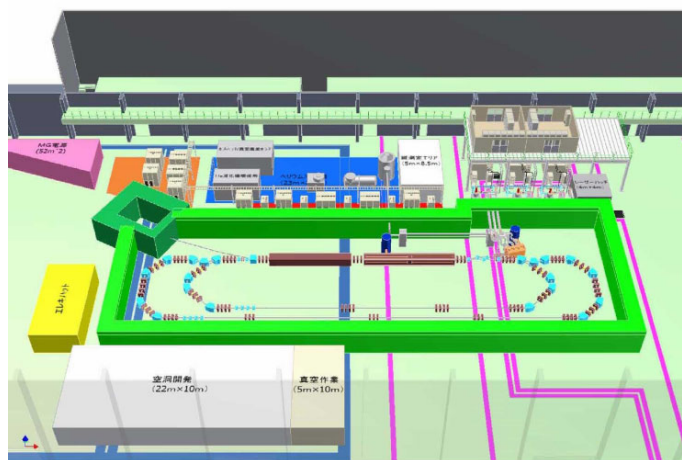


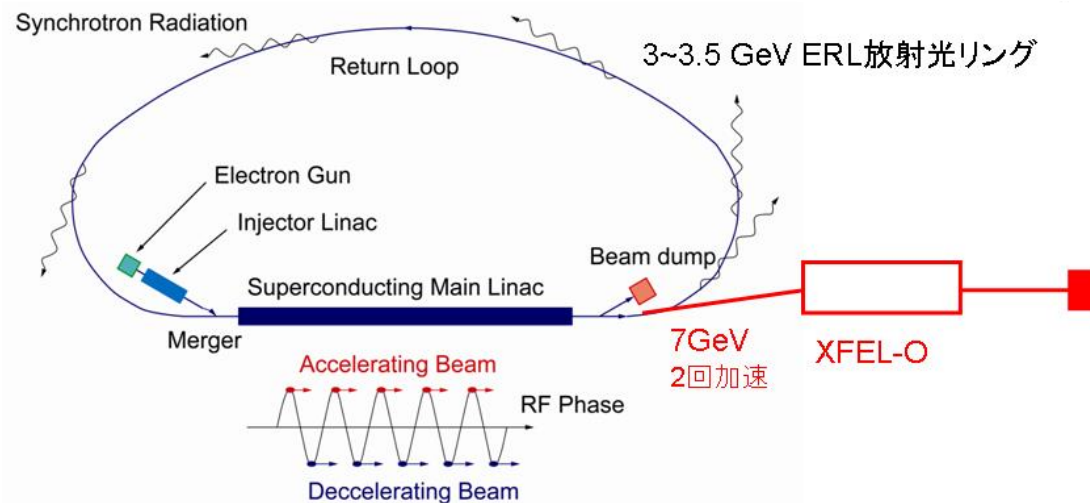
# ERL計画の概要と進捗状況

河田 洋

*ERL Project Office, KEK*  
*Photon Factory, IMSS, KEK*



cERL



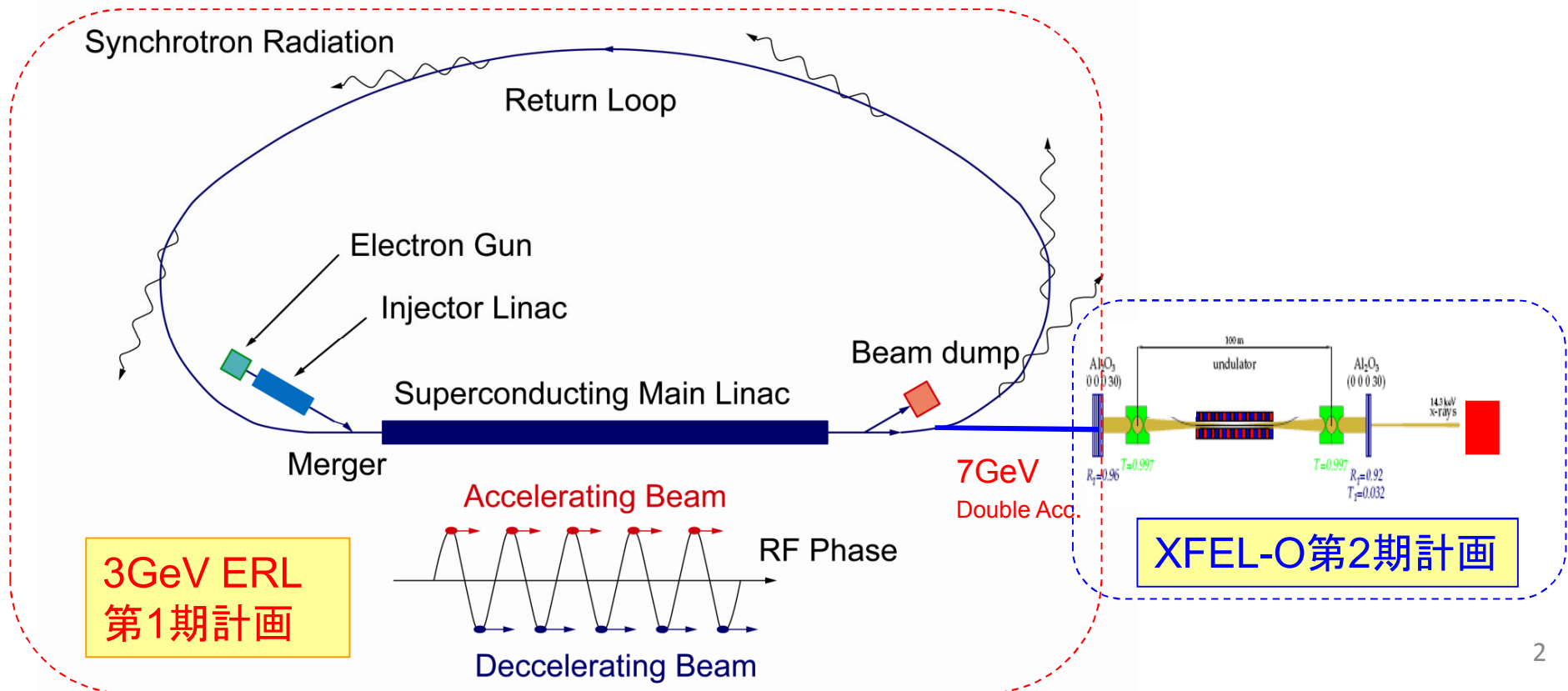
3GeVクラスERL + XFEL-O

# PF後継機としての次世代光源

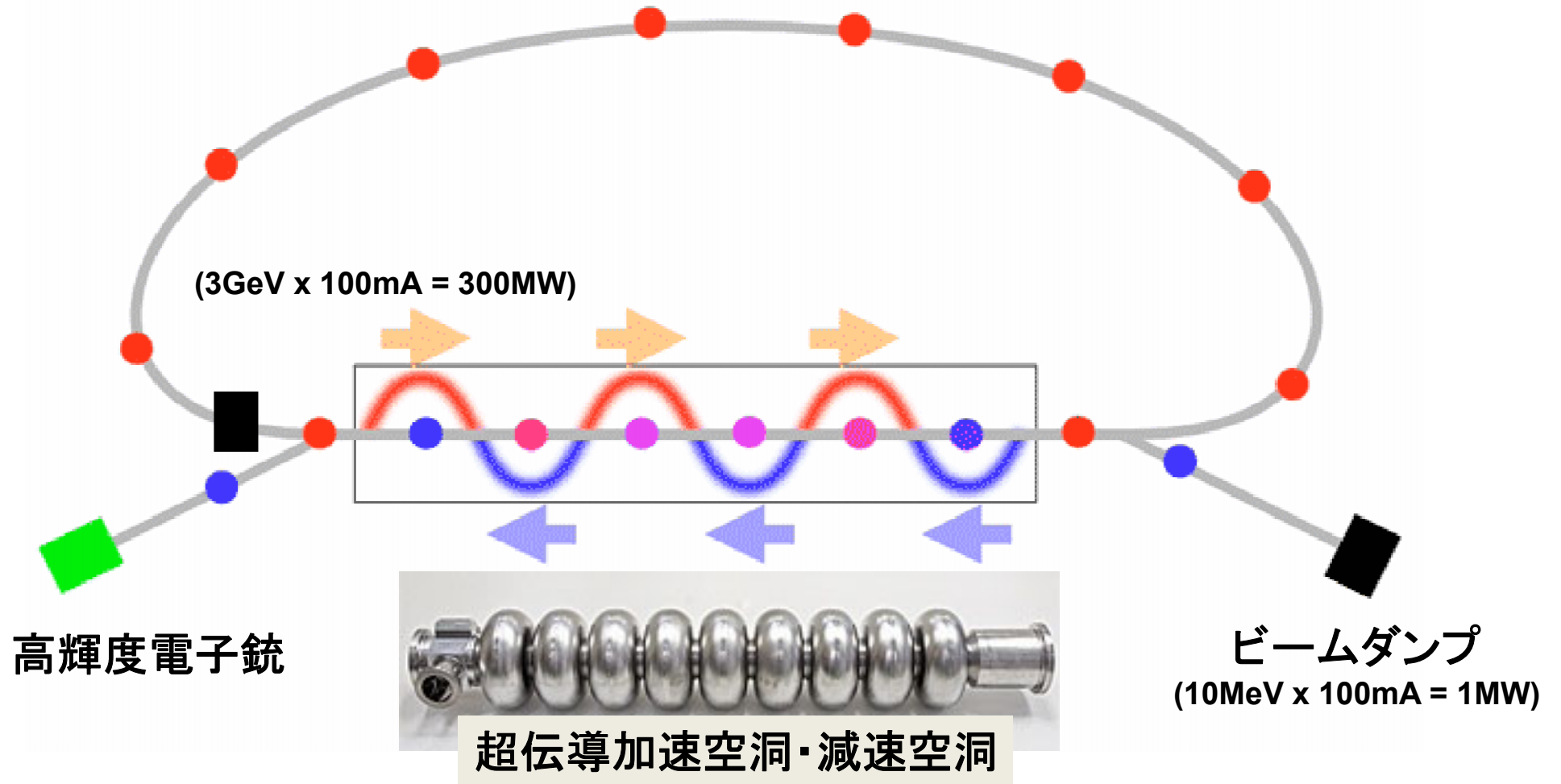
ユーザーのニーズ: 汎用性と先端性  
サイエンスの広がり と 課題解決型アプローチ  
超高時間分解能、非破壊、超高速データ収集  
軟X線超高輝度光源

