

PF 高度化計画に向けた PF リングインフラ設備改善策の検討

STUDY OF PF-RING INFRASTRUCTURE IMPROVEMENTS FOR THE PF UPGRADE PLAN

中村典雄^{#, A) B)}, 多田野幹人^{A)}, 野上隆史^{A)}, 芳賀開一^{A)}
Norio Nakamura^{#, A)}, Mikito Tadano^{A)}, Takeshi Nogami^{A)}, Kaiichi Haga^{A)}
^{A)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
^{B)}The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

Abstract

Temperature measurements have been performed in the PF-ring tunnel for more than one year in order to understand the infrastructure performance and the temperature stability of the PF-ring towards the PF upgrade plan, where better beam stability is required. Based on the temperature measurements, possible improvements of the PF-ring infrastructure such as air-conditioning and cooling-water systems have been studied. In this paper, we describe the temperature measurement results and the PF-ring infrastructure improvements.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の放射光実験施設 (PF) が推進する PF 高度化計画[1]では、PF リングの低エミッタンス化やビーム安定性の向上を含む光源性能の強化を行う予定である。Figure 1 に PF リングを含む PF 光源棟のレイアウトを示す。強化された光源性能を十分に活かすために、PF 高度化後にはリング及びリングトンネルの温度安定性の向上や日照・外気温の変化によるリング建屋変形の抑制などがより求められることになる。我々は、KEK 放射光計画[2]におけるビーム安定化研究のために始めた PF リングトンネル内の温度測定を、今度は PF 高度化計画のために 2018 年度以降も拡張・継続して行ってきた。同時に、これらの温度測定結果を元に現状のインフラ設備の課題を明らかにし、PF 高度化計画に向けたインフラ設備の改善策を検討してきた。ここでは、PF リングトンネル内の温度測定結果およびそれに基づく PF リングインフラ設備改善策の検討結果について報告する。

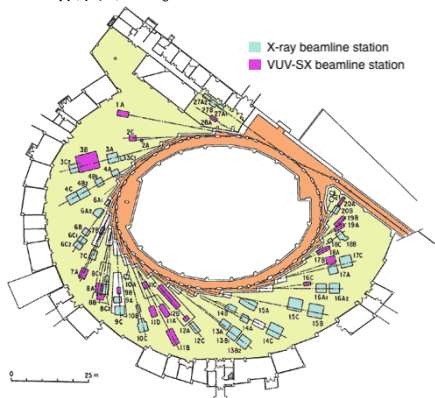


Figure 1: Layout of the PF Light Source Building. The orange area shows the tunnel of the PF ring including a part of the beam transport line from the injector and the yellow area the experimental hall with SR beamlines.

[#]norio.nakamura@kek.jp

2. PF リングインフラ設備の概要

ここでは、PF 高度化計画と関係する PF リングのインフラ設備について述べる。

2.1 空調設備

PF リングトンネル内の空調機は AC-3 と AC-4 の 2 台で、Fig. 2 に示すように AC-3 がトンネルの左半分 (緑の斜線部) を、AC-4 が右半分とビーム輸送路の一部 (ピンクの斜線部) をカバーする。AC-3 のカバーする領域の壁に 2 つの温度計ボックス AC-3-1,2、AC-4 のカバーする領域の壁に 3 つの温度計ボックス AC-4-1,2,3 が設置され、各ボックスには空調機用とエネルギーセンター (以下、エネセン) 監視用の 2 つの温度計がある。各空調機では温度をフィードバック (FB) 制御するためにその内の 1 つの空調機用温度計を選択して使用している。Figure 3 に空調機とトンネルの上に配置された空調ダクトの配置と送風ダクト内の空気の流れを示す。送風ダクトの温度制御された空気はトンネルの天井に数メートル置きに設けられた吹出口からトンネル内に送られる。

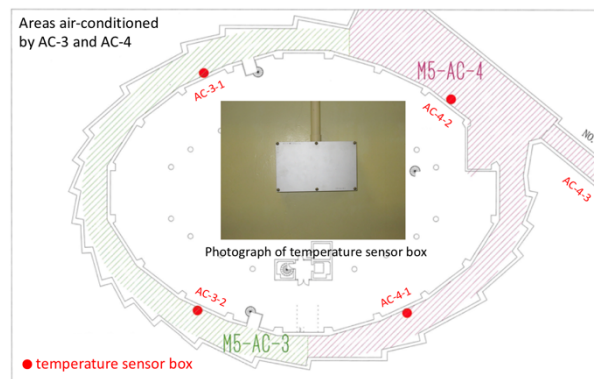


Figure 2: Areas air-conditioned by AC-3 (green hatched) and AC-4 (pink hatched) and five temperature sensor boxes (two for AC-3 and three for AC-4). One sensor for each air-conditioner is used for the temperature FB control.

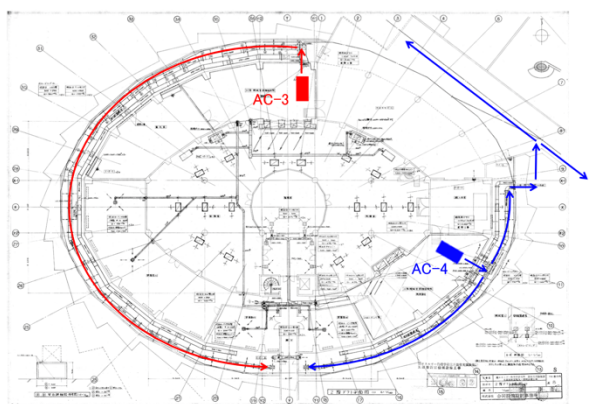


Figure 3: Layout of two air-conditioners (AC-3, AC-4) for the PF-ring tunnel and the airflow directions in the air ducts.

ただし、ビーム輸送路からリング入射点付近のトンネルの空調ダクトは特異で、建屋の構造上、トンネルの天井の下に取り付けられ、他のトンネルと比べてカバーする空間に対してダクトからの送风量も少ない（吹出口数が少なくダクト断面積も小さい）。

2.2 冷却水システム

熱負荷となるリング機器（電磁石、真空ダクト、RF等）への実験冷却水としてPFで用意された純水を循環・補充して使用しているが、熱負荷によって温められた純水の冷却には数十メートル離れている別棟のエネセンから送られる冷水が使われ、PF光源棟に隣接するPF電源棟にあるプレート式熱交換器で熱交換されて冷却されている。Figure 4にPFの冷却水システムを示す。PFの実験冷却水には3系あり、A系は実験ホールのビームライン機器、B系は主に電磁石と真空ダクト、C系はRF加速空洞とRF電源の冷却に使われている。エネセンからの冷水は、この他に空調の冷却水としても使用されている。

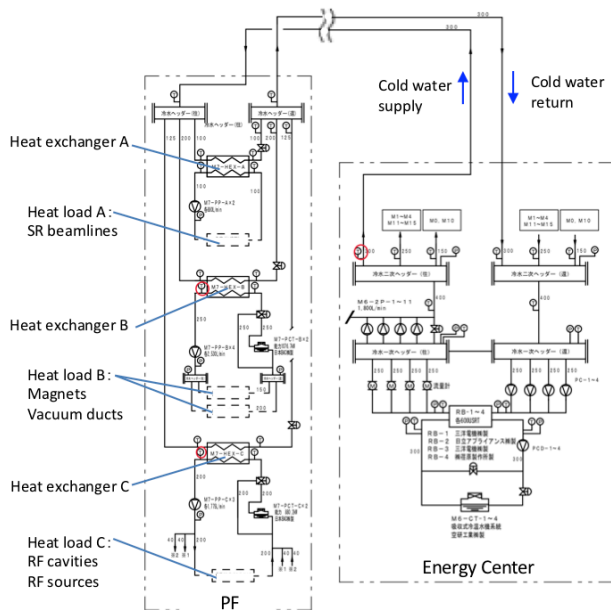


Figure 4: Schematic view of the cooling-water system for the PF ring.

2.3 建屋

Figure 1からもわかるように、PFリングは放射光（SR）ビームラインのある実験ホールとともにPF光源棟内に設置されている。PF光源棟はリングと実験ホールの一体型の構造をしているだけでなく、側壁や天井とも構造的に繋がっているために、日照や外気温などによる建屋の変形がビーム変動を引き起こす原因の1つになっている[3]。Figure 5にPF光源棟の写真を示す。建屋の変形を防ぐために、PF光源棟の天井に断熱材を敷いて建屋の変形を抑制しているが、ビーム入射点付近と入射用ビーム輸送路の一部があるトンネルの屋上は大型物品等の搬入・搬出場所とそのための道路として利用されているために断熱材は敷かれていない。また、大部分のリングトンネルは外側を実験ホールと接しているが、ビーム入射点付近とビーム輸送路のあるトンネルでは壁を隔てて直接外気と接する構造になっている。



Figure 5: Photograph of the PF Light Source Building. The white roof shows the thermal insulator for suppression of building distortion and the area bordered by a red line is the roof of the injection area with a beam transport line where the thermal insulator is not installed.

3. PFリングトンネル内の温度測定

PFリング運転期間毎のリングトンネル内の温度測定とその結果について報告する。温度測定には当初は熱電対を使用していたが、測定温度のふらつき（ノイズ）が大きいので、今回の温度測定は白金抵抗温度計を使用した。

3.1 2018年5月-7月運転

空調機AC-3とAC-4のFB制御用温度計としてはAC-3-2とAC-4-1の温度計をまずは使用した（この組み合わせが長い間使用されてきたが、その明確な理由や経緯を理解している人がいない）。FB制御用の空調設定温度はAC-3とAC-4共に24°Cである。実験冷却水B,C系の設定温度は25°Cと23°Cが基本である。白金抵抗温度計を使用したPFリングトンネル内の8つの温度測定点をFig. 6に示す。いずれの測定場所もAC-3-2温度計に近く、主にビーム位置を測定するビーム位置モニタ（BPM）を支えている四極電磁石とそれを支持する電磁石架台及び空調の吹出口に温度計を取り付けて測定した。

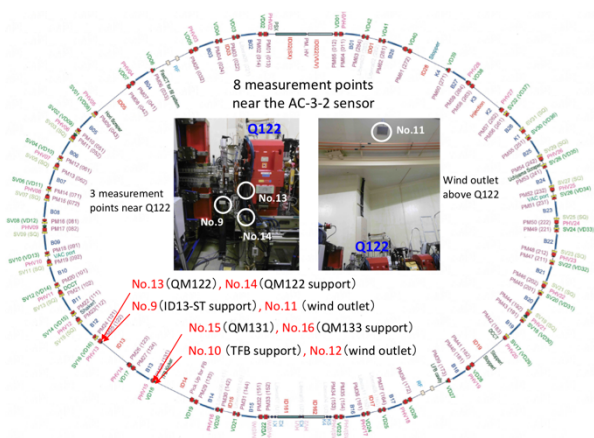


Figure 6: Eight temperature-measurement points No. 9 -16 where the temperature sensor AC-3-2 is nearly located. No. 9: ID13 steering-magnet support, No. 10: transverse FB kicker support, No. 11: AC-3 wind outlet near QM122, No. 12: AC-3 wind outlet near QM131, No. 13: QM122 magnet, No. 14: QM122 magnet support, No. 15: QM131 magnet, No. 16: QM131 magnet support.

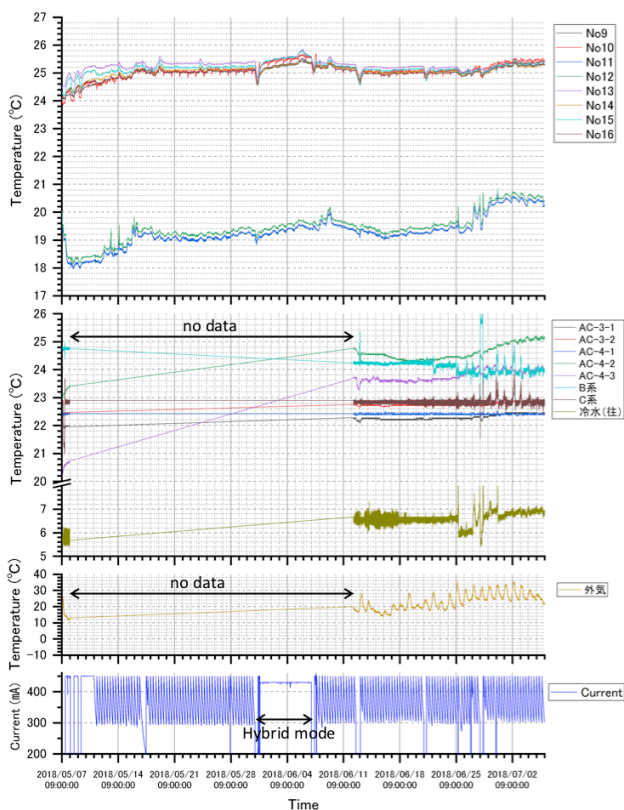


Figure 7: Temperatures at eight points No. 9 -16 in the PF-ring tunnel (top), temperatures of the AC-3 and AC-4 temperature sensors and the cooling-waters B and C before the heat exchangers at PF and the cold water from the Energy Center (upper middle), temperatures of the air temperature outside the Energy Center (lower middle), and the beam current (bottom).

Figure 7に5月7日9時から7月6日9時までのリングトンネル内の8つの温度測定点の温度、エネセンで監視している温度計 AC-3-1,2 と AC-4-1,2,3 の温度と実験冷却水 B,C 及びエネセンからの冷水の温度、リングのビーム電流を示す。測定した実験冷却水と冷水の温度の位置は、Fig. 4 の赤丸で示されている。今回の測定では、エネセンに送っている AC-3-1,2 と AC-4-1,2,3 の温度は変換器のオフセットの問題で空調用温度計の温度よりも 1.0-1.5°C程度低く計測されている。Figure 7 から次のようなことがわかる。

- (1) ハイブリッドモード以外はビーム電流が一定でなかったが、電磁石・架台の温度変動は短期的には 0.2-0.3°C以内で収まっていた。ただし、立上げ時、運転モード変更時（通常多バンチモード <-> ハイブリッドモード）、長時間のビーム電流変化時には温度が安定するまでである一定時間は温度ドリフトが生じた。
- (2) FB 温度制御に使用している AC-3-2 の温度が一定ではなくリングや外気の温度上昇につれて上昇していた。一方、AC-4-1 の温度は一定に保たれていた。
- (3) AC-3 の 2 つの吹出口の温度はどちらも立ち上げ時の温度上昇を抑えるべく一旦最低温度まで下降した後は、電磁石・架台の温度上昇にも関わらず増加の方向に転じた。
- (4) 特に外気温が上昇した6月末~7月で電磁石・架台や吹出口の温度の変動も大きく日較差の影響らしきものが見られた。
- (5) 温度計 AC-4-2（入射部付近）と AC-4-3（ビーム輸送路）の温度ドリフトは大きく日較差が見られた。
- (6) 7月1日以降はエネセンからの冷水の温度変動がほとんどなかったにも関わらず、実験冷却水 B,C に顕著な温度変動が現れた。
- (7) 温度測定点 No.10 の FB 架台で隣接する超伝導ウィグラーへの液体ヘリウムの供給と同期した数時間置きの脈動が観測された。

(1)で述べたように電磁石・架台の温度変化は短期的には 0.2-0.3°C以内で、それらの温度膨張による BPM の垂直方向の変化 (3-4 μm 以内) は PF 高度化後の垂直方向のビームサイズに比べて小さく深刻な問題ではない。ただし、立上げや運転モード変更時などを含めると長期的に 1.0-1.5°Cの変動があった。(2)(3)(4)より AC-3 の温度調節用冷却水のバルブが立上げ後すぐに全開になって AC-3 は冷却能力不足であったと推察される。(5)は入射エリアやビーム輸送路での特殊性（送風量が少なく、外気に直接接している）が原因と考えられ、(6)は7月に実験冷却水系の冷却能力が不足していた可能性を示している。(7)は No.10 に限定的な影響で、PF 高度化における超伝導ウィグラー更新で改善される。

3.2 2018年11月-12月と2019年2月-3月運転

温度測定点を一部変更し、温度測定場所をリング全体に拡大・分散させて、測定点数を8から12に増やした。Figure 8 に温度測定点の場所を示す。

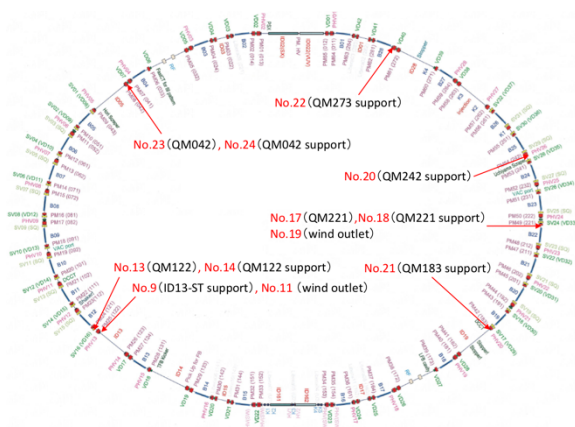


Figure 8: Twelve temperature-measurement points No. 9 - 24 except No. 10, 12, 15, 16.

前回の運転で AC-4-2 や AC-4-3 での温度ドリフトが大きいことから、11月の運転前に AC-4 の FB 制御用温度計を AC-4-1 から AC-4-2 に変更してトンネル内温度の様子を調べた。AC-3 の FB 制御用温度計は AC-3-1 のままとした。その結果、変更後に AC-4 の吹出口 (温度測定点 No.19) や AC-4-1 の温度が大きく変動して不安定になった。これは、AC-4-2 のある入射エリアが他のトンネルよりもスペースは広いが、送風量が少ないために、AC-4-2 での FB 制御によってそれ以外のリングトンネルの温度を大きく増幅して変動させてしまうためと考えられる。そのために、11月の運転前には元の温度計の組み合わせ (AC-3-2, AC-4-1) に戻した。

Figure 9 に 2019 年 2 月 12 日 9 時から 3 月 30 日 9 時までの温度測定結果を示す。Figure 9 から以下のことがわかる。

- (1) 2018 年 5 月-7 月の運転と同様に、立ち上げ時などを除けば、ほとんどの電磁石・架台の温度変化は短期的には 0.2-0.3°C 以内に収まった。
- (2) 今回測定範囲をリング全周に広げたことで、リングの場所による温度の差が 2-3°C あることがわかった。
- (3) 入射エリア付近の測定点 No.20 と No.22 では AC-4-2 の温度計とほぼ相関した形で 2°C 程度の長期的な温度ドリフトが見られた。
- (4) 2018 年 5 月-7 月運転同様、温度計 AC-4-2,3 で温度ドリフトが大きい。
- (5) AC-3 の吹出口の温度は 2018 年 5 月-7 月運転と同様に空調としては異常な挙動を示し、AC-3-2 の温度も一定に保たれなかった。
- (6) 一方、AC-4 の吹出口の温度は、リングの温度上昇を抑えるべく下がる方向にあって、AC-4-1 の温度も一定に保たれた。

(2) でリングの場所による温度の差が 2-3°C あっても、各場所での温度安定度が (1) のように 0.2-0.3°C 以内であれば問題ないと考える。しかし、(3) の入射エリア付近で観測された AC-4-2 と相関のある温度ドリフトは問題となりうるので、ビーム輸送路を含む入射エリアでの温度の安定化が必要になる。この温度安定化は (4) の問題解決にもなる。(5)(6) から、AC-4

と異なり、AC-3 の温度制御が十分に機能していない状態にあると結論される。なお、2018 年 11 月-12 月の運転も (1)-(6) とほぼ同様な測定結果であった。

