

高エネルギー加速器研究機構(KEK)、シンクロトロン内のベータトロン振動解明にリアルタイム・スペクトラム・アナライザを導入。



■ 概要

課題	加速器を運用するにあたって、ビーム不安定要素となっているベータトロン振動を抑えなければならない。八極磁場が有効なことはわかっているが、そのメカニズム解明が難しかった。
ソリューション	従来のスペクトラム・アナライザではリアルタイム性がないため、現象を的確に捉えられなかったが、リアルタイム・スペクトラム・アナライザを導入したことで、周波数領域でのパワーの時間変化が見られるようになり、振動メカニズムの解明に光明がさした。
利点	メモリの大きさとマスク・トリガで、長いスパンのデータを取込んだときの解析がしやすくなり、不安定要素の追究に効果が発揮された。

●国内最大級の加速器施設

高エネルギー加速器研究機構(茨城県つくば市)様は国内最大級の加速器を持つ施設で、素粒子原子科学研究所、物質構造科学研究所、加速器研究施設などの研究施設があり、高いエネルギーの粒子を衝突させ、発生させた粒子の反応を調べる素粒子実験や、高エネルギー粒子が運動状態を変える際に放つ強力な光(放射光)を使って物質の極微の世界の構造を調べる研究などが行なわれています。

加速器には大別していくつかの種類がありますが、KEK 様には高エネルギー実験で使う「素粒子実験用衝突型加速器」と、物質の微細な構造を研究するための放射光を発生させる「放射光用加速器」などがあります。この「放射光用加速器」の運

転維持管理しているのが宮島氏です。加速器を運用して陽子や電子を加速するとき、電磁石を使って加速器の設計軌道上を粒子が安定して周回するように制御しますが、加速器の条件によってはビームの振動が励起される現象が起きます。宮島氏は、その振動をどのように抑えるかを研究し、「非線形共鳴近傍でのビームダイナミクスに関する研究」のテーマで、日本加速学会の第一回奨励賞を受賞しています。

●放射光用加速器の運用試験に

放射光用加速器は、加速されて非常に高いエネルギーを持った光速に近いスピードの電子を、長時間加速器の設計軌道上に閉じ込め、放射光を発生させるための装置です。加速器中に閉じ込められたほぼ光速の電子は、磁場によって曲げられるときに放射光を出しますが、この「放射光」は極紫外線から X 線に及ぶ広い波長領域をもっていて、また指向性の強い光となっています。このような特徴をもつ放射光は、強力な光源として、多種多様な研究に利用されています。最近では、たんぱく質の立体構造解析などにも利用されています。宮島氏は、「加速器を使って放射光をつくるまでの業務、研究を行っています。放射光は物質構造解析の強力な手段ですが、より高度な実験を行なうにはさらに強度の強い光が求められており、そのためにより小さいサイズで安定したビームを作りたいというのが、私たちの研究目的になっています」と語っています。

●ビームの振動が問題

「より安定した光を供給するためには、電子ビームを設計軌道上で安定して周回させる必要があります。ですが、加速器の条件によってはビーム不安定性と呼ばれる現象が生じ、ビームサイズの増加やビーム寿命の悪化などを引き起こしてしまいます」と、宮島氏は運用上の問題点を指摘します。

電子ビームを長時間同じ軌道にとどめるには、設計軌道に向けてビーム



大学共同利用機関法人
高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所
理学博士
宮島 司氏

を集束させる必要があり、そのためにレンズの役割をする四極電蓄を加速器中に配置しています。このとき、個々の電子は設計軌道上を振動しながら周回し、電子ビーム全体としてはある広がりを持って周回しています。この振動のことをベータトロン振動と呼びます。しかし、加速器の運転条件によっては、ベータトロン振動がより強く励起されるビーム不安定性現象が発生します。このとき電子ビームのサイズは増大し、放射光の強度の低下などの原因となってしまいます。

●ビームの不安定性のメカニズムを解明

放射光用加速器では、より強度の強い放射光を発生させるために、出来るだけ電子ビームを小さくしています。ところが、ビーム不安定性現象により振動が励起されている状態では、ビームサイズが膨らむため放射光の強度が低下してしまいます。ここで、宮島氏の研究テーマの一つである「ビーム



