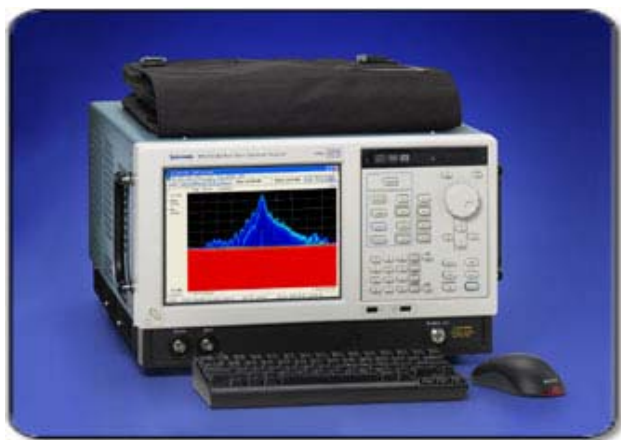


SPring-8 (理化学研究所播磨研究所) 「夢の光」X線レーザーの実現に テクトロニクスの実タイム・スペクトラム・アナライザが貢献



■ 概要

課題	パルス変調されたマイクロ波を毎秒 60 回の頻度で発生しており、そのスペクトルを 1 パルスずつ解析しなかった。また、数秒間にわたるパルス列の特性も知りたかった。しかし適当な測定器がこれまでなかった。
ソリューション	リアルタイム・スペクトラム・アナライザ (RTSA) 「RSA6114A 型」と「オプション 02」、「オプション 20」、「オプション 110」を選定した。
利点	数秒にわたって個々のパルスの特性を素早く解析することで、マイクロ波パルス列の発生タイミングや位相などの調整が簡単になる。また、パルス高周波機器の特性を詳しく測定できる。

■ 背景 ■

より強力な X 線を求めて

「エックス (X) 線」といえば、胸部レントゲン撮影がなじみ深い。非常に弱い X 線を人体に照射し、撮影画像を病気の診断に役立てる。一方、強力な X 線は、物質の微細な構造を調べるために使われる。より強力な X 線を使うと、少ない量の材料で、微細な構造を調べられるようになる。X 線は光と同じ電磁波であり、光のレーザーと同様に X 線のレーザーを作れば、波長と位相のそろった極めて強力な X 線が利用できる。ただし、強力な X 線レーザーの開発は容易ではない。現在考えられているのは、電子を非常に大きなエネルギーで加速し、周期的に変化する磁場中に電子を通して X 線を発生させるレーザー装置「X 線自由電子レーザー」である。

日本では、独立行政法人理化学研究所が財団法人高輝度光科学研究センターと協力して「X 線自由電子レーザー」の開発に取り組んでいる。

こういった大型プロジェクトでは、基本要素の確認作業が欠かせない。そのため「X 線自由電子レーザー」のプロトタイプ (試験加速器) が世界最高性能の大型放射光施設「SPring-8」の敷地内に建設済みである。加速エネルギーは 250 メガエレクトロンボルト (MeV)。電子ビームを射出する「電子銃」、電子を加速する「線形加速器」、X 線を発生する「アンジュレータ (周期磁場)」といった基本要素はすべて備えている。2006 年 6 月には波長 49 ナノメートル (nm) のレーザー増幅実験に成功し、開発プロジェクトを大きく前進させた。

■ 課題 ■

クライストロンの安定動作

X 線自由電子レーザーでは、電子を光速の 99.9999% の速度に加速する。電子を加速する装置「線形加速器」には、加速管と呼ばれる純銅の管が並んでいる。マイクロ波パルスによる高周波の高電界を加速管に送り込み、電子を連続的に加速していく。

加速管に供給するマイクロ波パルスは、専用の装置で生成する。「パルスモジュレータ」と呼ぶ変調器と「クライストロン」と呼ぶ真空管増幅器を使い、マイクロ波パルスを 1 秒間に 60 回 (60Hz) の割合で発生させる。

ここで重要なのは、マイクロ波パルスの安定性である。マイクロ波パルスが安定しないと、安定した加速性能が得られないからだ。現在はマイクロ波パルスをモニターするシステムを備えており、検波したマイクロ波信号をアナログ・デジタル変換 (A-D 変換) ボードに取り込み、ネットワーク経由でメモリーに記憶している。モニターしたパルスを見ながら、パルスの発生タイミングや位相などを調整する。ただし、メモリーが記録できる期間は約 10 マイクロ秒とそれほど長くない。マイクロ波パルスの長さは 2.5 マイクロ秒、パルスの発生周期は 60 分の 1 秒 (16.67 ミリ秒) なので、1 回に取り込めるパルスは 1 個だけである。数多くのパルスを解析するには、多くの手間を必要とする。

