

LASER STACKING CAVITY DEVELOPMENT FOR QUANTUM BEAM STF COLLISION EXPERIMENT*

Hiroataka Shimizu[#], Alexander Aryshev, Yasuo Higashi, Yosuke Honda, Junji Urakawa
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

According to the plan of “Quantum Beam Technology Program”, a new beam line using superconducting RF cavity accelerating system is constructed in STF accelerator facility. To obtain quasi-monochromatic X-ray via inverse Compton scattering, highly intensified laser beam is also needed. We are now preparing our laser system to install into the new beam line for autumn run. In this report, we explain the detailed part of our external optical cavity construction, and also, describe R&D situations about pulsed laser stacking experiment, and hardware preparation.

量子ビーム STF 衝突実験におけるレーザー蓄積装置の開発

1. はじめに

量子ビーム基盤技術開発プログラムでは、「超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発」として超伝導高周波加速器技術とレーザーパルス蓄積技術の融合によって、従来に比べ著しくダウンサイジングを図った高輝度 X 線発生装置の開発研究を行っている^[1]。

これは KEK-STF 棟内に建設された、L-band 9-cell の超伝導加速空洞を含む直線型電子加速器で 40MeV にまで加速された電子ビームと、laser 蓄積装置 (laser cavity) 内で高強度化された laser pulse とを正面衝突させる事により、数十 keV 程度の軟 X 線を毎秒 10^{10} 個(10% Bandwidth)程度生成する事を目標とした実験である^[2]。

既に良く知られている様に、電子と laser との Compton 散乱による γ 線 (X 線) 生成実験では、用いる laser の強度を高める為に、複数の高反射率鏡によって構成される外部光共振器が導入される^[3]。これは laser のコヒーレンス性を利用し、共振器を構成する鏡の位置 (共振器長さ) を精度良くコントロールする事で、順次供給される位相の揃った光を加算的に重ね合わせる技術であり、これによって共振器内部の laser の強度を 3 桁程度も引き上げる事が可能となる。より高増倍率・高安定な laser 蓄積装置を実現するために、現在我々は平面状に 4 枚の鏡を配置した共振器の作成に取り組んでいるが、これまでの光共振器を使った電子線と laser との衝突実験に比べて、生成される X 線量を増加させるべく衝突角度を 0 度にした正面衝突の実現や、共振器を構成する各鏡をそれぞれ独立にアクチュエータで制御を行う方式を取り入れる等の特徴がある。また、単に高反射率の鏡を「使う」だけではなく、平面状の共振器に特有の収差の影響を取り除くために、最適な形状の鏡の「自作化」にも取り組んでいる。こ

の報告では laser 蓄積装置の開発状況について詳しく報告する。

2. 共振器設計の基本方針について

最初に STF 衝突実験に用いる外部光共振器の設計方針について説明する。先にも述べた様に、KEK-ATF DR や小型電子加速器において、2 枚の高反射鏡を使った、合わせ鏡型の光共振器を使った γ 線 (X 線) 生成実験が行われ、その有用性が既に示されていた^[4]。

これらの実験では、既存の電子線の beam line に対して外部光共振器を設置する際、共振器を構成する鏡と電子線との干渉を避ける為に、有限の衝突角度 (1-inch の鏡を使った場合で約 10 度) を持った設計に成らざるを得なかった。しかし STF での実験では、beam line の建設が同時に行われた為、衝突点にシケインを導入した lattice を提案する事で、laser との正面衝突を行う事が可能となった。

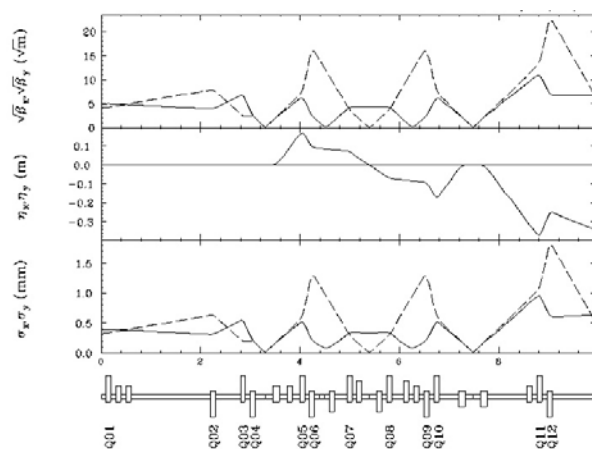


図 1 : STF beam line の設計

図 1 に、シケインを含む STF beam line の SAD での計算結果を示す。第一偏向電磁石手前に位置する擬似衝突点とシケイン中央の衝突点において、電子ビームを $\sigma = 10\mu\text{m}$ 程度に絞る事が出来る。衝突角度

