

## PF リング用 DCCT ダクトの設計 DESIGN OF A DCCT DUCT FOR THE PF-RING

高井 良太\*, 帯名 崇, 谷本 育律, 本田 融, 野上 隆史

Ryota Takai\*, Takashi Obina, Yasunori Tanimoto, Tohru Honda, Takashi Nogami  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Accelerator Laboratory

### Abstract

The DC current transformer (DCCT) measuring the stored beam current of the PF-ring will be renewed. The new DCCT duct is designed based on a cylindrical duct with an inner diameter of 100 mm and it has a structure housing a commercial DCCT core inside of the electrostatic and magnetic shields. A geometry of the ceramic break for interrupting flow of the wall current is optimized by a three-dimensional electromagnetic field simulator, while considering technical limitations. Both ends of the ceramic break are short-circuited in a high frequency manner by a sheet-like capacitive structure to suppress the radiation of unneeded higher order modes (HOMs) into the core housing. The ceramic break is also equipped with water-cooling pipes on the metal sleeves brazed to both ends of it to efficiently remove heat caused by HOMs. In this paper, a detailed design of the new DCCT duct for the PF-ring is described.

### 1. はじめに

KEK の放射光源加速器“PF リング”では、加速器内に蓄積した電子ビームの直流電流値を、直流ビーム電流トランス (DCCT) を用いて測定している [1]。PF リングには予備機を含め 2 台の DCCT が設置されており、ともに大きなトラブルもなく安定に動作してきたが、メインで使用している 1 台は設置から 20 年が経過し、長年にわたる放射線環境下での使用に起因する故障が懸念されている。また、DCCT コアを収納しているビームダクトの断面形状も旧式のものを採用しているため、高電荷のシングルバンチを蓄積した場合にはビームから発生する高次高調波 (HOM) によるダクトの発熱も問題となっている。DCCT で測定されるビーム電流値は、加速器運転において最も重要なパラメータの一つであり、加速器を構成する機器の保護 (マシンプロテクション) や放射線安全 (ヒューマンプロテクション) の観点から見ても十分な信頼性が求められる重要なパラメータであることから、この度 DCCT のコア・ビームダクト・信号検出回路の一式を更新することとなった。これらのうち、コアと信号検出回路については、PF リングを始め世界の加速器施設で十分な使用実績のある Bergoz 社製の In-air タイプ NPCT を使用する [2]。同社では、コアとダクトを一体化した In-flange タイプの NPCT も市販しているが、高温でのベーキングができないことやシングルバンチ蓄積時における発熱の見積りが難しい等の理由から In-air タイプを選択した。本発表では、このコアと対で使用する PF リング用 DCCT ダクトの詳細設計について述べる。

### 2. セラミックブレイクの設計

電子ビームが発する電磁場をビームダクトの外に設置した DCCT コアで計測するためには、金属のビームダクト壁の一部をセラミック管に置き換え、ビームが伴う壁電流の流れを遮断 (ブレイク) する必要がある。ただし、

単に流れを遮断しただけでは DCCT の測定帯域を超える不要な HOM がコアハウジング内に放出され、深刻な発熱や放電を引き起こす恐れがあることから、この“セラミックブレイク”には適度な静電容量を持たせて両端を高周波的に短絡させることが多い。静電容量の大きさは、測定帯域を考慮したカットオフ周波数とコアハウジング全体が形成するキャビティー構造のインピーダンスで決まり、Bergoz 社製のコアを使用する場合は

$$10 \text{ nF} \leq C \leq 220 \text{ nF} \quad (1)$$

とすることが推奨されている。

これまでの運転で使用してきた DCCT ダクトでは、厚さ 0.5 mm のアルミナセラミックスの円盤をセラミックブレイクとして使用している [3]。セラミック盤の中央には、旧 4 極電磁石のボアにフィットするダクトの断面形状に合わせて八角形の穴が開けられており、その両面はメタライズされ厚さ 0.5 mm のコバルト製スリーブがロウ付けされている。このような薄いセラミック盤を金属プレートで挟んだ構造は、ビームとの結合インピーダンスを小さくできるためダクトの発熱を抑える目的では非常に有効であるが、上記の静電容量を実現するには外径をダクトのそれよりもかなり大きくする必要があり、製作の難しさやコスト、その後の取り扱いの面でやや難点がある。

