



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

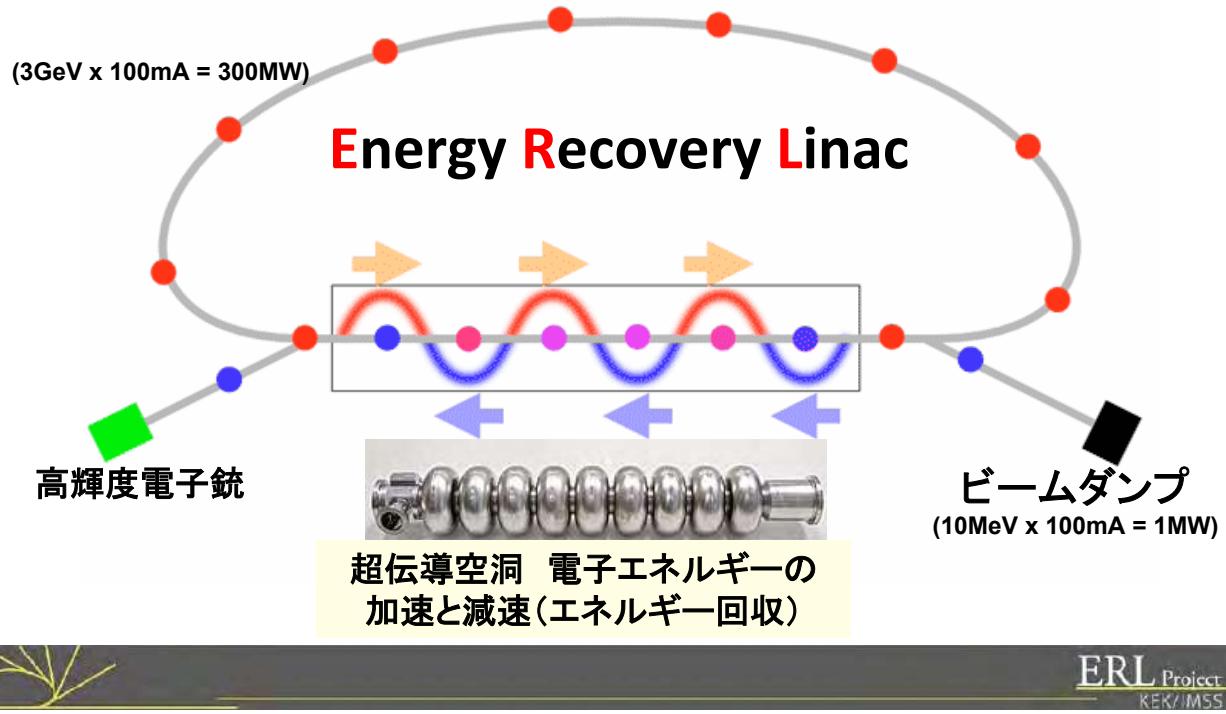
講演概要

1. ERLとは何か？
2. サイエンスが求めるERL —何故ERLなのか—
 - * 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 —ERLの実現は直ぐ近く—
 - * 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



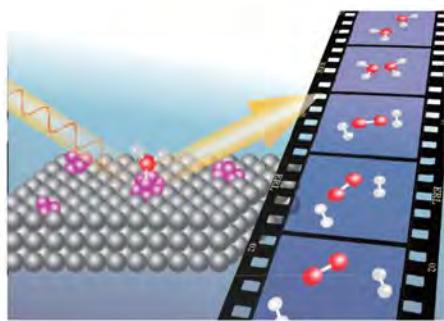
1. ERLとは何だろう？

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

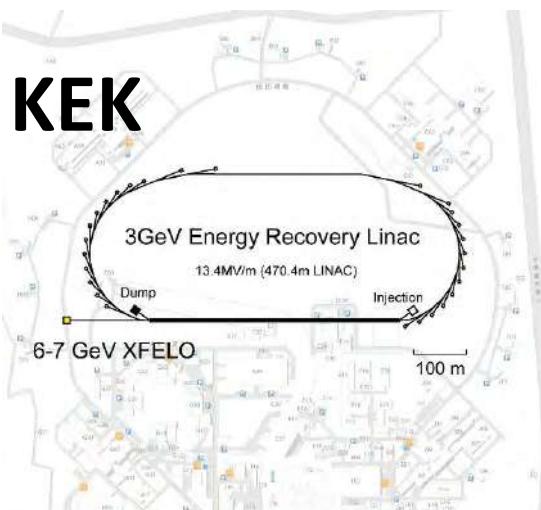


ERL計画の概要

Energy Recovery Linac
Preliminary Design Report
(Digest version)



Institute of Materials Structure Science, IMSS
High Energy Accelerator Research Organization, KEK



- 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 Project
KEK/IMSS

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

第3世代リング(SPring-8)

ERL

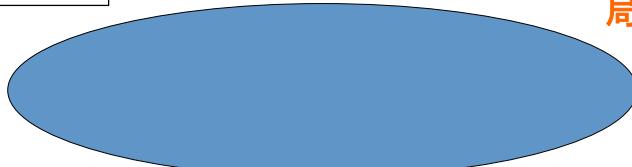
SASE-XFEL

光源サイズ(μm)



H: 298 (1σ)
V: 6.6 (1σ)

角度発散 (μrad)

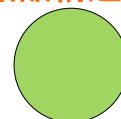


H: 12.7 (1σ)
V: 3.5 (1σ)

H: 7.1 (1σ)
V: 7.1 (1σ)

H: 28 (1σ)
V: 28 (1σ)

回折限界光(nmサイズのビーム)
局所結晶構造、局所電子構造



H: 2.3 (1σ)
V: 2.3 (1σ)



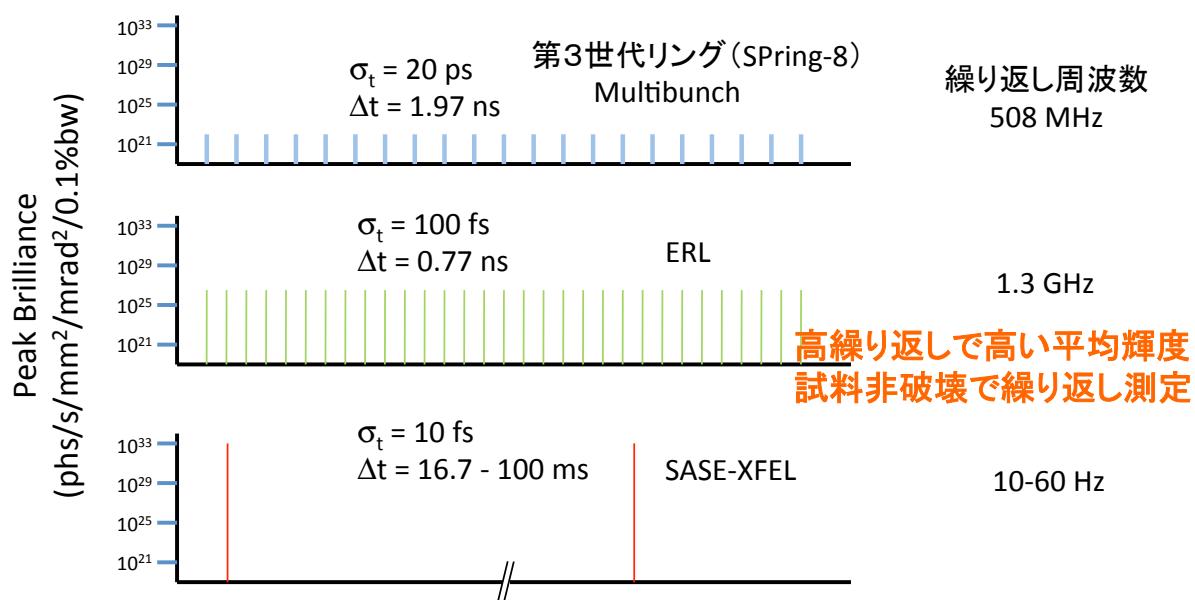
H: 0.28 (1σ)
V: 0.28 (1σ)



