

「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」

第16回全体会議

H28年度の業務

LCSの進捗状況

KEK 照沼 信浩

平成28年11月16日 KEK 4号館2階 輪講室1

進捗状況の把握と成果の取りまとめ

- 基本的には、現在の装置・技術を用いてできる、性能・達成状況の見極めを行う。
- その上で、追い込むべき内容に応じて経費を割り当てる。
(その内容はPOと相談して欲しい:量研室)
- H28年度の再委託業務が無い場合、課題開始からH27年度までの成果の取りまとめを行う(ので良いか?年度毎の報告は存在するが、整理したものが必要?)。
- 論文として出版できるものは積極的に投稿を!
- 技術レポートとしての取りまとめなど。
- 取りまとめの全体会議を2回(10月頃と2月頃)KEKで行う。
今までのように機関での持ち回りはしない。

成果の取りまとめについて 追記

- 2月の全体会議後、量研究室からH28年度業務として成果のとりまとめを出すように指示があった。

- H28年度業務計画書(抜粋)

当該年度における成果の目標及び業務の方法

以下の①～⑥を実施するとともに、事業開始時からの成果のとりまとめを行う。

- ① X線生成性能向上のための技術開発及び各要素技術の開発支援
- ② 光高周波電子銃用新マルチアルカリ光カソード及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)
- ③ スポーク型超伝導空洞の開発(再委託先:国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構)
- ④ スポーク型超伝導空洞開発にお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)
- ⑤ 超伝導高周波加速空洞高電界化の新技術の開発
- ⑥ プロジェクトの総合的推進

- 形式は指示されていない。全体会議で話し合ったように「**技術レポート**」的にまとめたい。

報告書の作成について

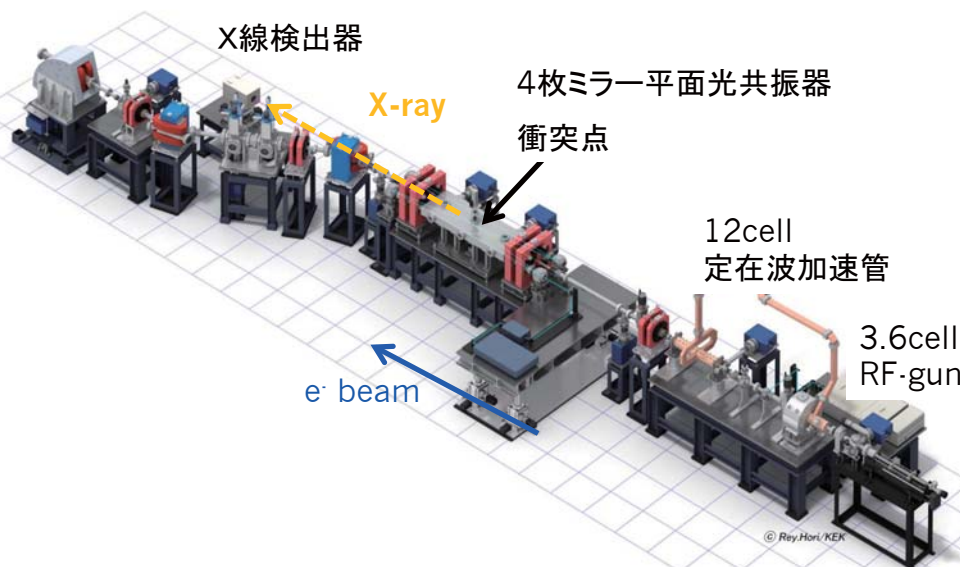
- 「成果の取りまとめ」と「H28年度業務成果報告」は別もの。
- 「H28年度業務成果報告」
 - H28年度の再委託機関のみ
 - 該当年度の計画書に沿った当該年度の成果報告
 - 昨年度は4月末までにKEKへ。取りまとめ後にJSTに提出（締め切り5月末）。例年？JST/文科省の校閲とその修正指示が年内一杯かかる。
- 「成果の取りまとめ」
 - 全機関：事業開始時からの成果のとりまとめ
 - 形式についての指示は今のところない。
 - 「技術レポート」的なものとして話し合っていた経緯がある。
 - 今までの年度報告＋発表論文をベースに、技術の追跡ができるようなもの
 - 印刷製本するのであれば、3月上旬までに原稿をKEKに提出が必須となる。（早いと助かります。）

KEK-LCS関係
昨年度からの進捗状況
(LUCX / cERL)

高輝度LCS-X線生成技術開発

高品質高強度電子ビーム加速技術(LUCX)

おさらい



LUCX電子ビーム

- 常伝導パルス高周波加速
- 24 MeV, バンチ間隔 2.8 ns

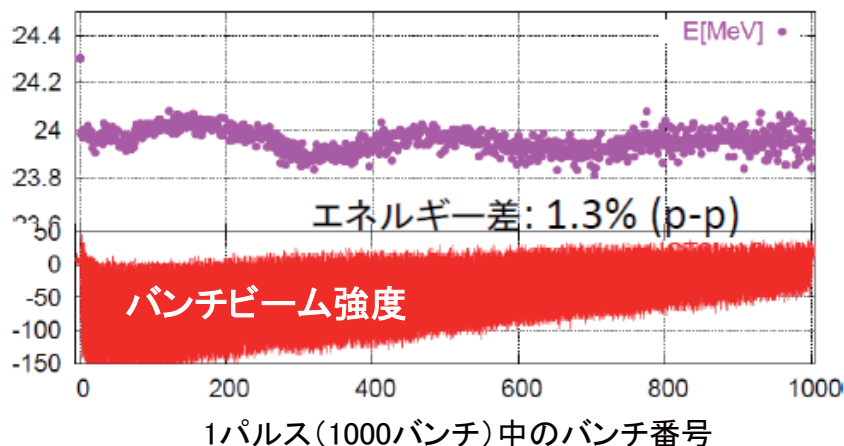
多バンチ・大電流化

- RF制御系の高度化

課題開始時: 150 バンチ, 90 nC

2013年度: 300 バンチ, 380 nC

衝突のエネルギー拡がり条件を満たさない(4%)が、
1000 bunches, 450 nC



2014年度:

RF振幅変調によるエネルギー補正システムを導入

1000 バンチ, 600 nCを達成

電子ビームエネルギー 1.3%(p-p): 要求をほぼ満足

今後、バンチ毎のビーム強度の改善、衝突ビームサイズの絞り込みを追求する。

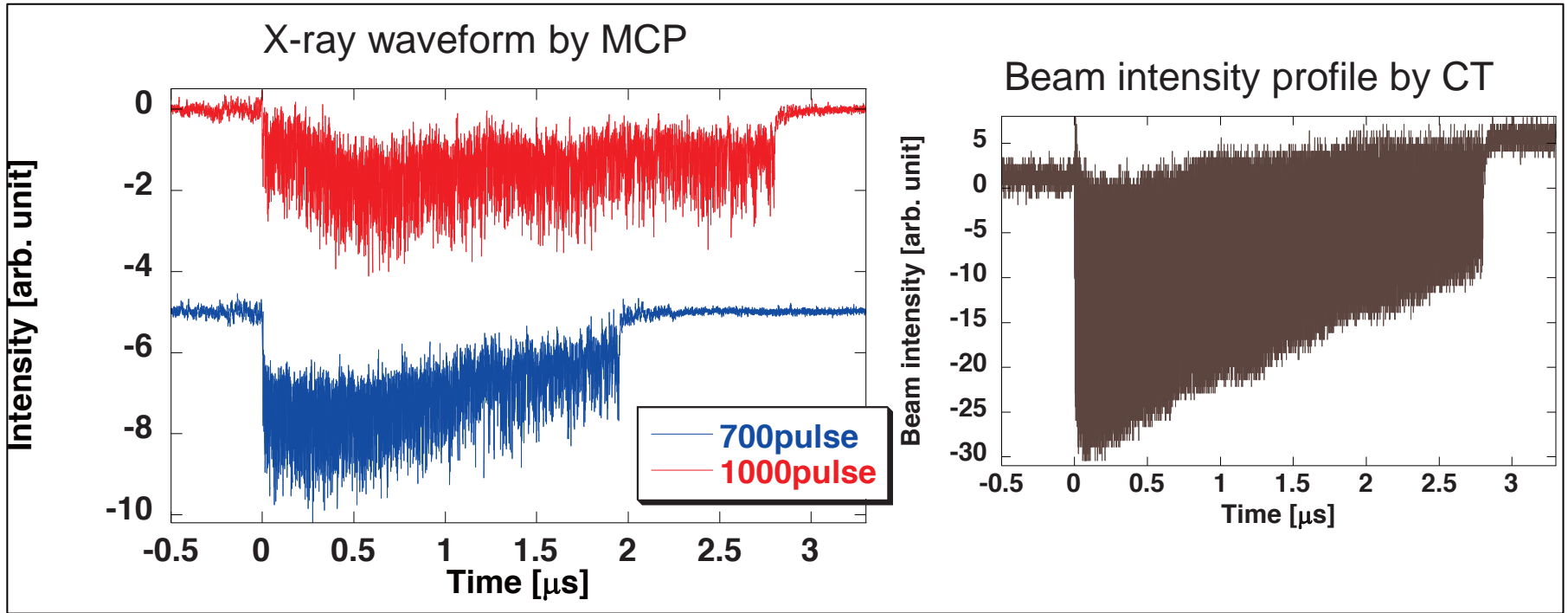
高輝度LCS-X線生成技術開発

電子ビーム・レーザー衝突技術 (LUCX)

おさらい

1000バンチ電子ビームによるX線生成

ポッケルスセルによる
入射レーザー増幅はしていない。

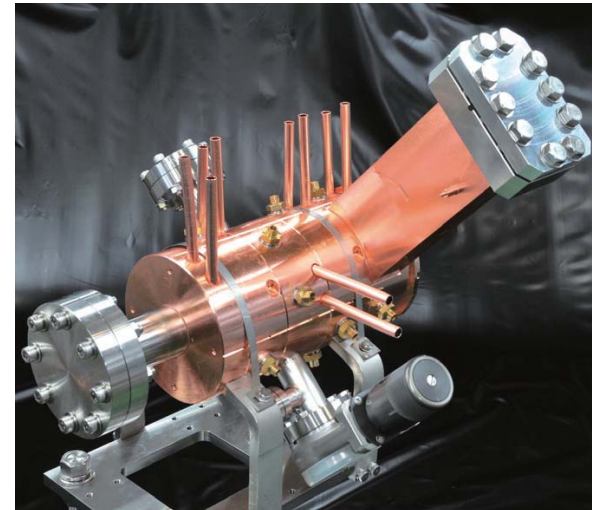
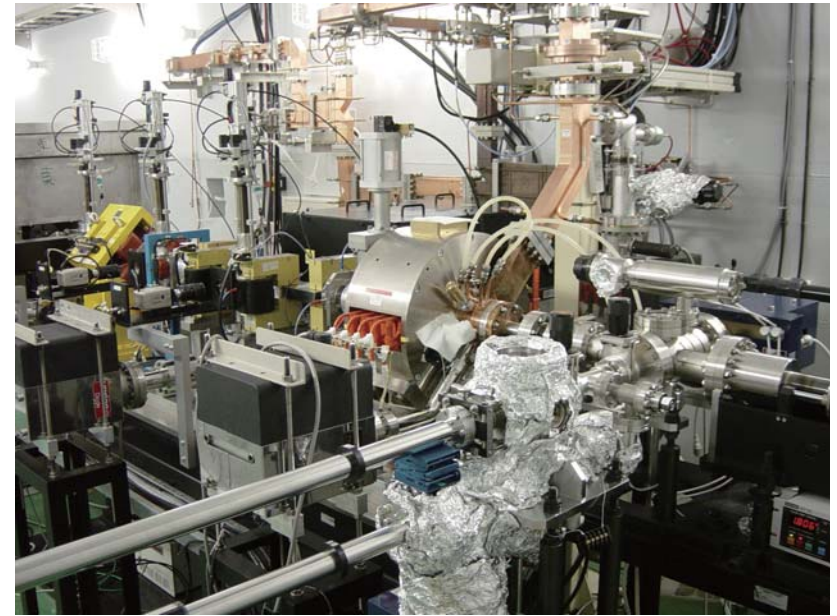
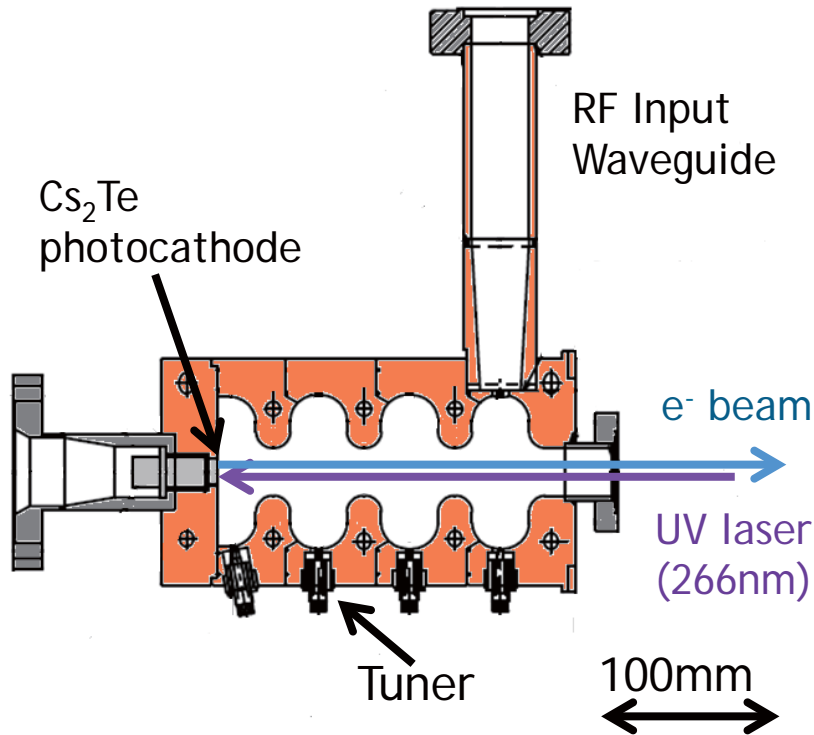


