

平成26年度光・量子融合連携研究開発プログラム-小型高輝度X線源イメージング基盤技術開発計画と全体会議報告。

加速器研究機構 浦川順治 2014.2.20

- ◆ 「光・量子融合連携研究開発プログラム」の英語名称は
Photon and Quantum Basic Research Coordinated Development Program
- ◆ 小型高輝度X線源イメージング基盤技術開発
- ◆ Fundamental Technology Development for High Brightness X-ray Source and the Imaging by Compact Accelerator

文部科学省委託事業

Application of advanced
laser and accelerator
technology for our life.



委託業務の目的

ポストゲノム時代の生命科学研究、ナノ構造解析、創薬、**医療診断・治療**への利用を画期的に飛躍させる**数keVから100keV**のX線領域の小型高輝度X線発生装置の基盤技術開発を行う。小型の高輝度X線源は**企業・病院・大学等での創薬および医療診断・治療**に革新的な高効率化を提供する。装置の主な目標性能として、

Peak Brightness: 10^{19} (photons/sec/mm²/mrad²/0.1%BW)、装置フットプリント:**6m × 8m**、消費電力:**100kW程度**を想定している。

逆コンプトン散乱(ICS)によるX線生成では、レーザーパルスと電子ビームの衝突を高繰返しミクロンサイズ精度で行うことによって高輝度X線生成が実現する。ブレイクスルーは再利用のコンセプトにより**レーザーパルス蓄積1MW**と電子ビームパワー1MWの安定高繰返し衝突を**100kW程度**の電力で実現することである。超伝導加速器技術を使ったエネルギー回収型線形加速器とレーザーパルス蓄積衝突技術を融合することで

Peak Brightness 10^{19} (photons/sec/mm²/mrad²/0.1%BW)を実現できる見通しを得た。ICS X線の特徴である**準単色コーンビーム**の画期的な利用展開に繋がる小型高輝度X線源に必要な基盤技術開発を行い、実用化を図る。本委託研究にて実施する技術開発項目はマルチアルカリカソード、クライオ光陰極高周波電子銃、エネルギー回収型超伝導高周波加速器、高品質短パルス大強度レーザー蓄積装置、ミクロン精度での電子ビーム軌道制御、レーザー光路精密調整及びX線イメージング法である。

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構(以下、KEKという。)では、超伝導線形加速器、小型高輝度光子ビーム源装置および先端X線イメージング法に関するシステム統合化研究開発を実施する。

代表機関KEKは、参画機関(国立大学法人広島大学、独立行政法人日本原子力研究開発機構、学校法人日本大学、株式会社リガク、学校法人早稲田大学、独立行政法人産業総合研究所、国立大学法人京都大学、国立大学法人東北大学)と密接に連携協力することによって、本委託事業で実施する基盤技術開発およびシステム統合化研究開発を推進する。

当該年度における成果の目標及び業務の方法

① X線生成性能向上のための技術開発および各要素技術の開発支援

既存のレーザー蓄積共振器を含む小型常伝導線形加速器(LUCX)のX線生成性能を上げ、X線検出器開発やX線イメージング手法開発を行う。現状**10keVから20keV X線領域で毎秒 10^7 光子数**生成程度であるが、平成26年度中にX線発生光子数を **10^9 程度**まで上げる為に、光共振器の4枚ミラー支持テーブルの剛性を上げてレーザー蓄積増倍率をさらに10倍上げることが試みる。さらに電子ビームパルス幅を拡げ**1000 bunches/pulse加速運転**を可能にすることを試みる。また、レーザー蓄積パワーが**ICS時200kWから500kWまで増強**すると同時に、衝突点での両ビームを **$30\mu\text{m}(\text{sigma})$ 以下**にすることを試みる。学校法人日本大学が開発するクライオ高周波電子銃の設計・プロトタイプ製作に協力する。また、学校法人早稲田大学がファイバーレーザー増幅技術を使った**50Wレベルの357MHzモードロックレーザー発生装置**試験を開始する予定であるので、レーザー発振器やクリーンルームを提供して協力する。そして、ファイバーレーザー増幅技術を使った50Wの357MHzモードロックレーザー発生装置製作及びその装置と新光共振器を使った**300kW蓄積実験**に着手し、蓄積安定度等のデータの取得を試みる。

国立大学法人広島大学と協力してレーザーパルス蓄積共振器のフィードバック性能を上げる実験に着手し、**増大率5000倍**以上を目指す。また、 10^8 から 10^9 photons/secのX線フラックスを使ったイメージング取得実験に着手し、X線検出器およびX線イメージング法の最適化の知見を得ることを試みる。また、その結果を分析することによって、X線検出器開発やX線イメージング手法開発の為の最適なX線測定系の詳細設計を試みる。

② 超伝導高周波加速空洞運転技術の確立

KEKでは超伝導加速器の運転性能を上げるために、加速勾配の限界の原因を各種の表面処理法の適用・空洞内面検査などにより追及する。平成25年度に大強度電子ビーム負荷無しで、パルス30 MV/m超伝導高周波加速空洞運転技術および連続波15MV/m超伝導高周波加速空洞運転技術の確認及び、**100 μ Aで連続波10MV/m**超伝導高周波加速空洞運転を開始

できた。平成26年度は**1mAで連続波15MV/m**超伝導高周波加速空洞運転を可能にできるように、超伝導空洞のフェードバック技術の向上により電子ビームの安定加速技術を確認する。

③ **光高周波電子銃用新マルチアルカリ光カソードおよびレーザー蓄積装置のフィードバック技術開発**(再委託先:国立大学法人広島大学)

従来のCs₂Teカソードから可視光励起できる物性的に有望であるマルチアルカリの高量子効率カソードについて、数%の量子効率や数ヶ月以上への寿命の改善に必要な条件を系統的に調べる。マルチアルカリカソード成膜試験装置により、蒸着条件の最適化を試み、平行して加速器への実装に必要な成膜装置の設計を開始し、試作を開始する。また最適化の指標とするため、マルチアルカリカソードの表面分析に取り組む。

また、KEKで進めているICS実験のレーザー蓄積装置の共鳴維持フィードバック技術開発を行い、光子ビーム生成実験に参加する。平成25年度に引き続き、開発したレーザー蓄積装置に高反射率鏡を導入し高強度蓄積の実証実験、デジタル制御装置のシステム設計を行う。特に、KEKにおいて高反射率鏡を実装したレーザー蓄積共振器による光子生成実験に着手し、光子強度向上のためのデータの蓄積を試みる。平行して平成25年度より継続しているレーザー蓄積共振器の高精度制御装置試験を実施し、そのデータに基づいたデジタル制御装置の導入を行う。

④ **スポーク型超伝導空洞の開発**(再委託先:独立行政法人日本原子力研究開発機構)

参画機関である国立大学法人京都大学と協力して**4Kで高電界加速運転可能な325MHz**新超伝導空洞開発を進める。H26年度は、マルチパッキング(共鳴電子増倍)の解析結果を反映した空洞形状の改良、必要な加工精度を得るための空洞製作工程の最適化を行う。分子線エピタキシー成膜装置(MBE)にて**高量子効率カソード**を試作し、量子効率等の評価に着手する。

⑤ 小型高輝度X線源を用いたX線イメージング装置の基盤技術開発(再委託先:株式会社リガク)

小型高輝度X線発生装置の開発目標仕様に合わせ、X線位相イメージング装置用検出器の評価選定基礎実験を実施する。具体的には、小型高輝度X線発生装置を用いるX線位相イメージング装置システムに必要なX線検出器の選定、評価を行う。SOI、CCD、CMOS器、Hybrid-pixel semiconductor検出器等、現在開発中および使用可能な検出器の中から小型高輝度X線発生装置の発生するX線スペクトラムに適した検出器を選定し評価実験を行う。また、**市場調査、アプリケーションの探索**に着手する。

⑥ クライオ光陰極高周波電子銃開発(再委託先:学校法人日本大学)

平成25年度の基本設計に基づき試作した2.6セルのC-バンド(5712MHz)RF空洞について、既存のクライオスタットに設置し20Kにおける高周波特性の詳細な測定を引き続き行う。20Kでの高周波特性に関して得られた成果を基に、平成26年度では次の段階としてRF入力用カップラーと光陰極装着部の構造を備えたRF空洞を設計・試作し、20Kにおいて低電力試験を行う。さらに、この低電力試験の成果に基づき実機の設計に着手する。RF空洞の設計では、3次元RF空洞計算コードCST STUDIOを用いる。RF空洞の製作は大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構(KEK)が担当する。

平成25年度における成果によって、室温で**無負荷Q値約12000**の高純度銅製C-バンドRF空洞は、低温時の異常表皮効果の寄与が大きいものの、**20K**まで冷却した際には無負荷Q値が60000以上、また**シャントインピーダンスが500M Ω /m以上**になることが分かっている。この場合、空洞への**入力ピークRF電力600kW**台でRF電子銃として十分な加速電界が得られる。RF電子銃を短パルスで動作させる際には、高い負荷Q値により空洞内RF電力の立ち上がり時間が長くなるのを避けるため、空洞と導波管とのRF結合を十分に大きくする必要がある。そこで平成26年度は、カップラーの設計・製作においてはRF立ち上がり時間0.3 μ sec以下、結合係数 $\beta_3=10$ 以上のオーバーカップルとなるカップラーの実現を目指す。

