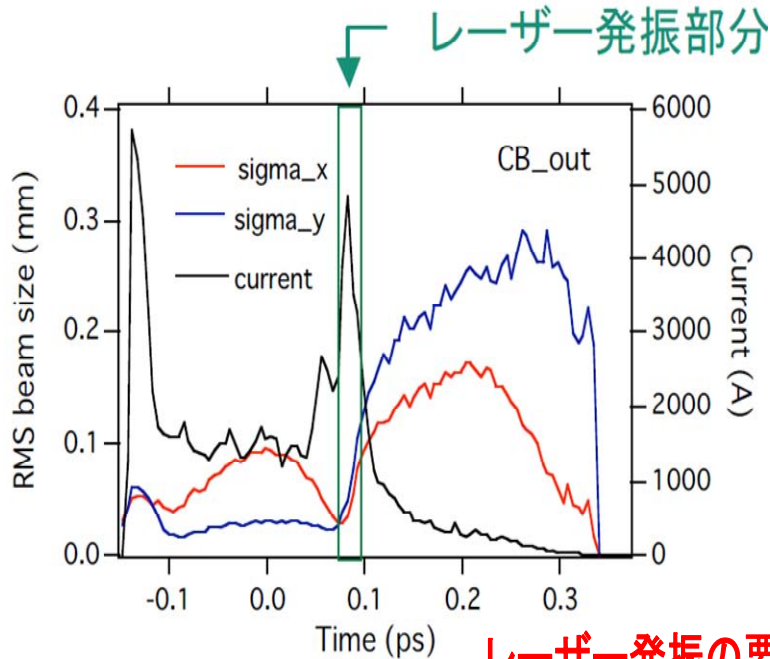
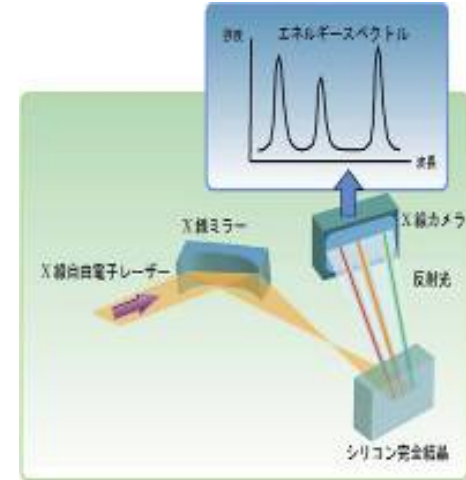


# 1-4 XFEL計測手法の開発

計算機シミュレーションによる電子ビームの性能評価



レーザー発振の要求を満たす



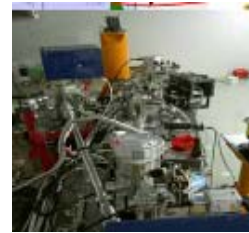
XFELのエネルギースペクトルを計測する装置を開発  
単一パルスのスペクトルを従来の分解能を  
2桁上回る高い分解能で計測  
(平成18年8月28日プレス発表)

8GeVでのビーム性能(計算値)

規格化スライスエミッタンス	$1.1 \pi \text{ mm/mrad}$
スライスエネルギー拡がり	0.004%
ピーク電流	4.5A
3kA以上の発振に寄与する部分	20fs

# 1-5 プロトタイプ機 (レーザー発振の成功)

平成16年4月 試験加速器の設計を開始  
平成17年2月 加速器建屋工事着工  
8月16日 加速管収納部仮引渡し, 加速器据付作業開始  
8月31日 加速器建屋竣工  
10月21日 加速管エージング開始  
11月 8日 ビーム運転開始  
平成18年 6月20日 レーザー発振  
平成19年 4月 実験棟を整備  
以降、順次ユーザー利用を実施



