

PF-ARにおけるビーム振動抑制用ストリップラインキッカーの更新計画 RENEWAL PROJECT OF STRIPLINE KICKER FOR BEAM OSCILLATION DAMPING AT PF-AR

高井良太[#], 帯名崇, 谷本育律, 本田融, 野上隆史, 飛山真理

Ryota Takai[#], Takashi Obina, Yasunori Tanimoto, Tohru Honda, Takashi Nogami, Makoto Tobiyama

High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Accelerator Laboratory

Abstract

In the Photon Factory Advanced Ring (PF-AR), there is a feedback damper system to suppress the transverse beam oscillation. The damper system is equipped with a long stripline kicker, and abnormal pressure rises have been observed frequently around insulating supports to prevent a deflection of the kicker electrode in recent years. As these pressure rises can be almost controlled by reducing the stored current, we have reduced the stored current from 60 mA to 55 mA as a temporary measure. In order to resolve this problem, we have designed a new stripline kicker. The new kicker has almost the same shunt impedance as the current one, whereas the length of electrodes is shorter and the loss factor is smaller. In this paper, the design of this new kicker is described, as well as the installation plan of it.

1. はじめに

KEKで稼働中のPF-AR (Photon Factory Advanced Ring)は、大電流のシングルバンチ運転に特化された6.5 GeV電子蓄積リングである。ここから生み出される大強度のパルスX線を利用すれば物質の動的特性を高い時間分解能で観測することが可能であり、これまで多くのユニークな研究成果を創出してきた。表1にPF-ARの主なパラメータを示す。

リングの西直線部には、入射ビームの横方向振動や蓄積ビームのベータatron振動を抑制するためのストリップラインキッカー (フィードバックダンパー)が設置されている。キッカー電極は4本のステンレスパイプから構成されており、ビーム進行方向の長さは予想されるビーム振動を放射減衰による減衰時間より早く減衰できるよう、およそ1.4 mに設定されている。自重によるたわみを軽減するため、各電極の中間点にはホトベール^[1]を使用した絶縁サポートが設けられているが、2012年秋期のユーザー運転を境にその絶縁サポート付近で急激な真空悪化

とそれに同期したビームロスが頻発するようになった。これは、キッカー部でのパワーロスに起因する熱的ストレスに長年さらされてきた絶縁サポートの一部が破損し、サポートと真空ダクト間で放電現象が起きているものと推測される。図1は現場調査時に撮影したキッカー電極と絶縁サポート部の写真である。電極のTDR (Time Domain Reflectometry) 試験では大きな異常は認められなかったが、実際にサポート部を分解してみるとホトベールを介して電極を支えているボルトの頭が放電によって黒く変色しており、ホトベール自身も一部がガラス化して破損しているのが確認された。明らかに部品の交換が必要な状態であったが、溶けたホトベールが固着して短時間での交換は困難であること、急激な真空悪化とビームロスは高電流蓄積時にしか起こらないことから、現在も部品交換は行っておらず、リングの最大蓄積電流を定格の60 mAから55 mA程度に制限することでユーザー運転を継続している。

Table 1: Main Parameters of PF-AR

Operation Energy	6.5 GeV
Injection Energy	3.0 GeV
Stored Current	60 mA
RF Frequency	508.57 MHz
Circumference	377.26 m
Harmonic Number	640
Number of Bunches	1
Revolution Frequency	795 kHz
Tunes (x/y/s)	10.15/10.21/0.03
Damping Time (x/y/s)	2.5/2.5/1.2 ms
Natural Emittance	294 nm rad
Natural Bunch Length	18.6 mm (62 ps)

[#] ryota.takai@kek.jp

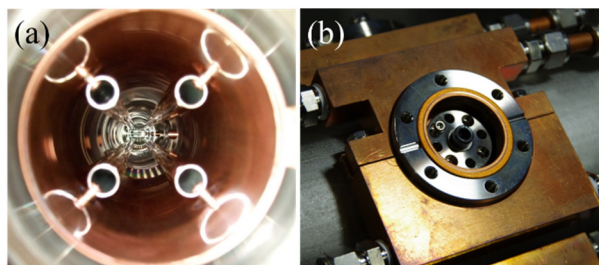


Figure 1: Photos of stripline electrodes (a) and their insulating supports (b).

その一方、PF-ARでは6.5 GeVビームの直接入射路を建設中である^[2]。専用入射路の新設に伴い、ビームの入射点も現在の南直線部から西直線部に変更されることから、上記のストリップラインキッカー一式はリング南西の短直線部に移設する予定となっている。これを機に電極の構造を根本的に見直

し、パワーロスを抑えたストリップラインキッカーを新しく製作することになった。本報告では、その設計状況と今後の更新計画について述べる。

2. シャントインピーダンスの数値計算

ストリップラインキッカーの性能を定量的に評価するためには、次式で定義される横方向シャントインピーダンスを計算する必要がある。

$$R_{\perp} = \frac{V_{\perp}^2}{2P} \quad (1)$$

P はキッカー電極への入力電力、 V_{\perp} はそのときに電極間に発生する横方向のキック電圧である。すなわち、シャントインピーダンスとは入力した電力をキック電圧に変換する際の変換効率を意味する。

一方、横方向シャントインピーダンスは、解析的に次式で表される^[3]。

$$R_{\perp} = 2Z_0 \left(\frac{2g_{\perp}L}{d} \right)^2 \left(\frac{\sin kL}{kL} \right)^2 \quad (2)$$

Z_0 は電極の特性インピーダンス、 g_{\perp} は電極形状や配置で決まる構造因子、 L は電極長、 d は電極間距離、 k は入力する高周波電力の波数である。この式はシャントインピーダンスの周波数特性や各パラメータに対する依存性を理解するのに有用であるが、複雑な構造をした実際のキッカーに適用するには構造因子 g_{\perp} の値の仮定が難しく、あまり実用的ではない。そこで、我々は 3 次元電磁界解析ソフトウェア“HFSS^[4]”を用いて任意のキッカー構造に対するシャントインピーダンスを数値的に評価することにした。

数値計算の信頼性を確認するため、図 2(a)に示したような上下 2 枚のストリップライン電極からなる単純な横方向キッカーを想定し、数値計算で得られるシャントインピーダンスと式(2)で得られる値を比較した。数値計算では、ビームの進行方向に対して下流側にあると仮定した 2 つのポートから互いに位相を反転させた 1 W の高周波電力を入力し、ビーム軌道上に発生した電界の鉛直方向成分を積分して次式によりキック電圧を計算した。

$$V_{\perp} = \sqrt{\left[\int_0^L E_y(0^{\circ}) dz \right]^2} \quad (3)$$

ただし、我々の場合はキッカーをほぼ直線的にしか使用しないため、ビームのトランジェント効果は無視し、入力電力の位相が 0° の場合のみを考慮した。これを式(1)に代入すれば、横方向のシャントインピーダンスが得られる。一方、図 2(a)のようなモデルの場合、式(2)内の構造因子 g_{\perp} は、電極の幅を w とすると

$$g_{\perp} = \tanh\left(\frac{\pi w}{2d}\right) \quad (4)$$

と表されるため、この場合 0.304 と計算できる。図 2(b)に計算したシャントインピーダンスの入力電力周波数に対する依存性を示す。グラフのノードの位置だけでなく、絶対値も最大 10%程度之差で一致しており、HFSS による数値計算は理論をよく再現することが分かった。

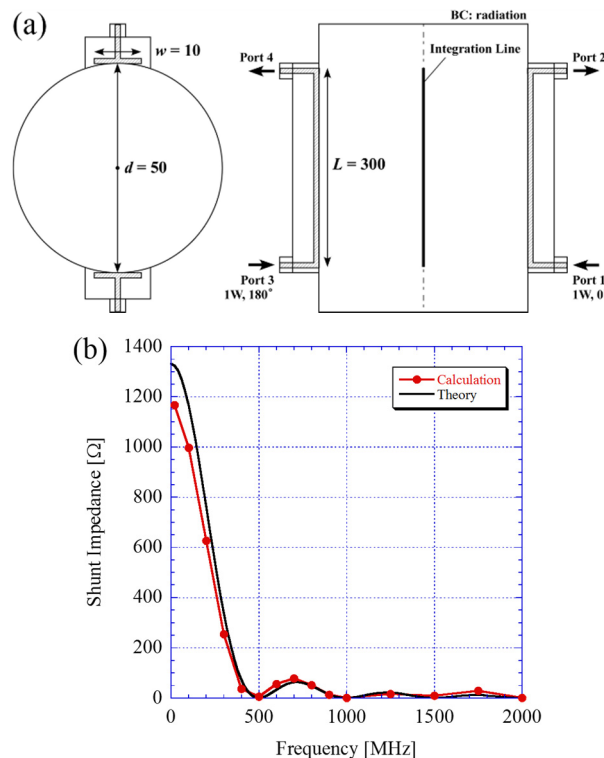


Figure 2: (a) Simple model of a transverse kicker for the test of numerical calculation. (b) Comparison of calculated shunt impedance with theoretical one.

3. 基本構造の検討

3.1 現行キッカー

まず現在使用中のキッカーがどれくらいのシャントインピーダンスを有しているのかを把握するため、HFSS で現行キッカーをモデル化し、上記の方法により横方向シャントインピーダンスを見積もった。図 1 で写真を示したように、現行のキッカー電極は上下左右から 45° 回転させた位置に配置した 4 本のステンレスパイプからなっている。パイプの直径は 18 mm で、長さは 1360 mm である。これらは内径 101.3 mm の円形ダクト内に納められており、ダクトの中心から各パイプの中心までの距離はおよそ 36 mm に設定されている（特性インピーダンス $\sim 54 \Omega$ ）。例えばこれを鉛直方向キッカーとして使用する場合、高周波電力はビームラインより上側にある 2 本と下側にある 2 本とで位相を 180° 反転させて加えることになる。最終段の RF アンプは当面既存

のもの (R&K, A20-200-R, 95 kHz~25 MHz, 200 W) を再利用するため、数値計算における入力電力の周波数はアンプの帯域を考慮して 20 MHz とする。図 3 に 1 W, 20 MHz (0°) の電力を入力した場合に水平面上に発生する電界の強度分布を示す。このとき、横方向シャントインピーダンスは 193 k Ω となった。現行のキッカーで十分ビームを安定化できていることから、新キッカーの設計では

$$R_{\perp} > 190 \text{ k}\Omega @ 20 \text{ MHz} \quad (5)$$

を実現できる構造を第一条件とする。

また、現在問題となっている電極の発熱を抑えるためには、ビームがキッカーを通過する際にロスするエネルギー (ロスファクター) ができるだけ小さくなるような構造にすることが重要である。そこで、3次元ビームシミュレータ“GdfidL^[5]”を使用し、バンチ長 8.3 mm (28 ps) のビームが現行キッカーを通過した際のロスファクターを計算すると、250 mV/pC となった。これを 60 mA のビームを蓄積したときのパワーロスに換算すると、1.1 kW となる。各電極の中央に絶縁サポートを追加した場合はこの値が 1.5 kW に増加することから、サポート部ではおよそ 400 W のパワーをロスすることが分かる。新キッカーには条件(5)を満たすことに加え、パワーロスはこれらの値よりも小さいことが求められる。

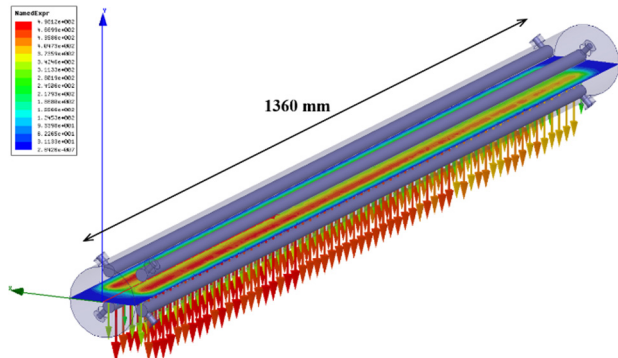


Figure 3: Current kicker model with electric fields at 20 MHz.

3.2 タイプ 1 (分割円筒型)

新キッカーの最も無難な候補として、4本のパイプ状電極を4分割した円筒のような板状電極に置き換えた構造を考える。ただし、電極を納める円形ダクトの内径は、キッカーの前後に繋がるダクト (内法 90 mm \times 34 mm のレールトラック型) に合わせて 90 mm とする。各電極の厚さは 2 mm、幅はダクト中心からの見込み角が 60° となる値に設定する。ダクト中心から電極表面までの距離は、電極 1 本あたりの特性インピーダンスが 50 Ω になるよう決める (33.9 mm)。このような構造の場合に発生する電界の計算結果を図 4 に示す。前節で定めた条件(5)を満たすためには、1380 mm 程度の電極長が必要であることが分かった ($R_{\perp} = 198 \text{ k}\Omega @ 20 \text{ MHz}$)。また、現行キッカーの場合と同じテストビームを通過させ

たときのロスファクターは 134 mV/pC となり、60 mA 蓄積時のパワーロスは 600 W と見積もられた。すなわち、この構造では現行キッカーに比べてロスは半分程度にまで減少するが、同じキック電圧を得るにはほぼ同じ長さの電極が必要であるという結論が得られた。

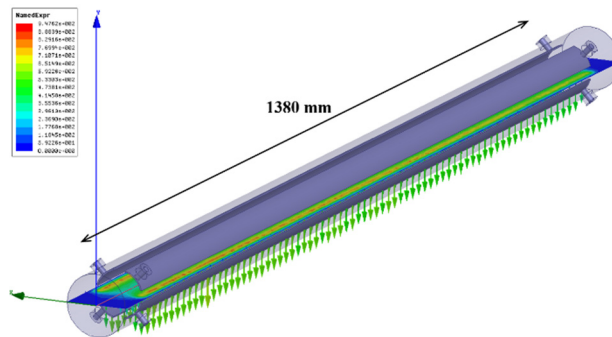


Figure 4: Type-1 kicker model with electric fields at 20 MHz.

3.3 タイプ 2 (平行平板・突出型)

前節でも触れたように、キッカーの前後に繋がるダクト (Qダクト) は内法 90 mm \times 34 mm のレールトラック型をしているため、キッカーに円形ダクトを採用するとその両端に形状変換が必要となり、設置スペースが長くなるばかりか、変換部でのパワーロスにも配慮しなくてはならなくなる。そこで、円形ダクトではなく扁平な Qダクトにそのままキッカー電極を納める場合を考える。ダクト内のスペースが限られているため、厚さ 2 mm、幅 20 mm の板状電極を平行に対向させたものを 2 組並べた構造とする。水平方向および鉛直方向の電極間距離 (最短距離) は、それぞれ 16 mm, 20.4 mm (50 Ω) とする。図 5 に発生する電界の強度分布を示す。電極配置の対称性から、この構造では水平方向と鉛直方向でシャントインピーダンスが異なるが、より小さい値となる鉛直方向を基準にすると、条件(5)をクリアするには 900 mm の電極長があれば十分であることが分かった ($R_{\perp v} = 229 \text{ k}\Omega @ 20 \text{ MHz}$)。ロスファクターは 164 mV/pC となり、60 mA 蓄積時のパワーロスは 740 W となる。鉛直方向の電極間距離が

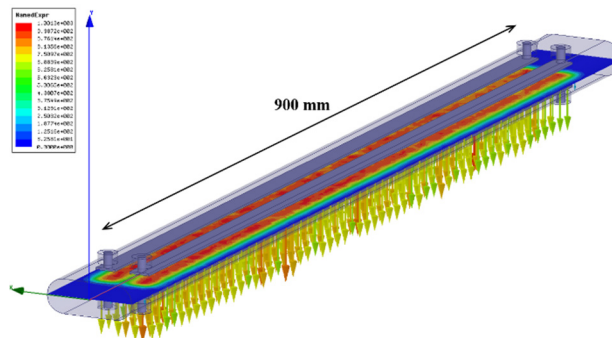


Figure 5: Type-2 kicker model with electric fields at 20 MHz.

20 mm 強とやや狭いが、ビームを蹴るには効率が良い構造であり、ロスも現行キッカーに比べるとまだ小さめである。

3.4 タイプ3 (平行平板・面一型)

前節のタイプ2は電極同士が近く、短い電極で大きなシャントインピーダンスを期待できるが、その分ビームとの相互作用も増えるためパワーロスは大きくなる。また、鉛直方向の電極間距離に余裕がなく、組み立てに工夫を要するという難点もある。そこで、Qダクトの上面と下面に2本ずつ溝を設け、そこに各電極を納めた構造を考える。電極形状はタイプ2と同じであるが、溝と電極間に適度なギャップ(3 mm)を持たせるため、水平方向の電極間距離は10 mmに狭める。鉛直方向についてはダクトの上面と面一にするため34 mmである。溝の深さは特性インピーダンスが50 Ωになる位置で決まる(10.2 mm)。この場合に発生する電界の強度分布を図6に示す。鉛直方向のシャントインピーダンスが条件(5)を満たすための電極長は、1200 mmとなった($R_{\perp v} = 199 \text{ k}\Omega @ 20 \text{ MHz}$)。ロスファクターは104 mV/pC, パワーロスにして470 Wである。当初の目的どおりロスは大幅に減少するが、電極はやはり短くできないという結果になった。また、このような空洞状の構造を設ける場合には、ビームに付随して発生するウェイク場を小さく抑えるため溝の両端の段差をテーパ化したり、一部の高調波がトラップされないような工夫が必要となる。

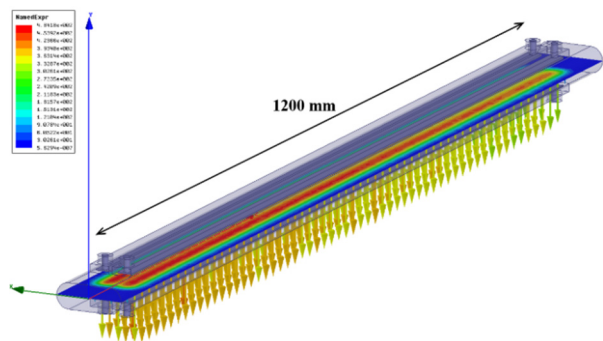


Figure 6: Type-3 kicker model with electric fields at 20 MHz.

3.5 基本構造の選定

新キッカーの基本構造の候補として以上の3種を検討したが、最も電極が短くて済み、形状変換の必要もないタイプ2(平行平板・突出型)を採用することにした。ただし、長さ900 mmの板状電極では中央部がたわんで特性インピーダンスのミスマッチが避けられない。しかしながら、現行キッカーのような絶縁サポートを設けるとまたそこでの局所的な発熱が問題を引き起こす可能性があるため、我々は450 mmの電極を2連にしてインストールすることにした。当面は間のポート同士を短いケーブルで接続して1台の長尺キッカーとして使用するが、将来的には2台の広帯域キッカーとして使用することも考えられる。

4. 詳細構造の検討

タイプ2の構造を実際に作る上での検討を行った。まず、厚さ2 mmの板状電極の機械的強度を増すため、各電極の幅を外側に5 mm延長し、さらに内側へ45°折り曲げる改良を加えた。そのままでは電極の特性インピーダンスが下がるため、鉛直方向の電極間距離を17.6 mmまで狭めて50 Ωを維持した(最近接距離は10.5 mm)。図7に発生する電界を再計算した結果を示す。電極同士が近付いたことで鉛直方向のシャントインピーダンスが増加し、電極長860 mmでも改良前とほぼ同じ効果を得られるようになった($R_{\perp v} = 247 \text{ k}\Omega @ 20 \text{ MHz}$)。なお、このときの水平方向のシャントインピーダンスは485 kΩであり、条件(5)を十分満足している($R_{\perp h} = 485 \text{ k}\Omega @ 20 \text{ MHz}$)。ロスファクターは200 mV/pC, パワーロスにして900 Wとやや増加したが、現行キッカーよりもまだ小さい。450 mmの長さの電極を2連にすると、電極間の構造変化によりロスはさらに増えると予想されるが、絶縁サポートのような構造はないため大きな問題にはならないと考えている。図8にGdfidLで計算したビーム結合インピーダンスを示す。4 GHz付近のモードが目につくが、Qダクトのカットオフ周波数(1.8 GHz)よりも高いことから局所的にトラップされることはないと考えられる。

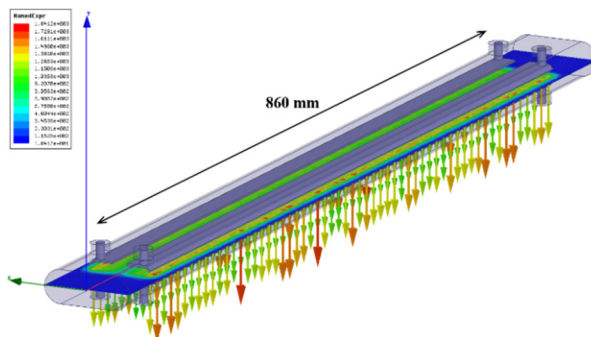


Figure 7: Improved model of type-2 kicker with electric fields at 20 MHz.

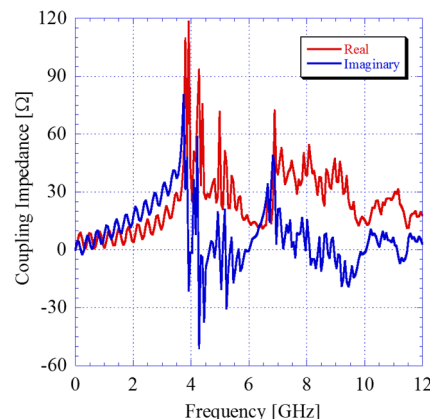


Figure 8: Real and imaginary parts of transverse beam coupling impedance for the 450-mm improved kicker. Bunch length of a simulated beam is 8.3 mm (28 ps).

次に、実際の組み立て工程やフィードスルーの取り合いを CAD 上で確認した。検討段階の全体図を図 9 に示す。これまでに確定している主な方針を以下に列挙する。

- ダクトおよび電極の材質は SUS304 とし、表面には Cu メッキを施す。
- パワーロスによる電極の伸びを吸収するため、各電極の片側には板バネ式のフィードスルーを使用する。
- フィードスルーは電極に対して垂直に配置し、フランジ間の干渉は隣り合うフィードスルーの長さを変えることで上下に回避する。
- 電極によって信号経路の長さに差が出ないようにするため、長さの異なるフィードスルーは交互に配置する。
- フィードスルーと電極の接続はネジ止めでも組み立て可能と思われるが、作業スペースの狭さや電極の伸縮でボルトが緩む可能性を考慮し、フィードスルーの中心導体自体を雄ネジ化して接続する等の方法を考える。
- 特性インピーダンスを決めるダクトと電極間の距離は、専用の組み立て治具を作って確保する。

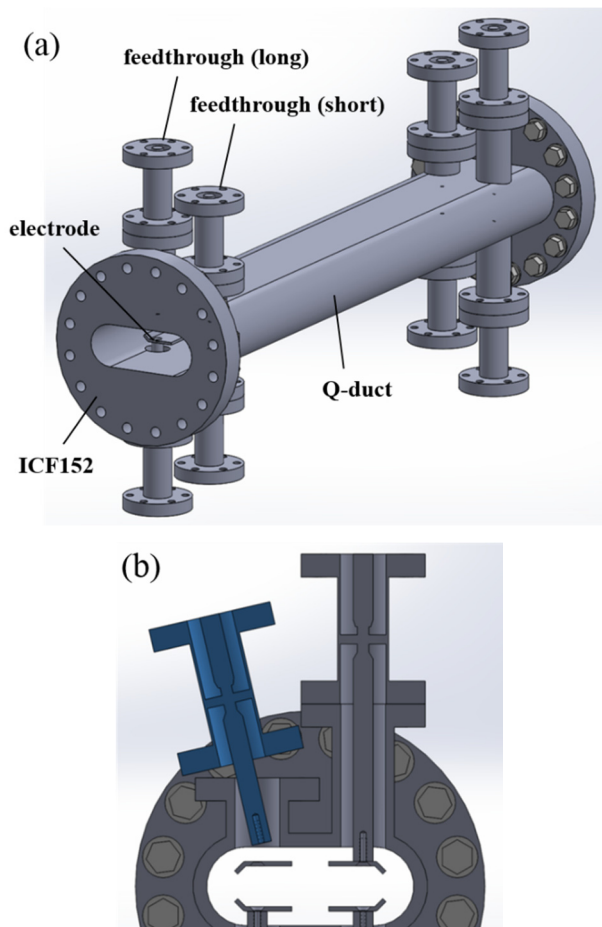


Figure 9: Schematic drawing of the new stripline kicker. (a) Overall view. (b) Cross-sectional view at feedthrough position.

5. まとめと今後のスケジュール

PF-AR のビーム振動抑制用ストリップラインキッカーを新たに設計した。より短い電極で現行キッカーの横方向シャントインピーダンスを実現でき、かつロスファクターは現行のものより小さいことを前提に 3 つの基本構造を検討し、その中から既存の Q ダクトを利用した最もシンプルな構造を最終候補として選んだ。自重によるたわみや将来の拡張性に配慮し、電極はビームの進行方向に対して 2 分割されている。実際の組み立て工程やフィードスルーの取り合い等は CAD 上で検討し、十分実現可能な構造であることを確認した。

現在はメーカーの技術者を交えてフィードスルー、およびキッカーダクトの詳細構造を詰めている段階である。詳細が固まり次第製作を開始し、2015 年 1 月から 3 月の停止期間中にリング南西部へインストールすることを目指す。その後はビーム振動検出用のモニター類もキッカーと同じセクションへ段階的に移設し、6.5 GeV 直接入射路の新設に備える予定である。

参考文献

- [1] <http://www.ft-ceramics.co.jp/products/machinable/Mica/>
- [2] H. Takaki, et al., "Construction Project of a New Beam Transport Line for PF-AR", in these proceedings, SUP020.
- [3] D. A. Goldberg and G. R. Lambertson, "Dynamic Devices: A Primer on Pickups and Kickers", AIP Conf. Proc. 249 (1992) 537.
- [4] <http://ansys.jp/products/electromagnetics/hfss/>
- [5] <http://www.gdfidl.de/>