ERL Project
KEK/MSS

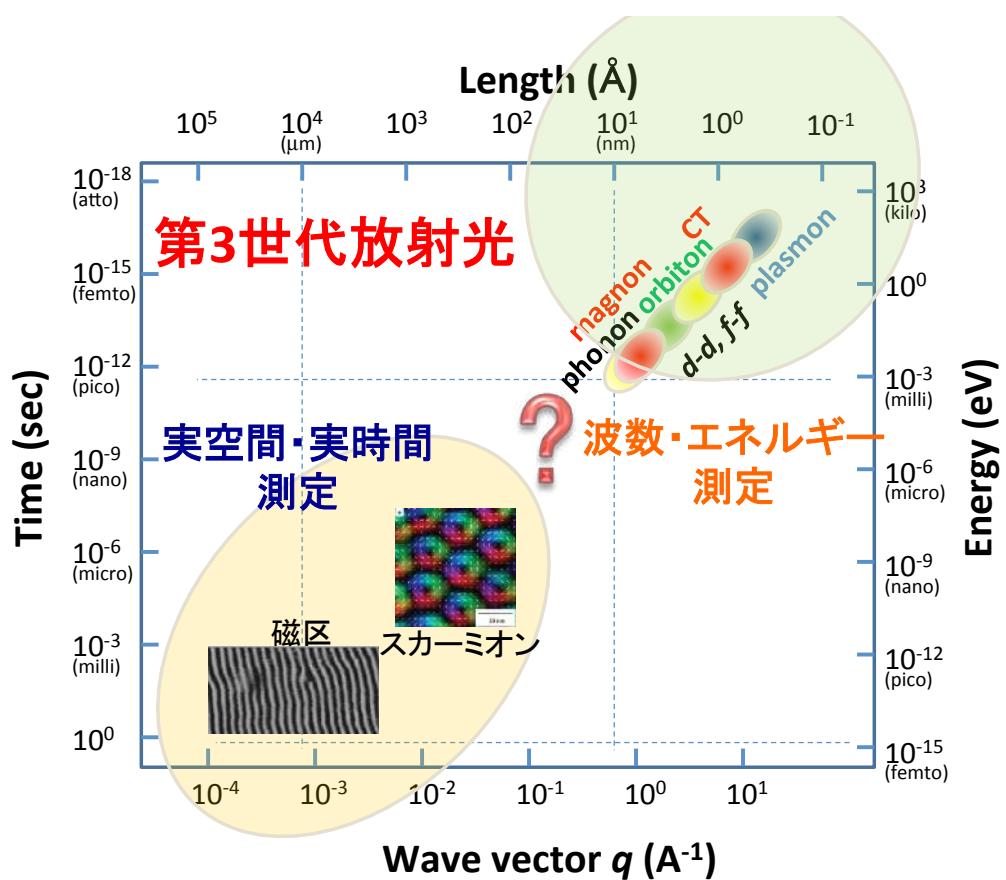
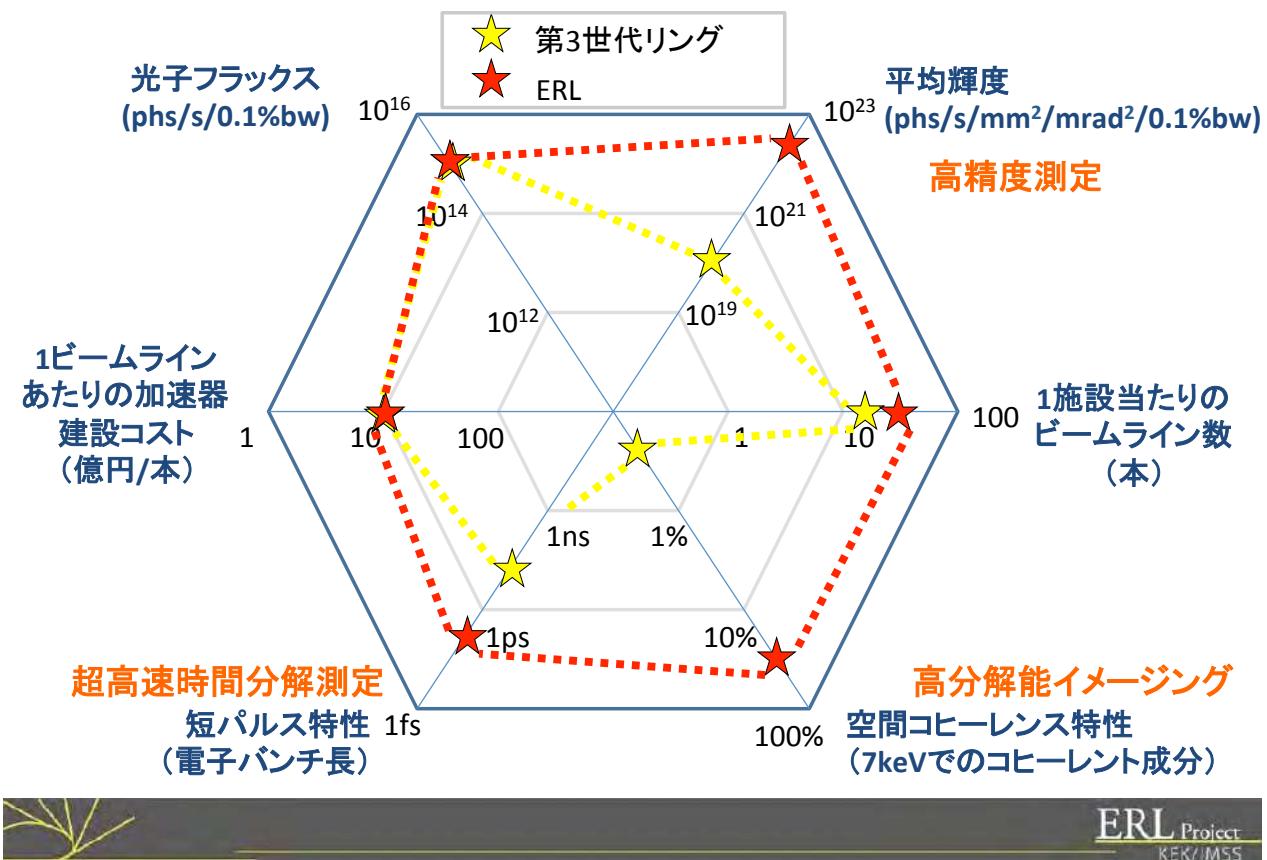
ERLとSASE-XFEL、第3世代リング光源性能の比較

