

KURRI ライナック電子ビームからのコヒーレント遷移放射の特性と生物への照射

CHARACTERISTICS AND BIOLOGICAL EFFECTS OF THE COHERENT TRANSITION RADIATION FROM THE ELECTRON BEAMS OF THE KURRI LINAC

奥田修一^{#,A)}, 田中良晴^{A)}, 高橋俊晴^{B)}

Shuichi Okuda^{#,A)}, Yoshiharu Tanaka^{A)}, Toshiharu Takahashi^{B)}

^{A)} Radiation Center, Osaka Prefecture Univ.

^{B)} KURRI, Kyoto Univ.

Abstract

The coherent transition radiation (CTR) is generated from the high-energy electron beams of an electron linear accelerator (linac) and is used as the intense light source in a submillimeter to millimeter wavelength range. The CTR light source for absorption spectroscopy established by using an L-band electron linac in Kyoto University Research Reactor Institute has been used for various kinds of materials. In the present work this light source is applied to investigating the biological effects of the CTR light. The characteristics of the light source such as the pico-second light pulse, the intensity and the spectrum were evaluated from the results for the measurements. The results for the preliminary irradiation experiments for several kinds of bacillus, cell and microorganism are reported.

1. はじめに

高エネルギー電子バンチからのコヒーレント遷移放射(CTR)は、極めて高いパルス強度が特徴である。物質中にパルス電場を与えて、電子や極性分子の挙動制御が可能になると考えられる。コヒーレント放射の生物に対する影響については、ほとんど研究が行われていない。本研究では、京都大学原子炉実験所(KURRI)Lバンド電子ライナックによるCTR光源[1, 2]を利用して、生体の基本である水や NaCl 水溶液への作用に関する基礎的知見を得るとともに、菌、細胞や微生物にこの光を照射し、その影響を調べ、生体における新しい生理活性を探索することを目的とした。

2. 実験方法

2.1 加速器の条件と実験配置

KURRI 電子ライナックによる CTR の照射、吸収分光測定系全体の概念図を Figure 1 に示す。代表的なビーム条件は、エネルギー42 MeV、マクロパルス幅 47 ns、パルス繰り返し 60 Hz、マクロパルスにおける平均電流 14 A であった。

ライナックは、通常の条件でビーム調整を行った後、CTR の強度をモニタしながら、加速器の高周波要素の運転条件を変化させ、最も高い光強度が得られるように運転条件を最適化した。この過程で、光強度は、最初の条件と比べて 2 から 3 桁増加した。この運転条件に関する定量的な評価は行っていないが、主として加速管での比較的強いバンチ圧縮による結果と考えられる。放射強度は、バンチ圧縮によって増加する。この過程は、通常の運転条件とは異なり、マイクロ波の加速位相を通常の条件からずらしてバンチ圧縮の効果を高め、一方で電子ビームのエネルギーのより大きな広がりを伴うものと推定される。この条件については、同様の現象に関する報告

を他の装置による実験で行っている[2]。本加速器システムでは、直線的に加速された電子ビームを利用したので、偏向磁石を用いた場合のように、電子ビームのエネルギー広がりがその軌道などに大きな影響を与えない。

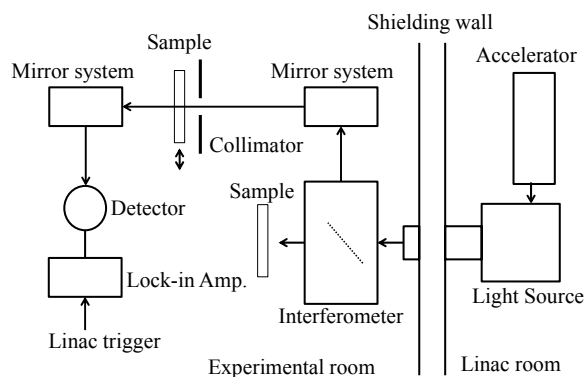


Figure 1: Schematic diagram of the experimental setup.

真空容器から、厚さ 3.1 mm の熔融石英の真空窓を通して CTR を加速器室外の実験室へ輸送した。光スペクトルの測定には、KURRI の高輝度ミリ波 THz 放射分光装置を利用し、本実験では図に示すように、試料への光照射と吸収分光が同時に行える系を構築した。この測定系における真空窓の後の光路は全て空気中にある。マーチンパレット型干渉計から出た光は直線偏光で、直径 8 mm の光コレクタの位置に集光した。この径は可変である。干渉計で光スペクトルを測定するためには、測定の間に入射光が安定していることが必要である。干渉計への入射光を一部モニタして、変動を相殺するシステムを設置しているが、その安定性が十分であるため、通常の実験では使用していない。このモニタ光を試料の照射に利用した。透過測定では、光コレクタのすぐ後方に置いた可動ステージ上に設置して、試料がある場合とない場合の測定を自動で行えるようにした。試料透過後の光を集光し、液体ヘリウム冷却シリコンボロメータ検

