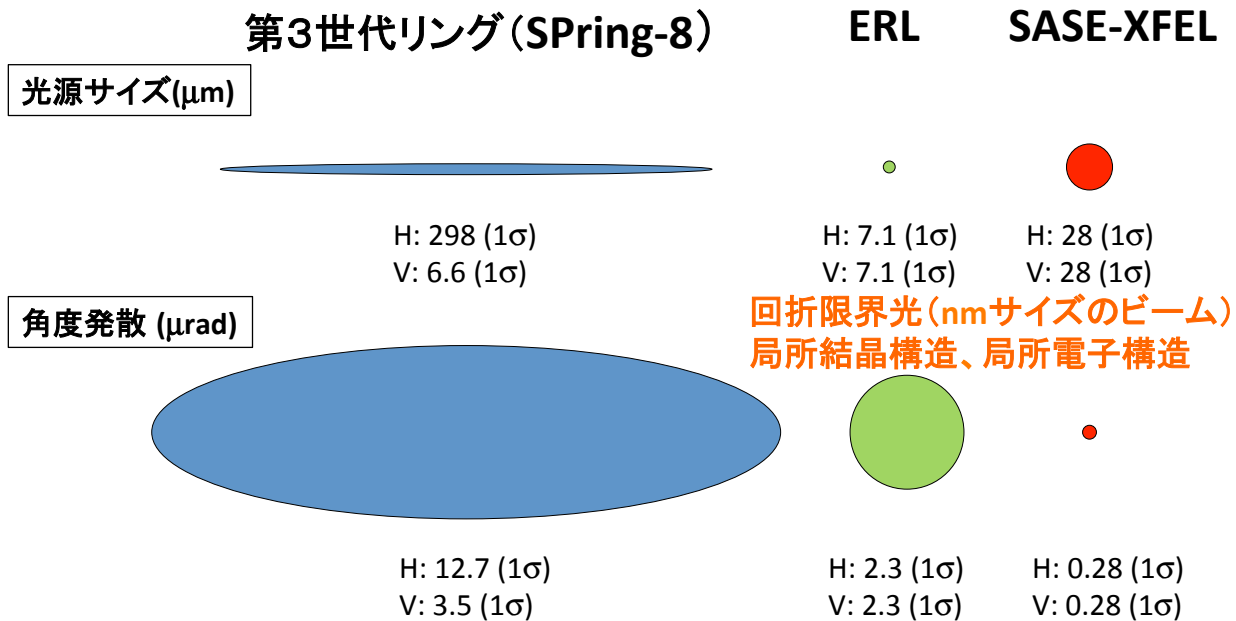


- Beam energy
 - Full energy: 3 GeV
 - Injection and dump :10 MeV
- Geometry
 - Linac length : 470 m
- Straight sections for ID's
 - 22 x 6 m short straight
 - 6 x 30 m long straight



