

# 放射光リング PF-AR 用加速空洞の高次モード引き出し用ケーブル系の更新 RENEWAL OF HIGHER-ORDER-MODE EXTRACTION CABLES OF RF CAVITIES FOR THE PF-AR

坂中章悟<sup>#</sup>, 高橋毅, 山本尚人, 内藤大地, 渡邊謙

Shogo Sakanaka <sup>#</sup>, Takeshi Takahashi, Naoto Yamamoto, Daichi Naito, Ken Watanabe

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

## Abstract

In the 6.5-GeV synchrotron light source PF-AR at KEK, beams are accelerated using six 11-cell APS (Alternating Periodic Structure) cavities which provide total RF voltage of 16 MV. Each accelerating cell of the APS cavities is equipped with a higher-order-mode (HOM) coupler in order to damp unwanted HOMs in the cavities. Electromagnetic wave that is extracted from the HOM coupler is guided to a 3-kW dummy load (HOM load) through a WX-20D coaxial cable (HOM cable). In recent years, we experienced a few troubles in which some of the HOM cables were broken due to overheating during the PF-AR operation. To avoid further troubles, we renewed all of seventy HOM cables during the summer shutdown in 2019. At the same time, we overhauled seventy HOM loads, as well as renewed degraded polyethylene insulators of the HOM couplers. The renovated HOM cable system is working satisfactorily.

## 1. はじめに

6.5 GeV 放射光リング PF-AR では、11 個の加速セルを持つ APS 空洞[1]を 6 台用いてビームを加速している。APS 空洞のうち 4 台(E1~E4)は PF-AR 東直線部に、2 台(W1, W2)は西直線部に設置されている (Figs. 1 and 2)。PF-AR の主要なパラメータ Table 1 に示す。

APS 空洞の各加速セルには、高次モード結合器 (HOM カップラー) という一種のアンテナが取り付けられており、ビームが空洞内に誘起する高次の共振モード (higher-order-mode; HOM と略称) を引き出し、ビーム不安定性を起し難くしている。PF-AR 用の HOM カップラー[2]を Fig. 3 に示す。この HOM カップラーを加速セルの外周・中央部から空洞内に突き出し、ロッドアンテナに平行な電場がある高次モード (主に TM011, TM021, TM111 モード) を引き出す。引き出された電磁波は、WX-20D 規格の同軸ケーブル (HOM ケーブル) を通して、空洞上部に設置された水冷式 3 kW ダミーロード (HOM ロード) まで導かれ、そこで消費される。

Table 1: Principal Parameters of the PF-AR

|                      |                     |          |
|----------------------|---------------------|----------|
| Beam energy          | 6.5 GeV             | 5 GeV    |
| Radiation loss/turn  | 6.66 MeV            | 2.33 MeV |
| RF voltage           | 16 MV               | 8 MV     |
| Natural bunch length | 53.7 ps             | 50.0 ps  |
| RF frequency         | 508.57 MHz          |          |
| Harmonic number      | 640                 |          |
| Operation mode       | single bunch        |          |
| Beam current         | 50 – 55 mA (top-up) |          |

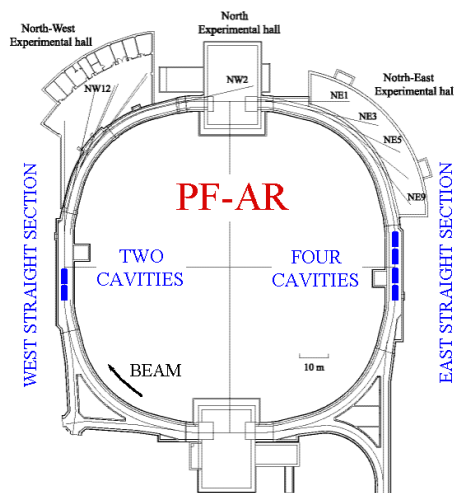


Figure 1: Layout of the PF-AR.