全長 60 m  
加速エネルギー 0.25 GeV  
レーザー波長 49 nm

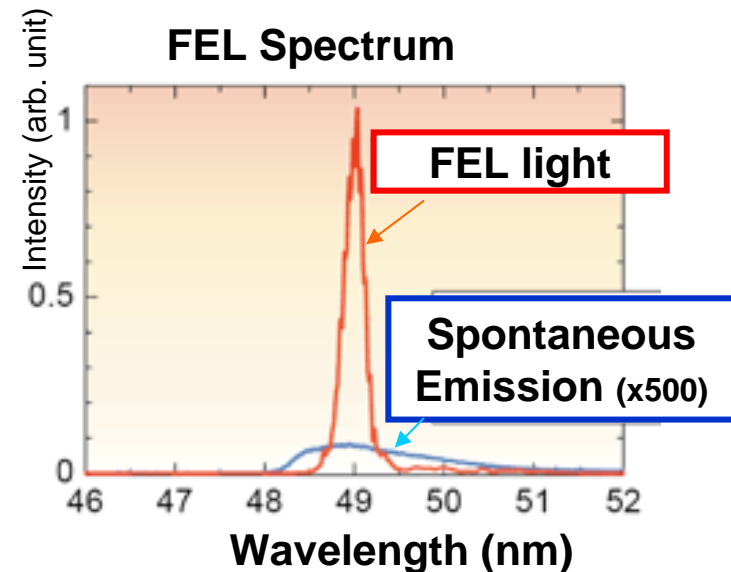
開発に関わった企業

三菱重工、住友重工、IHI、東芝電子管デバイス、東芝電波プロダクト、日立造船、三菱電機特機、ニチコン、ネオマックス、日本高周波、トヤマ、工藤電機などの多くの国内企業の技術が結集

## プロトタイプ機が担う2つの役割

(1) 実機建設のためのR&D、利用研究のための基盤技術開発

(2) 波長約50 nm の真空紫外線レーザー光源“実用機”として利用研究に使用



# 1-5 プロトタイプ機 (XFEL実機設計・建設への反映例)

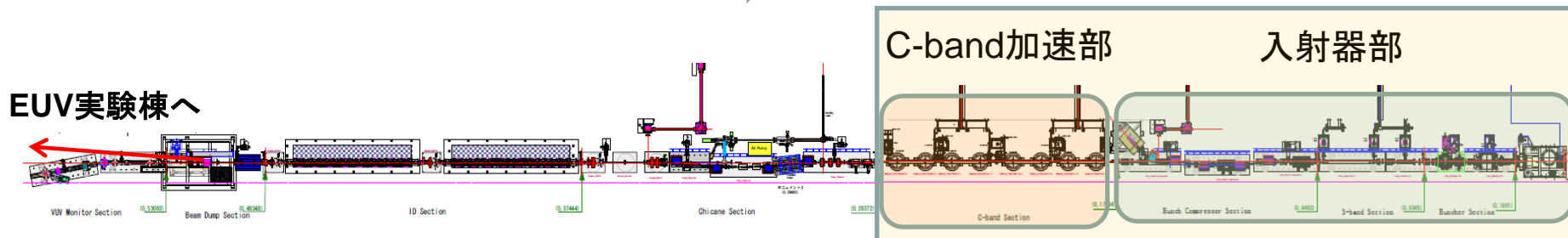
## プロトタイプ機(SCSS試験器)の目的

: SASE光の発振と実機XFEL建設に向けた各種R&D

R&D項目

1. 高品質電子ビームの生成
2. 速度変調型および磁気圧縮型バンチ長圧縮器の動作確認
3. 低エミッタンス・極短バンチ長電子ビームの運動力学的解析手法の確立
4. チョークモード型C-band 加速管での電子ビームの安定加速
5. アンジュレータでのSASE光の生成
6. 実機XFELに向けた各種ビーム診断システム(電気的光学的)の開発
7. フェムト領域の超高精度タイミングシステムの開発
8. MADOCAを基本とした高精度で高可用性制御システムの開発