⑦ 大強度高繰返しレーザー開発(再委託先:学校法人早稲田大学)

50から200W高繰返しモードロックレーザー開発を目標にして、出力1W程度を目指した前段増幅器の開発に着手する。そのために、増幅前のパルス幅伸長器及び増幅後の圧縮器の最適設計及び増幅器の最適設計を検討する。前段増幅器の性能試験はKEKの光共振器を用いて行う予定である。

⑧ 小型加速器を用いた逆コンプトン散乱光源による最適なイメージング手法の開発(再委託先:独立行政法人産業技術総合研究所)

独立行政法人産業技術総合研究所が所有するSバンド小型リニアック施設を用い、逆コンプトン散乱X線生成およびイメージング手法に関する研究開発をKEKと協力して推進する。H25年度はレーザー装置の復旧でX線生成への見通しがつき、衝突角90度でエネルギー10keV程度のX線生成を目指したが、H26年度は、更に電子ビームとレーザーを整備し、衝突角15度においてエネルギー20keV以上の逆コンプトン散乱X線を生成する予定である。電子ビームの整備では、小型光陰極蒸着装置の開発を行う。参画機関である国立大学法人東北大学及び株式会社リガクと協力してX線位相イメージング装置の設計・開発を行い、位相画像取得実験を行う予定である。

⑨ スポーク型超伝導空洞開発に於ける設計及び非破壊検査(再委託先:国立大学法人京都大学)

参画機関である日本原子力研究開発機構と協力して4Kで高電界加速運転可能な325MHz新超伝導空洞開発を進める。H26年度は、マルチパッキングが運転の障害とならないよう、改良後の空洞形状の解析に着手する。並行して、空洞製作において必要な加工精度を得るための工程設計について、日本原子力研究開発機構と議論を進めながら3D-CADでの思考実験を繰返し、最適化を試みる。また、スポーク空洞は複雑な構造を持ち、現状では非破壊検査の手法が確立されていないため、その手法について検討し、検査機器の設計を行う。

⑩ 小型高輝度X線発生装置を用いたX線位相イメージング法の開発(再委託先:
国立大学法人東北大学)

X線位相イメージングを実施するために、平成25年度に試作したTalbot干渉計用のX線透過格子を設置するための精密アライメントステージを、参画機関である独立行政法人産業技術総合研究所のSバンド小型リニアック施設に設置し、逆コンプトン散乱X線による位相イメージングの初期実験に着手する。この線源の空間的干渉性の制限のために、追加のX線透過格子を加えたTalbot-Lau干渉計構成にすべきであることをH25年度の研究で明らかにしたが、その追加格子を試作する。画像検出器については、参画機関の株式会社リガクの協力も得て、撮影実験を実施する。撮影したX線画像の鮮明度などを評価し、X線格子の品質、空間分解能、撮影時間、およびX線スペクトルの影響などの項目で、**位相イメージングのパフォーマンス**を検証する。これを受けて、さらに高感度な撮影を実現するために、X線格子デザインの高度化検討(アスペクト比の向上、周期の縮小など)を行う。

⑪ プロジェクトの総合的推進

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構は、本研究課題全体を円滑に運営していくため、本事業のPO及びPDとの連絡を密にとりつつ、各参画機関の連携・調整を行うとともに、課題間の連携強化、研究者間の交流促進を図る。各参画機関の連携・調整にあたっては、本課題全体打合せを2ヶ月に1度、各機関持ち回りで行う。また、プロジェクトで得られた成果については、積極的に公表し、今後の展開に資する。

◆ 「光・量子融合連携研究開発プログラム」の英語名称は
Photon and Quantum Basic Research Coordinated Development Program

◆ 小型高輝度X線源イメージング基盤技術開発

◆ Fundamental Technology Development for High Brightness X-ray Source and the
Imaging by Compact Accelerator

<http://kocbeam.kek.jp/> from 2008.9 to 2013.3



KEK 浦川順治

2014.2.13 学術政策局会議室1

文部科学省委託事業

Application of advanced
laser and accelerator
technology for our life.

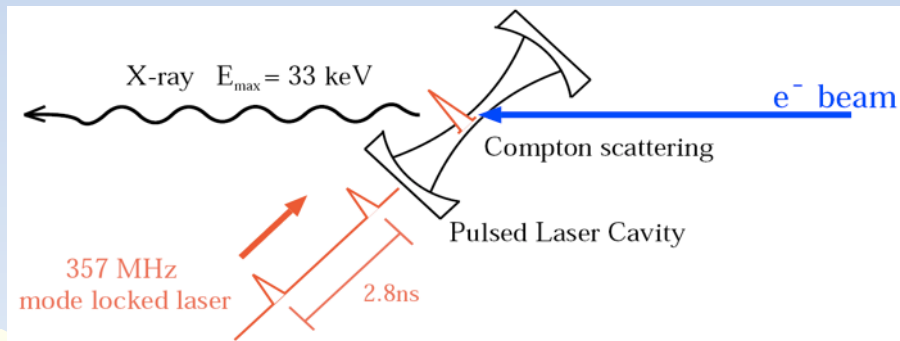
<http://nkocbeam.kek.jp/> from 2013.8



小型加速器による小型高輝度X線源とイメージング 基盤技術開発

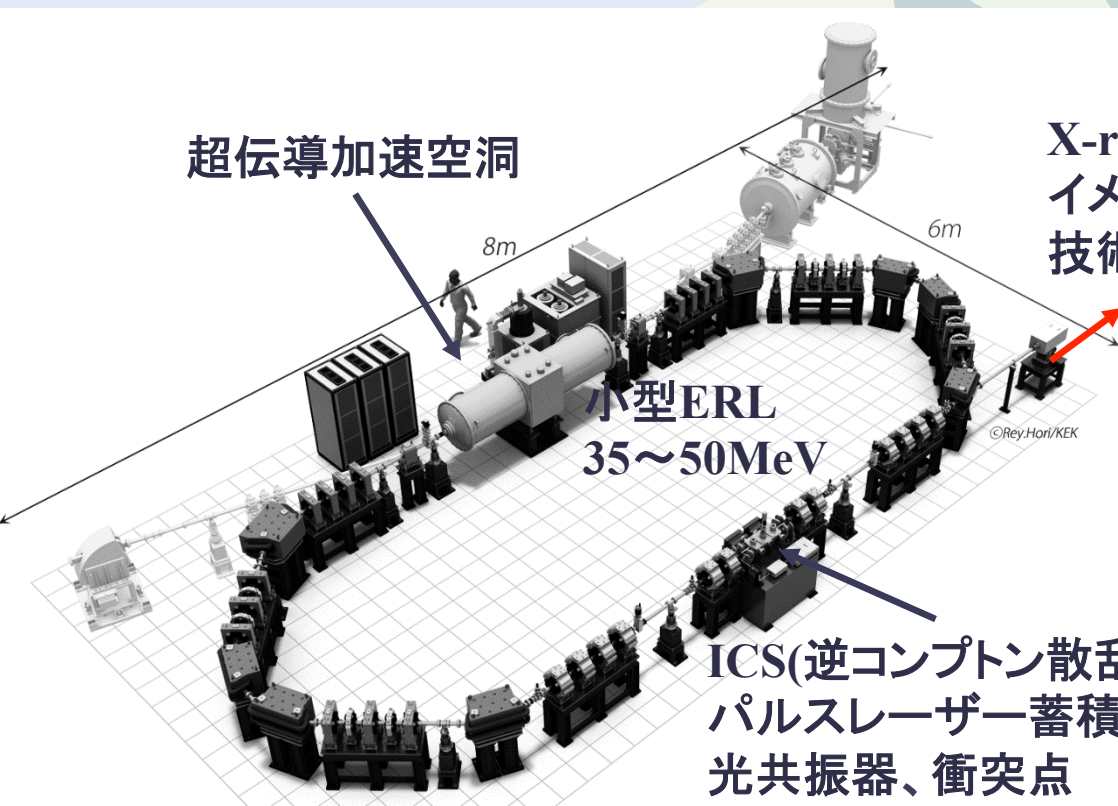
全体計画と研究開発目的

小型高輝度X線源(Peak Brightness 10^{19})
数keVから100keV X線領域エネルギー可変光源



基盤技術開発

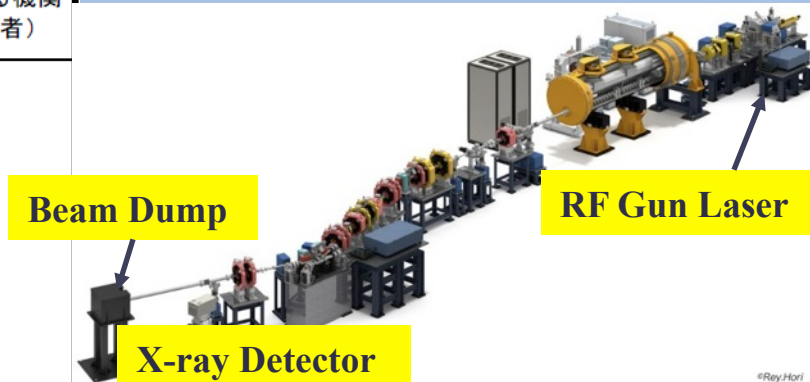
1. マルチアルカリカソード、
2. クライオ光陰極高周波電子銃、
3. ERL技術 (1MW電子ビーム・エネルギー回収)、
4. 大強度レーザー蓄積 (1MWレーザー蓄積)、
5. 10 μ mビーム衝突技術、
6. X線イメージング法、
7. 4K 325MHz spoke超伝導空洞開発、



