

小型逆コンプトン散乱硬 X 線源開発

上坂 充^{1,A)}、深澤 篤^{A)}、飯島 北斗^{A)}、吉井 康司^{A)}
浦川 順治^{B)}、肥後 寿泰^{B)}、明本 光生^{B)}、早野 仁司^{B)}

^{A)} 東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設
〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-22

^{B)} 高エネルギー加速器研究機構
〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

文部科学省のプロジェクト『先進小型加速器開発』が平成 13 年度から 5 年計画で始まった。この計画では、小型のがん治療用重イオンシンクロトロン加速器と動的血管造影用逆コンプトン散乱硬 X 線源が開発される。8 つの国立大学、研究所が参加し、仮想研究所(Virtual Laboratory)を形成する。

1. はじめに

加速器は大型装置の部類に属しており、そう容易には利用することができない。ビーム利用の拡大のためにはテーブルトップの大きさ程度にまで小型化する必要がある。そこで、平成 13 年度より 5 年計画で文部科学省（電源特別会計立地勘定）プロジェクトとして、小型加速器開発事業がスタートする。これは、最先端の加速器・レーザー・プラズマ技術を駆使して加速器を小型化し、重イオンシンクロトロンによるがん治療システム(図 1 参照)と、逆コンプトン散乱 X 線源による動的血管造影システム (図 2 参照) を開発するものである。研究体制は、放医研、東大原施、高エネ研、原研関西研、京大、産総研、阪大レーザー研、広島大が我が国初の試みである仮想研究所を組み、開発研究を円滑に推進する(図 3 参照)。東大原施は後者システムの主担当として参画す

る。本システムを所定の期間内に実現させ、病院への設置や、派生する様々な基礎研究展開、産業応用の形で地域社会に貢献していく。

2. 小型逆コンプトン散乱 X 線源

硬 X 線の発生は従来では GeV 程度の大型の電子貯蔵リングのアンジュレータで行われてきた。しかし、高強度のレーザーを用いた逆コンプトン散乱では 100 MeV 以下の低エネルギーの線形加速器で十分である。本研究の最終目的は動的血管造影を行えるような小型のシステムであり、それに要求される X 線のパラメータは 33 keV、 10^{11} photon/10ms である。システムの小型化のために、S バンドの 1/4 の大きさの X バンド加速器について研究が進められている。現時点での加速管とクライストロンの仕様はそれぞれ表 1,2 の通りである。電子銃は別途 SPring8 との共同研究で、S バンドフォトカソード RF ガンについて性能向上のための研究がなされるのでこの結果を適用する。現在は X バンドフォトカソード RF ガンを計画しており、カソード材料としてはまずは Mg (Q.E.=0.1%, 4.7 μ J/1nC@263nm)で行い、将来的には透過型のダイヤモンド薄膜 (Q.E.=50%, 12nJ/1nC@213nm)にすることを視野に入れている。PARMELA による解析では最終的に 240 pC、4.2 ps (FWHM)、 8π mm.mrad の電子ビームが得られている