一方、新しい DCCT ダクトは、設置場所のビームダクト形状に合わせて内径 100 mm の円形ダクトをベースに設計する。この場合、厚さ 0.5 mm のセラミック盤を用いた現方式では Eq. (1) の静電容量を実現するのに 290 mm 以上の外径が必要となり、製作上の困難が予想される。そこで、新ダクトでは PF-AR や KEKB (現 SuperKEKB) の DCCT ダクトで用いられている別方式を採用することにした [4]。この方式では、比較的機械的強度の高い円筒型のセラミックブレイクを使用し、静電容量は主にその外側にシート状の容量構造を巻き付けることで確保する。

このような円筒型セラミックブレイクを取り付けたダクトをビームが通過したときに生じるパワーロスを評価

\* ryota.takai@kek.jp

するため、3次元電磁界シミュレータ“GdfidL [5]”を用いたビームシミュレーションを行った。Figure 1 にシミュレーションで用いた計算モデルとその模式図を示す。内径 50 mm の円形ダクトの途中に、ビーム進行方向の長さ  $L$ 、動径方向の厚み  $T$  の円筒型セラミックブレイクを設け、その外部を内径 100 mm、長さ 70 mm のキャビティー状空間で覆った構造となっている。上記の容量構造を模擬するため、セラミックブレイクとそれに隣接するダクトの外周には、厚さ 500  $\mu\text{m}$  の誘電体シートで絶縁された導体シートが巻かれている。セラミックブレイク前後のダクトがこの容量構造を介して高周波的に短絡するよう、導体シートのセラミックブレイク側の一端はダクトと接続されている。セラミックブレイクと誘電体シートの比誘電率は、アルミナセラミックスとカプトンフィルムを想定して、それぞれ 9.7, 3.5 とした。電子ビームのバンチ長は、PF リングを想定して 10 mm (RMS) とした。計算における平均メッシュサイズは、容量構造の厚みと計算時間を考慮して 100  $\mu\text{m}$  に設定した。このようなモデルの中心軸上に光速の電子ビームを通過させ、そのときに生じるロスファクター  $k_{\text{loss}}$  とセラミックブレイクの形状  $L$ ,  $T$  の関係を調査した。

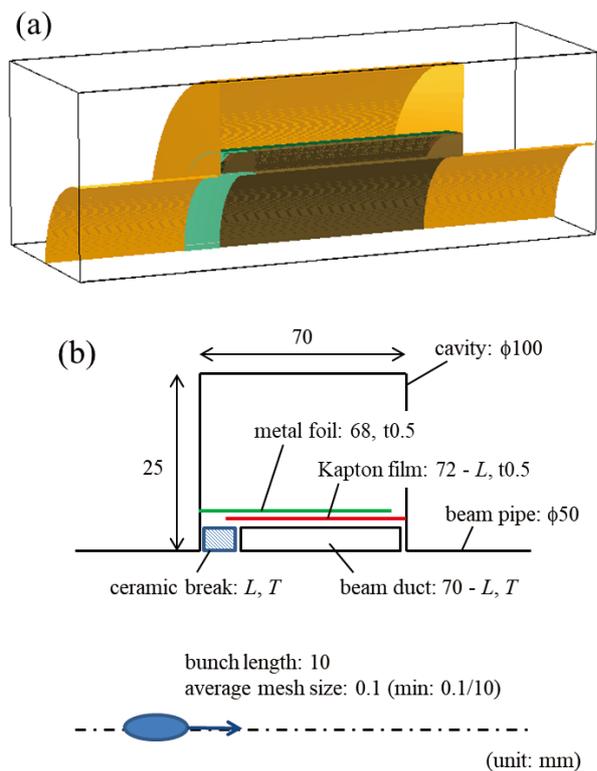


Figure 1: (a) 1/4 model for the GdfidL simulation. (b) Schematic layout of the simulation model (not to scale).

