

RF システム(1)

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。

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か、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う、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)と組み合わせられているので、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、

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、

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

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

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

で表される。 m_0 は静止質量である。また、運動量 p は、

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

であり、エネルギーと運動量の関係は、

$$p = \frac{E}{c^2} v$$
$$E^2 - p^2 c^2 = m_0^2 c^4 \quad (2-4)$$

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。

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

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 f_{rev} がよく使われる。

$$f_{rev} = v/C \quad (2-6)$$

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、

$$f_{rev} \approx 100 \text{ kHz}$$

であり、**revolution time** $\approx 10 \mu\text{sec}$ 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、

$$f_{rf} \approx 508.9 \text{ MHz}$$

である。この RF 周波数と回転周波数の関係は

$$f_{rf} = h f_{rev} \quad (2-7)$$

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乘ると安定にリングを周回する。加速空洞に f_{rf} 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。

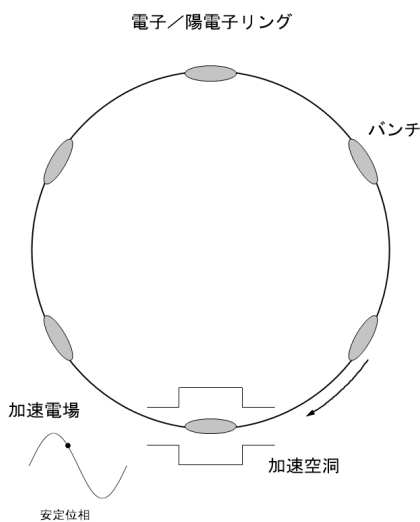


Fig. 1 リング上のバンチと加速空洞

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

$$I_b = f_{rev} e N \quad (2-8)$$

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

$$I_b = f_{rev} q N_b \quad (2-9)$$

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^{10} 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_c とすると、

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

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。

$$U_0 = eV_0 = eV_c \cos(\pm\phi_s) \quad (2-11)$$

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。

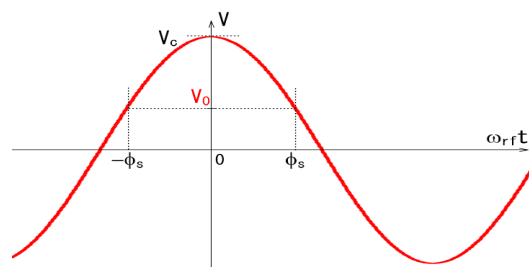


Fig. 2 空洞電圧と同期位相 ϕ_s

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。

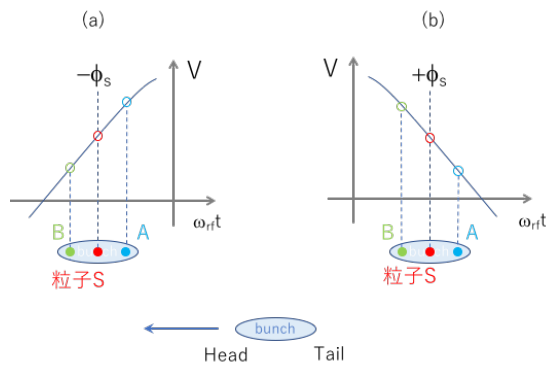


Fig. 3 空洞電圧と周回バンチ。同期位相 $\pm\phi_s$ にいる粒子 S とバンチの後方Aや前方Bにいる粒子とは感じる電圧が異なる

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 $+\phi_s$ 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 ϕ_s 、エネルギー E_0) から遅れた粒子(位相 ϕ 、エネルギー

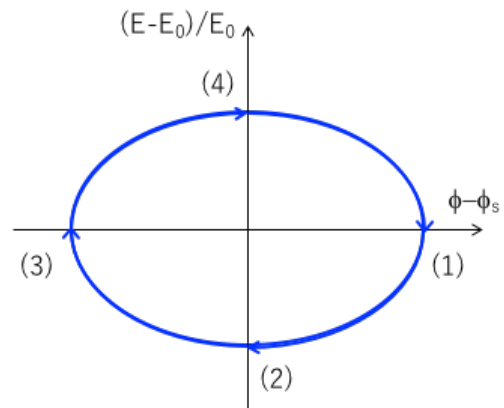


Fig. 4 粒子の同期粒子に対する位相差とエネルギーのずれの関係

一は同期粒子と同じ E_0 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、

$$T = \frac{C}{v} \quad (2-12)$$

であるので、

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta C}{C} - \frac{\Delta v}{v} \quad (2-13)$$

が得られる。ここで、momentum compaction factor α の定義から

$$\frac{\Delta C}{C} = \alpha \frac{\Delta p}{p} \quad (2-14)$$

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

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{1}{\gamma^2} \frac{\Delta p}{p} \quad (2-15)$$

であるので式(2-13)は、

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

となる。ここで、

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

として、 η を 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、

$$\gamma_t = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \quad (2-18)$$

で表す。粒子のエネルギーがこの γ_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、

$$\frac{\Delta T}{T} \approx \alpha \frac{\Delta p}{p} \quad (2-19)$$

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 γ_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 ϕ_s から時間 τ 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、

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

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 δ は、

$$\delta = \frac{E - E_0}{E_0} \quad (2-21)$$

より、

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{\Delta E}{E_0} \\ &= \frac{1}{E_0} (eV_c \cos(\omega_{rf}\tau + \phi_s) - U_0)\end{aligned}\quad (2-22)$$

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

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

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、

$$\frac{\Delta\delta}{T_0} = \frac{d\delta}{dt} \quad (2-24)$$

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、

$$p = \frac{E}{c} \quad (2-25)$$

としてよい。ここから、

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{\Delta E}{E} \quad (2-26)$$

となり、式(2-19)より

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

である。 ΔT 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、

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

と書ける。式(2-23)～式(2-28)から

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

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

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

と書ける。よく知られているように

$$\frac{d^2\tau}{dt^2} = -\omega_s^2 \tau \quad (2-31)$$

であるので、ここからシンクロトロン振動の角周波数 ω_s は、

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

である。 ω_s から

$$\omega_s = 2\pi f_s = 2\pi f_{rev} \nu_s \quad (2-33)$$

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 ν_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、

$$f_{rev} \approx 100 \text{ kHz}$$

$$f_s \approx 2.7 \text{ kHz}$$

$$\nu_s \approx 0.027$$

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_0 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

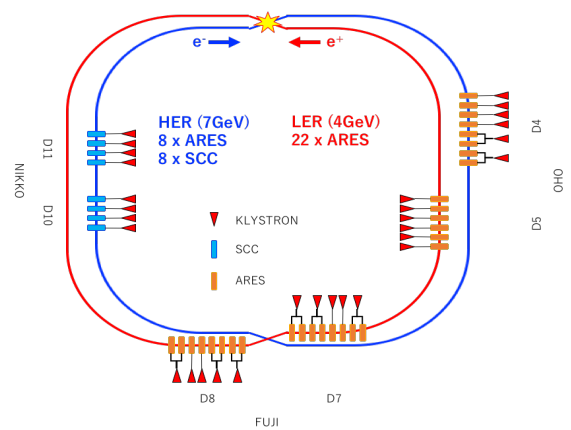


Fig. 6 SuperKEKB リングの RF システム配置 (2019 年現在)。6 箇所の RF セクションの 4 箇所 ARES、2 箇所に SCC が設置されている。HER (electron) : SCC 8 台+ ARES 8 台、LER (positron) : ARES 22 台

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)			
		HER		LER		HER		LER	
Ring		HER		LER		HER		LER	
Energy	GeV	8.0		3.5		7.0		4.0	
Beam Current	A	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	
		ARES		SCC		ARES		ARES	
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	
Beam Power (Max.)	kW/cav.	200	550	400	200	600	400	200	600

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

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。

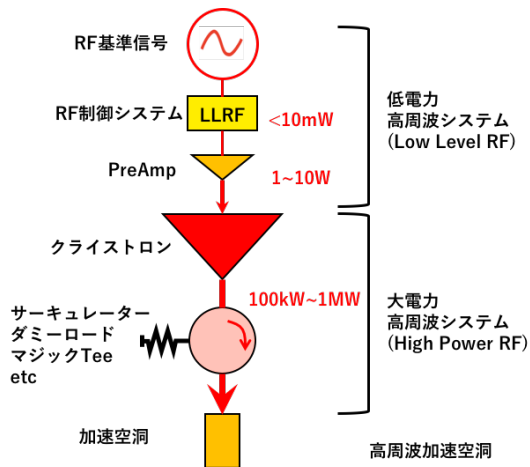


Fig. 7 SuperKEKBのRFシステム概要

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

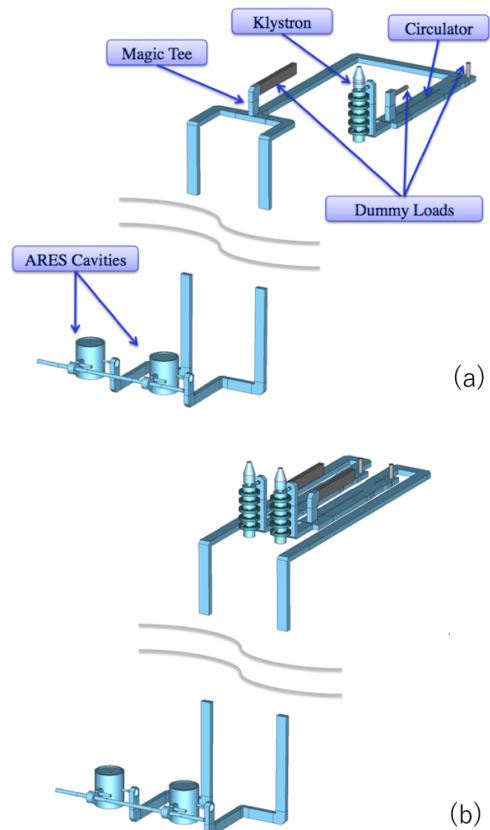


Fig. 8 地上部のクライストロンから地下トンネル内の空洞までの導波管接続の模式図。(a) クライストロン1台: ARES 2台、(b) クライストロン1台: ARES 1台

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

ステップ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、 μ TCA 規格の EPICS-I/OC 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%、 $0.02^\circ(\text{r.m.s})$ 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

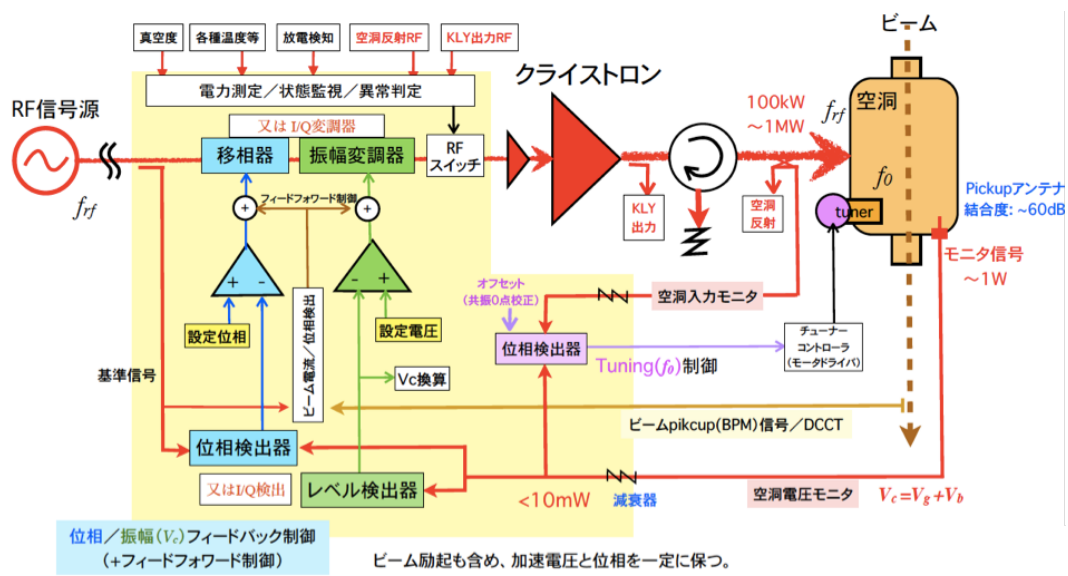


Fig. 9 LLRF 制御系のブロックダイアグラム

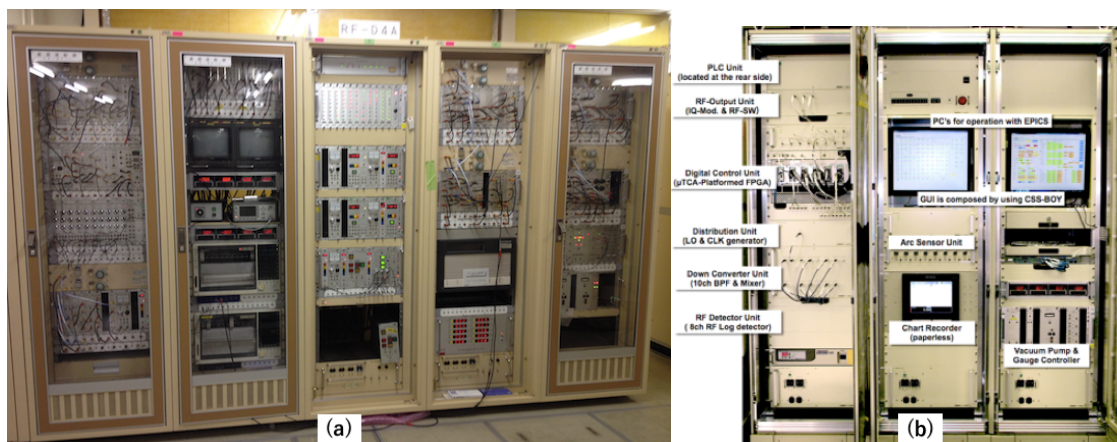


Fig. 10 LLRF 制御ラック

(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 制御の基本原則については、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 1 MW 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 $-50 \sim -60$ 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、

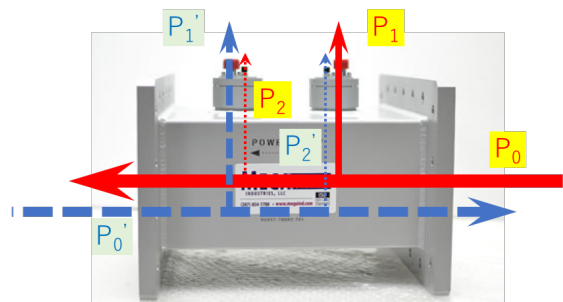


Fig. 11 導波管の方向性結合器

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

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、 $1 \text{ mW} = 0 \text{ dBm}$ と定義した電力の単位である。[mW] から [dBm] への変換は、

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

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 $P_{wg} = 1 \text{ MW}$ 、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、

$$P_{wg} = 10 \times \log_{10} 10^9 = 90 \text{ dBm}$$

$$P_{LLRF} = 90 \text{ dBm} - 60 - 5 - 15 \quad (3-3)$$

$$= 10 \text{ dBm} = 10 \text{ mW}$$

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、 $P_{LLRF} = 5 \text{ mW}$ となり、LLRF で扱いやすいレベルになる。

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。

$$I[\text{dB}] = 10 \times \log_{10} \frac{P_2}{P_0}$$

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

$$D = I - C$$

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 1 MW 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、導波管を通し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ー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。

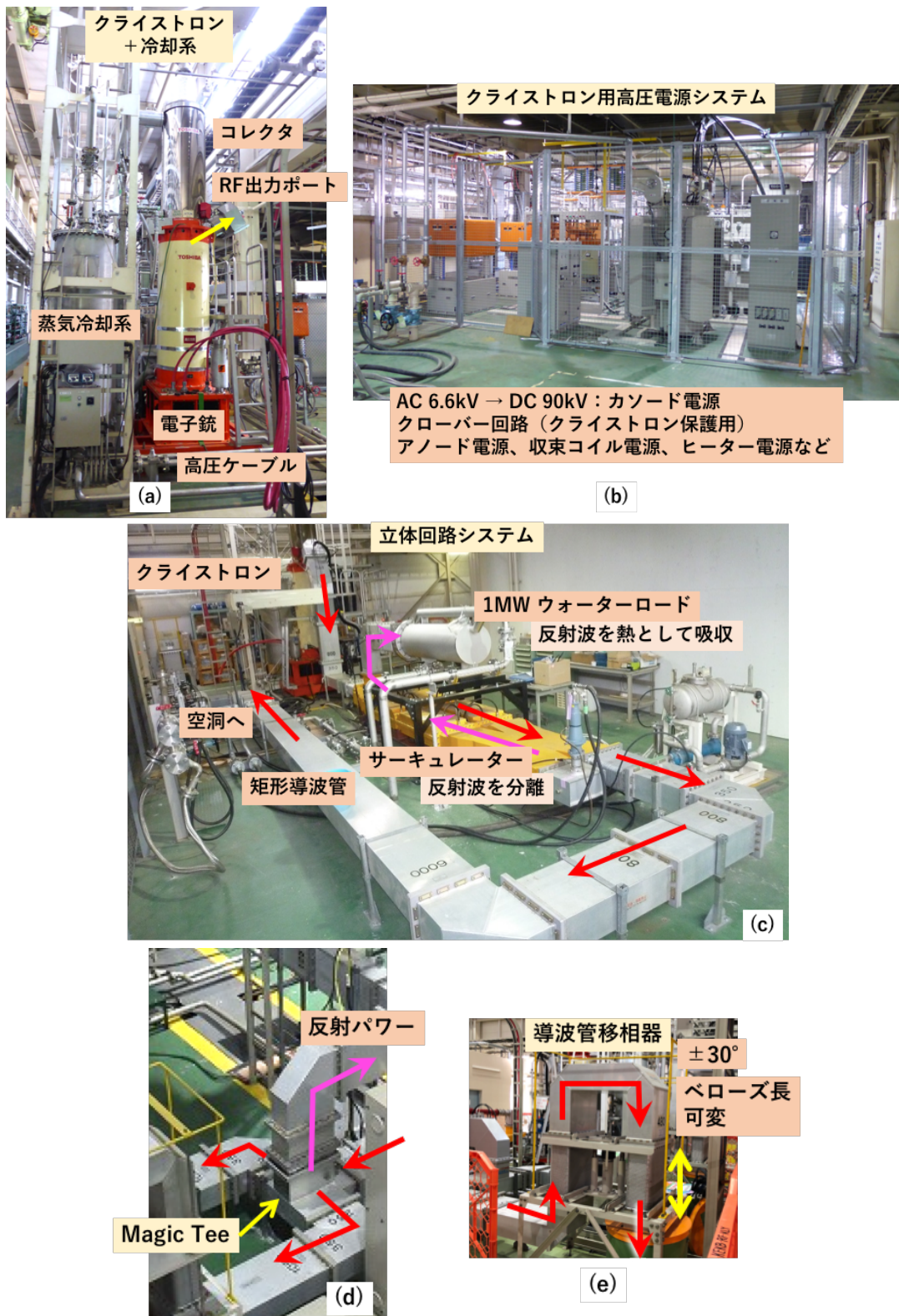


Fig. 12 ハイパワーRF系の機器。(a) 1MW クライストロン、(b) クライストロン高圧電源システム、(c) 立体回路系 (導波管、サーキュレーター、1MW ウォーターロード他)、(d) Magic Tee、(e) 導波管移相器

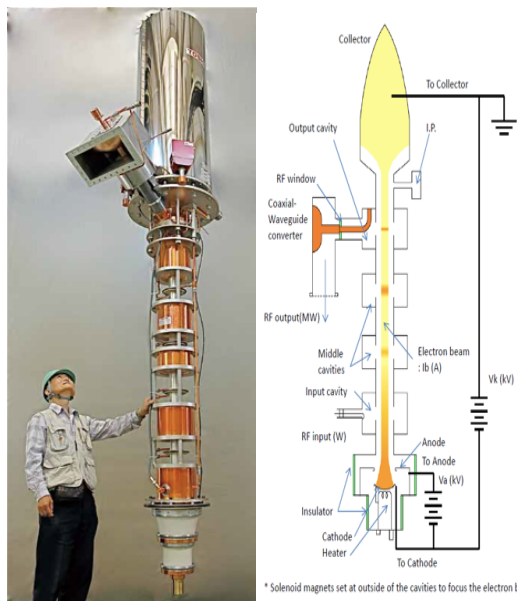


Fig. 13 クライストロンの構造

3.4. 常伝導空洞 (Accelerator Resonantly-coupled 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 β を 3 から 5 に増強した。 β 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

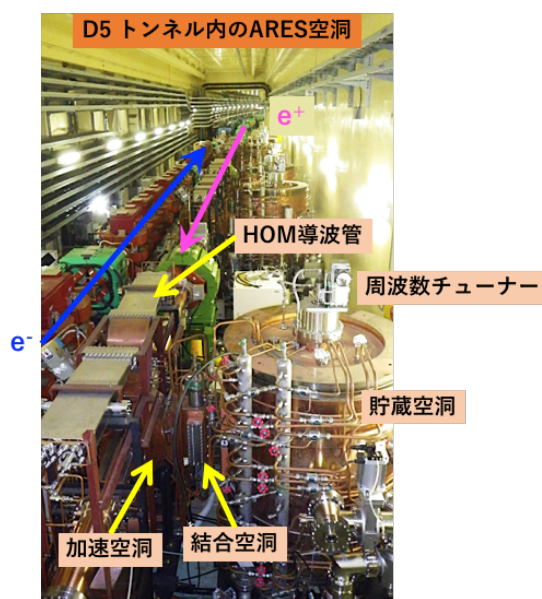


Fig. 14 SuperKEKB トンネル内の ARES 空洞

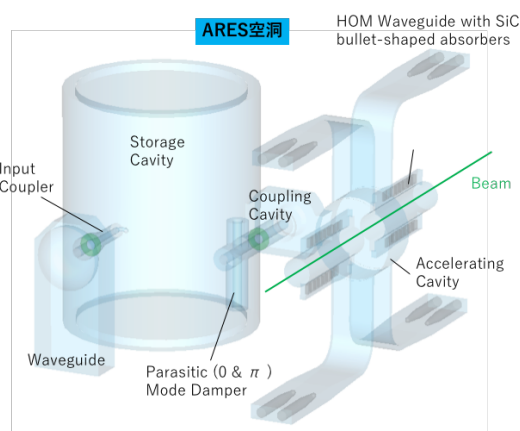


Fig. 15 ARES 空洞

ているので参照してほしい。この結合度 β 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 運転パラメータ

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 (Q_0 値や

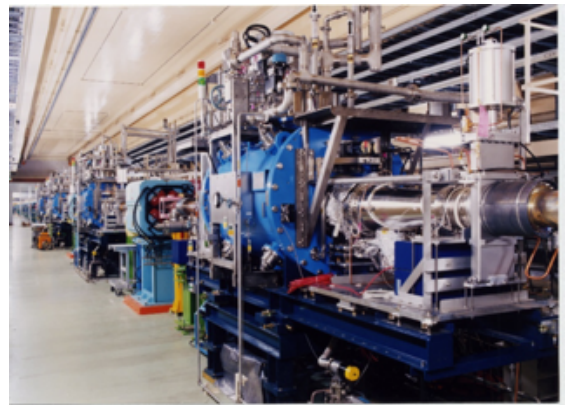


Fig. 16 SuperKEKB トンネル内の SCC

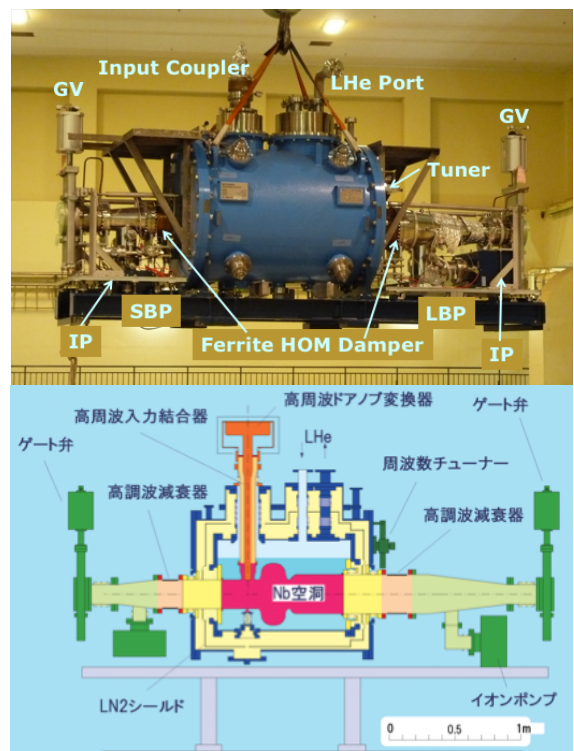


Fig. 17 SCC 外観と断面図

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 Q_0 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 V_c を $V_{c.sum}$ 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 $V_{c.sum}$ を合成してみると、Fig. 18 で示すようにいくつか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 $V_{c.sum}$ だけを見るので、 V_0 を得られる ϕ_s が自動的に決まる。

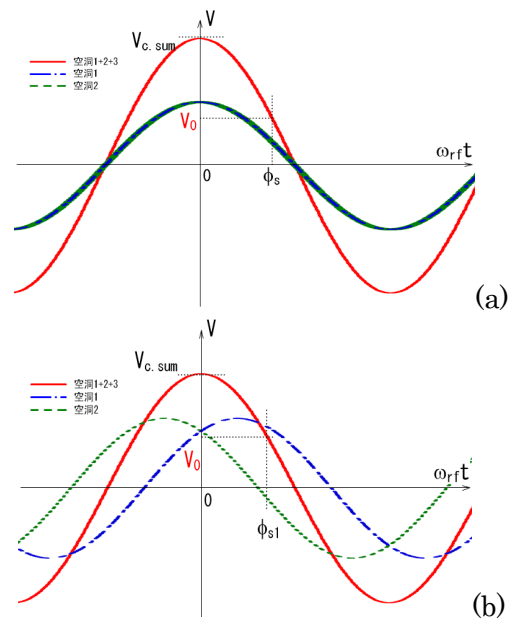


Fig. 18 2 台の空洞による V_c の合成。ビームは合成された $V_{c.sum}$ しか見ない。

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 $V_{c.sum}$ だけを見て、 V_0 を得られる ϕ_s に乗る。ここで空洞電圧をベクトル $\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \mathbf{V}_3, \mathbf{V}_4$ として、Fig. 20(a) に示す。横軸は、ビームが見る電圧 (\propto ビームが得られるエネルギー=ビーム負荷) に相当する。 \mathbf{V}_4 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 $V_{c.sum}$ が小さくなるため ϕ_s が小さく

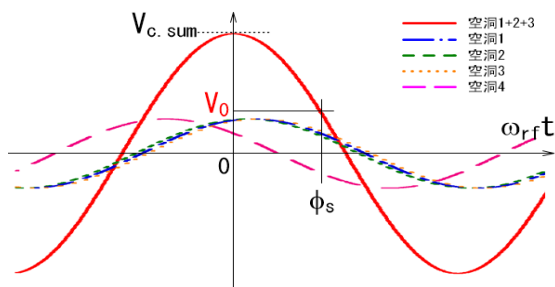


Fig. 19 4 台の空洞による Vc の合成。1 台は大きく位相がずれていると仮定

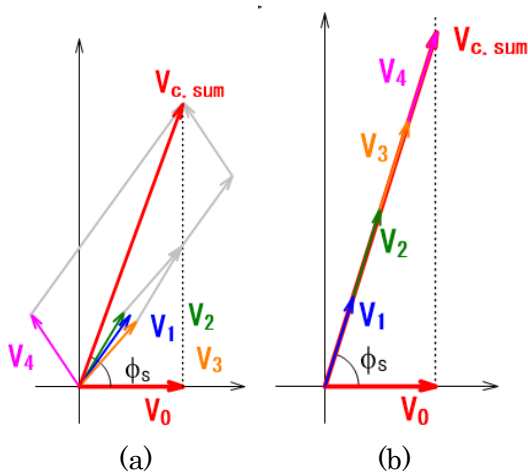


Fig. 20 Vc のベクトル表現 (a)Fig. 19 の各空洞の Vc と Vc.sum, (b) 4 空洞の位相が揃った場合

なる。 ϕ_s が小さくなるというのは、Fig. 18 など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_s 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。

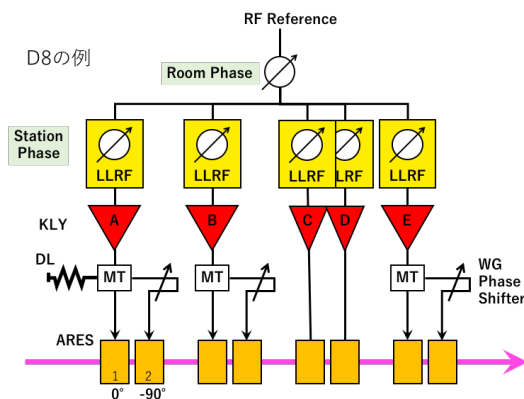


Fig. 21 RF セクションの例

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ため、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。

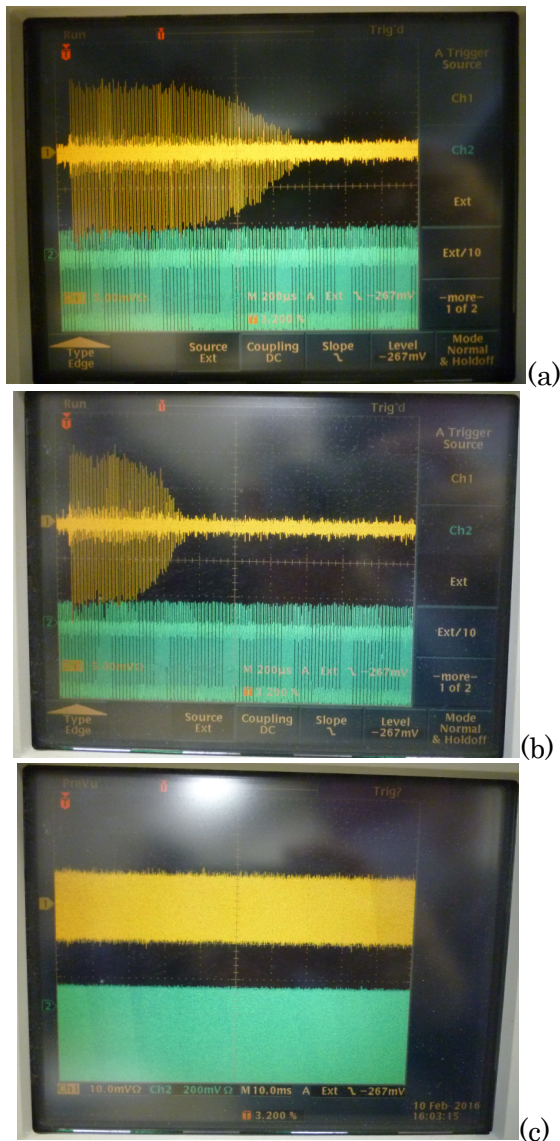


Fig. 22 SuperKEKB LER ビーム初入射時の Beam Position Monitor (BPM) オシロ画像。図上部の波形 1 パルスがビーム 1 周を意味する。
 (a) RF OFF でのビーム周回 (~130 周) → (b) RF On したが位相調整なしのため周回数減少 → (c) RF 位相調整してビーム蓄積に成功

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いければ、衝突せずすれ違ってしまふ。

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。

5. おわりに

SuperKEKB は、KEKB の 40 倍のルミノシティ $8 \times 10^{35} / \text{cm}^2/\text{s}$ 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ビストレージング”、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 *et al.*, "Status of Superconducting Accelerating Cavity and Development of 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).