

氏 名	あ さか たか お 安 積 隆 夫
学位の種類	博 士 (理 学)
学位記番号	論理博第 1433 号
学位授与の日付	平成 15 年 11 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目	大型電子線形加速器の安定化に関する研究

論文調査委員 (主査) 教授 野田 章 教授 今井 憲一 教授 谷 森 達

### 論 文 内 容 の 要 旨

電子ビームは高エネルギー実験や放射光の利用研究の施設に置いて広範に用いられているが、こうした研究の高度化に伴い、電子ビームの大電流、低エミッタンス等のより高度な性能が不可欠になってきつつある。本研究は高輝度放射光源 SPring-8 の入射器として用いられている S-バンド (2856MHz) 1 GeV 電子線形加速器のエネルギー及び出力ビーム強度の安定化を図り、放射光源としての安定性の飛躍的な向上を図ることを目的として遂行された。まず、種々のエネルギー及びビーム強度の変動の測定を行い、その時間特性の解析を行ってこうした変動の発生する原因を推察している。ついで、線形加速器の個々の構成要素である高周波装置の精密測定を実行して、その外乱に対する応答特性を解明し、外乱要因を抑制することを試み、ビームエネルギーの長時間にわたる変動を 0.06% (rms) 以下 (10 分の短時間では 0.03% 以下) にまで改善を行っている。

次に線形加速器の出力ビームをシンクロトロンを経由して蓄積リングに入射する際のビームの受け渡しの安定化を図るため、両者の高周波系の完全同期を実現するための回路系の構築を行っている。線形加速器は 2856 MHz、シンクロトロンおよび蓄積リングは 508.58 MHz の高周波周波数を使用しており、両者は整数倍の関係に無いため、従来は同期をとることは容易ではなく、周波数逡倍器及び分周器を多段に組み合わせる必要があった。こうしたシステムでは回路構成が複雑になるだけでなく、多数のタイミングモジュールが不可欠となるため、時間ジッターの増大が避けられず、加速器の運転の安定化の上での大きな制約となっていた。本研究では蓄積リングの高周波の周波数 508.58 MHz を基準クロックとして動作する任意波形発生器により、線形加速器の周波数 2856 MHz と分周関係にある 89.25 MHz の周波数の波形を生成することにより、両者の位相の同期を取るというまったく新たな方式を採用している。この方式によれば任意の 2 つの周波数間でタイムジッターを抑制した条件で同期を取ることが可能となり、加速器の制御の安定化の上で飛躍的な向上が実現できる。実際、SPring-8 の敷地内に存在し、上述の 1 GeV 電子線形加速器から入射ビームの供給を受けている姫路工業大学の New SUBARU は 500 MHz の周波数の高周波加速空洞を有しているが、これに対しても安定なビームの供給が本方式により実現している。本研究においては、こうした方式を環境温度変化に対して極めて安定した動作の実現できる狭帯域のバンドパスフィルターである水晶フィルターの導入により実現している。この同期タイミング方式の導入後、SPring-8 のビームエネルギーの安定度は従来の 0.03% (rms) から 0.009% (rms) に改善されている。

本研究ではビーム強度の増大及び長時間にわたるビームエネルギーの安定化にも意を用い、線形加速器出力部にシケインとエネルギー変調用加速管を設置することにより、ビーム強度を従来に比して 5 倍に増加させるとともに、長時間のビームエネルギー安定性についても、常時 0.01% (rms) 以下に抑えることを実現している。

本研究により高輝度放射光源 SPring-8 の蓄積リングへの線形加速器からの入射ビーム強度の増加及び長時間にわたる安定性が保証され、放射光強度の変動の抑制を目的として、近く採用が予定されているトップアップ運転に耐える入射ビームの安定化の見通しが得られている。これに加えて、本研究により SPring-8 という固有の加速器にとどまらず、広く一般の

加速器において異なる高周波加速装置間で精度良く同期を取る方式が確立された。

## 論文審査の結果の要旨

申請者は、放射光の利用研究の飛躍的な発展を目指し、放射光源 SPring-8 のビーム特性の安定化を図る目的で、入射器の 1 GeV 電子線形加速器のエネルギー及びビーム強度の安定化に取り組んできた。具体的には、以下のような取り組みを行っている。

- (1) 線形加速器の変動に関して、外乱が高周波装置に及ぼす影響を周期により分類し、周辺温度、電源電力、雑音などの環境の変化と個々の高周波装置の出力電力や位相の変動との相関関係を定式化している。そのうえで実際にビーム変動の測定を行い、周波数解析を行って周波数成分毎に支配的要素となる高周波装置の同定を行った結果、2856MHz のクライストロン基準高周波信号の伝送に用いられている 90m 長の矩形導波管が温度変化により伸縮し、長時間周期の位相変動を生じていた事実とクライストロン空洞の冷却水の温度変動に伴う 28分周期の位相変動の存在を見いだしている。

これらに対して、90m 長の矩形導波管を断熱材で覆い、室温制御方式の変更も行って、最下流部での位相変動を  $1^\circ$  以内に抑えると共にクライストロン冷却の制御方式を精密な温度制御の可能なインバータ方式に変更し、位相変動を  $0.5^\circ$  以下に改善している。さらにクライストロン電源の de-Qing 率を最適調整し、0.14% (rms) 以下の安定度を達成している。

- (2) 入射器の線形加速器とシンクロトロンないしは蓄積リングの加速周波数が非同期であることにより生ずるビーム電流強度およびエネルギーの顕著な変動の抑制のため、任意の 2 つの周波数を有する高周波加速系の間で同期をとるシステムを新たに提案し、これを用いることによりパルス幅 250ps のビーム電流変動を従来の 5 分の 1 以下に、また非同期運転では 0.03% (rms) であったビーム重心エネルギーの変動を 0.009% (rms) にまで抑制している。

この同期システムは一方の周波数（申請論文の場合は 508.58MHz または 500MHz）を基準クロックとして動作する任意波形発生器により、他方の周波数（申請論文の場合は 2856MHz）と分周関係にある周波数（申請論文の場合は 89.25MHz）を生成することにより、両者の位相の同期をとるという全く新たな方式であり、この学位申請論文の最も本質的な部分を構成している。大電力高周波系を扱う加速器の場合、選択可能なクライストロンの周波数により、加速周波数が決定されてしまうことが多いが、この方式はこうした周波数に左右されることなく、複数の加速器間での同期運転を可能とするものであり、画期的なものと評価できる。

- (3) 線形加速器からの大電流ビームのエネルギー幅の縮小によりシンクロトロンへの入射効率を増大し、長時間にわたってこの状態を維持するため、シケイン軌道と称するビームエネルギーに比例して軌道長が増減するシステムとこれにより生じた位相差を利用して、エネルギーフィードバックをかけるエネルギー変調加速管から構成されるエネルギー圧縮・安定化システムを導入することにより、ビームエネルギーの安定性を長時間にわたり常に 0.01% (rms) 以下に抑え、パルス幅 40ns のビームでは従来の 5 倍の 350mA の大強度ビームの入射を可能としている。

申請者を中心として行われた本研究により、任意の 2 つの加速周波数を有する加速器間で高精度の同期を実現するシステムが開発され、SPring-8 および New SUBARU への電子ビーム入射システムにおいてその実用化が実証された。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。

平成 15 年 10 月 9 日、主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問した結果、合格と認めた。

また、電磁気学、加速器物理学、ビーム物理学および放射線計測学については口頭の、外国語（英語）については筆答および口頭の試問を行い、本学大学院博士後期課程を修了した者と同等以上の学識を有することを確認した。