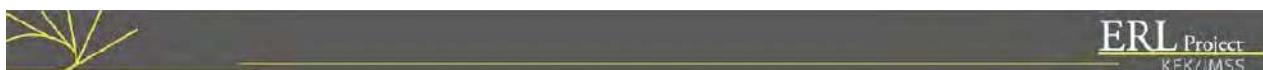
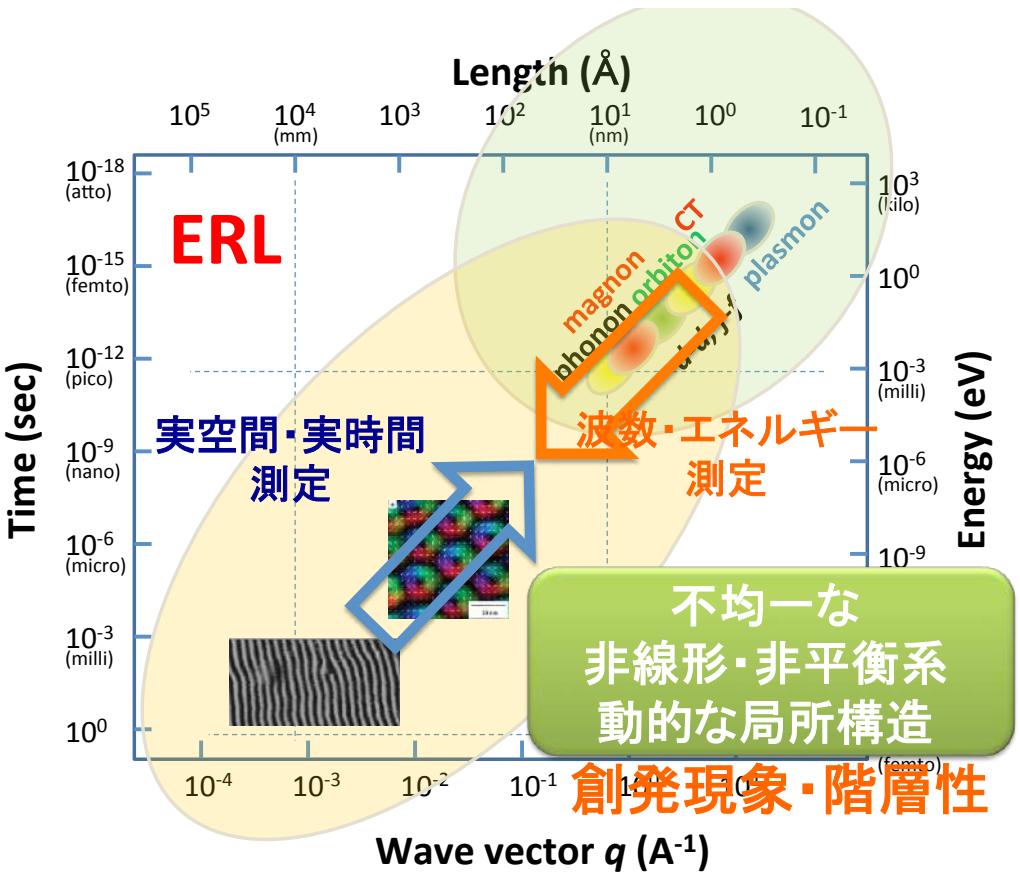
時間領域



ERL Project
KEK/MSS

ERL(3GeV)と第3世代リング(3GeV)の比較

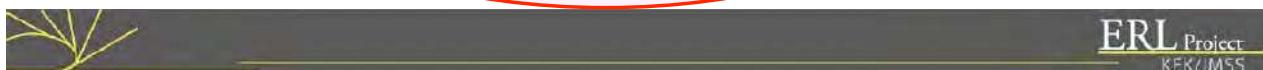
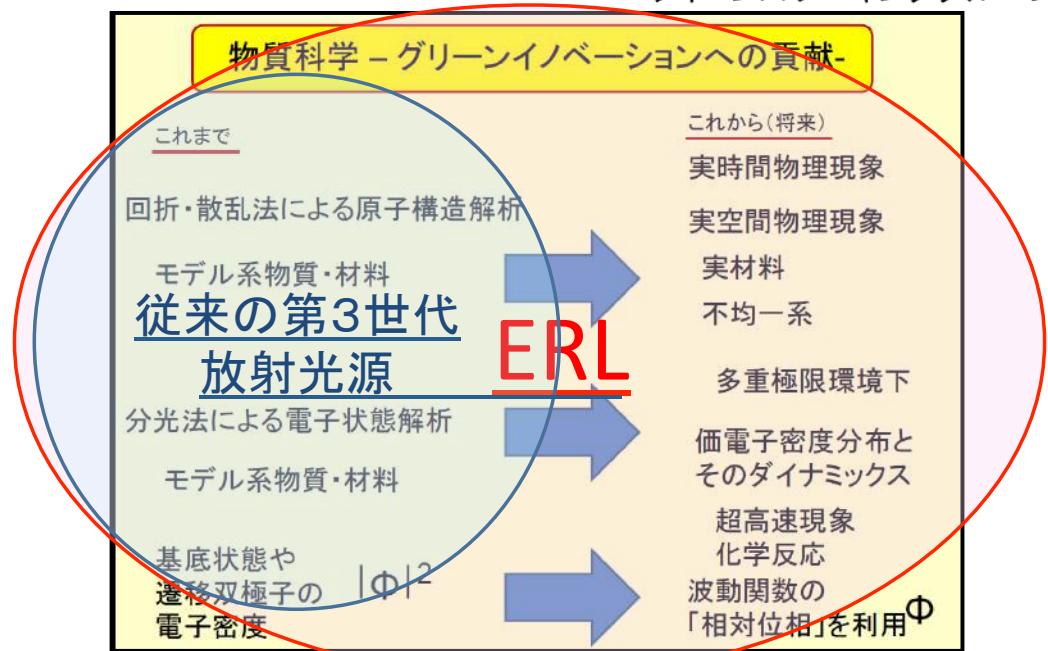




2. サイエンスが求めるERL

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

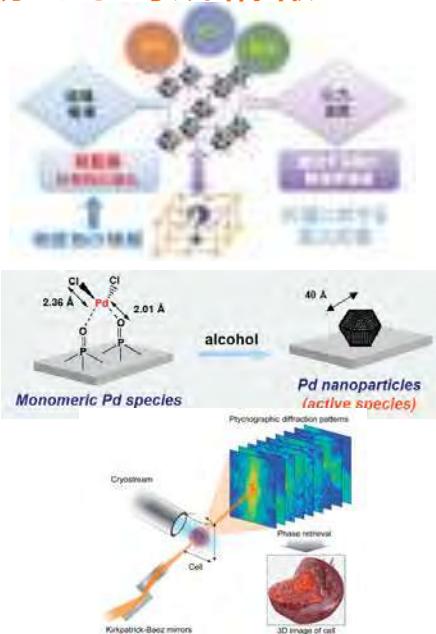


未来を創るERLサイエンス

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

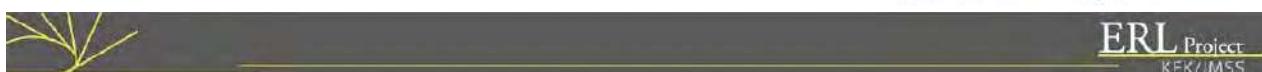


2. 不均一触媒の機能発現

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

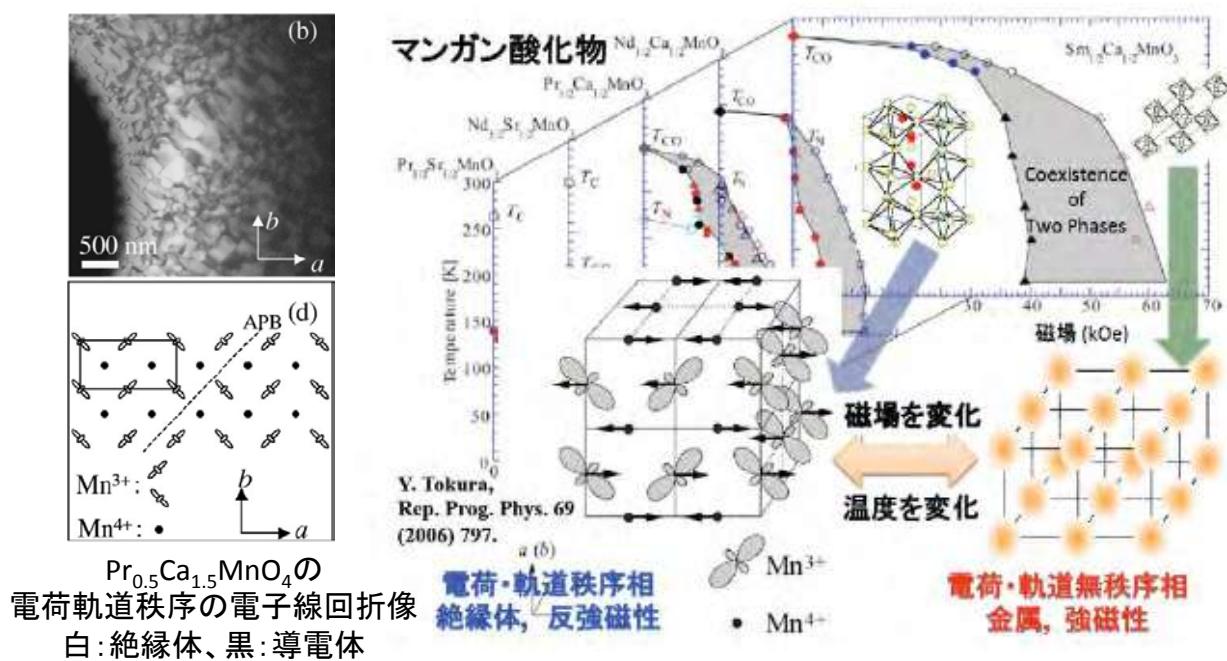
3. 細胞中の物質伝達

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

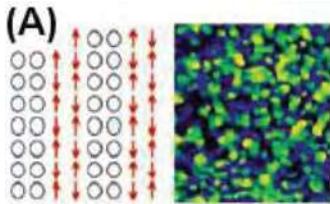


X.Z. Yu et al., Phys. Rev. B75, 174441 (2007).