*Work supported by Quantum Beam Technology Program of MEXT, Japan

[#]hirotaka@post.kek.jp

を0度とする事により、生成される線量を一桁程度引き上げる事が可能となる(10度衝突との比較)。この事から、光共振器の大きさとして、シケイン部分を包括出来る事が求められる。

上の SAD の計算に従って実際に各電磁石を配置した場合、シケインを構成する偏向電磁石を囲い込む様に置かれた凹面鏡間隔は、最低でも約1m程度となる。先に述べた様に、既に実験的に実績のある2枚鏡共振器を仮定した場合について、共振器の安定性について考える。長さの他に共振器が満たすべき条件としては、STF 加速器の RF によって定められる laser の繰り返し周波数 162.5MHz を満たす事と、衝突点での laser size が $\sigma=20\mu\text{m}$ となる事とする。以上の仮定から、凹面鏡間隔が 922.44mm で、凹面鏡の曲率半径を 461.28mm とした場合に waist size が 20 μm となり、現実的な検討の対象となる model である事がわかる。

通常共振器構造を考える際には、凹面鏡を凸レンズとして扱い、thin lens 近似を施した model を用いて光学系を展開し、周期的境界条件を課す事で laser の発展の様子を追う。Laser の伝搬の様子は所謂 ABCD 行列を使って記述されるが、各光学素子のミスアライメントまでを含めた評価を行う場合、3行3列に拡張した ABCD 行列を使う事になる。この拡張された ABCD 行列の手法を使い、例えば一端の凹面鏡に 100 μm 程度の位置ずれを与えてなお共鳴状態を維持しようとした場合、鏡面上での laser の位置が 30cm 以上移動してしまう事になり、現実的な大きさの鏡(例えば 2-inch 程度)では全く補足出来ない事がわかる。

上に示した model では、到達出来る waist size を小さくする為に、concentric 型の共振器を考えたが、head-on 衝突を前提とした STF 実験には、この様な従来型の2枚鏡共振器を用いる事は、安定性の面から現実的では無いと考えられる。この安定性の問題の解決策としては、confocal 型の共振器への移行が挙げられる。同時に、小さな waist size の達成の条件を満たす為には、例えば平面鏡2枚と凹面鏡2枚とを使った、4枚の鏡からなる confocal 型の共振器を使う事が考えられる^[5]。実際に次章で示す様に、4枚鏡型の共振器の場合についても、鏡にミスアライメントを与えて同様の評価を行うと、非常に耐久性に優れている事がわかる。この事から、我々は STF での衝突実験用の外部光共振器として、4枚鏡型の形状を採用する事とした。一般に3枚より多い鏡を使って共振器を構成する場合、各鏡の配置の仕方が空間的な自由度を持つ事になるが、この点に関して我々は、ビームラインに対するアライメントのし易さを優先的に考え、光共振器を構成する全ての鏡を同一平面上に配置する、2次元4枚鏡光共振器を開発する事とした。

3. STF 実験用共振器の設計

ここでは実際に STF での衝突実験に用いる外部光共振器について詳しく述べる。

外部光共振器の周長に関しては、加速器側からの

162.5MHz の繰り返し周波数による制限があるため、bunch-by-bunch での衝突を行うには 1844.88mm、若しくはその整数倍の長さになる必要がある。凹面鏡間隔を約1mと考え、平面鏡間隔や凹面-平面鏡の間隔がほぼ同じである様な素朴な model を考えると、全周長としては最低でも4m弱必要となるので、我々は基本繰り返し長の2倍にあたる、3689.75mm の共振器を作る事とした。これは光共振器内を二つの laser pulse が循環する形状になっている。

