

DEVELOPMENT OF CO₂ LASER STORAGE CAVITY FOR LASER-COMPTON SCATTERING X-RAY SOURCES*

Kazuyuki Sakaue^{† A)}, Akira Endo^{A)}, Yukihiya Yokoyama^{A)}, Masakazu Washio^{A)},

^{A)}Research Institute for Science and Engineering, Waseda University (RISE)

3-4-1, Okubo, Shinjuku, Tokyo, 169-8555

Abstract

We have been developing a laser-Compton X-ray source using laser enhancement super-cavity. Basic characteristics of classical laser-Compton scattering are reviewed, and as a result, there are many advantages using long wavelength CO₂ laser if the target X-ray energy is relatively low. Thus we started to develop a CO₂ laser enhancement super-cavity to achieve kHz-MHz interaction laser-Compton source. We found more than 600 enhancement cavity can be achieved using commercial CO₂ laser mirrors. The advantages of CO₂ laser, recent results of CO₂ laser enhancement cavity, and plan of R& D will be presented at the conference.

レーザーコンプトン X 線源のための CO₂ レーザー蓄積装置開発

1. はじめに

早稲田大学ではフォトカソード RF 電子銃を用いたレーザーコンプトン散乱 X 線生成試験を行ってきた。これまでの研究では約 5MeV の電子ビームと波長 1.047 μ m の Nd:YLF レーザーを 20 度で衝突させることで軟 X 線領域の光の生成に成功している。^[1] 特に水の窓と呼ばれる水による吸収が非常に小さく、生体を構成する窒素、炭素による吸収の非常に大きい『水の窓』と呼ばれるエネルギー領域の光を生成しており、生体を生きたまま観察できる生体軟 X 線顕微鏡への応用が期待できる。生成した X 線を軟 X 線顕微鏡として利用するためには、数桁以上の X 線収量の増大が必要であり、これを補うために電子ビームの大電流化などを行ってきた。^[2] これまでにマルチバンチ加速による大電流化に目処がつき、エネルギーの安定化、エミッタンス等の品質計測を始めている。レーザーコンプトン散乱の電子ビームの大電流化と平行して、衝突用のレーザー光についても検討を始めている。本講演では、早稲田大学軟 X 線実験における衝突用レーザー光の最適化研究及びその研究の進捗について報告する。

2. レーザーコンプトン散乱

レーザーコンプトン散乱で得られる X 線のピーク波長は以下のように表すことができる。

$$\lambda_p = \frac{\lambda_L(\cos \phi + 1/\beta)}{2\gamma^2} \quad (1)$$

ここで ϕ は衝突角、 $\gamma \cdot \beta$ は電子ビームのローレンツファクター λ_L は衝突レーザーの波長を示す。レーザーコンプトン散乱によって生成される X 線の波長は衝突レーザーの波長からピーク波長までのブロードなスペクトルとなるが、散乱光子の波長は散乱角に依存する。波長

λ の光子の散乱される角度 θ は、

$$\theta = \frac{1}{\gamma} \sqrt{\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_p}} \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 $\theta=0$ の時に最大のエネルギーであるピーク波長が得られる。また、電子ビームのエネルギーを示す γ が大きいほど、生成 X 線のエネルギーは高くなるとともに、散乱光子の散乱角分布が狭くなり、電子ビーム進行方向に集まる。レーザーの波長に関しても同様にレーザー光の波長が短くなればなるほどに生成光子のエネルギーが高くなるのがわかる。以下の図 1 に 1.064 μ m のレーザー光 (YAG レーザー) と 10.6 μ m (CO₂ レーザー) を用いた場合の生成される X 線エネルギーを電子ビームのエネルギーの関数として示す。

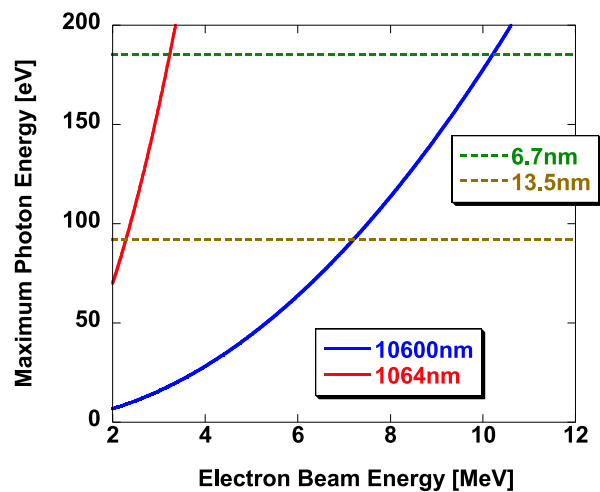


図 1: 電子ビームエネルギーと生成 X 線エネルギーの関係

図に示すように、X 線のエネルギーを決めた場合に要求される電子ビームのエネルギーは 1.064 μ m と 10.6 μ m で

* Work supported by JSPS Grant-in-Aid for Scientific Research (A) 10001690 and JST Quantum Beam Technology Program.