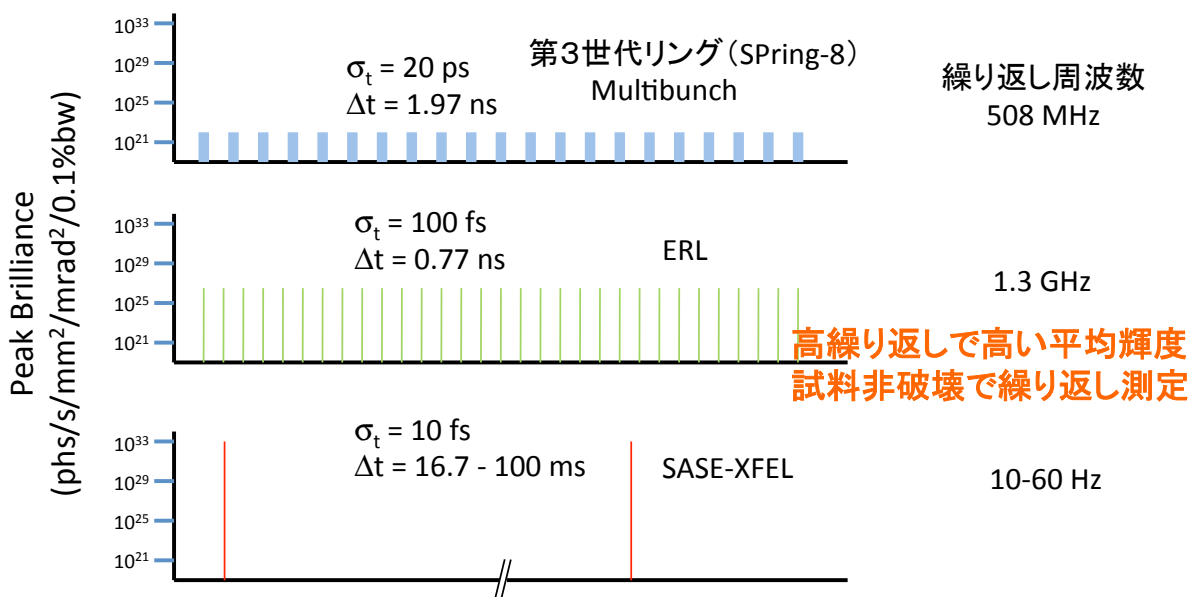
ERLとSASE-XFEL、第3世代リング光源性能の比較

光源サイズと角度発散

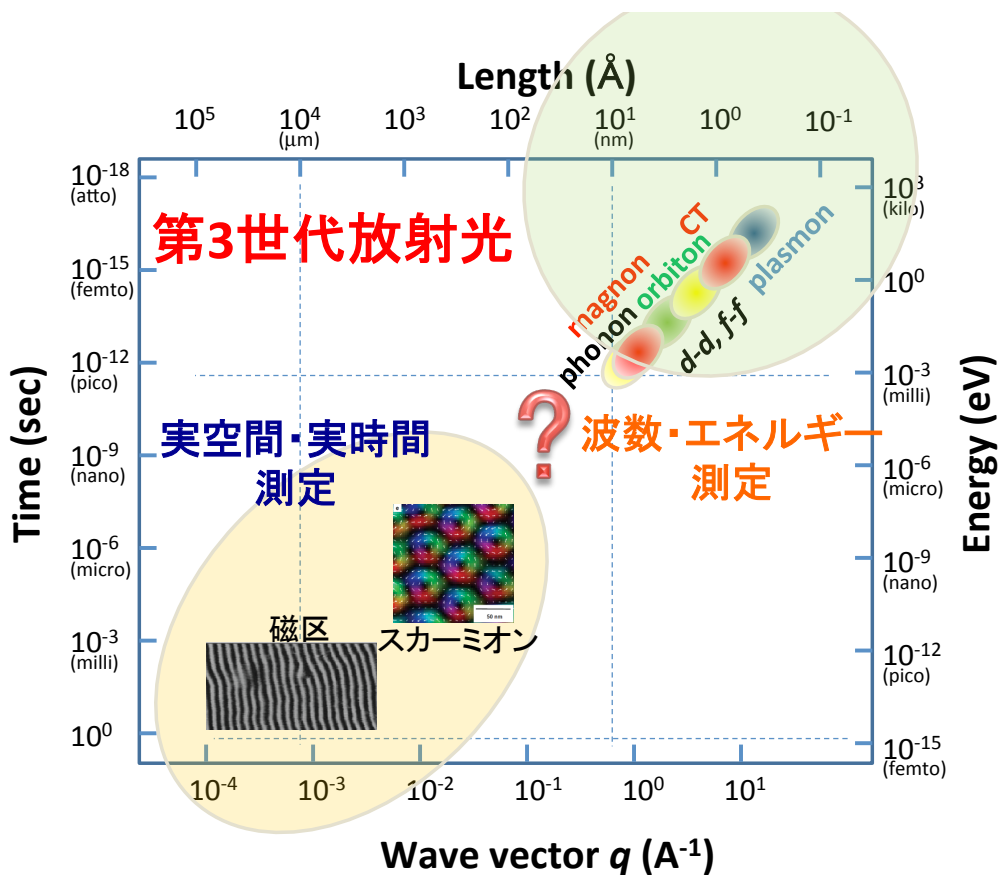
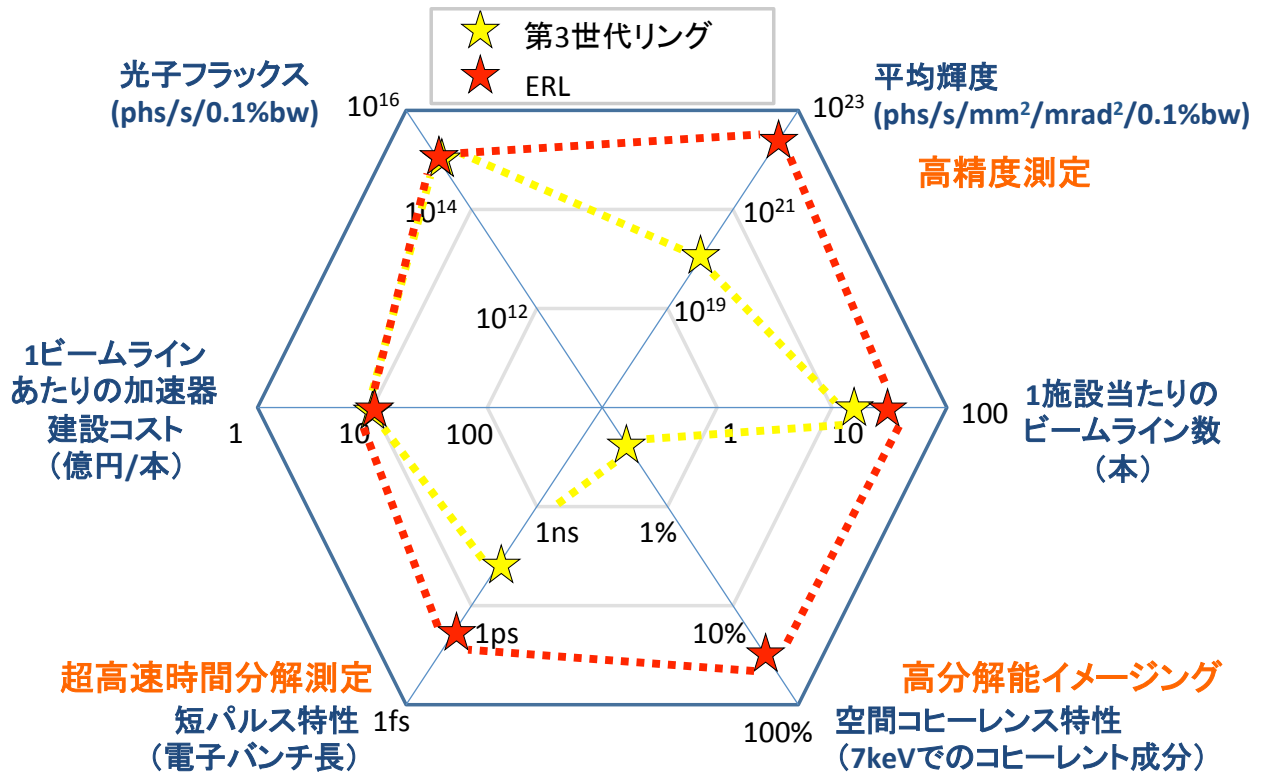