3GeV ERL

## 3GeVエネルギー回収型線形加速器 と 共振器型XFEL (エネルギー回収型線形加速器: ERL 共振器型XFEL: XFEL-O)

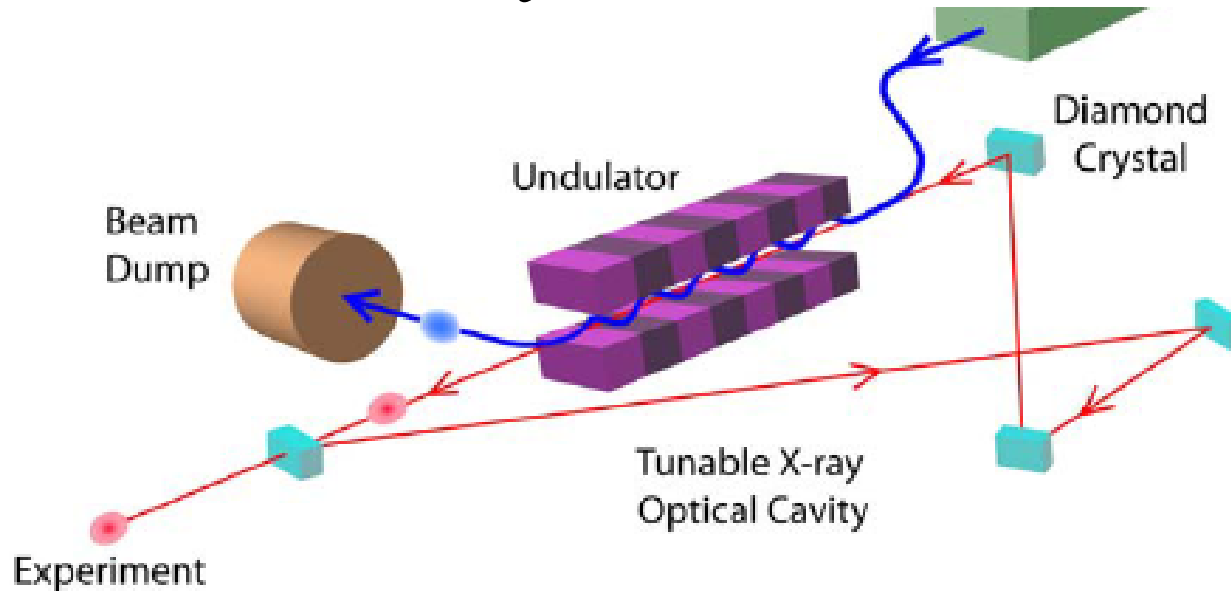


# ERLの概念図



# Hard X-Ray FEL Oscillator (XFEL-O)

By Kwang-Je Kim

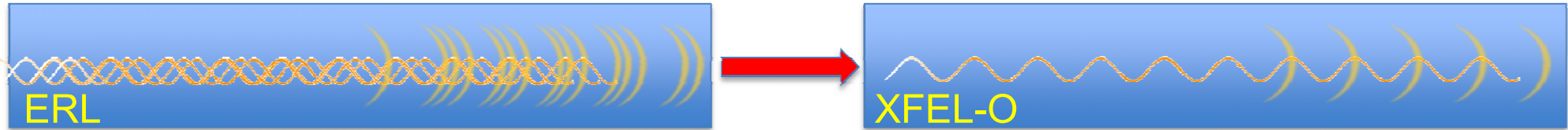


- Store an X-ray pulse in a Bragg cavity → multi-pass gain & spectral cleaning
- Provide meV bandwidth
- MHz pulse repetition rate → high average brightness  
( $10^{15}$  Photons/sec,  $10^9$  photons/pulse @  $\sim 10$ keV with a few meV b.w.)
- Zig-zag path cavity for wavelength tuning
- **Single mode X-ray laser (time and space domains)**

Originally proposed in 1984 by Collela and Luccio and resurrected in 2008 (KJK, S. Reiche, Y. Shvyd'ko, PRL 100, 244802 (2008))

# ERLとXFEL-Oの特性

- 1) 直線加速器をベースとする放射光源
  - ① エミッタンス  $\sim 15 \text{ pm-mrad}$  (回折限界光源)
  - ② パルス幅  $\sim 0.1\text{-}1 \text{ pico-second}$
- 2) 多数のIDを設置可能
- 3) 空間・時間コヒーレント光源(XFEL-O)のオプション(回折限界 & フーリエ限界光源)

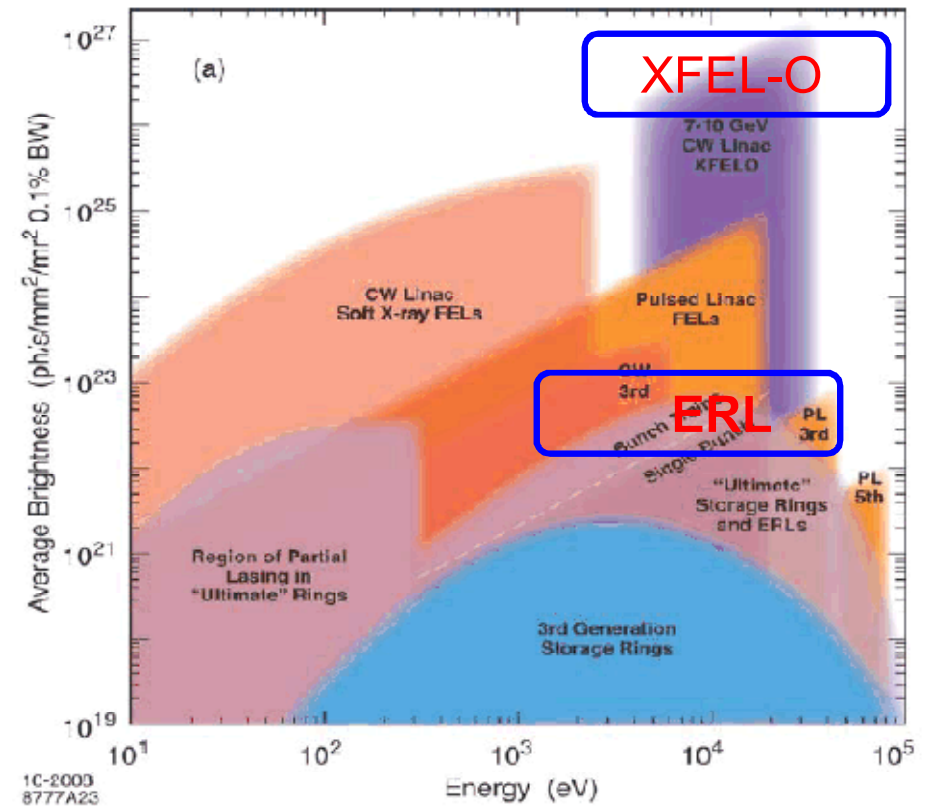
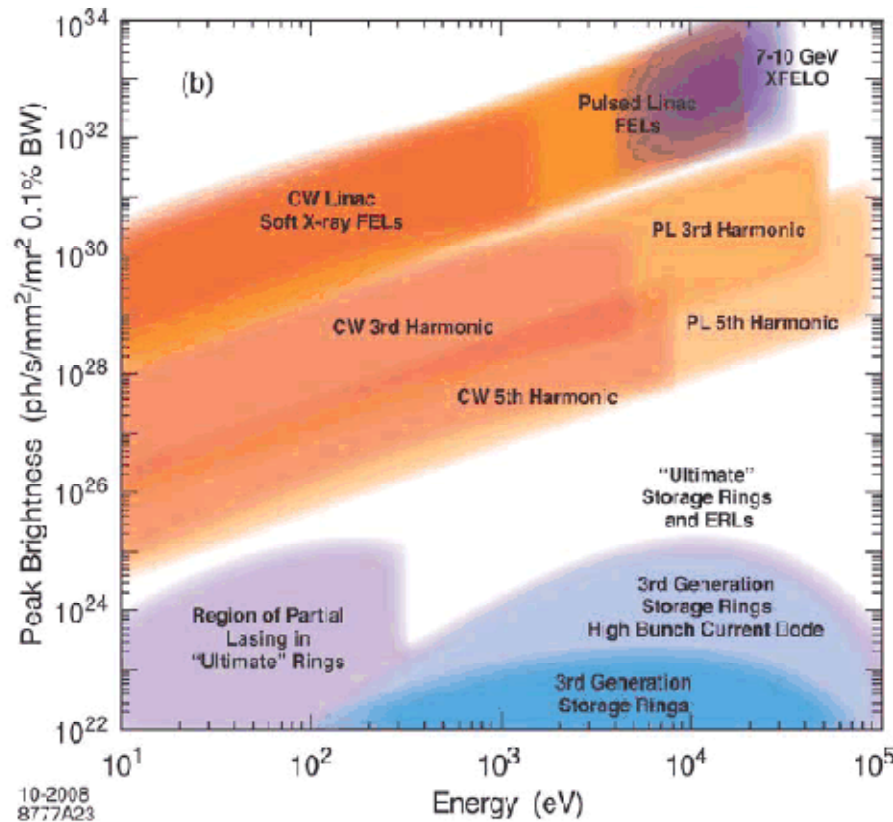


## ERL、XFEL-O、SASE-FELの相補性

	平均輝度	ピーク輝度	周波数(Hz)	コヒーレンス (空間方向)	コヒーレンス (時間軸)	バンチ幅 (ps)	BL数	特記事項
ERL	$\sim 10^{23}$	$\sim 10^{26}$	1.3G	$\sim 20\%$	non	0.1~1	~30	非破壊測定
XFEL-O	$\sim 10^{27}$	$\sim 10^{33}$	~1M	100%	100%	1	~1	シングルモード (few meV)
SASE-FEL	$\sim 10^{22\sim 24}$	$\sim 10^{33}$	50~10K	100%	few %	0.05	~1	ワンショット測定(破壊測定)
USR	$\sim 10^{22}$	$\sim 10^{23}$	~500M	~10%	non	10~100	~30	非破壊測定
3rd-SR	$\sim 10^{20\sim 21}$	$\sim 10^{22}$	~500M	0.1%	non	10~100	~30	非破壊測定