[†] kazuyuki.sakaue@aoni.waseda.jp

大きく違うことがわかる。特に低エネルギーの X 線を生成する場合には 6.7nm の光を生成するためには YAG レーザーで 3.2MeV、CO₂ レーザーで 10.2MeV の電子ビームが必要となる。低エネルギーの電子ビームは空間電荷効果の影響を受けやすく、衝突点での収束に難があったり、すぐに品質が低下してしまう問題がある。また、式 (2) にも示したよう散乱光の広がりも低エネルギーになるにつれ大きくなり、散乱光の取り扱いも難しくなる。

さらに、生成 X 線数 N_X について考える。生成 X 線数は以下のように表すことができる。

$$N_X \propto f \times N_L N_e \quad (3)$$

ここで、 f は単位時間あたりの相互作用数、 $N_L \cdot N_e$ はそれぞれ 1 衝突あたりのレーザーの光子数、電子数を示す。式を見て明らかなように生成 X 線数を増やすにはレーザー・電子の数を増やすとともに、衝突回数を向上させる必要がある。しかしながら、1 衝突あたりの電子数は空間電荷効果の観点から限界がある。我々の電子ビームをマルチパンチ化したのはこの目的のためで、1 衝突あたりの電子数は限界まで高め、かつ単位時間当たりの電子パンチの数を向上させた。レーザー光子数を制限するのは実用的には光学系へのダメージ閾値である。我々もすでに閾値いっぱいまで試験を行っている。^[1] ダメージ閾値は当然波長にも依るが、概ねレーザーの強度 (W/cm^2) で決まる。すると、レーザー光子 1 つのエネルギーが CO₂ レーザーの場合には YAG レーザーの 1/10 であることから、単位パワーあたりには 10 倍の光子が詰まっていることがわかる。したがって、CO₂ レーザーを用いる方が 10 倍光子数を向上させることが期待できる。

ここまでの議論をまとめるために、CO₂ レーザーを衝突レーザーとして用いることの利点を以下に列挙する。

- 1 光子当たりのエネルギーより、光子数が 10 倍稼げる
- 低エネルギーの X 線をターゲットにする場合には電子ビームのエネルギーを高く設定できる
- 電子ビームのエネルギーが高くなるために生成 X 線の散乱角が小さく、高輝度となる

3. CO₂ レーザー用蓄積共振器

前節では CO₂ レーザーを用いる利点に関して議論した。そこで実際に CO₂ レーザーを用いるために我々は CO₂ レーザーの蓄積共振器を提案し、開発を始めている。式 (3) に示したように生成 X 線数は f : 単位時間当たりの相互作用数にも比例する。したがって、高平均輝度の線源を開発しようとする場合、kHz ~ MHz の衝突回数が必要となる。そこで我々はこれまで光蓄積装置を開発してきた。これによって、レーザー光を共振器内に蓄積し、レーザーパルスを何度も衝突に利用することができる。我々はこれまでに蓄積率 600 倍の 1 μ m 波長用光共振器を開発し、レーザーコンプトン X 線の生成に成功している。^{[3][4]} この技術を 10 μ m の波長の CO₂ レーザーに応用することで前述の利点を生かすつパ

ルスを再利用でき、かつ衝突回数を格段に向上することを目指している。

蓄積共振器の詳細に関しては^[3]を参考にされたい。ここでは、簡単な共振器の説明と、現在設計した原理試験用共振器に関して述べる。光共振器は以下の図 2 のような構成をしており、2 枚もしくはそれ以上のミラーを用いて共振器を形作っている。

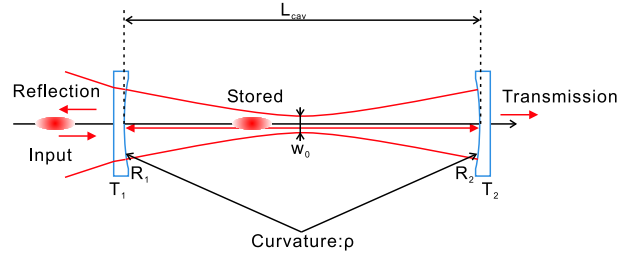


図 2: 光蓄積共振器の概念図

ここでは 2 枚のミラーを用いた共振器に関して説明する。2 枚の凹面鏡を用いて、レーザーを蓄積し、その境界条件から図 2 のようにウェストを持った共振器を設計することが可能である。このウェストとレーザーコンプトンの衝突点を一致させることになる。レーザー光は図中の左のミラーを通して共振器内に入射され、共振器内で蓄積される。ここで重要なのが、共振器長 L_{cav} であり、この共振器を 1 周した光が全く同じ位相で入射ミラーに戻ってくる必要がある。この共振器長は蓄積レーザー強度を計測しながらフィードバックをかけることになる。共振器を構成するミラーに求められる特性としては、入射側ミラーは反射率が高く、かつ透過率も高い、極めてロス小さい部分透過型のミラー。出射側ミラーとしては高反射率なものが望ましい。ロスはそのまま熱などに変換し、光学系へのダメージになりうるため、小さいに越したことはない。

このような条件から、まずは市販のミラーを用いて CW の CO₂ レーザーの蓄積実証試験の準備を開始している。以下の表に設計した光共振器用のミラーのスペックを示す。^[5]

