

APPLICATION OF INVERSE COMPTON SCATTERINGS; DIAGNOSIS OF ELECTRON BEAMS

Kazuyoshi Koyama*^{A)}, Hirotohi Masuda^{A)}, Mitsuru Uesaka^{A)}, Ryunosuke Kuroda^{B)}, Kawakatsu Yamada^{B)},
^{A)}University of Tokyo

2-22, Shirakata-shirane, Tokai-mura, Ibaraki, 319-1188

^{B)}Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)
Tsukuba-central-2, 1-1-1, Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8568

Abstract

The K-edge densitometry by using quasi-monoenergetic x-rays were investigated. X-ray were generated by the inverse Compton scattering process. In order to measure densities at the accuracy of 5% by the two color method, the energy fluctuation of the electron beam must be smatter than 0.15%. The scattering angle dependence of the x-ray energy is capable of measuring densities by taking images of K-absorption edge. The K-edge imaging densitometry requires that the energy width and normalized emittance must be smaller than 0.2 % and 0.1π mm – mrad, respectively. The K-edge imaging will provide a new technique to measure the transverse and longitudinal emittances

逆コンプトン散乱の応用；電子ビームの診断

1. はじめに

高エネルギービームは、科学や産業の広い分野で欠かす事のできない道具になりつつある。しかし現在はほとんどの場合、大型施設に向く必要がある。超高強度レーザーパルスとプラズマの相互作用を応用したレーザープラズマ粒子加速は加速器の超小型化に適しており、テーブルトップかが可能であり放射線はプラズマの周辺でしか発生しないので、既存の設備の一角での高エネルギービームを使った実験などを可能にする。レーザープラズマ粒子加速の加速構造はレーザーパルスに同期してその都度生成されるので、安定なビームを得るためには大振幅プラズマ波の振幅と波長、波形と波の伝播距離の再現性を十分に良くする必要がある。これまでに、12TW、50fsのチタンサファイア・レーザー（波長 800nm）を用いたレーザープラズマ粒子加速実験を行い、加速電子のエネルギー、電荷量、方向のレーザー・プレパルス依存性およびレーザー光軸に平行な外部磁場による電子ビーム集束と方向の安定化効果などを報告し、その後、初期電子入射と安定加速を目指して、磁場強度を 1T に挙げて 7TW のレーザーパルスで加速実験を行い、プラズマガイドコーンを形成とメインパルスの約十ピコ秒前にプレパルスを導入した事によるプラズマチャンネルの形成によって、100MeV 級の準単色電子加速に成功すると共に^[1]、航跡場への初期電子入射を可能にする超音速ジェットの子備的実験を実施し、電子入射が可能である事を示した^[1]。

レーザープラズマ粒子加速の安定化研究と並行して、産業技術総合研究所（産総研）のレーザーコンプトン散乱 X 線発生装置（LCS X-ray）を用いて、超小型準単色 X 線源として期待される全光学型逆コンプトン散乱 X 線源^[1]の応用に関する研究を行った。(1) もっとも単純な計測応用として期待される多波長 X 線による濃度測定の精度とそのために必要な X 線、電子線のエネルギーの安定度を求めること、(2) 逆コンプトン散乱 X 線のエネルギー（波長）が散乱角の一価関数である事を利

用した K 吸収端イメージングによる濃度計測模擬実験により、測定精度と電子ビームのエミッタンスおよびエネルギー幅との関係を求め、レーザープラズマ粒子加速を用いることの妥当性を評価すること、(3) K 吸収端イメージングによる K 吸収端透過率計測の、電子ビームの縦エミッタンスと横エミッタンスの測定への応用可能性を示すことが、主な目的である。