2006年 SASE光発振の初期目標を達成  $\longrightarrow$  入射器部およびC-band部は実機仕様とほぼ同じ



SCSS試験器の機器配置図(全長約60m)

### SCSS試験器の電子ビームとレーザー諸元

電子ビームのエネルギー	250MeV	アンジュレータ	
規格化エミッタンス (mm·mrad)		周期長	15mm
電子銃後	$1\pi$ @1nC/bunch	周期数	300×2台
250MeV	$2\pi$ @0.3nC/bunch	K値(g=2~40mm)	1.5(max)
ピーク電流	3kA	レーザー波長 (g=4,3mm)	50-60nm
バンチ長(FWHM)	0.7psec	パルスエネルギー	~30μJ
エネルギー拡がり	0.01%	パワー変動	10%

# プロトタイプ機 (SCSS試験器) の現状

SCSS試験器で各種高度化が実施され

1. 238,476,S-APS空洞の冷却水温度の安定化
2. IQ検出器用12bit,238MHzA/D,D/Aの開発
3. ビーム調整手法の精密化
4. アンジュレータ磁石列の高精度化

レーザー発振が長時間安定に持続可能に

強度変動: 約11%

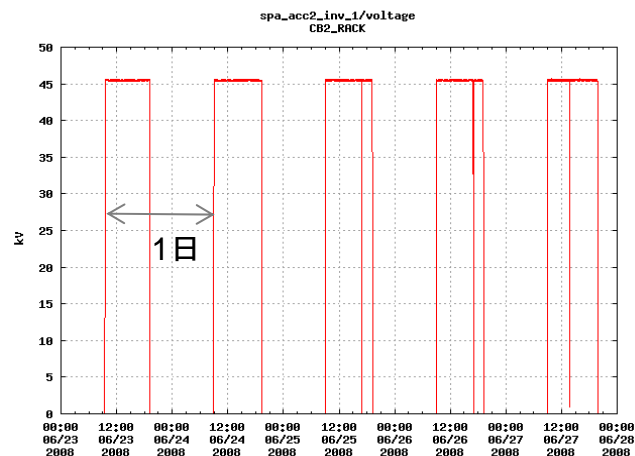
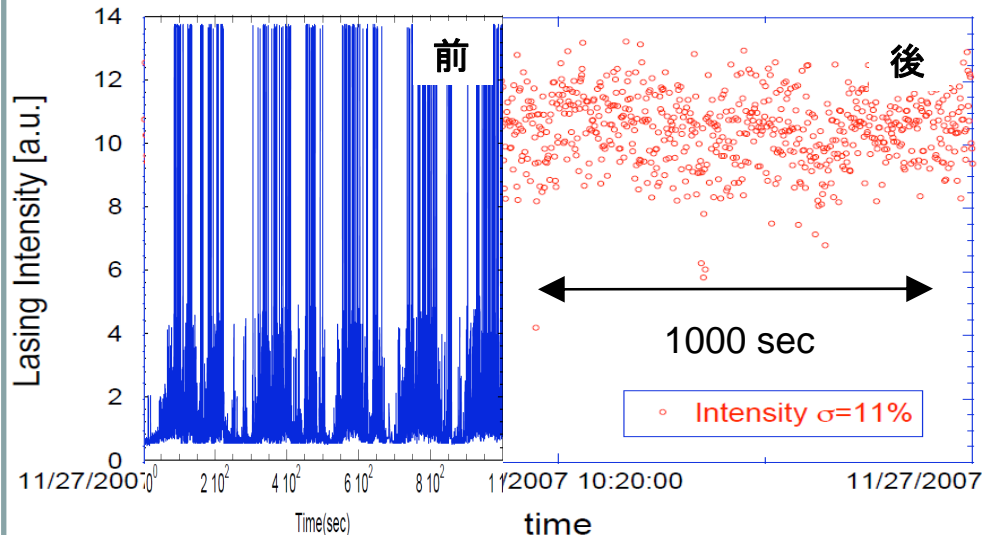
位置変動: 0.1mm(ビームサイズの5%)