USR: Ultimate Storage Ring (究極の蓄積リング型放射光)、3rd-SR: 第3世代放射光、  
 平均輝度 : 光子/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%/s @ 10 keV、ピーク輝度 : 光子/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%/パルス @ 10 keV

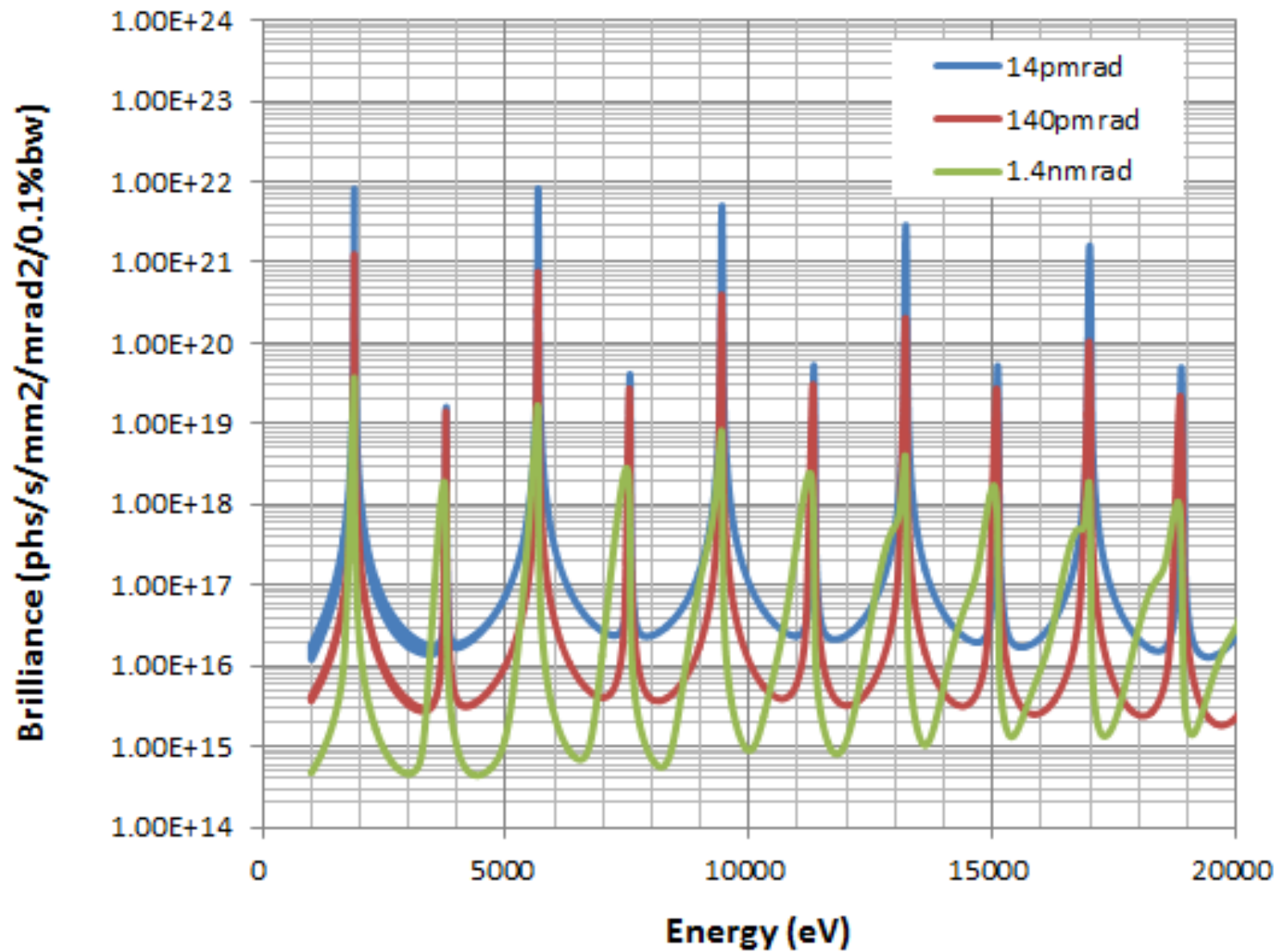
# Spectral Brightness



R. Hettel, "Performance Metrics of Future Light 13 Sources", FLS2010, SLAC, March 1, 2010 の報告書の中のERLとXFELのスペクトルから見た位置付け.



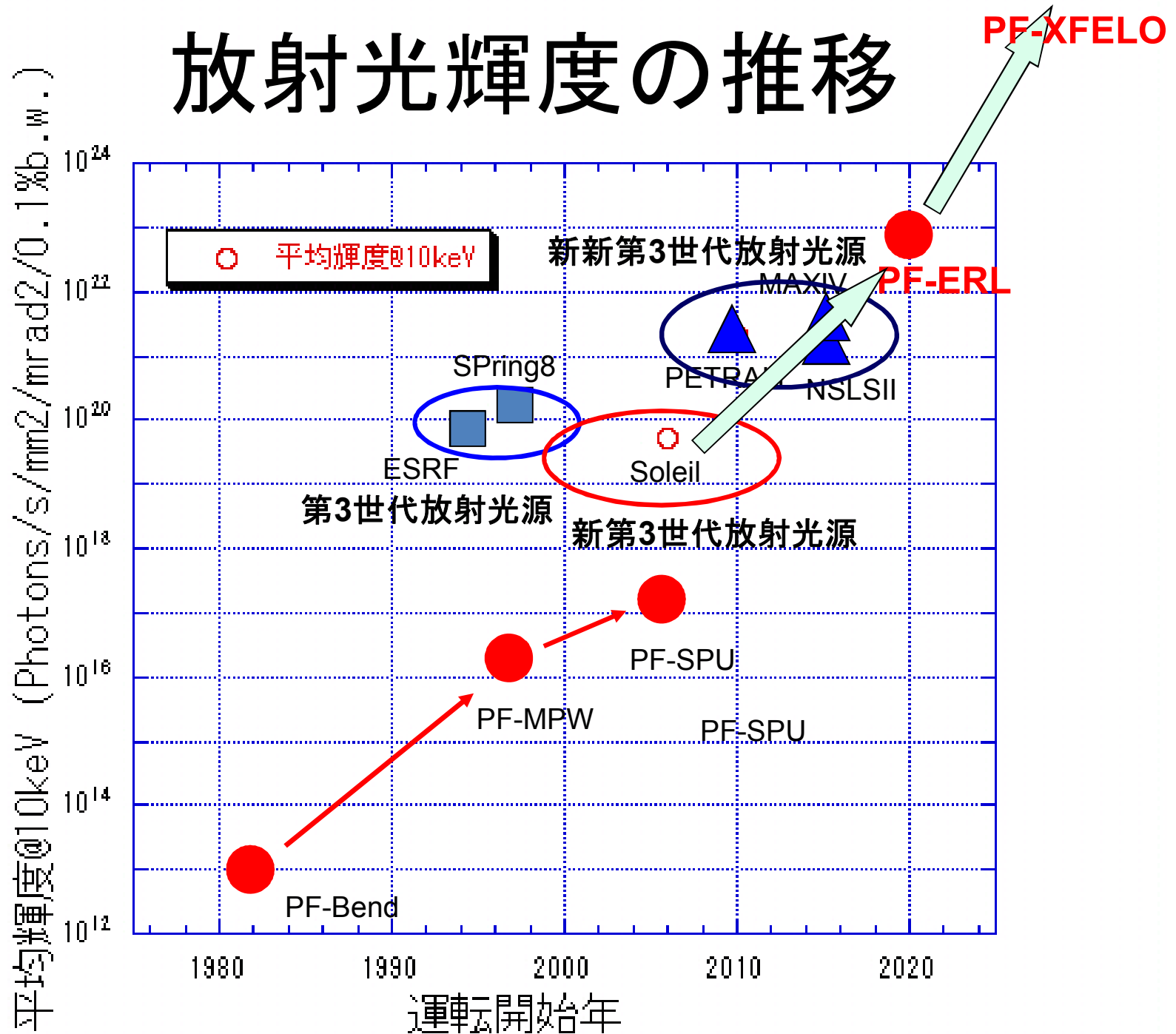
# Linear Undulator, $\lambda_u=18\text{mm}$



$E=3.0\text{GeV}$ ,  $I=100\text{mA}$ ,  $\epsilon_x=\epsilon_y=14\text{pmrad}$ ,  $140\text{pmrad}$ ,  $1.4\text{nmrad}$ ,  $\sigma_E/E=4.0\text{e-}4$

