

# 1-1 進捗状況 (アンジュレータ)

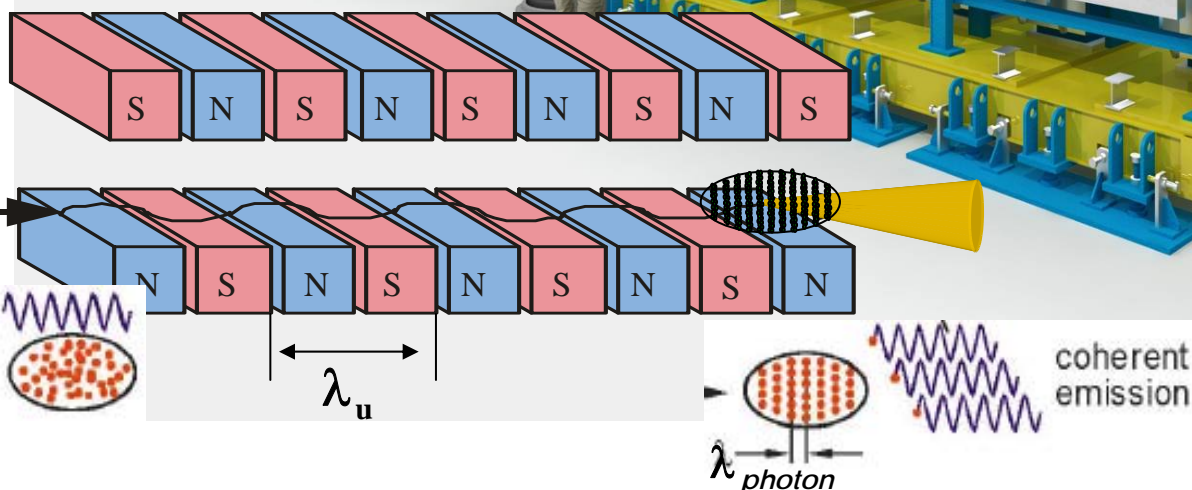
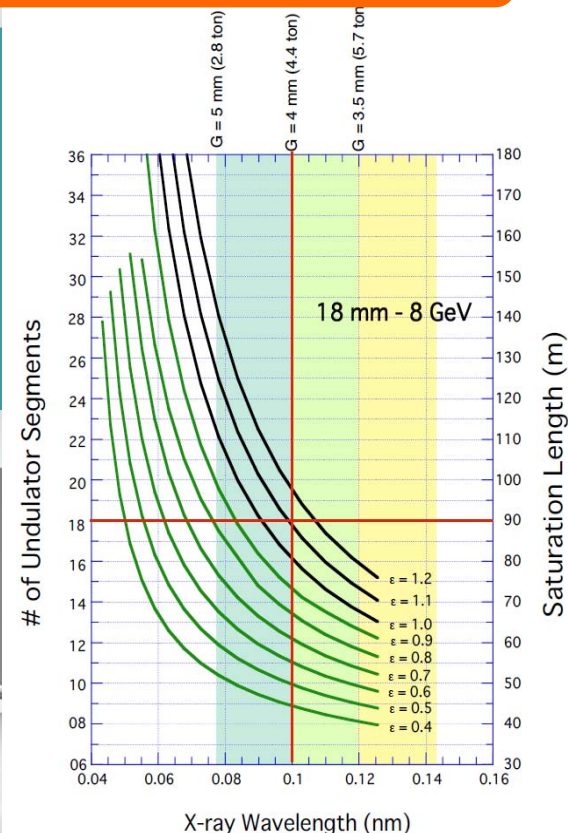
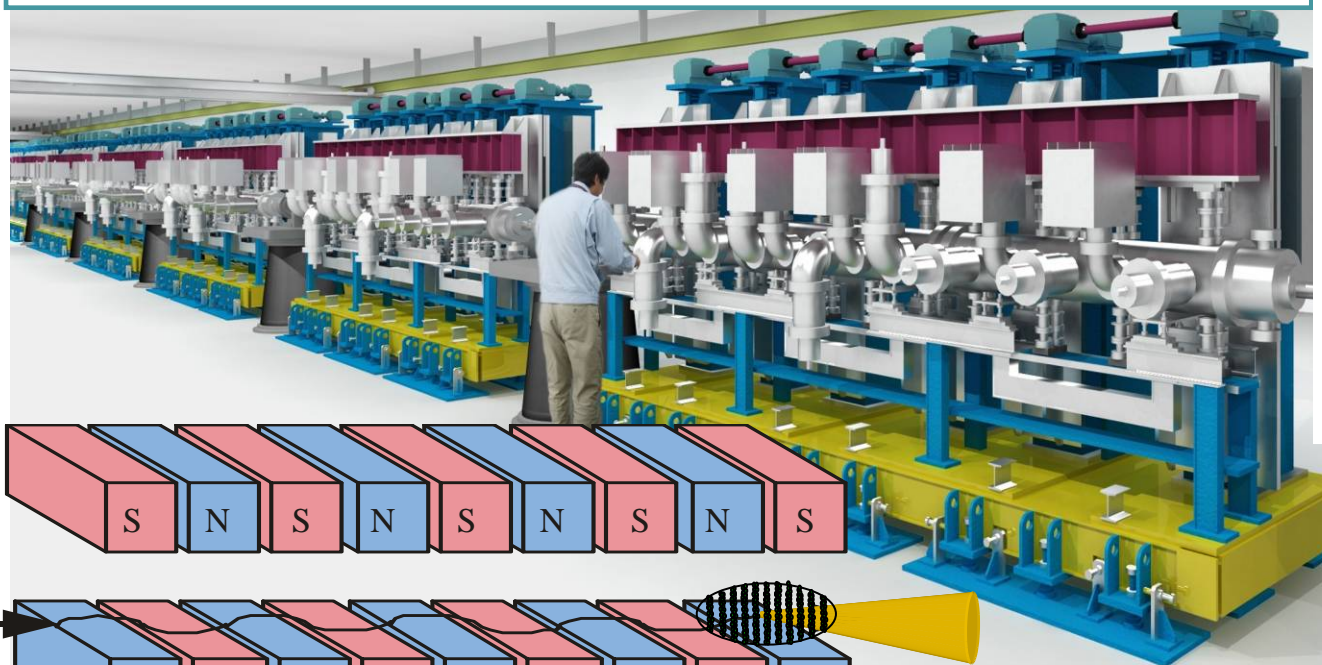
## XFEL/SPring-8アンジュレータの概要