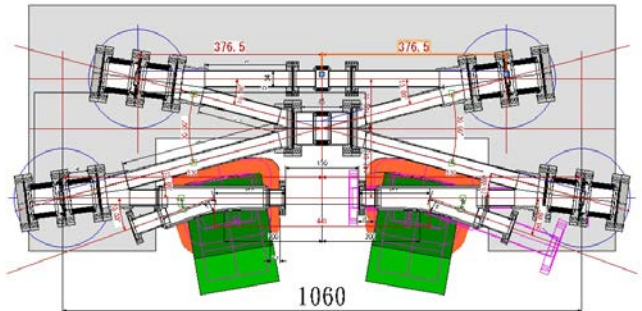


図2：STF 実験用光共振器の形状

図2に外部光共振器を含む衝突点付近の top-view を示す。シケインを構成する偏向電磁石とその直前に置かれた収束用の四極電磁石の間のスペースを使って共振器を構成する鏡を配置しなければならない事や、ビームパイプとの干渉の問題を考慮して、上底が753mm、下底が1060mmの台形型に各鏡を配置する事とした。各鏡の間は単管で接続され、真空状態になった光路を laser が伝搬していく。

ここまでの検討から、各鏡の配置までが決まったので、次に凹面鏡に求められる曲率半径を決定する。

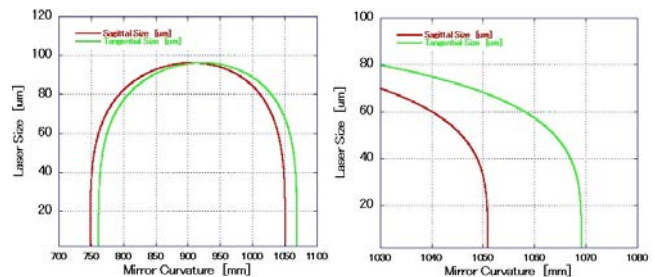


図3：凹面鏡の曲率半径の変化と到達 laser size [um]

図3に凹面-凹面間距離を1060mmに固定した場合、凹面鏡の曲率半径を変えた時に到達出来る laser の waist size (σ) をプロットしたものを載せる。左は広い範囲のプロットで、右は confocal 型の共振器を考えた場合に興味がある領域を拡大したものである。Sagittal と Tangential のそれぞれの曲線と横軸とで囲まれる部分が共振器として安定な解がある領域を示している。つまり両方の安定領域を示す部分の重なった箇所のみが共振器として意味のある領域を示している。図3の右側の場合、縦軸・横軸及び赤線と囲まれた部分についてのみ考えれば良い。

今、目標として20 μm の waist size を実現する事を考える。Sagittal 方向の laser size の変化を表す曲線

は、30um より小さい領域ではほぼ垂直に変化しており、鏡の曲率の製作精度に対する制限が厳しい事がわかる。またこの場合、凹面鏡の曲率半径の自由度を使って調整出来るのは Sagittal 方向の laser size のみであり、もう一方の Tangential 方向の size に関しては、目標値の3倍以上である 70um 程度までしか到達出来ない事がわかる。

ここでは二つの凹面鏡が同じ制作過程を経て作られるため、ほぼ同じ曲率半径を持つと仮定して計算を進めたが、左右の凹面鏡の曲率を変えて鏡を作成する場合、単一の曲率半径で作成する場合の倍以上の費用がかかるため現実的では無いと思われる。つまり曲率半径と言う一つの free parameter しか手元に無いため、Sagittal 方向と Tangential 方向と言う独立な2つの laser size を同時に制御する事が出来ない事を意味している。一方、先の SAD での計算に依ると、衝突点での電子ビームの大きさは縦横共に 10um 程度に絞れる事が示されており、円形の profile が期待されている。Head-on 衝突を考える今回の様な場合、楕円状に広がった laser の profile では、長軸方向に衝突に寄与出来ない光子が分布する為、衝突の輝度が明らかに落ちる。到達目標を $\sigma=20\text{um}$ と仮定した場合、長軸側の分布を如何に小さく纏めるかが収量の増大に重要な意味を持つ。

この問題は平面状に広がった共振器を組んだ際に生じる非点収差の影響を受けたもので、一般に良く知られている。そこで我々はこの問題を回避して、衝突点での laser profile を円形に近付ける為に、別途 free parameter を用意する事で、収差に対する補正を行う事にした。具体的には光共振器を構成している2枚の平面鏡に対し、Sagittal 方向にのみ曲率を持たせ、シリンドリカルな形状に変形させた状態で共振器に組み込む。この曲率半径を調節する自由度を使って、衝突点での laser size を整える事を考える。