$\lambda_u=18\text{mm}$ ,  $L=6\text{m}$ ,  $N=333$ ,  $K=1.74$

# 放射光輝度の推移





# ERLで実現するサイエンス(1)

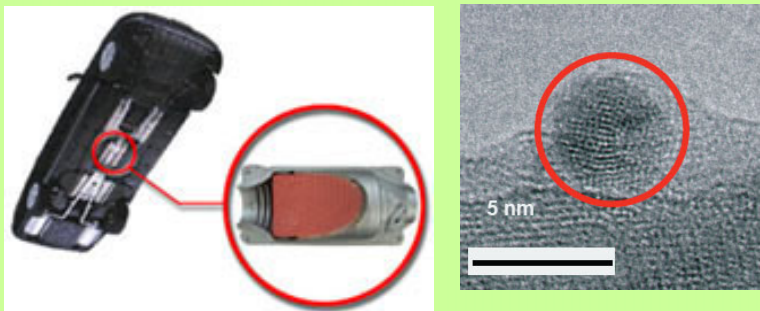
## グリーンイノベーション分野

ナノビーム

空間コヒーレンス

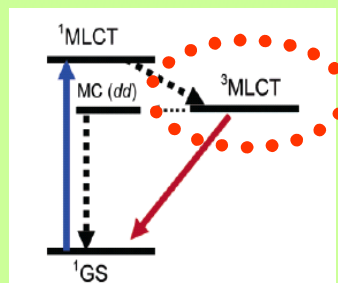
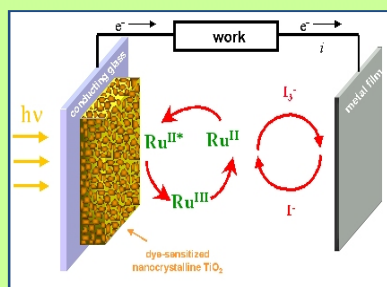
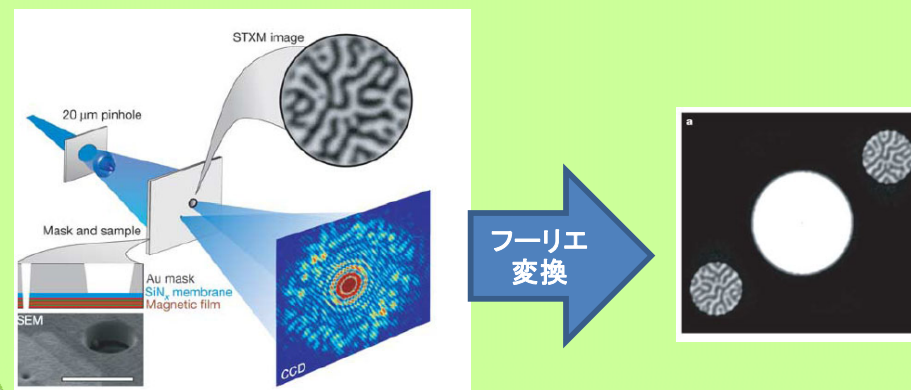
イメージング

### 高性能な不均一固体触媒の開発

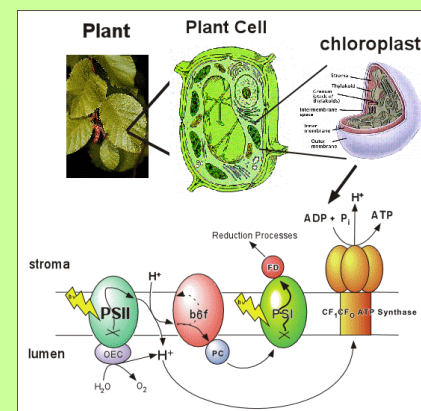


高性能な不均一固体触媒の開発と評価  
(燃料電池、排ガス除去、光触媒など)

### 新規デバイスの開発に向けて 磁気ドメインのホログラフィー観察



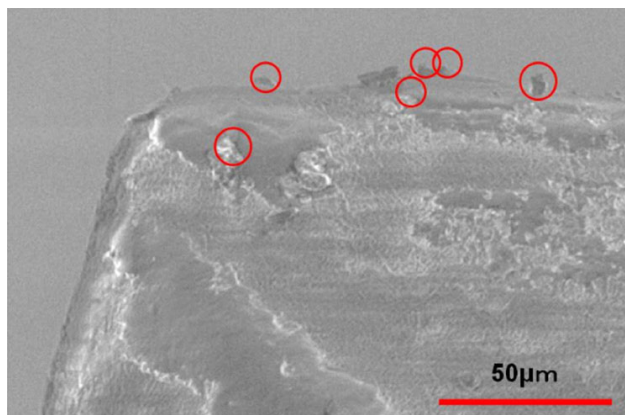
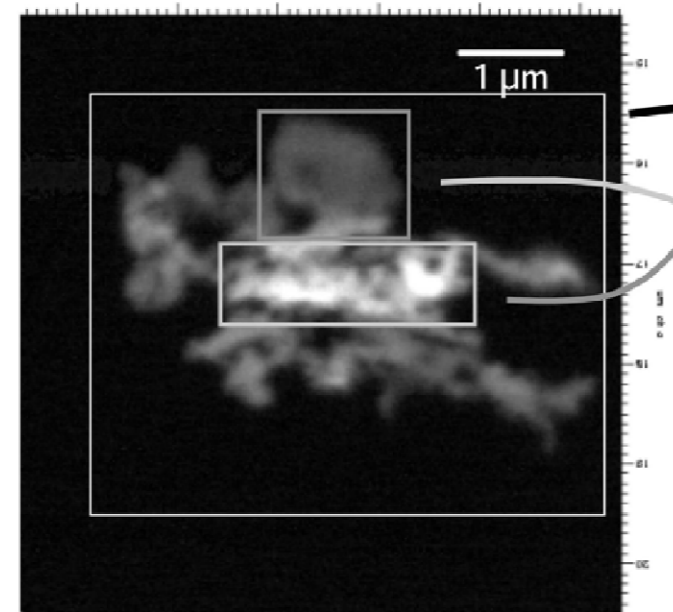
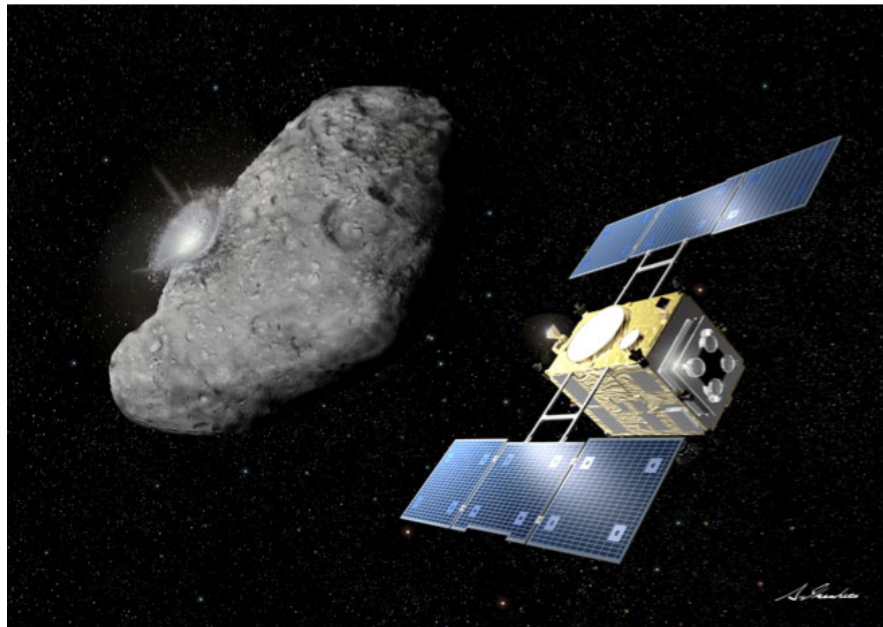
太陽光エネルギー利用～色素増感  
太陽電池における光反応素過程



光合成反応の理解から人工光合成への  
応用を目指す

宇宙・地球科学分野

## 宇宙塵から地球の起源を探る



スターダスト計画、はやブサなどにより採取された宇宙塵微粒子の分析  
ミクロン以下の微粒子の化学状態分析を行うためには、ナノメートルオーダーのX線ビームが不可欠

# ERLで実現するサイエンス(2)

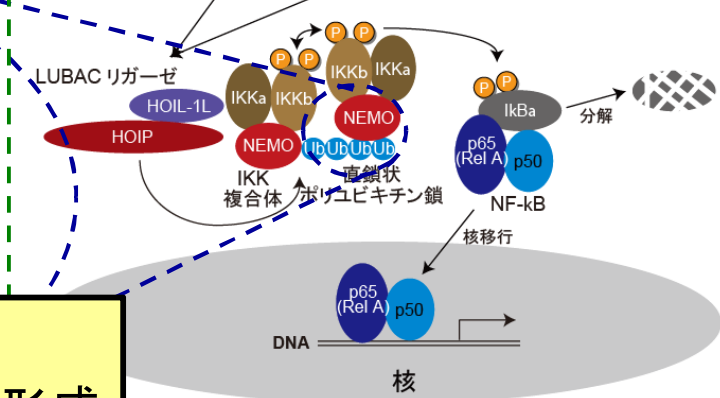
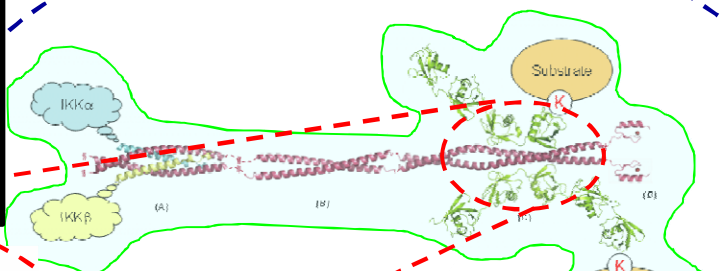
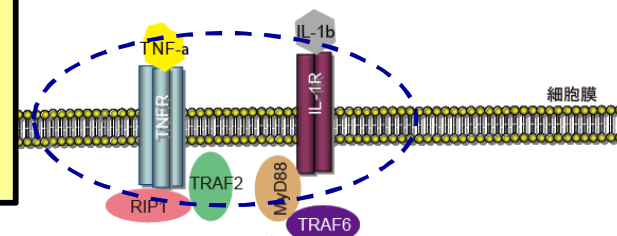
ナビーム

回折

ERL/XFEL-Oで拓く生体素子階層構造のダイナミクスと創薬

ERL:斜入射X線小角散乱  
膜タンパク質複合体の構造変化を解析

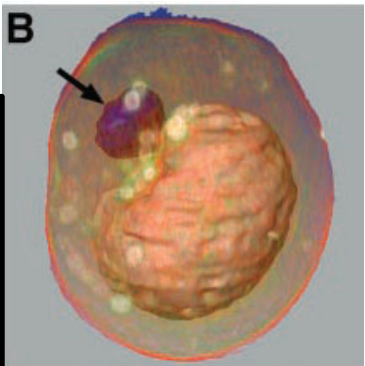
ERL: 極限のX線結晶構造解析  
超分子複合体、膜タンパク質複合体の原子分解能高解析