● 1000バンチ全体にわたるX線を確認。

● **衝突最適化が必要**

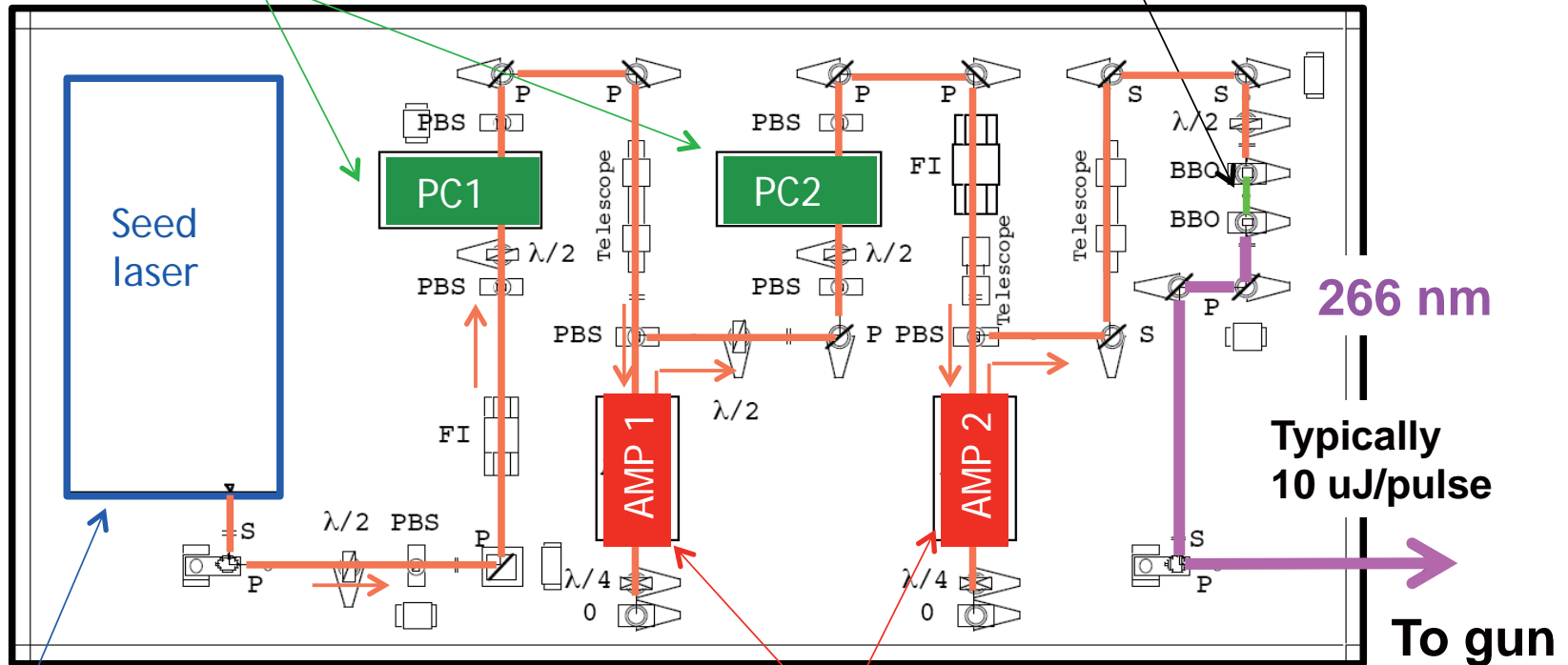
- 700バンチ→1000バンチにしてもあまりX線数が増えない。
- バンチ毎の強度分布が、電子ビームとX線で合わない。

Frequency (π -mode)	2856 MHz
Qvalue	15000
Coupling β	0.99
R/Q	395 Ω
Mode separation (π -2 π /3)	2.8 MHz



Pockels cell(BBO):
Pulse width $\leq 280\text{ns}$ (100bunches)

Fourth Harmonic Generation: Two BBOs,
Conversion efficiency $\sim 25\%$ (IR \rightarrow UV)



TBP, 357MHz mode-locked pulse laser
Nd:YVO₄ (λ :1064 nm, FWHM:9 ps)

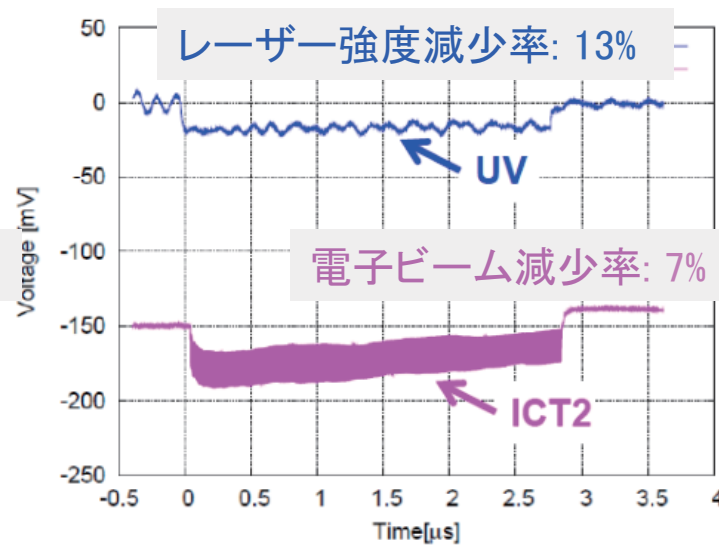
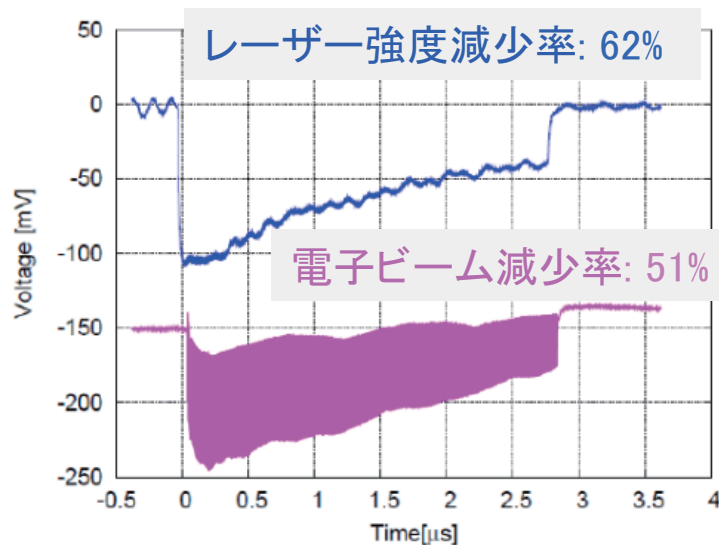
Two amplifier heads
(Continuum, rod: Nd:YAG)
Double pass configuration
Gain ~ 2000

H26年度までのLCS-X線生成

- 1000バンチにわたる電子ビーム強度分布に応じたX線強度分布が得られていない。
- バンチ数に応じて、総X線数が比例して増えていない。

電子ビームとレーザーの衝突が1000バンチに渡りズレている。

- 電子ビームのバンチ電荷の非一様性が問題 → RF電子銃レーザーの一様化
- RF電子銃にRF振幅変調を適用(昨年までは下流に加速管のみ)
- 光カソード用レーザーの増幅システムの改善を実施
 - ✓ 増幅器の出力を下げた、レーザー強度は従来の約半分
 - ✓ 電子銃のフォトカソードの量子効率を倍以上にする必要がある
 現在LUCXで使用しているフォトカソードの量子効率は実績の1/10程度
 十分な改善が見込める。



LUCX電子銃用光カソード(Cs₂Te)の再生

2016/夏までの量子効率(QE): **0.1%以下**(引き出しビームで評価)

