

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月14日現在

機関番号：82118
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23740222
 研究課題名（和文）革新的アラームシステムを基軸とした大型加速器用超高可用性ビーム運転システムの開発
 研究課題名（英文）Development of ultra-high availability beam operation system using innovative alarm system for large scale accelerator
 研究代表者
 佐藤 政則（SATO MASANORI）
 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授
 研究者番号：90353367

研究成果の概要（和文）：

本研究では、次世代大型加速器における超高可用性ビーム運転システムの開発研究をおこなった。KEK 電子陽電子入射器の実ビーム運転において、EPICS 制御システムに基づく大規模運転パラメーターの安定収集に成功した。また、高速・高精度なオンラインビームシミュレーションに基づいたフィードバックによる高効率なビーム運転システムの開発に取り組み、実ビーム運転に応用した場合の有用性に関する知見を得た。

研究成果の概要（英文）：

In this research, the ultra-high availability beam operation system for the next generation large scale accelerator has been studied. This system is based on the innovative alarm system. During the beam operation at KEK electron/positron injector linac, the large number of operation data has been stably acquired via EPICS control system framework. We have obtained knowledge on the feasibility of high-efficient feedback operation using the on-line beam simulation and fast diagnostic system to real beam operation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

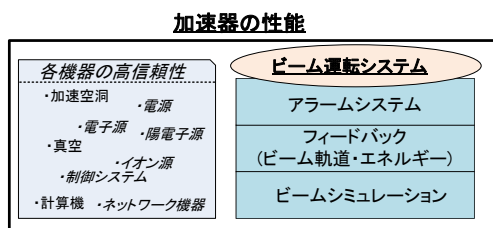
キーワード：加速器，線形加速器，フィードバック，アラームシステム，ビーム制御

1. 研究開始当初の背景

粒子加速器を用いた研究テーマは、高エネルギー物理学実験を始めとして、基礎物質科学・ナノテクノロジー、および生命科学など多岐にわたる。次世代の高度な利用実験のためには、超高輝度・高安定なビームの利用が必須であり、粒子加速器の性能が利用実験の成果を大きく左右することとなる。加速器の性能とは、電子源・加速空洞・高周波源・電磁石および電源など、個々の構成機器の性能・信頼性はもちろんのこと、ビーム運転の可用性から決定付けられる指標である。（図1）

2010年の春、高エネルギー加速器研究機構（KEK）・電子陽電子入射器では、3つの異なるリングへの同時トップアップ入射を実現した。これは、50 Hz 毎に異なる質（エネルギーおよび電荷量）のビームを輸送し、異なるリングへ振り分けて入射する画期的な運転技術であり、高効率なビーム運転の好例と言える。このように複雑なビーム運転形態においては、長期間安定なビーム運転を実現するためのシステム構築が特に重要となる。また、ILCを始めとした次世代の超大型加速器においては、制御対象機器数が飛躍的に増大することから、高安定なビーム運転は格段に

困難となる。このように、複雑なビーム運転形態や超大型加速器においては、種々の要因が複雑に影響してビーム変動を引き起こすため、単純なビーム軌道およびエネルギーフィードバックシステムでは、高安定なビーム



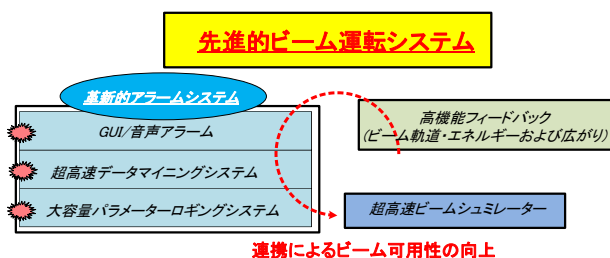
運転は実現困難である。このため、ビームダウンタイムを極限まで低減させ、ビームの可用性を最大限に高めるための、革新的なビーム運転システムの開発が切望されている。