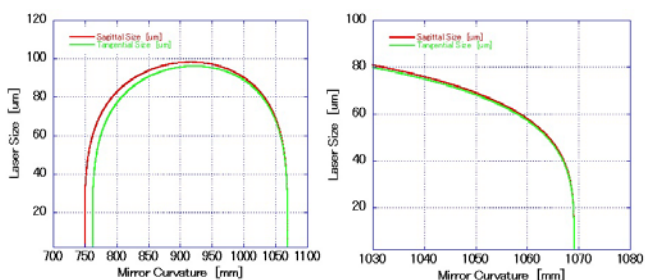


図4:凹面鏡の曲率半径の変化と到達 laser size [um]

図4のプロットは、2枚の平面鏡に Sagittal 方向にだけ、64080mm の曲率を持たせた場合の、凹面鏡の曲率の変化と到達出来る waist size の変化の様子である。平面鏡をそのまま用いた図3の場合と比べて、Sagittal 方向の laser size の変化の様子が変わっている事がわかる。即ち、今興味がある confocal 型共振器を構成出来る曲率半径の領域で、Sagittal 方向の laser size の変化と Tangential 方向の laser size の変化の様子をほぼ一致させる事が出来ている。つまり平面鏡側に曲率半径として新たに持たせた自由度を使って、まず Sagittal・Tangential 両方向の laser の発

展を揃える事が出来た事がわかる。後は先程の手順と同じ様に、求める 20um の waist size を与えるような凹面鏡の曲率を選び出せば良い。以上の手続きを踏む事で、我々の光共振器の構築に必要な鏡として、曲率 1068.93mm の凹面鏡と、曲率 64080mm のシリンドリカル鏡を作成する事にした。以上の事は、実は平面鏡を使ったままでも、球面状の凹面鏡を使わず、楕円状に磨かれた凹面鏡を用いる事で達成する事が出来る事がわかる。しかし長軸・短軸の区別を持たせた凹面鏡の作成がやはり高価である事に対し、60m を越えるような浅い曲率の鏡の場合、曲げ器を工夫する事で自作出来る可能性が高かった事から、我々はシリンドリカル鏡を使う方法を選択した。

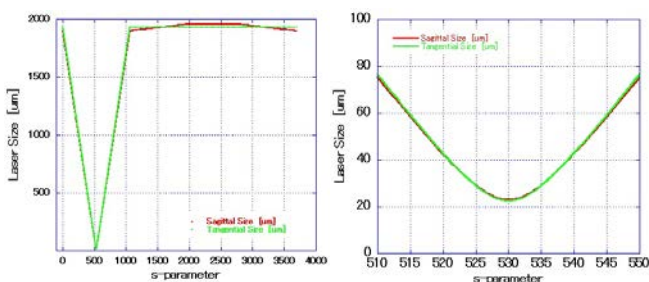


図5:共振器内での laser size の変化

図5に示したのは、上で定めた曲率の各鏡を用いて光共振器を組んだ場合の、共振器内部での laser size (σ) の発展の様子を示したものである。一方の凹面鏡の位置を原点として、各点での laser size をプロットしてある。凹面-凹面鏡間隔 1060mm に対応して、530mm の位置で確かに profile が最少になっており、Sagittal・Tangential 共に約 20um の値になっている事がわかる。

ここまでの検討で、共振器を記述する為に必要な parameter が全て決まったので、この STF 実験用に設計された共振器の安定性を評価する。やはりここでも凹面鏡に 100um の位置ずれをわざと与えた場合に、laser 位置がどれぐらい変化を受けるかを先程と同じ ABCD 行列の手法を用いて評価する。今の場合、共振器の共鳴状態の維持を要求しても、laser の凹面鏡上での位置は、位置ずれが無かった時と比べ、200um 程度のずれで収まっている事が計算から示される。鏡面上での laser size が約 2mm である事から、約 10% 程度の位置ずれが生じるだけであり、現実的な大きさの鏡(実際の実験で使用する鏡は $\phi 30\text{mm}$)で充分カバー出来る量の変位である事がわかる。この事から、我々が設計した平面型4枚鏡光共振器は、目標とした衝突点での laser size の 20um を達成し、かつ非常に安定な構造を実現している事が示された。

4. 実験準備状況について

ここでは実際の実験準備状況について報告する。

まず今回の光共振器設計において最も重要な役割を占めるシリンドリカル鏡の開発状況について説明する。幾つかの自作の曲げ器の試作器と市販の 45 度反射鏡を用いて R&D を行った後、曲げ器からの