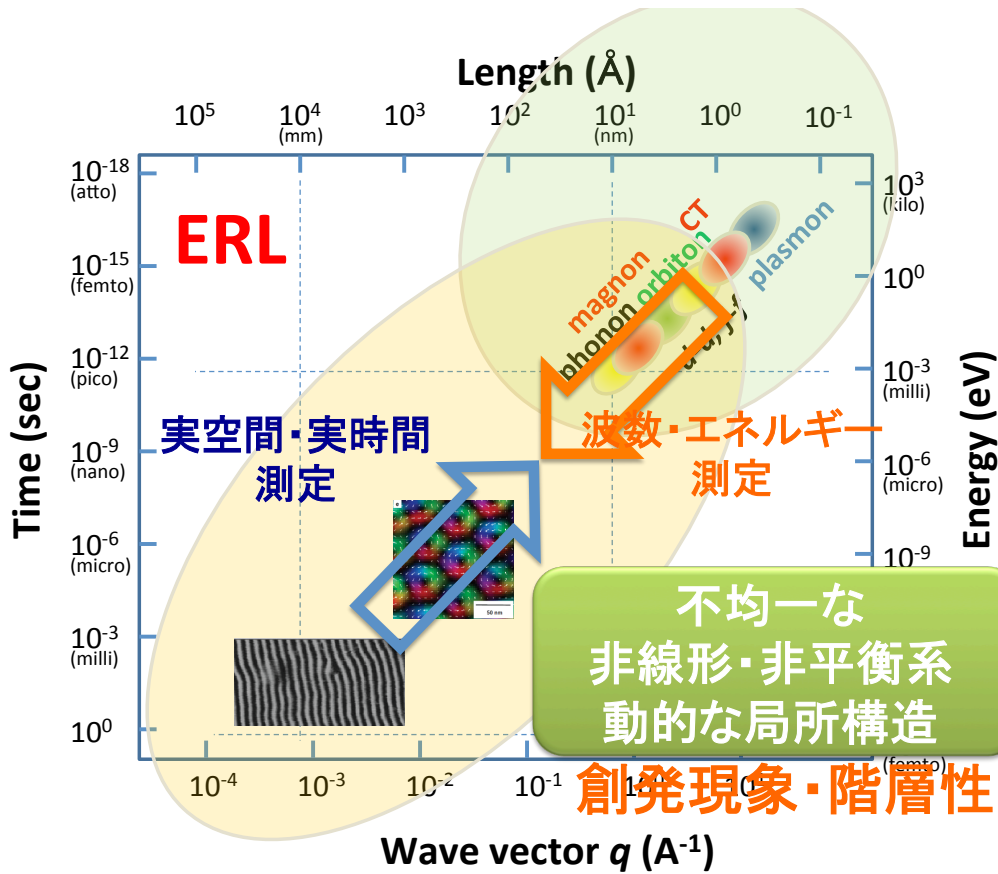
ERLとSASE-XFEL、第3世代リング光源性能の比較

時間領域



ERL(3GeV)と第3世代リング(3GeV)の比較

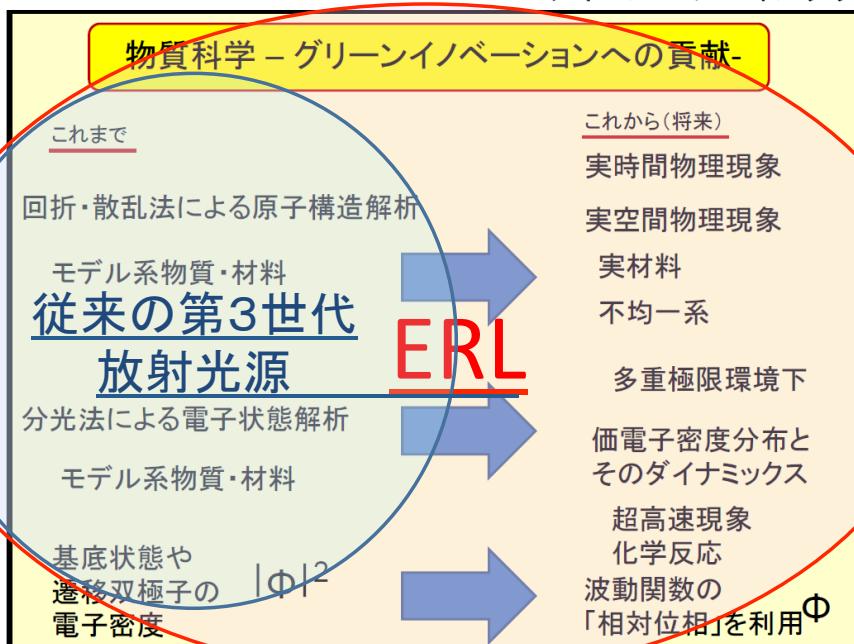




2. サイエンスが求めるERL

ERLの多様な可能性

2010年度放射光学会特別委員会
サイエンスワーキンググループ資料から



未来を創るERLサイエンス

放射光による物質科学・生命科学の新展開
 ～バルクの静的な平均情報から動的な局所情報へ～

1. 強相関電子の創発現象

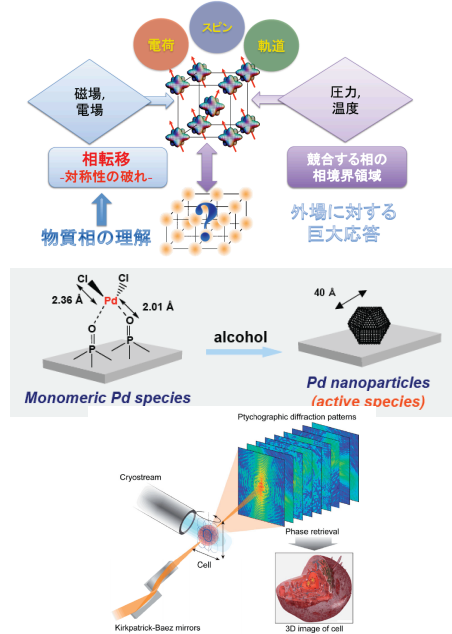
電子自由度秩序と電子相制御
 ナノビームによる超高速時間分解測定

2. 不均一触媒の機能発現

フェムト秒で変化する局所構造・電子状態
 高機能な不均一固体触媒の開発と評価

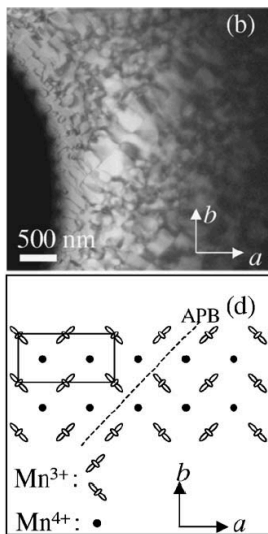
3. 細胞中の物質伝達

3次元動画で見る細胞の中を見る
 コヒーレントイメージングの高速・高分解能化



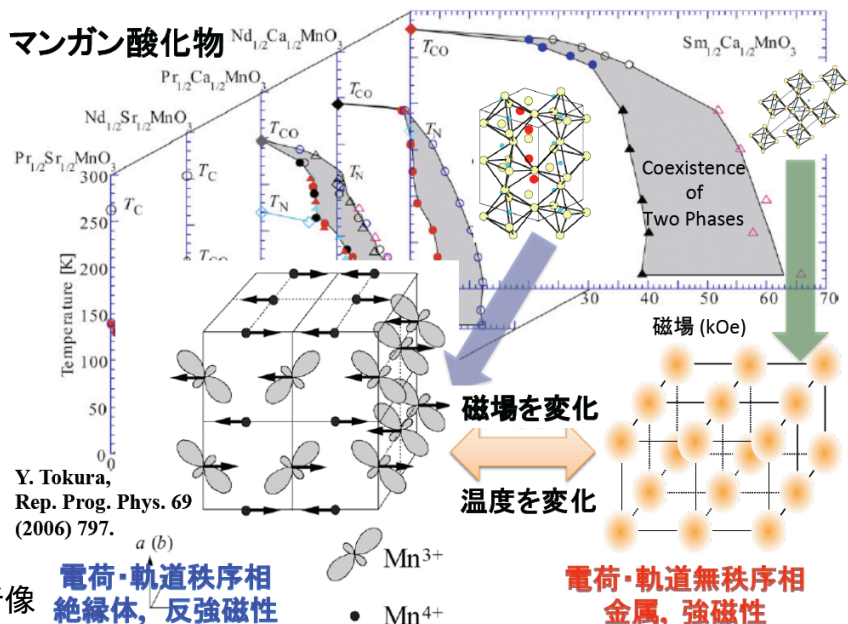
物質科学
 エネルギー
 環境問題

強く相互作用する多数の電子：強相関電子系 巨大磁気抵抗効果



$\text{Pr}_{0.5}\text{Ca}_{1.5}\text{MnO}_4$
 電荷軌道秩序の電子線回折像
 白：絶縁体、黒：導電体

X.Z. Yu et al., Phys. Rev. B75, 174441 (2007).

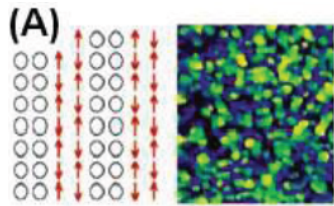


マンガン酸化物 $\text{Nd}_{1/2}\text{Ca}_{1/2}\text{MnO}_3$
 $\text{Pr}_{1/2}\text{Ca}_{1/2}\text{MnO}_3$
 $\text{Sm}_{1/2}\text{Ca}_{1/2}\text{MnO}_3$
 電荷・軌道秩序相
 絶縁体、反強磁性

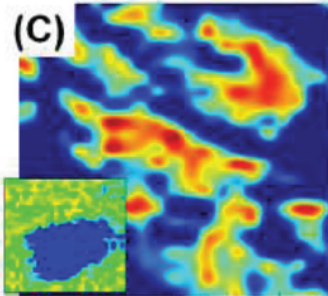
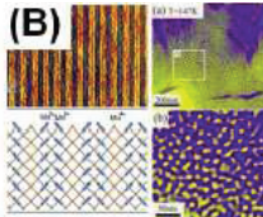
電荷・軌道無秩序相
 金属、強磁性

強相関系物質における相分離とナノ局所構造

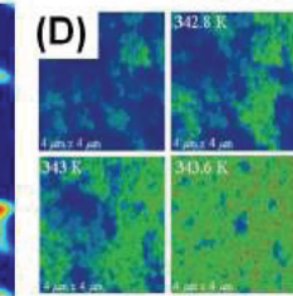
銅酸化物高温超伝導体



巨大磁気抵抗
マンガン酸化物



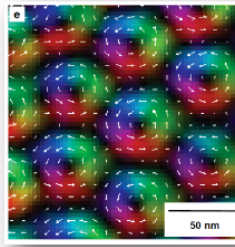
クロムのCDW, SDW



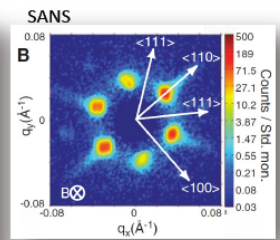
VO₂の金属相と絶縁相

Courtesy of Prof. Oleg Shpyrko,
(University of California at San Diego)
XDL2011 Workshop Summary

Skyrmion Lattice

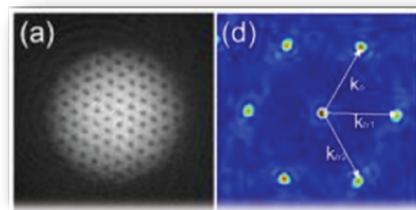


XZ. Yu et al.,
Nature 465, 901 (2010)



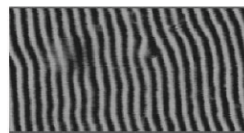
S Mühlbauer et al.,
Science 323, 915 (2009)