図1 加速器の性能

2. 研究の目的

従来の加速器科学分野においては、多くの研究者が加速空洞・電源・真空システムなどのハードウェア開発、あるいは関連したビーム物理学の研究に注力してきた。一方、加速器ビーム運転に関するソフトウェア技術は、計算機科学の発展にともない大幅な進歩を遂げたと言えるが、近年のビーム運転システムは、ILC に代表される超大型加速器の運転にそのまま適用できるレベルとは言い難い。大規模加速器では、その制御対象点数の多さから、単純な機器故障に起因しない場合のビーム変動の抑制が困難である。

これらの理由から、次世代加速器の運転効率を最大限に高めるためには、従来の水準を超える新しいビーム運転システムが不可欠である。本申請では、「革新的アラームシ



テム」・「高機能フィードバック」・「超高速ビームシミュレーター」のソフトウェア群から構成される、「先進的ビーム運転システム」を開発する。

図2 先進的ビーム運転システム

3. 研究の方法

本申請研究では、「先進的ビーム運転システム」に必要とされる、下記の項目に関する開発研究および検証実験をおこなう。

(1) 革新的アラームシステムの開発

近年、様々な分野へ応用されつつある“遺伝的アルゴリズム”を基盤とした、「革新的アラームシステム」の開発研究をおこなう。ILC や SuperKEKB などの、次世代大規模加速器を高安定に運転するためには、膨大な数の機器および運転パラメータを制御・監視する必要がある。通常のアラームシステムでは、パラメータ毎の閾値(上限値・下限値)を設定し、現在の測定値がそれらの範囲から外れた場合に、視覚的あるいは音的に運転者へ注意を喚起する目的で使用されている。しかしながら、次世代の大規模加速器を、長期間安定に運転するためには、従来よりも一段進んだ先進的なアラームシステムが不可欠であると考えられる。そこで本研究では、膨大な運転パラメータ間の超高効率・超高速な相関解析演算処理をおこなうために、遺伝的アルゴリズムを用いたデータマイニングシステムを構築する。本システムを用いることにより、従来の単純なアラームシステムでは発見不可能なパラメータ劣化の微細な兆候を検出することが可能となり、高効率なビーム運転のための強力なツールとなる。

(2) 高機能ビーム軌道・エネルギーフィードバックシステムの開発

本申請にある高機能ビーム軌道・エネルギーフィードバックシステムは、従来の単純なフィードバックシステム(制御量およびアクチュエーターが1対1)とは一線を画す物である。具体的には、(1)のアラームシステムによるデータマイニングにより、ビーム変動の原因を解析する。その後、(3)のビームシミュレーターと連携し、最も効率の良い補正解を求め、フィードバック制御に反映させる。より具体的な例を挙げると、ビーム軌道補正の場合には、最小の補正電磁石蹴り角で加速器全体のrmsビーム軌道を効率より補正するような解である。このような解は、固有値分解法を用いて求めることが可能である。さらに、補正に使用する固有値の数を最適化することにより、制御対象量の測定誤差およびアクチュエーターの設定誤差の影響を最小限に抑制することができる。

また、申請者は、円形加速器の軌道フィードバック制御システムを開発した経験があるため、この経験を大いに生かすことができる。さらに、過去の科学研究費補助金(課題番号: 15740167)において、ビームエネルギー

一広がり補正システムを構築した経験があるため、この資産も有効利用することができる。本システムを利用すれば、ビームパルス内のマルチバンチエネルギー広がりを補正することが可能である。また、パルス内での位相を最適に制御することにより、シングルバンチエネルギー広がりも同時に補正可能である。

(3) 超高速ビームシミュレーターによる高効率ビーム制御技術の確立

線形加速器のビームにおいて、高速オンラインビームシミュレーションの実現は非常に困難である。この要因の一つは、低エネルギー部（入射部）での空間電荷効果を考慮した高速計算アルゴリズムが存在しないためである。線形加速器の場合、入射部におけるビームシミュレーションを高精度におこなわなければ、下流ラインでの計算結果が現実から大きくずれることとなる。