硬X線レーザー用真空封止アンジュレータ(BL3では18台)

周期長(18mm): ギャップ3.5mm以上で適切な**波長可変範囲**を実現

磁石列長: 5m(277周期),  $K_{max}=2.4$  at  $G=3\text{mm}$

波長0.1nm:  $\text{Gap}=4\text{mm}$  at  $8\text{GeV}$ ,  $\text{Gap}=5\text{mm}$  at  $7\text{GeV}$



### エミタンスとアンジュレー台数 (N<sub>id</sub>)

8GeVで波長0.1nmの場合  
 $\epsilon = 0.4 \pi$   $N_{id} = 9$ 台  
 $1.0 \pi$   $16$ 台

波長可変範囲:  
 ギャップ3.5mm で0.13nm  
 ギャップ5mmで0.06nm

当初は  $\epsilon = 1.1 \pi$ 、 $N_{id}=18$ で波長0.1nmのレーザー発振を目指す<sub>3</sub>

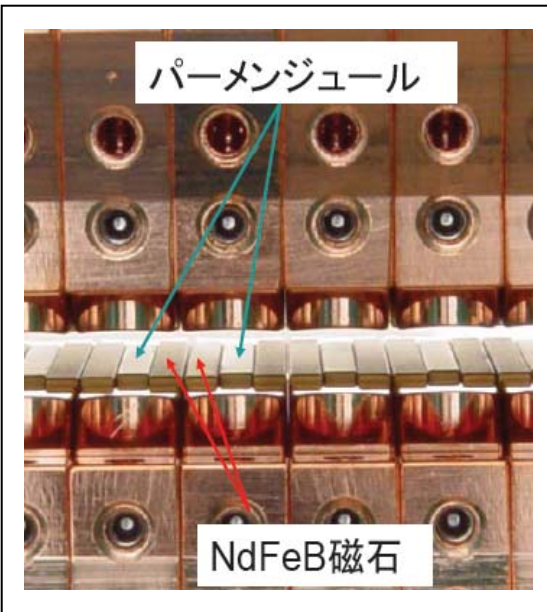
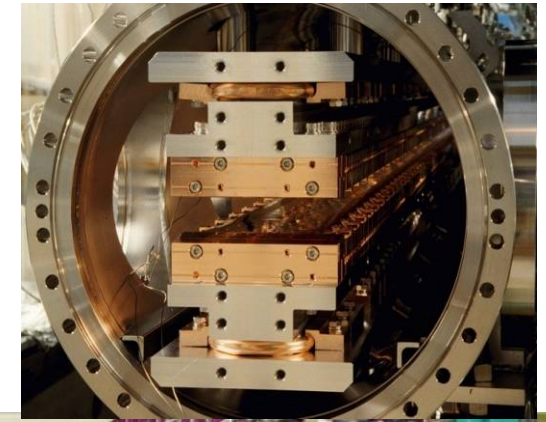
# 1-1 進捗状況 (アンジュレータ)

XFELアンジュレータ(18台+1台)の現状

周期長 : 18mm、磁石列長 : 5 m(277周期)