Figure 2 は、セラミックブレイクの長さ  $L$  に対するロスファクター  $k_{\text{loss}}$  の依存性である。セラミックブレイクの厚み  $T$  は 6 mm に固定した。この図より、ロスファクターはセラミックブレイクの長さにはほぼ比例して増加することが分かる。また、容量構造の有無で比較すると、有りのときの方が無しするときよりもロスファクター

を 5-6% 程度低く抑えられている。

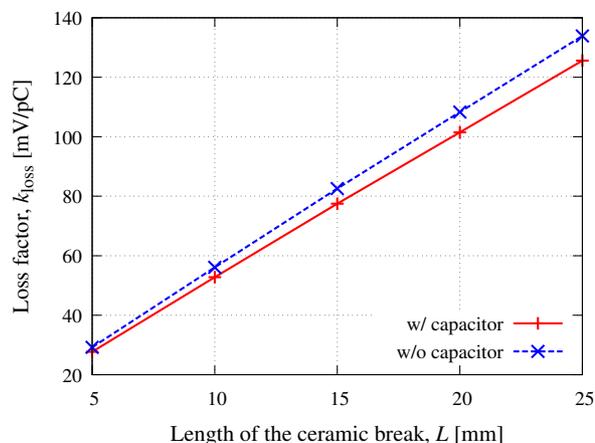


Figure 2: Dependence of the loss factor  $k_{\text{loss}}$  on the length of the ceramic break  $L$ . The thickness of the ceramic break  $T$  was fixed to 6 mm.

Figure 3 は、セラミックブレイクの厚み  $T$  に対するロスファクター  $k_{\text{loss}}$  の依存性である。セラミックブレイクの長さ  $L$  は 5 mm に固定した。非常に特徴的なのは、ロスファクターの増減傾向が、容量構造の有無によって逆転していることである。すなわち、有りの場合はセラミックブレイクが薄くなるほどロスファクターが急速に減少しているのに対し、無しの場合は薄くなるほど増加している。また、8 mm 以上の厚みでは、どちらの場合も同じ値に収束している。これらの傾向をまとめると、外部に巻いた容量構造は、セラミックブレイクが薄いとロスファクターの低減に極めて有効であるが、ある程度厚くなってくるとほとんど効果的に働かないということが分かる。

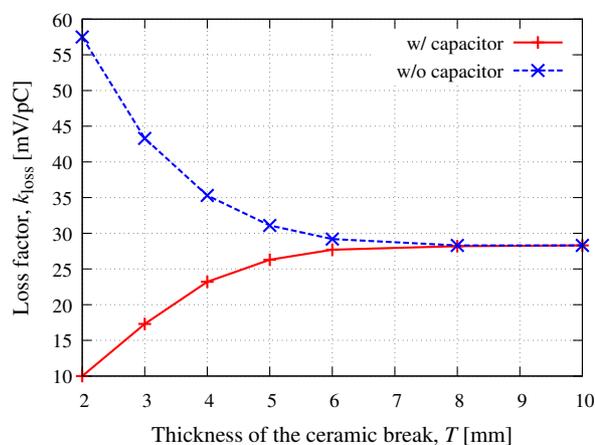


Figure 3: Dependence of the loss factor  $k_{\text{loss}}$  on the thickness of the ceramic break  $T$ . The length of the ceramic break  $L$  was fixed to 5 mm.

これらの他、シミュレーションで確認された傾向のうち主なものを列挙する：

1. 誘電体シートが薄い、すなわち容量構造の静電容量が大きい方がロスファクターは下がる。
2. 導体シートの長さについては、極端に短くしない限りロスファクターに効かない。これは容量構造の静電容量からすると上記1と矛盾する結果であり、ロスファクターに効いているのは静電容量自体ではなく、容量構造が持つ遮蔽効果であることを示唆している。変位電流の流れる領域がセラミックブレイク付近に局所化しているとも考えられる。
3. 容量構造はセラミックブレイク、および隣接ダクトの外周に沿って密着して巻かなければ効果が下がる。
4. セラミックブレイクとキャビティー構造の位置関係、キャビティー構造の大きさはロスファクターに大きく影響しない。

以上の結果により、ビーム通過時のパワーロスを抑えるためには、セラミックブレイクをできるだけ短く、かつ薄くすることが効果的であることが分かった。一方、セラミックブレイクを実際に製作する上では、技術的な限界や加工が特性に及ぼす影響を考慮しなくてはならない。今回のような内径 100 mm の円筒型の場合、それらをまとめると次のようである：

- 長さは 5 mm まで短くすることが可能だが、長さによって耐電圧が変わる。99% の  $\text{Al}_2\text{O}_3$  を使用した場合、10 mm で 6 kV、5 mm で 3 kV 程度になる。
- 厚さについては、単体なら焼結後の研削加工で 2 mm まで薄くすることも可能だが、両端にコバール製スリーブをロウ付けする際の応力歪みを考えると、5 mm が限界。
- 焼結後に研削加工を加えると、加工面の表面層にクラック等の欠陥が生じやすく、表面粗さが低下する。寸法公差は小さくできるが、コストは上がる。
- 逆に、焼結後に加工しない方が、表面の状態は綺麗に仕上がる。寸法公差は大きくなるが、コストは下がる。

これらの点を考慮し、セラミックブレイクの長さ  $L$  は、耐電圧に問題はないとして最短の 5 mm とした。ビームダクトのような強い電場に曝される用途では、表面粗さは放電の種になる恐れがある。したがって、焼結後の研削加工は加えないものとした（焼きっぱなし）。その場合、内径と外径それぞれに 1 mm 程度の寸法公差が生じるため、厚さ  $T$  はその分の余裕を見て 6 mm とした。ビーム進行方向に垂直な端面はメタライズし、厚さ 0.5 mm のコバール製スリーブをロウ付けする。スリーブの断面形状は、ダクトに溶接後の自由度を考慮して L 字型とした。進行方向のプロファイルやバンチ電荷測定用の CT では、結合インピーダンス低減やチャージアップ防止のためセラミックブレイクの内面に Ti 等のメタルコーティングを施すことがあるが、DCCT の場合は当然ながら DC 的な導電性を持たせてはならない。そのため、エッチング加工等で角度方向に溝を付けたような縞状のコーティングを施すことも考えられるが、我々の場合はビームから見える長さが 5 mm と短く、かつ縞の間隔やコーティングの仕上がりによっては放電の恐れもあることから、セラミックブレイク内面のコーティングは

無しとした。

Figure 4 に最終寸法 ( $L = 5 \text{ mm}$ ,  $T = 6 \text{ mm}$ ) のセラミックブレイクで計算した進行方向のウェイクポテンシャルとインピーダンスを示す。円形ダクトの内径を 100 mm に変更したことに対応してキャビティー構造の内径も 200 mm に変更したが、その他のパラメータは Fig. 1 と同じである。容量構造の効果で、ウェイクがビームからの距離とともに減衰している様子が分かる。周波数領域でインピーダンスとして見ても特に危険そうな trapped mode 等は見当たらない。このときのロスファクターは 14.4 mV/pC となり、PF リングの各運転モードにおけるパワーロスは次のように見積もられる：

- マルチバンチモード (188 バンチ, 450 mA) : 9.4 W
- シングルバンチモード (1 バンチ, 50 mA) : 22 W
- ハイブリッドモード (130+1 バンチ, 400+50 mA) : 33 W

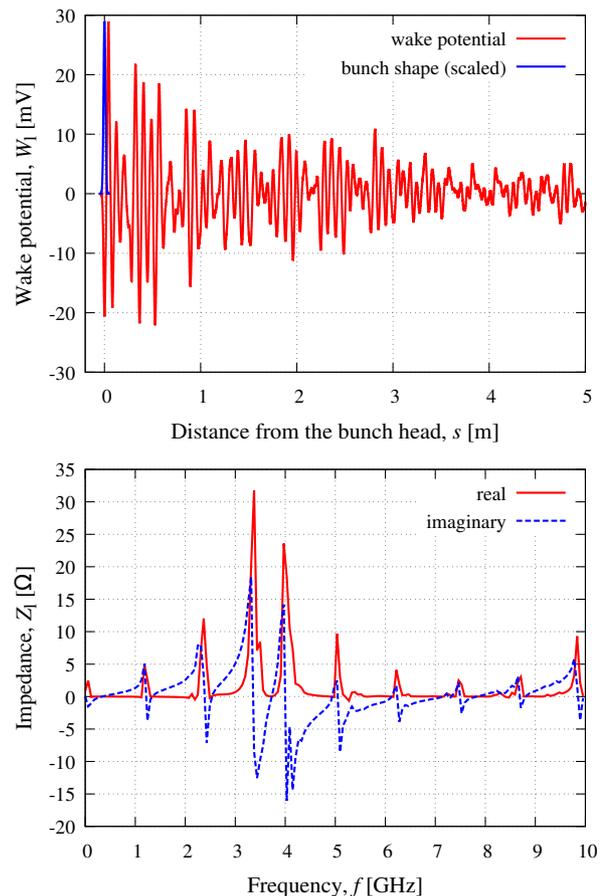


Figure 4: Wake potential and impedance with the final parameters:  $L = 5 \text{ mm}$ ,  $T = 6 \text{ mm}$ . Inner diameters of the beam duct and cavity structure were increased to 100 mm and 200 mm, respectively.

### 3. DCCT ダクトの設計

前章で述べたように、ビームのパワーロスが最小になるよう最適化して製作した円筒型セラミックブレイク

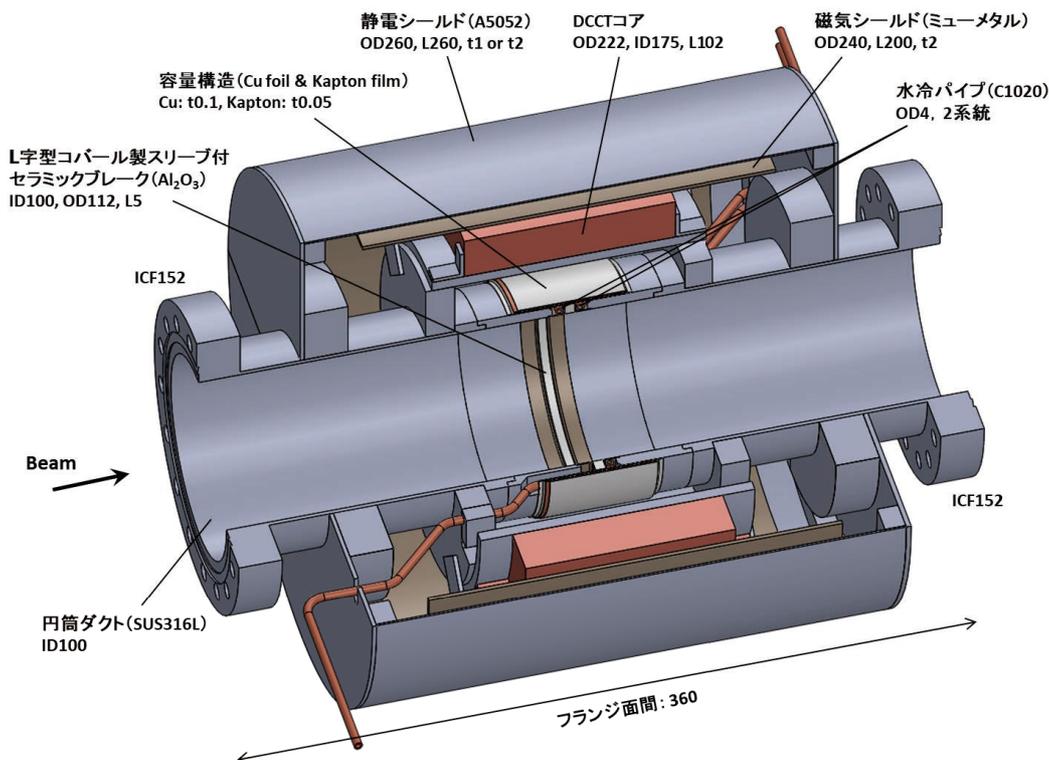


Figure 5: Schematic cross-sectional view of the new DCCT duct.

を、DCCT ダクトとして仕上げる。Figure 5 は現在製作中である新しい DCCT ダクトの断面図であり、以下でその詳細を述べる。

新しい DCCT ダクトは、上記のセラミックブレードを中央に配した内径 100 mm の円筒ダクトとなっている。L 字型のコバール製スリーブとダクトは、ダクトの内側から TIG 溶接にて接合される。ダクト両端のフランジには ICF152 規格のものを使用するが、ビームの進行方向に対して下流側のフランジには後述する水冷ジャケットが被さるため、熱的な接触を阻害しないよう、その外径は 152 mm に対して 0.1 mm のマイナス公差としてある。フランジ面間の距離は 360 mm である。真空に面する部品の材質は SUS316L であるが、その他の部品にはできるだけアルミ合金を使用してダクトの軽量化を図っている。

