

Development of Femtosecond Pulse Radiolysis System

T. Yamamoto, T. Kozawa, K. Hori, Y. Mizutani, S. Seki, Y. Yoshida and S. Tagawa

The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567, Japan

Abstract

The pulse radiolysis system by using a femtosecond laser synchronized with electron linac was developed at Osaka University. This system has a potential to detect ultrafast phenomena in the femtosecond region. The pulse width of analyzing light is 100 fs. However, the present pulse width of the electron beam (irradiation source) is 20 ps. The pulse width of electron beams mainly decide the time resolution of the whole system. We attempted to generate a shorter pulse by installing a magnetic pulse compressor to the L-band linac of Osaka University. The length of the pulse has been measured by a picosecond streak camera with a time resolution of 2 ps. 27 MeV electron pulses with the pulse width of 30 ps have been compressed to 2.4 ps, which is equal to the time resolution of the streak camera, by the magnetic pulse compression system.

ピコ秒パルスラジオリシスシステムの高時間分解能化

【序】従来、短パルス電子源としてはSバンド電子線形加速器とLバンド線形加速器が代表的であり、そのパルス幅は、それぞれ約 10ps、約 20ps 程度である。これよりも短い電子線パルスを作ろうとする試みはかなり以前からあり、1989 年アルゴンヌ国立研究所のLバンドライナックにおいて磁気パルス圧縮法を用いて 5ps の電子線パルスが生成された。磁気パルス圧縮法は電子線パルスにエネルギー変調をかけ、1パルス内のエネルギー差をマグネット系を用いて軌道差に変換し、進行軸方向のフォーカスを行う方式である。電子線のパルス幅を制御することは加速器にとって非常に重要な課題であり、磁気パルス圧縮器は、多くの加速器に取り入れられている。大阪大学においても、以前からシケイン型磁気パルス圧縮器および 270 度マグネットを使った 2 種類のパルス圧縮が行われており、最短 9ps の電子線が生成されている。

一方、現在、放射線実験所ではフェムト秒レーザーとライナックの同期によるピコ秒パルスラジオリシスに成功しているが、このシステムでは、分析光が

100fs であるのに対して、電子ビームは非常に長く 20~30ps 程度であり、電子ビームのパルス幅が時間分解能を制限している。本研究は、電子ビームの短パルス化を行うことにより、ピコ秒パルスラジオリシスシステムの時間分解能の向上を計り、フェムト秒領域の放射線誘起反応の測定が可能な時間分解計測システムの構築を目的としている。現状のLバンドライナックによる短パルス化の目標は、フェムト秒レーザー同期パルスラジオリシスシステムへ適用することを考慮して、パルス幅