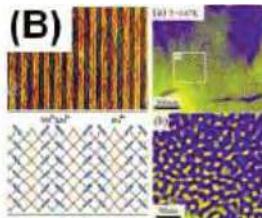
強相関系物質における相分離とナノ局所構造

銅酸化物高温超伝導体

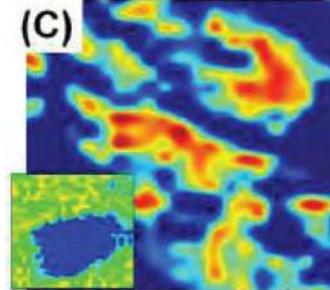
(A)



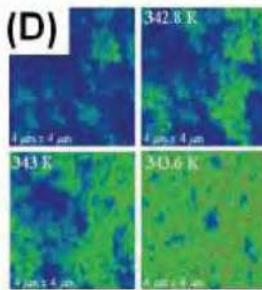
巨大磁気抵抗
マンガン酸化物



(C)



(D)

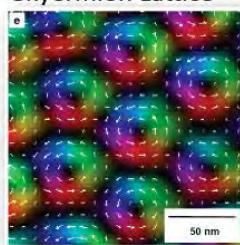


クロムのCDW, SDW

VO₂の金属相と絶縁相

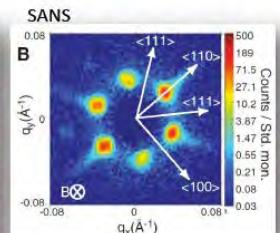
Courtesy of Prof. Oleg Shpyrko,
(University of California at San Diego)
XDL2011 Workshop Summary

Skyrmion Lattice



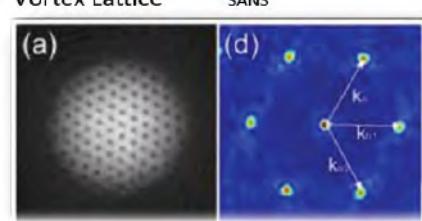
XZ. Yu et al.,
Nature 465, 901 (2010)

SANS



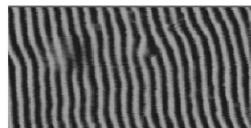
S Mühlbauer et al.,
Science 323, 915 (2009)

