

氏 名 増田 剛正

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大乙第 157 号

学位授与の日付 平成 18 年 3 月 24 日

学位授与の要件 学位規則第 6 条第 2 項該当

学位論文題目 Development of a control system for stable linac operation

論文審査委員 主 査 教授 川端 節彌
教授 春日 俊夫
教授 浦川 順治
教授 黒川 眞一
教授 藤井 啓文
教授 加藤 直彦（高エネルギー加
速器研究機構）
教授 上窪田 紀彦（高エネルギー
加速器研究機構）
教授 金谷 範一（茨城大学）

論文内容の要旨

本研究では、線型加速器の連続安定入射を実現する高い信頼性と可用性を持つ新制御システムの開発と、多数点のデータをビームに同期して取得し、全ての取得データをリレーショナルデータベース (RDB) に記録することが出来るイベント同期型データ収集システムの開発を行った。前者は、制御システムの安定性の向上と線型加速器の運転可用性の向上に特に配慮した設計思想を導入して開発を行い、結果として 2005 年の SPring-8 トップアップ運転において、線型加速器制御システムのトラブルによる連続入射の中断を無くすことに成功した。また後者は、SPring-8 の 1-GeV 線型加速器だけでなく、将来的な X 線自由電子レーザー加速器 SCSS (SPring-8 Compact SASE Source) への適用をも念頭に置き、高速なデータ収集やフィードバック制御が可能な汎用的なフレームワークとして開発を行った。この新しいフレームワークを、1-GeV 線型加速器の非破壊ビーム位置モニター (BPM) 用データ収集システムに実際に適用し、60Hz までの全てのビーム出射 (ショット) に同期して全 BPM データを取得し、汎用的なリレーショナルデータベース (RDB) に記録するという、極めて高度な新しいシステムの開発に成功した。全ショット、全 BPM のデータをショット毎に RDB に記録出来るため、収集データを用いたフィードバック制御に応用可能なだけでなく、過去の任意の時点での任意のショットのビーム軌道を再現し、解析することも可能になっている。汎用的なイベント同期型のデータ収集システムに関する研究成果は 2005 年 NIM に掲載された。

SPring-8 の線型加速器は、8-GeV 蓄積リングへのトップアップ入射と、1.5GeV NewSUBARU 蓄積リングへの同時トップアップ入射に対応するため、数ヶ月という長期間にわたって高度なビーム安定性が求められる加速器である。入射ビームのエネルギーと軌道の変動に対して敏感な NewSUBARU への入射においては、高い入射効率を安定に維持するためのエネルギー変動幅の実効的な許容値は現状で 0.03% (rms) である。このような線型加速器のビーム安定性を長期間にわたって実現するためには、ビーム不安定性等の究明のためのビームショット毎の BPM データの収集が必要であり、収集した BPM データを用いたビーム安定化のためのフィードバック制御も必要となる。しかしながら、データ収集系を構築する土台となるべき旧来の線型加速器制御システムの能力には問題があり、これらの実現のためには本研究を待たなければならなかった。

本研究では、先ず、最新の OS 技術、リアルタイム制御性、FPGA を用いた電子回路技術などを幅広く探求し、これらの研究成果を基に線型加速器制御システムのソフトウェアおよびハードウェアの刷新的な開発を行った。ソフトウェアについては、リアルタイム OS の広範な研究の結果として x86 Solaris を VME 計算機の OS として採用し、既に SPring-8 標準制御フレームワークとして、蓄積リングやブースター制御システムで実績がある MADOCA (Message And Database Oriented Control Architecture) を適用した。ハードウェアについては根本的な見直しを行い、新規に開発した光リンクリモート I/O システム、モーターコントロールユニット等の導入によって、耐ノイズ性能の向上を図り、機器の緊密で効率的な制御を実現する機能集約型の構成を実現した。さらに、光リンクリモート I/O システムとモーターコントロールユニットは、上位計算機の状態に依らず現在の出力や位置情報を保持出来るように設計したことで、機器制御用計算機のトラブル時でも線型加速器の継続運転が可能となり、運転の可用性向上に大いに貢献している。これらの開発によって、高い安定性と高いスループット性、および強力なデータロギングシステムを有する制御システムが実現し、線型加速器の安定化の基盤となる制御システムとなった。

次に、開発した新線型加速器制御システムを土台として、ビームの不安定性の原因究明やフィードバック制御等に利用出来るように、線型加速器の全 BPM のデータをショット毎 (イベント) に同期して取得し、かつ、取得した全てのデータを RDB に格納するという、新しいデータ収集システムの開発を行った。この新しいイベント同期型データ収集システムは、計画中の C バンド加速管を用いた 8 GeV の XFEL である SCSS の 60~120Hz のデータ収集にも適用出来るように、高速データ収集が可能な汎用的フレームワークとして開発を行った。