セラミックブレードの外側には円筒状の台座を設け、内径 175 mm の DCCT コア (Bergoz, NPCT-175-RHC020-HR-H) を固定する。In-air タイプのコアは樹脂製のトロイダルケースに埋め込まれており、出力ケーブルの特性も含めて極めて精密に調整されている。したがって、台座とコアの嵌め合いは、コアに決して歪みや応力が生じないよう、製作時にコアの現物を貸与して慎重に調整する。セラミックブレードの上流側と下流側がコアの内側で短絡してはならないため、台座は上流側のダクトから片持ちで支持されている。

コアの外側には、外部磁場を遮断するため円筒型のパーマロイ (ミュンメタル) 製磁気シールドを設置する。最外径は 240 mm で、厚みは 2 mm である。進行方向の長さは、理想的な遮蔽効果を得るには直径の 3 倍程度必

要であるが、設置スペースの都合上、今回は 200 mm とした。磁気シールドの更に外側には、セラミックブレードで生じた HOM を外部へ漏らさないよう、ダクトに短絡されたアルミ合金製の静電シールドを設ける。このシールドは、ビームが伴う壁電流の低周波成分をコアの外側の経路にバイパスさせるという重要な役割も兼ねている。最外径は 260 mm、厚みは 1 mm (側面は 2 mm)、長さは 260 mm であり、組み立てやすいよう適宜分割してある。シールド側面には DCCT コアの出力ケーブルを通すための穴が設けられている。

HOM により発生する熱を効率的に除去するため、セラミックブレード両端のスリーブ部分には、一周にわたって直径 4 mm の水冷パイプを取り付ける。水冷パイプの材質は、耐腐食性を考慮して無酸素銅 (C1020) とする。DCCT コアは冷却水が運ぶわずかな電流も検知してしまうため、水冷パイプはセラミックブレードの上流側と下流側で独立したものを使用し、それぞれの入口と出口は静電シールドの側面に設けた穴から同じ方向へ取り出す。冷却部に温度ムラがでないよう、各パイプの取り出し穴は互い違いの方向に設けられている。水冷パイプは伝熱セメント (坂口伝熱, サーモン T-99) を用いてスリーブ上に接着され、接着部に外部から力が加わらぬよう、静電シールド内の一ヶ所でダクトに固定されている。また、冷却効率を上げるため、水冷パイプとダクト間に生じる隙間には上記の伝熱セメントを充填する。

セラミックブレードの外周には、前章のビームシミュレーションでも考慮したシート状の容量構造を取り付ける。容量構造は厚さ 50  $\mu\text{m}$  のカプトンフィルムと 100  $\mu\text{m}$  の銅フォイルで構成する。この場合、Eq. (1) の

下限である 10 nF を実現するためには、進行方向の長さが 46 mm 必要となる。水冷パイプの形状を考慮すると、Fig. 1 のようにセラミックブレーク下流側のダクト表面にこれだけの平坦部を確保するのが難しいため、実際の容量構造は絶縁用のカプトンフィルムを介してセラミックブレークの真上に配置する方針とした。放電を引き起こす恐れがあるため、容量構造の周辺には熱電対等の導電性プローブによる温度モニターは設置しない。

#### 4. DCCT ダクト周辺のコンポーネント

新しい DCCT ダクトは、PF リングの北西に位置する RF 加速空洞の下流に設置される。DCCT ダクトの直上流には、セラミックブレークに加わる機械的ストレスを軽減するため、内径 100 mm で滑らかに繋がる RF シールド付きのベローズが接続される。このベローズのフランジには水冷式の光アブソーバが備えられており、リング外側に向かって影を作ることで DCCT ダクト内面に上流の偏向電磁石からの放射光が直接照射されるのを防いでいる。