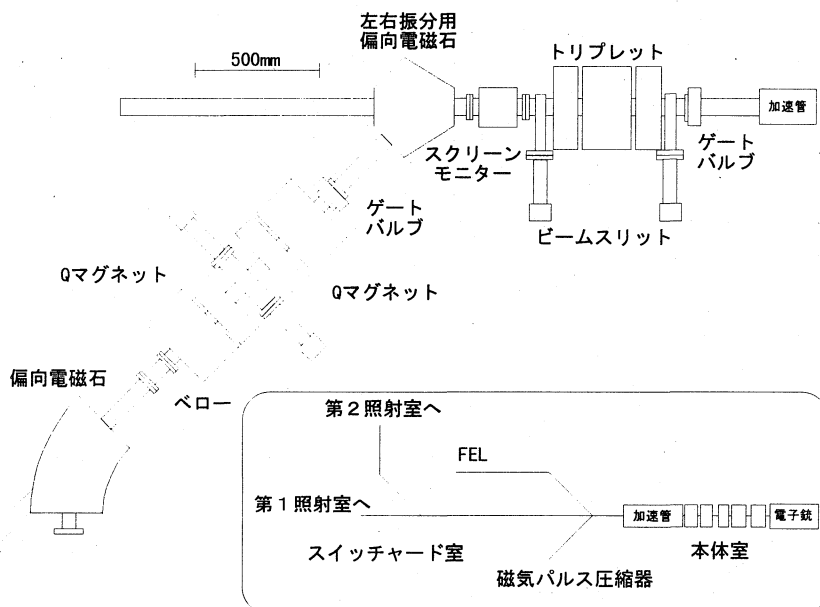


図1. 磁気パルス圧縮システム

1ps 以下、ビームサイズ $\phi 3\text{mm}$ 以下、電荷量 1nC 以上とした。

【磁気パルス圧縮システム】

磁気パルス圧縮法は電子線パルスにエネルギー変調をかけ、電子線パルスの前半部分を高エネルギーに後半部分を低エネルギーにする。高エネルギー電子ビームは相対論効果により、エネルギー変調で速度はほとんど変化せず、質量のみが増加する。したがって、変調後のビームを偏向電磁石に通せば、質量の違いに応じて偏向角が変わり軌道差が生じる。この原理を利用し、1パルス内のエネルギー差をマグネット系を用いて軌道差に変換し、進行軸方向のフォーカスを行うことができる。図1に偏向角45度、偏向半径50cmの偏向電磁石2台、四重極電磁石系からなる磁気パルス圧縮システムを示す。マグネット系の中心に水平方向スリットを挿入するために、トリプレットの中心のマグネットは2個に分離させている。外側の2個で水平方向の収束を内側の2個で鉛直方向の収束を行う。エネルギー変調は十分相対論的領域にはいった電子ビームを加速管で変調するのが理想的であるが、阪大Lバンドライナックには加速管が1本しかないので、加速と変調を1本の加速管で同時に行う。通常の線形加速器で超短パルス電子線の生成を試みる場合、最終的なパルス幅を決定するのは電子線の6次元エミッタンスである。東大Sバンドライナックでは、transverse 方向エミッタンス $100\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 、圧縮前パルス幅 10ps で、平均 890fs、電荷量 1nC/pulse の圧縮に成功しているが¹⁾、阪大Lバンドライナックは東大Sバンドライナックに比べエミッタンスが大きく、圧縮前のパルス幅も長い。特にパルス幅に関してはエネルギー変調をかけながらの加速になるので、通常の加速よりパルス幅が長くなることが予想される。これらの問題には、ストレート方向に $\phi 3\text{mm}$ スリット2枚、磁気パルス圧縮器中央に水平方向スリットを置くことにより対応する。

【数値計算】

軌道計算は、電子の飛行距離を幾何光学的に計算する手法で行った。30MeV のエネルギーの電子ビームの空間電荷効果は、今回のケースでは無視できる大きさなので考慮しない。四重極電磁石の磁場強度に関しては、最適化プログラムを作成し、transverse 方向のビーム面積とパルス幅の積（水平方向のビームサイズと鉛直方向のビームサイズとパルス幅の積）が、測定点で最小になるように選んだ。従って、ここに報告するビームサイズは

この磁気パルス圧縮器で生成できる最短のパルス幅ではない。計算は1ケース、粒子1000個で行い（計算時間約1秒）、四重極電磁石の最適な磁場強度は 0.01T/m の精度で求めた。また、ビームサイズ、パルス幅の評価は、粒子分布の標準偏差から算出した。

図2に圧縮前のパルス幅と圧縮後のパルス幅の関係を、磁気パルス圧縮器中央に挿入したスリットの効果とともに示す。これは加速位相70度、transverse 方向規格化エミッタンス $235\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 、同一位相でのエネルギー分散 0.2%で計算した結果である。この図からスリットを入れることにより圧縮後のパルス幅が短くなり、上記のビームパラメーターではスリット幅 10mm で圧縮後のパルス幅が、圧縮前のパルス幅に依存しなくなることがわかる。さらに、図3にビームクオリティ（エミッタンスと同一位相でのエネルギー分散）と測定点でのパルス幅の関係を示す。これらはスリット幅 10mm で計算した結果である。この図から transverse 方向のエミッタンスや同一位相でのエネルギー分散がパルスの圧縮効率と密接な関係にあり、ビームクオリティが良いほど圧縮効率が高

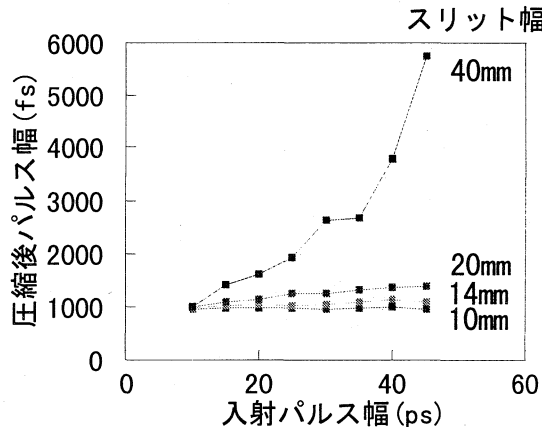


図2. 圧縮前のパルス幅と圧縮後のパルス幅の関係及びスリットの効果

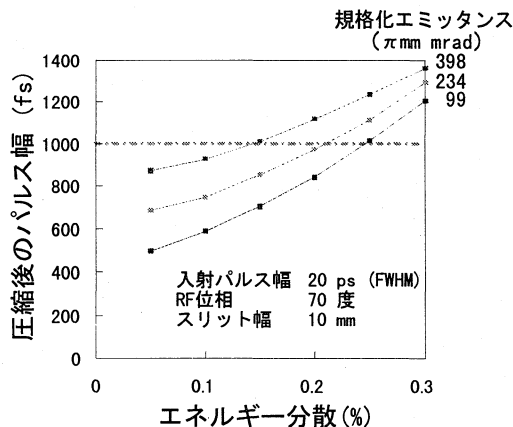


図3. 同一位相でのエネルギー分散及びエミッタンスと圧縮後のパルス幅の関係

いことがわかる。この結果から、1ps 以下のパルスを生成するためには、エミッタンスが $400 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ のときは、同一位相でのエネルギー分散が 0.15%以下、エミッタンスが $100 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ のときは、同一位相でのエネルギー分散が 0.25%以下でなければならないことがわかる。図4に加速RF位相と圧縮後のパルス幅の関係を示す。今回の実験では加速とエネルギー変調を1本の加速管で行わなければならないので、大きく変調をかけることができないが、この結果から少なくとも加速位相を70度程度までおとして変調をかけなければならないことがわかる。図5に典型的なパルス圧縮後のパルス波形と位相分布図を示す。これは加速位相70度、規格化エミッタンス $235 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 、同一位相でのエネルギー分散0.2%で計算した結果である。このときのスリットのビ