2016/8以降: **蒸着装置の見直し、カソード・クリーニング、カソード再蒸着
複数回繰り返し**

現在(2016/10以降)のQE: **0.3%を維持**(通常の設定で評価)。 QEとしての実績には不満だが、とりあえず3倍に改善し、目標は満たした。

この光カソードにより、

電子ビーム**1000バンチ 300 nC → 600 nC**を狙える(これから)

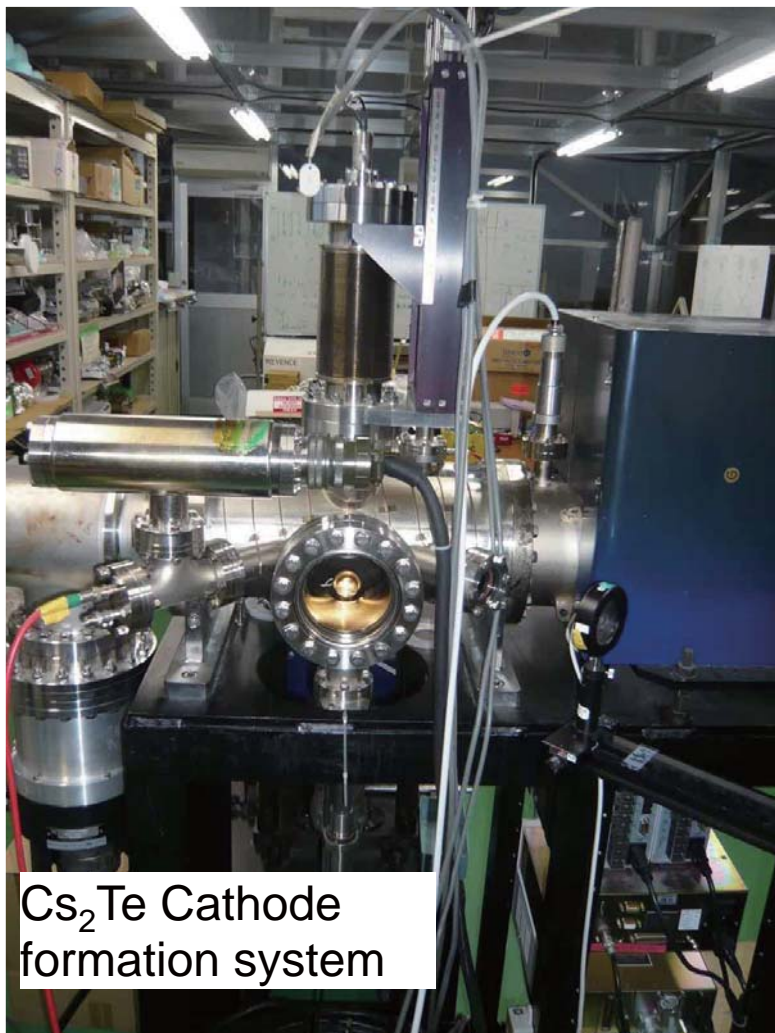
昨年までの実績として、600nCでのBeam loading補償は可能。

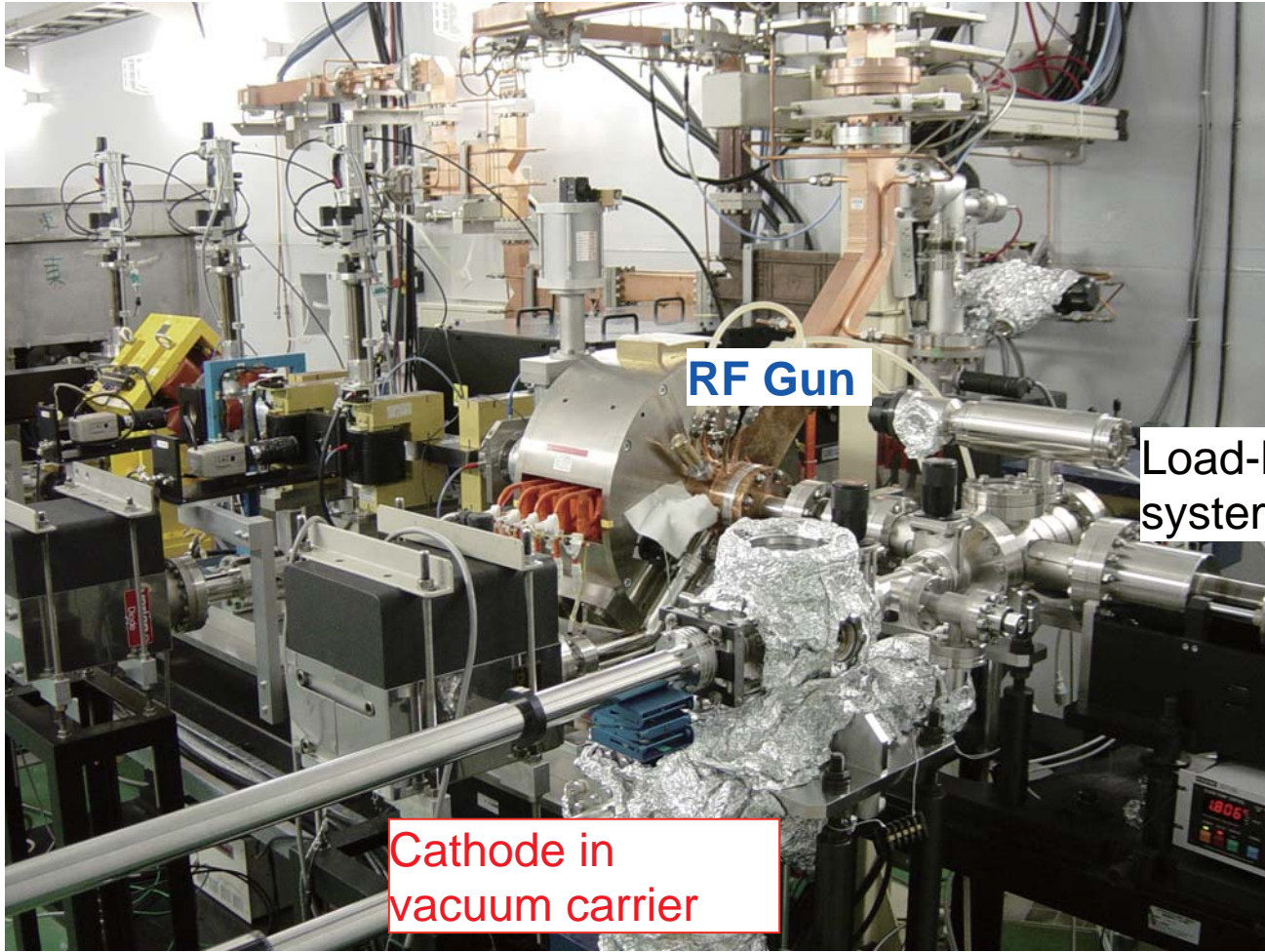
なお、100バンチでの電子銃単独試験で100 nC、バンチあたり1nC出せることを確認。

1000バンチ → 1000 nC

加速できるか？

現有RF系のビームローディング補償能力次第！





RF Gun

Load-lock system

Cathode in vacuum carrier

LUCXの1000バンチ電子ビーム改善(一様化)のめどは付いた。

次は、

衝突させるレーザーの高強度化について

- (1) 光共振器ミラーの耐性
- (2) 入射レーザーと蓄積強度

おさらい

大強度レーザー蓄積技術開発

レーザー蓄積光共振器開発 (LUCX)