表 1: CO₂ レーザー共振器用ミラーのスペック

入射側ミラー		
反射率 R_1	透過率 T_1	ロス
99.7%	0.25%	0.05%
出射側ミラー		
反射率 R_2	透過率 T_2	ロス
99.9%	0.0%	0.1%

どちらも市販のミラーであり、容易に入手可能である。入射側ミラーとして、高透過率かつ高反射率のもの、出射側ミラーとして高反射率のものを選定した。

これを用いて構成した共振器の蓄積率の計算結果を以下の図 3 に示す。横軸に共振器長にあたる Phase Advance(1 周あたりの位相ずれ)を取っている。

図 3 を見てわかるように位相を一致させた 0rad の時に蓄積率が約 600 倍得られることがわかる。また、点線は共振器からの反射光・透過光を示しており、出射側のミラーが透過しないため、透過光は 0、反射光は共振器

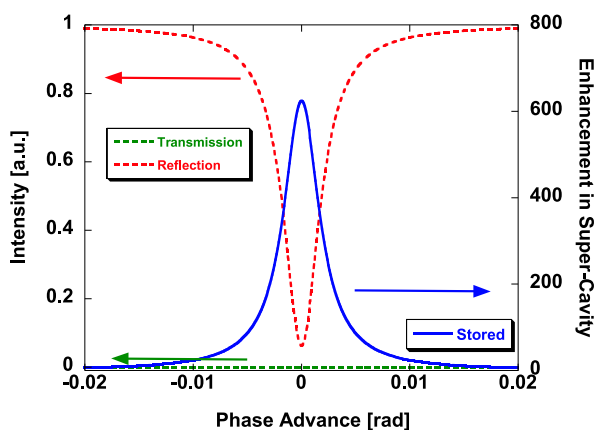


図 3: CO₂ レーザー光蓄積装置の蓄積率計算結果

蓄積時に共振器からの光と打ち消しあうため、共鳴付近で強度が下がっているのがわかる。

このように市販のミラーを用いて構成した共振器によって 600 倍という十分な蓄積率が達成できることが分かった。そこで早稲田大学喜久井町キャンパスに試験装置を立ち上げ、原理実証試験を開始する準備が整いつつある。以下の図 4 に現在構成中の試験装置のセットアップを示す。

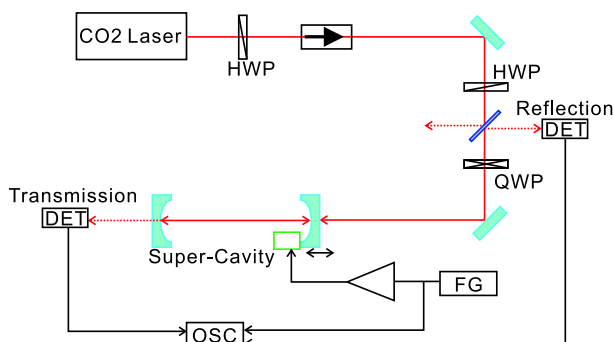


図 4: CO₂ レーザー蓄積試験のセットアップ概念図

セットアップは最低限のもので構成している。レーザーは CW の CO₂ レーザーを用い、反射光や透過光をモニターできる構成になっている。また、共振器長は積層型の Piezo を用いて制御する。共振器長の制御精度は共振器内で何回分の位相を重ね合わせるかで決まる。制御精度はレーザーの波長を重ね合わせる回数で割った値で概算できるため、波長の長い CO₂ レーザーでは制御精度が 1 μ m のレーザー光に対して 10 倍緩和される。したがって、より増大率の高い共振器実現の可能性があるので、蓄積原理実証試験の後にはさらに高い蓄積率の共振器構成を目指して研究を進めていく予定である。

4. まとめと今後の課題

レーザーコンプトン散乱における長波長レーザー (10 μ m) の有用性に関して明らかにし、特に軟 X 線以上の長さの波長をターゲットにする場合に非常に利点があることを示した。これまでの研究から、光蓄積装置を用いたレーザーコンプトン散乱は非常に有用であるこ

とは明らかであり、10 μ m に対する光蓄積装置の開発を開始した。すでに早稲田大学においてテストベンチを立ち上げ、年内に CW レーザーでの蓄積実証を行う予定である。また、その後の試験計画としては、

- CO₂ レーザー蓄積の原理実証 (CW レーザー)
- ハイパワー試験とダメージ試験
- 高蓄積率共振器開発
- CO₂ レーザーのパルス化とパルス蓄積

を計画しており、実際にレーザーコンプトン実験に堪える光共振器システムを構築していく予定である。

参考文献

[1] K. Sakaue et al., Radi. Phys. Chem. 77(2008)1136.
 [2] Y. Yokoyama et al., Proc. of this conference. TUPS036.
 [3] K. Sakaue et al., Nucl. Instrum. Meth. A637(2011)S207.
 [4] K. Sakaue et al., Rev. Sci. Instrum. 81(2010)123304.
 [5] Ophir Homepage <http://www.ophiropt.com/>