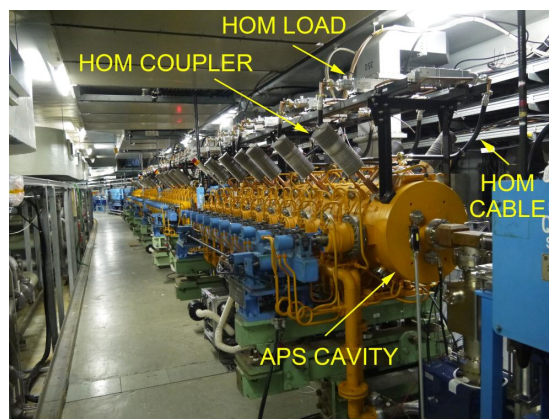


Figure 2: Picture of four APS cavities as installed in the east straight section of the PF-AR.

<sup>#</sup> shogo.sakanaka@kek.jp

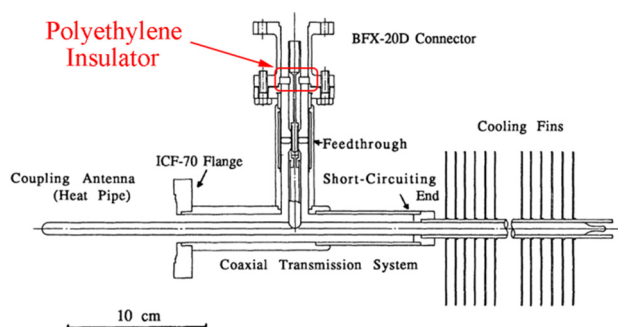


Figure 3: HOM coupler [2] for the PF-AR.

HOM カップラーは原則として 1 つの加速セルに 1 台が取り付けられ、中央の加速セルのみ 2 台が取り付けられている(ただし空洞 E1 のみ、中央の加速セルに HOM カップラーが取り付けられていない)。PF-AR では合計 70 台の HOM カップラーが使用されており、それに対応して、HOM ケーブル 70 本、HOM ロード 70 台が使用されている。このように、HOM 伝送系だけでも規模が大きい。また単バンチで大電流運転を行っている為、HOM のパワーが大きい(HOM カップラー当たり約 500W)。

PF-AR では、2017 年 2 月に直接入射路が完成し[3]、フルエネルギー入射を開始した。2018 年 11 月からは蓄積電流を一定に保つトップアップ運転も開始した[4]。これらによりビーム電流を高い値に維持できるようになり、放射光の平均強度が向上した。一方で、これらと同時期の 2018 年 5 月頃から、HOM ケーブルが運転中に異常に発熱するトラブルが数件発生した。本稿では、これらのトラブルについて報告した後、その対策と結果について報告する。

## 2. HOM ケーブルの発熱トラブル

PF-AR では、ビーム運転中に HOM ケーブル等が異常に発熱し、運転を中断して交換作業が必要となったトラブルが 2018 年以降に 4 件発生した。これらのトラブルを Table 2 にまとめた。1 件目(2018/5/28)のケースでは、HOM ケーブル(空洞 E4, HOM カップラー No. 11)に取り付けられた温度スイッチが動作し、インターロックで加速用 RF が停止したため、調査とケーブル交換作業を行った。取り外した HOM ケーブルは、Fig. 4(a)に示した

Table 2: Troubles in the HOM Cables at the PF-AR

| Date      | Case                                                     |
|-----------|----------------------------------------------------------|
| 2018/5/28 | Overheating in a HOM cable                               |
| 2018/6/14 | Overheating in a HOM cable                               |
| 2019/3/5  | Overheating in a HOM load and a HOM cable                |
| 2019/5/18 | Overheating in a polyethylene insulator of a HOM coupler |

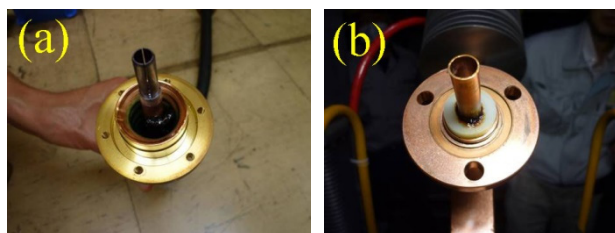


Figure 4: Cases of troubles. (a) Damaged HOM cable, and (b) damaged insulator of HOM coupler.