X線波長 = 0.1nm K=1.85(1.11T) at G=4mm @ 8GeV

K=1.48(0.89T) at G=5mm @ 7GeV



ハイブリッド型磁石回路 Gapの直接測定と局所調整

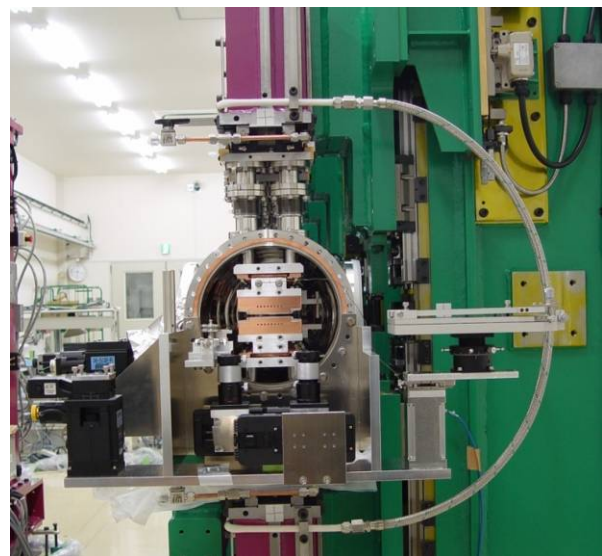
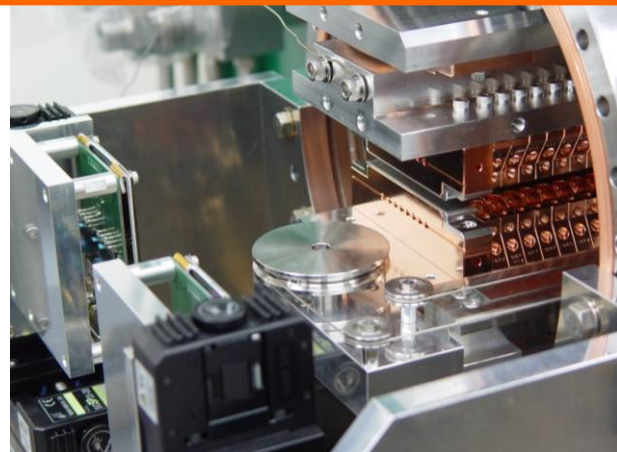
平成20年10月からの量産に向けたR&D(終了)  
①真空槽内でのgap長の精密測定・調整装置の開発

## 1-1 進捗状況 (アンジュレータ)

### ② 新型磁場測定装置(SAFALI)の開発

SAFALI:  
Self Aligned Field Analyzer  
with Laser Instrumentation

- 真空(槽)内部のホール素子走査による磁場計測
  - 真空封止アンジュレータ磁場測定
  - クライオアンジュレータ用真空対応磁場測定
- レーザによる位置決めを利用
  - 縦方向: 干渉計型測長器
  - 横方向: アイリスとPSDによるレーザスポット位置計測



### ③ ウェイクフィールドの影響 今後更に最適化に向けて詳細に検討

RFトランジション部: 導電性の良い金属で滑らかに接続

磁石表面を導電性の良い金属でカバー: 材質の最適化、

抵抗性ウェイクフィールドによるエネルギー分散はアパチャーの二乗に反比例

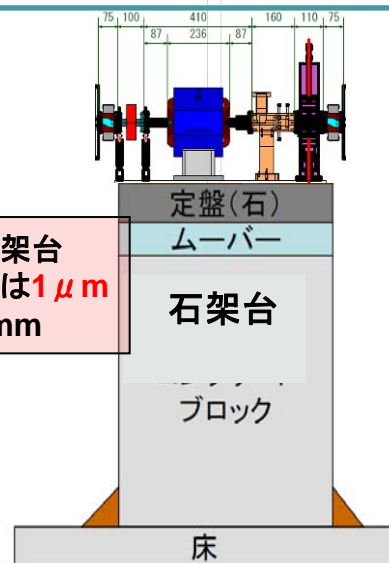
## XFEL機器の据え付け・アライメント

① 加速器部： 光学式測量機でユニットおよび加速管等をジオイド面に沿ってアライメント  
- 石定盤(L:2から3m、H:0.35から0.45m)の基準面に機器基準面(加工精度 $50\mu\text{m}$ )を押し当て固定ユニット化

- ユニット内の四極電磁石とBPMの磁気中心と電気中心を較正
- 定盤の基準点を光学的手法でジオイド面に沿って所定の精度でアライメント
- S-bandおよびC-band 加速管は設置精度(0.1mm程度)が緩いためS-bandの上流側二本を除き鋼管架台上に設置・アライメントする。

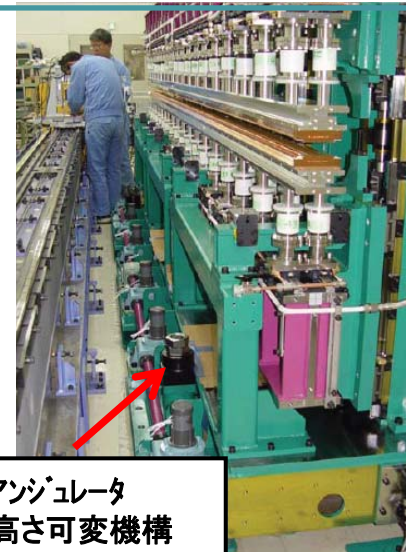
② アンジュレータ部： X-ray beam based alignmentで機器を直線にアラインメント