波長変動幅: 0.6%(FWHM)

C-band加速管:

実機の仕様値35MV/mを越える  
37MV/m の高電界強度で、長時間安定に運転できることが実証された。

高度化前後でのレーザー強度の時間変動



C-band 加速管  
37MV/mの高電  
界強度で運転中

実機仕様値  
35MV/m

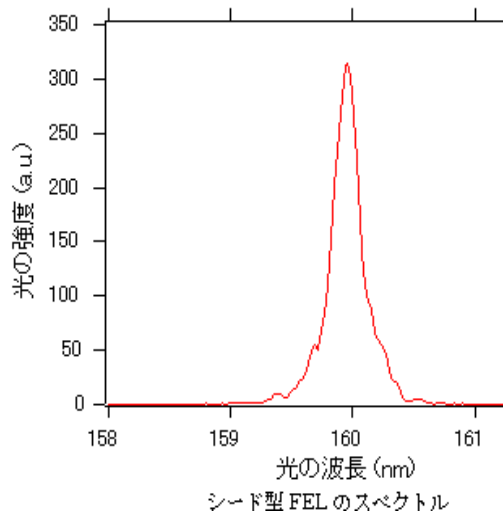
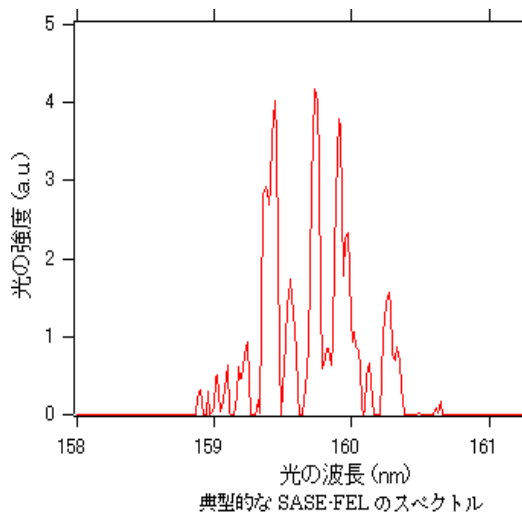
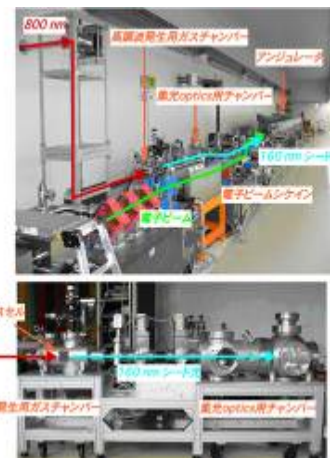
利用運転中5日間の高圧インバータ電源の稼働率(ほぼ100%)

# 1-5 プロトタイプ機(シーディング技術の開発)

シード光を入射する新方式で短波長自由電子レーザー光の発生に成功 (平)

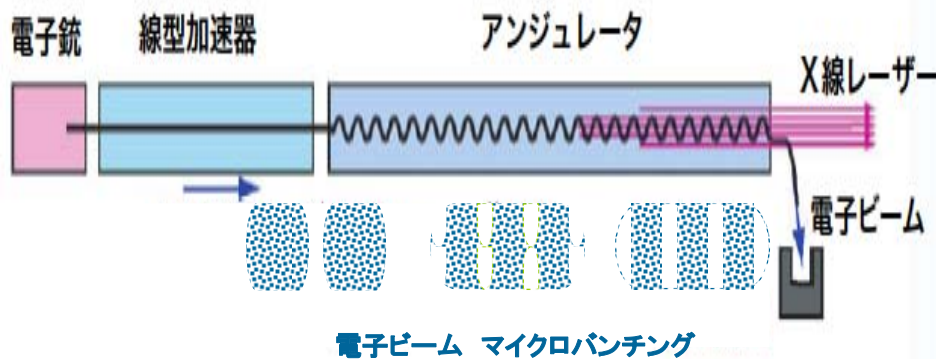
-単色性に優れた短波長FEL光源を世界で初めて実現-

ガス高次高調波をシード光として組み込み、単色化への難問を解決  
SASE-FELの次の世代の光源を実証  
FELの心臓部「アンジュレータ」のコンパクト化に貢献