Vortex Lattice



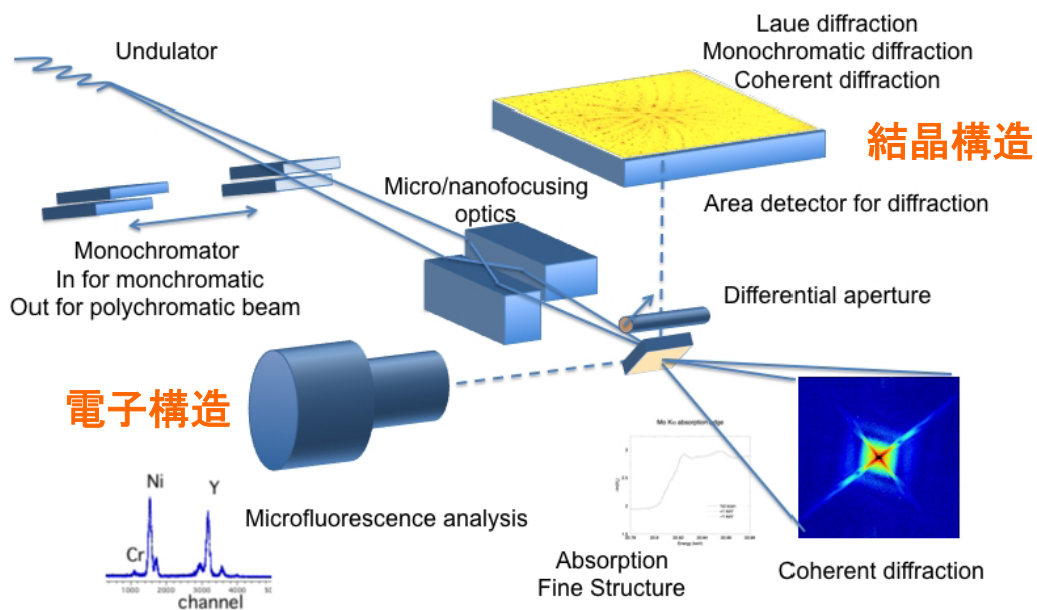
Magnetic Domain

FePd wire

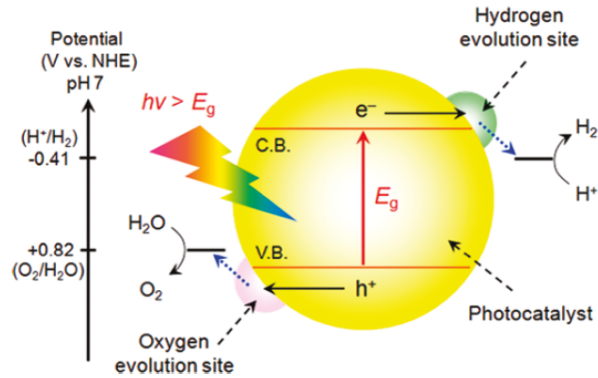
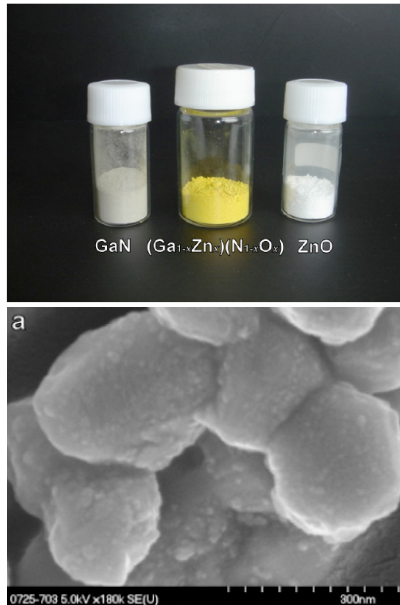


K. Chesnel et al.,
PRB 66, 172404 (2002)

強相関薄膜試料の ナノビーム回折・分光の時分割測定



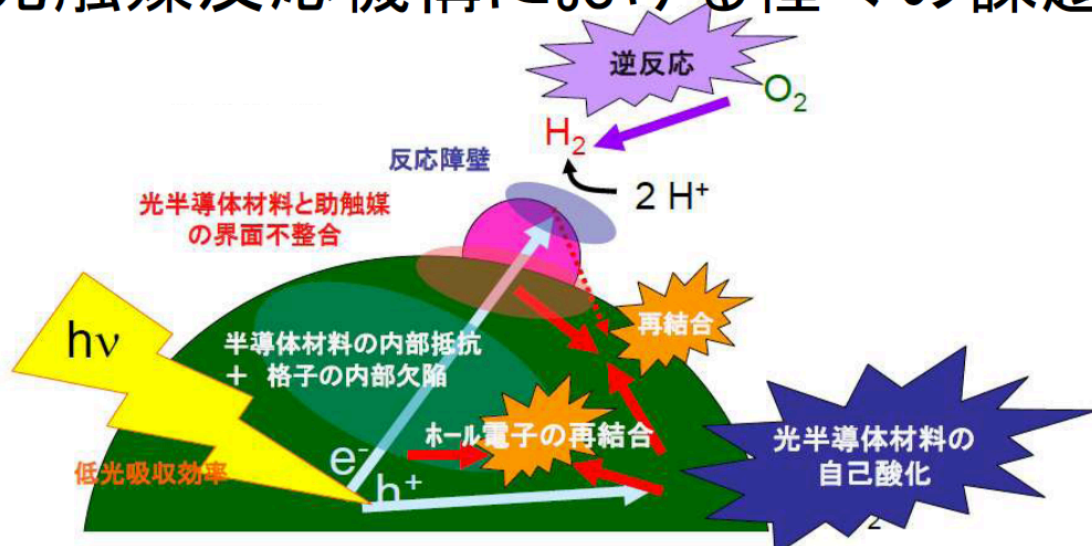
人工光合成を目指した 光触媒反応機構の解明



Maeda K. et al. (2006) *Nature* **440**, 295

Maeda, K. and Domen K. (2010)
J. Phys. Chem. Lett. **1**, 2655.

光触媒反応機構における種々の課題



- 現状の半導体材料と助触媒界面を正しく理解する

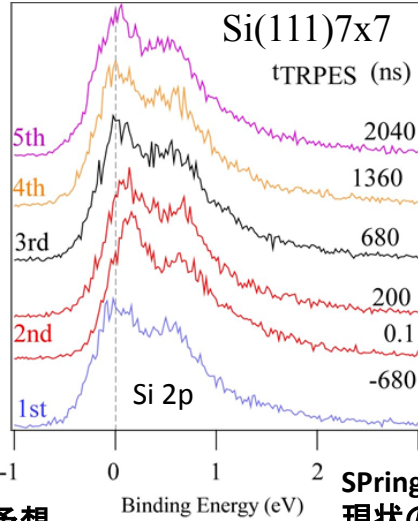
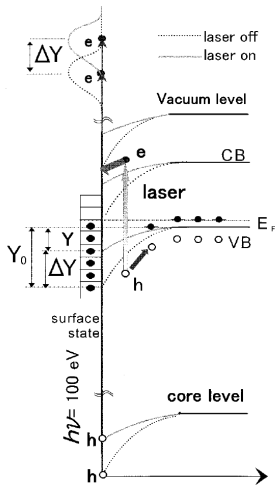