Vortex Lattice



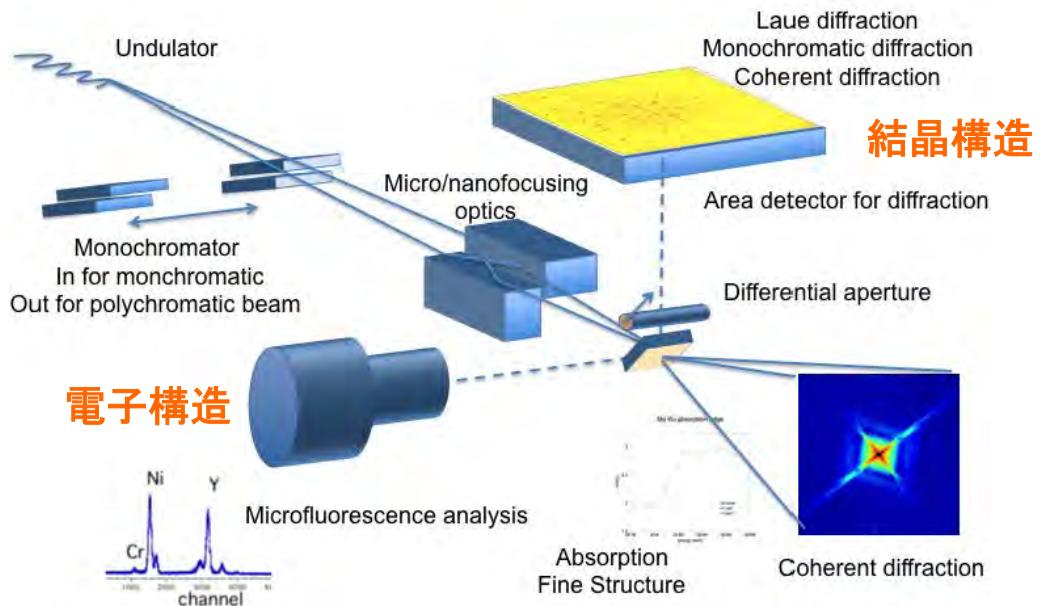
Magnetic Domain

FePd wire

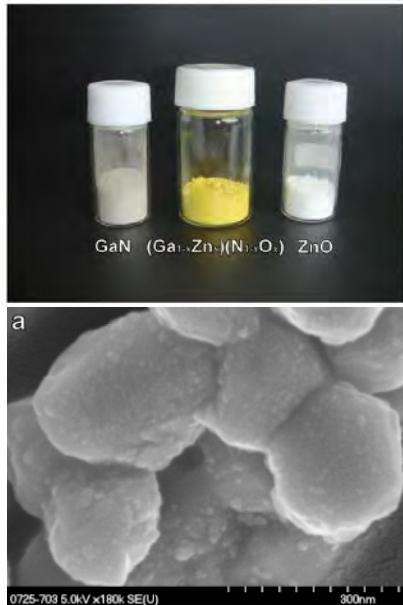


K. Chesnel et al.,
PRB 66, 172404 (2002)

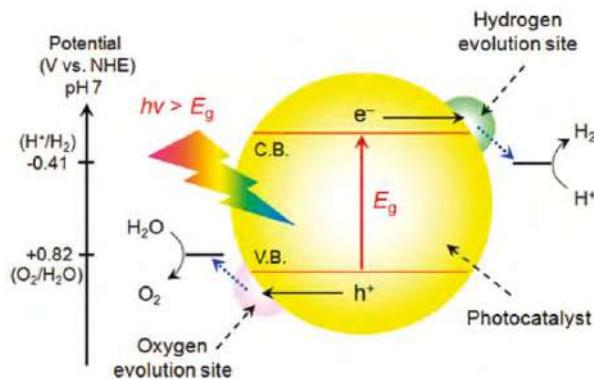
強相関薄膜試料の ナノビーム回折・分光の時分割測定



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

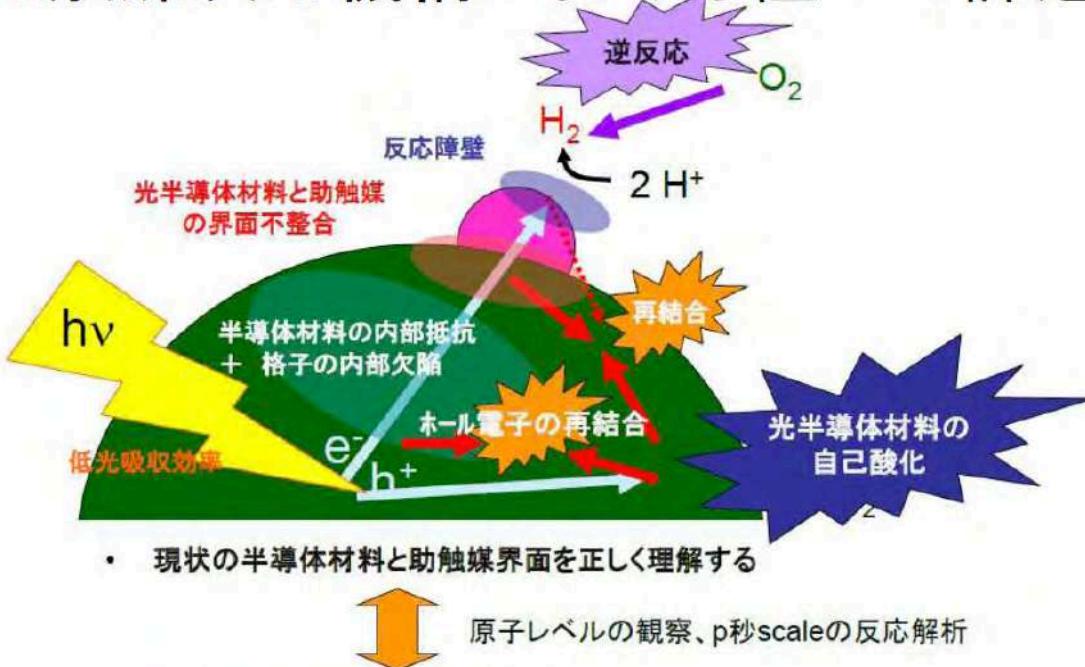


Maeda, K. and Domen K. (2010)
J. Phys. Chem. Lett. **1**, 2655.



ERL Project
KEK/IMSS

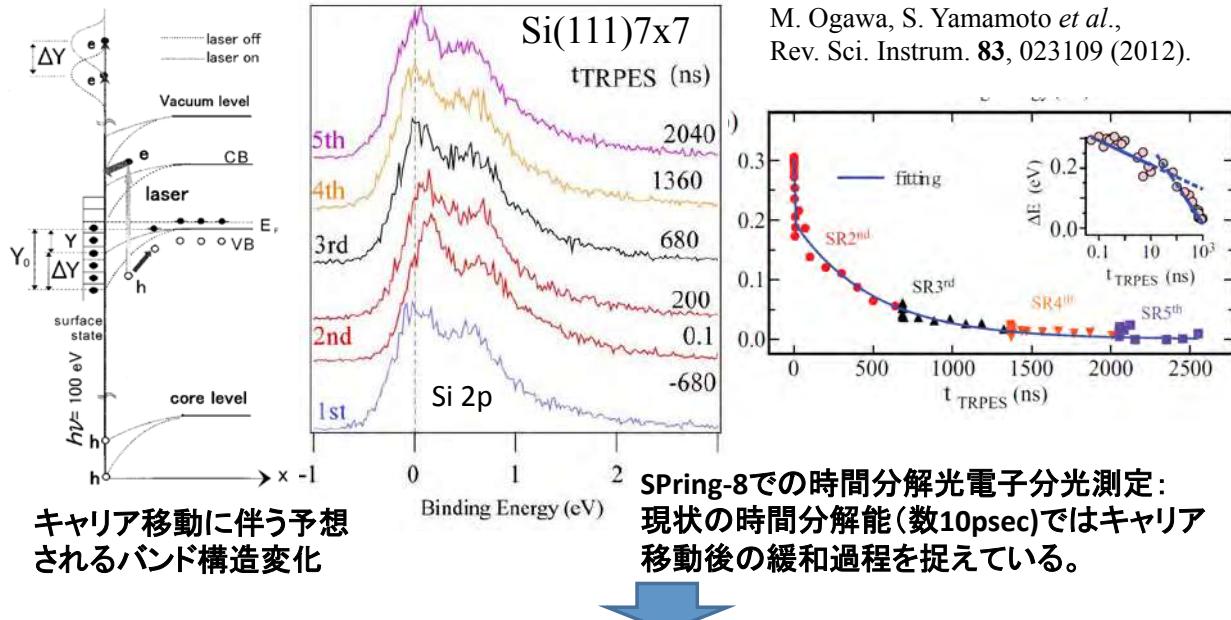
光触媒反応機構における種々の課題



探索研究ではなく、高度な精密設計

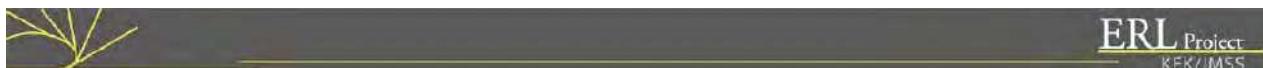
瀬戸山 亨氏(三菱化学)発表資料より抜粋 第2回ERLシンポジウム

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



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

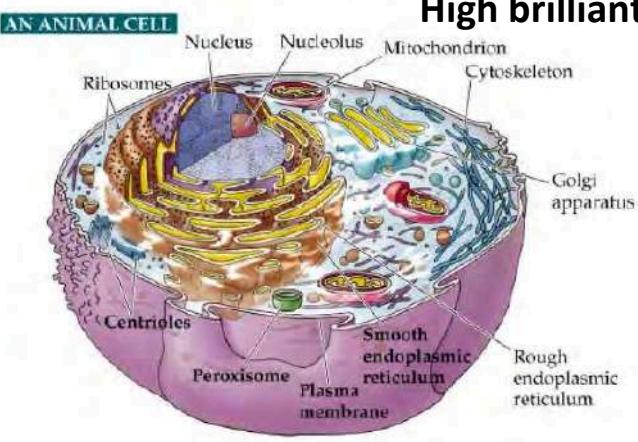
松田 巖氏(東大)発表資料より抜粋 第2回ERLシンポジウム



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



【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

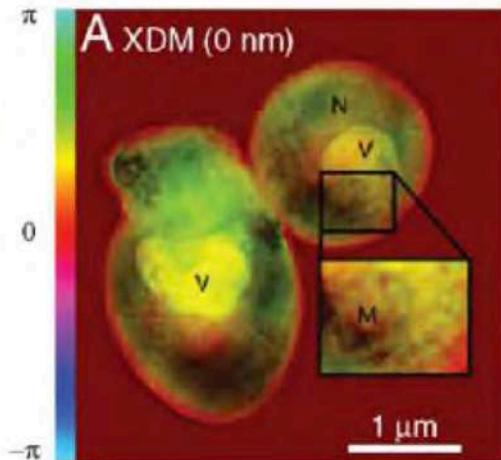
回折顕微鏡法は、細胞のように厚みのある試料の測定に向いている

5-10 nm resolution

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

Radiation damage ?

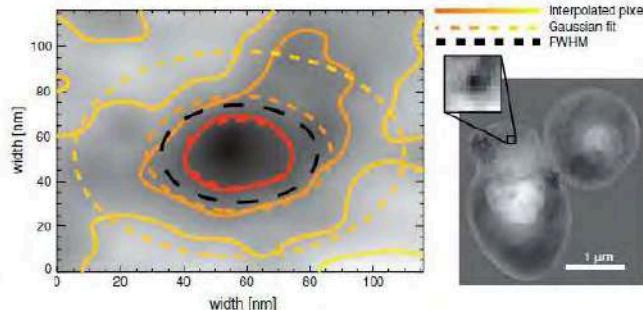
細胞の回折顕微鏡像の現状と将来



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))がおぼろげに見えている
- ・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

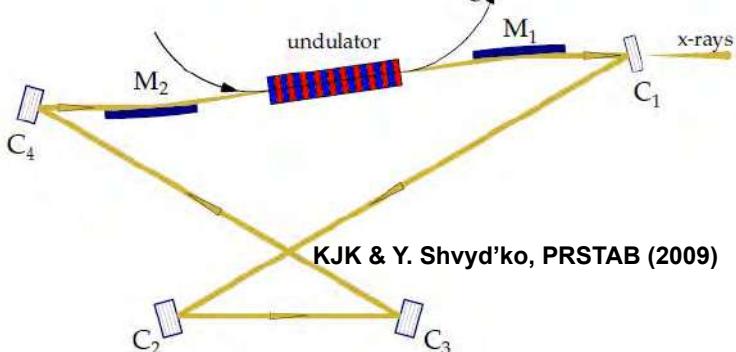
XFEL Oscillator

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(10^{15} 光子/秒, 10^9 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)