ERL: X線小角散乱  
シグナル伝達系の複合体形成と翻訳後修飾に伴う構造変化を時分割溶液散乱で解析

XFEL-Oナノ結晶構造ダイナミクス解析: XFEL-Oの高繰返し1MHzはナノ結晶ジェット(100kHz~1MHz)とよくマッチ。  
XFEL-Oによりデータ収集が10000倍加速(1日86400データセット)⇒

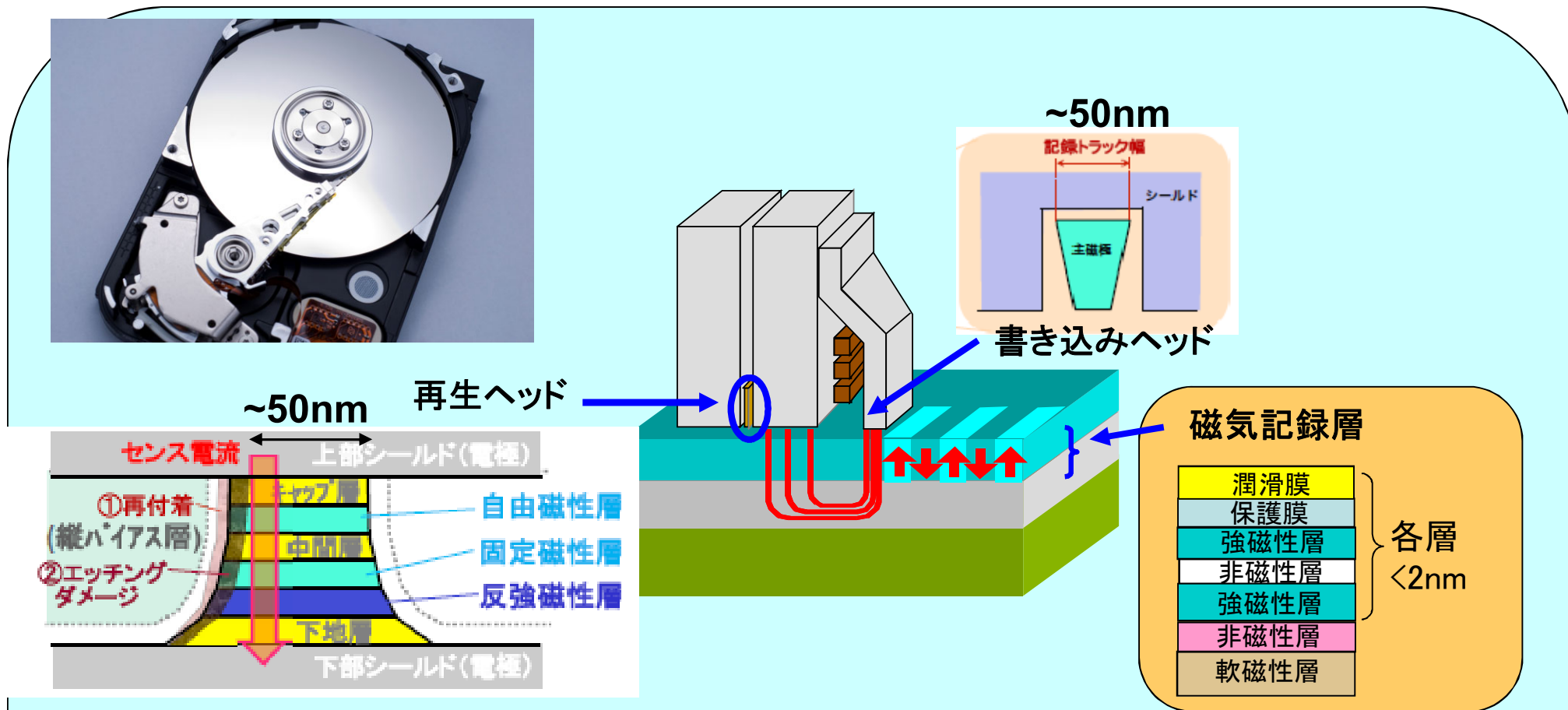
ERL:放射光X線トモグラフィ  
異なる金属でラベルされたタンパク質の細胞内動態を高分解能・高コントラストで解析



例: ポリユビキチン鎖の合成・認識機能の発現機序の解明、薬剤の効果の解析による創薬プロセスの加速

# 産業界からの要請

## -磁気記録デバイスの場合-

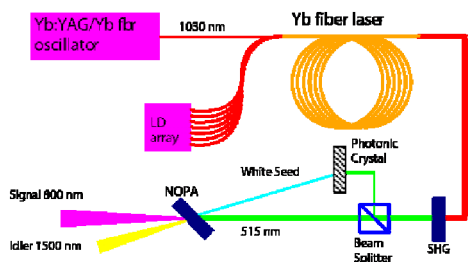


- 1) 書き込み、再生ヘッド:すでに2次元方向で50ナノメートル!
- 2) 界面のダメージ層(~5ナノメートル)の評価が重要課題!
- 3) 磁気デバイスは磁性層状構造が基本:その磁気構造を非破壊で!

数ナノメートル径の放射光による、磁気構造、化学結合状態、  
応力分布測定等の3次元計測が次の微細化の技術を築く



# ERLの加速器要素技術のR&D項目



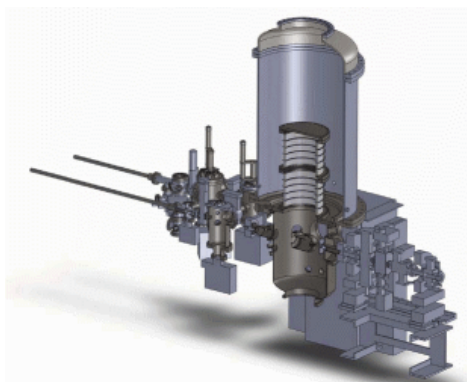
## フォトカソード励起レーザー:

- High average power: 15 W CW
- Repetition: 1.3 GHz,  $\lambda \sim 800$  nm



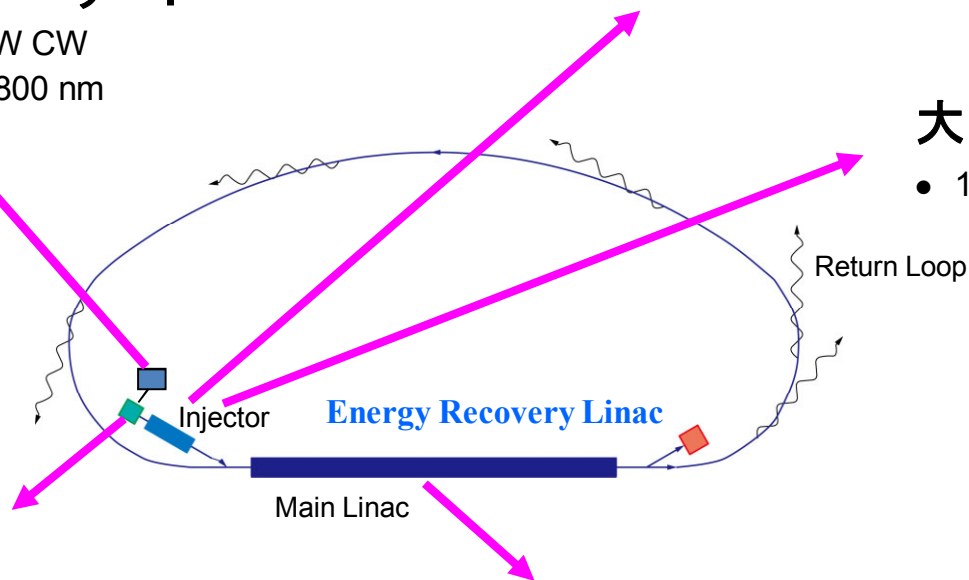
## 入射部超伝導空洞

- High input power: 170 kW/coupler
- Medium gradient: 15 MV/m
- High beam currents: 100 mA (CW)



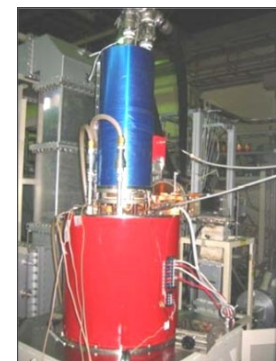
## 高輝度DC電子銃:

- 500 kV, 10-100 mA
- Normalized emittance: 0.1 - 1 mm·mrad



## 大出力RF源

- 1.3 GHz, 300 kW (CW) for injector



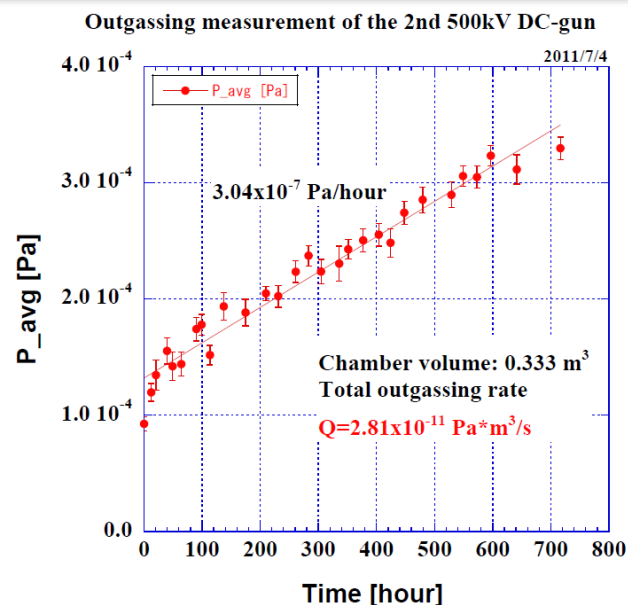
## 主加速部超伝導空洞

- Medium gradient: 15-20 MV/m (CW)
- High average current: 200 mA
- Higher-order-mode damping