原子レベルの観察、p秒scaleの反応解析

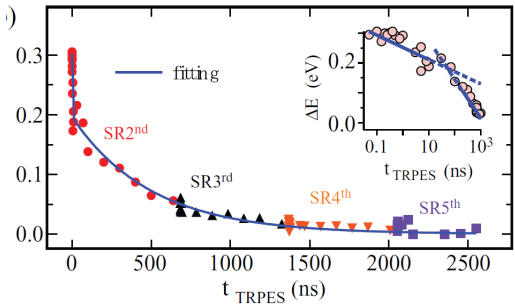
探索研究ではなく、高度な精密設計

瀬戸山 亨氏(三菱化学)発表資料より抜粋 第2回ERLシンポジウム

半導体表面のバンド構造とキャリアダイナミクスの追跡



M. Ogawa, S. Yamamoto *et al.*,
Rev. Sci. Instrum. **83**, 023109 (2012).



キャリア移動に伴う予想されるバンド構造変化

SPRING-8での時間分解光電子分光測定:
現状の時間分解能(数10psec)ではキャリア移動後の緩和過程を捉えている。

初期のキャリアダイナミクスを捉える事が反応機構を探る上で重要

松田 巖氏(東大)発表資料より抜粋 第2回ERLシンポジウム

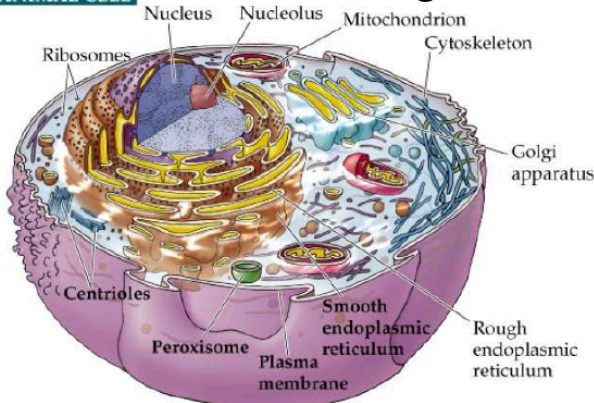


生命科学
医療

回折顕微鏡法で細胞内を可視化する

High brilliant/coherent nano-focused X-rays

AN ANIMAL CELL



【既存測定法の限界】

- 光学顕微鏡の分解能は~200nm
- 電子顕微鏡は切片スライスが必須

回折顕微鏡法は、細胞のように厚みのある試料の測定に向いている

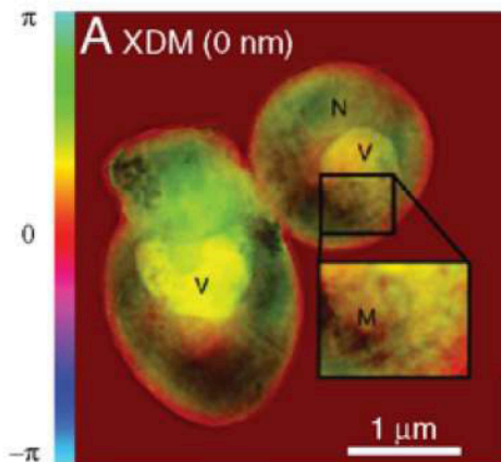
5-10 nm resolution

Radiation damage ?

Courtesy of Prof. Chae Un Kim
(Cornell University)
XDL2011 Workshop Summary

© 2001 Sinauer Associates, Inc.

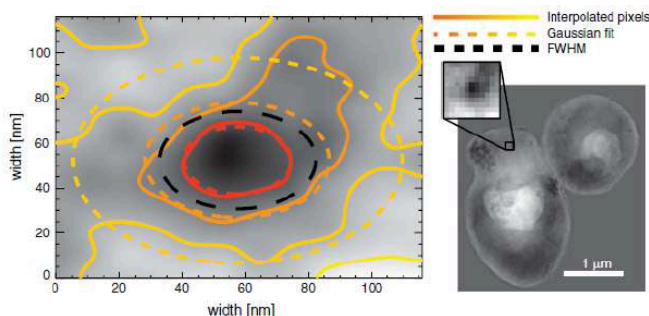
細胞の回折顕微鏡像の現状と将来



J. Nelson et al., PNAS 107, 7235 (2010)

金ナノ粒子でラベルした酵母菌の回折顕微鏡像

- 細胞を瞬間凍結
- 細胞小器官(液胞(V)、核(N)、ミトコンドリア(M))がおぼろげに見える
- 空間分解能は10-20nm



【ERLが実現】

- 回折顕微鏡法の空間分解能の向上
- 測定時間が100分の1に短縮

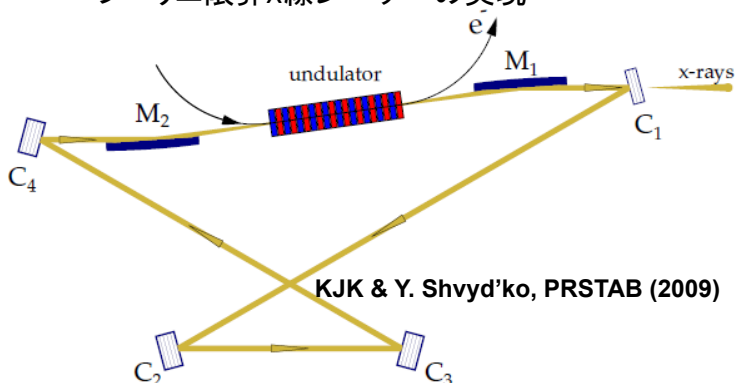
進化を続けるERL

XFEL Oscillator

X線領域の共振器を利用して高エネルギー分解能を実現
フーリエ限界X線レーザーの実現

ERLの電子ビーム特性をフルに活用

- 低エミッタンス
- 高繰り返し(1MHz)
- 大強度高エネルギー分解能X線源 (10¹⁵ 光子/秒, 10⁹ 光子/パルス @ ~10keV with a few meV b.w.)
- エネルギーの可変性を担保
- シングルモードX線レーザー (時空間領域で)



KJK & Y. Shvyd'ko, PRSTAB (2009)

提案されている利用研究例

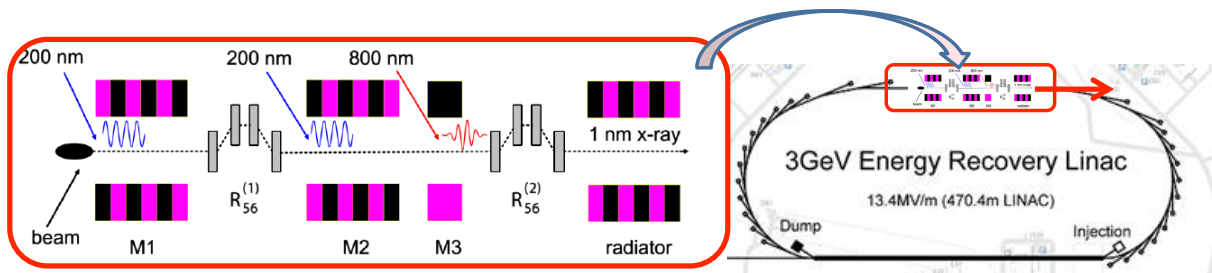
- X線非弾性散乱実験の革命(6桁の飛躍): 10⁹ 光子/秒(現状)から10¹⁵光子/秒
ナノ空間分解非弾性散乱(構造相転移の前駆現象等)、
RIXSからNIXSへ(定量的な理解へ)
- X線光電子分光 → Bulk-sensitive Fermi surface study with HX-TR-AR PES
- X線コヒーレントイメージングの飛躍: (サブnm分解能)

....and new applications



Echo-Enabled Harmonic Generation (EEHG)

電子ビームとレーザーとの相互作用による**アト秒パルス**の発生とその利用研究



D. Xiang, Z. Huang, and G. Stupakov,
Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, 060701 (2009)

Ultimate ERL

XFEL-O: フーリエ限界X線レーザー → 時間相関のサイエンス
EEHG: アト秒パルス → 超高速サイエンス

将来拡張型光源



ERL Project
KEK/IMSS

3. ERL開発の現状

ERL加速器2大要素技術

• 高輝度大電流電子銃の開発

- Normalized emittance of $0.1 \mu\text{m}$ ($17\text{pm}@3\text{GeV}$)
- Maximum beam current of 100 mA
- Ultra short pulse of 100 fs

→ 500kV DC 光陰極電子銃

+ 1.3GHzハイパワードライブレーザー

• cw 高勾配超伝導空洞の開発

– 入射器

→ 1.3GHz 2セル空洞 + 170kW 入力結合器
+ 300kW クライストロン

– 主加速器

→ 1.3GHz 9セル空洞 + 150W HOM 減衰器 + 30 kW IOT

$E_{acc} \sim 15 \text{ MV/m}$, $Q_0 > 1 \times 10^{10}$

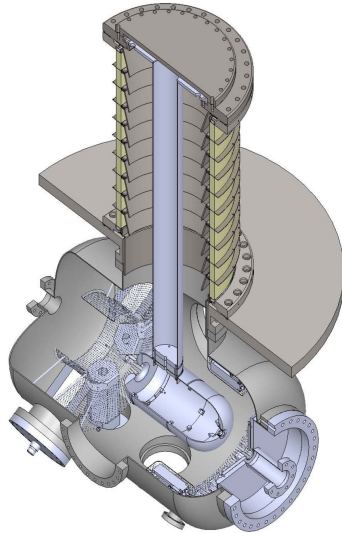
(inductive Output Tube)