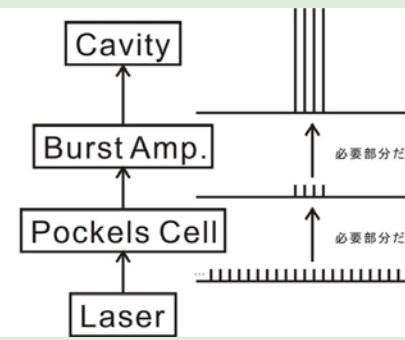
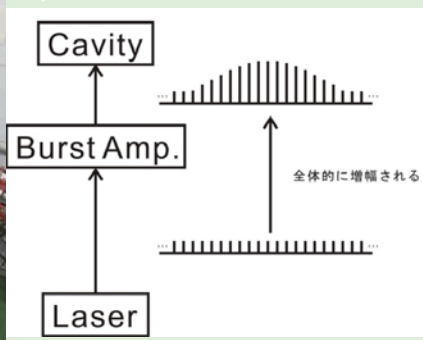
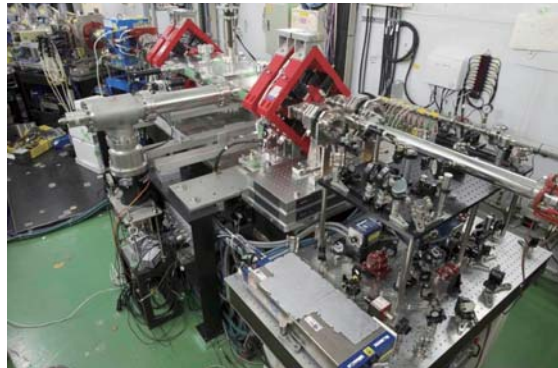
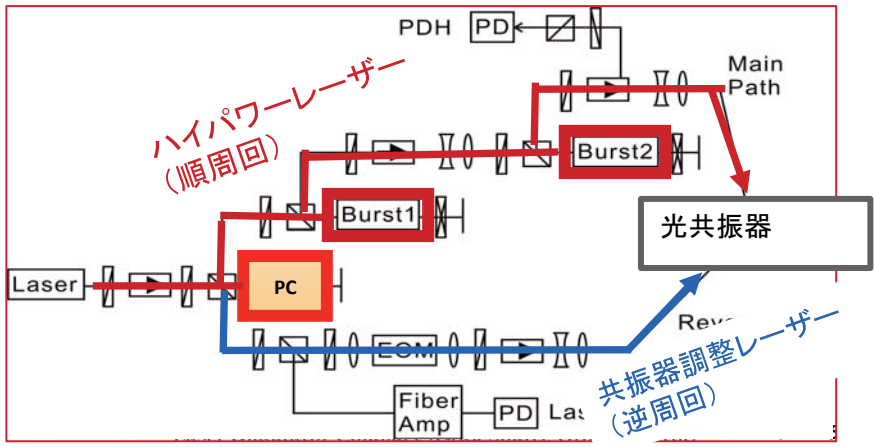
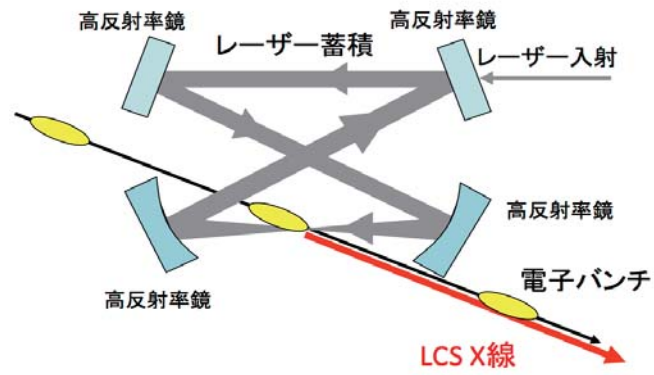
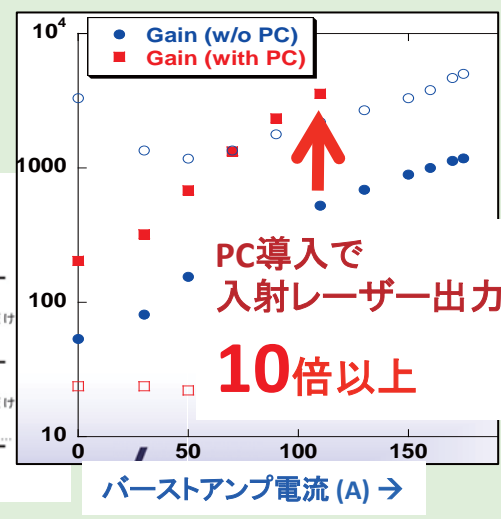
パルスレーザー蓄積の高度化

357 MHz, 10 usec, 繰り返し 3.1 Hz

課題開始時の蓄積レーザーパワー: **100 kW**

- 逆周回フィードバック技術
- バースト増幅
- 光共振器環境の改善(清浄化、振動対策)
- 蓄積レーザーパワー: **300 kW** (2015年)

