

CONSTRUCTION OF THE VIRTUAL ACCELERATOR AND BEAM STUDY BY SAD AT J-PARC RCS

Hiroyuki Harada^{1,A)}, Kenta Shigaki^{A)}, Hiroyuki Sako^{B)}, Fumiaki Noda^{B)}, Hideaki Hotchi^{B)}, Hiromitsu Suzuki^{B)},
Kazuro Furukawa^{C)}, Shinji Machida^{D)}

^{A)} Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8526

^{B)} Japan Atomic Energy Agency, 2-4 Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

^{D)} CCLRC, RAL, Chilton, Didcot, Oxon, UK, OX110QX

Abstract

We have developed a virtual accelerator based on EPICS for 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) in J-PARC. It is important to have an on-line model of optics parameters, such as tunes, Twiss parameters and dispersion function at the commissioning stage in a high intensity proton machine. It gives a strong feedback for the RCS operation as a commissioning tool as well as for the studies of beam dynamics issues. Beam position monitors with finite resolutions, a transverse exciter to measure the betatron frequency, and a RF system with variable frequency to simulate off-momentum optics have been implemented into the system. The virtual accelerator system itself and results of beam dynamics studies are presented.

J-PARC RCSにおけるSADを用いた仮想加速器の構築とビームスタディ

1. 報告概要

J-PARC 3 GeV RCSにおいて、EPICSを基盤とした仮想加速器の開発を行っている。大強度陽子加速器のコミッショニング時に、オプティクスパラメータのオンライン加速器モデルを持つことは重要であり、これはビームダイナミクス計算に基づくコミッショニングツールとして、RCS運転への寄与が期待される。この仮想加速器のシステムならびにビームスタディの結果、仮想加速器の展望を報告する。

2. 研究背景

現在、大強度ビーム加速器の建設ならびに計画が世界各地で進められており、日本では、日本原子力研究開発機構(JAEA)と高エネルギー加速器機構(KEK)が共同で、大強度陽子加速器J-PARC^[1]の建設を進めている。J-PARCは、3 GeV 1 MW、50 GeV 0.75 MWの大強度陽子ビームを最大の特長とし、生命・物質、原子核・素粒子の分野において、次世代の研究拠点と期待される加速器施設である。大強度ゆえに、加速器の立上・調整時には未曾有の困難が予想される。特にJ-PARCの心臓部である3 GeV RCSでは、加速器機器の放射化により保守が不可能となる事態を避けるため、リング内で許容されるビーム損失割合は 10^{-3} 程度と通常の加速器と比較して極めて厳しく、ビーム損失抑制が最大の課題となる。

3. 仮想加速器の概念

本研究では、ビーム損失抑制と目標出力実現に向けた戦略として、計算機上に構築した加速器モデルと仮想加速器に基づく制御モデルを推進する。この制御モデルの概念図を図1に示す。計算機コードを用いて、電磁石などによる外部集束系の最適なパラメータや設定磁場値の計算を行うものを加速器モデルと呼び、図中の加速器制御端末で構築し、使用する。このような加速器モデルに基づく加速器制御を行っている代表的な加速器としてKEKB加速器^[2]がある。一方、ビーム出力増強に伴い、粒子間相互作用がビームに大きな影響を与えるため、大強度ビームの安定供給やビーム損失抑制の観点から、粒子間

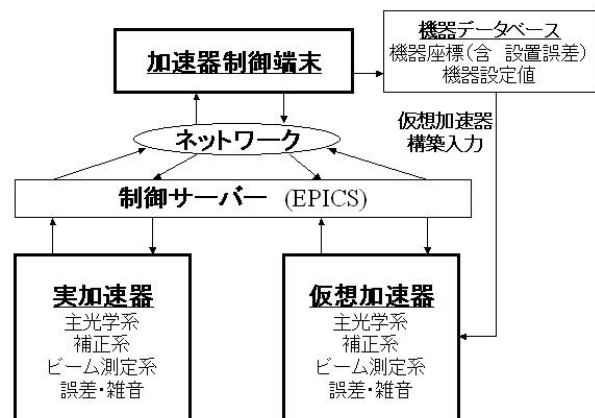


図1：仮想加速器に基づく制御モデル

¹ harada@hepl.hiroshima-u.ac.jp

相互作用を考慮した最適なパラメータの導出が不可欠となる。この粒子間相互作用を含んだ多粒子周回計算機能を備え、制御サーバなどの下に実加速器と並列に配したものを仮想加速器と定義し、図中に示す。これは、制御端末から実加速器と同等に見え、ビームを用いず制御システムの構築ならびに検証を可能とする。また、仮想加速器と実加速器を制御サーバの下に並列に配し、同じ入出力で制御可能にすることで、直接の比較が可能で仮想加速器に基づくフィードバック機能を持つ。