光カソードDC電子銃1号機で500kV以上の印加に成功

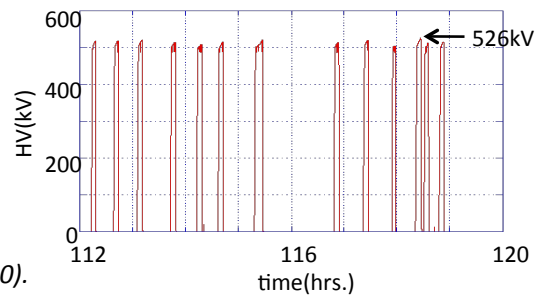
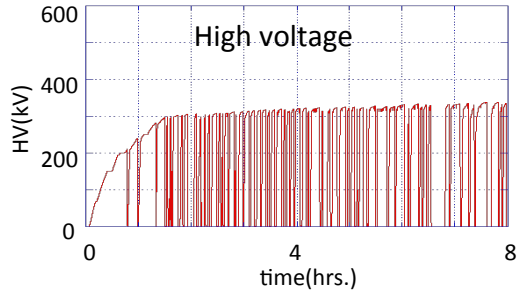
従来の電子銃 (Jefferson Lab., コーネル大学) では、高電圧が約350 kV程度に制限



分割型セラミックスを採用することにより、500 kV以上の印加に成功



R. Nagai et al., Rev. Sci. Instrum. 81, 0333304 (2010).



入射器超伝導空洞の開発

構成する各要素の性能試験は終了し、
クライオモジュールの組み立てを開始する。
シールド完成後、横測定による性能確認を行う。

Vacuum vessel

2K He

5K He

80K N₂

1.3GHz, 2-cell SC cavities with 5 HOM couplers

CW high power input couplers

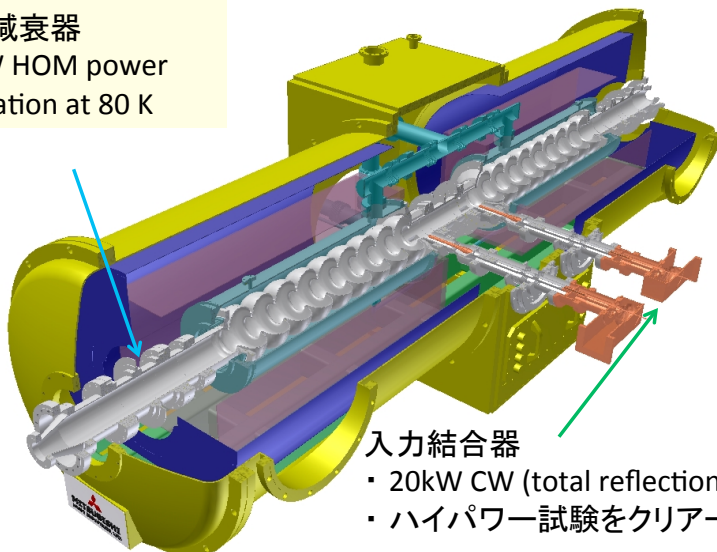
RF feedthroughs for HOM couplers

Slide-Jack type frequency tuner

入射器クライオモジュール

主加速超伝導空洞の開発

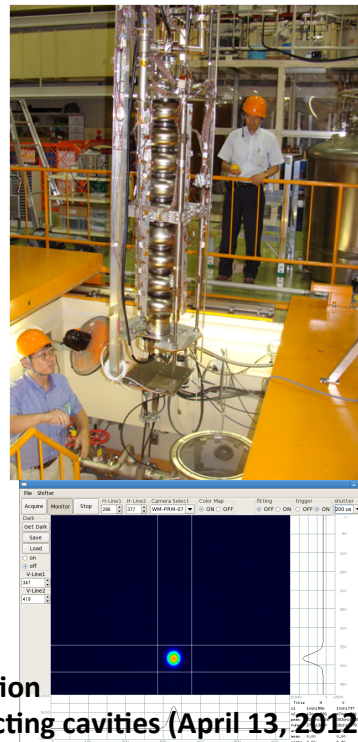
- HOM 減衰器
- ・150W HOM power
 - ・Operation at 80 K



- 入力結合器
- ・20kW CW (total reflection)
 - ・ハイパワー試験をクリアー

2台の空洞で目標である15MV/mの加速勾配を達成した。

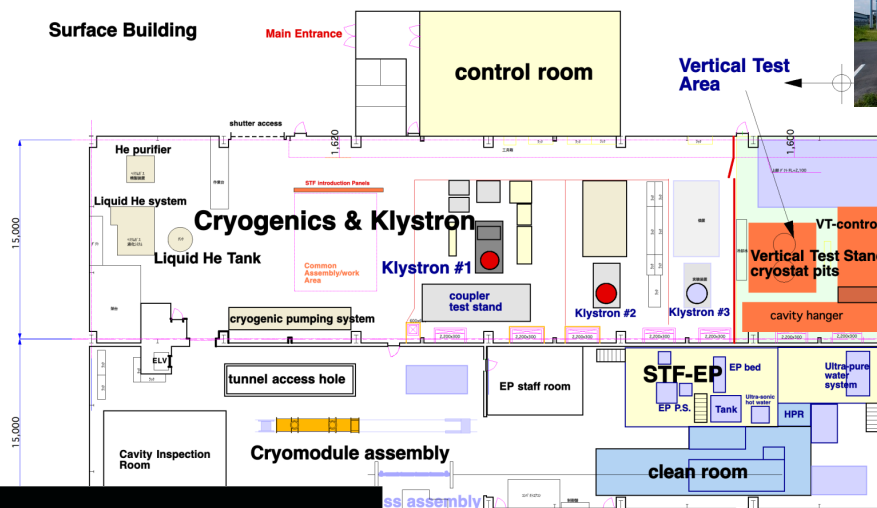
Beam acceleration by superconducting cavities (April 13, 2012)



2台の空洞で構成されたクライオモジュールを今夏までに完成させる。シールド完成後、横測定による性能確認を行う。



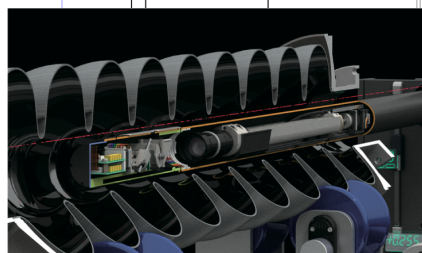
STF (Superconducting RF Test Facility)



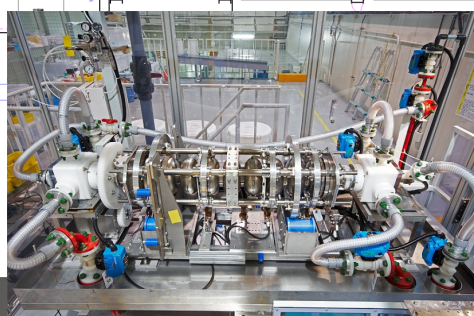
STF棟



縦測定装置



内面検査装置



電解研磨装置



空洞製造設備 (Cavity Fabrication Facility)



0号機:

EBWは外部, 他は内部
HOM無し

$E_{acc} = 29 \text{ MV/m}$

2012年 1号機 (すべてKEK製, HOM付き) EBW条件出し中
2013年 2号機 (高圧ガス対応) 特定設備製造事業所登録申請の準備中
2014年 高圧ガス対応空洞量産開始



ERL Project
KEK/IMSS

実証機としてのコンパクトERLの建設

- R&Dマシンとしての役割
 - 加速器要素の性能試験
 - ビームを用いて各要素の性能および安定性の確認
 - 実用機に向けての問題点・改良点の洗い出し
 - ビームダイナミクスの評価
 - 空間電荷効果、CSR効果によるエミッタンス増大
 - 各種ビーム不安定性の調査
 - ビームロス測定と対策 etc
- 光源としての役割
 - レーザ逆コンプトン散乱によるX線の発生
 - コヒーレント放射によるテラヘルツ光の発生