# cERL入射部開発の現状

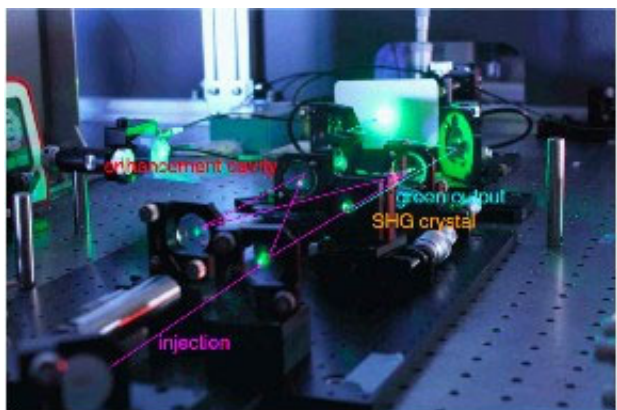
## 500 kV第2電子銃開発

- 極高真空開発 (Ti製チェンバー、絶縁用セラミック管)
- 高圧電源 (600 kV, 10 mA)



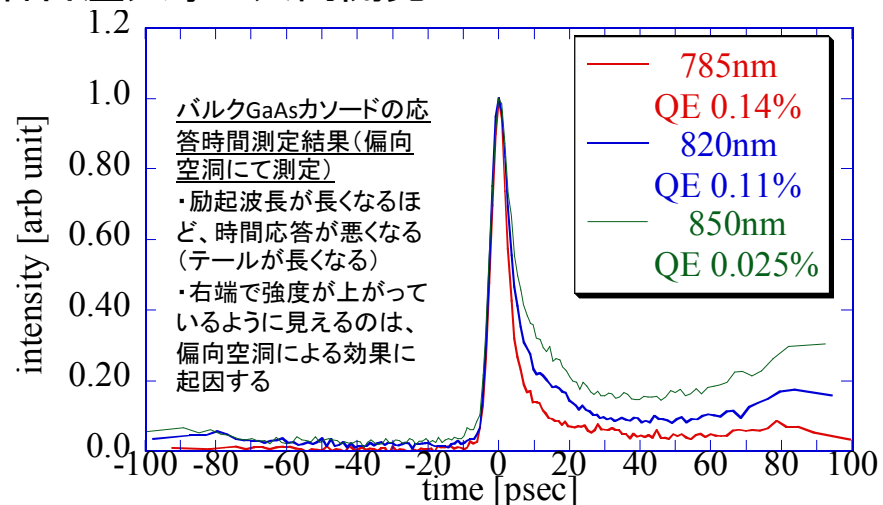
## レーザー開発

- cERLの10 mA運転に必要な仕様: 1.3GHz, 530nm, 20ps, 1.5W



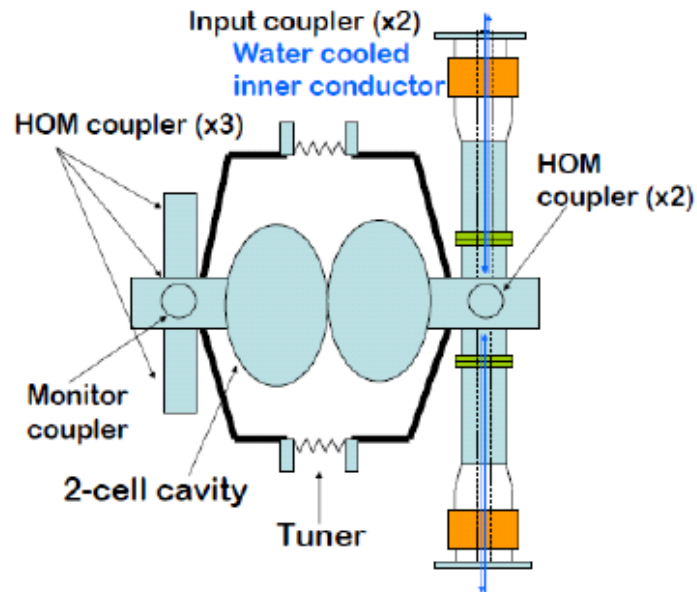
## カソード開発

- 名古屋大学と共同開発

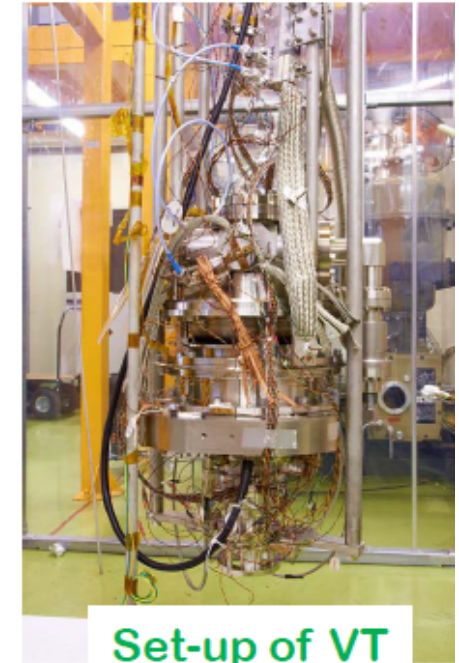


# Injector Cryomodule for cERL

1 Cryomodule = 3 x 2-cell Cavity



Three 2-cell cavities with 5 HOM couplers



Set-up of VT

	$V_{acc}$ [MV]	$P_{rf}$ [kW]
Cavity-1	1.5	10
Cavity-2	2.5	25
Cavity-3	2.5	25

( $I_{beam} = 10$  mA,  $P_{rf}$  /coupler)



Six cw input couplers



High power test stand

Eiji Kako (KEK)  
2011 June 28

7/20 ERL計画推進委員会  
cERL Injector Cryomodule



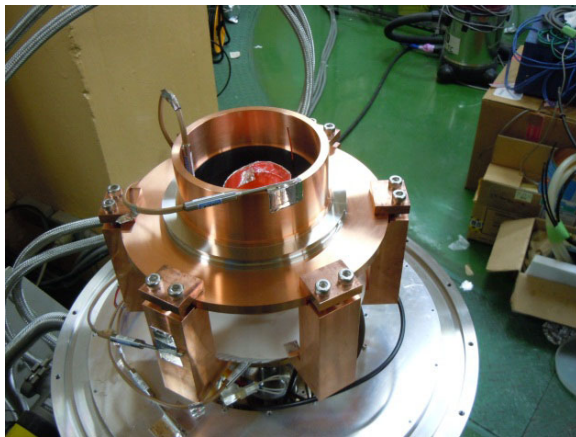
# cERL主空洞の進捗

## 1. 震災後の復旧について

- ✓ 空洞、入力カップラー：製造上での震災の影響はないが、ERL開発棟(ERL-TF)が立入禁止のため、納入が1.5ヶ月遅れた。これは全工程へ影響した。
- ✓ HOM減衰器部品：HIP工場が被災したため、部品納期が3ヶ月遅れたが、全工程への影響はない。
- ✓ ERL開発棟：照明落下のため、立ち入り禁止。  
3月：超純水装置立ち上げるも異常なし。  
5月：クリーンルーム点検をメーカーに依頼。異常なしで、以降は運転中。

## 2. R&D活動

- ✓ 空洞開発：2台の本機空洞が完成し受入れ検査、現在は縦測定の準備中。
- ✓ 周波数チューナー：試作機の動作試験中。ミクロンの動作を計測している。(300Hz/ミクロン)
- ✓ HOMダンパー：フェライトの80Kヒートサイクル試験を実施中に被災。
- ✓ 今年度中に主要部品製作を完了、来年(2012年)夏に総組立てと据え付けを予定している。



ダンパーの熱サイクル試験  
この直後に大地震発生



納品された2台の9セル空洞  
受け入れ検査の後、EP、アニールを実施  
7/20 ERL計画推進委員会



チューナーの動作特性試験



# ヘリウム冷凍設備



- 2010年8月に茨城県の完成検査の合格
- コールドボックス内配管の内面を洗浄
- 2011年1月にヘリウム液化に成功！



# RF源

- 300KWクライストロン用高圧電源の立ち上げ・調整完了
- 2系統の入力カプラー用テストスタンドを構築・テスト開始



高周波源 (300kWクライストロン)

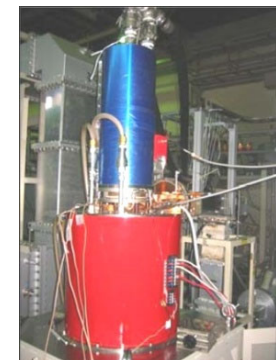
冷却水設備



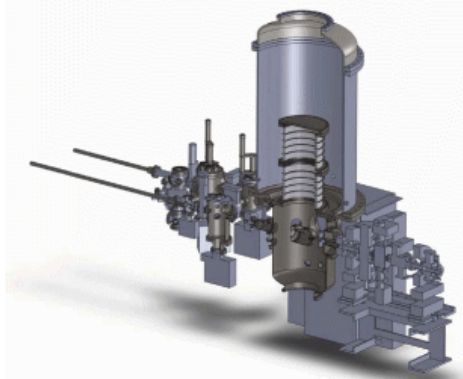
# 要素技術開発 => c-ERL (35MeV→250MeV)



主加速部超伝導空洞

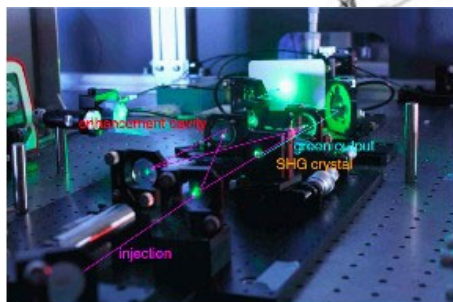


大出力RF源



高輝度DC電子銃:

電子銃励起  
レーザー



基本的な要素技術  
開発はほぼ確立

2012年度末の完成を目指して建設中



入射部超伝導空洞

# 3GeV-ERLの概念設計と外部評価

## 概念設計案の検討状況

### ○加速器設計（含建設予算算定）

ERL推進室中心にLC推進室、JAEA、東大、名古屋大、広島大などが参画

### ○利用研究計画検討

PERL研究会(サイエンス検討のための研究会:26回開催)

「ERLサイエンスワークショップⅡ」4月27-28日

「ERLシンポジウム-持続可能な社会を実現する放射光-」7月11日

特別基調講演「日本「再創造」-「プラチナ社会」の実現に向けて-」小宮山 宏

「ERL2011」(国際ワークショップ;マシン中心+サイエンス) 10月17-21日

「物構研シンポジウム」12月6-7日

### ○KEK内での検討、意見交換会等

ERL推進会議

研究推進会議

PF懇談会

⇒ CDR(概念設計書)の  
年内作成を目標

## 外部評価・議論など(CDR完成後)

国際評価委員会(年度内開催予定)

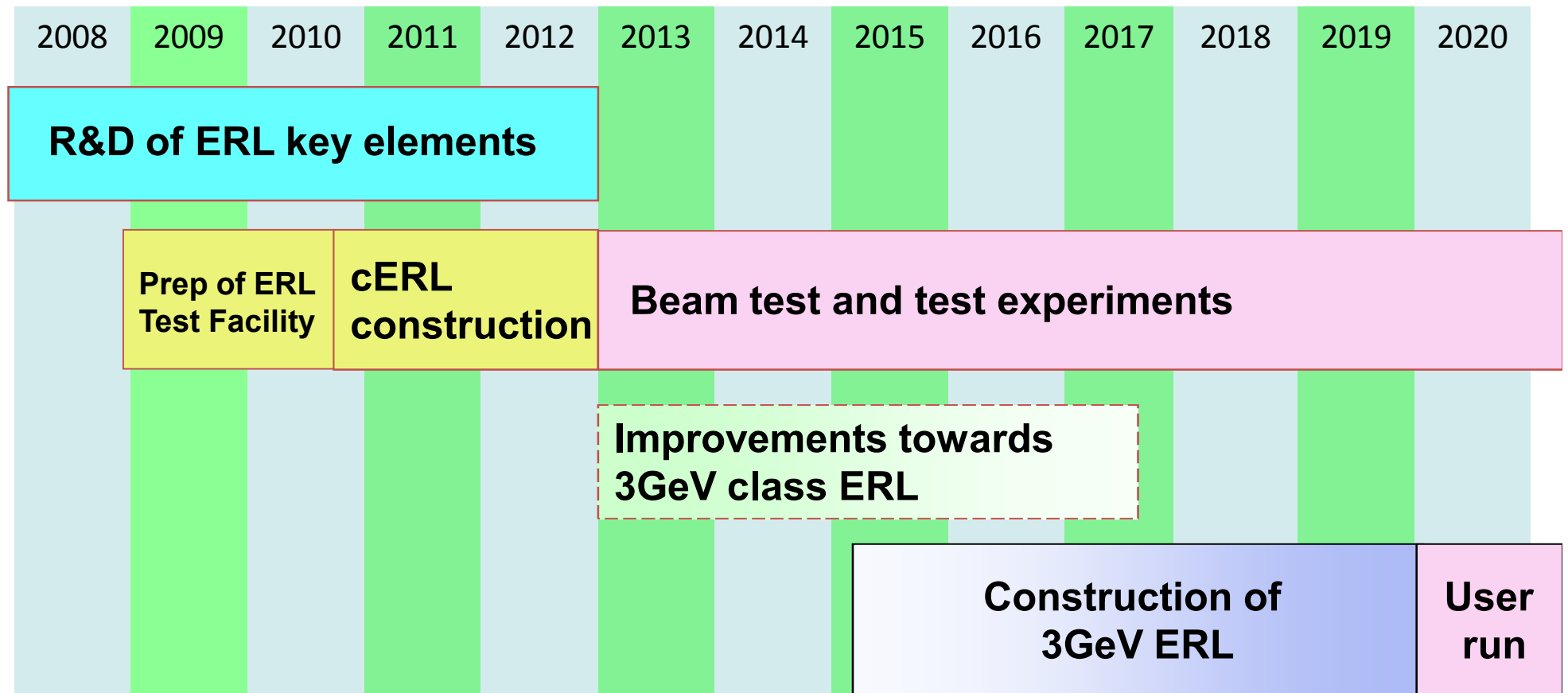
放射光学会(特別委員会)

学会会議など



「ERLサイエンスワークショップⅡ」

# ERL計画のロードマップ(案)

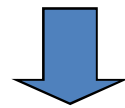


3GeVクラス、2020年運転開始

- 運転経費は30億円/年をベースとする
- 2期計画としてXFEL-O(7GeV)

# まとめ

- 放射光源の性能向上のNEEDは、既にナノビーム、コヒーレントX線領域そして100fsecのダイナミクス研究に達している。  
→  $10^{23}$ の輝度と~15pmradのエミッタンス、100フェムト秒のパルス幅が目標となる計画。
- PFの後継機として改造ではなく、グリーンフィールドの計画であるのでさらに建設運転後に発展の余地を十分に有するもの。(既にXFEL-Oは折込済み)