6. 研究開発推進に必要な施設及び設備品・機器

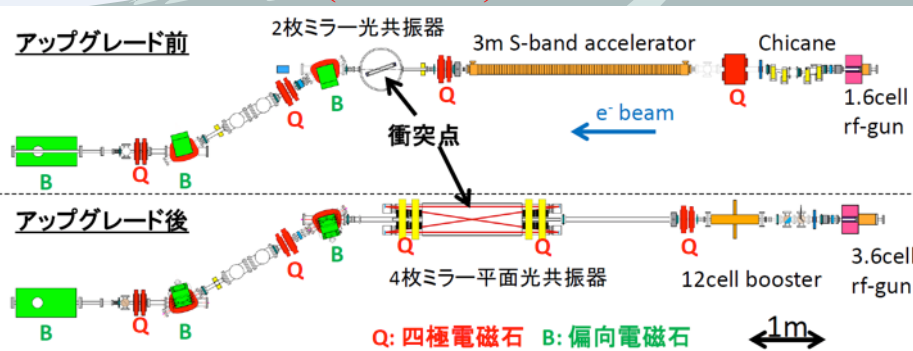
保有・購入・賃貸の区分	品名	仕様	用途	金額 (千円)	購入・賃貸の場合の調達時期	賃貸する機関 (当事者)
小型加速器 X線生成実験 保有 (LUCX)	LUCX	40MeV, 12.5Hz Max. beam power: 320W	X線光源、THz光源開発、利用実験用	800,000	2013-2019	KEK
高輝度X線生成実験 将来保有 (cERL、将来計画のR&Dの為建設中)	cERL	35MeV, 10mA Max. beam power: 350kW	ERL技術開発用、X線およびTHz利用実験	3,800,000	2015-2019	KEK
パルス高輝度X線生成実験 将来保有 (STF、将来計画のR&Dの為改造中)	STF	300MeV, 10mA 5Hz-1ms beam Max. beam power: 15kW	ILC技術開発用、X線およびガンマ線利用実験	6,800,000	2016-2019	KEK

STF施設

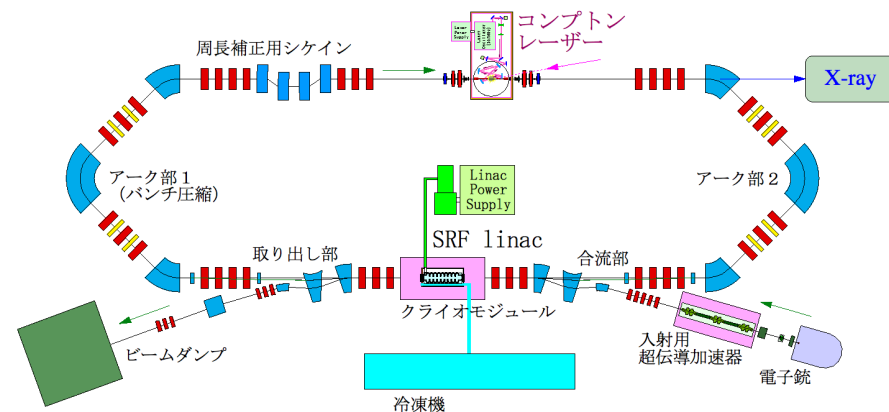


60MeVから300MeVへビームエネルギー増強の為改造中。
2016年度から運転再開、高エネルギーX線生成・利用研究開発に使用できる(2016-2019)。

LUCX施設(40MeV)



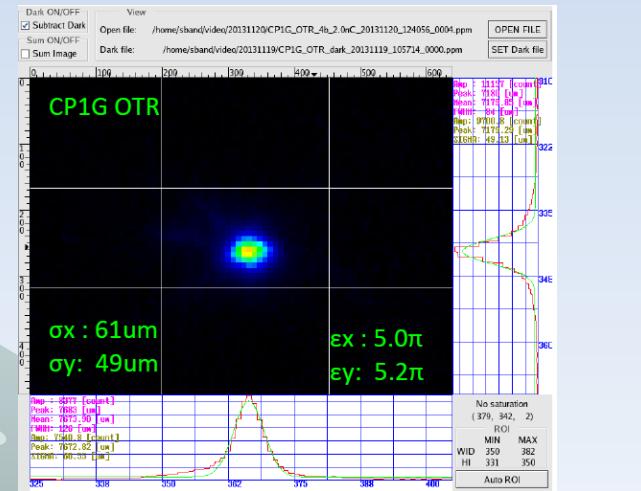
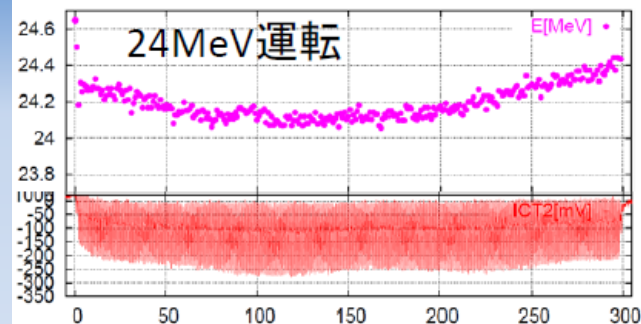
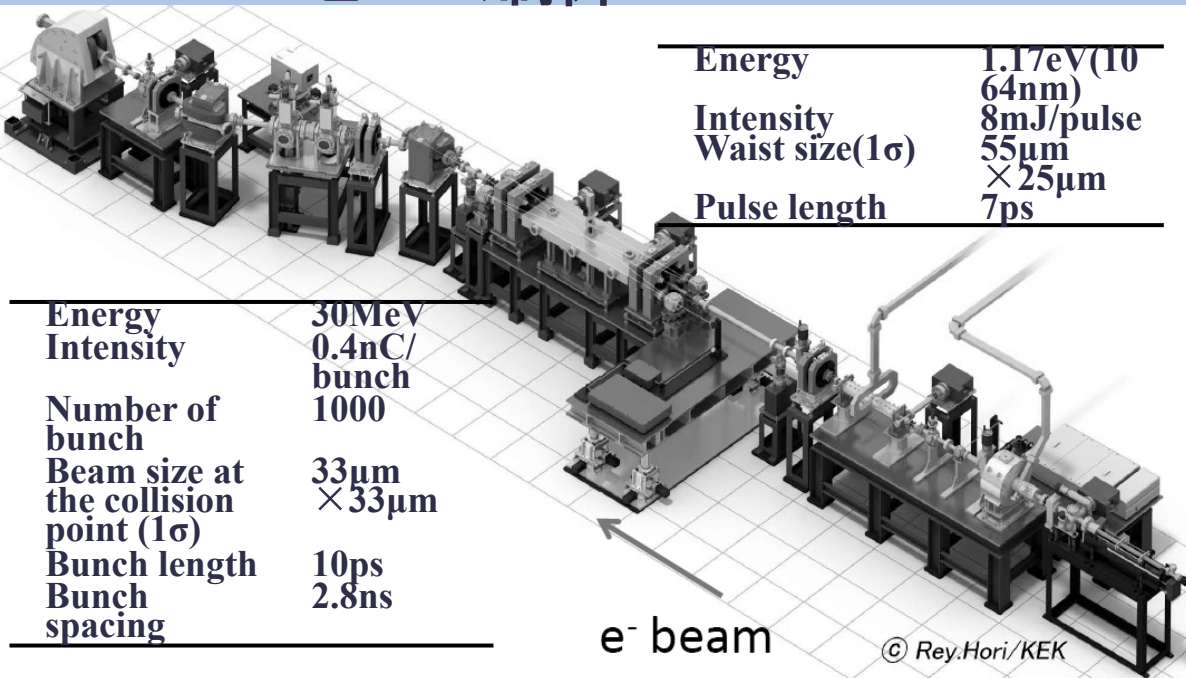
cERL施設(35MeV)