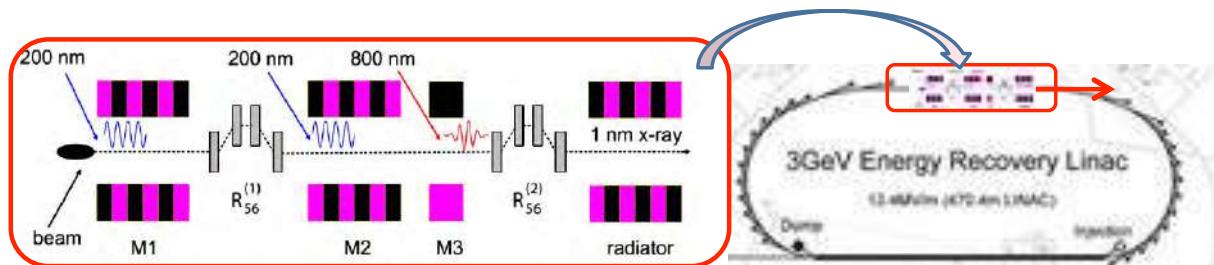
提案されている利用研究例

- ・X線非弾性散乱実験の革命(6桁の飛躍): 10^9 光子/秒(現状)から 10^{15} 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

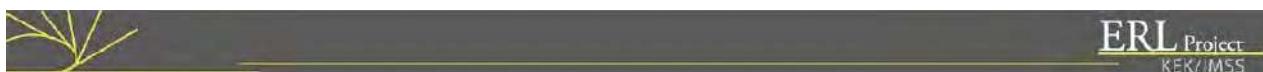


D. Xiang, Z. Huang, and G. Stupakov,
Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, 060701 (2009)

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



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

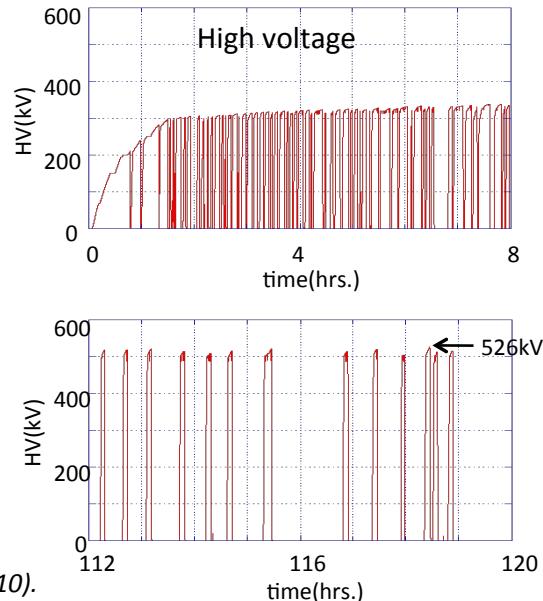
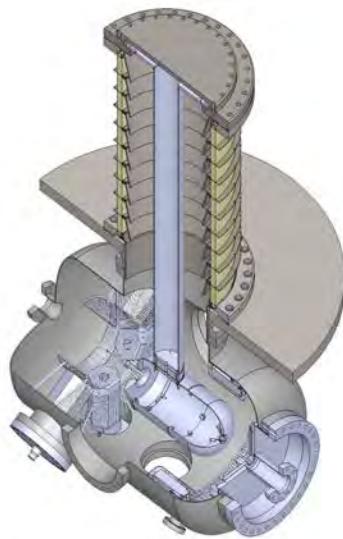
→ 1.3GHz 9セル空洞 + 150W HOM 減衰器 + 30 kW IOT
(inductive Output Tube)
 $E_{acc} \sim 15 \text{ MV/m}, Q_0 > 1 \times 10^{10}$

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



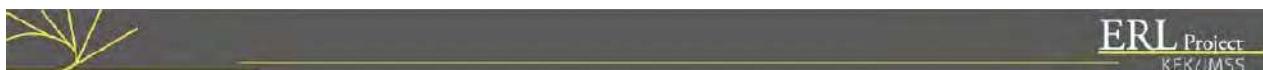
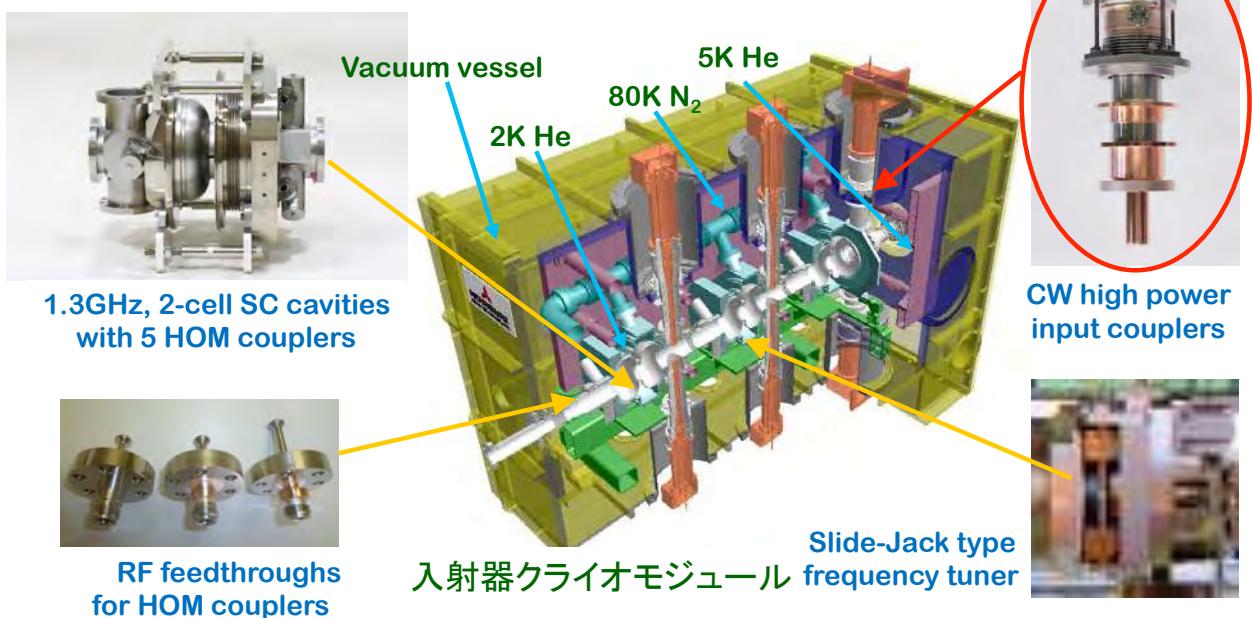
R. Nagai et al., Rev. Sci. Instrum. 81, 0333304 (2010).



ERL²³ Project
KEK/MSS

入射器超伝導空洞の開発

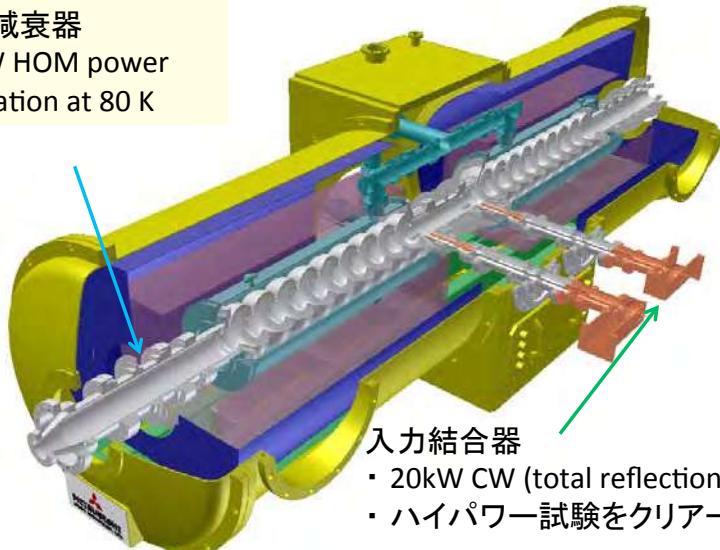
構成する各要素の性能試験は終了し、
クライオモジュールの組み立てを開始する。
シールド完成後、横測定による性能確認を行う。