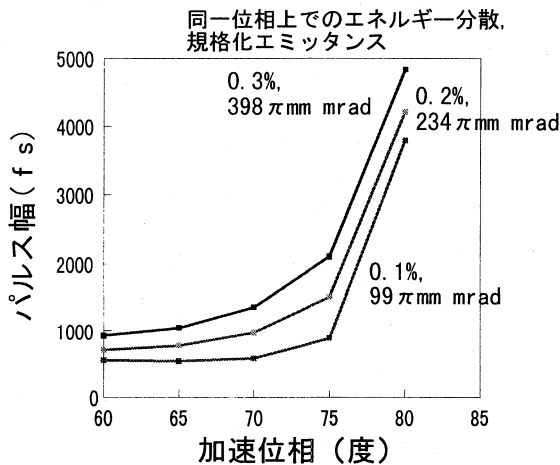
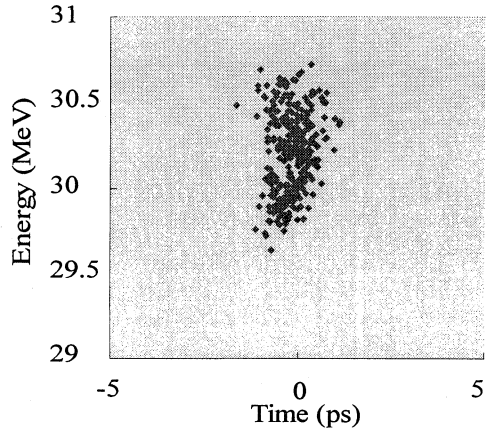


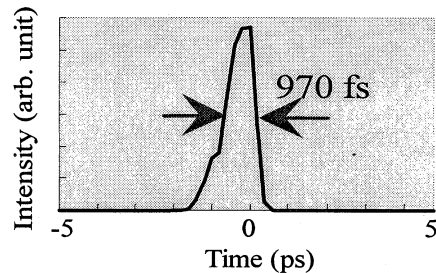
図4. 加速位相と圧縮後のパルス幅の関係
一ム透過度は65%である。

【実験】

パルス幅は電子ビームが空気中で発生するチェレンコフ光をストリークカメラで測定することにより評価した。ストリークカメラの時間分解能は2psである。加速管においてRF位相70度、平均電界強度10MV/mで加速及び変調を行った後、ストリークカメラでパルス幅をモニターしながら、電磁石系を微調整し圧縮を行った。その結果、ストリークの時間分解能に相当する最短2.4psのパルスを得(図6)、現有のストリークカメラの時間分解能まで、電子ビームの圧縮に成功した。このときの電荷量は2.0nC/pulseであった。また、このときのスリット幅は10mmであり、スリットで約3分の1の電子が失われた。ビームサイズは5mmX6mm(テイル部分)であった。



(a) Phase Space Distribution of Compressed Pulse



(b) Time Profile of Compressed Pulse

図5. 圧縮後のパルス波形(計算結果)

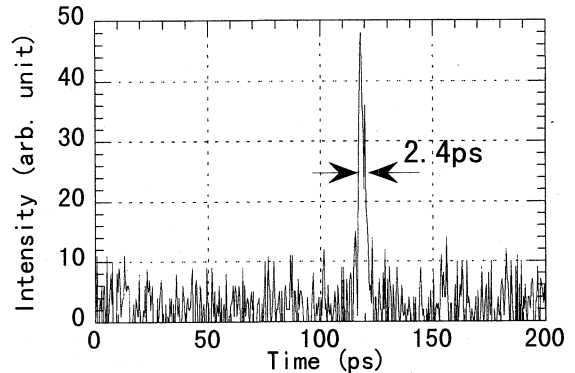


図6. ストリークカメラで測定した
圧縮後のパルス波形

【まとめ】

阪大Lバンドライナックに磁気パルス圧縮器を導入することにより現有のストリークカメラの時間分解能までパルスの圧縮に成功した。

今後、フェムト秒レーザーの輸送系を整備し、圧縮したパルスを使用したフェムト秒レーザー同期パルスラジオリシスシステムを構築するとともに、さらなる短パルス化を行いフェムト秒パルスラジオリシスシステムの開発を行っていく予定である。

参考文献

1] T. Kozawa et al., Nucl. Instrum. Meth., in press.