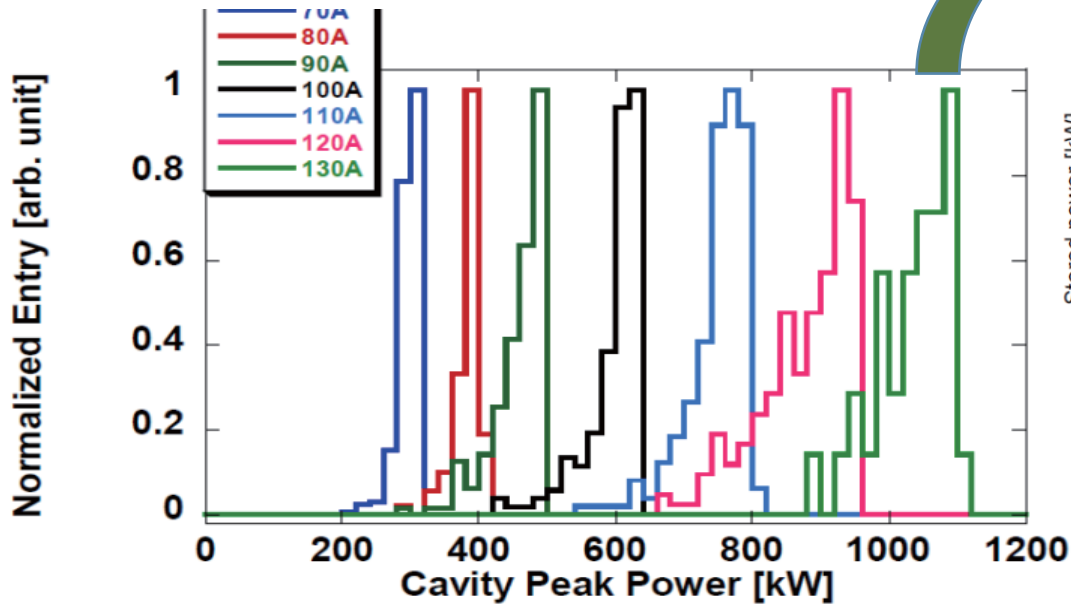
ポッケルスセル導入によるバースト増幅効率化を考案



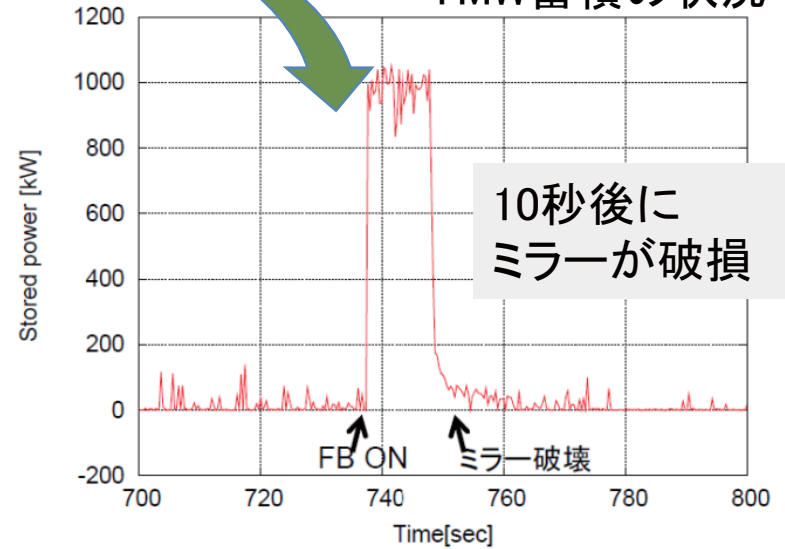
Pockels Cell・レーザー増幅蓄積試験 (H27年9月)

おさらい

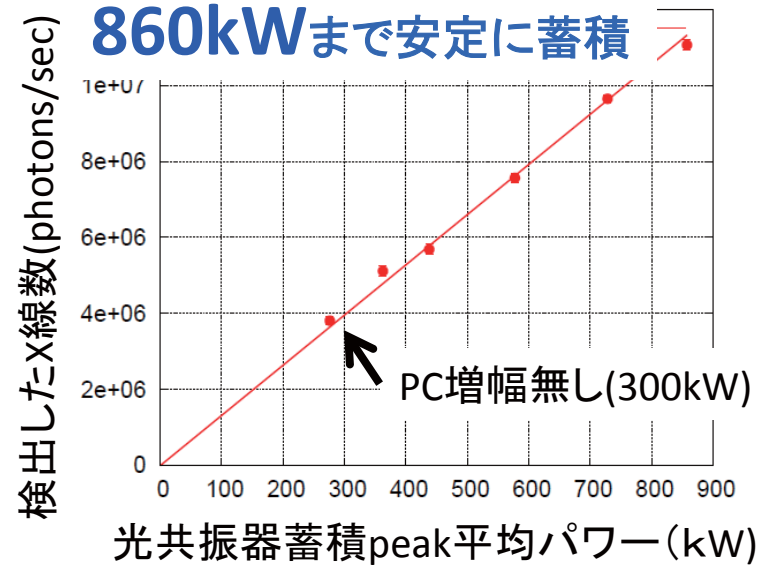
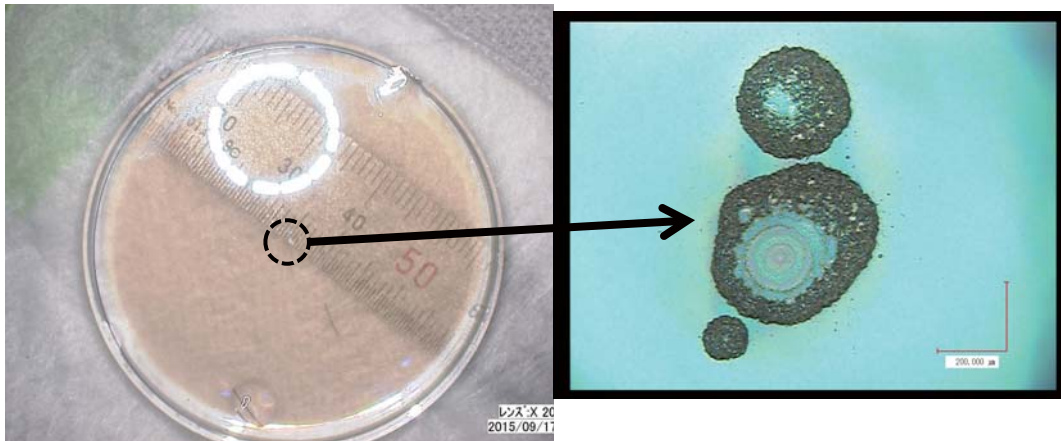
最大 1 MW (peak平均) の蓄積



1 MW蓄積の状況



10秒後に
ミラーが破損

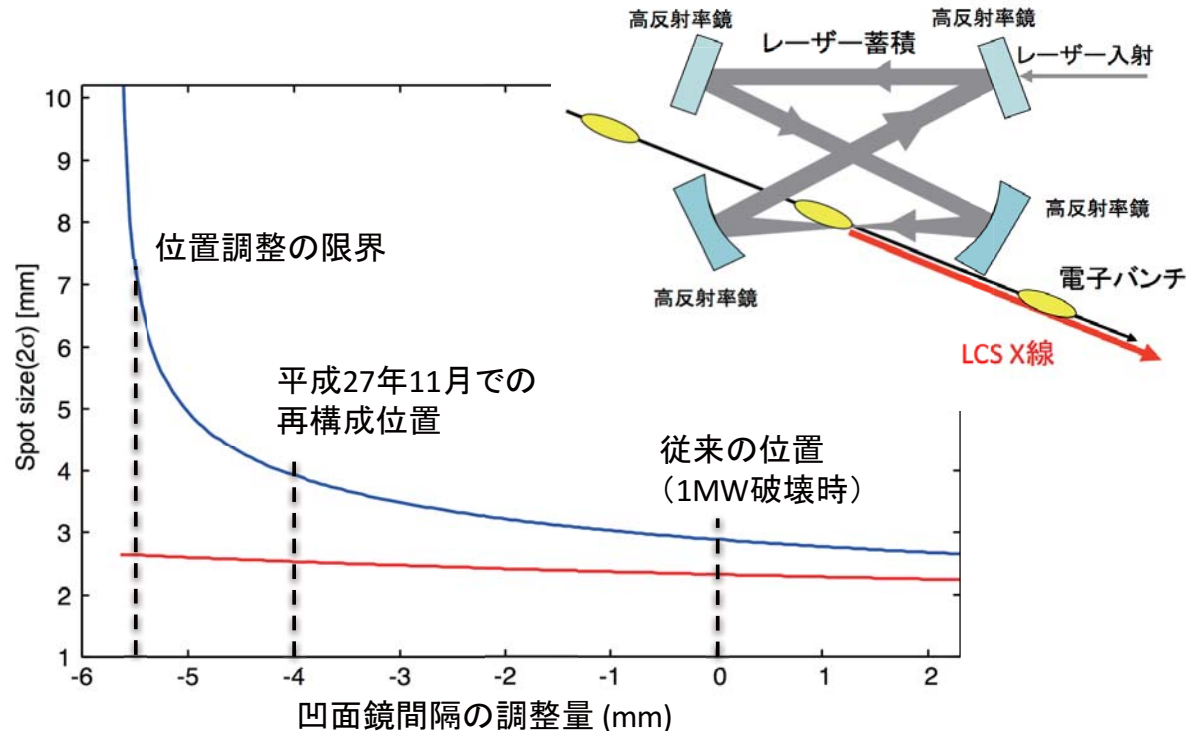
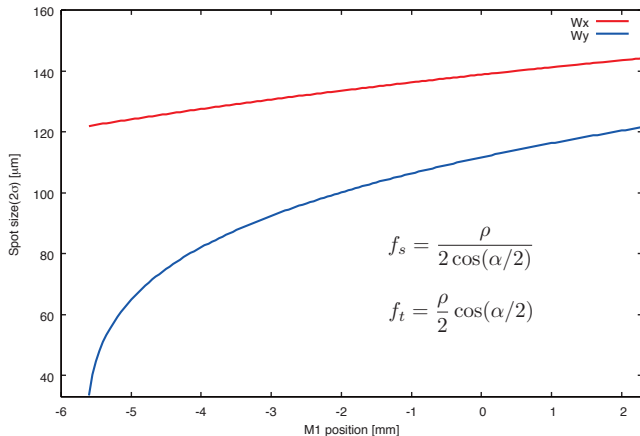


860kWまで安定に蓄積

レーザー蓄積強度を上げるために

- 高反射率ミラーの高度化は、その分野の専門家が取り組んでいる案件であり、我々が進むべきものではない。
- ミラー上のスポットサイズを大きくして、破壊しきい値以下にする
→ 凹面鏡間隔を小さく
結果的に衝突点のスポットサイズを小さくすることになる
✓ 現在の光共振器の限界位置まで追い込む。スポットサイズサイズ2倍 → **2MW程度まで耐える**を狙う

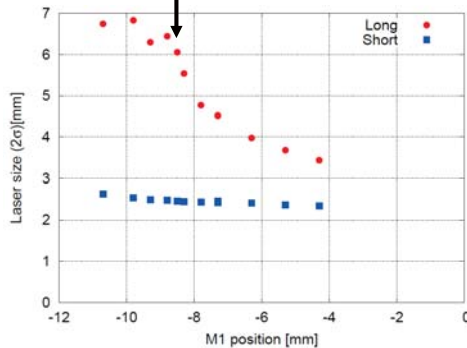
衝突点のレーザーサイズも
凹面鏡間隔とともに減少



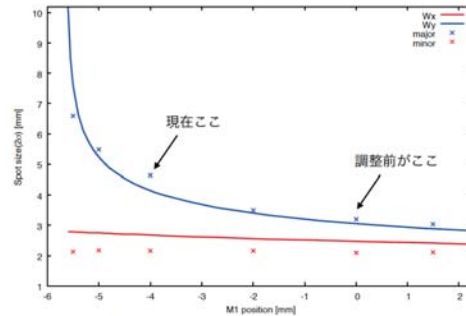
凹面鏡間距離の調整

M1: -9mm付近で、急激にサイズが大きくなり、解なしになるかと思ったが、その後も、共鳴できる状態が続いた。

現在、-8.5mmにセットしている。



縮む ← 凹面鏡間 → 拡がる



← 凹面鏡間隔小

Agaki20151203.pdfより

7

ミラー耐久度(2016)

- レーザースポットサイズの縦横比 1:2の時に、1.3 MW超でミラーを損傷。

この結果から外挿すると、

- 1:2.5の時に → 1.6 MW
- 1:3 → 2 MWまでの耐久度
縦横比は1:3まで広げられる。(入射レーザーのマッチング調整が必要)

レーザー蓄積

- 現在までに、1:2.5の設定で **1.3 MWの安定な蓄積を確認**。
- 使用している入射レーザーの強度はほぼ限界である。アンプ系を調整しても、1.4MW程度が上限と推定。
- 現有の入射レーザーでは、これ以上の高蓄積は確認できないが、スポットサイズ比1:3の設定で衝突点レーザーサイズの改善(小さく)は期待できる。
- (早稲田に再委託していた高強度レーザー開発の組み込みを考えていたが、展開には時間と経費が必要。)

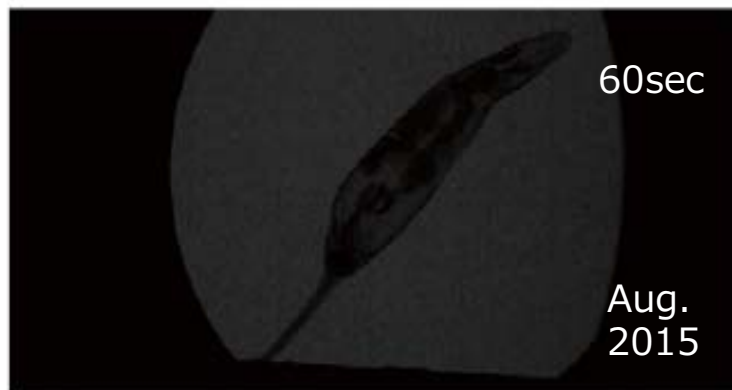
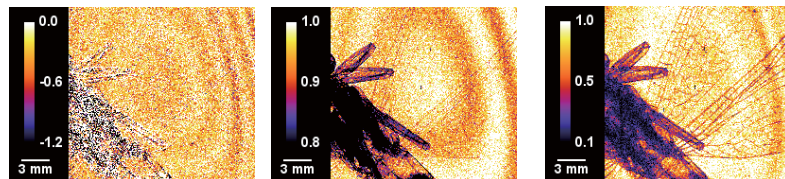
- 先ほどまでのそれぞれ高度化されたパラメータに基づくX線生成試験はこれから行う。
- 本年度、最大強度でのX線試験は以下の様になっている。

X線生成試験(2016年7月)

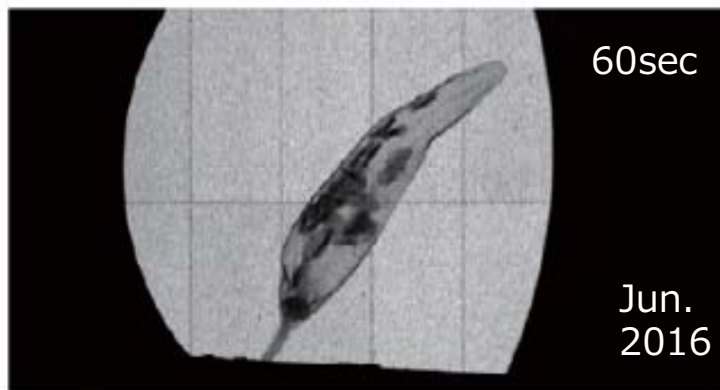
- 電子ビーム平坦化 (ただし、QE改善前の**300nC**/1000バンチ)。 ビーム繰り返しは3Hz。
- ポッケルスセル利用による **1.3MW**レーザー蓄積
- 電子ビームサイズ 60um x 60um
- レーザーサイズ 61um x 46um

昨年8月の**タルボ位相イメージング**試験時と比較すると**6倍のX線を発生**

- 当時のレーザー**300kW**, 電子ビーム**400nC**
- 当時(右)の解析に必要なデータ取得:**5時間**



$N_x: 3.1 \times 10^6$ photons/sec



$N_x: 1.8 \times 10^7$ photons/sec

では、現状でどこまで行けそうか？

2016年7月のX線数(2×10^7 ph/sec)と比較

- 電子ビーム強度: 300nC --> 600nC (2倍。更に上？ beam loading補償次第。)
- レーザー強度: 1.3MW --> 1.4MW (ほぼかわらず)
- 電子ビームサイズ: 60um x 60um --> 45um x 45um (15%増。Beam Optics)
- レーザーサイズ: 61um x 46um --> 50um x 25um (25%増。凹面鏡間距離)