- 四極電磁石、アイリス付きBPM、フェーズシフター等機器を位置調整機構付き定盤上に設置
- 定盤上のアイリスとBPMおよび四極電磁石の中心をミクロンレベルで較正
- 定盤とアンジュレータの基準点をジオイドに沿って0.1mm程度の精度で据え付ける
- 電子ビーム加速後、アライメントアンジュレータからのX線を用いてアイリスの中心をX線光軸上に位置調整装置(μ-バー)を用いてミクロン精度でアライメントする。
- 最後に電子ビームがアイリス中心を通るようにBPM用いて電子軌道を光軸に一致させる



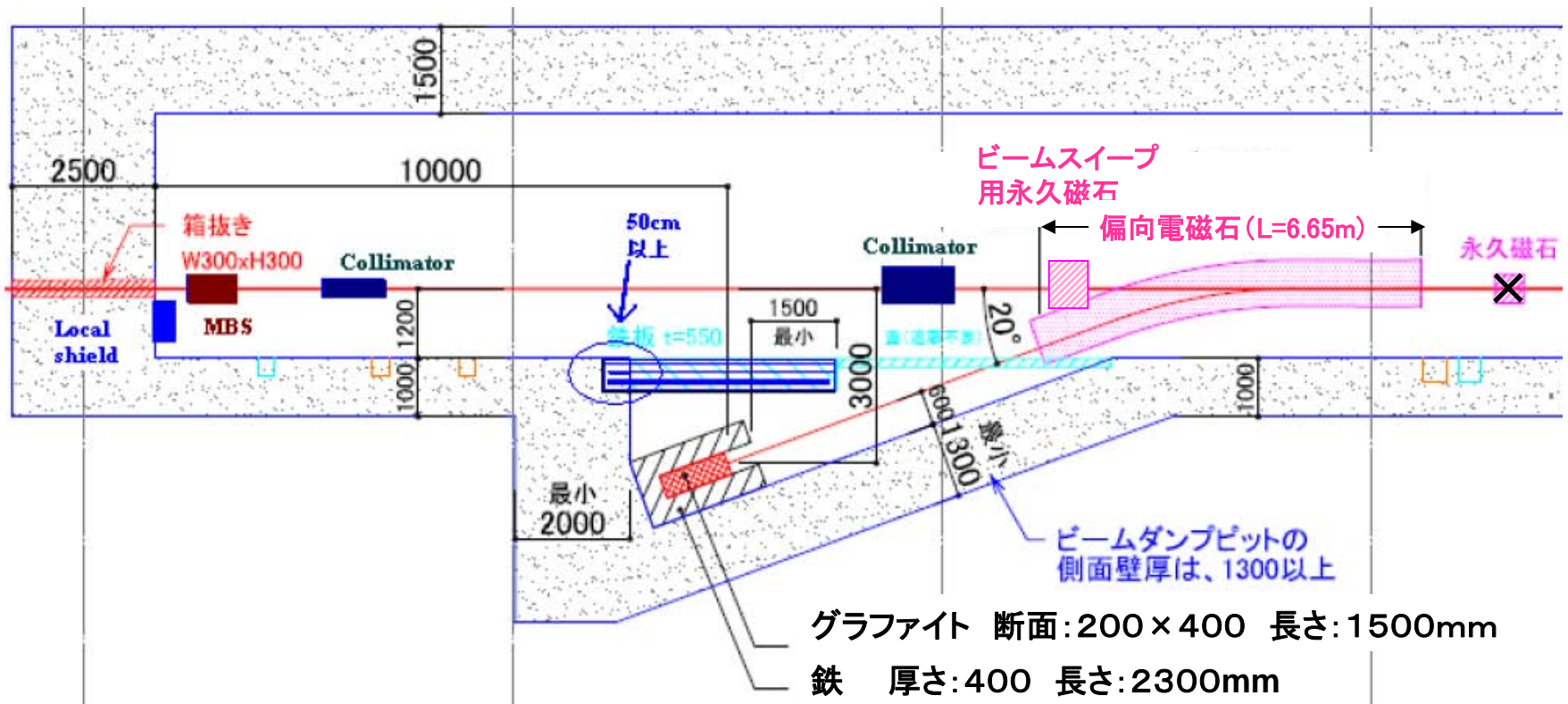
### 電子ビーム

ビームエネルギー	8GeV
バンチチャージ	0.3nC
規格化エミッタンス	$1\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$
AL ID (alignment undulator)	
周期長	32mm
長さ	0.992m
E1st	12.66keV
光源サイズ	50um(rms)
光源発散角	7.2urad(rms)
Iris付きBPM	
穴直径	100um



# 8GeV電子ビームダンプの概要と真空槽の口径

ビームパラメータ 12 $\sigma$ =3.6mm、 $\Delta p/p$ =2.4%	ダンプ入口 Dy=3m	偏向電磁石出口 Dy=1.2m	偏向電磁石入口 Dy=0m
ビームサイズ全幅(H,V) mm	4, 約80 (+12)	4, 30	4, 4
チェンバー口径(H,V) mm	100 $\Phi$	22 $\times$ 60	22 $\Phi$