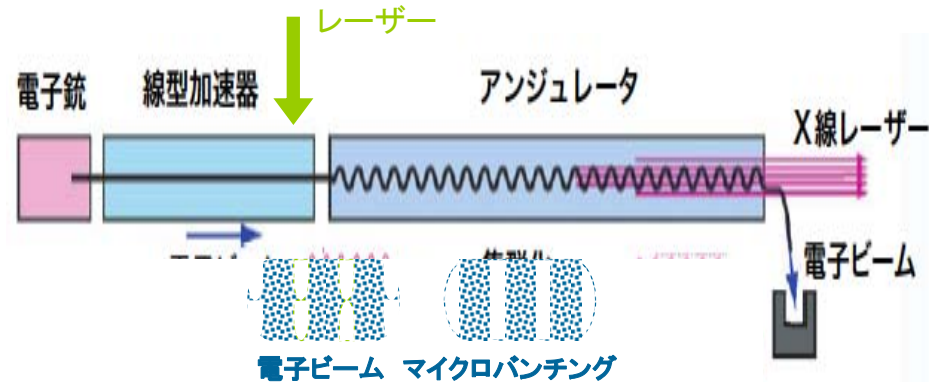


## 1-5 プロトタイプ機(スーパーシーディング技術の開発)

SASE方式(実機)



スーパーシーディング(プリバンチ)(実機完成後)



通常のSASE方式では、電子の蛇行により発生する光は弱く、電子ビームのマイクロバンチを形成するまでにある程度の電子の蛇行距離が必要となる、そこでレーザー光を電子ビーム軸に垂直に挿入することによって電子ビームに波長オーダーの変調をかけバンチングし、電子ビームにアンジュレータ挿入前のある程度のバンチング効果を与えることで、マイクロバンチ化をより早く形成させ、出力されるレーザー光をより安定化させる。

プロトタイプ機でのレーザー発振成功により今後、XFEL実機完成後の高度化を見据えて、プロトタイプ機においてスーパーシーディング技術の開発を行っていく。

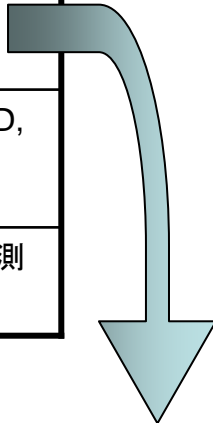


# 1-5 プロトタイプ機(利用推進研究)

プロトタイプ機での利用推進研究の状況、利用技術の状況、X線自由電子レーザー装置(加速器、光源装置)としての課題、問題点

## 利用推進研究の状況

期間	応募件数	採択件数	利用週数	分野
2007年10月~2008年3月(試行運用)	2	2	6	AMO(ガス照射)
2008年5月~7月(公募運用の開始)	6	5	6	AMO(ガス照射,ポンププローブ), タイミング計測R&D, 波面計測, プラズマ物理
2008年9月~12月(審査中)	10	-	9(予定)	AMO(クラスター照射,ポンププローブ), タイミング計測R&D, 波面計測, プラズマ物理, 回折顕微法