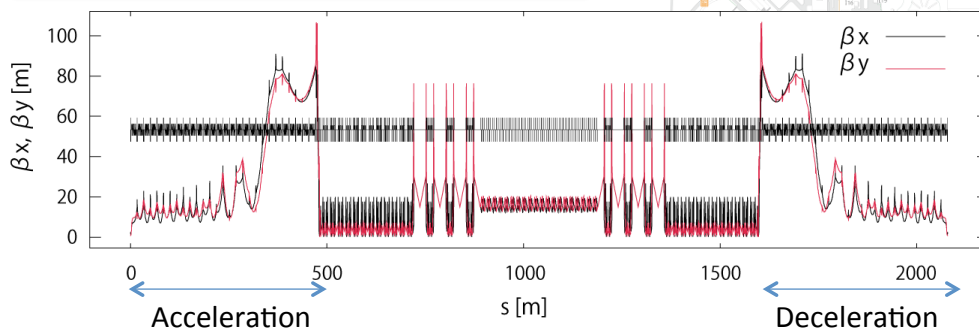
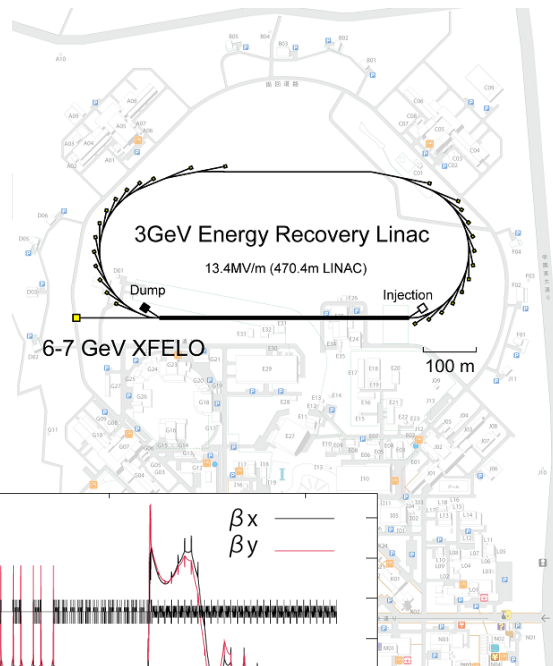
ERL Project
KEK/IMSS

コンパクトERL建設の状況 (2012年4月中旬)



Layout of 3 GeV ERL (preliminary)

- Electron energy
 - Injection and dump energy :10 MeV
 - Full energy : 3 GeV
- Geometry
 - From the injection merger to the dump line : ~ 2000 m
 - Linac length : 470 m
- Undulator beam lines
 - 22 x 6 m straight section
 - 6 x 30 m straight section
 - 1 x 200 m straight section
 - 1 x XFEL-O line



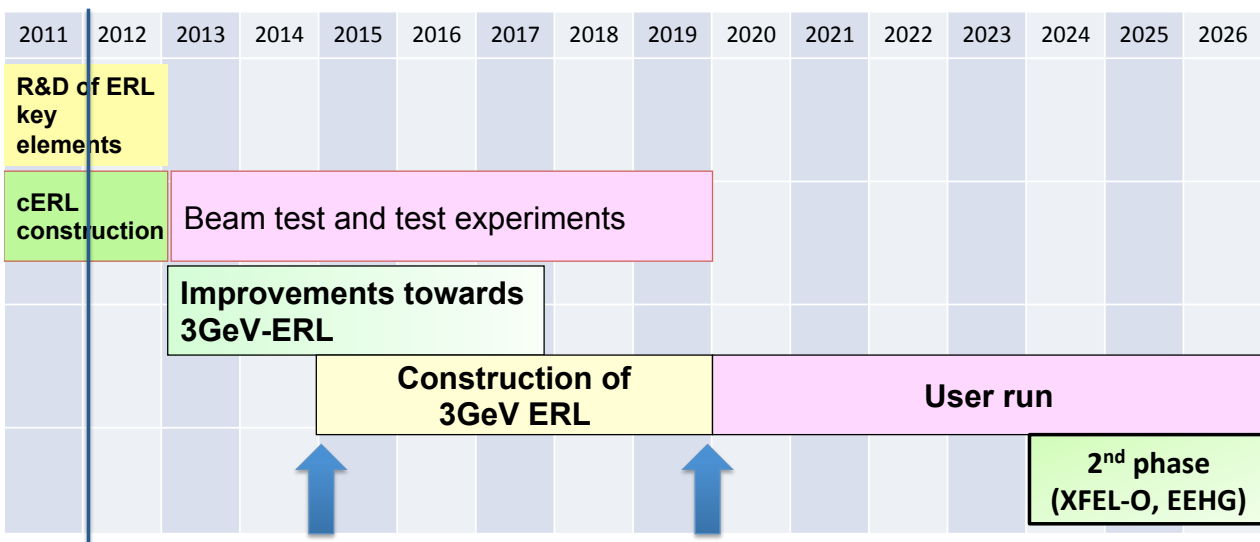
ERL実現へのロードマップ

1. CDRのバージョンアップ → 国際評価委員会(7月2, 3日)
2. **KEKロードマップへの記載**(8月ごろ素案、最終は来年3月)
→ **Super KEKBの後、KEKの大型プロジェクトとしての位置付け**
3. **放射光学会ロードマップ(夏頃)** → 学術会議マスタープラン
→ 文科省大型プロジェクトのロードマップへの記載
4. 関連諸学会からの支援
海外量子ビーム施設からの支援
5. 大学・諸外国施設・産業界/民間企業との連携による
ビームライン建設計画の推進
→ 国際的量子ビームプラットホームを目指す



ERLロードマップ

(年度)



cERLは現在建設中
3GeV ERL の運転開始を 2020年

加速器予算: 300億円台
運転経費(光熱経費)は約25億円/年
XFEL-Oは第2期計画で



4. ERLをどう使うか

PAST AND FUTURE



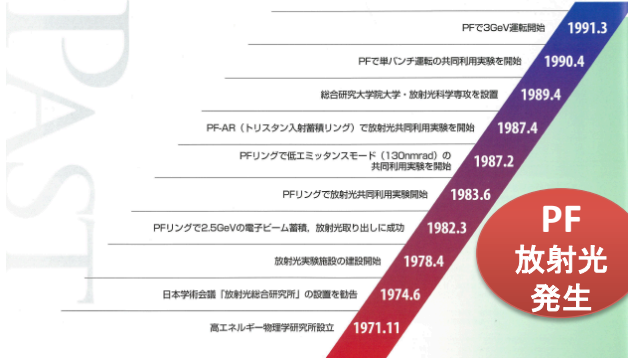
PF 30周年

C-ERL
初ビーム

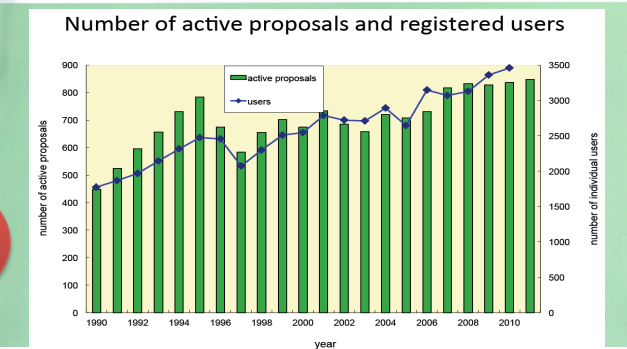
ERL
検討開始

- 2013.3 2010.3 コンパクトERL建設の準備が完了
- 2009.4 構造物性研究センター設立
- 2009.4 放射光源研究系が加速器研究施設・加速器第七研究系に組織変更
- 2006.4 次世代放射光源・ERL計画推進室が発足
- 2005.9 予リング蓄積部増設工事完了
- 2004.4 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構発足
放射光科学研究施設に名称変更
- 2003.5 構造生物学研究センター設立
- 2002.1 PF-AR高度化改造（大強度リンス放射光源）完了
- 1997.9 PFリング高度化（1.5 GeV）完了
- 1997.4 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光研究施設に組織変更
- 1996.12 PFで77SmAの大電流蓄積に成功