ビーム性能: 8GeV、1nC/バンチ、60pps  
 運転時間 168hr/w(単バンチ) 4.2hr/w(40バンチ)  
 ビームパワー: 480W(単バンチ) 19.2kW(40バンチ)

多バンチ運転でのビームパワー: 約20kW  
 Euro-XFEL : 300kW

# 1-1 進捗状況 (光学系)

“No optics is the best optics.” (Prof. A Freund, Former Optics Group Leader of ESRF)

SASE X線レーザーでの光学系に対する要請

コヒーレンス保存・スペックルフリー

耐高強度(LLNL Criteria)

特殊光学素子

光子空間密度制御

超平坦非球面光学素子による光子密度制御

長尺ビームライン

SP8, LCLS

EXFEL, LCLS

超平坦光学素子加工技術(阪大)

電通大・米田先生

従来X線光学技術の利用

XFEL光

EXPANDER

既存光学系

CONDENSER

試料

FLASH, SCSS prototypeでの経験: 光子密度 < LLNL限界密度 (SASE発振機構から)  
charge/bunchは小さくてもレーザー発振(エミッタンスが計画値より良好)

# 1-1 進捗状況 (光学系)

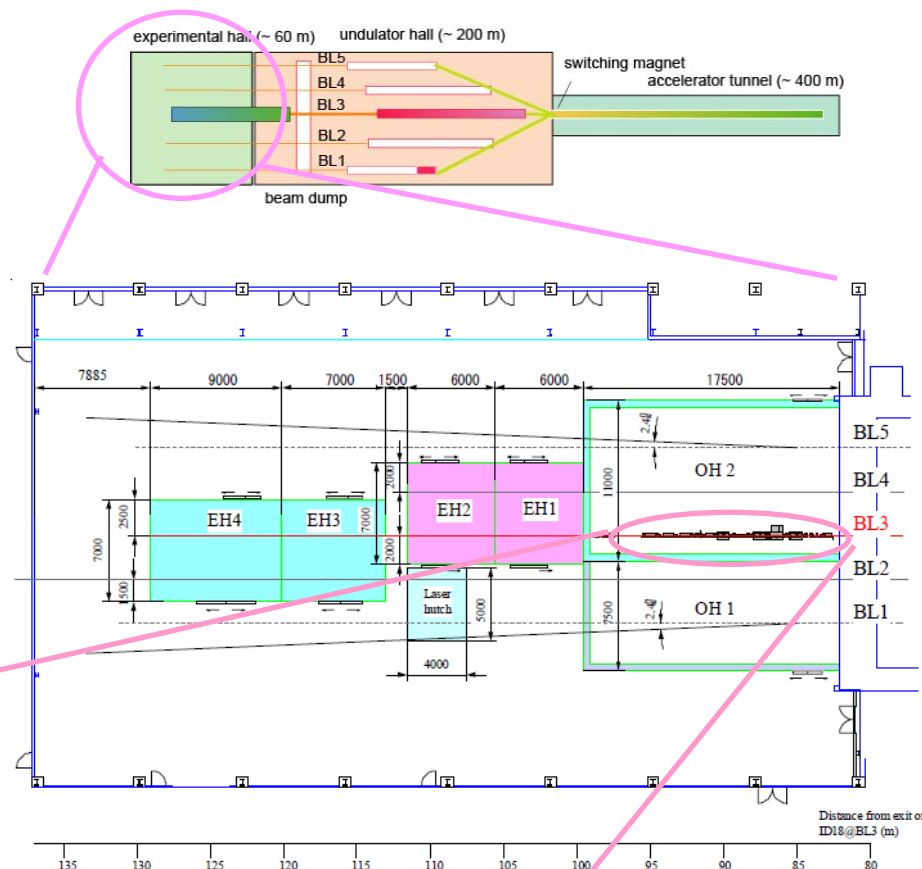
出力、パルス幅、波長範囲、輝度、等の物理的な計画仕様(光学系の設計及びその性能と特徴)

## ビームパラメータ

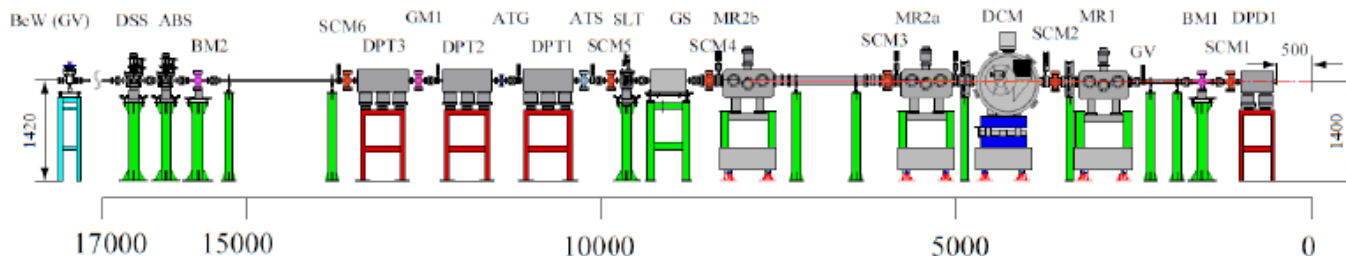
Table 2-4-1 FEL radiation parameters (fundamental radiation)

