

令和元年6月19日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2018

課題番号：15K04740

研究課題名（和文）大電荷電子ビーム生成のための多目的最適化ツールの開発と実証

研究課題名（英文）Development and demonstration of a multi-objective optimization tool for high-current electron beam generation

研究代表者

永井 良治（NAGAI, Ryoji）

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 東海量子ビーム応用研究センター・上席研究員（定常）

研究者番号：40354906

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：高輝度電子ビーム生成を実現するには、加速器入射部での電子ビームの挙動の理解が必要不可欠である。しかし、この過程には多数の加速器要素パラメータが寄与しており、加速器要素の全パラメータの最適化を行うことなく、電子ビームの挙動の理解は難しい。そこで、本課題において、加速器パラメータの多目的最適化に関する研究を行った。その結果、加速器パラメータ多目的最適化の研究基盤となるGUIツールを開発し、また、入射器においては、加速空洞の3Dモデルの有用性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題で開発を進める最適化ツールは、加速器の研究開発、ビームダイナミクス研究において必要不可欠な数値計算ツールであり、新型の加速器開発、複雑な挙動を示す電子ビーム挙動の解明へ貢献できる。また、既存の加速器であってもバンチ電荷を大きく増加するなどの電子ビーム性能の向上を図る場合には、各加速器要素パラメータの最適化が必須であり、そのうえで、各加速器要素の必要な性能などを決定できる。さらに、最適化ツールの実際の加速器への適用を計画しており、これが加速器開発初期段階から適用可能になれば、加速器の自動運転を可能する等、加速器の普及へ向けた大きなブレークスルーが期待できる。

研究成果の概要（英文）：Understanding of the behavior of an electron beam in an injector section is indispensable to achieve high-brightness electron beam acceleration. A lot of electron accelerator element parameter contributes to the injector section, and the understanding of behavior of an electron beam is difficult without optimizing all parameters of the injector section. So multi-objective optimization of the electron accelerator parameters was studied in this program. As a result, the GUI tool which is a basic tool of electron accelerator parameter multi-objective optimization study was developed also showed that a three-dimensional model of acceleration cavity is useful in the injector section.

研究分野：加速器科学、量子ビーム科学

キーワード：ビーム輸送条件最適化 加速器要素技術開発

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年の加速器、例えば、次世代の放射光源用加速器として期待されているエネルギー回収型リニアックでは、従来の蓄積リング型加速器より小さなエミッタンス、非常に短いバンチ長といった特徴を持つ電子ビームの生成が可能である。このような電子ビームを生成する加速器を実現するには、電子源で発生した低速の電子ビームが光速の電子ビームとなるまでの、バンチング、加速の過程での電子ビームの挙動を十分に理解する必要がある。しかし、この過程には多数の加速器要素パラメータが寄与しており、さらに、空間電荷力の影響で電子ビームの挙動が複雑なものとなるので、電子ビームの挙動を客観的に理解するには、加速器要素パラメータの最適化が必要不可欠である。

2. 研究の目的

本課題では、大電荷電子ビーム生成のための多目的最適化ツールを開発する。このツールは多目的遺伝的アルゴリズムおよび多目的シミュレーテッドアニーリングから構成し、それぞれのアルゴリズムを相補的に最適化問題に適用することで、アルゴリズムのチューニングを行う。GPT、PARMELA などの加速器のシミュレーションコードに本ツールを適用し、最適化試験を行う。また、本課題で開発するツールには加速器制御システムにも適用できるように汎用性を持たせ、実際の加速器を用いた最適化試験も行う。この試験は、現在 KEK で開発中の次世代光源用試験加速器「コンパクト ERL」を用いて行う。

シミュレーションコードやコンパクト ERL を用いた本最適化ツールの試験を通して、電子源で発生した低速の電子ビームが光速の電子ビームとなるまでの、バンチング、加速の過程での電子ビームの挙動に及ぼす各加速器要素の影響を明らかにし、大電荷電子ビームを生成する。