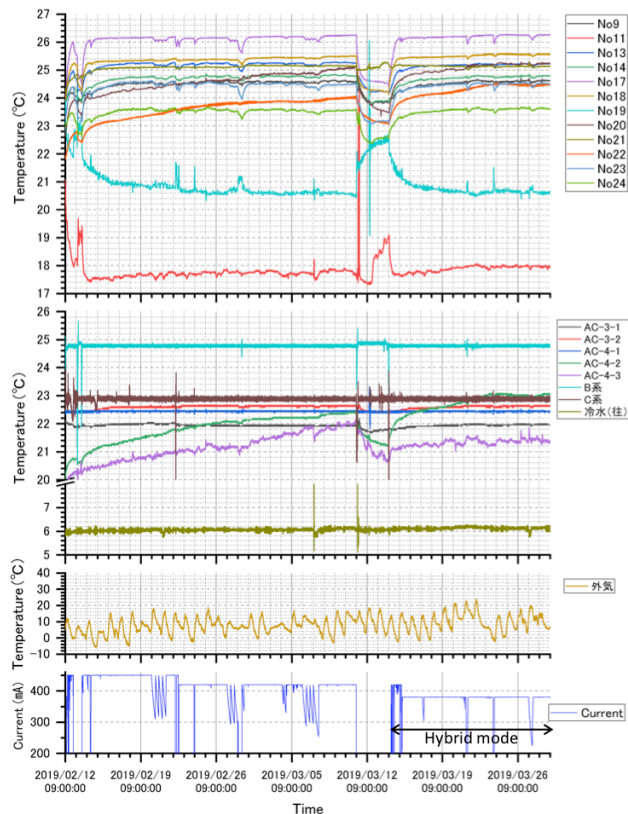


Figure 9: Temperatures at twelve points in the PF-ring tunnel (top), temperatures of the AC-3 and AC-4 temperature sensors and the cooling-waters B and C before the heat exchangers at PF (upper middle) and the cold water from the Energy Center, temperatures of the air temperature outside the Energy Center (lower middle), and the beam current (bottom).

3.3 2019 年 5 月-7 月運転

これまでの運転での温度測定の結果、FB 制御用温度計 AC-3-2 の温度は一定でなく、AC-3 の吹出口の温度の挙動も正常ではなかった。リング運転前の 4 月に AC-3 の FB 制御用温度計を AC-3-2 から AC-3-1 に変えてリングトンネル内の温度の様子を見た。AC-4 の FB 制御用温度計は AC-4-1 のままとした。その結果、特に異常なトンネル内温度の挙動は見られなかった。変更した設定で 2019 年 5 月からの運転を行った。

Figure 10 に 2019 年 5 月 7 日 9 時から 7 月 2 日 9 時までの温度測定結果を示す。AC-3 の FB 制御用温度計を AC-3-2 から AC-3-1 に変えたことで、AC-3 と AC-4 の吹出口の温度が近づき、AC-4 と同じ正常な挙動になった。同時に、AC-4-2 同様に AC-3-1 の温度も一定になった。一方、入射エリア付近の No.20 と No.22 の温度は今回も AC-4-2 の温度計とほぼ相関した形で長期ドリフトが見られた。AC-4-2,3 の温度ドリフトも依然として大きかった。リングの場所に

よる温度の差は約 2°C で少し小さくなった。

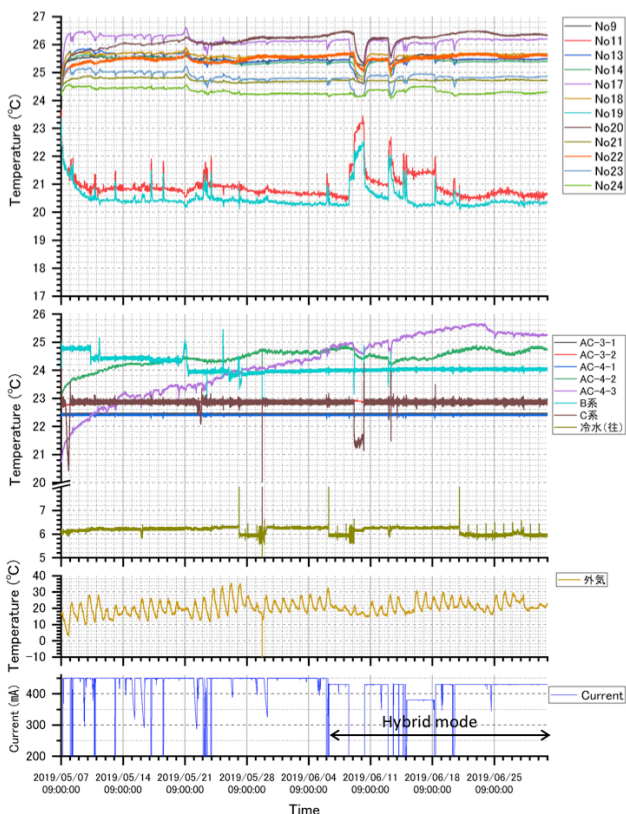


Figure 10: Temperatures at twelve points in the PF-ring tunnel (top), temperatures of the AC-3 and AC-4 temperature sensors and the cooling-waters B and C before the heat exchangers at PF and the cold water from the Energy Center (upper middle), temperatures of the air temperature outside the Energy Center (lower middle), and the beam current (bottom).

