

SuperKEKB における RF ステーション位相およびビーム負荷配分の調整 ADJUSTMENT OF RF PHASE AND BEAM LOADING DISTRIBUTION AMONG RF STATIONS IN SuperKEKB

小笠原 舜斗[#], 赤井 和憲, 小林 鉄也, 中西 功太, 西脇 みちる

Shunto Ogasawara[#], Kazunori Akai, Tetsuya Kobayashi, Kota Nakanishi, Michiru Nishiwaki
 High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

SuperKEKB is the e-/e+ collider which targets the world highest luminosity. In recent operation, SuperKEKB achieved a new world record $4.7 \times 10^{34} / \text{cm}^2/\text{s}$ for luminosity with beam current 1.4 A. In the future, beam current will be increased further to aim at the designed value of 3.6 A and much higher luminosity. The RF system consists of 38 cavities (30 stations), which share the huge beam loading brought by high current beam. For beam stability and power efficiency, it is important to distribute beam loading properly among RF cavities. It is equivalent to adjust the acceleration phase of each cavity. However, it is difficult to evaluate acceleration phase using only the pickup signal. Therefore, we established a method to evaluate the beam loading balance among RF stations from the RF power measurement for each cavity, and to adjust the acceleration phase. This presentation introduces a method for evaluating and optimizing the beam loading (acceleration phase) among stations in SuperKEKB, which has a large number of RF stations, and its operation.

1. はじめに

SuperKEKB[1]は、標準理論を超える物理探索を目的とした、素粒子物理実験用の電子陽電子衝突型円形加速器である。加速器は 7 GeV 電子リング (High Energy Ring, HER) と 4 GeV 陽電子リング (Low Energy Ring, LER) で構成される。SuperKEKB は、前身である KEKB の数十倍という前人未踏の目標ルミノシティ(衝突頻度)を設定している。これを達成するため、蓄積ビーム電流の設計値も最大 3.6 A (LER) という世界最大級の大電流に設定されている。

これまでの運転で、蓄積ビーム電流が最大 1.4 A で、KEKB の二倍以上となるピークルミノシティ記録 ($4.7 \times 10^{34} / \text{cm}^2 / \text{s}$) を達成[2]した。今後も高ルミノシティ達成に向け、蓄積電流の増強を伴う調整が続けられる。

SuperKEKB の大電流ビームの加速には、2 リング合わせて 2 種 38 台におよぶ高周波(RF)加速空洞[3]が用いられる。

SuperKEKB では蓄積電流が非常に大きいため、ビームの不安定性が増し、ビーム加速のために必要な RF 電力(ビーム負荷)も前例のないほど大きくなる。ビームを安定かつ効率的に加速するには、ビームに対する加速位相が空洞間で揃っていることが望ましい[4]。これは、ビームが各空洞から受け取る電力が空洞間で均一であることに相当する。ただし、実際の運転ではステーション毎の構成の違いやハードウェアの状態などの制約により、敢えて特定のステーションのビーム負荷を軽く/重くしたいこともある。いずれにせよ、ステーション毎に加速位相を精密に評価・調整する機能は有用である。これは空洞毎に負担するビーム負荷を調整することと等価である。

今回、各ステーションの RF 電力収支からステーション毎に加速位相を評価し、精密な調整を容易に行えるツールを開発したので、本稿で紹介する。

2. SuperKEKB の RF システム

Table 1 に、SuperKEKB の RF に関する主な運転パラメータを、Fig. 1 に、SuperKEKB の加速空洞(RF ステーション)の配置を示す。

Table 1: Parameters Related to RF System [3-5]

	LER	HER
Beam Energy [GeV]	4.0	7.0
Beam Current [A]	3.6*	2.6*
Loss Energy [MeV/turn]	1.76	2.43
Cavity Type	ARES	SCC/ARES
RF Frequency [MHz]	508.9	
# of Cavities (# of Stations)	22 (16)	8(8)/8(6)
RF Peak Voltage [MV/cavity]	0.5*	1.5*/0.5*
Beam Power [kW/cavity]	400~*	400*/600*
Klystron Power [kW/station]	~800*	~450*/800*

*: Design value

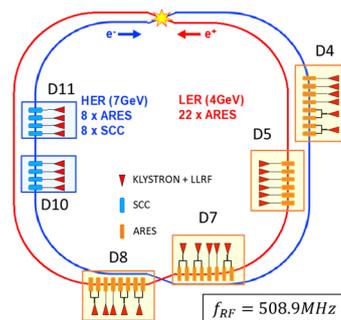


Figure 1: Arrangement of RF Stations in SuperKEKB.