3. 研究の方法

まず、本課題の目的の一つである多目的最適化ツールを開発するための基盤環境となる GUI ツールを開発する。GUI ツールには、Parmela、GPT 等の加速器のシミュレーションコードの入力ファイルを作成し、シミュレーションコードを呼び出し実行、シミュレーション結果の表示及び、加速器パラメータの最適化の機能を備えさせる。具体的には、作成した入力ファイルを、外部プロセスとして呼び出した Parmela 等の加速器シミュレーションコードに渡して、電子ビームの計算を行い、その出力ファイルを読み込んで結果の表示を行う機能の他に、パラメータを系統的に変化させた場合のエミッタンス等の変化を計算する機能やエミッタンス等を最小化するための最適パラメータを探索する機能を有する GUI ツールを開発することで、本研究課題を推進する研究基盤環境を整える。このツールを用いて SPEA2 や AMOSA と言ったパラメータの最適化手法を加速器シミュレーションコードに適合させ加速器パラメータの最適化を行う。また、コンパクト ERL 入射器のような低エネルギー領域にある電子ビーム輸送では、環境磁場等の外乱や空間電荷効果によって、ビーム光学関数と射影エミッタンスの補償条件が設計条件から外れてしまい、ビーム性能が悪化する。このずれを補正することが高いビーム性能を実現する上で重要である。そこで、入射超伝導空洞のモデルとして、従来の円筒対称性を仮定したモデル(2D モデル)ではなく、入力結合器と高調波減衰結合器を加えた 3 次元加速空洞モデル(3D モデル)を新たに作成し、入射器の最適化シミュレーションとビーム試験を行う。

4. 研究成果

まず、開発した加速器パラメータ最適化のための GUI ツールの典型的な使用例を示す。

(1) パラメータの系統的な変化による影響

光陰極電子銃直近の大口径ソレノイドのミスアライメントの影響をシミュレートするために、ソレノイドの設置位置と角度を系統的に変化させ、位置と角度のミスアライメント影響によるエミッタンスの増加量をコンターマップにしたものである。この図から、このソレノイドについては、エミッタンスの増加量を 0.5 mm-mrad 程度に抑えるには 0.1 mm、2 mrad 程度以下のアライメント精度が求められることが分かった。

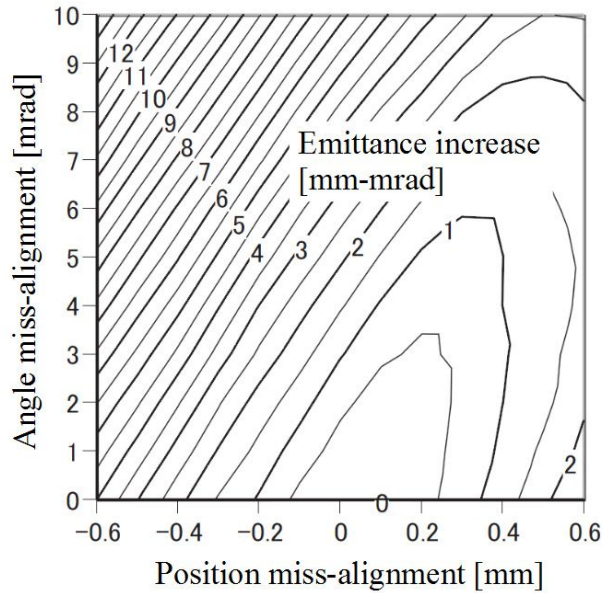


図1 . ソレノイドのミスアライメントによるエミッタンスの増加

(2) パラメータの分散による影響

JAERI-ERL において電子銃のタイミングジッタ、SHB、前段加速器 2 台の RF 位相ジッタの影響により、電子バンチ長の分布について計算したものである。電子銃のタイミングジッタは実測値の 16.7 ps を用い、RF 位相ジッタは 0.20 度、0.05 度について計算した。これらの結果から、バンチ長の分散を数パーセント以下に抑えるためには、位相ジッタを 0.1 度以下にする必要があるということが分かった。