改造終了、1MWパルスレーザー蓄積技術、
357MHz~10μm衝突技術、
X線イメージング技術等の開発(2013-2019)。

2015年度中に~10mA ERL運転達成。その後
逆コンプトンX線生成・利用研究開始(2015-2019)。

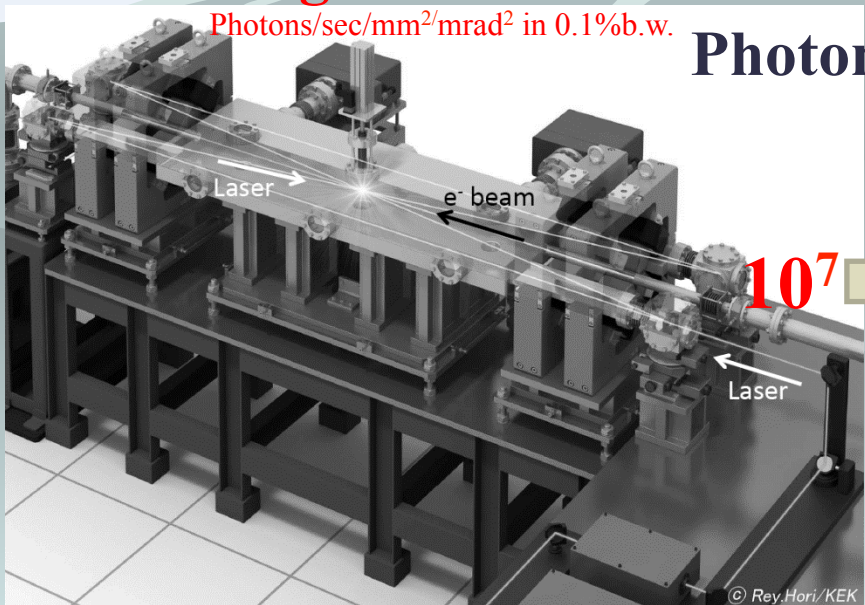
ビーム制御



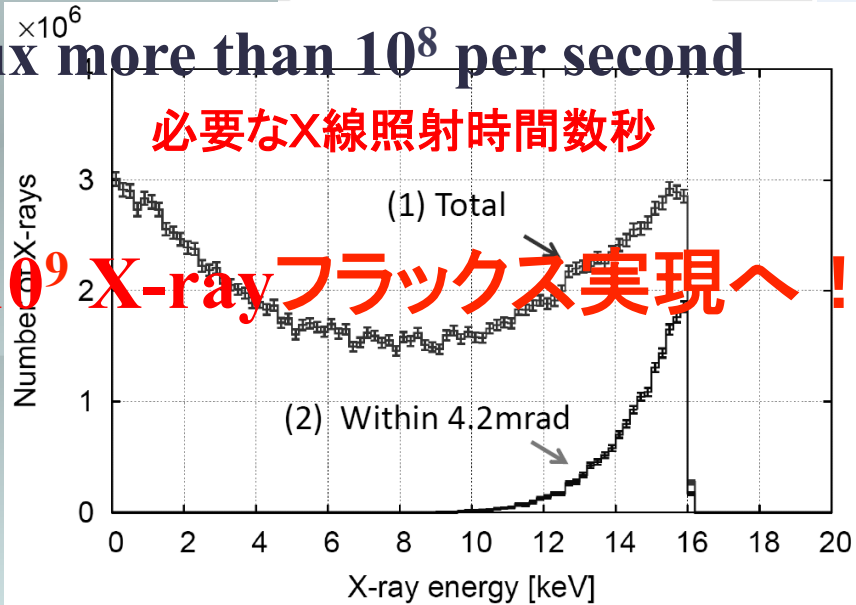
Brightness 10^{12}

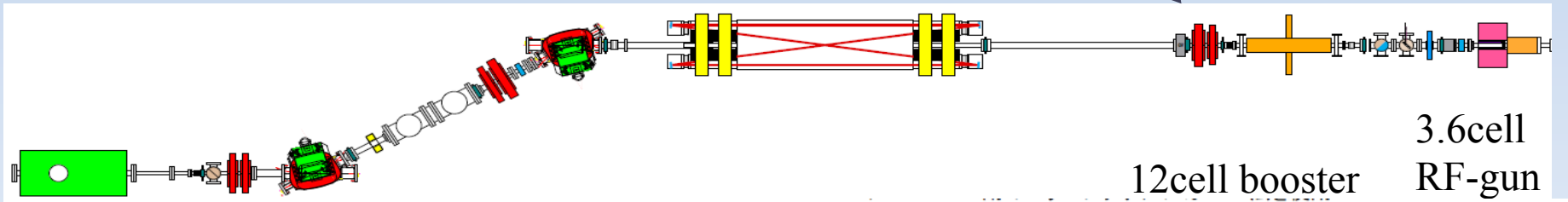
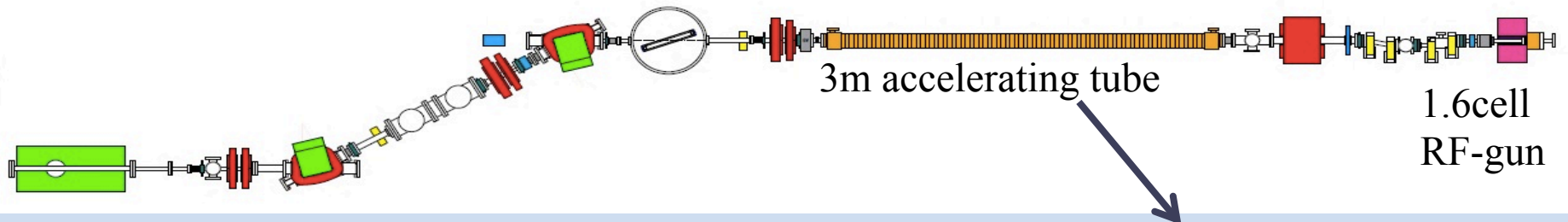
Photons/sec/mm²/mrad² in 0.1%b.w.

Photon flux more than 10^8 per second



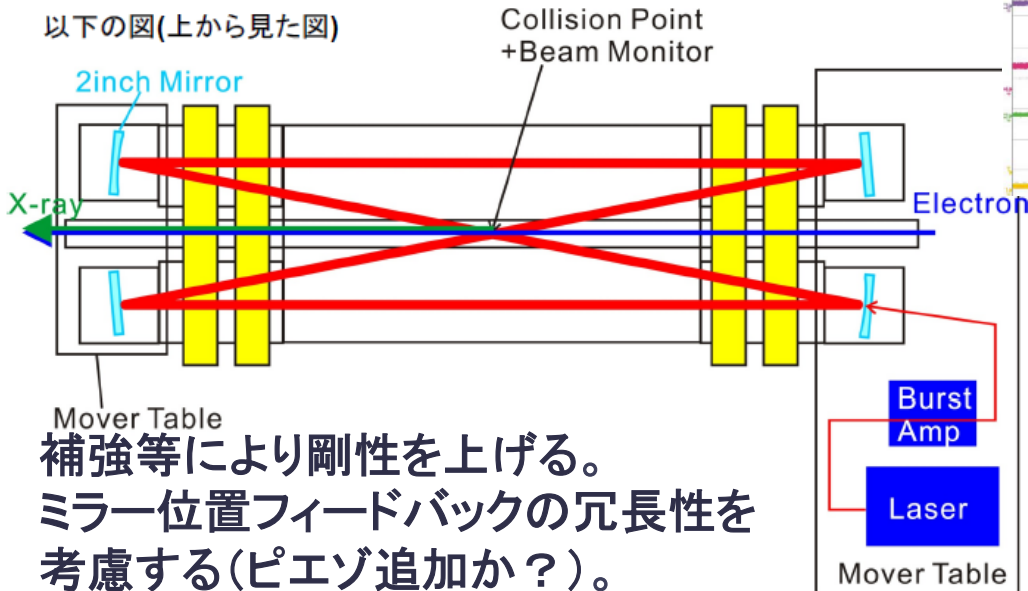
$10^7 \rightarrow 10^9$ X-rayフラックス実現へ!



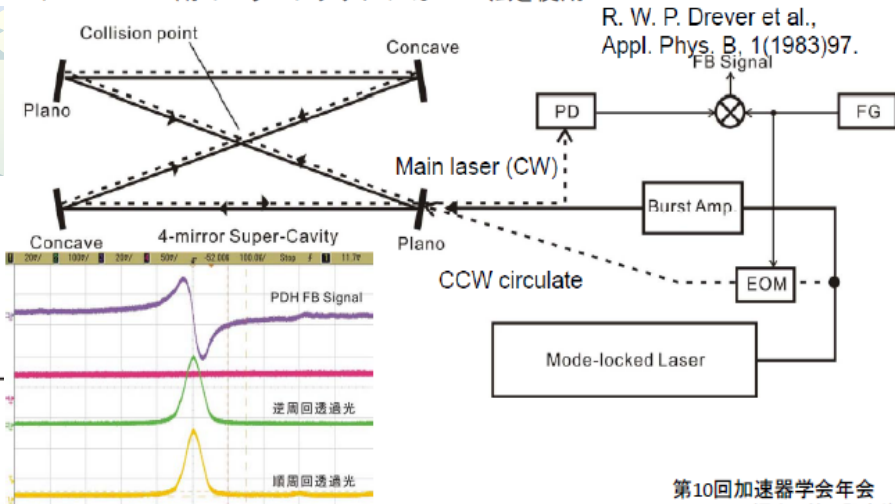


Cavity Design

前述の衝突角度問題+4枚ミラーCavityという境界条件の下良さそうな設計が以下の図(上から見た図)