- ・波長のチューナビリティに大きな注目  
(←ギャップ可変真空封止アンジュレータの採用)
- ・加速器は長期にわたり非常に安定に運転している

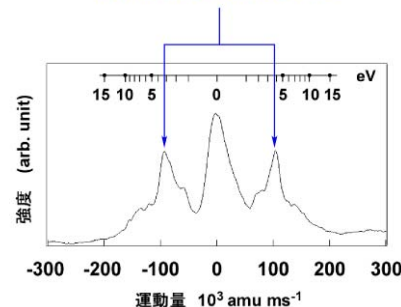
## 利用実験の初の成果 2008年4月 (APL誌)

APPLIED PHYSICS LETTERS 92, 154103 (2008)

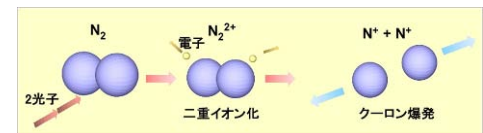
### Dissociative two-photon ionization of N<sub>2</sub> in extreme ultraviolet by intense self-amplified spontaneous emission free electron laser light

Takahiro Sato,<sup>1,7</sup> Tomoya Okino,<sup>1</sup> Kaoru Yamanouchi,<sup>1,7,8)</sup> Akira Yagishita,<sup>2</sup> Fumihiko Kannari,<sup>3</sup> Koichi Yamakawa,<sup>4</sup> Katsumi Midorikawa,<sup>5</sup> Hidetoshi Nakano,<sup>6</sup> Makina Yabashi,<sup>7</sup> Mitsuru Nagaono,<sup>7</sup> and Tetsuya Ishikawa<sup>7</sup>

2光子過程で生成したイオン



東大, 理研, JAEA, KEK, 慶應大, NTT-AT



## プロトタイプ機の運転・利用体制

X線自由電子レーザー計画推進本部

SCSS試験加速器(プロトタイプ機)運転利用委員会

課題選定作業部会 (一般利用課題を選定)

・実機に向けた利用研究開発  
・一般利用

・XFEL利用推進協議会選定  
課題(文部科学省)