年間
3500人のユーザー
800の有効課題



PF
放射光
発生

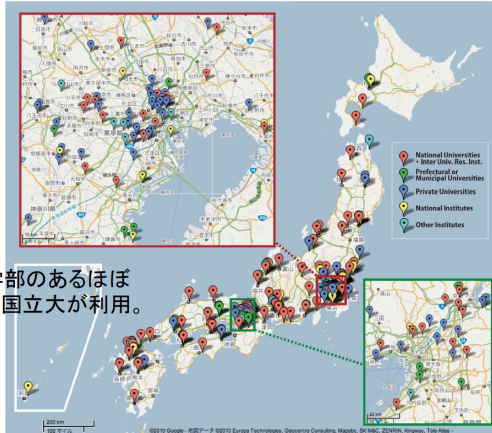


「つくば」に集うサイエンスと産業応用研究

国内外からのアクセスの良さ、
特に、関東圏の多数の研究教育機関ユーザー
産業界からのユーザー

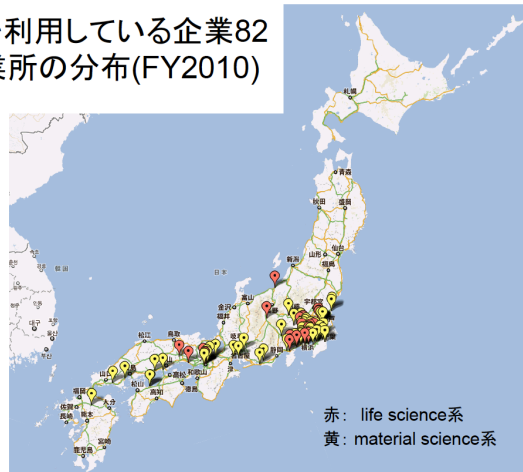
大学・産業界
との緊密な連携

PFユーザーの分布（共同利用）



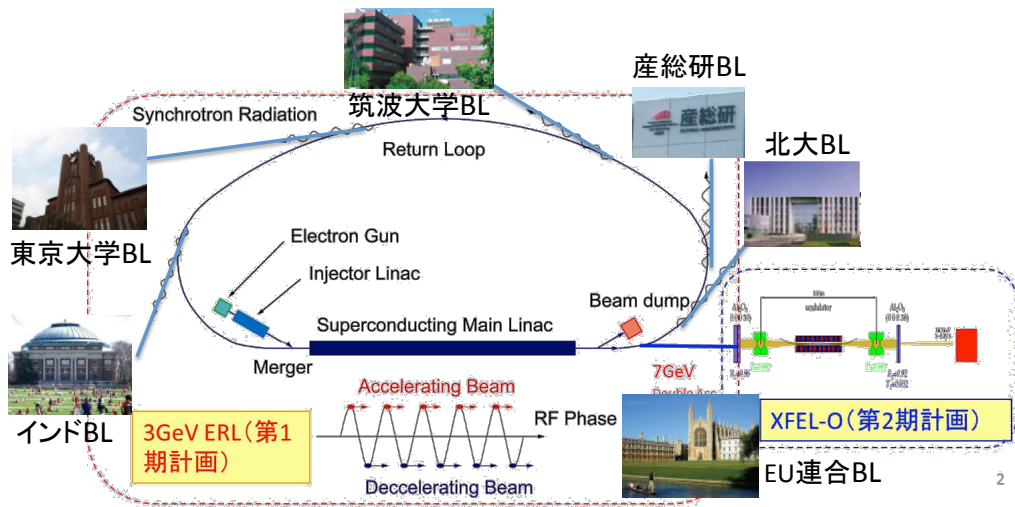
理学部のあるほぼ
全ての国立大が利用。

PFを利用している企業82
事業所の分布(FY2010)



国立大
公立大
私立大
国研
その他

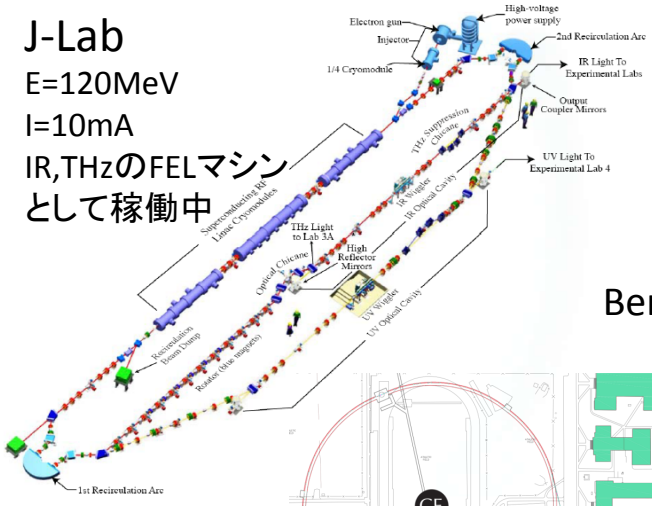
国際的な建設・利用コミュニティの形成



概念設計・要素技術・計測技術・利用研究に関する国際的協力

世界のERL研究施設・計画

J-Lab
 $E=120\text{MeV}$
 $I=10\text{mA}$
 IR, THzのFELマシン
 として稼働中



BERLinPro - Machine layout / parameters

BERLinPro = Berlin Energy Recovery Linac Project
 100mA / low emittance technology demonstrator (covering key aspects of large scale ERL)

Basic Parameter	
max. beam energy	50MeV
max. current	100mA (77pC/bunch)
normalized emittance	1 ± mm mrad
source length (straight)	2 ps or smaller
rep. rate	1.3GHz
losses	< 10%

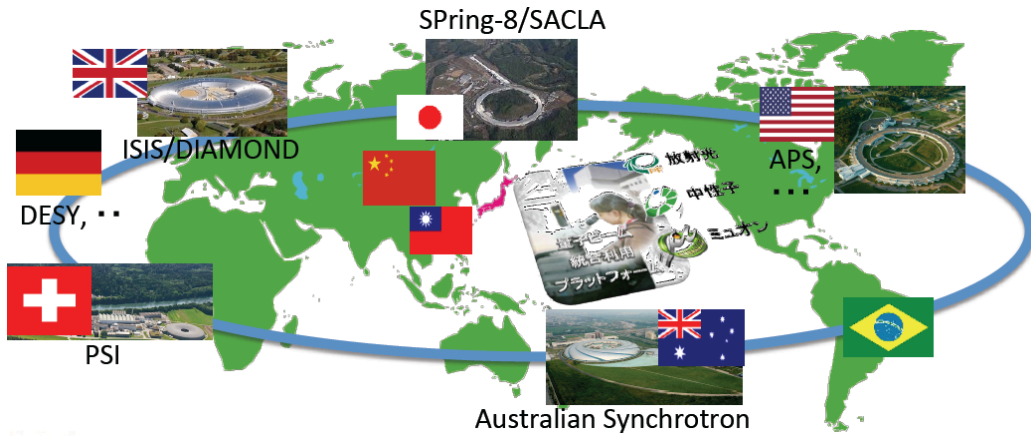
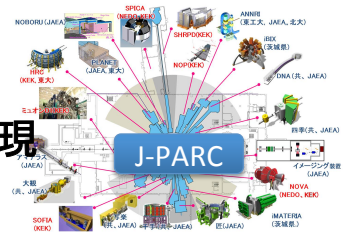
A. Jankowiak, BERLinPro Status, FL3 2011, 05.03.2012

Berlin-Pro: BESSY II



放射光・中性子・ミュオンの相補利用

ERL == J-PARC(中性子・ミュオン)の連携により
 世界最強の超先端量子ビームプラットホームが出現
 → 国際連携量子ビームプラットホームの形成



現在の世界の放射光施設



不均一系のイメージング 現状 ~数10nm, 数100 psec

10年後の世界の放射光を牽引するERL

超伝導加速器をベースにした新光源

世界の放射光科学分野を牽引する



不均一系のイメージング 10年後 ~ 1 nm, ~ 100 fsec

20年後の世界の放射光を牽引するERL

超伝導加速器をベースにした新光源(XFEL-O, EEHG, etc.)

世界の放射光科学分野の中でリードを保つ



不均一系のイメージング 20年後 $\sim 0.$ 数 nm, \sim 数10 asec

メッセージ

◎ ERLのサイエンス

将来の物質・生命科学に必須となるERL

◎ ERLの実現

2020年にユーザー運転開始となるERL

1. ERLとは何か
2. サイエンスが求めるERL ー何故ERLなのかー
3. ERL開発の現状 ーERLの実現は直ぐ近くー
4. ERLをどう使うか