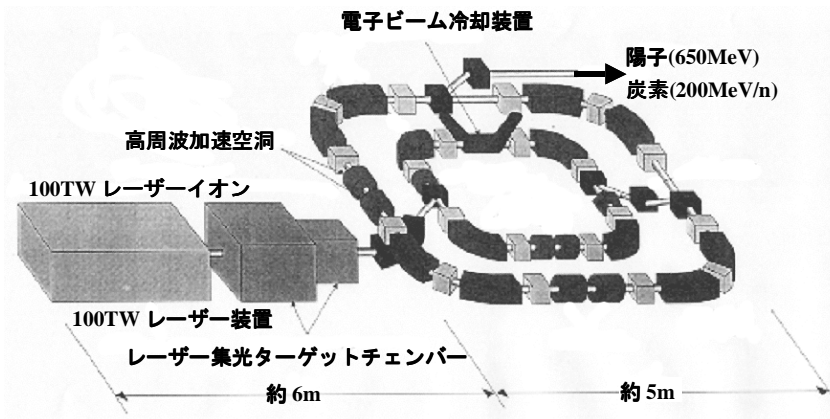


図 1 : 重イオンシンクロトロン

¹ E-mail : uesaka@tokai.t.u-tokyo.ac.jp

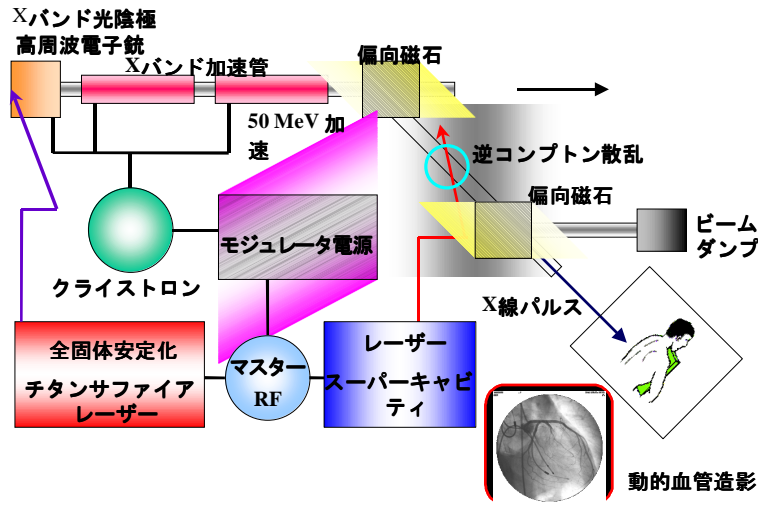


図2：逆コンプトン散乱 X 線源による動的血管造影システム

が、さらなる改良が必要であることは明らかである。高強度レーザーはレーザースーパーキャビティにより CW レーザーを増幅することで 100MW/7ns 程度を得られるように、KEK で研究が進められている。これらを組み合わせただけでは 10^5 photons/shot 程度しか得られないため、電荷量とレーザーパワーを上げる必要がある。1 shot 当たりの電荷量を増やすための工夫として、電子銃駆動レーザーをマルチパルス化することを検討している。レーザーは 10 J/1ps のようなものが欲しいが、それには CO₂ レーザーや Nd:Glass レーザーなど大型の装置が必要となってしまう安定性にも問題があるため、それら以外の手段を模索中である。

今年 6 月 18-22 日に行われた ICFA Beam Dynamics Workshop on Laser-Beam Interactions (Stony Brook) や、24-30 日に行われた PAC2001 (Chicago) では、S バンド以上の RF ライナックと TW レーザーとの逆コンプトン散乱 X 線源の開発と計画は世界で 10 件にも上る。また、X (9.3, 11.424 GHz)、Ku (17.2 GHz)、Ka (30, 34.3 GHz)、W (90 GHz) バンド、THz、プラズマプラズマカソード、真空レーザー加速器など超高周波小型ライナックの研究も特にアメリカにて盛んである。すべて医療など産業応用を狙っている。

表 1：X バンド加速管仕様

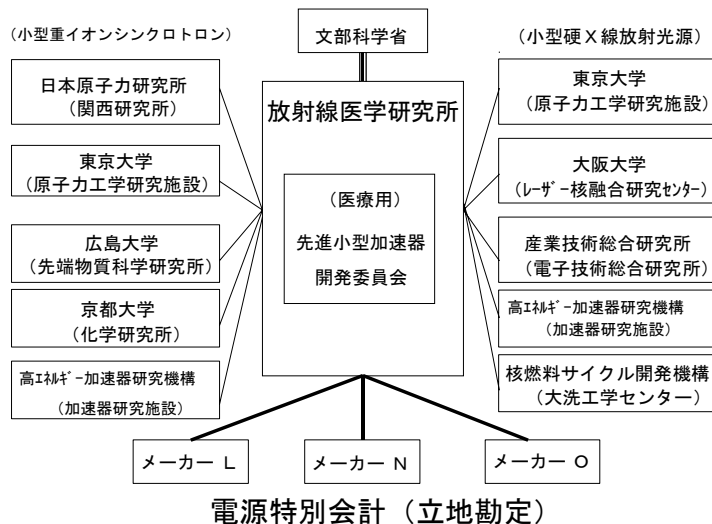
運転周波数	11.424 GHz
加速モード	$2\pi/3$ モード
加速管長	0.75 m
加速管タイプ	RDS 型
シャントインピーダンス	平均 93 M Ω /m 以上
Q 値	計算値の 95% 以上
入力電力	20 MW

表 1：クライストロン仕様

クライストロン	
出力電力	40 MW
RF パルス	1.0 μ s (平坦部)
効率	37 %
パービアンス	0.8 μ
ビーム電圧	449 kV
ビーム電流	221 A
モジュレータ	
ピーク電力	108 MW
一次出力電圧	32 kV
一次出力電流	3.4 kA
パルス幅	2.5 μ s (FWHM)
平坦部	1.0 μ s
繰り返し	50 pps
平均電力	13.6 kW