・実機に向けた加速器研究開発

利用系

加速器系

## プロトタイプ機で認識された事項と実機に向けた対応策 (光利用)

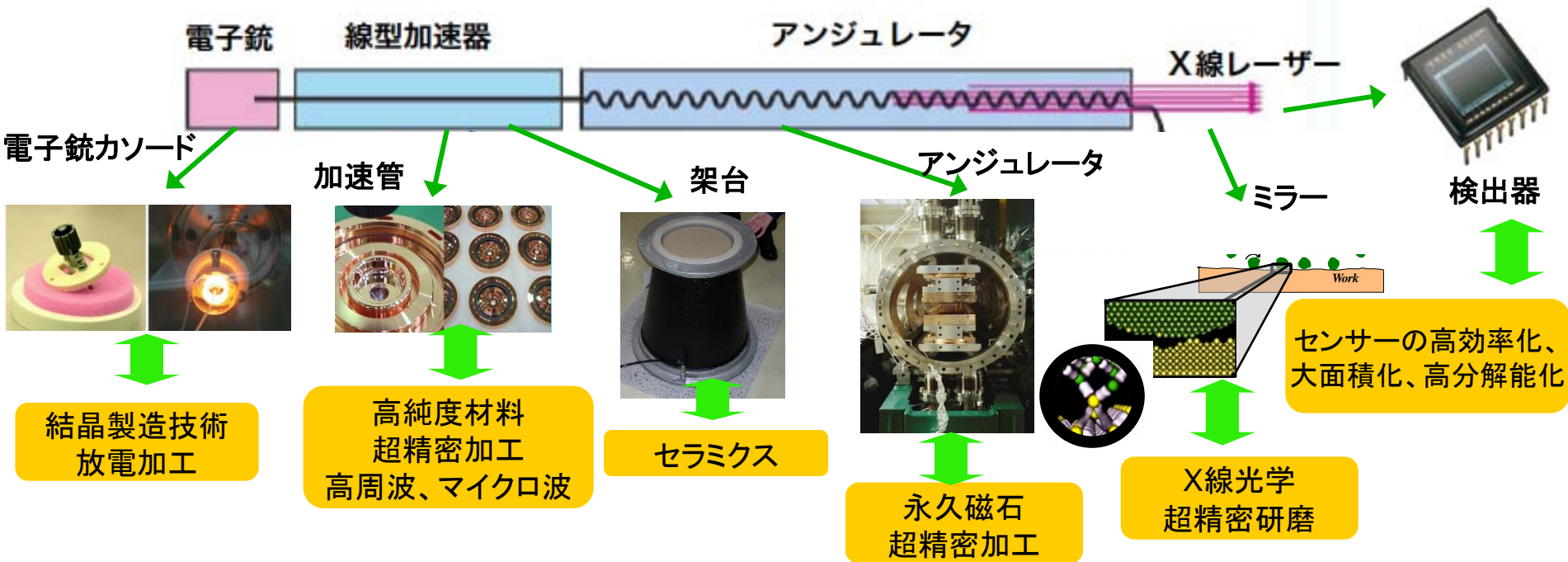
事項	対応策
スペクトルがショット毎に変化する (SASEに起因)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・X線スペクトロメータによりショット毎の計測を行い, 実験結果と突き合わせて補正する (ポストプロセス). 原理検証は既に完了. オンライン非破壊計測に向けたR&amp;Dを進める</li> <li>・シード技術のR&amp;Dを進める</li> </ul>
高次高調波が混入し, 非線形現象の観測の妨げとなる.	<ul style="list-style-type: none"> <li>・X線領域では, 全反射ミラーを用いることで6桁以上の抑制が容易に可能.</li> </ul>
さらなる短パルス化が望ましい (現状のパルス幅はsub-ps)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・バンチ圧縮の際の非線形性を補償するためのキャビティを導入する. パルス幅は数10fs以下に.</li> <li>・シード技術のR&amp;Dを進める</li> </ul>
ユーザー毎にショット毎の計測 (タグ付の60Hz) を委ねるのは非生産的	<ul style="list-style-type: none"> <li>・共用の検出器・計測システムの開発整備を進める.</li> </ul>
波長のチューナビリティは非常に有用である. 磁極間隔可変の真空封止アンジュレータの優位性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・磁極間隔の変更時の自動軌道補正アルゴリズムの開発を進める</li> </ul>
長期にわたるビームの安定性が確認されつつある	<ul style="list-style-type: none"> <li>・光学系の安定性をさらに追求する (ビームライン延伸への対応)</li> </ul>



# 1. その他(周辺技術の波及効果)

## ⑧周辺技術の開発がもたらす波及効果

X線自由電子レーザーの建設に用いられる高周波技術、真空技術、超精密加工技術、永久磁石などの材料開発技術等は、幅広い製造業の技術レベルの向上、日本の産業の強みである「匠の技」の伝承につながる。また、医療応用のための小型加速器の実用化や、オールド技術の最先端分野への応用などによる経済的波及効果が期待される。



## XFEL計画の中で生まれた特許出願の例

ビーム位置検出装置	電子ビームの変調方法及び装置	高精度振幅位相変調器、高精度振幅位相検出器、高精度振幅位相検出方法	補償回路、プローブ装置及びプローブ装置キット
リボルバー式挿入光源	リニアアクチュエータ	テラヘルツ電磁波発生装置及び方法	CTモニター
磁場発生方法及び磁場発生装置	高電圧充電器	重量物の位置決め方法及び当該方法に用いる空気浮上式位置決め装置	RFコンタクト及びRFコンタクト付きベローズ
挿入光源装置	電源用筐体、パルス電源	位置出し機構	パルストランス
床面施工方法及び床面検索装置	挿入光源用架台、挿入光源、磁場測定方法	電子銃	精密定規

# 1. その他(XFEL運営費)

⑬レーザーにするための調整運転予算を十分に確保し、一日も早くレーザー発振を迎えることの必要性