4. 仮想加速器の基本モデルの構築

4. 1 仮想加速器の制御システムの構築

本研究では、計算コードSAD^[3]と制御サーバEPICSのPortable Channel Access Server (PCAS)^[4]を用いて、仮想加速器の基本制御モデルを構築した。SADはKEKで開発され、ビームダイナミクス計算に加え、加速器制御端末の構築に不可欠であるEPICS制御サーバへのアクセス機能(Channel Access Client, CA Client)、GUI作成機能(Tk Inter)、グラフィックス機能などを兼ね備えた加速器用コードである。また、EPICS^[5]はネットワーク分散型制御システムが特徴で、J-PARCの制御システムにも使用する。この制御モデルを図2に示す。加速器制御端末(Operation Interface, OPI)は、SADを用いて作成し、例として7ファミリーの四極電磁石のOPIを図3に示す。また、仮想加速器はSADを用いてRCSをモデル化および作成された。SADの単粒子周回計算の機能を用いて周回ビームを模擬し、入出力はCA Clientの機能を用いて行う。PCASには各出力因子に対応したチャンネルが用意され、SADのCA Clientの機能を用いて、そのチャンネルに設定値やモニタ値などの入出力を行う。つまり、端末と仮想加速器間のデータのやり取りは、PCASのチャンネルを介して行われた。

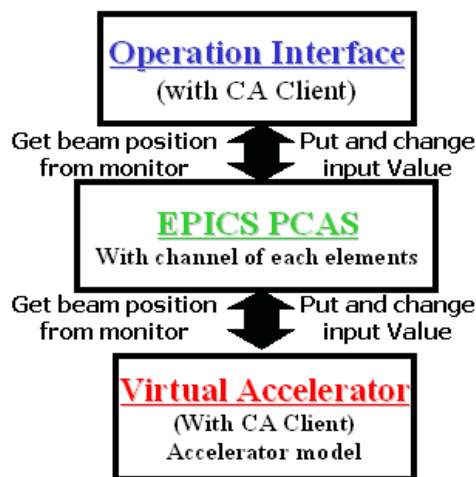


図2：仮想加速器の基本制御モデル

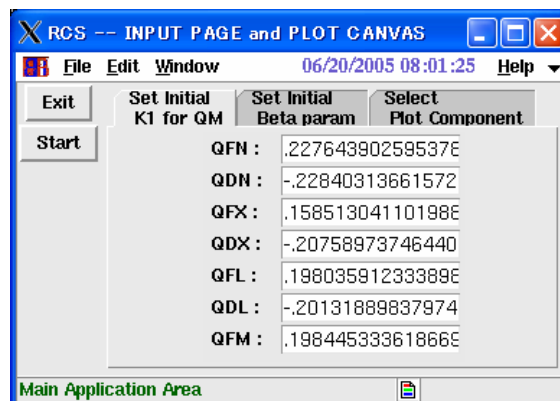


図3：四極電磁石用OPI

4. 2 機器の実装

制御端末(OPI)は、各装置の運転・制御やビームコミッショニング時の各パラメータに対して、作成されなければならない。仮想加速器における入出力が、実加速器と同じであれば、ビーム無でビームコミッショニング用OPIや制御サーバの構築ならびに検証が可能となる。仮想加速器における同入出力に向け、ビームコミッショニング時の各パラメータの測定に用いる機器を仮想加速器に実装した。入力部として、ベータトロン振動数測定に用いるエキサイタと呼ばれる横振動励起装置とoff-momentumのビームスタディに用いる高周波加速空洞を、出力部として、ビーム重心を測定するビーム位置検出器(Beam Position Monitor, BPM)を仮想加速器に実装した。エキサイタは、2極の電極に定格1kWの帯域制限白色ノイズを入力し、2つの電極間に作られる電磁場によって粒子を偏向させる^[6]。RCSでは、エキサイタを水平・垂直方向用に2台設置する。高周波加速空洞は、ビームを加速・減速することで、ビームのエネルギーや運動量を変化させる。また、ビームのピーク電流値やノイズに起因するBPMの測定精度を一括して分解能として与え、実装した。

5. 仮想加速器を用いたビームスタディ

RCSの初期コミッショニングにおけるビーム蓄積運転時を仮想加速器で模擬し、仮想運転を行った。加えて、基本パラメータであるベータトロン振動数とクロマティシティを測定した。

5. 1 ベータトロン振動数

ベータトロン振動数の小数部を測定するための一般的な手法は、ビームの横方向振動を励起し、その振動を検出することである。RCSでは、ベータトロン振動との共鳴を利用して、エキサイタでベータトロン振動を励起させ、振幅を増大させる。そのビーム振動はBPMで検出する。その振動をフーリエ変換で周波数解析し、スペクトルのピークよりベータト

ロン振動数を求める。

ベータロン振動数測定用のOPIを作成し、仮想加速器においてBPMの分解能 $\sigma=0.2, 0.5, 1.0, 3.0$ mmの場合の測定を行った。そのOPIは、周波数解析スペクトルを表示する機能、エキサイタをOn/Offする機能、スペクトルピークを同定する機能を持つ。それを図4に示す。定格入力エキサイタによって励起された 10^4 回周回中の最大のベータロン振幅は、約0.3 mm程度で、スペクトルのピーク値は、約-45 dBであった。また、BPMの分解能に対するスペクトルのノイズレベルを表1に示す。その結果、 $\sigma=3.0$ mmの場合、ノイズに埋もれてしまい、ピークの同定が不可能となる。しかし、各測定の周波数解析を平均化することで、スペクトルのばらつきが抑えられ、ピークの同定が可能になった。