[#] okuda@riast.osakafu-u.ac.jp

出器で光強度を測定した。この分光装置で計測できる波数領域は、2 から 35 cm^{-1} である。

2.2 試料と測定法

生物関連試料として、水および NaCl 水溶液に対して吸収分光を行い、光強度に対する変化などを調べる実験を行った。

生物試料の照射については、予備実験を行っている。生物試料は、標準的な菌と微生物(大腸菌、酵母、ユーグレナ藻)および細胞とした。生物試料を無水石英板にはさんだ水中に浮遊させて光照射を行った。水はサブミリ、ミリ波の強い吸収体であり、試料の全厚さを 0.5 mm 以下として、試料に照射される光強度の減衰を抑えた。大腸菌や酵母では、照射後に培地での培養における増殖率の変化を調べ、定量化して結果を評価した。単細胞真核藻類のユーグレナ藻では、光照射中の挙動を実体顕微鏡で直接観察して影響を調べる実験を予定している。

3. 実験結果と考察

3.1 光源特性の測定

試料がない場合、すなわち光源としての CTR のインターフェログラムの測定結果を Figure 2 に示す。ロックイン増幅器の信号を、干渉計内で分割されたパルス光の光路差に対してプロットしたものである。光路差を設定するパルスモーターのステップ間隔は、十分小さく設定されている。結果として得られる光スペクトルの波数分解能

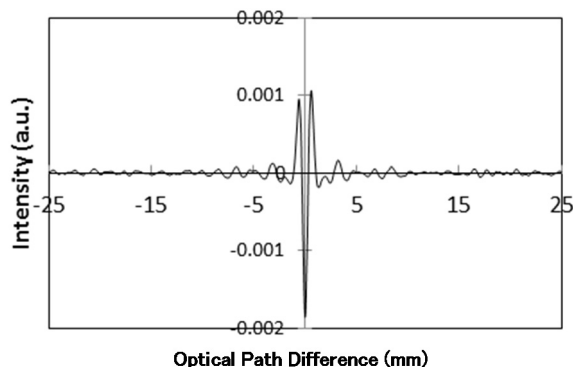


Figure 2: Interferogram of the CTR source light for the absorption spectroscopy.

は最大の光路差で決まり、 0.2 cm^{-1} であった。これは、最大の光路差を増すことでさらに小さく設定することができる。1 回の測定には、約 4 分要した。この時間は、設定した分解能と反比例する。図の中央では、分割した光の光路差がなくなり、大きな干渉が見られる。この周辺の形状から、光のパルス幅は、約 3 ps と推定される。これは 1 mm の波長、または 10 cm^{-1} の波数に対応する。L バンドライナックの電子バンチ長は、通常 10 ps より長い。本実験では、電子ライナックのビーム調整の際に、前述の特別な運転条件に伴うバンチ圧縮効果で、比較的短いバンチが形成されたと推定される。前述のように、この波長域において、バンチ圧縮は顕著な CTR 強度の増大を生

じる。

インターフェログラムの解析によって光のスペクトルが得られる。試料がない場合の光源スペクトルと、水を試料として得られた透過光のスペクトルを Figure 3 に示す。この図で横軸の光の波数 10 cm^{-1} は、波長 1 mm に、また光子のエネルギー約 1.2 meV に対応する。 $4\text{-}13 \text{ cm}^{-1}$ の範囲において、全測定時間約 30 分間の光強度の変動による誤差は $\pm 2\text{-}3\%$ に収まり、非常に安定なスペクトルが得られた。スペクトルの測定誤差は、主に測定中の放射強度の変動による。ただこの測定では、放射強度は、電子ビームのマクロパルスの中で平均化され、さらに光計測における時定数で平均化されている。今回は使用していないが、前述のように、分光器に入射する光の強度をモニターするためのもう 1 台の検出器を用いるとさらに改善される。光強度が比較的低い波数領域においては、誤差はかなり大きくなる。これは、光の強度が低いからではなく、スペクトルの計測の際に常に全光を検出する今回の計測法のためである。回折格子による分光を行うか、

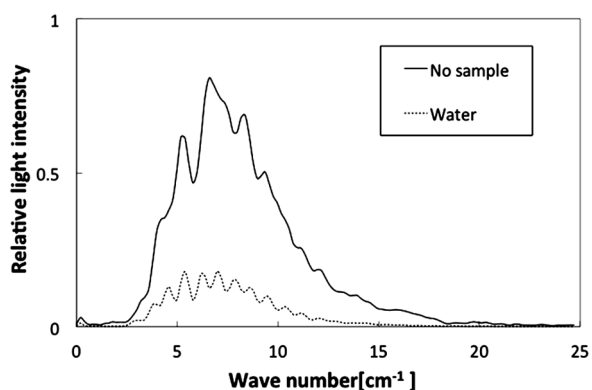


Figure 3: CTR spectra obtained by the measurements for no sample (solid line) and water sample $120 \mu\text{m}$ thick in the sample holder shown in Fig. 4 (dotted line).