3. レーザープラズマビーム源

レーザープラズマ電子・イオン源の可能性の追求も本プロジェクトに含まれている。の当施設ではこの十年間プラズマ航跡場加速について、KEK、JAERI と共同で多くの先進的な研究が続けられてきた。近年我々は、12 TW 50 fs レーザーパルスにより 10 fs 単バンチ電子ビームを発生させるレーザープラズマライナックの研究を進めている。ガスジェット中のレーザー強度が上昇するにつれ、プラズマ航跡場は線形の正弦波から波の先頭が鋭くなる非線形に変化していき、プラズマ中の電子の動きも非相対論から相対論的になる。最終的に臨界値を超えると航跡場の波が崩れて、波のエネルギーが電子ビームの進行方向のエネルギーに変換される。構成を図 4 に示す。2D-PIC (Particle In Cell) によるシミュレーションによると 25 MeV (max)、12 fs (FWHM)、 2.8π mm.mrad (rms)、 10^{11} electrons/bunch の電子ビームが発生される。我々はこの発想と約 10 fs の極短電子ビームバンチの



「放射線利用技術・原子力基盤技術移転等委託事業」の一環

図3：研究体制(仮想研究所)

発生を実験的に立証することを計画している。電子バンチを計測したのち、レーザービームスプリッターと光学的遅延ラインを用いて数 10 fs 時間分解能 pump & probe 分析システムを構築することも計画している (図5)。同期が受動的に行われるため、遅延ラインを 5 μm 動かすことで 33 fs の遅延をタイミングジッターなしで得ることができる。

銅板に高強度レーザーを照射し、短パルス X 線を発生させることに成功している。これは銅板上にプリパルスにより生成されたプラズマの電子をメインパルスの動重力で加熱し、その電子が銅をたたくことで特性 X 線を発生させる。これを用いて GaAs のフォノンの伝達を示す回折像の歪みを 50 ps 間隔で得ている。これらはシミュレーションとも良く一致しており、この方式による時間分解計測の手法が確立された。この応用として、タンパク質動的構造解析、時間分解 X 線イメージングフォログラフィなどを計画している。

高強度レーザーを金属箔に照射することで、短パルスイオンビームを発生することも可能であると考えられている。この機構は電子が加熱されることまでは上記と同様だが、加熱された電子は外側に分布するため内側にはイオンが取り残され、イオン同士が反発し合いクーロン爆発を起こす。さらに一部のイオンは外側の電子と内側のイオンにより作られる電場により加速される。この現象を解明するためにレーザープラズマイオンの諸特性を調べる実験が行われている。ビームに垂直に電場と磁場を同一方向にかけてそのイオン核種、価数、エネルギーの特定が可能なトムソンパラボラ法による測定が銅について行われた。その結果 12-18+, 50-220 keV, 1.1×10^5 ions/sr/shot のビームの発生を確認した。今後はレーザー条件による違い、他の核種などより詳細なデータの取得を行っていく。

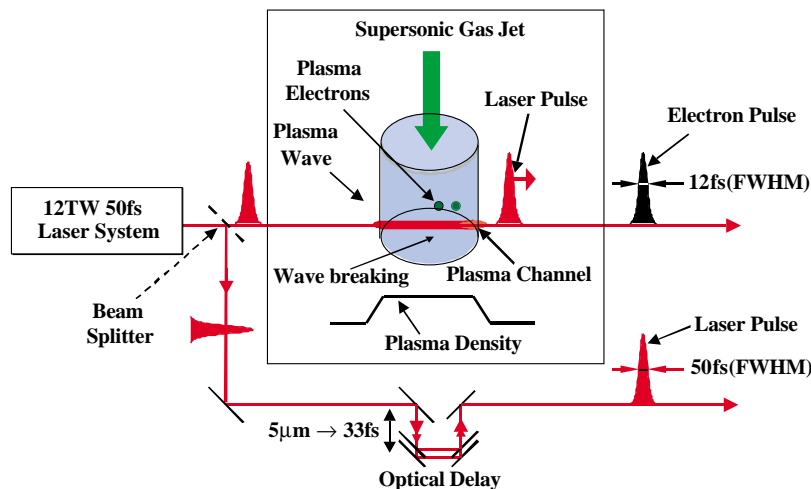


図4：レーザープラズマライナックによる 10fs 電子シングルバンチ生成