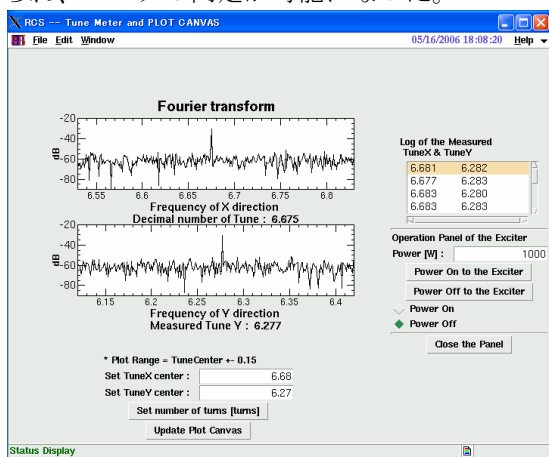


図4：ベータロン振動数測定用OPI

BPM's resolution (in σ)	Noise level of FFT
0.2 mm	-66 dB
0.5 mm	-58 dB
1.0 mm	-50 dB
3.0 mm	-42 dB

表 1：BPM分解能に対する周波数のばらつきレベル

5. 2 クロマティシティ

ビームの個々の粒子は、異なる運動量を持ち、ビームは運動量の広がりを持つ。そのため、個々の粒子は磁場から異なる収束力を感じ、ベータロン振動数も異なる。その運動量の違い Δp によるベータロン振動数のずれ(dQ)がクロマティシティ ξ ($=dQ / \Delta p/p$)である。このパラメータは、一般的にビームの運動量を変化しつつ、ベータロン振動数を測定することで得られる。RCSでは、高周波加速空洞の周波数を変えることで、運動量の異なる粒子を同期粒子にし、ビームの運動量を変える。

高周波加速空洞で $\Delta p/p$ を-0.5%から0.5%まで0.1%ずつ変化させ、ベータロン振動数を測定し、クロマティシティを求めた。運動量のずれに対する水平方向(x)のベータロン振動数の測定結果を図5に示す。得られたクロマティシティ ξ は-8.32で、測定精度はデータ点数とベータロン振動数の測定精度に依存し、 ± 0.05 となった。

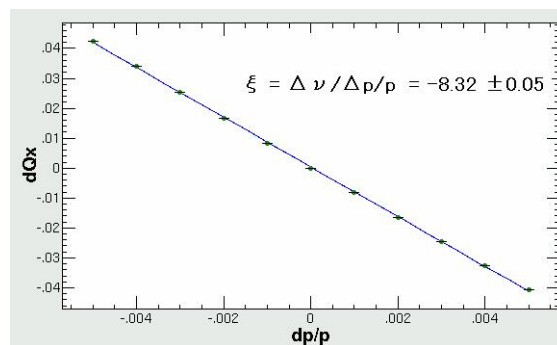


図5：運動量の違いによるベータロン振動数 (傾き：クロマティシティ ξ)

6. まとめと展望

計算コードSADと制御サーバEPICSのPCASを用いて、仮想加速器の基本制御モデルを構築した。この仮想加速器は、ビームを用いず制御システムの構築ならびに検証を可能とする。加えて、ベータロン振動数測定のための横振動励起装置、off-momentumのビームスタディのための高周波加速空洞、ビーム位置検出器を仮想加速器に実装した。初期運転時のビーム蓄積運転時におけるベータロン振動数とクロマティシティの測定手法を仮想加速器で模擬し、仮想加速器で仮想運転を行うことで、測定に用いる機器の最適なパラメータを導出した。

今後、空間電荷効果などの粒子間相互作用や加速過程の模擬計算を仮想加速器sに実装し、様々な設定値に対するビーム損失評価を目指す。膨大な計算量のため、モデル化や並列計算による計算時間の短縮が大きな課題となる。加えて、実加速器における基本パラメータの測定ならびに補正のためのOPIを作成し、仮想加速器を用いた検証を行う。

参考文献

- [1] J-PARC, URL: <http://jkj.tokai-sc.jaea.go.jp/index-e.html>
- [2] KEKB, URL: <http://www-acc.kek.jp/KEKB/>
- [3] SAD, URL: <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [4] A. Shishlo, P. Shu, J. Galambos, T. Pelaia, "The EPICS Based Virtual Accelerator – Concept and Implementation", Proceedings, PAC, 2003
- [5] EPICS, URL: <http://www.aps.anl.gov/epics/>
- [6] T. Miura et al, "Measurement of betatron-tune in the KEK 12 GeV – PS/J-PARC", Proceedings, the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, URL: <http://lam29.lebra.nihon-u.ac.jp/WebPublish/5P47.pdf>