Electron beam energy (GeV)	8
Repetition rate (Hz)	60 (max) to 1 (min)
UND K value	2.2
FEL parameter**2	4.4e-4
Saturation length (m) **3	45
Wavelength (nm) **4	0.13
Photon energy (keV)	9.9
Bandwidth	9.2e-4
Source size (um, rms)	33
Angular divergence (urad, rms)	0.73
Peak power (GW)	29
Pulse energy (mJ)	0.78
Photons per pulse (phs/pls)	5.0e11
Pulse width (fs, FWHM)	30
Power ratio of higher-order harmonic (2nd:1st)	1.3e-4
Power ratio of higher-order harmonic (3rd:1st)	2.8e-3

## 光ビームラインの構成



- ・スペックルフリー光学素子
- ・大強度XFELの輸送と $\gamma$ 線の除去
- ・高いドースに対する光学素子の耐性



XFELビームライン TDR

# 1-1 進捗状況 (光学系)

XFEL利用のための要素技術

光源の特性

高コヒーレンス性

パルス性

SASE起因のフラクチュエーション

要請

スペckルフリー

耐高強度

外部機器との同期

ショット毎の  
ビーム診断

ショット毎の  
データ計測・解析

要素技術

SP8

★ 非球面ミラーの超平坦化・長尺化

★ タイミング伝送・モニタ

★ void-free平滑ベリリウムフォイル SP8

LCLS, SP8, EXFEL

ダイヤモンド単結晶の高品質化 SP8

LCLS, SP8, EXFEL

ビーム強度・位置モニタ

★ 2次元検出器

★ スペクトルモニタ SP8

★ データ収集・  
解析システム

パルス幅モニタ

LCLS, SP8, EXFEL



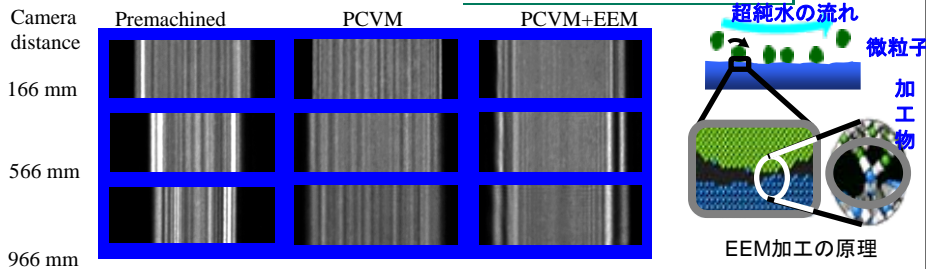
# 1-1 進捗状況 (光学系)

仕様を満たすために行った開発研究とその進捗度、さらに今後開発すべき研究開発

スペックルフリー光学系: 弱いコヒーレントX線 光利用技術の開発研究 (I)