2. K 吸収端濃度計測

2.1 多波長計測

K 吸収端濃度（密度）計測法を用いると吸収端の両側の X 線エネルギー E_1, E_2 での透過率の比 I_2/I_1 から試料の濃度（密度） ρ を求めることができる。

$$\rho = \frac{1}{(\mu_2 - \mu_1)L} \ln \frac{I_2}{I_1} \quad (1)$$

ここで、 μ_1, μ_2 はそれぞれの X 線エネルギーにおける質量吸収係数で L は試料の厚さである。現在は X 線管を用いて X 線の透過スペクトルを Ge 検出器によって得ているが、線源強度による制約から計測時間は 20 分以上が必要である。テーブルトップで 100keV のエネルギーを持ちフェムト秒の短い電子バンチに 100pC~1nC の電荷量を含む電子線加速が可能なレーザープラズマ粒子加速を使うと、核燃料物質等の K 吸収端エネルギーである 100keV 以上の準単色 X 線源発生により、1~2 分での計測が可能になるものと期待される。単色 X 線のエネルギーを K 吸収端を挟む 2つのエネルギーに選り、その X 線の透過率の比から濃度を知ることができる。しかし、X 線の質量吸収係数は X 線エネルギーの約-2.5 乗で変化するので、X 線エネルギーのバラツキが濃度の測定精度に大きく影響する。質量吸収係数をベキ乗で近似して濃度の誤差 $d\rho/\rho$ と X 線エネルギーの変動の関係を見積もると、単色 X 線のエネルギー E_1 と E_2 が吸収端エネルギー E_K から同じ微量量だけずれてい

* koyama@nuclear.jp

るとして、

$$\frac{d\rho}{\rho} \approx \frac{1}{\mu_1 - \mu_2} \left(p_1 \mu_1 \frac{dE_1}{E_K} + p_2 \mu_2 \frac{dE_2}{E_K} \right) \quad (2)$$

となり、X線のエネルギーが吸収端に近い方が分母 $\mu_1 - \mu_2$ が大きな値になるので、濃度誤差は小さくなる。測定用X線のエネルギーが吸収端エネルギーに等しいとすると、 $d\rho/\rho \approx (8 \sim 18) dE/E_K$ となる。銀に対して5%の精度で密度を計るためにはX線エネルギーの変動を約0.6%以下に、すなわち電子のエネルギー変動を0.3%以下にする必要がある。ウランに対しては、X線と電子に許容されるエネルギー変動は夫々0.3%と0.15%である。高周波加速器はすでにこの変動以下におさまっているが、レーザープラズマ粒子加速器では一桁以上の改善が必要である。現在のレーザープラズマ粒子加速器の出力変動は、初期電子を背景プラズマから制御無しに供給していることに起因している。改善のためには、初期電子入射制御技術の確立が必須である。

2.2 K 吸収端イメージングによる K 吸収端透過率計測

逆コンプトン散乱 X 線が散乱角によって X 線波長が異なる事を利用すれば、2 波長を発生する事無く、K 吸収端の周りの X 線透過スペクトルを得る事ができる。電子ビームのエネルギー幅、エミッタンスとレーザーの発散角がゼロであれば、散乱角と X 線のエネルギーが正確に対応するために、吸収端での X 線透過率の差を直読できる。しかし、実際には有限のエネルギー幅、エミッタンスや発散角を持つために、同じ散乱角でも異なる X 線エネルギーを含み、X 線透過率の散乱角依存性測定では吸収端で不連続にならず、吸収端での不連続は吸収端近傍の測定値の外挿によって推定する必要がある。

レーザーの発散角は数 μrad 以下にできるので、電子ビームのエネルギー幅とエミッタンスの K 吸収端像のボケへの影響を見積もる。逆コンプトン散乱の散乱 X 線のエネルギーと電子のエネルギーおよび衝突角、散乱角の関係を与える式を使って、電子のエネルギー γ およびビームの発散角 θ の変動が散乱角 ψ_s に与える大きさに対する最低次の解を求めると、それぞれ、 $d\psi_{s\gamma} \sim (1/4\psi_s) (d\gamma/\gamma^3)$, $d\psi_{s\theta} \sim d\theta$ となる。電子のエネルギー変動が0.1%で吸収端の位置が散乱角 $\psi_s = 5\text{mrad}$ 、ビームのエネルギーが $\gamma = 70$ の場合で、 $d\psi_s \sim 5\mu\text{rad}$ である。一方、規格化エミッタンスを $1.3\pi\text{mm} - \text{mrad}$ 、電子ビームの焦点での大きさを $40\mu\text{m}$ とすると、吸収端の位置のボケは $d\psi_s \sim d\theta \sim 1\text{mrad}$ となる。これは、濃度計測にとって無視できない大きさである。