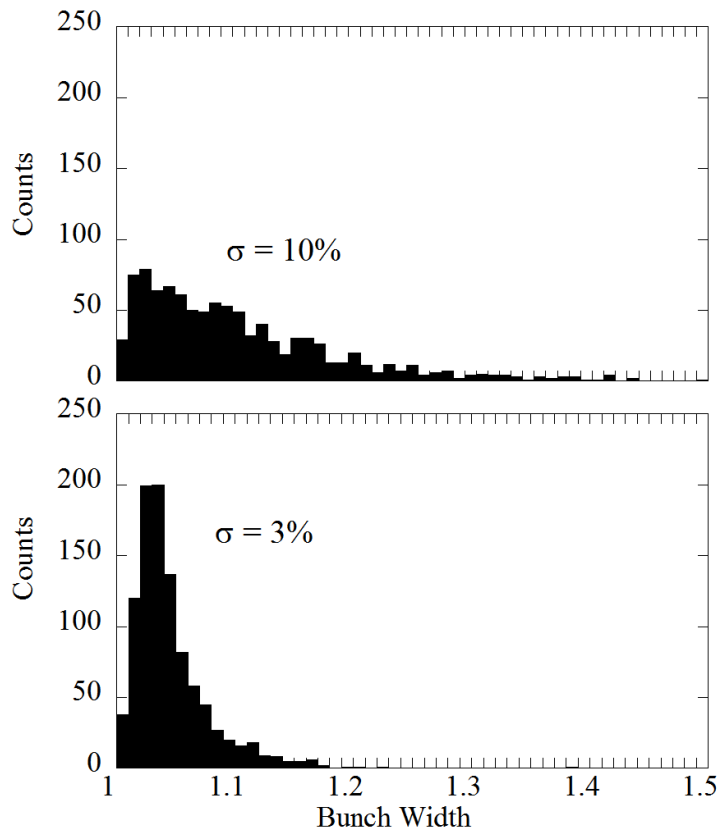


図2 . 加速空洞 RF 位相ジッタによるバンチ幅の分散
位相ジッタ 0,20 度(上)、位相ジッタ 0.05 度(下)

(3) パラメータの最適化

JAERI-ERL の入射部のパラメータ最適化による輝度の最大化を行った。最適化後の前段加速器後の位相空間の粒子分布を下図に示す。最適化により、粒子の分布が直線状になり、輝度が最大化された。ここでの最適化には通常のソミュレーテッドアニーリングを用いたが、今後引き続き SPEA2 や AMOSA と言ったパラメータの最適化手法のチューニングを進めていく予定である。

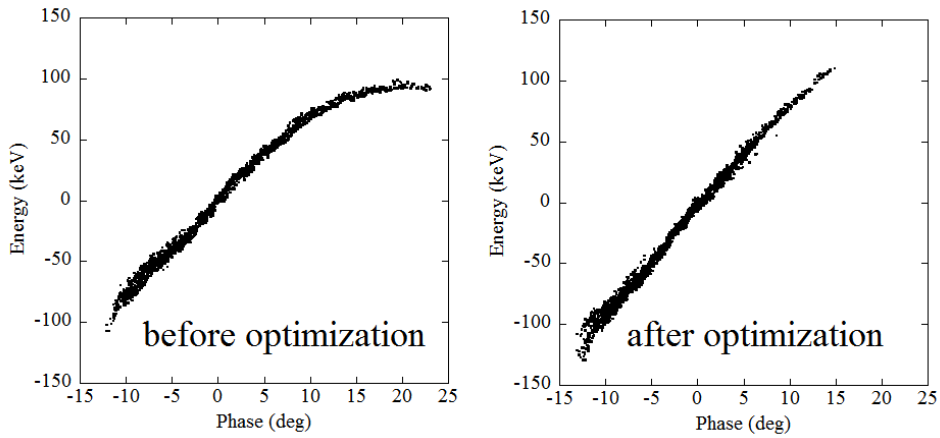


図3 . 最適化前後の位相プロット、最適化により位相空間上の粒子分布が直線状になった。

また、入射超伝導空洞のモデルとして、従来の円筒対称性を仮定したモデル(2D モデル)ではなく、入力結合器と高調波減衰結合器を加えた3次元加速空洞モデル(3D モデル)を新たに作成し、入射器の最適化シミュレーションを行った結果、バンチ電荷 40pC のビームに対して、従来の2Dモデルを用いた最適化では、約 10 mm-mrad 程度のエミッタンスであったが、3Dモデルの導入により、約 3 mm-mrad まで低減することに成功した。下図に2Dモデルと3Dモデルでの4極電磁石に対する応答のシミュレーションと実測との比較を示す。2Dモデルではシミュレーションと実測との間で差異がみられるが、3Dモデルではシミュレーションで実際のビーム応答をほぼ再現できている様子が分かる。