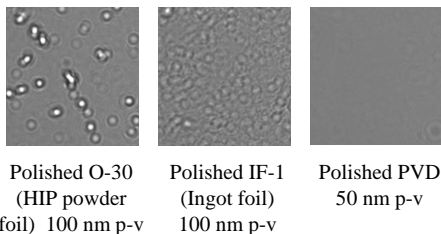
(@1kmビームライン) を用いたR&D

## 超平坦ミラーの開発

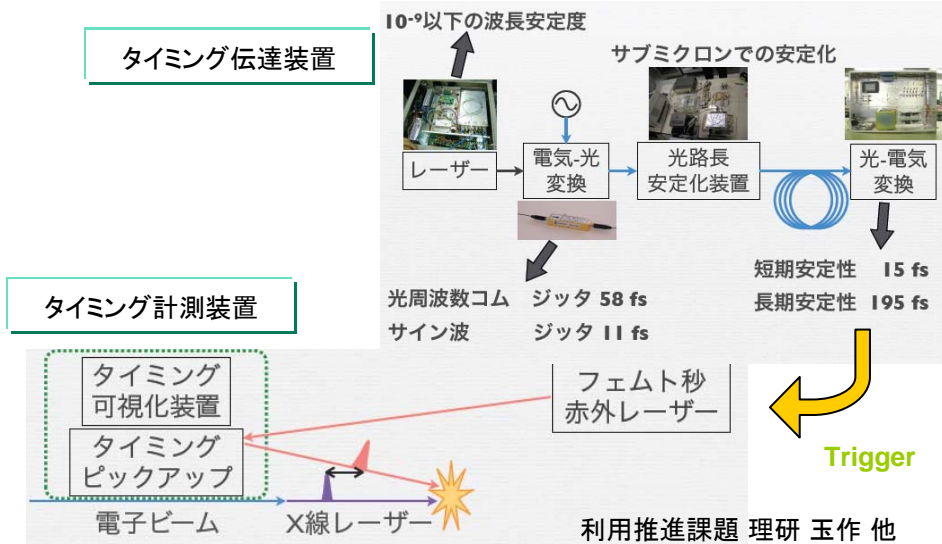


EEM加工の原理

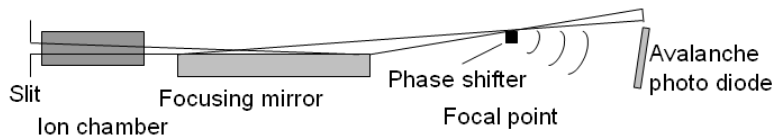
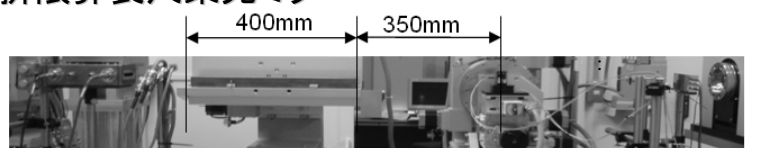
## スペックルフリーベリリウム窓の開発



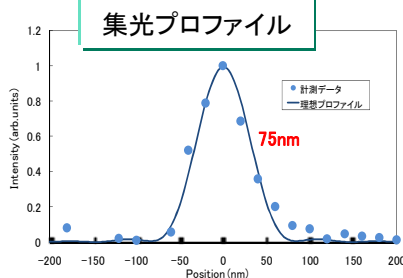
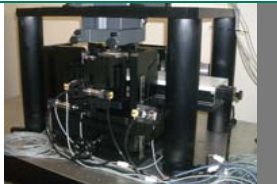
## フェムト秒タイミング同期システム



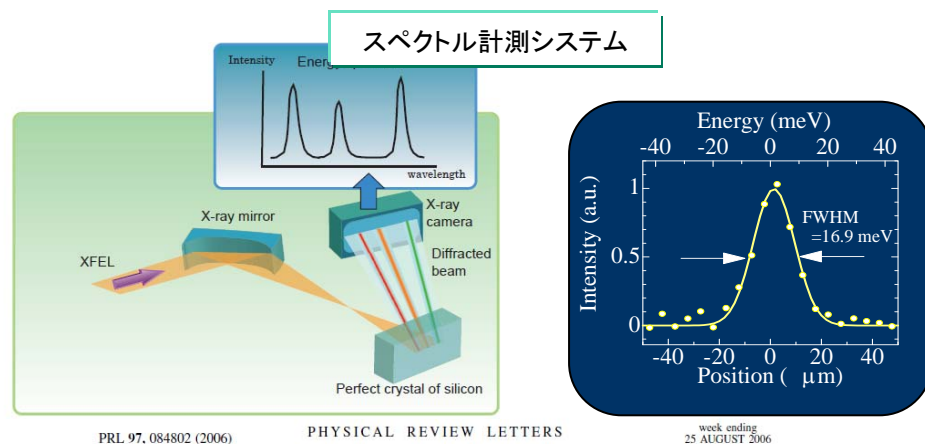
## 回折限界長尺集光ミラー



## 400mmミラー形状計測装置



## シングルショット光特性診断システム



### Single-Shot Spectrometry for X-Ray Free-Electron Lasers

Makina Yabashi,<sup>1,5\*</sup> Jerome B. Hastings,<sup>2</sup> Max S. Zolotarev,<sup>3</sup> Hidekazu Mimura,<sup>4</sup> Hirokatsu Yamoto,<sup>4</sup> Satoshi Matsuyama,<sup>4</sup> Kazuto Yamauchi,<sup>4</sup> and Tetsuya Ishikawa<sup>1,5</sup>

# 1-1 進捗状況 (光学系)

今後、開発すべき要素技術、部品(ミラー、検出系など)について、必要な時間・人員

特に光利用技術の開発状況と今後の見通し(各技術の特徴、本プロジェクト以前の状況、本プロジェクトでの状況、課題、今後の見通し等)  
X線レーザーの精密測定の際のX線光学について、その課題と解決方法

## 光利用技術の開発研究 (II)

項目	本プロジェクト以前の状況	本プロジェクトの状況	課題 (本プロジェクトに留まらない世界の課題)	今後の見通し (時間・人員を含む)
集光システム	<ul style="list-style-type: none"> <li>・EEM加工技術により超平坦ミラーを製作.</li> <li>・小型ミラー(100mm)用の精密計測システムを開発.</li> <li>・小型ミラーにより2次元回折限界集光を達成</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ミラーの長尺化(400mm). 加工・計測装置を高度化し, 回折限界集光を達成.</li> <li>・ミラー加工に関する要素技術開発はほぼ完了.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・迅速なアライメント方法の開発</li> <li>・超安定姿勢制御機構の開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・阪大・理研・JASRIの緊密な協力体制を継続.</li> <li>・2010年度にSP8ビームラインにおけるオンラインテスト.</li> </ul>
フェムト秒タイミング同期システム	<ul style="list-style-type: none"> <li>・SP8ビームラインにおいてピコ秒タイミング伝達システムを構築. レーザ・放射光同期実験により±2 psの同期精度を確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・フェムト秒タイミング伝達システムの開発 (ほぼ終了)</li> <li>・レーザと電子ビームのタイミング計測システム(EOS)のR&amp;Dが進行中</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・レーザとX線のタイミングの直接計測</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・国内外の研究機関 (SLAC・DESY含む) との連携 (特に計測システム)</li> </ul>
シングルショット光特性診断システム	<ul style="list-style-type: none"> <li>・SP8において様々な特性をもつX線光学系を開発し, ユーザー実験に応用.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・シングルショットスペクトル計測の実証実験を世界に先駆けて行う.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・非破壊計測のためのビームスプリッタの開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・理研・JASRIで開発を継続</li> </ul>
2次元検出器・データ処理システム	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大強度パルスX線に対応できる2次元検出器は世の中に存在しなかった</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・既存技術の高度化により, 開発リスクを抑制しながら諸外国に匹敵する性能を目指す. 仕様がほぼ確定.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大面積化 (=X線顕微鏡の高空間分解能化)</li> <li>・次世代検出器の開発</li> <li>・60Hz運転に対応したオンライン大容量データ解析システムの構築</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・検出器: KEKを含むオールジャパン体制で開発を進める</li> <li>・データ処理: JAEA 理論グループ等とのコラボレーションにより最適化を進める</li> </ul>



# 1-1 進捗状況（建屋建設）

平成20年度末 線形加速器・アンジュレータ収納部建屋完成予定

(H20.6月現在)

アンジュレータ収納部下流部



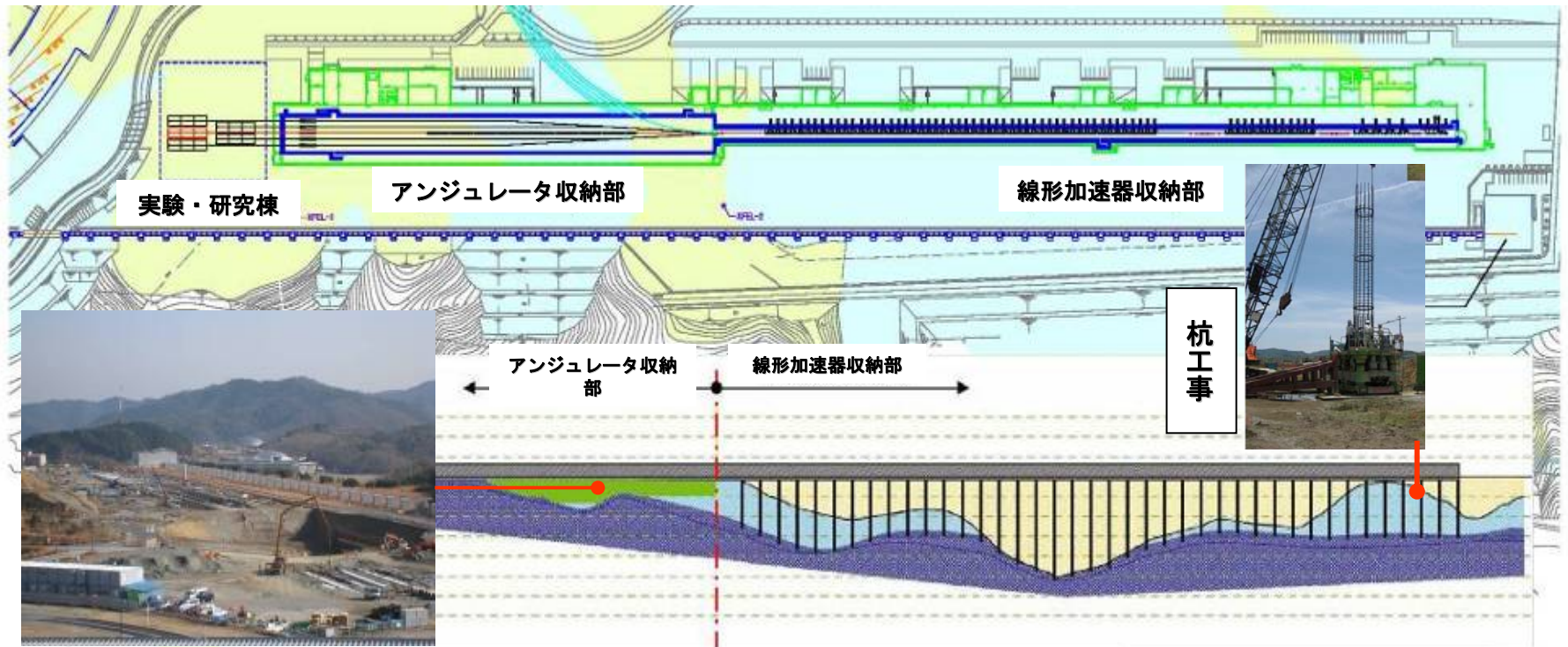
線形加速収納部下流部



線形加速収納部上流部



線形加速収納部上流部



砕石置換を実施

X線自由電子レーザー建設計画 建屋配置図