[#] shunto.ogasawara@kek.jp

2 リングそれぞれに 3 か所の RF セクション(計 6 セクション)があり、加速空洞が分散配置されている。RF 周波数は約 508.9 MHz である。加速空洞には、常伝導空洞と超伝導空洞(SCC)[6]の 2 種類がある。常伝導空洞は、電磁氣的に結合した 3 空洞を用いた独自の空洞システムで、ARES 空洞[7]と呼ばれる。HER には ARES と SCC が各 8 台、LER には ARES が 22 台設置されている。

各空洞には、クライストロン(KLY, 定格 1 MW)を用いて連続波 RF を供給する[8]。通常は KLY 1 本で空洞 1 台を駆動するが、一部の ARES ステーションでは KLY 1 本で空洞 2 台に大電力 RF を供給している(=1:2 ステーション)。前身の KEKB では、全ステーションが 1:2 構成であった。最終的には、1:1 構成のステーションを更に増やす予定である。特に HER は、設計では全ステーションが 1:1 構成となる。各 RF ステーションには LLRF 制御システム[9]一式が組み込まれ、加速電圧制御やチューニング制御等を担っている。

マスターオシレータから空洞までの経路上には、幾つかの移相器が配置されている。Figure 2 に、例として D07 セクションにおける主な移相器を示す。主要な移相器には、セクション全体の位相を調整する「Section Phase」、ステーション毎の位相を調整する「Station Phase」、1:2 ステーションの空洞間位相を調整する導波管移相器がある[5,10]。これらの移相器のうち、導波管移相器を除く 2 種は電子的な移相器で、位相補正量を遠隔制御できる。本稿では主に Station Phase の調整について紹介する。

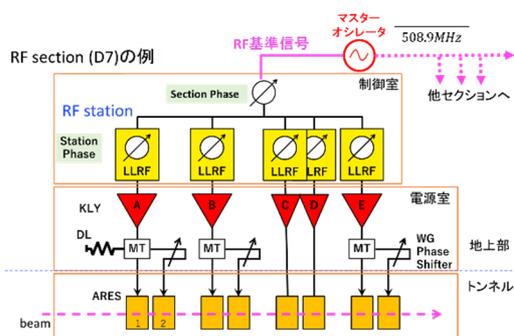


Figure 2: Phase shifters in RF D07 section [4].

3. 加速位相とビーム負荷

本章では、加速位相とビーム負荷の関係、およびその調整における前提条件について述べる。SuperKEKB では、電子(陽電子)の速さは常にほぼ光速で一定である。

3.1 加速位相とビーム負荷の関係

ある加速空洞(電圧振幅 V_c)において、電流 I_{beam} のビームが位相 ϕ_s で加速される。このとき空洞がビームに供給する RF 電力 P_{beam} は、

$$P_{beam} = V_c \cos \phi_s \cdot I_{beam} \quad (1)$$

で表される。これは、空洞からみるとビーム負荷である。1:2 ステーションの V_c は、空洞 2 台のベクターサムとする。

多数の加速空洞を持つリング全体でのビーム加速について、各空洞電圧(振幅 V_c 、位相 ϕ_s)のベクターサム

($V_{c,sum}$, $\phi_{s,sum}$)で考える。Figure 3 に、1 ステーション(V3)のみ位相のずれた 3 ステーションによるベクターサムの例を、ビーム位相を基準に示す。破線は、全ステーションの位相がそろっていた時のベクターサムである。

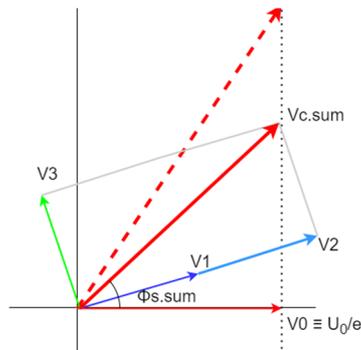


Figure 3: Example of vector sum of three stations.

$\phi_{s,sum}$ は、リング一周の(主に放射損失による)エネルギー損失(1-Turn Loss, U_0)に対応する電圧 $V_0 (\equiv U_0/e)$ に釣り合うよう、以下のように決まる。

$$V_0 = V_{c,sum} \cos \phi_{s,sum} \quad (2)$$

また、その結果として、各空洞の ϕ_s がそれぞれ決まる。

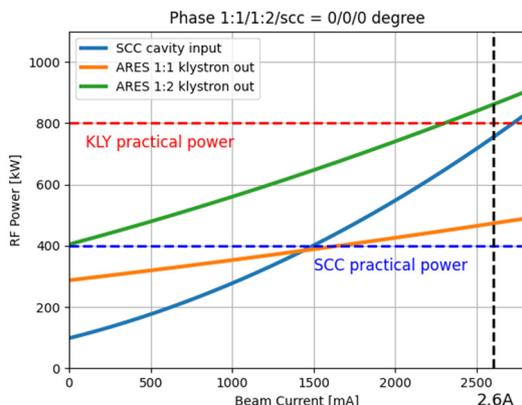
Figure 3 のように各空洞の位相がバラバラだと、 $V_{c,sum}$ の絶対値(振幅)が小さくなる。このとき、 $\phi_{s,sum}$ はより小さくなるので、シンクロトロン振動の復元力が小さくなり、また実効的な加速電圧が下がるという点から電力効率が悪くなる。したがって、後述の事情を考慮しない場合、原則として各空洞の加速位相は揃っていることが望ましい。これは Eq. (1) から、(V_c が同じであれば)各空洞が負担するビーム負荷が均一であることと等価である。

3.2 ステーション構成に応じた分配

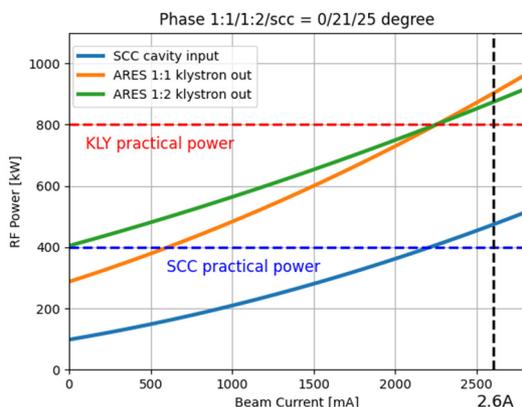
SuperKEKB は、ARES 1:1、ARES 1:2、SCC という異なる構成のステーションがリング内に混在している。これらの特性の違いを無視してビーム負荷を均一に揃えると、各装置への負荷が問題となる。例えば、KLY の定格出力 1 MW に対し、SCC で実績のある実用電力は 400 kW 程度である[6]。また、ARES 1:2 ステーションの KLY では空洞 2 台を駆動する必要があり、必要電力が 1:1 ステーションの 2 倍となる。

例として、HER におけるビーム電流に対する RF 電力の評価を Fig. 4 に示す。ただし、KLY の出力が飽和領域に近いと V_c 制御が正常に機能しなくなるため、良好な線形特性を示す 800 kW を出力上限とした。上記を踏まえ、SCC と KLY の実用電力上限を図中に破線で示した。Figure 4 (a) は、現状のステーション構成においてステーション間に一切の位相差をつけずに運用した場合で、ビーム電流 1.5 A 程度で SCC の入力電力が実用範囲を超える。これに対して Fig. 4 (b) は、ステーション間に位相差をつけた場合である。現状のステーション構成では設計ビーム電流の蓄積は厳しいとみられるが、ビーム負荷を適切に配分することで対応可能な電流を引き上げることができる。Figure 4 (c) は当初の設計通り

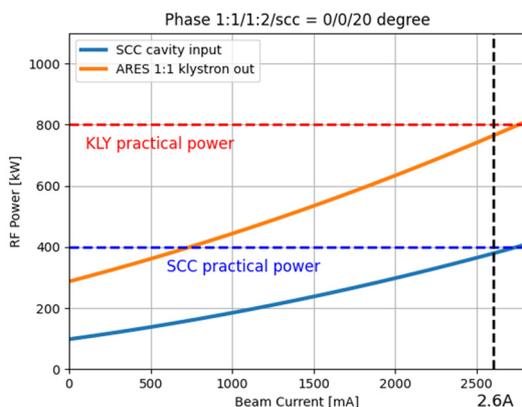
KLYを増設し、HERの全ARESステーションを1:1構成にした場合の評価である。この場合でも、2.6 Aのビーム



(a) Without phase offset. SCC input power exceeds the practical power at 1.5 A.



(b) With appropriate phase offset. The current limit is increased, but not enough.



(c) With phase offset, in case of 1:1 configuration for all ARES stations.

Figure 4: Evaluation of klystron power with respect to beam current in HER, with and without phase offset.

を蓄積するには位相差を精密に調整し、ビーム負荷を適切に分配することが必須である。

また実際の運転では、空洞毎の個体差等の理由で、個別にビーム負荷を設定したい場合もある。場合によっては、特定のステーションの位相を固定したい場合もあるので、そのような調整も可能だと便利である。

3.3 位相調整に要求される条件

位相調整でもう一つ重要な要素は、SuperKEKBは高ルミノシティを目指す衝突型加速器であるという点である。リング間の位相関係の変化はビームの衝突タイミングを狂わせ、ルミノシティを低下させる。最近の傾向では、リング間の位相関係が 1° ずれると、ルミノシティが5~8%程度低下する。したがって位相調整には、調整前後でビームの通過タイミングが変化しないことも要求される。これを実現するには、調整前後でビーム位相が変化しないことが必要である。言い換えると、Fig. 3のベクトル図で、ベクターサムのビーム軸成分 (Eq. (2) の右辺) が変わらないことが必要である。これが調整前後で変化する場合、1-Turn Lossは常に一定なので、ビーム位相がシフトする。

加えて、調整後に何らかの原因で位相がドリフトするとビーム負荷バランスも崩れてしまうので、定期的な再評価・再調整も重要である。そのため、調整手順は手間のかかりすぎないものが望ましい。まとめると、ビーム負荷(加速位相)の調整には以下のことが要求される。

- ステーション間で任意の位相差をつけられること。
- 任意のステーションについて、 ϕ_s を固定(絶対値指定)することもできること(不調な空洞のビーム負荷を軽くしたい場合など)。
- 条件が同じステーションの位相は、可能な限り揃えること。
- 調整の前後で、ビーム位相(1-Turn Lossと平衡するタイミング)が変化しないこと。
- 定期的な再調整が容易な、簡便な方法であること。

3.4 ビーム負荷(加速位相)の調整手段

実際にビーム負荷を変更するには、Fig. 2で示した移相器の設定を変更し、ビームに対する空洞位相を調整することになる。加速器立ちあげ時には空洞ピックアップ信号を直接測定し、1台ずつ隣の空洞との位相差を調整する作業が行われる[4]が、最大1 km離れた空洞間の位相を精密に調整することはできない。また、ビーム運転中にそのような作業を行うことはできない。

必要なのはビームに対する空洞位相なので、ビームから得られる情報を使うしかない。具体的な方法として、周回ビームのスペクトルを観察しながらシンクロtron振動が最も強くなる位相設定を探す方法が考えられる。しかし、この方法では1ステーションずつ位相をスキャンすることになるため、手間がかかるうえにビーム運転(物理実験)と両立できず、精度もよくない。

本評価では、各ステーションのRF電力収支からビーム負荷を求める方法を使うこととした。この方法では、ビーム運転への影響を最小限としながら、一度に全ステーションの位相補正量を決めることができる。具体的な計算方法について、次章で説明する。なお、1:2ステーションにおける2空洞間の位相関係をビーム負荷から調整する方法は既に確立されている[10]。

4. ビーム負荷の評価

4.1 ビーム負荷(加速位相 ϕ_s)の評価

全体のビーム負荷を調整するため、まず現在の各空洞の ϕ_s を知る必要がある。ある1台の加速空洞で入力・消費されるRF電力の関係は、

$$P_{kly} - P_{ref} = P_{beam} + P_{wall} \quad (3)$$

となる[4,5]。ここで、 P_{kly} はKLY出力電力である。 P_{ref} は空洞からの反射電力で、設計ビーム電流において反射が0になるよう入力結合度を設定している[5]。 P_{wall} は空洞壁面損失で、シャントインピーダンスの定義に従い、 V_c^2 に比例する。運転中はLLRFが V_c を一定に制御するので、 P_{wall} も常に一定になる。Figure 5に、ビーム電流の変化に対するこれらのRF電力の変化を示す。

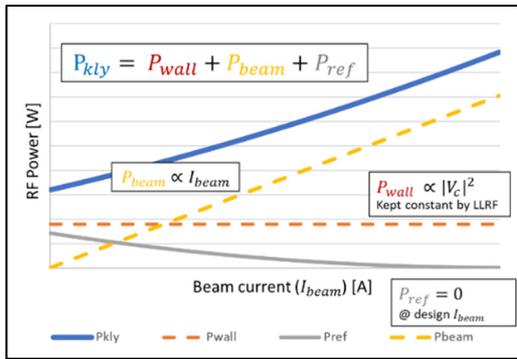


Figure 5: RF powers with respect to beam current.

これらのRF電力のうち、Fig. 5に実線で示した P_{kly} と P_{ref} は直接測定が可能である。 P_{wall} は空洞ピックアップ信号とQ値から計算可能だが、本評価では後述するようにビームを加速しないとき($I_{beam} = 0$)の電力を用いる。これらの加減算から P_{beam} を求めることができる。また、Eq. (1)によって各空洞の位相 ϕ_s も求めることができる。

この計算方法では、通常のビーム運転(物理実験)中の情報のみを使って各空洞の位相を求めることができる。そのため、評価にあたってビーム運転へ影響を与えず、ビームをアポルトさせるおそれもない。移相器の操作を慎重に行えば、ビーム蓄積中の調整も可能である。

実際には、大電力RFの電力測定は誤差が大きいため、測定値1組だけを使った見積もりでは信頼性が低い。そこで、本評価ではビーム電流積み上げ中の P_{beam} の変化を取得し、その線形フィットの傾きから P_{beam} を求めるようにした。また、フィットの切片が P_{wall} である。

4.2 ビーム負荷分配のための位相計算

次に、ビーム負荷を分配するための目標位相の計算方法について述べる。ここで、リング内に N 個の加速空洞があるとし、 i 番目の空洞の V_c 、 ϕ_s をそれぞれ V_i 、 ϕ_i とする。 V_i および蓄積電流 I_{beam} は全て既知であるとする。

前節の方法によって各空洞の ϕ_i が求まるので、リング全体のベクターサム($V_{c,sum}$ 、 $\phi_{s,sum}$)から V_0 (1-Turn Lossと平衡する電圧)も求まる。3.3節で示した条

件の通り、位相調整はEq. (2)の右辺を変えないように行わなければならない。

まず位相差をつけずに、全ステーションの位相をある位相 ϕ_{tgt} に揃えることを考える。リング内の全空洞の位相を揃えたとき、ベクターサムの振幅は V_i の単純な合計になる。つまり、

$$V_0 = \left(\sum_i^N V_i \right) \cos \phi_{tgt} \quad (4)$$

を満たす ϕ_{tgt} が、ビーム位相(ビームが乗るタイミング)を変えずにリング全体で位相が揃う所である。各ステーションで ϕ_i と ϕ_{tgt} の差を求め、その分だけ移相器を動かせば、全ステーションの加速位相を ϕ_{tgt} に揃えることができる。

次に、ステーション毎に相対的な位相差をつけることを考える。その方法として、ステーション毎に ϕ_{tgt} に対する任意の位相差を指定する。 i 番目の空洞に対して位相差 $\Delta\phi_i$ を付けるとき、

$$V_0 = \sum_i^N V_i \cos(\phi_{tgt} + \Delta\phi_i) \quad (5)$$

を満たす ϕ_{tgt} を求めればよい。各ステーションの移相器は、 $(\phi_{tgt} + \Delta\phi_i)$ と ϕ_i の差分だけ動かすことになる。

さらに、任意のステーションの ϕ_s を任意に固定したい場合を考える。このとき、位相を固定したいステーションとそうでないステーションを分けて考える。 j 番目のステーションの位相を $\phi_{j,tgt}$ で固定したいとき、そのステーションの位相調整は、調整前の位相 ϕ_j と $\phi_{j,tgt}$ の差だけ移相器を動かせばよい。残りのステーションについては、 V_0 の不足分を補うように目標位相を考える。このとき、まず j 番目のステーションが担う加速電圧を計算し、それを V_0 から引いた残りを補うよう、Eq.(5)と同様の計算を行う。つまり、

$$V_0 - V_j \cos \phi_{j,tgt} = \sum_{i \neq j}^N V_i \cos(\phi_{tgt} + \Delta\phi_i) \quad (6)$$

として ϕ_{tgt} を計算すればよい。複数のステーションで位相を固定したい場合は、 j に対する和で考える。

5 ビーム負荷調整ツール

5.1 ビーム負荷調整ツールの開発

前章で述べた方法で位相調整を行うため、ステーション毎のビーム負荷を評価し、適切な位相設定を求めるソフトウェア(調整ツール)を開発した。

調整ツールには、以下のような機能を持たせた。

- 任意の時間帯の P_{beam} とビーム電流を表示する。
- プロットの切片(= P_{wall})を差し引く。
- プロット全体を V_c で正規化する。
- プロットの傾きを右の棒グラフに、加速位相(ϕ_s)を下の位相分布に表示する。
- 前章の条件に従ってビーム負荷が分配されるよう、各ステーションの位相変更量を計算する。

Figure 6 は調整ツールの画面例で、ある日の HER におけるビーム負荷を表示し、切片除去と V_c 正規化を有効にしたものである。HER のステーション構成は、ARES 1:2 が 2 式(D04A, C)、1:1 が 4 式(D04E~H)、SCC が 8 式(D10A~D, D11A~D)である。ARES と SCC は 10° 程度の位相差がついているが、1:1 と 1:2 間は位相差がはっきりせず、SCC も位相が 3° 程度の範囲でばらついている。

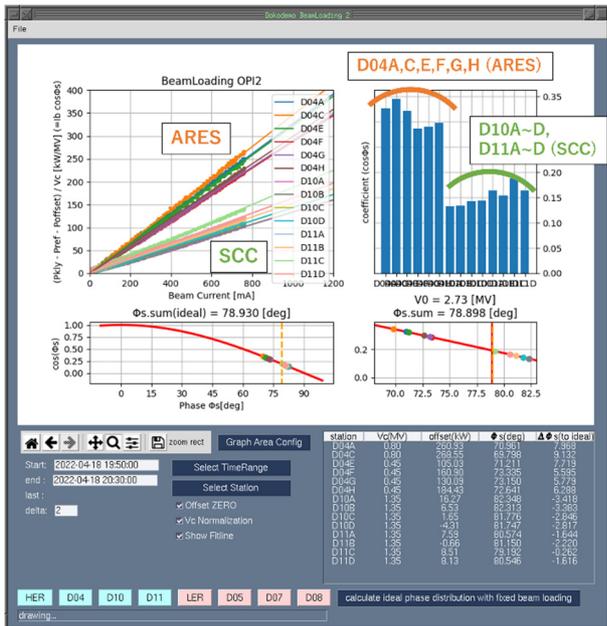


Figure 6: Example of beam loading evaluation tool.

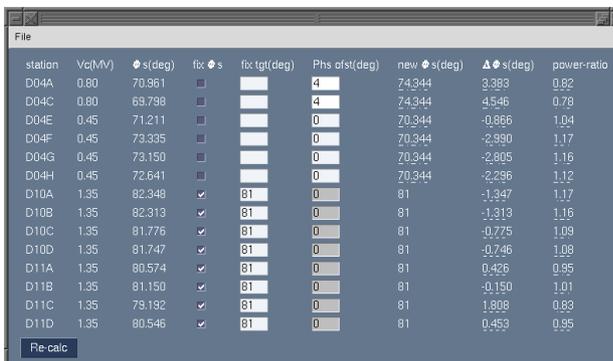


Figure 7: Calculation tool for phase shift.

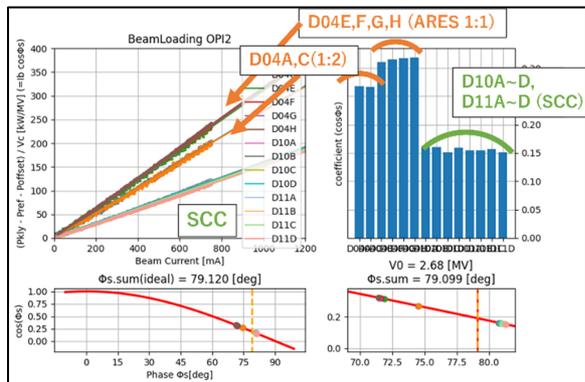


Figure 8: Beam loading distribution after adjustment.

5.2 ビーム負荷調整の例

Figure 6 の状態から、実際にビーム負荷の調整を行った。最適な位相の計算は、別途用意したパネルで行う。今回は、以下の条件において最適な位相を計算した。

- ARES 1:2 ステーションは 1:1 に対し 4° の位相差をつける。(ビーム負荷を軽くする)
- SCC は全て位相を 81° で固定する。

Figure 7 は、これによる計算結果である。Figure 7 の右から 3 列目が目標位相で、2 列目が位相変更量である。実際の移相器の操作は、2 列目の値を別途用意された移相器操作パネルへそのまま入力するだけでよい。

調整後のビーム負荷分布を Fig. 8 に示す。ただし、実際には精度向上のため、位相の再計算と再設定を 2 回繰り返している。調整後は、1:1、1:2、SCC の傾きの違いがはっきりと見えるようになり、位相のばらつきも $\pm 0.5^\circ$ 程度にすることができた。また、調整前後でルミノシティに影響がないことも確認できている。

6 まとめ

SuperKEKB における、RF 電力を用いた加速位相(ビーム負荷)の評価・調整方法について紹介した。大電流ビームを蓄積する SuperKEKB では、ステーション間のビーム負荷バランスの適切な調整が必須となる。この調整は大電流ビームへの対応だけでなく、不調空洞の電力負荷を調整することで無用なビームアバートを減らし、加速器全体の安定性の向上にも貢献できる。また、今回開発したツールによって位相調整をビーム運転と両立しながら手軽に行えることは、予期せぬ位相ドリフトや機器故障の早期発見にも役立つ。さらに、得られた空洞位相の情報は、その他のビームスタディ等にも有用である。

今後は調整精度の向上に加え、位相調整の自動化を目指して開発を続ける予定である。

参考文献

- [1] Y. Ohnishi *et al.*, "Accelerator design at SuperKEKB", Prog. Theor. Exp. Phys., vol. 2013, no. 3, pp.03A011, 2013.
- [2] https://www-linac.kek.jp/skekb/status/web/2022ab_history.png
- [3] K. Akai *et al.*, "RF System for SuperKEKB", Proc. of PASJ2010, pp.177-181.
- [4] 西脇みちる, "RF システム(1)", OHO'19 テキスト (2019).
- [5] 小林鉄也, "RF システム(2)", OHO'19 テキスト (2019).
- [6] M. Nishiwaki *et al.*, "Status of Superconducting Accelerating Cavity and Development of SiC Damper for SuperKEKB", Proc. of PASJ2017, pp. 914-918.
- [7] T. Kageyama *et al.*, "Development of High-Power ARES Cavities", Proc. of PAC97, 1997, pp. 2902-2904.
- [8] K. Watanabe *et al.*, "Current Status of the High-Power RF Systems during Phase2 Operation In SuperKEKB", Proc. of PASJ 2018, pp.464-467.
- [9] T. Kobayashi *et al.*, "Operation Status of LLRF Control System in SuperKEKB", Proc. of PASJ2021, TUP044.
- [10] T. Kobayashi *et al.*, "Phase adjustment between cavities with beam loadings disparity in high power RF distribution system at SuperKEKB", Proc. of PASJ2020, WEPP38.