3.4 温度測定結果のまとめ

インフラ設備の改善を考える上で、これまで行った温度測定結果から重要な結論を以下にまとめた。

- (1) 入射エリア付近の電磁石・架台の温度に顕著なドリフトが見られ、温度の安定性が他の場所と比べて悪い。入射エリアはリングの一部を含むので入射だけでなく蓄積ビームの安定性に影響を与える。
- (2) (1)の原因としてビーム輸送路を含む入射エリアでの特殊性（空調からの送風量が少なく、外気に直接接している）が考えられる。
- (3) AC-3のFB制御用温度計をAC-3-2からAC-3-1に変えることで、AC-3-1の温度は一定となりAC-3はAC-4と同じような正常な動作になった。一方、AC-4のFB制御用温度計をAC-4-1からAC-4-2に変えると(2)の原因で空調の温度制御が不安定になった。
- (4) リングの立上げ時などで温度が安定するまでにある一定の時間がかかる。
- (5) リング内での温度差が $2\text{--}3^{\circ}\text{C}$ ある。
- (6) 夏に実験冷却水系の冷却能力が不足する可能性がある。

4. インフラ設備改善策

温度測定の結果を踏まえて、PF高度化計画に向けたインフラ設備の改善策を検討した。空調設備の更新やPF側での独立した冷熱源施設の設置なども冷却能力の向上として挙げられるが、予算の観点から下記のようなより現実的な改善策をいくつか提案する。

- (a) 入射エリア及びビーム輸送路のトンネルへの風量の増加（空調ダクト断面積の拡大及び吹出口数の増加など）。
- (b) 入射部エリア及びビーム輸送路のトンネル上部ならびに外壁の遮熱塗装やトンネル内部への断熱ボード貼付け。
- (c) 空調の設定温度の変更（ $24^{\circ}\text{C} \rightarrow 25\text{--}26^{\circ}\text{C}$ ）
- (d) リングにある複数の空調用温度計の平均化制御を可能にする機能の追加。
- (e) 実験冷却水 B,C のプレート式熱交換器の更新。

(a)(b)は、入射エリアやビーム輸送路の温度安定化を考えた改善策である。(b)の遮熱塗装は建屋の歪み抑制にも効果があるものと期待する。ただし、トンネル内部への断熱ボード貼付けは施工の可能性を検討する必要がある。(a)の代わりに入射エリアにパッケージ式の空調設備を追加設置する案も出たが、放射線の点から困難であるとわかった。(c)は、立上げ時などにおける温度安定時間を早め、空調の負担を軽減する可能性がある。(d)の実効果の予想は難しいが、(a)(b)の改善を行った上でリング全体をより均一にすることを考えたものである。(e)は実験冷却水系の冷却能力を上げるため、冷却水の配管サイズも同時に広げることを考えている。

5. まとめ

今回、PFリング運転においてリングトンネル内の温度測定を行うことで、現状のインフラ設備の能力とトンネル内の温度安定性について多くの知見を得ることができた。また、この温度測定結果に基づいて、インフラ設備の改善策を検討し、いくつかの現実的な案を提案することができた。引き続き、温度測定を続けて、新たな課題や改善策が見つければ検討を加えて改善策のブラッシュアップを図っていきたい。

謝辞

KEK 施設部の清岡さんと国府田さんにはPFリングのインフラ設備改善策の検討に協力していただきました。この場を借りて深く感謝致します。

参考文献

- [1] 船守展正, 第36回PFシンポジウム, 2019年3月.
- [2] KEK放射光 Conceptual Design Report ver. 1.1, 2017年5月22日.
- [3] T. Katsura and Y. Fujita, "Vertical displacement of the storage ring floor due to the building distortion in the Photon Factory", Review of Scientific Instruments 62 (1991) 2550.