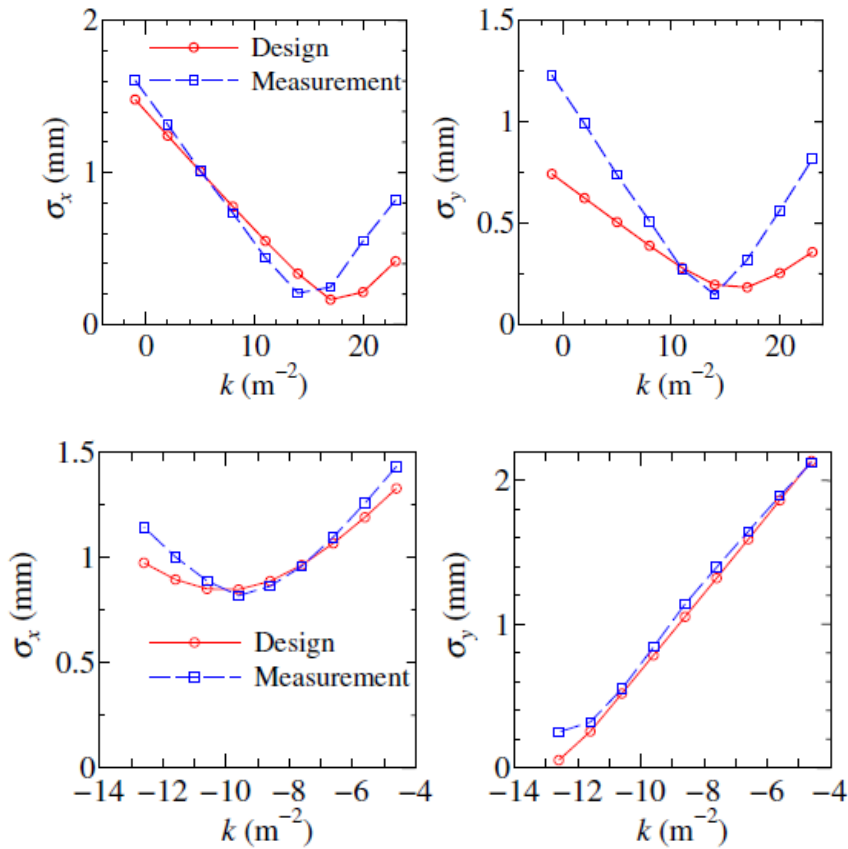


図4 . 2Dモデル(上)と3Dモデル(下)のシミュレーションと実測の差異

このようなシミュレーションモデルの検証を行う際も、得られる加速器パラメータの最適条件での比較・検証が重要であることがこの結果からも分かる。

〔雑誌論文〕(計 4 件)

宮島司、布袋貴大、本田洋介、島田美帆、高井良太、帯名崇、加藤龍好、永井良治、「cERLにおける空間電荷効果が支配的な電子ビームの光学関数とエミッタンス補償条件の改善」、第15回加速器学会年会プロシーディングス、査読なし、p.376-380、2018

永井良治、宮島司、「加速器パラメータ最適化のためのGUIツール開発」、第13回加速器学会年会プロシーディングス、査読なし、p.1186-1188、2016

T.Miyajima, Y.Honada, R.Takai, T.Obina, M.Shimada, K.Harada, M.Yamamoto, K.Umemori, H.Sakai, T.Miura, F.Qiu, N.Nakamura, S.Sakanaka, N.Nishimori, R.Nagai, R.Hajima, D.Lee, "STATUS OF HIGHER BUNCH CHARGE OPERATION IN COMPACT ERL", Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference, 1583-1586, 2015, doi:10.18429/JACoW-IPAC2015-TUPWA067 査読なし

宮島司、永井良治、本田洋介、島田美帆、高井良太、帯名崇、「電子線形加速器における低エミッタンスビーム輸送路光学系の最適化試験」、第12回加速器学会年会プロシーディングス、査読なし、p.963-967、2015

〔学会発表〕(計 6 件)

宮島司、布袋貴大、本田洋介、島田美帆、高井良太、帯名崇、加藤龍好、永井良治、「cERLにおける空間電荷効果が支配的な電子ビームの光学関数とエミッタンス補償条件の改善」、第15回加速器学会年会、2018年

永井良治、宮島司、「加速器パラメータ最適化のためのGUIツール開発」、第13回加速器学会年会、2016年

宮島司、島田美帆、本田洋介、高井良太、帯名崇、永井良治、路川徹也「cERLコミッションング運転における軌道調整とビーム光学関数調整」、第13回加速器学会年会、2016年

Tsukasa Miyajima, Ryoji Nagai, "Optimization of Beam Transportation in Commissioning of the Compact ERL injector at KEK", The 28th Linear Accelerator Conference, 2016

T.Miyajima, Y.Honada, R.Takai, T.Obina, M.Shimada, K.Harada, M.Yamamoto, K.Umemori, H.Sakai, T.Miura, F.Qiu, N.Nakamura, S.Sakanaka, N.Nishimori, R.Nagai, R.Hajima, D.Lee, "STATUS OF HIGHER BUNCH CHARGE OPERATION IN COMPACT ERL", 6th International Particle Accelerator Conference, 2015

宮島司、永井良治、本田洋介、島田美帆、高井良太、帯名崇、「電子線形加速器における低エミッタンスビーム輸送路光学系の最適化試験」、第12回加速器学会年会、2015年

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：宮島 司

ローマ字氏名：MIYAJIMA, Tsukasa

所属研究機関名：大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

部局名：加速器研究施設

職名：准教授

研究者番号(8桁)：50391769

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。