補強等により剛性を上げる。
ミラー位置フィードバックの冗長性を考慮する(ピエゾ追加か?)。



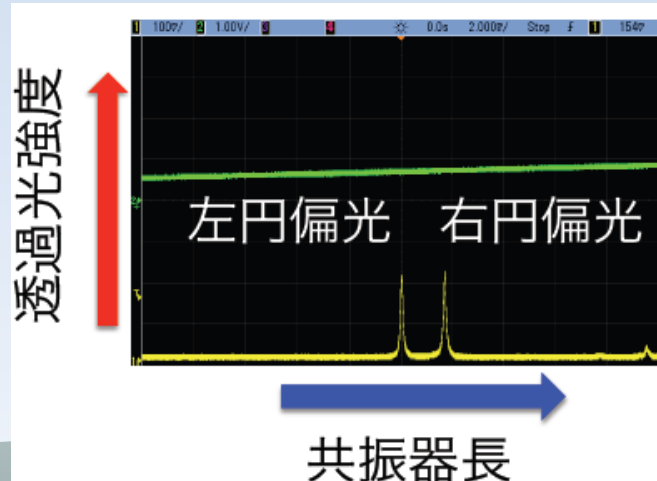
第10回加速器学会年会

逆周回レーザーを使った共鳴制御によって、Burst Amp増幅により10kW入射が可能になった(~200W入射実現)。DC運転では入射レーザーパワーは100Wから200Wが最近の目標になっている。

4枚ミラーレーザー共振器

2011年に設置したレーザー共振器

新しいエラー信号生成によるアナログ
フィードバック共鳴制御、X線偏極制御。



2010年にフランスLALが
設置したレーザー共振器

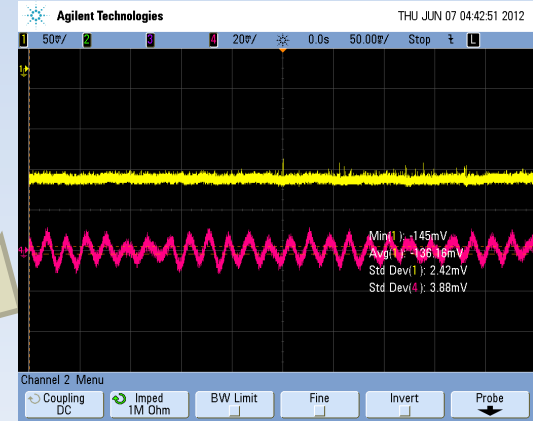
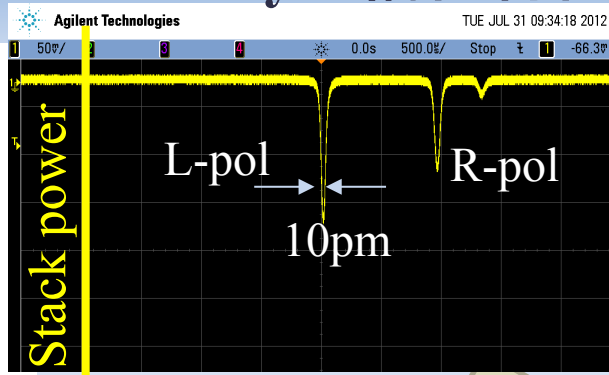
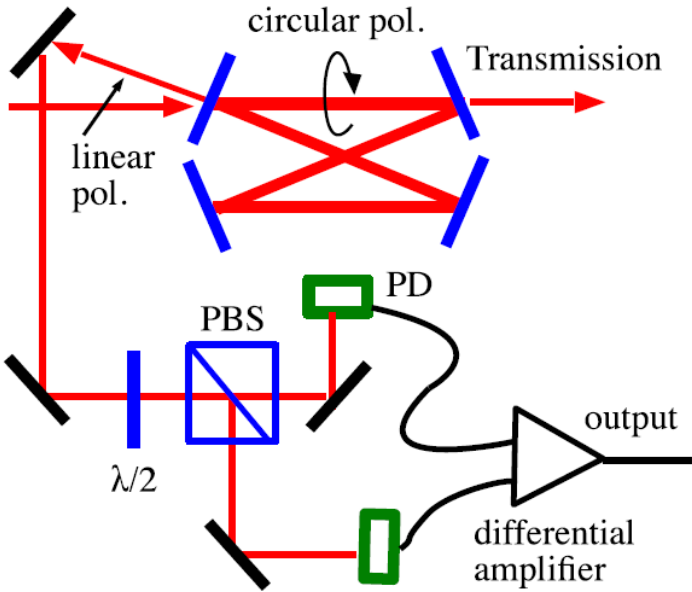
PDH法によるデジタル
フィードバック共鳴制御。



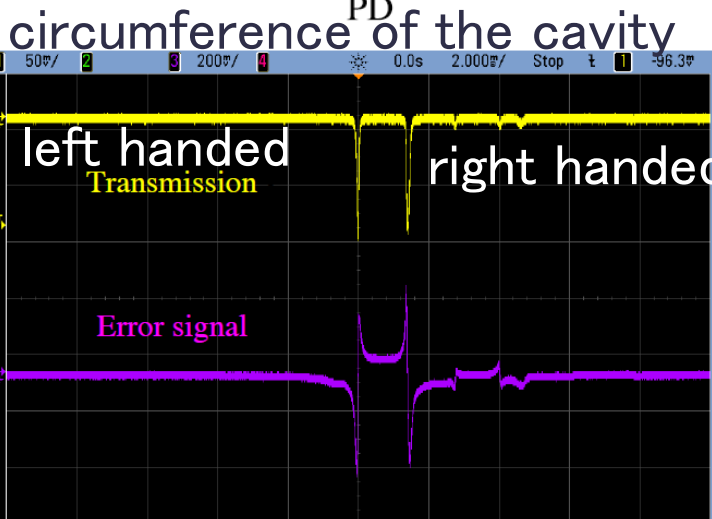
2013年、再インストール及
びレーザー再調整によって
、peak 101kW蓄積及び
100% 近い入射Coupling確認。
現在、ATF運転時共鳴lock
状態で40kW蓄積。
コンプトンガンマフラックス
検出量は 10^{11} を達成
(2013.12.12)。

新偏極共鳴制御

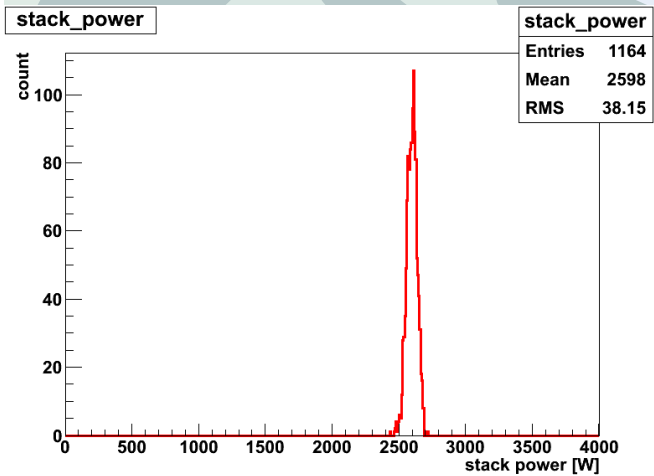
3D-4M Cavityの偏極特性を利用した制御



Control



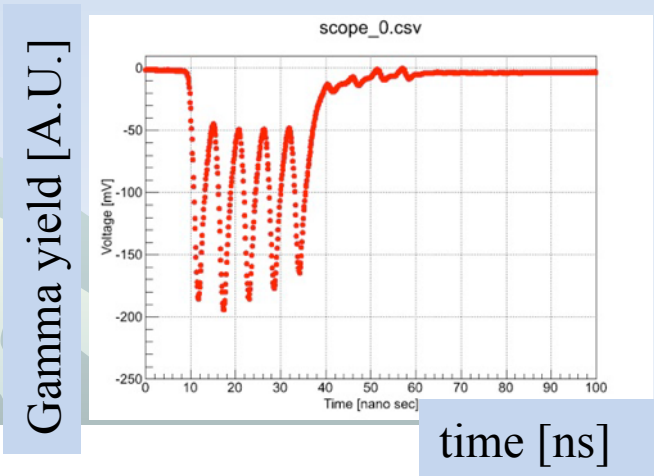
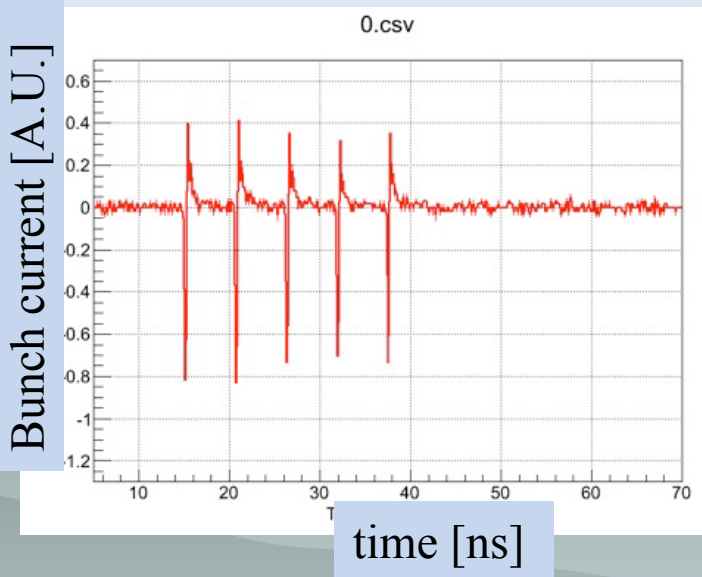
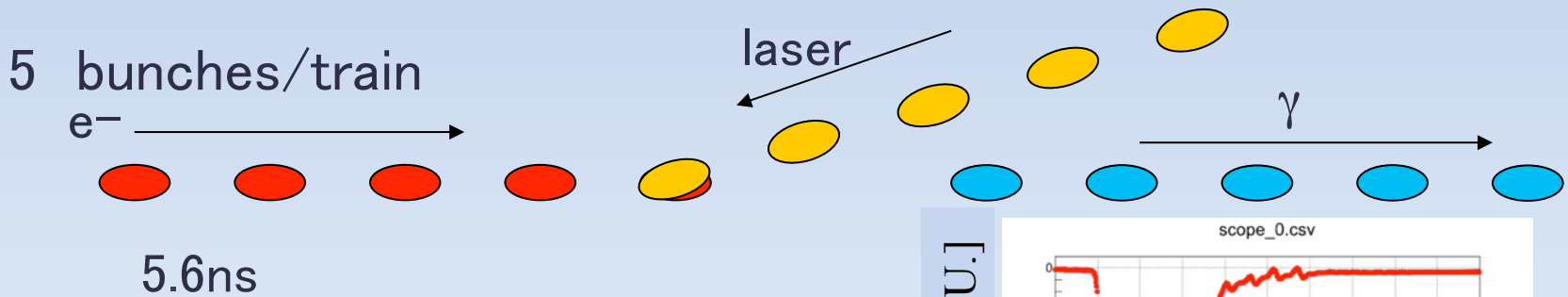
Different slope in left and right pol.



relative mirror position control of 8pm was achieved. Fast polarization control (>10kHz) is possible. Laser IP size 13μm was achieved.

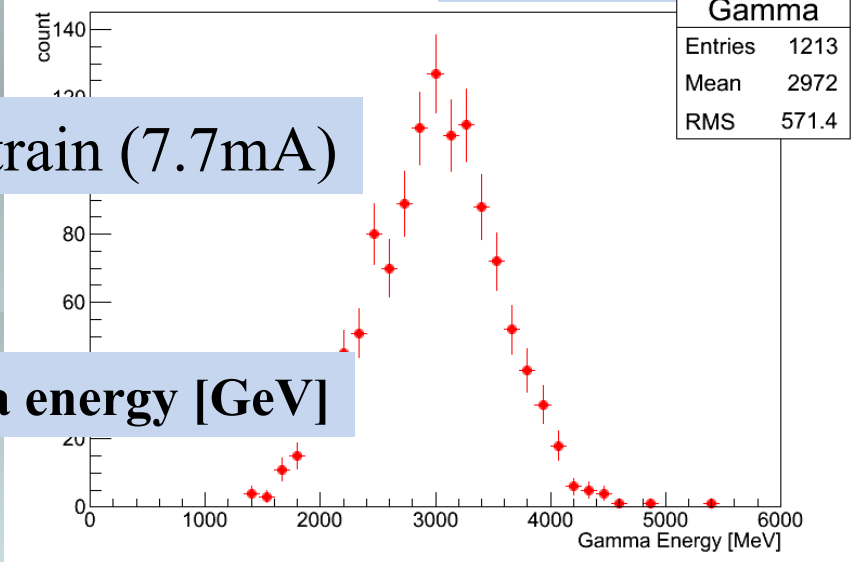
Laser power = 2.6kW
Enhancement 1230
or less due to **mirror contamination and injection coupling.**

γ -ray Generation



5 bunch/train (7.7mA)

Gamma energy [GeV]



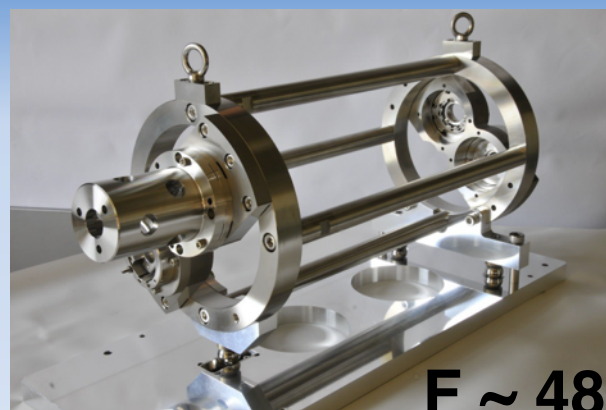
2970 ± 20 MeV
 $\Rightarrow \sim 120 \gamma$ s / train
 ATF 2.16MHz
 $\sim 2.6 \times 10^8$ /sec

2-Mirror Cavity --> 4-Mirror Cavity



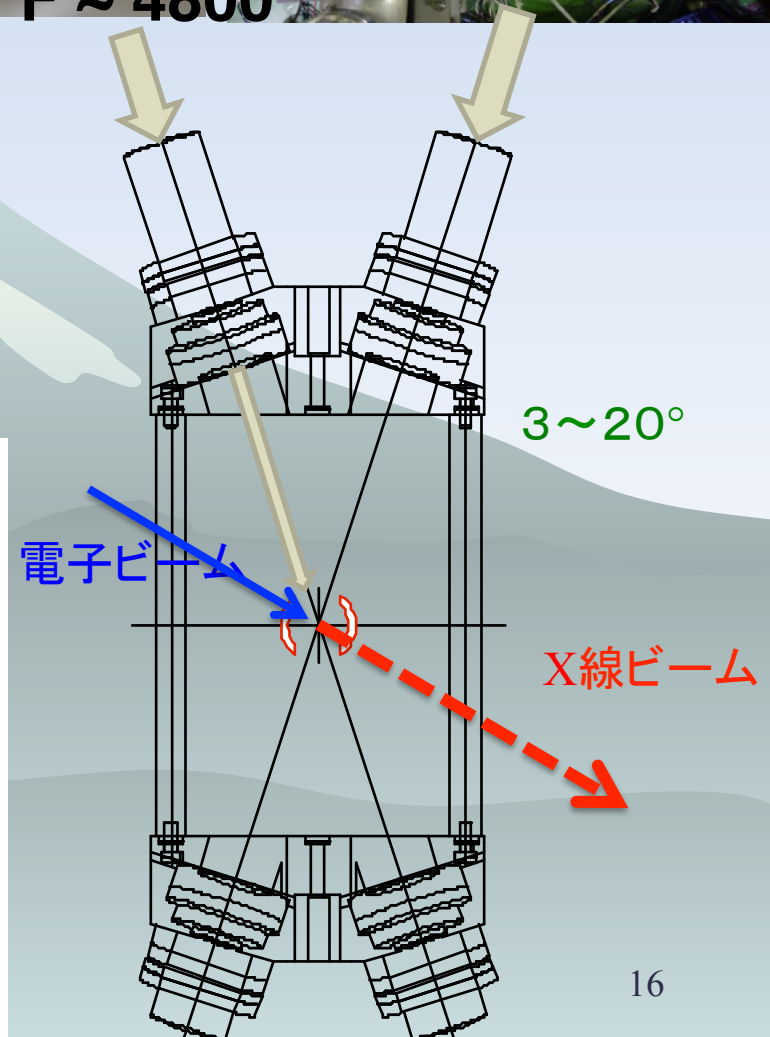
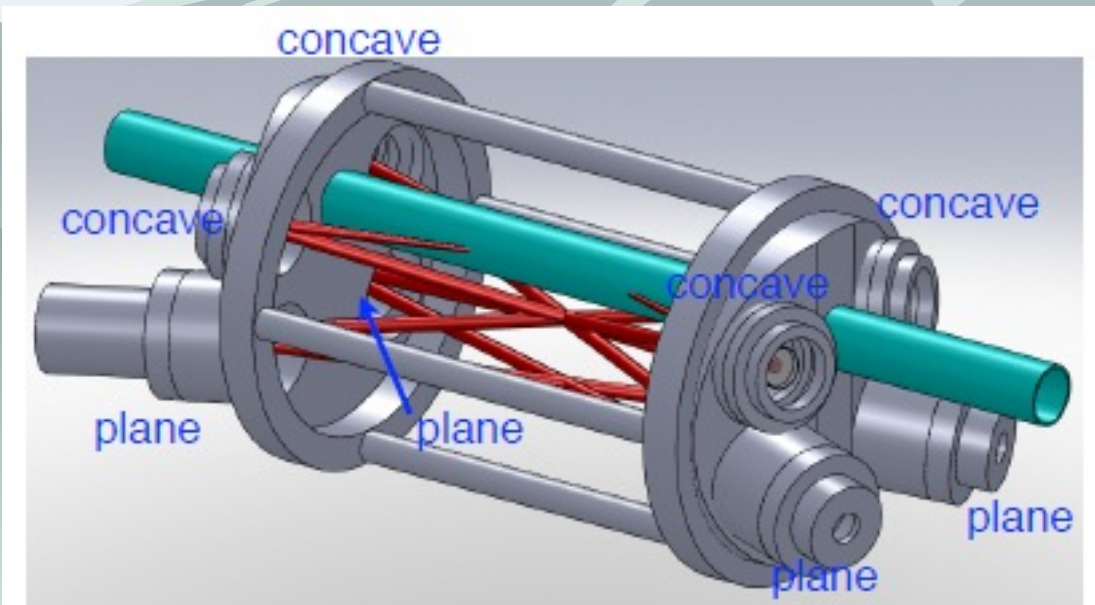
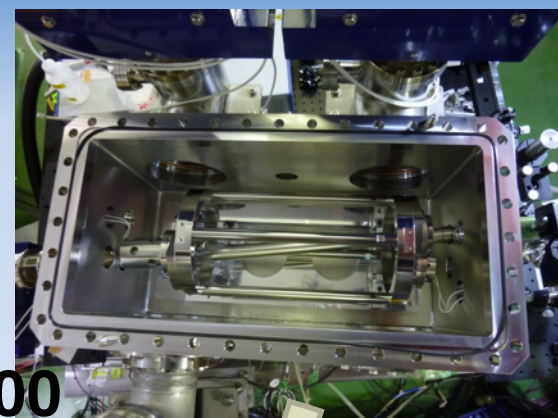
$\sigma_{\text{spot}} \sim 30 \text{ micron}$

$F \sim 2000$



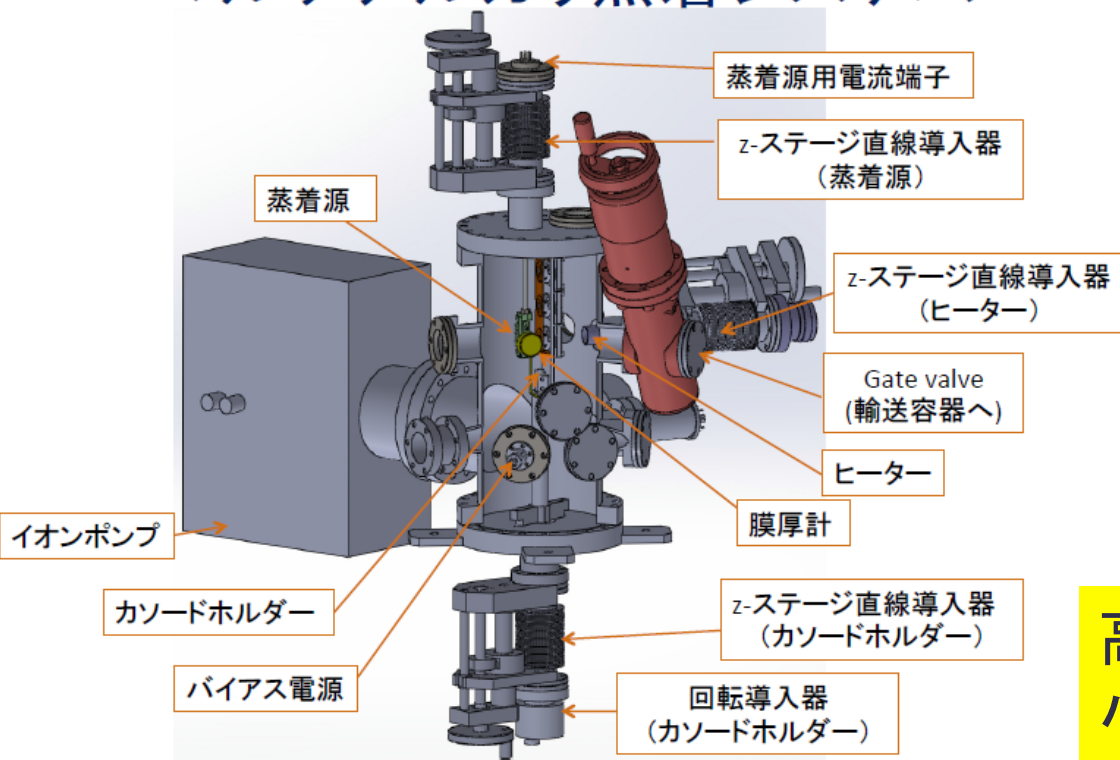
$F \sim 4800$

$\sigma_{\text{spot}} \sim 13 \text{ micron}$



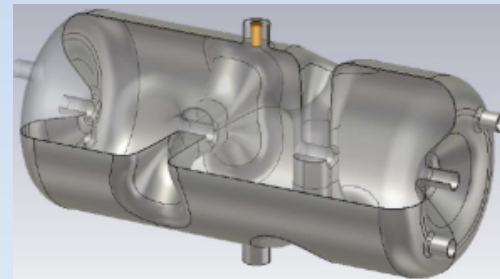
広島大、原機構:ホットカソード開発

マルチアルカリ蒸着システム



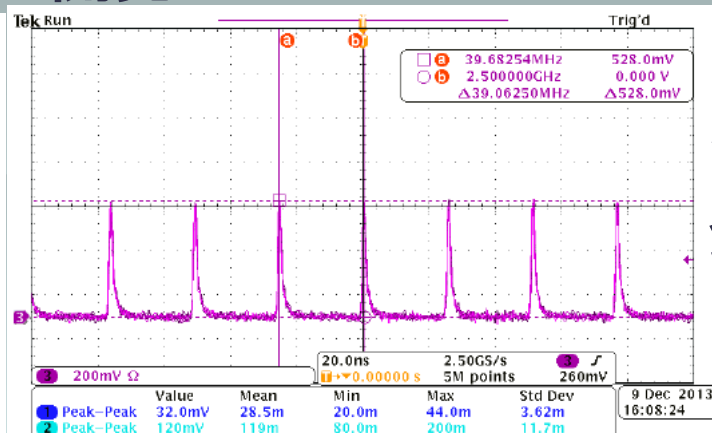
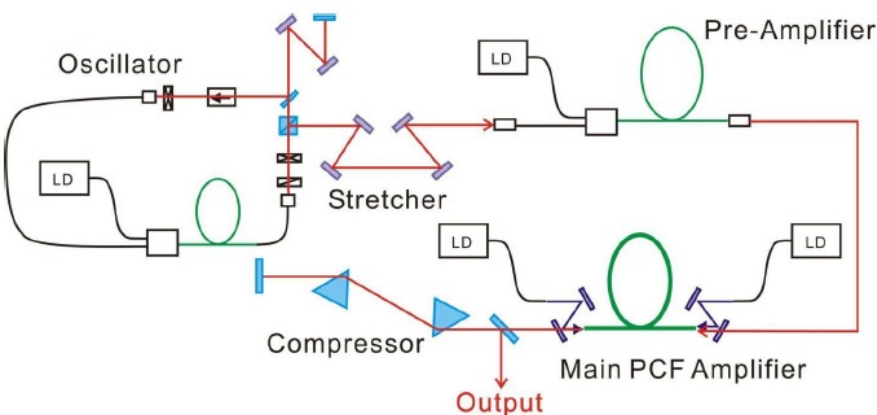
原機構、京大:空洞開発

4K 325MHz cold model用超伝導スポーク設計完了。



高周波源として、
小型半導体増幅器が使える。

早大:ファイバーレーザーシステム開発

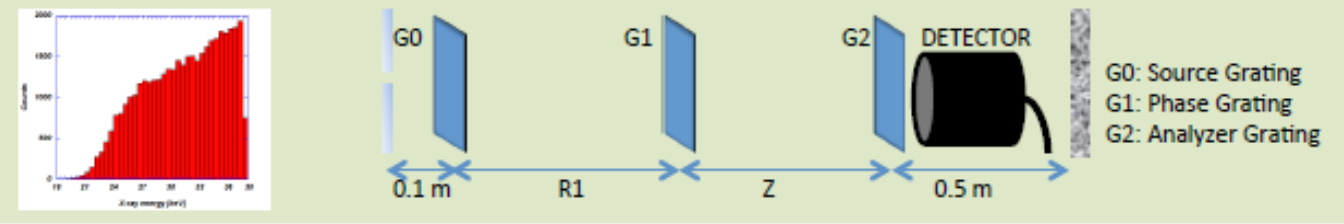


18mW安定
発信確認。

東北大、リガク、産総研：位相イメージング

日大、KEK：クライオ高周波電子銃開発

Fig. 2. X-ray Talbot-Lau Interferometer



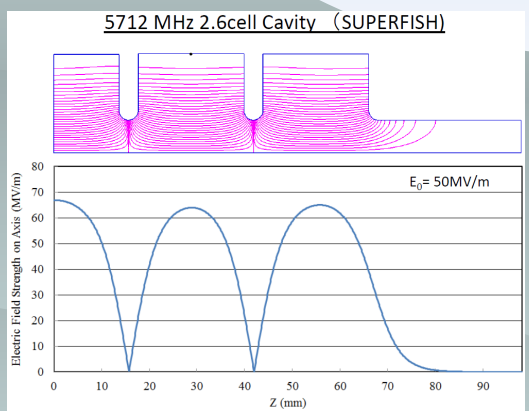
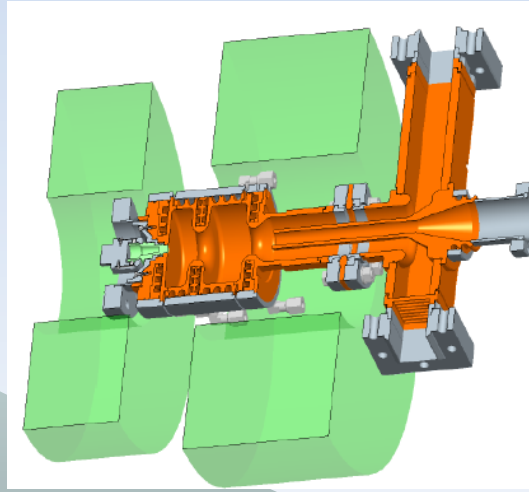
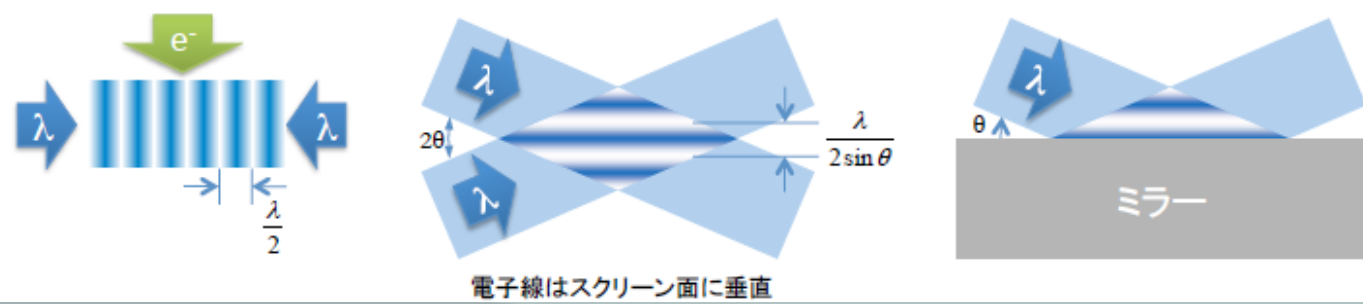
$$z = pd \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right) / \lambda$$

$$R_2 = R_1 + z$$

p : Talbot order
 d : grating pitch
 λ : X-ray wavelength

マルチスリットとして、レーザーパルス干渉縞の利用提案。

Striped LCSを形成するには一定在波利用



Cold model製作開始、H26年度中に特性測定及び実機設計を行う。

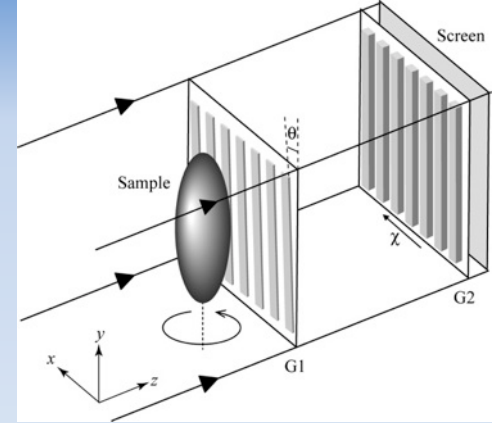
今後の展望

光・量子ビーム融合連携研究開発プログラムの「小型高輝度X線源とイメージング基盤技術開発」で、これまでに開発した基盤技術をさらに発展させて構築する小型高輝度X線源の性能を示す機会を得た。この新しいプログラムではイメージング基盤技術開発も行うので、期待される成果の結果を直接社会のニーズと比較できる。

事業終了後

成果を適用する対象: 小型時間分解型電子顕微鏡や小型高輝度X線源装置に適用する。

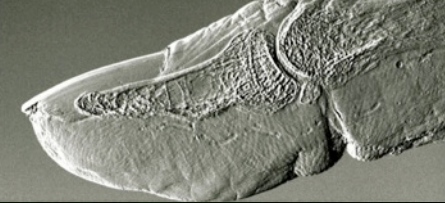
実用化に向けた計画等: プロトタイプ製作による性能実証実験。
経済的効果及び社会的効果: 社会ニーズによるので、協力企業と検討中。特に、医療診断や高エネルギー高品質X線によるガン治療は高齢化社会に有用であると考えられるので、装置の製品化が実現すれば経済効果は十分に期待できる。また、社会的効果も十分に期待できる。



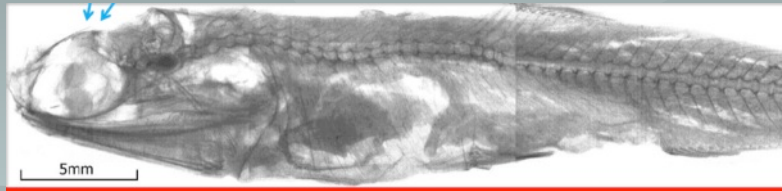
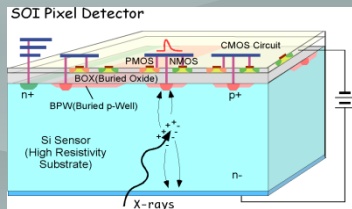
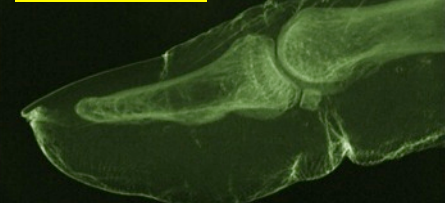
吸収画像



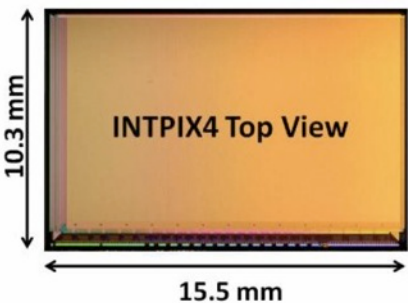
微分位相画像



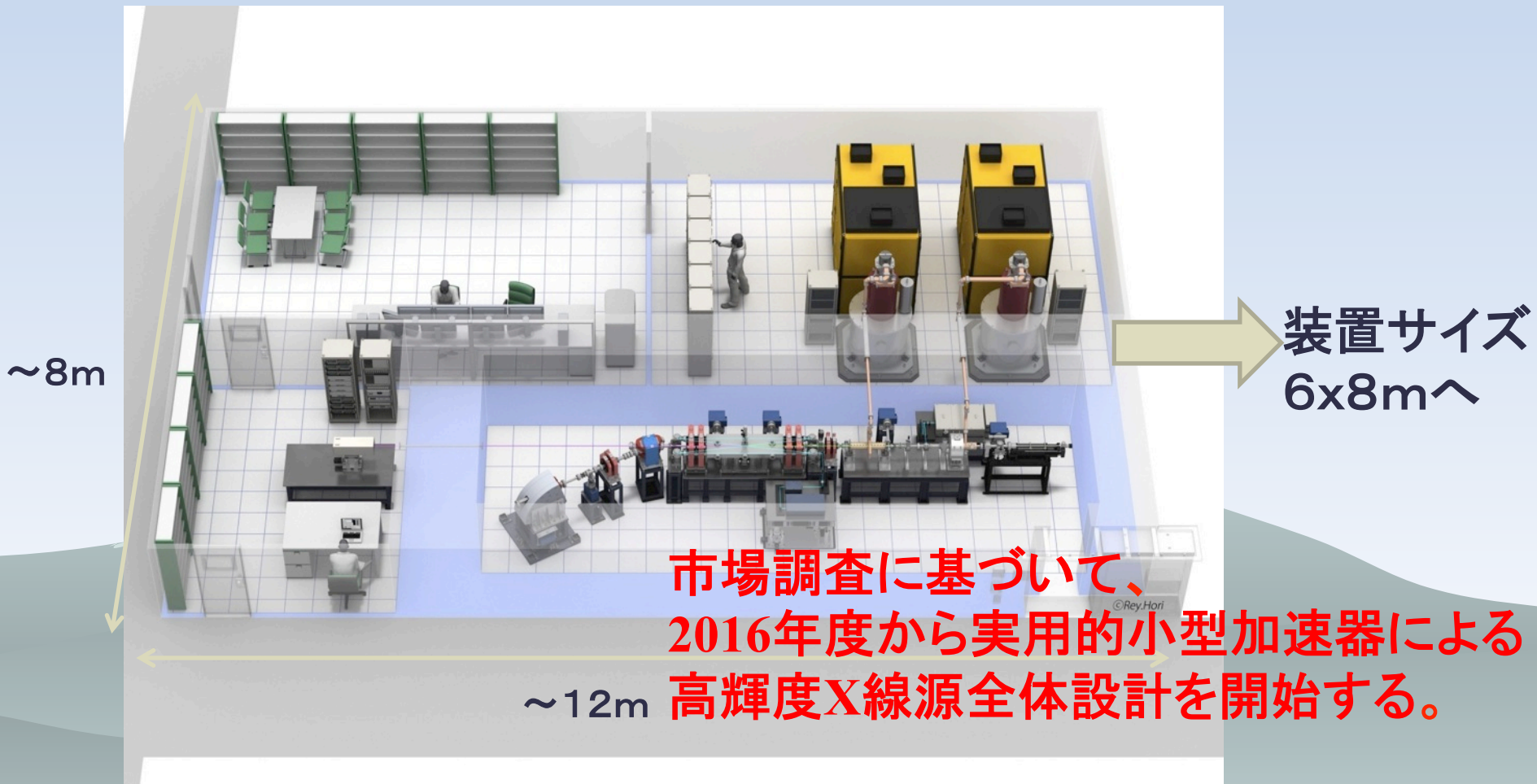
散乱画像



SOI Pixel DetectorによるX-ray Imaging試験結果。



逆コンプトン散乱による高輝度X線発生施設



小型常伝導線形電子加速器による高輝度X線発生装置

2k冷凍から4k冷凍で運転可能な超伝導空洞開発によって小型化を実現(基盤技術開発後に導入)。