3. K 吸収端濃度計測実験

3.1 シミュレーション

数値計算コード CAIN を使って、産業技術総合研究所 (産総研) の「レーザーコンプトン散乱 X 線源 (LSC X-ray) のパラメータを用い、逆コンプトン散乱 X 線の銀の K 吸収端近傍での透過強度を散乱角の関数として計算した結果を図 1 に示す。概算と同様に有限エミッタンスの影響によって K 吸収端が約 1.2mrad の範囲でボケている事が分かる。

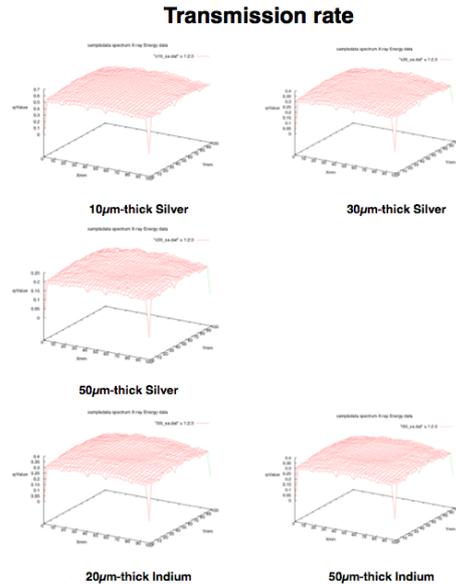


図 1: Simulation results of x-ray transmissions through silver foils by using the "CAIN".

3.2 実験

実験は産業技術総合研究所 (産総研) の「レーザーコンプトン散乱 X 線源 (LSC X-ray) を使用した。S バンド・ライナックによって $20 \sim 42\text{MeV}$ (エネルギー幅 0.2%) の電子バンチ (1nC, 3 ps) とパルスエネルギーが 100mJ 、パルス幅が 100fs のレーザーパルス (波長 800nm) を 165 度の角度で衝突させて、 $10 \sim 40\text{keV}$ の X 線パルスを発生できる [2]。実験には、約 $20 \sim 28\text{keV}$ の X 線を用い、試料としてこの範囲に K 吸収端エネルギーを持つ銀、インジウム、錫を用いた。試料は固体 (厚さ $10 \sim 50\mu\text{m}$ の薄膜) と硝酸溶液 ($1 \sim 5\text{wt}\%$) を用意した。図 2 の配置図に示すように X 線の検出には富士フイルム製イメージングプレート (IP) を用いた。衝突点から試料までの距離は 3250mm であり、試料の背後に IP を密着して置いた。

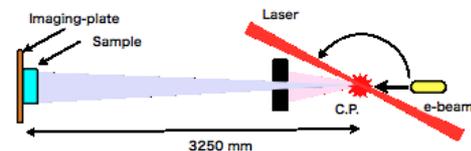


図 2: Configuration of the experiment.

図 3 にインジウム薄膜と銀薄膜の X 線透過率の測定結果を示す。図中の縦軸は Photo Stimulated Luminescence (PSL) 値と呼ばれる輝尽発光強度であり、X 線のエネルギーが一定の場合 IP による吸収線量に比例する。測定された透過線量分布はシミュレーションで予想された分布と似た形を示し、急激に変化する部分を持つ。インジウムを試料にすると、急激な変化の部分は中央に向かって (高エネルギー側に向かって) ずれる事から、これは K 吸収端の影であると言える。K 吸収端のボケの大きさは $1.2 \sim 1.5\text{mrad}$ であり、シミュレーション結果に近い値を持つ。今回行った実験条件では K 吸収端のボケの

大きさを X 線エネルギーに換算すると 7-10keV に相当する。吸収端のエネルギーの違いが数 keV 程度の複数の元素が混じっている試料の測定に適用する場合には、K 吸収端のボケの大きさを今回の実験の 1/10 の大きさ、すなわち 0.1mrad にする必要がある。吸収端から離れた場所での透過曲線を外挿して吸収端での X 線透過率の不連続の大きさを求める場合にも、0.1mrad 以下のボケであることが望ましい。この値を達成するためには、エミッタンス（正確には衝突点でのビームの発散角）を現在の 1/10 にする必要がある。この値以下では、電子ビームの有限エネルギー幅による影響が現れる。

