# 1. はじめに

高周波(RF)加速については、このOHOセミ ナーにおいても過去に様々な講義が行なわれて おり、多数の素晴らしいテキストを読むことがで きる。RF 加速の原理や各種式の導出等、それぞ れの観点から丁寧な説明があり、私も日々それら のテキストをひっくり返しながら、学んでいる。 今更私が何か書こうとしてもいずれかのテキス トの真似となってしまい、よろしくない。とここ まで自分の力不足を言い訳にしたわけだが、この RF システム(1)は、次の RF システム(2)と組み合 わされているので、ここでは、RF システム(2)を 学ぶ前に知っておくべき関係式や定義等を示し ておくことにする。ただし、様々な式の導出等は 省略することが多くなるので、正確に知りたい方 や興味のある方は、過去のテキストを参照してい ただきたい。内容は、SuperKEKB 加速器を想定 しているので、加速空洞は連続波 (CW) 運転によ る定在波型空洞、粒子の速度はほぼ光速、という 前提である。直線加速器などで用いられるパルス 運転や進行波型の加速管や陽子加速器などにつ いては触れないので、こちらも過去の OHO テキ ストを参考にしてほしい。

後半では、SuperKEKB 加速器における RF シ ステムの具体的な例を紹介し、実物を見たことが ない読者でもイメージが湧くようにしたいと思 う。加えて SuperKEKB の立ち上げ時に立ち会え た幸運を生かし、複数の空洞の位相をどのように 揃えたのかを紹介する。具体的な調整法というの は、これまであまり OHO テキストでは触れられ ていないと思うので、何かの参考になれば幸いで ある。

RF に関する文献や教科書は、非常に多くある ので、文中では私がこの文章を書くのに参考にし た過去の OHO テキストを主に引用することにし た。私もそうであるが、最初は日本語のテキスト に助けられることが非常に多いと思う。特に1994 年、2004 年の OHO は KEKB がテーマであり、 テキストには詳細で有用な解説が多くあるので 参考にしていただきたい。

# 2. 知っておくと便利なこと

### 2.1. よく使われる言葉

2.1.1. 粒子のエネルギー・速さ・運動量

SuperKEKB は電子・陽電子加速器であり、そのエネルギーは電子 7 GeV、陽電子 3.5 GeV である。このような高エネルギー加速器では、電子はほぼ光速に到達している。ここで、

$$\beta = \frac{v}{c}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$
(2-1)

を定義する。vは粒子の速さ、cは光速、 $\gamma$ はローレ ンツ因子である。粒子のエネルギー E は、

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} = m_0 \gamma c^2$$
 (2-2)

で表される。 $m_0$ は静止質量である。また、運動量 pは、

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{m_0 \beta c}{\sqrt{1 - \beta^2}} = m_0 \beta \gamma c$$
(2-3)

であり、エネルギーと運動量の関係は、

$$p = \frac{E}{c^2} v \tag{2-4}$$
 
$$E^2 - p^2 c^2 = m_0^2 c^4$$

となる。

### 2.1.2. 電磁波の周波数と波長

周波数:*f*、波長:λ、角周波数:ωとして、以 下の関係にある。

$$f = \frac{c}{\lambda} \qquad \qquad \omega = 2\pi f \qquad (2-5)$$

## 2.1.3. 回転周波数 (revolution frequency)

回転周波数はビームが1秒間にリングを回転 する回数である。記号として*frev*がよく使われる。

$$f_{rev} = v/C \tag{2-6}$$

C はリングの周長である。また、回転周波数の逆数=一周に必要な時間を revolution time と呼ぶ。
 SuperKEKB では、周長約3 km、粒子の速度はほぼ光速であるので、

$$f_{rev} \approx 100 \; \mathrm{kHz}$$

であり、revolution time ≈ 10 µsec である。

2.1.4. RF 周波数

高周波加速空洞に投入する高周波電磁波の周 波数であり、 $f_{rf}$ と表すことが多い。また、角周波 数  $\omega_{rf} = 2\pi f_{rf}$  が使われることも多い。多くの場 合、空洞の共振周波数と一致している。 SuperKEKBの場合、

### $f_{rf} \approx 508.9 \,\mathrm{MHz}$

である。この RF 周波数と回転周波数の関係は

$$f_{rf} = h f_{rev} \tag{2-7}$$

で表され、*h*は harmonic number と呼ばれ、必ず 整数を取る。SuperKEKB では、正確な値は 5120 である。これは、粒子がリングを一周する間の高 周波電場の振動回数であり、後述する安定位相の 数(RF bucket 数とも呼ぶ)である。

Fig.1にリングの模式図を示す。粒子は、塊(バンチ)になっていて加速空洞でこの位相の電場に 乗ると安定にリングを周回する。加速空洞に *f*<sub>rf</sub> で電場が励起されているとする。バンチが1つだ とすると、加速空洞を通過する際には、常に安定 位相に乗るようなタイミングでなければならな い。つまり、 $f_{rf}$ が $f_{rev}$ の整数倍(ここではh) でなければ、位相がずれてしまうことになる。ま た、その1つのバンチが一周して再び空洞に到着 するまでの間にも空洞内にはh回、安定位相のタ イミングが来るので、その回数分(つまりh個)の バンチをリングに入れることができる。



Fig.1 リング上のバンチと加速空洞

2.1.5. ビーム電流

ビーム電流  $I_b$  は、素電荷 e とリングを周回す る全粒子数 N から

$$I_b = f_{rev}eN \tag{2-8}$$

で表せるが、バンチ数  $N_b$  と1つのバンチに含まれる電荷量 q から

$$I_b = f_{rev} q N_b \tag{2-9}$$

とする方が実用的である。

SuperKEKBの陽電子リングの設計ビーム電流 は 3.6 A、設計バンチ数は 2500 であるので、1 バ ンチあたりの電荷量は 14 nC、バンチあたりの陽 電子数は 9×10<sup>10</sup> 個ということになる。

### 2.2. 位相安定性の原理

最も重要な原理の一つである位相安定性の原 理について簡単に触れておく。詳しい説明は[1-4] など多数の OHO テキストや今回の OHO の杉本 さんによる「ビームダイナミックスの基礎」を参 照していただきたい。ここでは、できるだけ平易 な説明をしたい。

高周波加速空洞の電圧 V は、ピーク電圧 V<sub>c</sub> とすると、

$$V = V_c \cos(\omega_{rf} t) \tag{2-10}$$

と表される。電子リングでは、電子が一周で失った放射損失エネルギー $U_0$ を補填するのが加速空洞の仕事である。そのため、Fig. 2 のように、 粒子は $U_0$ と釣り合うエネルギーを得る必要があり、粒子は式(2-11)で定義される位相  $\pm \phi_s$ で空 洞を通過しなければならない。

$$U_0 = eV_0 = eV_c \cos(\pm\phi_s) \tag{2-11}$$

このような理想的な粒子を同期粒子 (synchronous particle)と呼ぶ。しかし実際には、 バンチには粒子の進行方向に広がりがあるので、 同期粒子よりすこし先に到着したり、遅れたりす る粒子があるが、これらも安定に周回させなけれ ばならない。これらの粒子の振る舞いについて考 える。ここで、式(2-11)中の位相が  $\pm \phi_s$  であるこ とに注目する。安定に加速できる同期位相 (synchronous phase)は  $+\phi_s$ か  $-\phi_s$ のどちらか 一つであるが、どちらを取るのかを考えてみる。



Fig. 2 空洞電圧と同期位相  $\phi_s$ 

**13-1**-3

Fig. 3(a)(b)は、空洞を通るバンチと空洞電圧 Vを示している。この図では、横軸は時間を意味するので、バンチは B 側を先頭として空洞を通過する。同期位相  $\pm \phi_s$ のタイミングで空洞に到着したのが同期粒子 S とする。同じバンチの中の A, B にも粒子がいるとする。つまり、B にいる粒子は S よりも先に、A にいる粒子は S よりも遅れて空洞に到着する。到着時間が異なるので、当然感じる空洞電圧が S とは異なる。



Fig. 3 空洞電圧と周回バンチ。同期位相 ±φ<sub>s</sub> にいる粒子 S とバンチの後方 A や前方 B にい る粒子とは感じる電圧が異なる

Fig. 3(a)の場合、A にいる遅く来た粒子は、粒 子Sよりも高い空洞電圧を感じるのでより大きな エネルギーを受け取る。今、SuperKEKB 加速器 を想定しているので、粒子の速度はほぼ光速であ り、後述する momentum compaction factor は通 常は正の値になっている。つまり、エネルギーが 大きくなっても粒子の速度は変わらず、外側の軌 道を通る=軌道長が長くなる=一周する時間が 長くなり空洞に戻ってくるのがSよりもどんどん 遅れてしまう。また、B にいる早く来た粒子は低 い空洞電圧を感じるので受け取るエネルギーが 小さく、内側の軌道を通り一周する時間が短くな り、どんどん早く戻ってきてしまう。つまり、A, B いずれも安定に周回することができない。

一方、Fig. 3(b)の場合、A にいる遅れた粒子は、 粒子 S より小さいエネルギーを受け取る。粒子の エネルギーが小さくなり軌道が内側を通る=軌 道長が短くなるため、一周する時間が短くなる。

そのため一周して戻ってきた粒子は、粒子Sに近 づく。やがてSに追いつくが、粒子のエネルギー はSより小さいため、さらに早く到着するように なり、バンチの前方(Bの方)に向かう。すると 受け取れるエネルギーが大きくなっていき、やが てSと同じエネルギーとなる=一周する時間は同 じになる。しかしバンチ前方にいて S より早く到 着しているので大きなエネルギーを受け取り、S よりも外側の軌道を通り、一周する時間は長くな る=Sに近づく。やがてSと同時に戻ってくるが、 エネルギーが大きいため、さらに遅れて到着する ようになり、バンチの後方に向かう・・・を繰り 返す。もし、周回しているあるバンチの中の粒子 の位置をずっと観察したとすると、リングを何周 かする間にバンチの中で前後に往復したように 見える。この往復運動はつまりは位相の振動であ り一定の周期で安定に繰り返す。同様にSとのエ ネルギー差も正負に振動しながら安定に繰り返 す。つまり、粒子の速度がほぼ光速であれば + が安定に加速できる同期位相である。

一方、速度が小さく、エネルギーにより速度が 変化する場合は、 $-\phi_s$ が同期位相になる。

このように、同期粒子の周辺の粒子は位相とエ ネルギーが振動しながら安定に周回する。これが 位相安定性の原理である。

Fig.4に上述の説明を、同期粒子(位相  $\phi_s$ 、エ ネルギー  $E_0$ )から遅れた粒子(位相  $\phi$ 、エネルギ



Fig. 4 粒子の同期粒子に対する位相差とエネ ルギーのずれの関係 ーは同期粒子と同じE<sub>0</sub>と仮定)の同期粒子との位 相差とエネルギー差の関係で表す。最初は図の(1) にいる。Fig. 3(b)で粒子がAにいるのと同じ条件 である。徐々に同期粒子に近づき位相差がなくな るとエネルギー差が最大になり(2)、エネルギー差 がなくなると位相差が最大になる(3)、という具合 に位相振動とエネルギー振動を繰り返している のがよく分かる。この粒子の振動をシンクロトロ ン振動と呼ぶ。

### 2.3. Transition Energy (遷移エネルギー)

前節の説明をすこし数式で表してみる。ここ で、周回時間を *T*、速度 *v*、リングの周長を *C*と すると、

$$T = \frac{C}{v} \tag{2-12}$$

であるので、

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta C}{C} - \frac{\Delta v}{v} \tag{2-13}$$

が得られる。ここで、momentum compaction factor  $\alpha$ の定義から

$$\frac{\Delta C}{C} = \alpha \frac{\Delta p}{p} \tag{2-14}$$

である。SuperKEKB では通常  $0 < \alpha < 1$  と設定 されている。また、

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{1}{\gamma^2} \frac{\Delta p}{p} \tag{2-15}$$

であるので式(2-13)は、

$$\frac{\Delta T}{T} = \left(\alpha - \frac{1}{\gamma^2}\right) \frac{\Delta p}{p} \tag{2-16}$$

となる。ここで、

$$\eta = \left(\alpha - \frac{1}{\gamma^2}\right) \tag{2-17}$$

として、 $\eta \varepsilon$  slippage factor と呼ぶ。 $\eta > 0$  と  $\eta < 0$  の境界のエネルギーを transition energy と呼び、

$$\gamma_t = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \tag{2-18}$$

で表す。粒子のエネルギーがこの  $\gamma_t$  よりも大き い場合、つまり  $\eta > 0$  の時、運動量が大きくなる ほど周回時間が長くなる。SuperKEKB のように 粒子の速度がほぼ光速の場合、 $\gamma \gg 1$ であるので 式(2-16)は、

$$\frac{\Delta T}{T} \approx \alpha \frac{\Delta p}{p} \tag{2-19}$$

である。この時の安定位相は、Fig.2の + $\phi$  側ということになる。

一方、粒子のエネルギーが $\gamma_t$ よりも小さい場合は $\eta < 0$ となるので、運動量が大きいほど周回時間が短くなる。安定位相は Fig. 2の $-\phi$ 側である。

### 2.4. シンクロトロン周波数

シンクロトロン周波数の式を導出しておく。

同期位相  $\phi_s$  から時間  $\tau$  遅れている粒子(位 相  $\phi = \omega_{rf}\tau + \phi_s$ )について考える。この粒子の 1 周回あたりのエネルギーのずれは、

$$\Delta E = eV_c \cos(\omega_{rf}\tau + \phi_s) - U_0 \qquad (2-20)$$

である。同期粒子のエネルギー $E_0$ とすると、遅れた粒子のエネルギーのずれ $\delta$ は、

$$\delta = \frac{E - E_0}{E_0} \tag{2-21}$$

より、

$$\delta = \frac{\Delta E}{E_0}$$

$$= \frac{1}{E_0} \left( eV_c \cos(\omega_{rf}\tau + \phi_s) - U_0 \right)$$
(2-22)

である。同期粒子の周回時間は前に述べた revolution time ( $T_0$ )であり、単位時間あたりのエ ネルギーのずれは

$$\frac{\Delta\delta}{T_0} = \frac{1}{T_0 E_0} \left( eV_c \cos(\omega_{rf}\tau + \phi_s) - U_0 \right)$$
(2-23)

と書ける。ここで、 $T_0$  はエネルギーの振動周期 (つまりシンクロトロン振動の周期)よりも十分 に小さいと仮定すると、

$$\frac{\Delta\delta}{T_0} = \frac{d\delta}{dt} \tag{2-24}$$

と近似できる。

SuperKEKB では電子はほぼ光速であるので、 運動量とエネルギーの関係は、

$$p = \frac{E}{c} \tag{2-25}$$

としてよい。ここから、

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{\Delta E}{E} \tag{2-26}$$

となり、式(2-19)より

$$\frac{\Delta T}{T_0} = \alpha \frac{\Delta p}{p} = \alpha \frac{\Delta E}{E} = \alpha \delta \qquad (2-27)$$

である。 $\Delta T$  は周回あたりの時間遅れなので $T_0$ で 割ると単位時間あたりの時間遅れになり、

$$\frac{\Delta T}{T_0} = \frac{d\tau}{dt} = \alpha \frac{\Delta E}{E}$$
(2-28)

と書ける。式(2-23)~式(2-28)から

$$\frac{d^2\tau}{dt^2} = \frac{\alpha}{T_0 E_0} \left( eV_c \cos(\omega_{rf}\tau + \phi_s) - U_0 \right) \qquad (2-29)$$

となる。時間遅れ  $\tau$  は小さく、 $\omega_{rf}\tau$  が微小であるとすれば、

$$\frac{d^2\tau}{dt^2} = -\frac{\alpha}{T_0 E_0} eV_c \omega_{rf} \tau \sin \phi_s \tag{2-30}$$

と書ける。よく知られているように

$$\frac{d^2\tau}{dt^2} = -\omega^2\tau \tag{2-31}$$

であるので、ここからシンクロトロン振動の角周 波数  $\omega_s$  は、

$$\omega_s = \sqrt{\frac{\alpha}{T_0 E_0} eV_c \omega_{rf} \sin \phi_s} \tag{2-32}$$

である。ωs から

$$\omega_s = 2\pi f_s = 2\pi f_{rev} \nu_s \tag{2-33}$$

となり、シンクロトロン周波数  $f_s$ 、シンクロトロ ンチューン  $\nu_s$  が得られる。SuperKEKB の電子 リングでの値は、2019 年春の運転実績で 7 GeV,  $V_c = 14.2$  MV とすると、

$$f_{rev} \approx 100 \text{ kHz}$$
  
 $f_s \approx 2.7 \text{ kHz}$   
 $v_s \approx 0.027$ 

である。シンクロトロンチューンは、一周の間に 何回シンクロトロン振動するかを示している。つ まり、SuperKEKB リングの場合、バンチの中の 粒子の位相・エネルギーの振動は、リング約37周 で1回である。

ここでは、粒子のエネルギー損失は定数U<sub>0</sub>としたが、実際には粒子のエネルギーに依存する。また、振動が大きい場合についてもここでは触れないが、いずれも[1-4]等にきちんと説明されているので、参照してほしい。

# 3. SuperKEKBのRF システム

この章では、SuperKEKB 加速器における RF システムの具体例を紹介する。

SuperKEKB の RF システムは、基本的に KEKB のシステムを再利用し、さらなる大電流ビ ームに対応するための増強を行った。Fig. 5 に KEKB と SuperKEKB のパラメータを示す[5,6]。 SuperKEKB の RF の主な課題は、(1)電流が約 2 倍、(2)常伝導空洞のビーム負荷が約 3 倍、(3) 大電流+短いバンチ長により高調波(HOM)パワ ーが増大、ということである。KEKB の RF シス テムに関しては、過去の OHO セミナーでも複数 の講義[4,7-11]が行なわれている。詳細を学びた い方はぜひそちらを参照していただきたい。

### 3.1. RF システムの配置と構成

**Fig. 6**に現在の **SuperKEKB** リング全体の **RF** システムの配置を示す。トンネルの 3 箇所の直線 部をそれぞれ 2 分割し、計 6 箇所の **RF** セクショ



Fig. 6 SuperKEKB リングの RF システム配置 (2019 年現在)。6 箇所の RF セクションの 4 箇 所に ARES、2 箇所に SCC が設置されている。 HER (electron): SCC 8 台+ ARES 8 台, LER (positron): ARES 22 台

ンがあり、4箇所に常伝導空洞(ARES)、2箇所 に超伝導空洞(SCC)が配置されている。Fig. 7 に概要を示したように、RF システムは、低電力 RF (Low Level RF, LLRF)制御系、クライストロ ンとその電源、導波管やサーキュレーター、大電 力反射パワーを吸収するウォーターロードや冷 却システムなどの大電力(High Power RF, HPRF)系、そして加速空洞から成り立っている。 LLRF 制御系および HPRF 系は各 RF セクショ ンの地上部建屋に配置されている。

クライストロンを中心に、ドライブされる空洞 を含めて付随する RF 設備群をグループ化して

Parameter	unit	KEKB (achieved)				SuperKEKB (design)			n)	
Ring		HER			LER		HER		LER	
Energy	GeV	8.0			3.5		7.0		4.0	
Beam Current	А	1.4			2		2.6		3.6	
Number of Bunches		1585			1585		2500		2500	
Bunch Length	mm	6-7			6-7		5		6	
Total Beam Power	MW	~5.0			~3.5		8.0		8.3	
Total RF Voltage	MV	15.0			8.0		15.8		9.4	
		AR	ES	SCC	ARES		ARES	SCC	AR	ES
Number of Cavities		10	2	8	20		10	8	8	14
Klystron : Cavity		1:2	1:1	1:1	1:2		1:1	1:1	1:2	1:1
RF Voltage (Max.)	MV/cav.	0.5		1.5	0.5		0.5	1.5 0		.5
Beam Power (Max.)	kW/cav.	200	550	400	200		600	400	200	600

Fig. 5 KEKB と SuperKEKB の RF に関連するパラメータ

RF ステーションと呼んでいる。1 つの RF ステー ションには、1 台のクライストロンと1 式の LLRF を含み、ドライブされる空洞は SCC であ れば1台、ARES であれば1台または2台の場合 がある。Fig. 6 に示すように現在は電子リング (High Energy Ring, HER) に14式、陽電子リン グ (Low Energy Ring, LER) に16式、合計 30 式の RF ステーションがある。空洞は、HER に ARES 8台と SCC 8台、LER に ARES 22 台が設 置されている。



Fig. 7 SuperKEKBのRF システム概要

Fig. 8 は、地上部のクライストロンからトンネ ル内の空洞まで導波管で接続されている様子を 示している。ARES の 16 台はクライストロン 1 台で 2 台の空洞 (Fig. 8(a)、1:2)、ARES の 14 台 と SCC はクライストロン 1 台で 1 台の空洞 (Fig. 8(b)、1:1) に高周波大電力を供給している。将来 的には、大電流ビームに対応するため、1:1 の ARES の台数を増やす計画である。

#### 3.2. ローレベル RF (LLRF) 制御

RF の制御系は、低いパワーの RF を扱うこと から一般に Low Level RF と呼ばれる。 SuperKEKB の LLRF は、地上部の各建屋内制御 室に設置されている[7]。主な目的は、(1)空洞に 投入する RF 電力の振幅、位相を制御して空洞電 圧を一定に保つ、(2) チューナーを制御して空洞 の共振周波数を基準信号 ( $f_{rf}$ )(あるいは意図的



Fig. 8 地上部のクライストロンから地下トン ネル内の空洞までの導波管接続の模式図。(a) クライストロン1台: ARES 2台、(b) クライ ストロン1台: ARES 1台

に  $f_{rf}$  からずらした  $f_0$ ) と同期させることである。付随して様々な異常な信号を検知してインターロックを発生し、RF 電力供給を止めたり、ビームをアボートさせたりする。

Fig. 9に LLRF のブロック図を示す。RF のフ ィードバック制御の詳細に関しては[8]を参照し てほしい。空洞に設置されたピックアップポート からの RF 信号を検知し、レベル(空洞電圧に相 当)検出および位相検出し、設定値と比較して、 空洞に入力する RF 電力のレベルおよび位相をフ ィードバック制御している。ビーム電流が変化す ると空洞内に励起されるビーム負荷電圧が変化 し、空洞電圧・位相も変化する。そこでピックア ップ信号を電圧と位相の設定値を常に比較し、空 洞電圧・位相が一定に保たれるように制御する。 また、空洞の共振周波数は、温度変化や超伝導空 洞ではヘリウム圧力などによる変形、床の振動な どでも変化する。一方、入力する RF 電力の周波 数は固定されているので、空洞の周波数チューナ ーを調整し、常に同期させる必要がある。チュー ナーの機構は空洞によって違うが、ARES の場合 は、スタブチューナーの空洞内への突き出し量を 変化させて周波数を調整する。一方、超伝導空洞 では、空洞全体の長さを変化させて周波数を調整 する。前出の空洞ピックアップポートからの信号 と空洞入力電力のモニター信号の位相を検出・比 較して、フィードバック制御している。実際に LLRF で制御するのは各チューナーを動作させる ステッピングモーターへのパルス電力やピエゾ アクチュエータへ印加電圧である。

SuperKEKB の LLRF システムの写真を Fig. 10 に示す。(a)は、従来使用されてきたアナログ制 御モジュールを組み合わせたシステム、(b)は、 SuperKEKB 用に開発したデジタル制御システム である。デジタルシステムは、µTCA 規格の EPICS-IOC 組み込み型 FPGA ボードを基盤と したシステムであり、現在 ARES の 9 ステーショ ン (1:1) に導入した。デジタルシステムでは、加 速電界の振幅・位相の安定性として、0.02%、 0.02°(r.m.s)のフィードバック制御安定性(制御精 度)を実現した[12-14]。デジタル LLRF 制御に関





#### Fig.9 LLRF 制御系のブロックダイアグラム

Fig. 10 LLRF 制御ラック
(a) 従来のアナログシステム、(b) 新規導入したデジタル制御システム

しては、SuperKEKB ではないが[15,16]に詳しく 解説されている。また、実際の RF 制御の基本原 理については、RF システム 2 で詳細に解説され ているので、テキストを参照していただきたい。

SuperKEKB の LLRF には空洞の真空監視や ゲートバルブ制御等も含まれる。空洞は、真空悪 化の影響を大きく受ける(放電、空洞性能の劣化 など)ので、常に監視する必要がある。また、空 洞やハイパワー機器の冷却水や温度、各種機器の ステータス等も監視し、異常の際には RF を OFF し、ビームをアボートし、また場合によってはゲ ートバルブを閉めるなど、インターロックによる 機器の保護も LLRF が担っている。

### 3.2.1. 大電力の測定

SuperKEKB では数 100 kW から最大 1 MW の 大電力を制御する必要があるが、LLRF では数 mW のパワーしか扱えない。そこで、大電力測定 では一部だけを取り出す、という工夫がある。

たとえば、空洞ピックアップ信号は、空洞に取 り付けられたアンテナ等により空洞内に励起さ れた高周波電磁場の一部を取り出したものであ る。Fig. 9 中の「KLY 出力」「空洞反射」などは 導波管内を伝送されるパワーのモニタを意味し ているが、これらは、方向性結合器(Fig. 11、方 結)によって大電力の一部を取り出している。導 波管内は進行波と反射波の両方が存在している が、この方結により一方向のみを取り出すことが できる。実際の大電力と方結あるいはピックアッ プポートで取り出した電力の比率は結合度(カッ プリング、C)とよばれている。これら結合度は、 あらかじめ測定しておく。SuperKEKBでは、導 波管は最大1MWの大電力が伝送されるが LLRF で扱えるのは 10 mW 以下のレベルであるので、 最大で8桁近く減衰させる必要がある。そこで結 合度 -50~-60 dB の導波管方向性結合器が使 用されている。

ここで dB とは、電力の比を対数で表したもの である。たとえば Fig. 11 で電力  $P_0$  と  $P_1$  の比 率(結合度C)は、



Fig. 11 導波管の方向性結合器

$$C[dB] = 10 \times \log_{10} \frac{P_1}{P_0}$$
 (3-1)

で表され、例えば  $P_1/P_0 = 1/100$  ならばC = -20 dB となり、10 dB が1桁に相当する。これ は、何桁もオーダーの違う電力を扱うときにとて も便利である。導波管の方結の結合度が -60 dB ということは、6桁の減衰率で電力を取り出せる 結合器、という意味である。つまり、Fig. 11では  $P_0 = 1 \text{ MW} \rightarrow P_1 = 1 \text{ W}$  ということである。さ らに、この導波管方結のある場所から LLRF のあ る制御室までは同軸ケーブルで伝送し、アッテネ ータ (減衰器)等により-20 dB ほど減衰させ、 トータルで -80 dB 程度減衰させて LLRF シス テムで取り扱えるレベルにしている。

ここでもう一つ、dBm という単位も覚えよう。 これは、1 mW=0 dBm と定義した電力の単位で ある。[mW]から[dBm]への変換は、

$$[dBm] = 10 \times \log_{10} P [mW] \qquad (3-2)$$

である。電力単位 dBm と電力比 dB を使って、導 波管から LLRF までの伝送を表してみる。導波管 内の伝送パワー  $P_{wg} = 1$  MW、方結結合度: -60 dB、ケーブルロス: -5 dB、アッテネータ: -15 dBとすると、LLRF で受け取ったパワー  $P_{LLRF}$  は、

$$P_{wg} = 10 \times \log_{10} 10^9 = 90 \text{ dBm}$$
$$P_{LLRF} = 90 \text{ dBm} - 60 - 5 - 15 \qquad (3-3)$$
$$= 10 \text{ dBm} = 10 \text{ mW}$$

と引き算だけで考えることができる。増幅器の増 幅率も dB で表されるので、足し算すればよい。 また、計算すればわかるが、電力比が 2 倍(ある いは半分)なら +3 dB (-3 dB) というのも覚え ておくと便利である。式(3-3)の例ではさらに -3 dB のアッテネータを入れれば、 $P_{LLRF} =$ 5 mW となり、LLRF で扱い易いレベルになる。

方向性結合器は、進行波と反射波を分離してと り出せるのが特徴ではあるが、完全に分離するの は難しい。Fig. 11 の  $P_2$  で示すように、逆方向の パワーの一部も取り出されてしまう。この逆方向 の結合度 ( $P_0$  に対する  $P_2$  の比)をアイソレーシ ョン I、 $P_1$  に対する  $P_2$  の比を方向性 Dと呼ぶ。

$$I[dB] = 10 \times \log_{10} \frac{P_2}{P_0}$$
$$D[dB] = 10 \times \log_{10} \frac{P_2}{P_1}$$
$$D = I - C$$
(3-4)

である。導波管方結の方向性は、通常 -20~-30 dB であり、つまり 1%程度は逆方向の信号が 混じる。また、方結の結合度の校正は難しく、大 電力測定には ±5%程度の誤差が含まれると考え られる。

この項では、方結などの減衰率は-20 dB など と負で、増幅率は正で表したが、日常的には、符 号を省略して単に 20 dB の方結、とか、20 dB の アンプ、などと呼ぶことが多い。関係者と会話す るときには、要注意である。

# 3.3. ハイパワーRF (HPRF)

ハイパワーRF の機器を Fig. 12 に示す。LLRF からは数 mW 程度で出力された RF 電力はアン プで数 W に増幅され、クライストロンに入力さ れる。SuperKEKB のクライストロン (Fig. 12(a), Fig. 13) は、増幅率 50dB (5 桁) のゲインを持ち 最大1MWの大電力RFを出力できる。大きなエ ネルギーを扱うため、機器の保護と省エネルギー のために変換効率の最適化が必須であり、必要に 応じて動的にアノード電圧を制御することによ り、コレクターロスを最適化し、効率化を図って いる。クライストロンは2台で1式の電源 (Fig. 12(b)) により制御されていて、カソード用高圧電 源、アノード用電源、ヒーター電源、収束コイル 電源、クローバー回路等で構成されている[17-19]。クライストロンから出力された大電力 RF は、導波管を通って地下の空洞に導かれる。これ を立体回路と呼ぶ (Fig. 12(c))。途中には、サーキ ュレーターが挿入されていて、空洞へ送るパワー と空洞からの反射パワーを分け、反射パワーがク ライストロンに戻らないように 1MW ウォータ ーロードで熱として吸収する。また、1:2 で空洞 に接続されている場合は、Magic Tee (MT, Fig. 12(d)) と呼ばれる Power Divider で分岐して2台 の空洞まで伝送する。この場合、1MW ウォータ ーロードは MT の第4ポートに設置され、反射パ ワーを吸収する。導波管が地下に入る直前には導 波管型移相器 (Fig.12 (d)) があり、RF の位相を 大まかに調整することができる。導波管の経路長 は空洞ごとに異なるため、予めこの移相器で空洞 間の位相差を設計値に近づけておく。2 台空洞か ら MT に戻ってくる反射パワーは、お互いが逆位 相になっていれば全て第4ポートに合成されて出 力される。もし、同相であると上流のサーキュレ ータやクライストロン側に戻ってしまう。つま り、2空洞の導波管長は往復で逆位相になるよう に、片道で 90 度位相がずれるようにこの移相器 で設定する必要がある。導波管の各所には、RF 測 定用の方向性結合器が設置されており、それぞれ LLRF にてモニターし、制御に使用している。



Fig. 12 ハイパワーRF 系の機器。(a) 1MW クライストロン、(b) クライストロン高圧電源システム、(c) 立体回路系(導波管、サーキュレーター、1MW ウォーターロード他)、(d) Magic Tee、(e) 導波管移相器



Fig. 13 クライストロンの構造

# 3.4. 常伝導空洞 (Accelerator Resonantlycoupled with Energy Storage, ARES)

SuperKEKB の ARES は、KEKB 加速器の大 電流ビーム(設計では 2.6 A @LER) に対応する ために独自に開発された。SuperKEKB では upgrade を施して再利用している。空洞設計など の詳細は[7,9,20-22]を見ていただきたい。Fig. 14 に加速器トンネル内の ARES、Fig. 15 に ARES の模式図を示す。もっとも特徴的なのは、3台の 空洞を連結した構造になっていることである。加 速空洞とエネルギー貯蔵空洞が、その間の結合空 洞を介して結合している。貯蔵空洞が加速空洞の 9倍のエネルギーを蓄えることで、ビーム負荷を 1/10に見せる効果がある。これにより、大電流ビ ームにより空洞の detune 量が大きくなると結合 バンチ不安定性が励起される(詳細は RF システ ム2や[11])が、detune 量を抑制することができ る。大電流ビームによって励起される高調波電力 (HOM)は、加速空洞に取り付けられた扁平矩形型 HOM 導波管、および加速空洞の上・下流には溝 付きビームパイプに設置された SiC 製電波吸収体 で取り除くことができる。SuperKEKB への主な upgrade は、大電流ビームに対応するため、より 電流の大きい LER に HER から空洞を移設した。 また、クライストロンと 1:1 構成の空洞を増やし、 かつ入力結合器の結合度  $\beta$  を 3 から 5 に増強し た。 $\beta$  は、ビームがないときに空洞内で消費され るパワーと入力結合器から出て行くパワーの比 で定義され、ビーム蓄積時に反射パワーを小さく (できれば 0) にするために、通常  $\beta > 1$  にして おく。 $\beta = 5$ というのは、空洞消費パワーに対して ビーム負荷が 4 倍のときに反射パワーが 0 になる 設定である。詳しくは、RF システム 2 で解説し



Fig. 14 SuperKEKB トンネル内の ARES 空洞



Fig. 15 ARES 空洞

ているので参照してほしい。この結合度  $\beta$  の増 強により、より大きなビーム負荷を負担すること ができる。SuperKEKB の ARES 空洞の運転パラ メータ(設計値)を Table 1 に示す。

Table	1:	ARES	運転ハ	『ラ	メ	-/	5

Parameters	SuperKEKB (design)			
Number of ARES cavities	HER: 8, LER: 22			
Beam power [kW/cavity]	600			
RF voltage [MV/cavity]	0.5			

#### 3.5. 超伝導空洞 (Superconducting Cavity, SCC)

SuperKEKB の SCC は、KEKB 加速器用に開 発された高調波減衰型超伝導空洞を再利用して いる。空洞設計の詳細は[23-25]を参照していただ きたい。Fig. 16 にトンネル内の SCC および Fig. 17に SCC の外観と断面図を示す。ニオブ製単セ ル超伝導空洞の外側に液体ヘリウム槽、その外側 に断熱真空槽の3重構造になっており、この部分 をクライオモジュールと呼ぶ。また、SuperKEKB の SCC では、クライオモジュールの上・下流の 室温部分に後述の高調波 (HOM) 吸収体や真空排 気系・真空計を取り付けたビームパイプを接続 し、その両端にゲートバルブを設け、外部のビー ムパイプから独立できる構造とした。超伝導空洞 は内表面の汚れに非常に敏感であるが、この構造 により外部からの汚染をできるだけ防いでいる。 また便宜上このゲートバルブまでを SCC モジュ ールなどと呼ぶことがある。

空洞の上・下流のビームパイプを大口径にする ことで、ビームによって励起された HOM パワー を空洞の外に取り出しやすくし、ビームパイプに 円筒型のフェライト製 HOM 吸収体を取り付けて HOM パワーを吸収できる。入力パワーは同軸型 の入力カプラから空洞内に供給している。

KEKBから SuperKEKB への upgrade では、 SCC に関する運転条件は、ほとんど保存されるため、大きな変更はない。一方で、大電流化に伴い HOM パワーが増大するため、ゲートバルブの外 側に、SiC 製の HOM 吸収体を追加し、大電流運転に備えている。HOM は、空洞を通過するビームによって励起される高い周波数成分のパワーであるが、バンチ長が短くなるほど、ビーム電流及びバンチ電流が大きくなるほど、大きなパワーになる。SuperKEKBのSCCでは、KEKBの3~4倍に増加すると予測[26]している。

また、SCC は KEKB 時代から 10 年以上のビ ーム運転に使用しているため、空洞性能(Q₀値や



Fig. 16 SuperKEKB トンネル内の SCC



Fig. 17 SCC 外観と断面図

Vc 最大値)が低下している空洞もある。そこで、 超伝導空洞の表面処理でよく使われる高圧水洗 浄を応用した横型高圧水洗浄システムを開発し、 実機に適用した。その結果、低下していた Qo値が 回復し、問題なく運転に使用している[27,28]。 SCC の運転パラメータを Table 2 に示す。

ここでは詳しく述べないが、超伝導空洞の運転 には、ヘリウム冷凍機システムも不可欠である。 SuperKEKBのヘリウム冷凍機システムは、1980 年代のトリスタン加速器時代に開発されたもの [29,30]をベースにして改良しながら現在も使わ れているが、非常に安定なシステムであり、SCC の安定運転への寄与は大きい。

Table 2: SCC 運転パラメータ

Parameters	SuperKEKB (design)
Number of SCcavities	HER: 8
Beam power [kW/cavity]	400
RF voltage [MV/cavity]	1.5
HOM power [kW/cavity]	37

# 4. 空洞の位相制御

## 4.1. 空洞位相のずれ

第2章では、加速空洞が1台であるかのように 説明した。しかし、第3章で示した通り、 SuperKEKB 含め多くの高エネルギー加速器で は、複数の加速空洞を持っている。

Fig. 2を思い出して欲しい。この図は、あたか もリングに加速空洞が 1 台だけのように見える が、実は複数の加速空洞の加速電圧の合成であ る。そこで、空洞電圧の振幅 Vc を Vc.sum と置 き換えてみる。ここでリングに加速空洞が 2 台(空 洞 1,2) あり、それぞれの加速電圧の振幅が同じ だと仮定して Vc.sum を合成してみると、Fig. 18 で示すようにいくつもの場合が考えられる。Fig. 18(a)は、2 台の空洞の(ビームが見る)RF 位相 がそろっている場合である。一方、Fig. 18(b)は、 位相がずれている場合である。このように、各空 洞の加速電圧がどのような振幅・位相だとして も、ビームはその合成である Vc.sum だけをみる ので、 $V_0$ を得られる $\phi_s$ が自動的に決まる。



Fig. 182 台の空洞による Vc の合成。ビームは 合成された Vc.sum しか見ない。

もう少し SuperKEKB に近づけるために、空洞 が4台ある場合を考える。Fig. 19は、空洞1,2,3,4 の各空洞電圧とその合成を示している。ここで は、空洞 1,2,3 は多少ずれてはいるがほぼ同じ位 相だが、空洞4だけが大きくずれている、と仮定 した。このような場合でも、ビームは Vc.sum だ けを見て、Voを得られる $\phi_s$ に乗る。ここで空洞電 圧をベクトル V1, V2, V3, V4 として、Fig. 20(a)に 示す。横軸は、ビームが見る電圧 (αビームが得ら れるエネルギー=ビーム負荷)に相当する。V4は、 ビームにとって負の電圧を発生することを示し ており、むしろ減速してしまうことになる。つま り、他の3空洞の加速電圧を相殺してしまうこと になり、効率が悪い。また、空洞への入力パワー もビームを加速している(ビーム負荷を負担して いる) ほど大きくなるため、空洞 1,2,3 が 4 の分 も分担することになり、クライストロンの余計な 負荷となる。また、位相が完全にそろっている Fig. 20(b)と比較するとわかりやすいが、位相がずれて いる場合はVc.sum が小さくなるため $\phi_s$ が小さく



Fig. 194台の空洞による Vc の合成。1台は大きく位相がずれていると仮定



Fig. 20 Vc のベクトル表現 (a) Fig. 19 の各空洞 の Vc と Vc.sum, (b) 4 空洞の位相が揃った場合

なる。 *φ*<sub>s</sub>が小さくなるというのは、Fig. 18 などで バンチの位置がピークに近づくということであ り、バンチ内の位相差に対するエネルギーの範囲 が小さくなることを意味する。ビームが安定して 周回できるエネルギーの安定領域をバケットハ イトと呼ぶが、*φ*<sub>s</sub>が小さくなるということは、こ の安定領域が小さくなることであり、ビームの安 定性が悪くなる。このような不都合があるため、 空洞の位相はできるだけ揃えて運転するのが理 想的だ。

### 4.2. 位相調整の必要性

LLRF が使っている基準となる信号は、マスタ ーオシレータ(MO)と呼ばれる1台の信号発生 器(SG)で作り、すべてのRFセクションの制御 室に分配している[31]。最長2kmの距離の伝送路 であるが、高精度な位相安定制御をおこなってい るため、各セクションにおける位相は安定してい るが、セクション間に位相差があり、大きさは不 明である。基準信号は、制御室内で各 LLRF ステ ーションに分配され、クライストロンに送られ (LLRF 出力とクライストロン出力は位相ロック ループ(PLL)で位相を合わせている)、大電力 RF は導波管によって空洞まで送られ、空洞電圧を励 起する。導波管経路長はステーションごとに異な るため、同じ RF セクション内でも空洞同士の位 相はずれてしまう。

まったく新しい加速器はもちろん、KEKBから の upgrade で RF システムの構成を変更した SuperKEKBでも、空洞間の位相関係はまったく 未知である。そのため、安定にビームを加速する ためには、空洞電圧の位相を調整することが必要 である。

### 4.3. SuperKEKB 立ち上げにおける位相調整

SuperKEKB 立ち上げ時に実施した位相調整に ついて紹介する。

各 RF セクション内の空洞間距離は、一般的に RF 波長の整数倍(ARES の 1:2 の空洞の場合は、 整数倍+1/4 波長分。3.3 参照)の距離に置かれて いる。つまり、空洞間を同じ位相に調整すれば、 ほぼ光速のビームはどの空洞でも同じ位相に乗 ることができる。

今回の立ち上げでは、

(1) 各 RF セクション内での空洞間の位相合わせ(ビーム運転開始前)

(2) RF セクションの位相合わせ(ビーム運転開始時)

(3) 各ステーションの位相微調整(運転中)

の3段階で位相調整を行った。以下に順をおって 紹介する。

# 4.3.1. 各 RF セクション内の位相調整

この項では、各 RF セクション内での空洞間の 位相合わせについて述べる。この調整は、ビーム 運転開始前に実施する。 SuperKEKB の各 RF セクションには、最大 8 台の空洞がある。まずは、この 8 台の空洞間の位 相調整を行った。Fig. 21 に 1 つの ARES 空洞セ クション(D8)の模式図を示す。このセクションに は、1:2 構成の空洞 3 組 6 台と 1:1 構成の空洞 2 台が設置されている。調整は、10 kW 程度の低い パワーを空洞に入力し、空洞のピックアップ信号 を観察して行った。



Fig. 21 RF セクションの例

はじめに、1:2構成の各ステーション内の2空 洞間位相を調整する。例えば、D8A ステーション を例に考えよう。1:2 構成であるので、クライス トロンの下流に Magic Tee (MT) があり、D8A-1, D8A-2 の 2 台の空洞に導波管でパワーを供給 している。3.3 でも述べたが MT には、空洞で反 射したパワーが逆位相で戻ってくる必要がある ので、空洞間の位相差を90度にする必要がある。 図中の WG Phase Shifter (導波管移相器) は、 Fig. 12 にあるように、導波管に挟んだベローズ長 を変えて位相を調整するものである。D8A-2空洞 への経路に設置された移相器を動かせば、D8A-1 の位相を基準として、D8A-2の位相を調整でき る。この移相器を使って、2空洞間の位相差が90 度になるように調整した。他の1:2のステーショ ンも同様に調整を行った。

次に、ステーション間の位相を揃える。例えば、 D8A, D8B 間を同位相に揃える場合は、それぞれ のビーム上流側の空洞 (D8A-1, D8B-1)の位相を 観察しながら、Station Phase と呼んでいる LLRF 出力の位相を調整する。つまり、D8A-1, D8A・2 空洞間の 90 度の位相差を保持したまま、 ステーション全体の位相が動き、隣のステーショ ンとの位相差を調整できる。この調整により、同 じ RF セクション内のステーション間の位相を合 わせる。ここで、図中の D8C, D8D 空洞に注目す る。これは、もともと 1:2 構成であった空洞を SuperKEKB への Upgrade で 1:1 構成に変更し たものである。トンネル内の空洞の位置は動かし ていないため、D8C, D8D 空洞間は、別なステー ションでありながら、90 度の位相差がある。

このような位相調整を4箇所のARES セクションで実施した。この調整により、各RF セクション内の空洞位相は数度の範囲内で揃えることができる。

SCC セクションは、SuperKEKB への upgrade でも空洞とハイパワー系の構成がほとんど変わ っていないため、KEKB 運転時の位相関係が保存 されていると期待できることや、冷却しなければ 空洞電圧を観察できないことなどからステーシ ョン間の位相調整は実施しなかった。

### 4.3.2. RF セクション間の位相調整

続いてビーム運転開始時の位相調整である。初 めてリングへのビーム入射をする際には、ビーム と空洞の位相関係はまったく未知である。

SuperKEKBの初入射時の調整では、各セクシ ョンで1ステーションのみ空洞を立ち上げ、Room Phase と呼んでいるセクション全体の位相(Fig. 21 参照)を調整し、ビーム蓄積を試みた。Fig. 22 のオシロ画像は、(a) RF Off、(b) RF On(位相調 整前)、(c) RF On(位相調整後)である。(a)の RF Offでは、ビームは入射され130周ほど周回する が減衰してしまう状態、(b)は空洞を立ち上げたも のの位相が合っていないため、むしろ周回数が減 少してしまった状態、(c)は Room Phase 調整によ り、ビーム蓄積に成功した状態である。このよう に、RF セクションごとに Room Phase を調整し た後、すべての空洞を立ち上げて、本格的なビー ム運転を開始した。



Fig. 22 SuperKEKB LER ビーム初入射時の Beam Position Monitor (BPM) オシロ画像。図 上部の波形1パルスがビーム1周を意味する。 (a) RF OFF でのビーム周回(~130 周)  $\rightarrow$  (b) RF On したが位相調整なしのため周回数減少  $\rightarrow$  (c) RF 位相調整してビーム蓄積に成功

## 4.3.3. 各ステーションの位相微調整

ビーム蓄積に成功した後は、ビームを使って位 相の確認が可能となる。第2章で式(2-11),(2-33) で示したように、ビームの運転パラメータと Total Vc からシンクロトロン周波数が計算でき る。ここで Total Vc は、設定空洞電圧値の合計で ある。また、シンクロトロン周波数は周回ビーム から実測できる。もし、空洞間の位相がずれてい れば、4.1 で示したようにビームが見る実効的な Vc.sum が小さくなり、シンクロトロン周波数が 計算値よりも小さくなる。また、位相のずれはビ ーム負荷にも現れる。

これらをビーム運転中に観察し、できるだけビ ーム負荷が均等になるように、Station Phase を 微調整する。ビーム電流が大きくなるとわずかな 位相のずれもビーム負荷の差として影響が出る ので、運転の進捗に伴って随時調整を行う。

#### 4.3.4. 衝突調整

安定なビーム蓄積が成功した後は、当然電子と 陽電子を衝突させなければならない。その衝突調 整パラメータの一つが RF 位相である。

前項までは、電子あるいは陽電子のそれぞれの リング内で空洞の位相を揃える、という話だった が、今度は、2 つのリングのタイミングを合わせ る調整である。電子と陽電子は、決まった RF 周 期ごとに1つのバンチが安定位相に乗っている。 その電子と陽電子のバンチが乗った位相が全く 同じタイミングで衝突点で重ならなければ、衝突 せずにすれ違ってしまう。

SuperKEKB では、LER (陽電子) の3つの RF セクションの Room Phase を同時に動かせるシス テムを用意し、衝突調整を行っている。初衝突の 際はもちろん、運転パラメータを変更した場合な どにもこの調整を行っている。

# おわりに

SuperKEKB は、KEKB の 40 倍のルミノシティ 8×10<sup>35</sup> /cm<sup>2</sup>/s を目指して、2016 年に加速器 の調整運転を開始し、2018 年には初衝突、2019 年には Belle II 測定器をフルバージョンにして本 格的な衝突実験を開始したところである。まだ、 ハードウェアもビームも設計のパラメータには 達していないが、今後も随時 upgrade し、ルミノ シティ向上を目指していく。 SuperKEKBのRFシステムは、トリスタンからの知識と技術の蓄積の上に成り立っており、日常の加速器運転ではあまり意識しなくとも安定に運用できている。しかし、加速器やRFが専門でない方でもここに記した最低限のことを思い出してくれれば、安定運用の裏で何が行われているのか、想像の助けになれば嬉しい。

# 参考文献

- [1] 神谷幸秀、"加速器の原理 シンクロトロン及 びストレージング"、OHO1984.
- [2] 大西幸喜、"加速器の基礎とダンピングリン グ"、OHO2006.
- [3] 絵面栄二、"高周波加速入門"、OHO2003.
- [4] 森田欣之、"高周波加速 2"、OHO2009.
- [5] K. Akai *et al.*, "RF systems for the KEK B-Factory", NIM A499, p45-65 (2003).
- [6] K. Akai *et al.*, "Design Improvement and Construction Status of SuperKEKB", Proc. of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, MOPL02 (2011).
- [7] 赤井和憲、"RF システム"、OHO1994.
- [8] 絵面栄二、"RF フィードバック"、OHO1994.
- [9] 影山達也、"高次モード減衰型空洞"、 OHO1994.
- [10]古屋貴章、"超伝導空洞"、OHO1994.
- [11]阿部哲郎、"高周波加速入門"、OHO2004.
- [12] K. Nakanishi *et al.*, "Development of LLRF system for SuperKEKB", Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, SUP093 (2013).
- [13] T. Kobayashi *et al.*, "Development and Production Status of New LLRF Control System for SuperKEKB", Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, SUP107 (2014).
- [14] T. Kobayashi *et al.*, "Operation Status of LLRF Control System for SuperKEKB Commissioning", Proc. of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, TUP011 (2016).
- [15]松本利広、"高周波電力制御の設計"、 OHO2006.

- [16] 松本利広、"ILC の高周波源 低電力高周波 制御・立体回路"、OHO2014.
- [17] M. Ono *et al.*, "TRISTAN RF System with Normal Conducting Cavity", KEK Internal 87-6 (1987).
- [18] 末武聖明、"高周波加速装置"、OHO1991.
- [19] K. Watanabe *et al.*, "Current Status of the High-Power R Systems in SuperKEKB for Phase2", Proc. of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, WEP055 (2017).
- [20] Y. Yamazaki and T. Kageyama, Part. Accel. 44 107 (1994).
- [21] T. Kageyama *et al.*, "Development of High-Power ARES Cavities", Proc. PAC97, p. 2902 (1997).
- [22] T. Kageyama *et al.*, "ARES Cavity System for SuperKEKB", Proc. of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p. 1245 (2011).
- [23] T. Furuya *et al.*, "Superconducting Accelerating Cavity for KEK B-factory", Proc. of SRF1995, CEA-Saclay, France, 1995, p. 729.
- [24] S. Mitsunobu *et al.*, "High Power Test of the Input Coupler for KEKB SC Cavity", Proc. of SRF1995, CEA-Saclay, France, 1995, p. 735.
- [25] Y. Morita *et al.*, "Status of KEKB Superconducting Cavities and Study for Future SuperKEKB", Proc. of SRF2009, Berlin, Germany, 2009, p.236-238.
- [26] M. Nishiwaki al., "Status etof Superconducting Accelerating Cavity and of Development SiC Damper for SuperKEKB", Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 1-3, 2017, Sapporo, Japan, p.914-918.
- [27] Y. Morita *et al.*, "Developments of Horizontal High Pressure Rinsing for SuperKEKB SRF Cavities", Proceedings of SRF2015, Whistler, BC, Canada, 2015, p.443-447.
- [28] M. Nishiwaki *et al.*, "Status of Superconducting Accelerating Cavity at SuperKEKB Phase-2 Operation", Proceedings of the 15th Annual Meeting of

Particle Accelerator Society of Japan, August 7-10, 2018, Nagaoka, Japan, p.428.

[29] 細山謙二、"ヘリウム冷凍機"、OHO1992.

- [30] K. Nakanishi et al., "KEKB/SuperKEKB Cryogenics Operation", Proc of eeFACT2018, Hong Kong, China, 2018, WEPAB04, p276-281.
- [31] T. Kobayashi *et al.*, "RF Reference Distribution System for SuperKEKB", Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, SUP094 (2013).