スペクトル強度が高い部分をフィルター等でカットすると、このスペクトルの両側の部分も、より誤差が少なく測定できると推定される。

この図からわかるように、光源の光のスペクトルは、サブミリ・ミリ波領域に広く分布している。波数約 7 cm^{-1} においてピークを持つ。このピーク周辺での周期的な変動は、真空容器の窓内での入射光と反射光の干渉による変動に対応している。CTR の光源強度は、ピーク付近で約 $10^{-7} \text{ W}/0.1\% \text{ b.w.}$ と推定される。以前の測定では、高圧水銀灯の光強度の約 10000 倍の強度が得られている⁴⁾。ただ、これらには定常光とパルス光の違いがあり、パルス強度の比較を行うと、両者にはさらに大きな差がある。

図からわかるように、CTR の強度は、電子バンチ長より短い波長ではかなり低下する。CTR のスペクトル形状を決める主要因は、電子バンチの形状である。CTR のスペクトルが比較的高い波数へ伸びているのは、このバンチ形状によると考えられる。一方比較的低い波数では、主に放射強度の波数依存性により、波数と共に光強度が低下しているためと考えられる。

今回の実験で、CTR は、サブミリ・ミリ波の広い領域で比較的高い強度を示した。全放射強度は、吸収分光測定のためのプローブ光としては極めて高い。本測定では、最大 3 桁の増幅率を持つ検出器の増幅器は使用していない。この増幅器を使用すると、試料の光透過率が 10^{-6} かそれより低い場合でも測定には十分な強度がある。この場合、測定系の雑音は、信号に比べ 3 桁程度低い。ただし試料である水の厚さを増やして、透過光強度がかなり低くなった場合の実験では、試料周辺からの反射によると見られる迷光を電波吸収材で十分に遮光する必要があり、これが計測の雑音となって測定誤差を決めることがわかった。

3.2 水および NaCl 水溶液の吸収分光測定

Figure 4 に示す試料ホルダーに入れた水試料に対する透過光スペクトルの測定結果を Figure 3 に示した。この透過率曲線上に見られる周期的な振動は、入射光と無水石英板表面での反射光の干渉によるものである。この測定で、試料による 70-80% の光吸収とその波数依存性

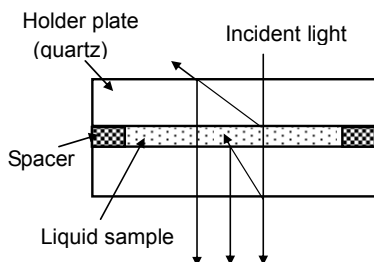


Figure 4: Schematic diagram of the sample holder for water showing the behavior of the incident light.

が得られた。水の物性値である吸収係数と屈折率は、この曲線を解析することによって求めることができる。本研究で測定対象とした液体の水は、サブミリ・ミリ波領域で強い光の吸収体であり、通常用いられている他の光源では、極めて測定が困難である。CTR を用いると、水を含む有機、生体物質や、水溶液の吸収分光が可能になる。

水および NaCl 水溶液を対象に光の吸収を調べた結果、両者における吸収挙動の差や光強度による非線形現象の可能性が明らかになった。

3.3 生物試料の分光測定及び照射

CTR のピーク強度は、他の THz 光源などと比べると極めて高い。この光源の重要な応用は、S バンドや L バンド電子ライナックの典型的なバンチ長である 1-10 ps に対応する短い時間で、物質の非線形光吸収を調べることである。また光の平均強度を、温度上昇の影響が十分に無視できる程度に低くし、高いソルスピーク強度によって、特に生物にどのような影響があるかについて調べるために標準的な菌および微生物、細胞への光照射実験を開始した。現在、有意な照射効果は観測されていない。

4. 結論

KURRI の L バンド電子ライナックの CTR を用いて、生物への照射影響を調べるために、従来の吸収分光シ

ステムと加速器動作条件を最適化し、純水、食塩水溶液の吸収分光を行い、予備的な照射実験を行った。今後、菌、細胞、微生物の増殖率、生残率、挙動などに対する光照射の影響を詳細に調べる。

本研究の一部は、平成 27-29 年度 JSPS 科研費 15K04733 の助成を受けた。

参考文献

- [1] T. Takahashi, J. Particle Accelerator Soc. Japan 2 (2005) 11-15.
- [2] S. Okuda and T. Takahashi, Infrared Phys. Technol. 51 (2008) 410.