ように、ケーブルのポリエチレン絶縁体が溶融し、黒色に変色していた。また Table 2 の 4 件目(2019/5/18)のケースでは、ビーム運転中に HOM ケーブル(空洞 E4, HOM カップラー No. 9)の温度が上がり続けたため、運転を中断して調査した。その結果、Fig. 4(b)に示したように、HOM カップラーのポリエチレン絶縁体(Fig. 3 に赤色で示した部品)の内導体側が一部溶融し、内導体に固着していた。これらのトラブルでは、HOM ケーブルやポリエチレン絶縁体等の部品を交換することで復旧したが、作業のためユーザー運転が中断した。

この時点で使用していた HOM ケーブルは前回更新してから 8~13 年が経過しており、PF-AR トンネル内での放射光の照射等により、ポリエチレン絶縁体の劣化が進んでいたと考えられる。また近年の PF-AR の平均ビーム電流の向上により、平均 HOM パワーが増加したこともトラブル頻発の一因と考えられる。この HOM ケーブル等の発熱トラブルに対処するため、2019 年夏の停止期間に次の更新・改良作業を行った：

- 1) HOM ケーブル全数(70 本)の改良と更新
- 2) HOM ロード全数(70 台)のオーバーホール
- 3) HOM カップラーのポリエチレン絶縁体の更新
- 4) HOM ケーブル用温度スイッチと熱電対の増設
- 5) 温度データ収集システムの更新

## 3. HOM ケーブル系の更新

### 3.1 HOM ケーブルの更新と改良点

HOM ケーブルは、空洞に取り付けられた HOM カップラーと空洞上部に設置された HOM ロードの間を結ぶ WX-20D 規格の同軸伝送線路である。旧 HOM ケーブル(Fig. 5)では、ケーブル本体として高難燃同軸ケーブル NH-HF-20D(日立金属)を使用し、その両端に同軸エルボが一体として付けられていた。NH-HF-20D ケーブルは内・外導体間の絶縁体として螺旋状のポリエチレンを使用しているため、ケーブルの曲げ加工を現場で行うことができないという問題点があった。また、ケーブルとエルボを接続する接栓が固定式かつ日立金属固有の製品であった為、ケーブルの設置時に自由度が乏しく、また調達先が限られるという問題があった。HOM ケーブルを更新する際には、これらの点について設計を改良した。

新しい HOM ケーブルの設計を Fig. 6 に示す。ケーブル本体には同じ WX-20D 規格の NH-WF-H50-7S ケーブル(フジクラ・ダイヤケーブル)を採用した。このケーブルは絶縁体として超高発泡ポリエチレンを使用している為、現場で曲げ加工ができ、空洞部への設置・位

置調整作業が容易になった。またケーブルの両端に付ける同軸エルボを独立した部品とし、コネクタを規格品 (BFX-20D) とした。これにより、設置時にエルボの両端を回転・取り外しする事ができ、自由度が増すことにより設置作業が容易になった。同軸ケーブル両端のコネクタには、大強度陽子加速器 J-PARC MR の放射線環境で使用実績のある耐放射線仕様のコネクタ (フジクラ・ダイヤケーブル製 WFH7SD-BFX20D-CB-X1) を採用した。

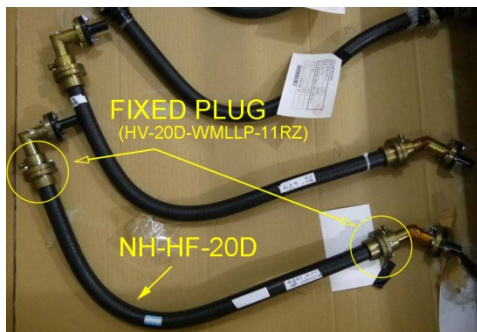


Figure 5: Picture of an old HOM cable.

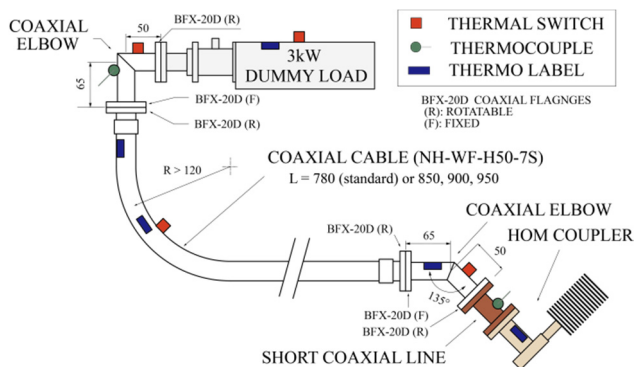


Figure 6: Design of a new HOM cable.

新 HOM ケーブルにおいては、BFX-20D コネクタ同士の接続箇所がケーブル 1 本当たり 4 箇所、合計 280 箇所ある。接続の際に用いるアンカーコネクターとしては、電気接触部にコンタクトバンドを用いた特注品 (日本高周波 ACX-20DX-GTC) を採用した。コンタクトバンド型では、設置時のミス (内導体のスリ割りの一部が捲れ上がる) を防止でき、電気接触も良いと期待される。この特注品アンカーコネクターは事前に試作を行い、周波数 508.9 MHz において大電力試験 (通過電力 1.2 kW で 8 時間、2 kW で 20 分間) を行って問題無いことを確認した後、量産した。

新 HOM ケーブル本体および同軸エルボの電力容量を検討した結果を Table 3 に示す。使用周波数としては、主要な HOM 周波数の一つである 1.385 GHz を仮定した。他の周波数  $f$  においては  $f^{-1/2}$  に比例した電力容量となる。この検討では、メーカーのカタログ等に記載された電力容量を元に、PF-AR の使用条件に近い条件を仮定し、値を修正した。特に、HOM ロードの広帯域での入力 VSWR がやや悪い事を考慮した。HOM ケーブル全体としては約 720 W (@1.385 GHz) の電力容量と考えられる。

Table 3: Estimation of Power Capacity of the New HOM Cable at an Operating Frequency of 1.385 GHz

| Component (use conditions)                                                                              | Capacity |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Coaxial cable (ambient temperature: 35°C, maximum temperature of inner conductor: 80°C, load VSWR: 1.5) | ~ 1.1 kW |
| Coaxial elbow (outer temperature: 40°C, maximum temperature of inner conductor: 80°C, load VSWR: 1.5)   | ~ 720 W  |

### 3.2 HOM ロードのオーバーホール

HOM 電磁波を吸収するため、水冷式 3 kW ダミーロード (日本高周波 DL-302DW-20DF) を 70 台用いている。内部の高周波吸収体は、ベリリア製基板の上に焼成された抵抗体である。ベリリア基板を水冷された銅製基板に押しつけ、間接水冷している。このダミーロードは 2001 年に設置して以来一度も保守を行っていなかったため、今回全数のオーバーホールを工場で行った。オーバーホールの内容は、(1) 受け入れ時特性測定、(2) 分解・清掃、(3) 内部に使われているポリエチレン部品 3 個の交換、(4) 抵抗体等の目視点検、(5) 再組み立て、(6) 水路出入口のシール材の交換、(7) 組み立て後の特性測定、(8) 水路加圧試験、(9) 50Hz, 1 kW でのヒートランニング試験、(10) 出荷前の特性測定、である。

内部の抵抗体の状態は全てのダミーロードで健全であった。ただし、入力 RF を抵抗体に接続する入力リードについては、70 台中 20 台についてハンダ付けの外れまたは接触不良が発見され、再ハンダ付けで修理を行った。長年の使用によるヒートサイクルで、ハンダ付け箇所が劣化したものと考えられる。今回のオーバーホールにより、ダミーロードは今後 10 年間程度は問題なく使用できると考えている。

### 3.3 HOM カップラーのポリエチレン絶縁体の交換

Figure 3 に示した HOM カップラーで強度が最も弱い箇所は真空フィードスルーのロー付け部である。同軸ケーブルの抜き差しの際にこのロー付け部に無理な力がかからないよう、ポリエチレン絶縁体 (Fig. 3 に赤色で示した部品) で内導体を支えている。この絶縁体部品は HOM カップラーの設置後約 30 年間交換しておらず、放射線照射等により劣化が進んでいたと考えられたため、全数を交換する事にした。

この絶縁体部品には、1) 使用周波数帯域において誘電損失が小さいこと、2) 放射線環境で使用するためフッ素系材料であること、3) 融点ができるだけ高く耐熱性が良いこと、が必要とされる。元々用いられた材質は、高密度ポリエチレンまたは架橋ポリエチレンである (どちらかは不明)。既に部品図が失われているため、現物を採寸して部品図を作成し、部品を新たに製作した。材質としては、超高分子量ポリエチレン (作新工業ニューライト®NL-W) を採用した。部品を事前に試作して HOM カップラーにフィットすることを確認、またそのうち 2 個を事前に HOM カップラーに組み込んで PF-AR の運転で使用し、問題がないことを確認した後、全数 (70 個) の交

換を行った。部品交換と同時に、HOM カップラーのフィードスルーの目視点検と同軸管部分の清掃も実施した。

### 3.4 温度スイッチと温度センサーの増設

Figure 6 に示したように、HOM ケーブル系 1 本当たり温度スイッチ(バイメタル製、設定温度 60°C)を 4 個、温度センサー(熱電対)を 2 個取り付けている。これらのうち、温度スイッチ 1 個(@ダミーロード上部)と温度センサー 1 個(@上側エルボ)を今回増設した。この他、最高温度記録用のサーモラベル®(日油技研 3E-40)を 5 枚貼り付けている。温度スイッチが動作すると、インターロックにより加速用 RF を停止する。また温度センサーはケーブル外周の温度を常時モニターするのに用いられる。これらは、ケーブルの温度異常を早期に検知するのに役立っている。

### 3.5 温度データ収集システムの更新

HOM ケーブルや冷却水系の温度センサーの信号は、PF-AR 東棟と西棟に各 1 台設置したデータロガーで収集される。老朽化していた従来のデータロガーを更新した。新しいデータロガーには SMARTDAC+ GM10(横河電機)を採用し、EPICS 制御システムへのデータ取り込みシステムを構築した。収集する温度センサーの点数は、東空洞用が 135 点、西空洞用が 79 点である。

### 3.6 更新作業

3.1~3.5 節で述べた更新作業を 2019 年 7 月~10 月中旬の PF-AR 停止期間中に実施した。限られた期間中に作業を終えるため、工程を工夫した。特に、最も時間を要する HOM ロード 70 台のオーバーホールを効率的に行うため、停止期間が始まるとすぐに HOM ロードの取り外し作業を開始し、取り外した HOM ロードをすぐに工場に発送、流れ作業でオーバーホールを実施した。

更新された HOM ケーブル系の写真を Fig. 7 に示す。

## 4. 運転における使用状況

### 4.1 HOM ケーブルの使用状況

HOM ケーブル更新後、2019 年 10 月中旬から PF-AR の運転を再開した。運転再開後の蓄積電流をそれまで(2019 年 6 月以前)の 55 mA から 50 mA に下げ、慎重に立ち上げを開始した。蓄積電流を 50 mA に下げた理由は、1) HOM ケーブル更新期間中に、HOM カップラーの新たに 2 箇所のポリエチレン絶縁体で、部品の内導体側が溶融しているのが見つかった事、および 2) 新 HOM ケーブルで何らかの初期不良があり得ること、である。更新された HOM ケーブル系は順調に立ち上がり、以降問題なく運転に使用されている。ビームエネルギー 6.5 GeV、ビーム電流 50 mA(単バンチ、トップアップ)時の HOM ケーブル外周温度は、最も高いもので 38°C(@上側エルボ)および 41°C(@HOM カップラーの短同軸管)であり、問題ない。

### 4.2 運転中の HOM パワーの測定(スペクトル)

HOM ケーブルが Table 3 に示す電力容量以内で使用されていることを確認するため、HOM カップラーから



Figure 7: Picture of the renovated HOM cable system.

引き出された HOM パワーを 2 通りの方法で測定した。測定箇所は、HOM ケーブル外周温度が比較的高い HOM カップラー 2 台(空洞 E1 の HOM カップラー No. 4、および空洞 E2 の HOM カップラー No. 4; それぞれ E1-4, E2-4 と略称する)を選び、ビーム電流 50 mA、ビームエネルギー 6.5 GeV および 5 GeV において測定した。第 1 の測定方法では、HOM ロードに備えられている信号モニターポートからの信号を同軸ケーブルで RF 制御室に導き、スペクトラムアナライザー(R&S FPC1500)で信号スペクトルを測定した。

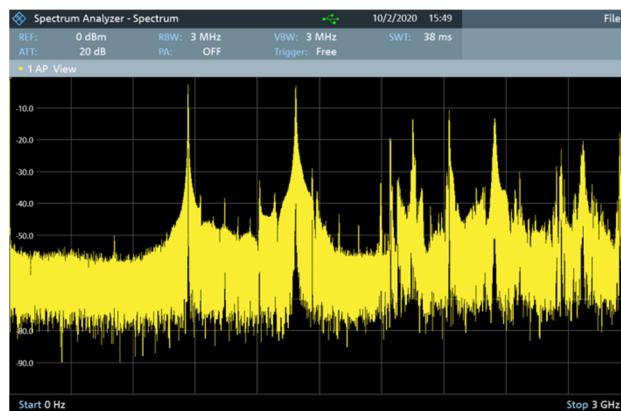


Figure 8: Spectrum of HOM signal from a HOM coupler E1-4 at a beam current of 50 mA and a beam energy of 6.5 GeV. Abscissa: frequency (0—3 GHz), ordinate: signal level (10 dB/division).

ビーム電流 50 mA、6.5 GeV の条件で測定した、HOM カップラー E1-4 からの HOM スペクトルを Fig. 8 に示す。HOM カップラーと結合する空洞 HOM に対応する複数のピークが見て取れる。次に、Fig. 8 で観測され

た主要な 6 つの HOM ピークについて、各ピークのパワー(ピークを含む適当な周波数帯域内で積分した電力)を測定し、各ピークについてモニターポートの結合度と同軸ケーブルでの損失を補正し、HOM ロードに入力されたパワーを算出した。その結果を Table 4 に示す。周波数 0.865 GHz(TM011 モードに対応)と 1.385 GHz(TM021 モードに対応)の 2 つのピークのパワーが大きいことがわかる。主要な 6 つのピークの合計パワーは約 434 W であった。他の測定結果については、後で示す。

Table 4: Estimated Powers of HOMs from the Spectrum Measurement

| Frequency (GHz) of each peak | HOM power (W) |
|------------------------------|---------------|
| 0.865                        | 231           |
| 1.385                        | 127           |
| 1.952                        | 16            |
| 2.129                        | 23*           |
| 2.349                        | 26*           |
| 2.954                        | 11*           |

\* Not accurate due to inaccurate coupling coefficient.

#### 4.3 運転中の HOM パワーの測定(熱量)

HOM ロードの冷却水システムは、HOM ロード 5 台(空洞 E1)または 6 台(空洞 E2~E4, W1, W2)を直列に接続し、1 系統当たりの入・出口の水温と流量を測定している。この水温上昇と流量から、HOM ロード 5 台(または 6 台)当たりの熱量(HOM パワー)を求めた。第 4.2 節で報告した HOM カップラー E1-4, ビーム電流 50 mA, 6.5 GeV の例では、HOM ロード 5 台当たりの水温上昇が  $\Delta T=2.6^\circ\text{C}$ 、流量が 12 L/min. であり、HOM ロード 5 台当たりのパワーは約 2.18 kW、HOM ロード 1 台当たりの平均パワーは約 437 W であった。この例も含め、HOM カップラー 2 箇所(E1-4 と E2-4)に対して 2 通りの方法で測定した HOM パワーを Table 5 にまとめた。