本研究では、高速演算可能な空間電荷効果計算アルゴリズムの考案・計算コードの開発をおこなう。これに加えて、高効率な軌道補正アルゴリズムとともに、既存の高精度ビーム計算コードと融合する。本計算コードを、ビームシミュレーター用高速計算機上で動作させ、さらに、高速なビームモニターデータ収集系と連携させる。これにより、ビームの位置・エネルギー広がりおよびサイズなどの情報を非破壊かつ高速に収集し、高速ビームシミュレーション（オプティクスなど）が可能となる。このリアルタイムモデルを基にして、主要なビームパラメーター（オプティクス・ビームエネルギーおよび広がり・軌道変動など）を高速に補正することが可能となる。

(4) 超高速ビーム位置モニターによる高速同期ビーム診断

次世代の大規模加速器においては、高品質なビーム診断およびルミノシティ最適化のための高速なパラメーター微調整機構が不可欠であり、高速ビーム診断システムの運用が重要となる。申請者は、KEK 電子陽電子入射器において、約 100 台のビーム位置モニター (BPM) の高速データ収集システムを開発した経験を持つ。本システムをさらに発展させ、高精度なイベントタイミングシステムと連携させることにより、パルス毎の完全同期ビーム位置情報システムを構築する。本システムによる測定結果と (3) のビームシミュレーターを組み合わせることにより、ビームオプティクスなどのパラメーターエラー解析に役立てることができる。本システムを用いて、次世代の大規模線形加速器を想定した高

速同期ビーム診断システムを試験する。

上述の (1) ~ (4) のソフトウェア郡をシステムレスに連携させることにより、“先進的ビーム運転システム”を構築する。本運転システムを用いて、KEK 入射器におけるビーム試験をおこない、システム全体の性能評価および改善をおこなう。また、本研究全体のまとめをおこない、今後の課題等について検討する。

4. 研究成果

加速器ビーム運転に関するソフトウェア技術は、計算機科学の発展にともない大幅な進歩を遂げたと言えるが、近年のビーム運転システムは、ILC に代表される超大型加速器の運転にそのまま適用できるレベルとは言い難い。大規模加速器では、その制御対象点数の多さから、単純な機器故障に起因しないビーム変動の抑制が困難である。これらの理由から、次世代先端加速器のビーム運転効率を最大限に高めるためには、従来水準を凌駕する新しいビーム運転システムが不可欠である。このため、本研究では、「革新的アラームシステム」を基盤とした“先進的ビーム運転システム”の開発を目指してきた。

通常のアラームシステムでは、パラメーター毎の閾値を設定し、現在の測定値がそれらの範囲から外れた場合に、視覚的あるいは音声的にビーム運転者へ注意を喚起する目的で使用されている。本研究で開発を目指しているものは、膨大な運転パラメーター間の相関解析演算処理を高速におこない、アラームについてはビームフィードバックに用いるための、大規模パラメーターに対応した高速データマイニングシステムである。

本研究に於いては、高速オンラインビームシミュレーションに用いるための高性能計算サーバを導入し、ソフトウェア開発及び運用環境の構築をおこなった。さらに、高精度なシミュレーションをおこなうためには、大規模な運転パラメーター及び測定値の蓄積が必要となるため、大容量データ蓄積用の高速ネットワークディスクを導入した。これらの装置上に、データ蓄積用ソフトウェアを構築し、KEK 入射器の実ビーム運転環境下に於いて、30000 点以上のパラメーターを常時監視し、Log システムへの安定なデータ蓄積を実現し、入射器のビーム位置、電荷量、及び高周波位相情報等の同期計測を実現した。マシンスタディー時間の制約上、実運転パラメーターを用いた試験は十分に達成できなかったが、アラームアルゴリズムを更に精査及び改良し、システムの完成を目指している。また、本システムを基盤としたビームフィードバック試験をおこない、大規模加速器への

応用可能性を検証する予定である。

今年度は、システム全体の完成には至らなかったが、高速ビーム位置情報の収集、大規模運転パラメーターの蓄積及びこれらの解析結果から、本研究目的のビーム安定化システム実現性に関する大きな知見を得ることが出来た。総合的な高速・高精度オンラインビームシミュレーションシステムの構築及び試験をおこない、実ビーム運転での運用をおこなう予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 政則 (SATO MASANORI)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器
研究機構・加速器研究施設・准教授
研究者番号：90353367

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし