

# ARES CAVITY SYSTEM FOR SuperKEKB

Tatsuya Kageyama #, Tetsuo Abe, Hiroshi Sakai, Yasunao Takeuchi, Kazuo Yoshino  
 High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
 1-1 Oho, Tsukuba-shi Ibaraki-ken, 305-0801

## Abstract

The ARES cavity is a normal-conducting, three-cavity system developed for KEKB. The acronym “ARES” stands for Accelerator Resonantly coupled with Energy Storage, just representing its RF configuration based on the  $\pi/2$ -mode operation, where an accelerating cavity is resonantly coupled with an energy storage cavity via a coupling cavity between. The energy storage cavity functions as “an electromagnetic flywheel” to stabilize the accelerating mode against the reaction from a high current beam. From 1998 through 2010, ARES cavities had been successfully operated in KEKB (from 2005 through 2010, 32 ARES cavities in total, 20 ARESs at the 3.5-GeV positron ring LER, and 12 ARESs at the 8-GeV electron ring HER). To push the luminosity frontier, the SuperKEKB project has been launched. Its innovative machine design employing the “nanobeam” scheme has led us to the conclusion that the current ARES cavity system can be reused neither upgrading the cavity structure itself nor even its HOM loads. Only the input coupler needs to be upgraded since the beam power per cavity will increase from 200 kW to 600 kW. First, we report key issues on the operation of ARES cavities in SuperKEKB: the coupled-bunch instabilities due to the accelerating ( $\pi/2$ ) and parasitic (0 and  $\pi$ ) modes. Next, we cover the experimental results for the power handling capabilities of two different types of HOM loads used for the current ARES cavity. Finally, we describe a prototype input coupler and its performance demonstrated through the actual operation with a high-current beam in KEKB.

## アレス空洞系「KEKB から SuperKEKB に向けて」

### 1. はじめに

昨年6月末に其の12年余にわたる運転を成功裏に完了した KEKB であるが、更にその先へとルミニシティ・フロンティアを切り拓くべく、ナノビーム方式と謂う鋭く強靱な「刃先」の砥ぎと焼入れの最中である。主リングにおいては、陽電子リングの低エミッタンス化と衝突点収束系の超低ベータ化に向けてビーム光学系を大改造中、加えてビーム電流の倍増に対応すべく高周波加速システム増強とビームチェンバー交換など、諸々の作業が進行中である。一方、入射器においては低エミッタンス電子銃の開発、陽電子ダンピングリングの新設工事などが進められている。全てが計画通りに運べば、約3年後に新生 SuperKEKB として再び未踏の領域を目指す。本稿では、主リング常伝導高周波加速空洞系の増強について、机上検討・実証実験などの結果を交えながら報告する。

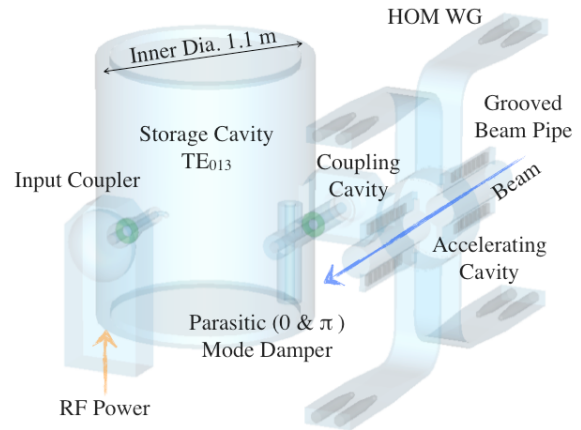


図1：アレス空洞系（3次元透視図）

### 2. アレス空洞系

アレス空洞系は、加速空洞に電磁場エネルギー貯蔵空洞が結合空洞を介して共鳴的に結合された三空洞系である<sup>[1]</sup>。図1にアレス空洞系の透視図を示す。理解の一助として、等価な三連振子系モデルを図2に示す。アレス空洞は KEKB において大電流ビームを安定に加速するために開発され<sup>[2]</sup>、最終的には KEKB 3.5-GeV 陽電子リング(LER)で20台、8-GeV 電子リング(HER)で12台、計32台が使用された。図3に KEKB 高周波加速系の全体構成（2005年以降）と運転パラメータ（実績値）を示す。

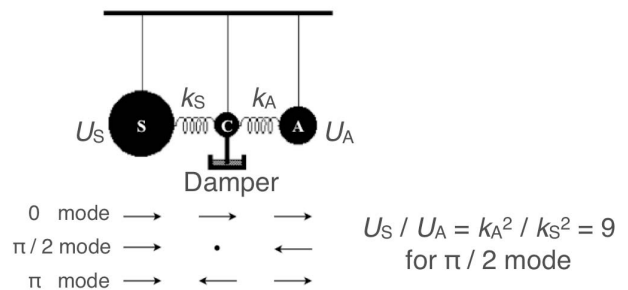


図2：等価な三連振子モデル

# kageyama@post.kek.jp

大型円筒（内径 1.1m×軸長 1.2m）の貯蔵空洞は、加速空洞中の電磁場エネルギー量に比べて約 9 倍（図 2 参照： $U_S/U_A$ ）のエネルギーを壁面損失が低い  $TE_{013}$  モードで貯える。結合空洞を介して共鳴的に結合された加速・貯蔵の二空洞にわたる電磁場分布は、一次の摂動項が相殺される「 $\pi/2$ モード安定化機構」により、ビーム負荷の影響を受けにくい。強い摂動下でも安定した加速空洞と貯蔵空洞の結合によりビーム負荷の影響を一桁軽減（ $U_A/(U_A+U_S) = 1/10$ ）できる点がアレス空洞の特長である。貯蔵空洞は、例えて言えば、負荷変動に対して原動機の回転を安定化させるために回転運動エネルギーを貯えておく「フライホイール」として機能する。アレス空洞の諸元を下表にまとめておく。

表 1：アレス空洞諸元

$f_{RF}$	508.887 MHz
$U_S/U_A$	9
$R/Q$	15 $\Omega$
$Q_0$	$1.1 \times 10^5$
$V_c$	0.5 MV
$P_c$	150 kW (加速空洞 60kW、貯蔵空洞 90kW)

三空洞系の枠組みでは、 $\pi/2$  加速モードの両側に 0 モードと  $\pi$  モードが不可避免的に寄生する。両寄生モードのビーム結合インピーダンスは加速モードなりに高く、結合パンチ不安定が問題となる。三空洞系に内在する上記「副作用」を解消するには、 $\pi/2$  モードでは励振されない結合空洞に同軸アンテナ型結合器を取り付け、寄生モードのみを選択的にまずは減衰させる。さらに都合の良いことに、減衰されて鈍された 0 モードと  $\pi$  モードの結合インピーダンス波形は運転周波数に対してほぼ左右対称となる。よって、0 モードが励起した或る結合パンチ不安定モードを運転周波数の反対側で  $\pi$  モードが減衰させる。左右の均衡具合に依るが、0・ $\pi$  モード双方からの結合パンチ不安定への寄与は完全ではないが或る程度相殺される。

大電流ビーム負荷という摂動下で加速空洞と貯蔵空洞の結合の安定化に寄与し、加えて寄生モードに対する選択的減衰も可能にするという重要な役目を担う結合空洞は、アレス空洞系の「要」と謂える。

### 3. SuperKEKB 高周波加速システム概観

図 4 に SuperKEKB 高周波加速システム<sup>[3]</sup>の全体構成（最新版：2010 年 11 月）及び高周波加速運転に係わる主要パラメータの一例（計画値）を示す。なお、SuperKEKB のビームエネルギーについては、HER は 8 GeV から 7 GeV に減、LER は 3.5 GeV から 4 GeV に増と変更される。図 4 を図 3 と比較すると、SuperKEKB において要求される加速電圧は両リングとも KEKB と同程度か、少し高い程度。ビーム電流は両リングとも約 2 倍増となる。ビームへの供給電力については、KEKB 実績比で HER が約 1.6 倍

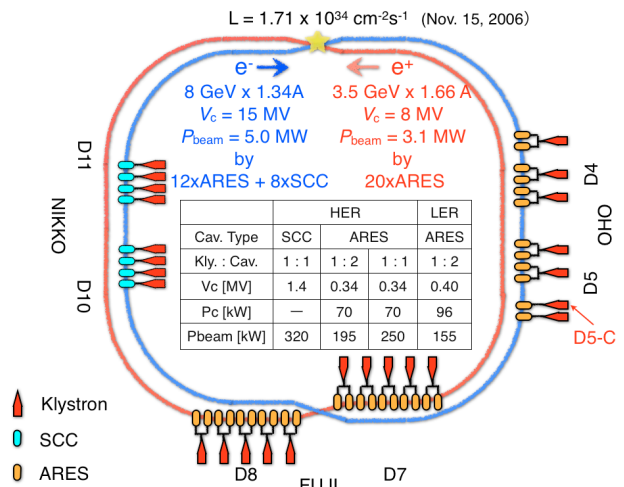


図 3：KEKB 高周波加速系（SCC:超伝導加速空洞）、及び運転パラメータの例（2006 年 11 月 15 日の実績）

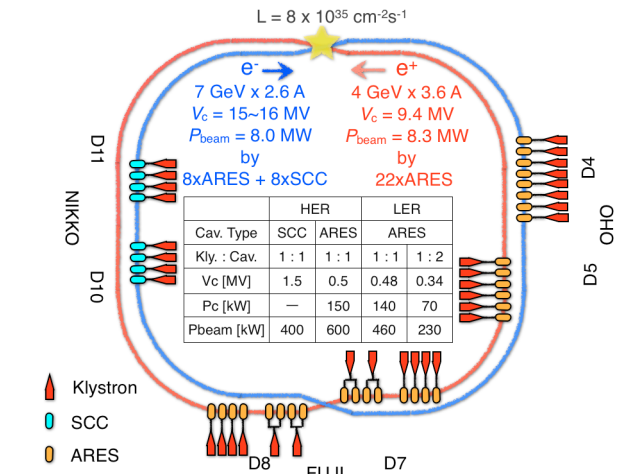


図 4：SuperKEKB 高周波加速系（SCC:超伝導加速空洞）、及び運転パラメータの例（計画値）

（エミッタンス低減を目的として HER 直線部ビームラインの空き区間にウィグラー電磁石を全数設置した場合）、LER が 2.7 倍程度となる。

以上の仕様を満たすべく、アレス空洞への高周波給電については、KEKB ではクライストロン（出力 1 MW）1 本でアレス空洞 2 台に給電する「1 対 2」の構成が標準であったが、SuperKEKB ではクライストロン 1 本でアレス空洞 1 台に給電する「1 対 1」の構成が大半を占めることになる。まとめると、SuperKEKB の LER 用にアレス空洞 2 2 台、HER 用にはアレス空洞 8 台と超伝導空洞 8 台が使用される。アレス空洞が設置される区間は従来通り大穂 D4・D5 直線部、富士 D7・D8 直線部の計 4 区間となる。しかしながら、地上の高周波源・高圧電源設備との関係で、アレス空洞の間引き（D7・D8 区間各々から 2 台ずつ計 4 台）、移設（D5 区間の 6 台を HER から LER へ）、増設（D4 区間に 2 台）などの再配置が必要となる。

## 4. アレス空洞系「SuperKEKB に向けて」

ナノビーム方式の採用により SuperKEKB において要求されるビーム電流値は KEKB 実績比で 2 倍程度に収まる。この点を踏まえつつ「最小費用の原則」に沿って検討と実証実験を重ねた結果、現行のアレス空洞を、高周波構造自体に対する改造不要、且つ高次モード減衰用電波吸収体に対する増強も不要、即ち現状のままで SuperKEKB でも使用可能との結論に至った。ただし、アレス空洞 1 台あたりのビームへの供給電力は KEKB の場合に比べて約 3 倍増となるので、入力カプラの性能増強は必須である。

### 4.1 加速モードによる結合バンチ不安定

シンクロトロン加速の場合、加速空洞に対するビーム負荷のリアクタンス成分を打ち消すように加速空洞の共鳴周波数を RF 運転周波数から離調 (detuning) する。即ち、高周波励振電流に対する加速空洞電圧 (高周波源励振とビーム誘起のベクトル合成) の位相角を適切な一定値に保つように加速空洞の共鳴周波数をチューナーにより制御する。大電流ビーム負荷の場合、上記周波数離調量がビーム周回周波数 ( $f_{rev}$ ) に比べて無視できない大きくなるか、もしくは超えるようになると、加速モードに因る結合バンチ不安定 (進行方向 -1 mode 等) が深刻な問題となる。

大電流ビーム下のアレス空洞の加速モード ( $\pi/2$  モード) について、そのビーム結合インピーダンス (実部) のスペクトル波形二例 (計算値) を図 5 に示す。グラフ横軸は周波数をビーム周回周波数  $f_{rev} = 99.4$  kHz で除した無次元数となっている。図中、黒色破線は KEKB LER においてビーム電流値 1.8 A の場合 (アレス空洞 20 台、空洞 1 台あたりの電圧 0.4 MV、入力カプラの入力結合度 3)、赤色実線は SuperKEKB LER においてビーム電流値 3.6 A の場合 (アレス空洞 22 台、空洞 1 台あたりの電圧 0.48 MV、入力カプラの入力結合度 5) を示す。加速空洞単体の周波数離調量 ( $\Delta f_A$  の絶対値) は前者の場合で 170 kHz、後者で 280 kHz とビーム周回周波数の 2~3 倍となるが、結合空洞を介して加速空洞に接続された貯蔵空洞のフライホイール効果 ( $U_S/U_A = 9$ ) により  $\pi/2$  モードの周波数離調量 ( $\Delta f_{\pi/2}$ ) は結果として一桁小さい値に抑えられている。

次に SuperKEKB LER の場合について、加速モードに因る結合バンチ不安定の主なモードの成長時定数をビーム電流値の関数として図 6 に表す。図中の青色破線は放射減衰の時定数 (22 ms) である。不安定の成長が放射減衰に比べて速くなるのは -1 mode (赤色実線) だけであり、定格電流値 3.6 A の場合の時定数は 4 ms となる。この程度の時定数であれば、RF フィードバックで対応可能である。

### 4.2 0モードと $\pi$ モードに因る結合バンチ不安定

三空洞系枠組の宿命として  $\pi/2$  加速モードの両側に寄生する 0 モードと  $\pi$  モードであるが、現行アレス空洞では結合空洞に備えられたアンテナ型結合器により負荷 Q 値 100 程度まで減衰される。先に言及

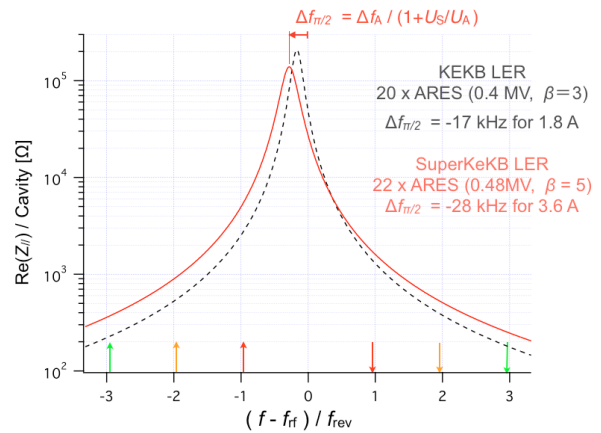


図 5 : 加速モードの結合インピーダンス (実部)

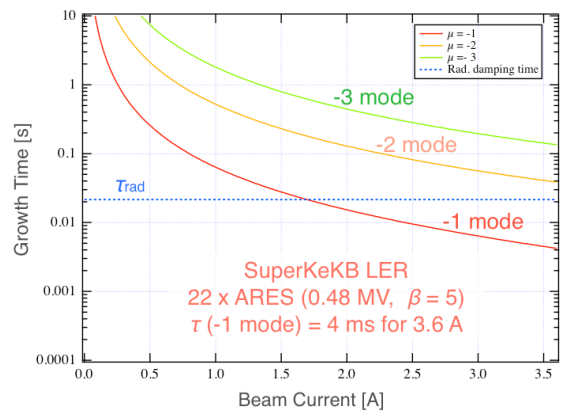


図 6 : 加速モードによる結合バンチ不安定成長時定数

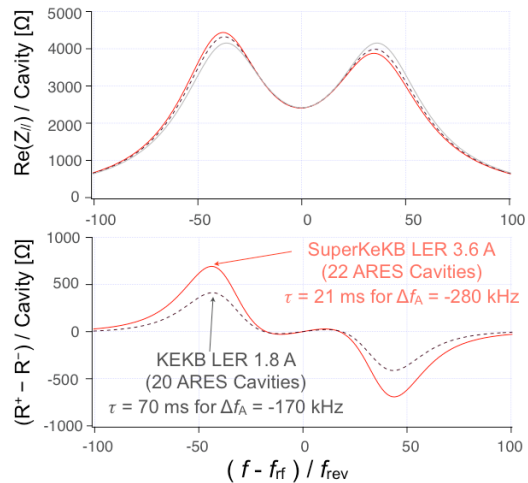


図 7 : 0モードと $\pi$ モードのビーム結合インピーダンス (実部) と左右不均衡

したように、減衰されて鈍された 0 モードと  $\pi$  モードの結合インピーダンス波形は運転周波数に対してほぼ左右対称となる。そして、その均衡により双方のモードからの結合バンチ不安定への寄与はある程度相殺される。しかし、加速空洞の周波数離調量の増加に伴い、上記左右均衡の破れは大きくなる。そ



の理由は、加速空洞の周波数を離調するという摂動に対して 0 モード・ $\pi$ モードの各電磁場分布はその一次の項から影響を受けるからである。

加速空洞が離調された場合について、0 モードと  $\pi$ モードのビーム結合インピーダンス（実部）のスペクトル波形（計算値）、その左右不均衡度合（元の波形と左右反転した波形との差分）を図7に示す。グラフ横軸の周波数はビーム周回周波数で除した無次元数である。参考のために、完全に左右対称なスペクトル波形を薄い灰色で示す。図7の黒色破線と赤色実線に対応する運転条件は、図5の黒色破線と赤色実線の条件に同じである。黒色破線で示した KEKB LER (1.8 A) の場合、結合バンチ不安定の成長時定数は最速モードでも 70 ms と遅い（放射減衰時定数 21 ms）。実際、KEKB の運転では 0 モード・ $\pi$ モードに因る結合バンチ不安定は観測されなかった。一方、赤色実線で示した SuperKEKB LER (3.6 A) の場合であるが、最速モードの成長時定数は 21 ms と放射減衰時定数 22 ms にほぼ等しい。当該不安定モードを減衰する場合は、RF フィードバックが可能な周波数帯域の外側なので、バンチ by バンチ・フィードバックにて対処することになる（時定数的には無問題）。

#### 4.3 高次モード減衰用電波吸収体

言うまでもなく、ARES 空洞系の加速空洞は高次モード(HOM)減衰式である。当該加速空洞は ARES 空洞系に組み込まれるときに不可避となる「対称性の破れ」に無理なく整合するように設計された<sup>[2]</sup>。図1に示すように、加速空洞の上側・下側に各2本ずつ計4本の扁平矩形断面の HOM 導波管を備え、空洞軸方向前方と後方の端板各々には上・下（天・地）に溝を有する溝付ビームパイプ<sup>[4]</sup>を備える。各 HOM 導波管終端部には2本の砲弾形炭化ケイ素電波吸収体が装填され<sup>[5]</sup>、各砲弾形吸収体は中心部の同軸二重管水路を流れる水により直接冷却される。一方、溝付ビームパイプの各溝には炭化ケイ素タイル8枚が一行に装荷されている<sup>[5]</sup>。個々のタイルは応力緩和用銅製緩衝板を挟んで水冷銅板に鑲付されている。

表2：HOM 減衰用電波吸収体の吸収電力実績値、予想値、及び許容限度の一覧。

	実績値 KEKB	予想値 SuperKEKB	許容 限度
$I_{beam}$ (LER)	1.6 A	3.6 A	-
$N_{bunch}$	1293	2503	-
$\sigma_z$	7 mm	6 mm	-
$k / ARES$	0.40 (0.39 <sup>†</sup> ) V/pC	0.44 V/pC	-
$P_{HOM} / ARES$	5.4 kW <sup>†</sup>	17 kW	-
$P_{HOM} / 導波管$	1.05 kW <sup>†</sup>	3.3 kW	5.0 kW
$P_{HOM} / 溝$	0.3 kW <sup>†</sup>	0.93 kW	1.2 kW

<sup>†</sup> calorimetric measurement

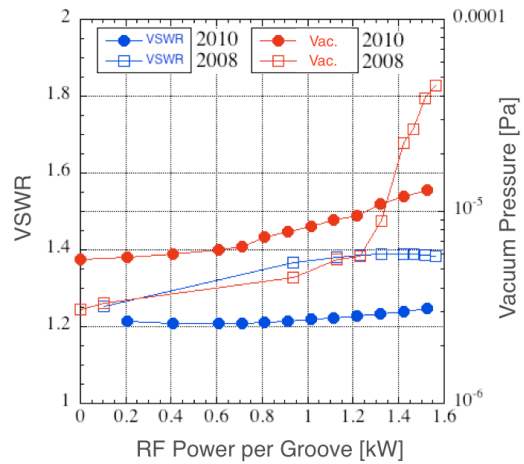


図8：溝付ビームパイプ用電波吸収体の電力試験結果（真空圧力と VSWR の電力に対する応答）

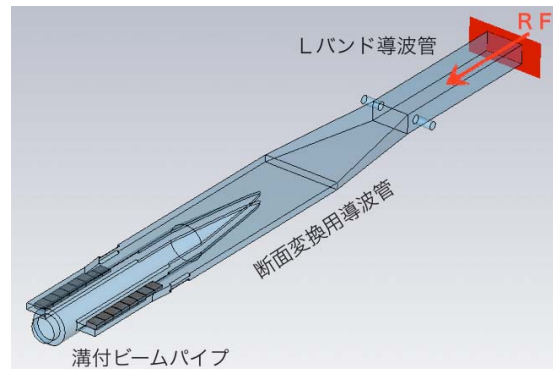


図9：溝付ビームパイプ用電波吸収体の電力試験セットアップ（RF 周波数 1.25 GHz）

これらの高次モード減衰用電波吸収体について、吸収電力の実績値(KEKB)、予想値 (SuperKEKB)、許容限度（周波数 1.25 GHz の Lバンド・クライストロンを高周波源とする電力試験結果に基づく）をビーム電流パラメータと併せて表2にまとめておく。空洞あたりの HOM 電力は、SuperKEKB では KEBB 実績比で三倍強となる。直接水冷式の砲弾形吸収体が2本装填されている矩形導波管については、導波管あたりの許容限度 5.0 kW に対して予想値 3.3 kW とかなりの余裕がある。一方、溝付ビームパイプについては、間接冷却方式の炭化ケイ素タイルを使用している都合上、吸収電力増に伴うタイルの温度上昇、それによる真空圧力上昇に注意を払う必要がある。当初（2008年）、溝に装荷されている吸収体ユニット（8枚のタイルを冷却銅板に鑲付した部品）をLバンド導波管（WR650規格）の天板（E面）に取り付けた形状にて電力試験を行っていたが、電力 1.2 kW を超えたあたりから真空圧力が急激に上昇する現象が観測された（図8中、2008年の実験結果）。この現象は長時間の RF コンディショニングでも解消されなかった。この圧力上昇が異常発熱、

放電現象の何れによるものかについては判別出来なかった。この実験結果は微妙であり、実際の吸収体の装荷状態とは異なるという系統的差異に由来するので御懸念無用との楽観論を肯定するにも根拠に乏しい。慎重を期して、予備の加速空洞から切り離れた溝付ビームパイプを使用して図9に示すように吸収体の実際の装荷状態を忠実に再現した上で、電力1.5 kWまで試験を行った。その結果、後者の実験では急激な真空圧力上昇は観測されなかった(図8中、2010年の実験結果)。ただし、この実験結果の差異が吸収体ユニット自体の個体差に由来する可能性もあり、現段階ではそれを完全に排除できない。以上の事情により、安全をとって両実験結果の論理積、即ち電力1.2 kWを許容限度値とした。この場合、SuperKEKB LER (3.6 A)での予想値0.93 kWに対して約30%の余裕を残す。

#### 4.4 入力結合器の性能増強

アレス空洞系を構成する機器のうち、SuperKEKB用に性能増強を要するのは唯一入力カプラである。入力カプラを通してアレス空洞へ給電すべき電力はSuperKEKBでは最大750 kW程度になる。内訳は、壁面電力150 kW、ビームへの供給電力550~600 kW(KEKB実績値: 160~250 kW)である。現行入力カプラ<sup>[6]</sup>の断面図を図10に示す。図中、今回の改造点も付記しておく。矩形導波管から入って来た高周波は、ドアノブ変換器経由で同軸管に入り、真空気密用アルミナ窓を透過し、同軸直管を通過して、終端部の誘導ループを介して貯蔵空洞内の電磁場に結合する。性能増強に向けての改造点は以下二つ: 1) ビームへの供給電力増に対応すべく、ループ先端を延長して入力結合度を現行値3強から最大6強まで上げる。2) 同軸直管でのマルチパクタ放電を完全に抑制すべく、同軸直管の外導体内面に周方向微細溝加工を施す<sup>[7]</sup>。実際、KEKBで運転に使用したアレス空洞32台中2台において、入力カプラでのマルチパクタ放電により給電電力を制限せざるを得ない事例が過去にあった。

一昨年度、現行入力カプラの構造をベースとして、上記改造項目に加えてRF窓鑢付に係わる細部見直しの検討結果<sup>[8]</sup>も取り入れて、性能増強型初号機を製作した。現行より結合ループ先端を43 mm延長することにより、増強型では最大8までの入力結合度を可能とした。ループ先端の延長により懸念される以下二項目については事前に評価、及び検証を行った: 1) ループ先端部の温度上昇。2) アレス空洞の無負荷Q値劣化(貯蔵空洞のTE<sub>013</sub>モードは対称性の破れ等の摂動に非常に敏感)。前者1)については熱構造解析シミュレーション、後者2)についてはコールドモデル測定をそれぞれ行い、温度上昇もQ値劣化も許容範囲内であることを確認した。

昨年4月、入力結合器専用の地上試験設備<sup>[9]</sup>において増強型初号機に対する大電力試験をまず行った。同軸管でのマルチパクタ放電も全く観測されことなく、定格電力800 kWまでコンディショニングを無事完了した。次に、ビームへの600 kW給電を実証すべく、当該カプラをKEKB主リング大穂D5直

線部のアレス空洞D5-C(図3参照: 1対1構成でHER用)に取り付け(冷間結合度6.4)、翌5月中旬から、BELLE物理実験と並行して1ヶ月余りにわたって入念なるビームコンディショニングを行った。そして、KEKB運転完了を数日後に控えた昨年6月下旬、空洞電圧0.47 MV(壁面電力133 kW)にて入力カプラ1台あたりのビーム(電流値1250 mA)への供給電力610 kWを実証した(図11参照)。

## 5. 展望

図10: 入力カプラ断面図(改造箇所を付記)

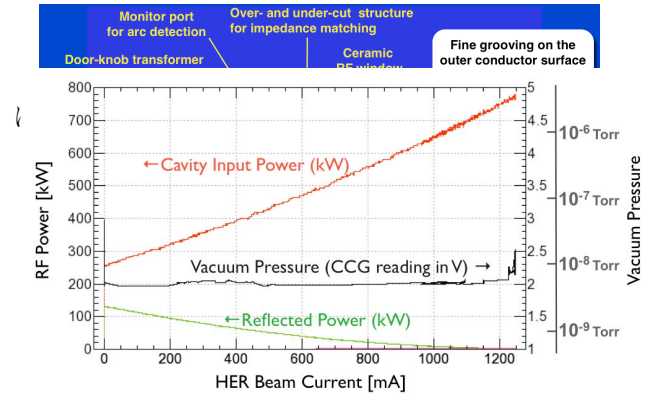


図11: 入力カプラ性能増強型初号機によるアレス空洞への770 kW給電試験結果。入力・反射電力、真空圧力のビーム電流に対する応答を示す。

生産も軌道に乗りつつある。主リング関係の仕事と並行して入射器陽電子ダンピングリング高周波加速構造の開発も進めている<sup>[10]</sup>。「3.11」を冷静に受けとめ、「葦」の如くしなやかに再起動すべく、今は為すべきことを為し地道に進もう。

## 参考文献

- [1] Y. Yamazaki and T. Kageyama, Particle Accelerators 44 (1994), p. 107.
- [2] T. Kageyama et al., Proc. of the Particle Accelerator Conference, Vancouver, Canada, 1997, p. 2902.
- [3] K. Akai et al., PASJ8-MOPL02, 2011.
- [4] T. Kageyama, "Grooved beam pipe for damping dipole modes in RF cavities," KEK-PREPRINT-91-133, 1991.
- [5] Y. Takeuchi et al., Proc. of the Particle Accelerator Conference, Vancouver, Canada, 1997, p.2986.
- [6] F. Naito et al., Proc. of the Asian Particle Accelerator Conference, Tsukuba, Japan, 1998, p. 776.
- [7] T. Abe et al., EPAC-2006-TUPCH127.
- [8] K. Yoshino et al., PASJ7-THPS036, 2010.
- [9] H. Sakai et al., PAC-2005-TPPT012.
- [10] T. Abe et al., PASJ8-TUPS131, 2011.