- これらを達成できると、合計で3倍。
- (更に、Feedbackで最大共鳴条件から1/2の共鳴位置に持ってこれれば1.5倍。現在は、1/3の位置に止めている。)

- 電子ビーム強度での**2倍化**追求は直ぐに実施する。その他は補助的、その都度実施したい。
- 現状の装置構成で大きく改善できることは行ったと認識している。あまり重箱の隅を追求することはせずにイメージング試験を実施して成果をまとめる。
- 年度末までに**タルボ試験**を行いたい。(12月はKEKの予定が立たないので年明けに。)

次は、cERLの状況

H28年2月の全体会議後、ビーム電流100 μ A→1mAで1ヶ月運転。

■ H28年3月

電子ビーム900 μ AでLCS-X線生成試験

- タルボ干渉計の立ち上げを試みるも、光共振器の熱膨張によりLCS稼働時間が制限。限られたビーム運転時間内での十分な進展は得られず。時間切れ。
- 今までH28年度のcERL運転は予算の目処が立っていなかった。
- 今月になって、2017/3月に一ヶ月の運転(ビーム期間は2週間ほど?)が認められた。ただし、エネルギー回収モードではないので、LCS実験は成立しない。
- ビーム試験はないので、光共振器の安定化を追求

cERLにおけるLCS-X線生成試験結果

	2015/4/3	2016/3/25
平均電流値 (μA)	57.7	900
バンチ電荷 (pC)	0.35	5.5
規格化エミッタンス 水平/垂直 (mm·mrad)	0.32 / 0.28	2.64 / 1.3
衝突点電子ビームサイズ (σ_x / σ_y) (μm)	24 / 32	17 / 55
衝突点レーザーサイズ (σ_x / σ_y) (μm)	30 / 30	30 / 30
蓄積レーザーパワー (kW)	10.4	6.4
測定X線数 (発生点換算) photons/sec	2.6×10^7	1.6×10^8
予想X線数 (発生点) photons/sec	1.4×10^8	1.1×10^9

予想数の評価にはレーザーパルスジッターは含んでいない。
そもそもcERLの運転時間が足りない。LCS-X線を生成しながら、技術開発を進める十分な時間が取れなかった。

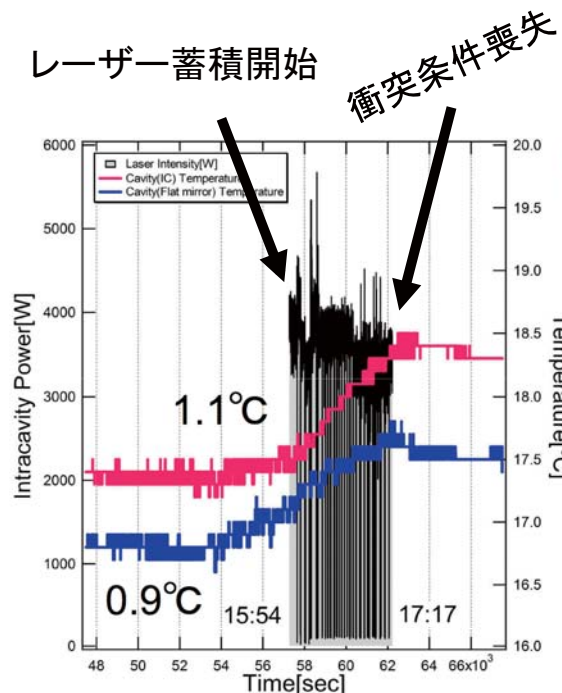
レーザー蓄積光共振器とCW電子ビームとの同期

- レーザー発振周波数
- 光共振器の共振周波数
- CW電子ビーム繰り返し周波数
- 光共振器のミラーをピエゾで駆動、共振器長を維持するようにフィードバック

問題その1

- レーザー熱蓄積で光共振器が伸びる (H28年3月)
 - ピエゾの可動限界(30 μ m)を越える
 - LCS衝突条件を失う

熱除去を考慮した装置設計(真空BOX、共振器ホルダーとの接触)を徹底すべし。



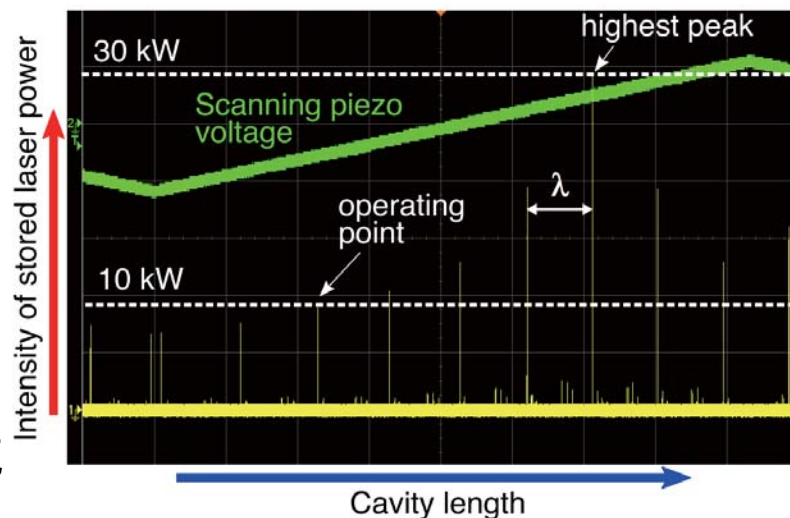
問題その2

蓄積最大の共振ピークに保持できていない(不安定)

共振器ピエゾの応答速度不足が原因か？

→

高速な応答が期待されるAOM(Acoust-Optic Modulator)を用いたフィードバックの可能性を試験。現在、AOM素子単体の応答試験を実施
→ cERL光共振器システムで試験へ



成果報告の状況

論文誌

(1) cERL, (赤木ほか) 今月、Accepted. 掲載準備中。

PHYSICAL REVIEW ACCELERATORS AND BEAMS XX, 000000 (XXXX)



Narrow-band photon beam via laser Compton scattering in an energy recovery linac

T. Akagi,^{1,*} A. Kosuge,¹ S. Araki,¹ R. Hajima,^{3,4} Y. Honda,^{1,2} T. Miyajima,^{1,2} M. Mori,^{3,4}
R. Nagai,^{3,4} N. Nakamura,^{1,2} M. Shimada,^{1,2} T. Shizuma,^{3,4} N. Terunuma,^{1,2} and J. Urakawa¹

¹High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

²SOKENDAI: The Graduate University for Advanced Studies, 1-1, Oho, Tsukuba,
Ibaraki 305-0801, Japan

³Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Tokai, Naka, Ibaraki 319-1195, Japan

⁴National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST), Tokai,
Naka, Ibaraki 319-1106, Japan

(Received 30 June 2016)

(2) 逆周回フィードバック(坂上ほか)
ドラフト回覧中

(3) ポツケルスセル・バースト増幅(坂上ほか)
準備中

国際会議(KEKとりまとめ分)

- IPAC16(釜山) 5月
- SFR2016 (Russia) 7月
- ALD2016 (Iceland) 7月
- ICXRL 2016 (奈良) 8月
- Channeling 2016 (Italy) 9月
- LINAC16 (US) 9月
- NA-PAC 2016 (US) 9月