一方、DCCT ダクトの直下流には、内径 100 mm の円形ダクトから現行の 4 極電磁石用ダクト (Q ダクト) への形状変換ダクトが接続される。Q ダクトの断面形状は、内法が 90 mm×38 mm の扁平な八角形となっているが、設置スペースの制限から形状変換に許される進行方向の長さが 100 mm 程度しか取れない。この場合、特に形状の変化が大きい鉛直方向では、ダクト内面に生じるテーパの角度が 17° にも及ぶため、それなりの発熱が予想される。GdfidL を用いたビームシミュレーションによると、この場合のロスファクターは 41 mV/pC と見積られた。これはセラミックブレークの場合の約 3 倍にあたり、空冷では不十分と思われることから、この形状変換ダクトには銅製の水冷ジャケットを被せて使用することとなった。DCCT ダクトへの入熱を軽減するため、水冷ジャケットの一部は DCCT ダクトの下流側フランジにも架かっている。Figure 6 にシミュレーションで用いた形状変換ダクトの計算モデルを示す。DCCT ダクトは、この形状変換ダクトと共通の位置調整機構付き架台で支持される。

#### 5. まとめと今後の予定

PF リング用に設計した DCCT ダクトの詳細を述べた。新しい DCCT ダクトは内径 100 mm の円形ダクトをベースに設計され、静電シールドと磁気シールドの内側に市販の DCCT コアを収納する構造となっている。ビームが伴う壁電流を遮断するためのセラミックブレークには円筒型のものを採用し、その形状は実際に製作する上での技術的な限界を考慮しつつ、3 次元電磁界シミュレータを用いて最適化された。コアハウジング内への不要な HOM の放射を抑えるため、セラミックブレークの両端は薄いカプトンフィルムと銅 foil で構成された容量構造によって高周波的に短絡される。また、HOM により発生する最大 30 W 程度の熱を効率的に除去するため、セラミックブレーク両端のスリーブ上には直径 4 mm の水冷パイプを配している。

この新しい DCCT ダクトは、2018 年 8 月中の完成を目指して現在製作中である。完成後は容量構造の取り付

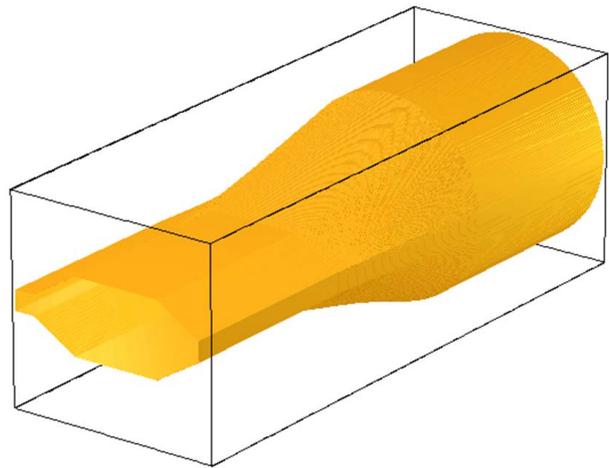


Figure 6: Simulation model of the transition duct installed at the downstream side of the new DCCT duct.

けや最終形態への組み立て作業を行い、上述したスペース (北 RF 下流の直線部) に設置される。これまでメインで使用してきた古い方の DCCT ダクトは、今夏予定されている直上流のアンジュレータ更新に合わせて撤去される。ダクトとともに DCCT コアと信号検出回路も更新されるが、回路の出力信号を読んでいるデジタルマルチメータやその制御系は従来のものを引き継いで使用する。2018 年 11 月から再開される運転において、コアの温度変化や測定されたビーム電流値の安定度、フィルパターンの依存性等を順次測定する予定である。

#### 謝辞

KEK 加速器施設の有永三洋氏には、KEKB で使用している DCCT ダクトに関する貴重な情報を快くご提供いただきました。京セラ株式会社の吉住浩之氏、横山篤志氏には、セラミックブレークを製作する上で多くの技術的な情報をご教示いただきました。株式会社トヤマの畑中宏之氏、諸田明洋氏には、DCCT ダクトの詳細を検討する上で多くのご助言をいただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

#### 参考文献

- [1] K.B. Unser, "Beam current transformer with DC to 200 MHz range", IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-16, June 1969, pp. 934-938.
- [2] <http://www.bergoz.com/npct>
- [3] T. Honda, Y. Hori and M. Tadano, "Suppression of bunched beam induced heating at the DCCT toroid", Proceedings of EPAC'98, Stockholm, Sweden, Jun. 22-26, 1998, pp. 1526-1528.
- [4] M. Arinaga et al., "KEKB beam instrumentation systems", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 499, 100 (2003).
- [5] <http://www.gdfidl.de/>