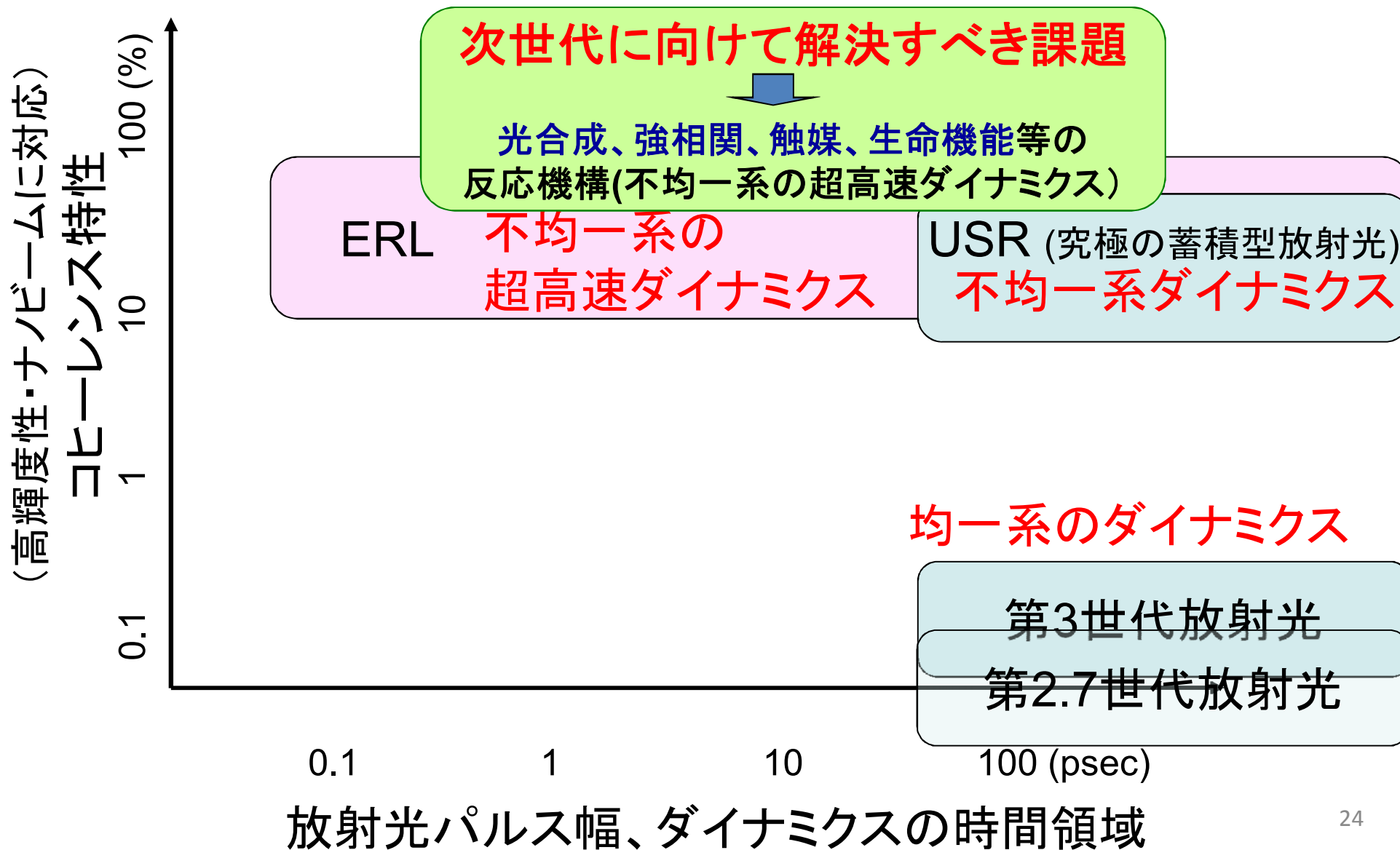
KEKで先端的超伝導加速器を用いた  
ERLとXFEL-O計画を実現



# 参考資料

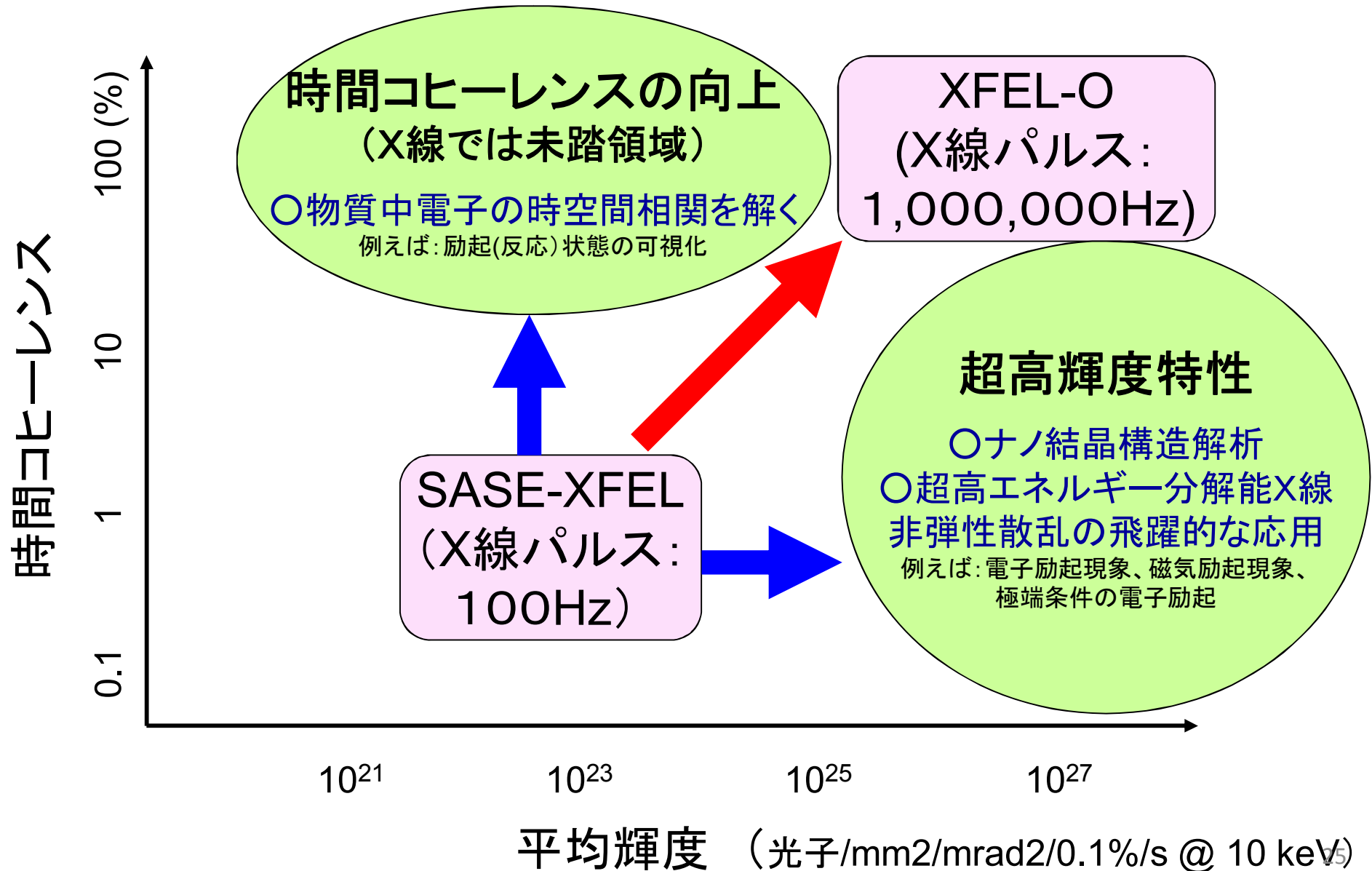
以下の例は今までの資料を単に消さないで残しただけ

# ERLの立位置



# 共振器型XFEL-Oによる究極のX線ビーム

平均輝度、時間コヒーレンス、X線パルス周波数の飛躍的向上



## PFシンポジウム

7月12日 9:00 – 7月13日 13:00

7月12日 17:30～18:20

PF将来光源ERL計画

7月13日 11:00～13:00

ERL計画「PFからERLへ～私の研究はどうかなる」

## XDLワークショップ報告会

7月13日(水) 14:00-17:00

研究交流センター・国際会議場

<プログラム> 14:00～17:00

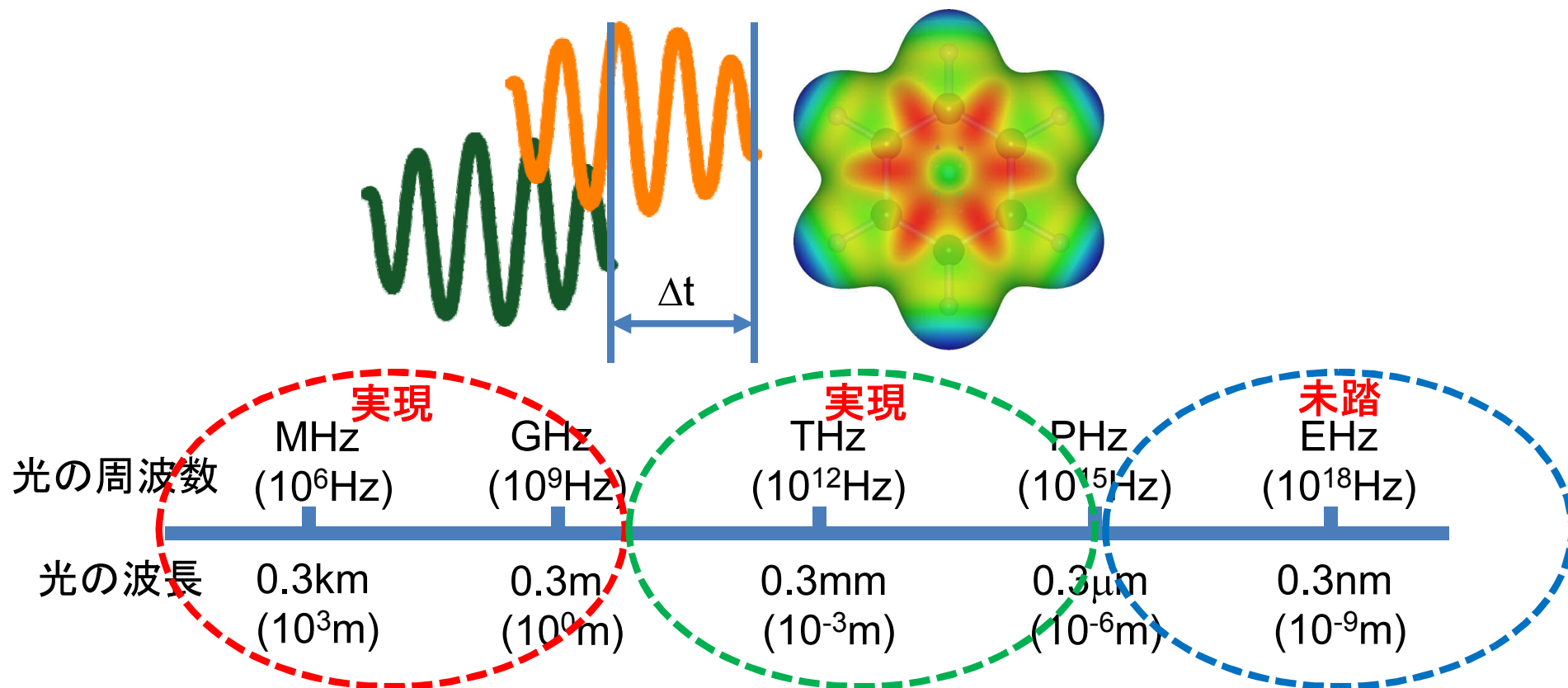
WS1 “Diffraction Microscopy, Holography and Ptychography using Coherent Beams” の報告  
西野 吉則 (北海道大学 電子科学研究所)

WS3 “Ultra-fast Science with Tickle and Probe” の報告  
足立 伸一 (KEK 物質構造科学研究所)

WS6 “Frontier Science with X-ray Correlation Spectroscopies using Continuous Sources” の報告  
篠原 佑也 (東京大学大学院 新領域創成科学研究科)

# ERLとXFELで実現するサイエンス(4)

X線領域の時間コヒーレンスを利用した  
人類未踏のサイエンス



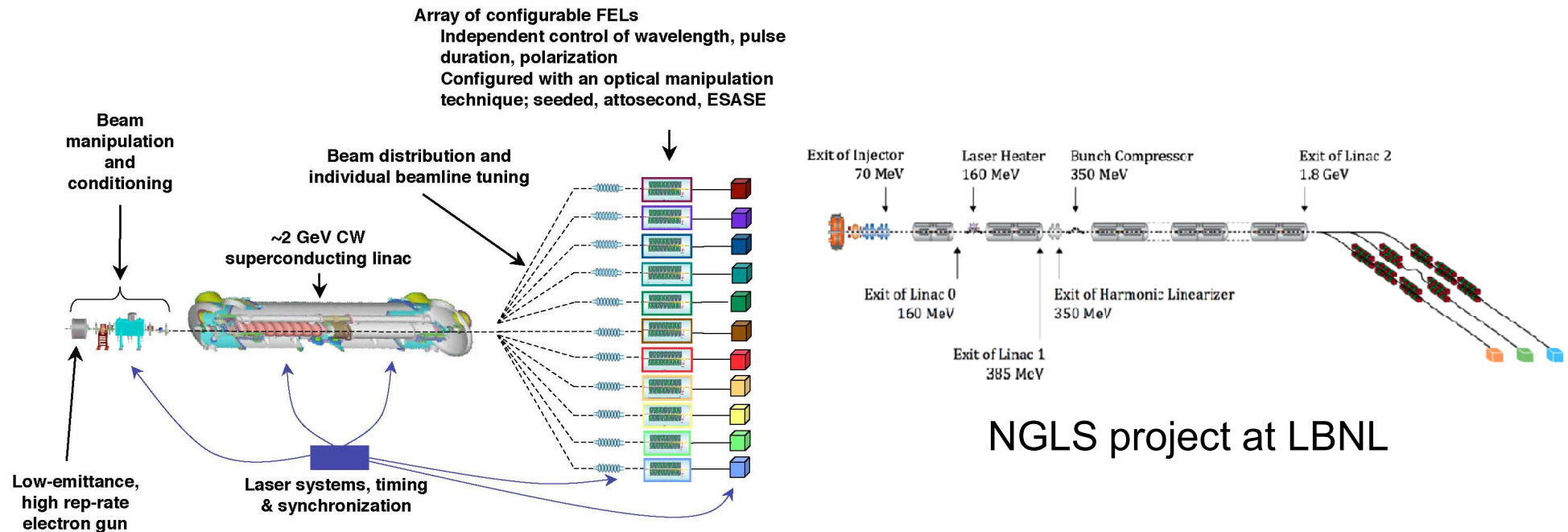
**電波領域:** 多次元NMR  
核スピン間の相関を利用して構造情報を得る

**赤外領域:** フォトン・エコー  
振動モードの相関を利用して  
分子振動のダイナミクスの  
情報を得る

**X線領域:** 多次元X線分光  
電子間の相関を利用して  
波動関数の情報を得る

# ERLプロジェクトの開発がもたらす更なる展開

- 高繰り返し高輝度超伝導加速器技術で開かれる世界
  - XFEL-O（既に折込済み）
  - 高繰り返しSeeded XFEL



High-Repetition-Rate FEL Facility at LBNL

(*Synchrotron Radiation News*, Vol. 20, NO. 6, 2007, p20~27.)