線型加速器 BPM のためのデータ収集システムは、データを取得する 6 台の VME 計算機と取得されたデータを RDB に書き込む 1 台の PC から構成され、これらの計算機間を共有メモリネットワーク (SHM-net) で接続し、高速リアルタイムデータ転送と分散計算機上で動作するソフトウェアプロセス間の同期を実現している。VME で取得されたデータは全てこの SHM-net 経由で伝送され、PC から読み出され、RDB へ書き込まれる。SHM-net 上にはリングバッファ型データバンクを用意し、PC での読み出し遅延への対応と将来的な高速フィードバックへの利用を可能にするようにデータ構造設計を行っている。同一イベントの識別は、SHM-net の割り込み時に、VME 間での整合性を保つためのイベント番号と、NTP によって時刻が合わされたタイムスタンプの両方を用いて行っている。Solaris のリアルタイム性能と VME 計算機の高速な CPU、イベントソースとして CPU への割り込みを用いることで、線型加速器の最大繰り返し運転周期である 60Hz で取りこぼしのないデータ収集を実現することに成功した。RDB への書き込み部分に、バルクインサート等の既に確立した高速化手法を用いることで、60Hz での連続データ収集は十分に可能となってい

る。このことは、本研究で開発した新しいデータ収集システムが、将来の適用が予定されている SCSS のビームモニター用データ収集システムの要求に応え得る高いポテンシャルを有していることを示している。

本データ収集システムによって RDB へ収集された BPM データは、実運転では5分間隔程度のビームの軌道補正や、エネルギー補正に利用されており、ビームエネルギーの長期的安定度 0.02% (rms)、ビーム位置安定度 30 μ m (rms) の達成に貢献している。

本データ収集システムにおいて特筆すべき事は、パルスマシンである線型加速器において、60pps 程度の速い繰り返し運転時でも、過去の任意の時点でのビームの状態を再現し、機器との相関を解析することが可能になったことである。本システム応用の好例として、実際に線型加速器で発見された過大バースト電流の解析がある。これは、通常の 1ns のビームの約 40ns 後方に 2 μ s にわたって稀に電子ビームが出射されるという現象で、当初この現象は直前の加速器運転停止期間中に交換した電子銃カソードの問題ではないかと考えられていた。しかしながら、RDB にアーカイブされた全 BPM データを解析することで、1ヶ月から2ヶ月に1回程度の非常に低い頻度ではあるが、カソードの交換前にもバースト電流が発生していることが判明し原因究明の一助となった。現時点では原因は不明であるが、電子銃グリッドの不具合が疑われている。また、出荷電荷量の管理上問題となりうる NewSUBARU へのバースト電流の出荷が、1年前にただ1度だけ起こったが、放射線管理上問題になるような電荷量の出荷がなかったことも確認出来ている。これらはいずれも、本研究の成果無しには為し得なかったことである。

本研究は、土台となる新線型加速器制御システムの開発に始まり BPM データ収集システムに適用したイベント同期型データ収集システムの開発に結実し、これらの成果を通して、線型加速器の安定性と電子ビーム性能の向上に大きく貢献し、SPring-8 蓄積リングのトップアップ運転を制御基盤として堅持することに成功している。

論文の審査結果の要旨

SPring-8は第三世代放射光源であり、8GeVの蓄積リングで発生する高輝度放射光(X線)は、科学技術の幅広い研究分野で知見の向上を目指して利用実験に供されている。近年、SPring-8の蓄積リングに「トップアップ運転」が導入されることになった。トップアップ運転を安定に行うために、入射器である1GeV線型加速器には、長期間にわたる高度な機器安定性とそれに基づくビーム安定性が求められる。増田 剛氏は、最新の計算機OS技術、FPGA電子回路技術、実時間制御性などを幅広く探求し、最新の知見に基づき、安定性に配慮した設計思想を導入して、線型加速器制御システムを新規開発し、線形加速器の安定性の向上に大きく貢献した。増田氏はまた、電子ビームの運動学的研究のために、電子ビームモニター系のデータを収集する実時間制御性を有した新発想のデータ収集系を開発し、世界に先駆けてSPring-8の線形加速器に導入し、電子ビームの安定性向上に貢献した。

具体的には、線型加速器の機器を制御するVMEバス用CPUを広範囲に渡って探求し、これを運用するオペレーティングシステム(OS)を新規に求めて、スケジューラ機能、タスク切り替え処理応答性等の実時間性能を詳細に研究し、これらの研究成果を基にして、線型加速器制御ソフトウェアの更新を行い、制御ソフトウェアの大幅な安定化と能力向上、ビームや機器のモニタリング機能やデータロギング機能の強化と共に、全加速器の密接な制御性を実現することに成功した。また、ハードウェアについても、トップアップ運転実現に耐えうるように、FPGAを用いた高速光通信型入出力制御モジュール、ネットワーク接続型のインテリジェントなモータ制御用コントローラ等を、先進の技術や独自のアイデアを用いて新規に開発し、線型加速器制御システムハードウェアの全面的な再構築を行った。さらに、線形加速器に設置されている全47台のビーム位置モニターシステムについて、共有メモリネットワークのリアルタイム高速通信機能を用い、最大60 ppsのビーム運転に同期して取得し、かつ全データを分散型リレーショナルデータベースに格納するという、世界でも他に類を見ない新しいシステムを実用化した。このシステムにより、通常では得られない、単発的な異常についての知見を得ること、加速器のゆっくりしたドリフトの原因の特定とフィードバックによる安定化などの成果があがっている。

以上に述べたように、増田氏の仕事は、独創性に富み、また、加速器制御システムの発展に貢献するものであることから、審査委員会は全員一致で、増田氏を合格とした。