力が均一に加わる様に、正方形型の平面鏡を購入する事にした。図6に、実際に曲げ器で自作したシリンドリカル形状鏡の曲率測定の結果の一部を載せる。

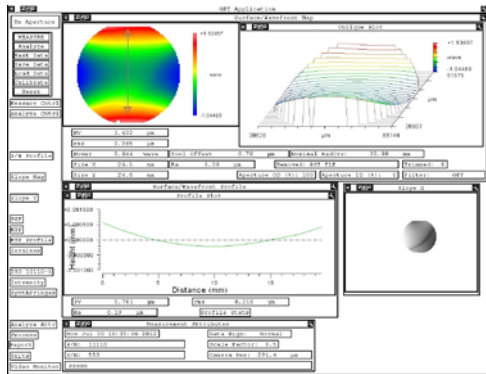


図6：Zygo 干渉計を使った曲率測定の結果

測定の結果、有効面積として約 20mm^2 の領域で、設計値(今回は試験的に 64300mm を狙った)の曲率半径が達成されている事がわかった。今後更に曲率に微調整を加えた後、真空封じ切り用に使う mirror holder にマウントし、laser 蓄積実験に移行する予定である。

STF 実験で用いる光共振器は、約 1t の重量を持つ石定盤上に設置される。従来の光共振器を用いた衝突実験では、駆動式の mover table の上に光共振器が設置され、table ごと衝突点の位置を微調する事で最適な位置に laser waist を移動させていた。今回我々が開発する光共振器のユニークな点の一つが、従来型の mover table を導入する事無く、電子ビームとの最適な衝突位置を探す機構を組み入れている点である。実装としては、光共振器を構成している4枚の鏡それぞれに対し、平行移動2軸、上下動1軸、角度あおり2自由度の合計5自由度の駆動能力を持つアクチュエータ群を用意し、その上にマウントしている。各鏡は真空中に置かれているが、全てのアクチュエータは大気側に置かれており、bellow を介して可動式になっている mirror holder を大気側から動かす事で鏡の位置を制御する方式をとっている。

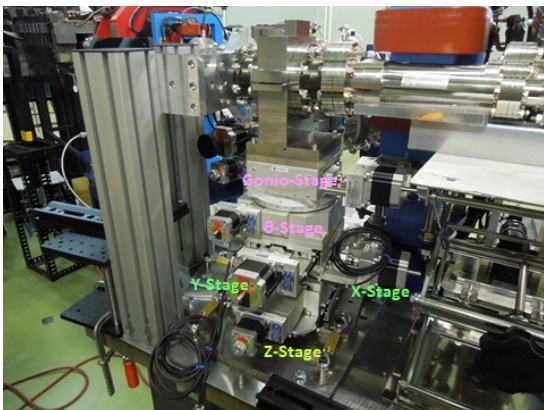


図7：アクチュエータ群の実装例

図7に STF 加速器に組み込まれた状態のアクチュエータ群の実装の写真を載せる。下から順に高さ方向を制御する z-stage、水平面内を scan する為の xy-stage、角度あおり調整用の θ -stage と Gonio-stage が組み上げられており、Gonio-stage の上に mirror holder が位置している。Mirror holder の前後は bellow によって光共振器本体又は viewport に繋がれており、mirror holder 部分のみが bellow の伸縮の範囲内で自由に動ける構造となっている。

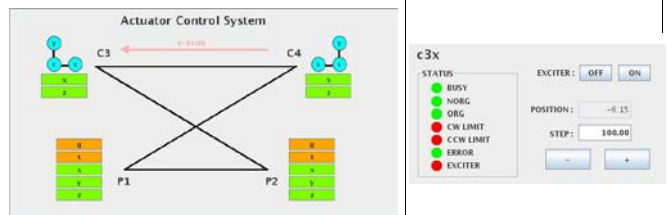


図8：アクチュエータのコントロールパネル例

全てのアクチュエータは STF 制御室にある制御端末から操作出来る。図8左側のコントロールシステム図の中から、制御したいアクチュエータに該当する箇所を選ぶと、個々のモーターの実際の移動量を制御する個別のパネルが表示される。図8右側は例として下流側凹面鏡(C3)の x-stage の動きを制御するパネルを開いたところである。動作試験を行った結果、各ステージで約 $1\mu\text{m}$ 程度のバックラッシュが存在するが、マイクロステップ方式による動作制御により、数百 nm 刻みの移動量が達成されており、求められる動作精度は十分に満たしている事がわかった。