主加速超伝導空洞の開発

HOM 減衰器

- 150W HOM power
- Operation at 80 K

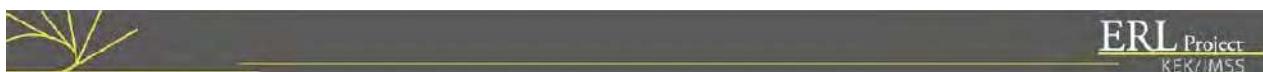


2台の空洞で目標である15MV/mの加速勾配を達成した。

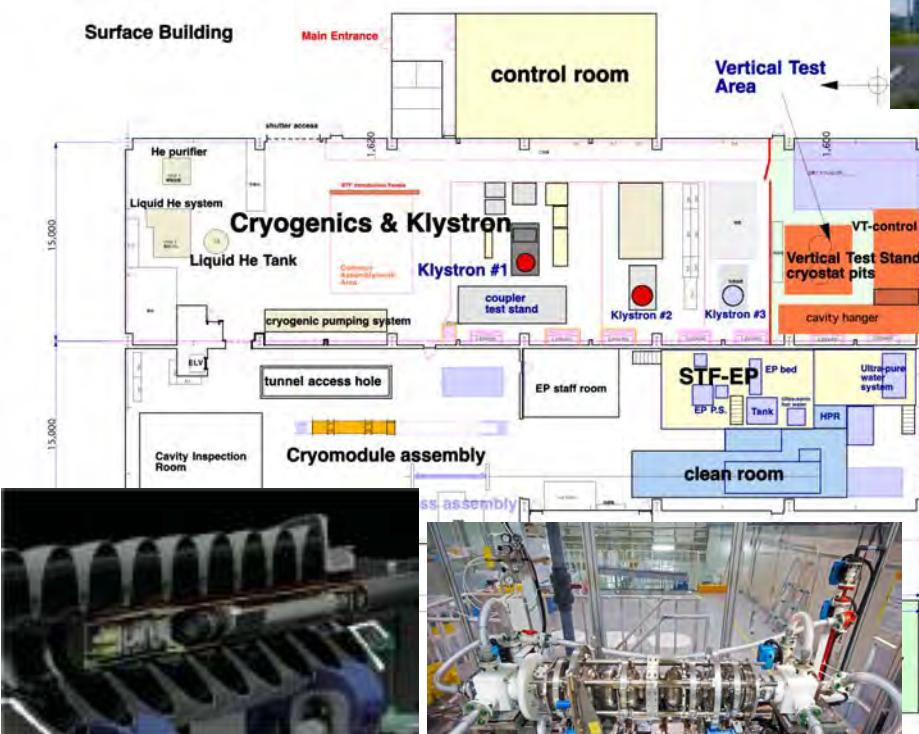
Beam acceleration
by superconducting cavities (April 13, 2012)



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)



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

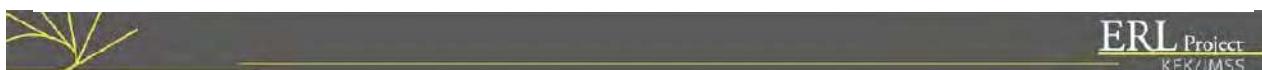
$E_{acc} = 29 \text{ MV/m}$

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

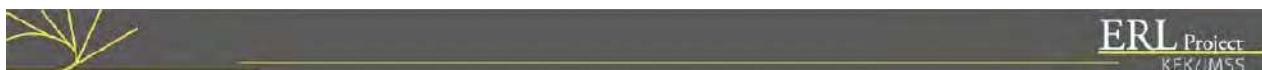
2014年 高圧ガス対応空洞量産開始

Nb平板



実証機としてのコンパクトERLの建設

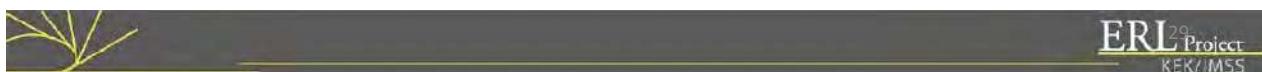
- R&Dマシンとしての役割
 - 加速器要素の性能試験
 - ビームを用いて各要素の性能および安定性の確認
 - 実用機に向けての問題点・改良点の洗い出し
 - ビームダイナミックスの評価
 - 空間電荷効果、CSR効果によるエミッタス増大
 - 各種ビーム不安定性の調査
 - ビームロス測定と対策 etc
- 光源としての役割
 - レーザ逆コンプトン散乱によるX線の発生
 - コヒーレント放射によるテラヘルツ光の発生



コンパクトERL建設の状況（2012年4月中旬）

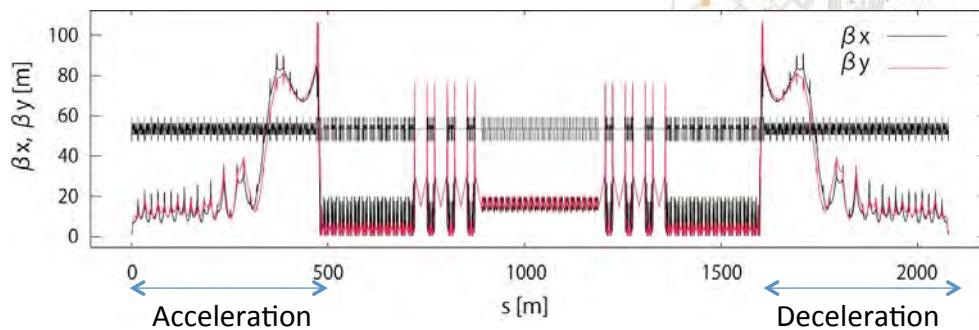
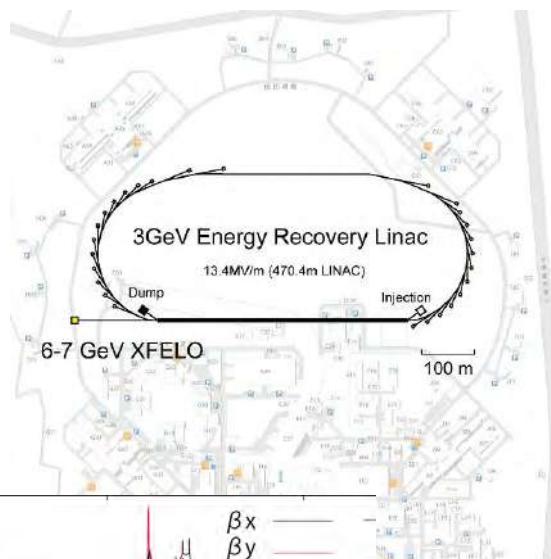


2013年3月ビーム調整運転開始



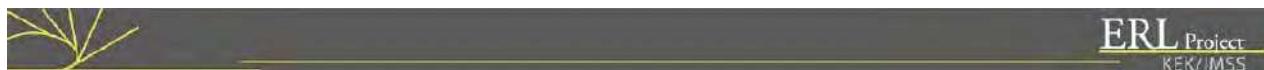
Layout of 3 GeV ERL (preliminary)

- 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



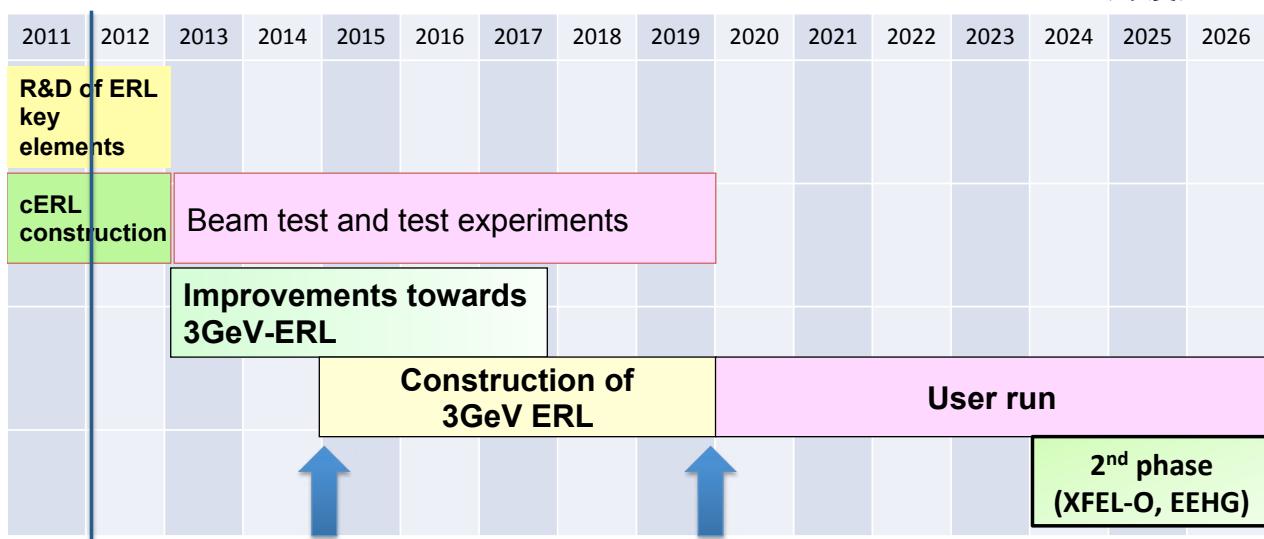
ERL実現へのロードマップ

1. CDRのバージョンアップ → 國際評価委員会(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plan
→ 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
ビームライン建設設計画の推進
→ 國際的量子ビームプラットホームを目指す



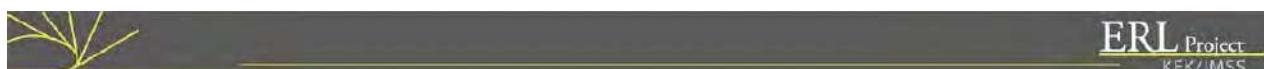
ERLロードマップ

(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



「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

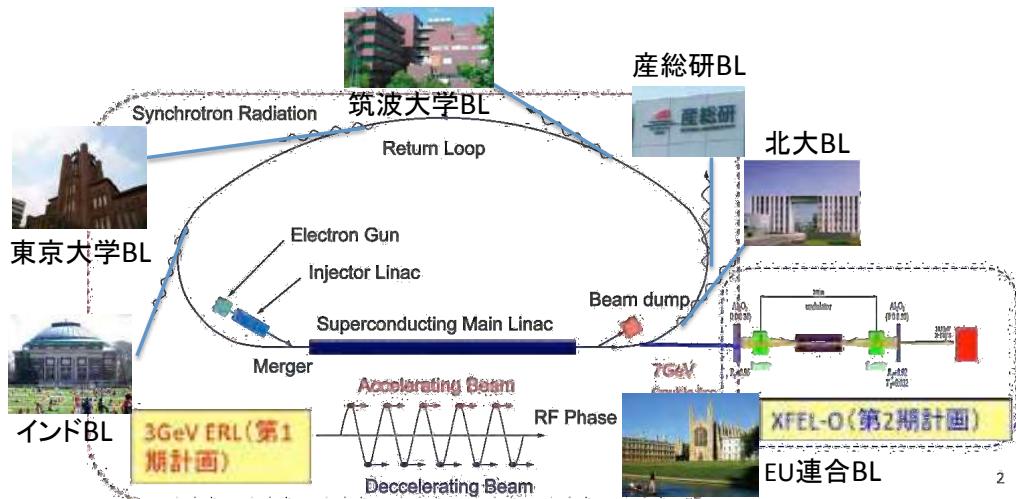
PFユーザーの分布(共同利用)



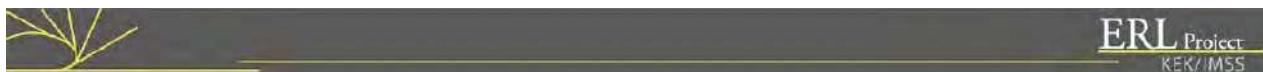
PFを利用している企業82
事業所の分布(FY2010)



国際的な建設・利用コミュニティの形成



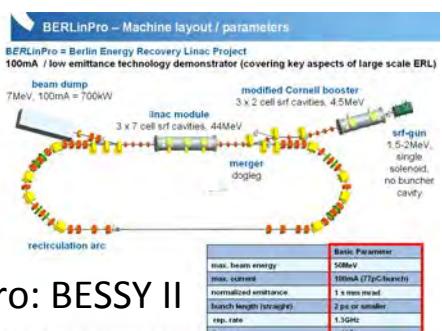
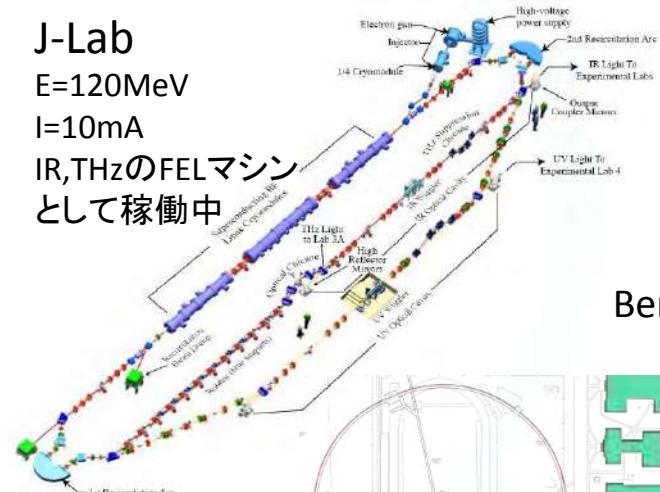
概念設計・要素技術・計測技術・利用研究に関する国際的協力



世界のERL研究施設・計画

J-Lab
E=120MeV
I=10mA

IR,THzのFELマシン
として稼働中



Berlin-Pro: BESSY II



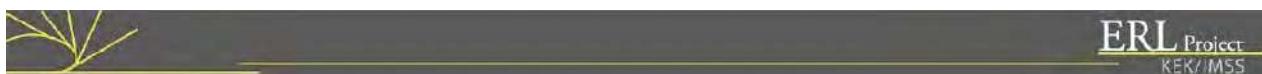
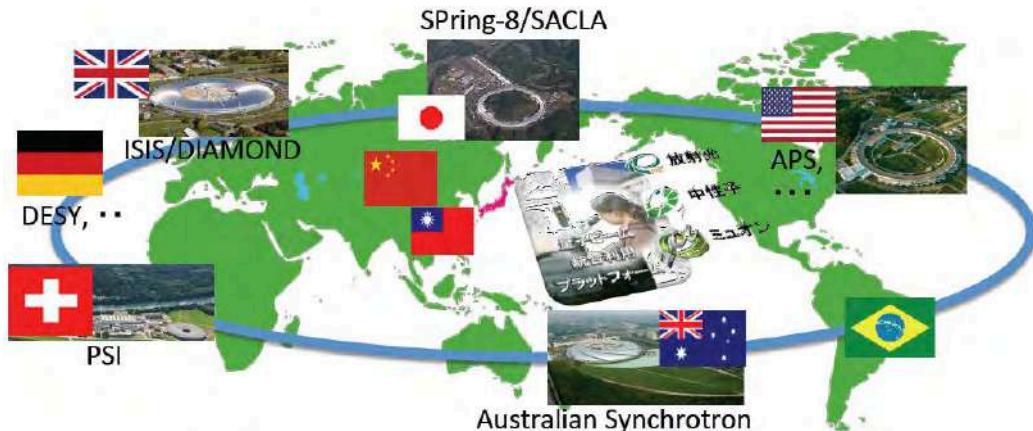
Cornell Univ.



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



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 ~0.数 nm, ~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 —何故ERLなのか—
3. ERL開発の現状 —ERLの実現は直ぐ近く—
4. ERLをどう使うか