Table 5: Summary of HOM-Powers from Spectrum Measurement and Calorimetric Measurement

| HOM coupler (method) | 6.5 GeV, 50 mA | 5 GeV, 50 mA |
|----------------------|----------------|--------------|
| E1-4 (spectrum)      | 434 W          | 431 W        |
| E1-4 (calorimetric)  | 437 W          | 481 W        |
| E2-4 (spectrum)      | 384 W          | 515 W        |
| E2-4 (calorimetric)  | 504 W          | 547 W        |

Table 5 より、1) スペクトル測定で求めた HOM パワーは熱量測定から求めた値と概ね一致する、2) ビーム電流が 50 mA であれば HOM パワーはビームエネルギーにはあまり依存しない、がわかる。6.5 GeV と 5 GeV では自然バンチ長はほぼ同じである(Table 1)。ビームエネルギーが異なると、空洞電圧の違いにより空洞温度が異なり、HOM 周波数にずれが生ずることで、HOM スペクトルと HOM パワーに小さな違いが生ずるものと考えられる。

Table 5 の結果より、ビーム電流 50 mA においては、

HOM ケーブル 1 本当たりを通過する HOM パワーは約 550 W 以下である事がわかる。他の 68 箇所の HOM カップラーについてはスペクトル測定を実施していないが、HOM ケーブル温度が比較的高い箇所で測定を実施したことから、他の HOM ケーブルでも Table 5 に示した HOM パワーと同程度またはそれ以下であろうと考えている。測定された最大 HOM パワー約 550 W は、Table 3 に示した HOM ケーブルの電力容量(約 720 W@1.385 GHz)の約 76%である。また、ケーブル電力容量の周波数依存性( $\propto f^{-1/2}$ )を考慮しても、電力容量以内で使用していると考えられる。

## 5. まとめ

PF-AR では、APS 空洞からの高次モード引き出し用ケーブル系の発熱トラブルが 2018 年以降に多発した。この問題に対処するため、HOM ケーブル全数の交換、HOM ロード全数のオーバーホールを含む更新作業を実施した。更新された HOM ケーブル系は、2019 年 10 月からの運転で全く問題なく稼働している。蓄積電流 50 mA(単バンチ)での HOM パワーは、HOM ケーブル 1 本当たり約 550 W 以下であると考えられる。現在の PF-AR の蓄積電流 50 mA(トップアップ)は、主に HOM ケーブルの発熱によって制限されている。HOM ケーブルの電力容量には多少の余裕があるため、今後蓄積電流を増やす事ができるか、慎重に検討中である。

## 謝辞

KEK 放射線科学センターの波戸芳仁氏、吉田剛氏、他の皆様には、HOM ケーブルのトラブル時に有益な助言を頂きました。HOM カップラーの設計については、両角祐一氏(KEK)に詳細に教えて頂き、日立パワーソリューションズの高木翔悟氏には約 30 年前の図面を探し出して頂きました。KEK の外山毅氏、飛山真理氏、有永三洋氏、西脇みちる氏にはケーブル等に関して有益な情報を頂き、梅森健成氏には旧 HOM ケーブルの履歴を調べて頂きました。HOM ケーブル系の調達では、各メーカー(藤倉商事およびフジクラ・ダイヤケーブル、日本高周波、スズノ技研)の皆様にお世話になり、更新作業では三菱電機システムサービスの皆様にお世話になりました。温度収集システムの構築では、KEK の帯名崇氏、東日本技術研究所の路川徹也氏にお世話になりました。ここに感謝致します。

## 参考文献

- [1] T. Higo *et al.*, "Development of an APS cavity for TRISTAN Main Ring", IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-32, 2834 (1985).
- [2] Y. Morozumi *et al.*, "Higher order mode damper with self-cooled coupler", Part. Accel. 29, 85 (1990).
- [3] N. Higashi *et al.*, "PF-AR 直接入射路の建設とコミッションング", Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 212-215.
- [4] S. Nagahashi, "PF-AR におけるトップアップ運転", Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31- Aug. 3, 2019, pp. 1066-1066.