の不安定性」が問題となってきます。宮島氏は「『八極磁場』を使えば、不安定性が抑えられるのはわかっていますが、そのメカニズムがまだ完全には解明されていません」と語っています。「八極磁場の強さがある値以上になったときに、ビーム不安定性が急激に抑制されることがわかっています。この現象をより詳細に研究する目的で、パルス八極電磁石という短時間で八極磁場を変化させる実験装置を開発し、実験を行っています」と宮島氏。「ビームは電荷を持っていますので、ビームが振動していると、ビームの位置検出のための電極に信号の強弱が表れ、ビーム不安定性が起きていることがわかりますので、その信号をリアルタイム・スペクトラム・アナライザにインプットして計測しています」と、解明への手がかりを説明しています。

現在、もう一歩進んだメカニズムを調べているという宮島氏は、「リアルタイム・スペクトラム・アナライザを使った実験を行った結果、原因が見えかかっているところです」と八極磁場の効果解明に光明がさしていることを示唆しています。「この現象測定には、スペクトラムを連続して高速に捉える装置が不可欠で、リアルタイム・スペクトラム・アナライザが非常に有効でした」。

さらに、時間に対するパワー変化を測定しているため、マスクトリガ機能を使用することで、ゼロスパンでしか見られなかった現象が、マスクをかけた部分をつぶさに観察することができ、時間軸のパワー測定が可能になったことも、実験の大きな手助けになったようです。ビームが不安定なときには色々なところに周波数成分が出現するため、マスクトリガが有効になったといいます。「現在の実験計測のためにはリアルタイム・スペクトラム・アナライザでなければ対応できませんでした」と宮島氏、「やはり、リアルタイム・スペクトラム・アナライザが持つダイナミックに変化する信号の測定ができるというメリットは大きかったですね。実際に加速器を運転して、よくわからないビーム不安定性が起きたときにも、画面からその情報を得ることができます」と語っています。

●リアルタイム性が選定のポイント

測定しているビームの周波数は 500MHz ですが、「性能的な要求としては、研究対象である現象が数十マイクロ秒と比較的長いため、ある程度のメモリ長があることと、1GHz 周辺まで測定できることでした。しかし、最も重要だったのはリアルタイム性でした」と、その選定ポイントを宮島氏は語っています。加速器の中でビーム不安定性が励起されると、中心周波数の横に不安定な状態のときに出現するサイドバンドという周波数が表れますが、その変化を捉えるにはリアルタイム・スペクトラム・アナライザでスペクトラムをリアルタイムで高速に取込む必要があります。実際には、八極磁場を急激に変化させたときのサイドバンドのピーク値の変化を見て、ビーム不安定性の様子はどう変わるか測定しています。八極磁場の変化に沿ってすぐにビーム不安定性の信号が変わると思われがちですが、実際は応答時間の遅れなどが観測されており、それが現象のメカニズム解明の手がかりになります。宮島氏の行っている実験では、このような動的性質を測るということに着目しているため、リアルタイム性がないと測定が困難になってしまおうといいます。「私の中では、周波数領域の中で時間変化が追えるというのが、非常に大きいですね。パワーを含めて」と、そのメリットを十分に活用している感がうかがえます。

さらに、時間に対するパワー変化を測定しているため、マスクトリガ機能を使用することで、ゼロスパンでしか見られなかった現象が、マスクをかけた部分をつぶさに観察することができ、時間軸のパワー測定が可能になったことも、実験の大きな手助けになったようです。ビームが不安定なときには色々なところに周波数成分が出現するため、マスクトリガが有効になったといいます。「現在の実験計測のためにはリアルタイム・スペクトラム・アナライザでなければ対応できませんでした」と宮島氏、「やはり、リアルタイム・スペクトラム・アナライザが持つダイナミックに変化する信号の測定ができるというメリットは大きかったですね。実際に加速器を運転して、よくわからないビーム不安定性が起きたときにも、画面からその情報を得ることができます」と語っています。