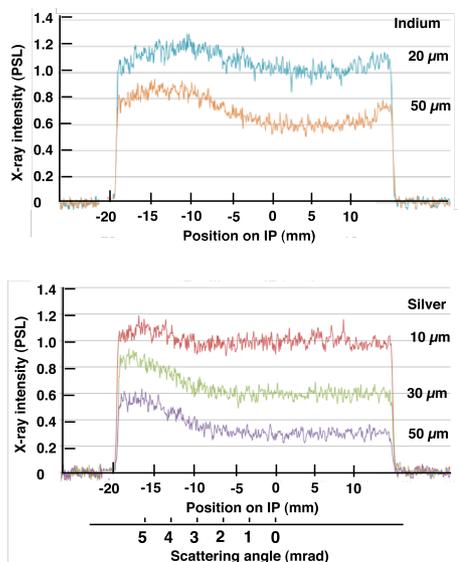


図 3: X-ray transmissions through indium and silver foils recorded on the Imaging Plate, IP.

生データ（図 3）に現れている細かな変動は誤差の要因となる。この変動を減らすためには X 線強度を上げる必要がある。現在の実験配置では IP の空間分解能に余裕があるので、K 吸収端の影の分解能と整合がとれる 0.5m まで試料を近づけると、X 線量が 36 倍に増え、雑音成分も相対的に小さくなると期待される。レーザープラズマ粒子加速では、ここで要求される程度の低エミッタンス、高電荷量の電子ビーム発生が可能であるが、高電荷量を保ちつつビームのエネルギー広がりを狭くするという課題が残る。

4. K 吸収端イメージングによるエミッタンス測定の提案

K 吸収端近傍の X 線の透過率から試料の密度や濃度を測定するためには、エネルギー幅が 0.2% 以下でエミッタンスが $0.1\pi \text{ mm} - \text{mrad}$ 以下が必要であることが分かったが、ここで得た結果は、電子ビームのエミッタンス測定に適用可能である。天然元素の K 吸収端エネルギーはウランの 116keV が最高であるが、衝突角度と衝突レーザー波長を適当に選ぶ事によって数 GeV の電子ビームまで応用可能である。また、フェムト秒レーザーを用いて衝突角を 90° に選ぶと、縦エミッタンスの測定も可能になる。

5. まとめ

レーザープラズマ粒子加速を使った「全光学型テーブルトップパルス単色 X 線発生装置」の研究と並行して、産総研のレーザーコンプトン散乱 X 線発生装置 (LCS X-ray) を用いて、K 吸収端濃度計測への応用に当たっての X 線源、電子線の仕様を明らかにした。K 吸収端近傍の X 線の透過率から試料の密度や濃度を測定するためには、2 波長 X 線を用いて 5% の精度で測定するためには、電子のエネルギー変動を 0.15% にする必要がある。

シングルショット計測が可能な連続したエネルギーの X 線を使った測定では、エネルギー幅が 0.2% 以下でエミッタンスが $0.1\pi \text{ mm} - \text{mrad}$ 以下が必要である。レーザープラズマ粒子加速では、エミッタンスの達成は可能であるが、高電荷量を保ちつつビームのエネルギー広がりを狭くするという課題が残る。

K 吸収端近傍の X 線の透過率分布の測定は、電子ビームのエミッタンス測定に適用可能である。フェムト秒レーザーを用いて衝突角を 90° に選ぶと、縦エミッタンスの測定も可能になる。測定精度など適用限界に関しては今後の課題である。

本研究は、先進原子力科学技術に関する連携重点研究および文部科学省グローバル COE プログラム（世界を先導する原子力教育研究イニシアチブ）の支援を受けた。

参考文献

- [1] N. Hosokai, *et al.*, Appl.Phys.Lett. **96**,(2010)121501 .
- [2] K. Koyama, *et al.*, NIMA **608** (2009) S51.
- [3] H. Toyokawa, *et al.*, Proc. of the 3rd Annual Meeting of Particle Accel. Soc. Japan, WO11, (2006).