またモニター・システムでは、検波用の発振器とクライストロンの発振器を共用していた。発振器を共用している場合、発振器特有の雑音が見えてしまう。この雑音を見るには、相関のない



理化学研究所播磨研究所
新竹電子ビーム光学研究室
研究員 前坂 比呂和様

発振器を積んだ、個別の測定器を使う必要がある。

■ 機種選定 ■

マイクロ波パルスを1個ずつ解析

そこで新たに導入を決めたのが、リアルタイム・スペクトラム・アナライザ「RSA6114A 型」である。個々のマイクロ波パルスを取り込んで、特性を解析、表示できるスペクトラム・アナライザだ。「RSA6114A 型」の測定周波数範囲は9kHz~14GHz。クライストロンの中心周波数である2.856GHzと5.712GHzを十分カバーする。オプションは「オプション 02」、「オプション 20」、「オプション 110」を採用した。「オプション 02」はレコード長を標準の4倍にすると同時に周波数マスク・トリガを実現するオプション、「オプション 110」は取り込み帯域幅を110MHzに広げる(標準は40MHz)オプションである。両者を組み合わせることで、取り込み帯域幅110MHzでのレコード長が1.706秒、同60MHzでのレコード長が3.413秒になる。「1回のトリガで、パルス列を数秒間にわたって取り込みたい」(理化学研究所 播磨研究所 新竹電子ビーム光学研究室 研究員 前坂比呂和様)とのご要望に応える性能を発揮していることが分かる。



クライストロンの外観。線形加速器にマイクロ波パルスを供給する

「オプション 20」は、パルスの立ち上がり時間、パルス幅、パルス・ピーク電力、パルス平均電力、パルス・パルス間位相周波数偏差などを測定するオプションである。個々のパルスを素早く解析し、一覧表示してくれる。

機種選定に当たっては、マイクロ波のパルスを1個ずつ取り込んで解析する機能が必須だった。「この要望に応えられるのは、テクトロニクス社のリアルタイム・スペクトラム・アナライザだけでした。テクトロニクス製品の中で、どれにしようかということで、最新の機能を備えたフラッグシップ・モデルのRSA6114A型を選定しました」(前坂様)。

「RSA6114A 型」には、1464 個のスペクトラム情報をまとめ、1 画面(1 フレーム)に周波数別に発生頻度を色表示する「DPX ライブ・スペクトラム表示」機能がある。「初めにパルス列の発生状況を素早く把握するには、とても良い機能だと感じました」(前坂様)。

■ 今後の展望 ■

クライストロンを60台以上並べる

なおプロトタイプ(試験加速器)では、全長60メートルのトンネル内に直線状にさまざまな装置を配置してある。



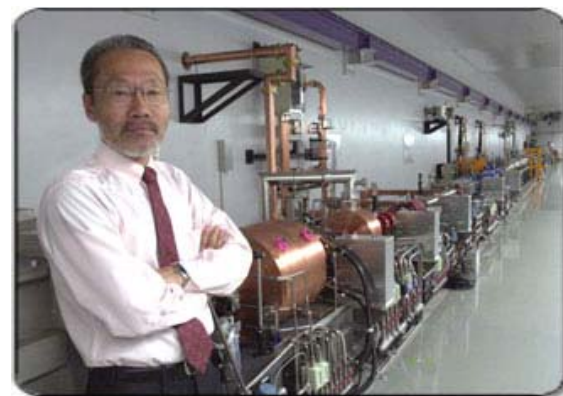
理化学研究所播磨研究所専任研究員の大竹 雄次様(左)と同研究員の前坂 比呂和様(右)

「X 線自由電子レーザーの開発で最も難しいのは、トンネル内の機器をまっすぐにしっかりと並べること」(同 主任研究員 新竹 積様)。

特に重要なのはアンジュレータにおける電子ビーム軌道の微調整(アラインメント)である。アラインメント装置の架台には、温度変化による伸び縮みの少ないセラミック材料(コージライト)を採用した。「熱膨張係数の低い材料を探していて偶然、見つけることができました」(新竹様)。

「X 線自由電子レーザー」の本装置では、トンネルの全長は600メートル以上にも及ぶ。8ギガエレクトロンボルト(GeV)の加速エネルギーで、発振波長0.06ナノメートル(nm)のX線を取り出す。2010年度の運転開始を目指し、建設が始まったところである。

当然ながら、線形加速器も強力になる。5.712GHzのマイクロ波を扱うクライストロンを60台以上並べる予定である。「クライストロンでパルスを増幅する前後のスペクトルの違いや、時間経過によるスペクトルの変化などの解析にも「RSA6114A 型」を活用したいと考えています」(前坂様)。「夢の光」の実現に向け、「RSA6114A 型」はさらに活躍してくれるに違いない。



理化学研究所播磨研究所主任研究員の新竹 積様。背後にあるのがX線自由電子レーザーのプロトタイプ(試験加速器)