図9：全てのアクチュエータを配置した状態

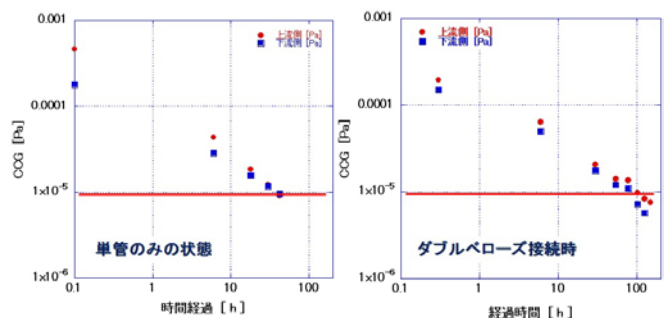


図10：Beam Line に繋ぎ込み後の真空度の推移

図9に全てのアクチュエータを所定の場所に配置した状態の外部光共振器の様子を示す。各アクチュエータが実際に干渉無く予定の箇所に設置出来る事を確認した。また加速器との同期用のピエゾアクチュエータ及び一部の高反射率鏡をマウントした状態での真空引き試験も行った。図10に結果を示す。図10の左側のプロットは、光共振器の光路を形成している単管に直接 blank flange を固定した時の真空引きの様子で、右側が光共振器をほぼ本番に近い状態にした際の真空引きの様子である。単管のみの場合、イオンポンプを立ち上げてから2日後程度で加速器運転可能な目安となる 10^{-5} Pa に到達しているが、mirror holder 等を取り付けた本番に近い状態では、4日程度の時間を要する事がわかった。

実験を経て、秋のX線生成実験に移る予定である。

参考文献

- [1] <http://kocbeam.kek.jp>
- [2] 高輝度光子ビーム源開発室ニュース vol.8
- [3] T.Akagi, et al., PASJ2012 Proceedings
- [4] S.Miyoshi, et al., Proceedings of TIPP09
- [5] N.Delerue, et al., Proceedings of IPAC2011

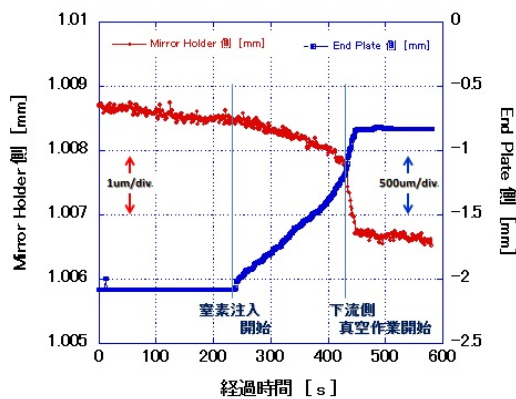


図11 : Mirror holder 安定性試験

本番に近い状態の光共振器を導入した真空引き作業に合わせて、アクチュエータ群によって保持された mirror holder がどの程度安定であるかを測るテストを行った。真空引き後、mirror holder 部と、bellow を介して繋がっている view port 部分にそれぞれレーザー変位計を取り付け、パージ時の室素注入に合わせて位置の変化を記録した。図11にその結果を示す。図中、赤線が mirror holder 側をモニタした記録、青線が view port 側の変位をモニタした記録である。室素注入開始時から、view port 側は約 1mm 程度移動しているのに比べて、mirror holder 側の変化量は約 1/1000 の 1 μ m 程度に収まっている事がわかる。この測定はパージ時に行ったもので、室素の注入による内部気圧の変化は非常に早い速度で起こっている。しかし実際に問題になると考えられるのは、各鏡位置の調整後、真空引きを行った際に共鳴状態がどの様に崩れていくか、若しくは影響を受けるかであった。しかしこの安定性試験の結果から、真空引きによる内部気圧の減少が非常にゆっくりと起こる事を考え合わせると、正しい共鳴状態に近い状態に光共振器を維持したまま衝突実験が可能な真空度に移行する事は充分可能であると思われる。

現在 test bench で試作共振器を使った laser の蓄積実験を繰り返し行っており、今後順次本番に近い実験装置での蓄積実験に移行していく予定である。最終的には STF トンネル内の石定盤上での laser 蓄積