

STF2 加速器での安定なビーム運転のための RF 出力分配系の構築

CONSTRUCTION OF RF POWER DISTRIBUTION SYSTEM FOR STABLE BEAM OPERATION FOR STF2 ACCELERATOR AT KEK

堤和昌^{#,A)}, 石本和也^{A)}, 沼田直人^{A)}, 明本光生^{B)}, 荒川大^{B)}, 片桐広明^{B)},
川村真人^{B)}, チュウフェン^{B)}, 中島啓光^{B)}, 松本利広^{B)}, 三浦孝子^{B)}, 江木昌史^{B)}

Kazuyoshi Tsutsumi^{#,A)}, Kazuya Ishimoto^{A)}, Naoto Numata^{A)}, Mitsuo Akemoto^{B)}, Dai Arakawa^{B)}, Hiroaki Katagiri^{B)},
Masato Kawamura^{B)}, Qiu Feng^{B)}, Hiromitsu Nakajima^{B)}, Toshihiro Matsumoto^{B)}, Takako Miura^{B)}, Masashi Egi^{B)}

^{A)} Nippon Advanced Technology Co. Ltd. (NAT)

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The STF2 accelerator has been developed to realize the International Linear Accelerator (ILC) in the Superconducting rf Test Facility (STF) at KEK. In the STF2 accelerator, three RF units are installed and feed its power to the RF-gun cavity, two superconducting (SC) cavities and eight SC cavities. For the stable operation of the STF2 accelerator, the power distribution system, monitor system and interlock system have been constructed. After the adjustment of phase length in the power distribution system, the first beam acceleration was conducted from February to March 2019. This report describes the present status of the power distribution system of the STF2 accelerator.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)の超伝導 RF 試験施設(STF)では、国際リニアコライダー(ILC)の実現にむけて超伝導空洞を用いた線形加速器(STF2 加速器)の開発を進めている。STF2 加速器は 3 台の高周波源を持ち、各々が RF 電子銃、2 台の超伝導空洞、8 台の超伝導空洞へマイクロ波(運転周波数 1.3 GHz、繰り返し 5 Hz、RF パルス幅 1~1.65 ms)を供給する構成となっている。2019 年 2 月から 3 月にかけて、初めてビーム加速試験が行われた。安定な高周波源やビーム運転に向けて、導波管内放電や反射 RF により引き起こされるビーム運転への悪影響を抑えるための分配系やモニター系、インターロックの構築を行った。また、ビーム運転のために各高周波源の RF 出力分配系のパワー分配や移相量の調整を行った。本稿では、STF2 加速器の RF 出力分配系について報告を行う。

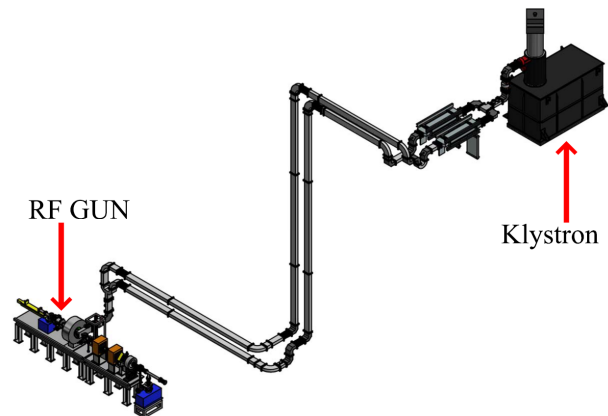


Figure 1: RF system for RF GUN.

2. STF2 加速器の RF 出力分配系

2.1 RF 電子銃の RF 出力分配系

RF 電子銃の高周波系は、5 MW クライストロンを高周波源とし、導波管を通じて RF 出力を空洞に供給する構成となっている。この導波管路を二分割し、導波管への RF 入力レベルを下げることで放電を抑え、空洞に安定してマイクロ波を供給することを目的として分配系を構築した(Fig. 1)。

2.2 キャプチャークライオモジュールの RF 出力分配系

キャプチャークライオモジュール(CCM)の高周波系は、800 kW クライストロンを高周波源とし、可変ハイブリッドによって RF 出力を分配し、移相器によって位相を調整

して 2 台の超伝導空洞(CCM1、CCM2)に供給する構成となっている(Fig. 2)。可変ハイブリッドの出力分配比は、CCM1 と CCM2 の加速電界がそれぞれ 16 MV/m、24 MV/m となるよう調整する。移相器によって調整可能な位相範囲は 70 deg 程度であることから、ビーム運転前に導波管路に位相調整用スペーサーを挿入して位相を調整する。

2.3 クライオモジュールの RF 出力分配系

クライオモジュール(CM-1、CM-2a)の高周波系は、10 MW マルチビームクライストロン(MBK)を高周波源とし、その片側(5 MW)から出力された RF を 3 dB ハイブリッドによって二系統に分配し、LPDS (Local Power Distribution System) ①~④、⑤、⑥~⑧によって各空洞(Cavity#1~#4、#8、#10~#12)に供給する構造となっている(Fig. 3)。LPDS は可変ハイブリッド、移相器及びサーキュレーターによって構成される。

[#] nat-tutu@post.kek.jp

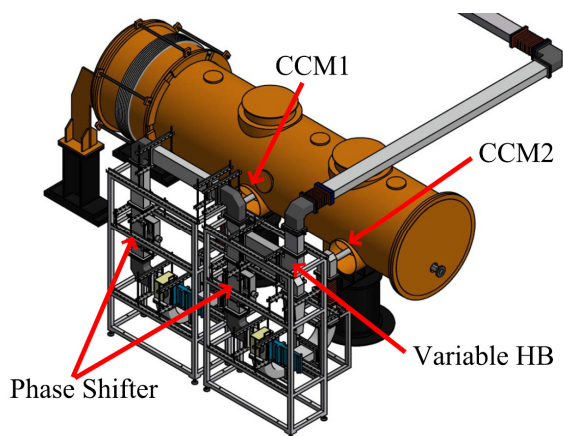


Figure 2: RF system for CCM.

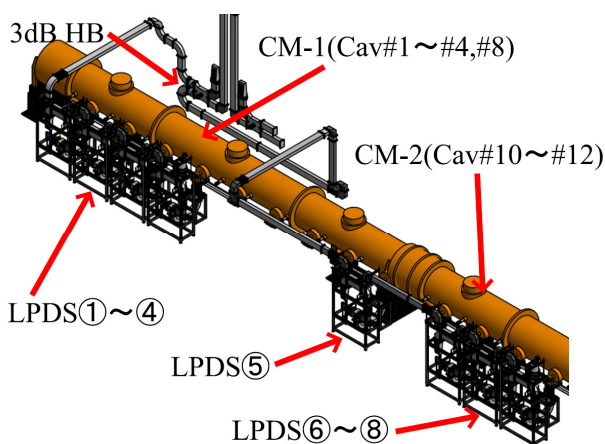


Figure 3: RF system for CM-1 CM-2a.

2.4 インターロック系

モニター系は、RF パワーを測定するパワーセンサーと、放電発光を検出するアークセンサーによって構成される。インターロック系は J-PARC の MR でも採用されているモジュールを使用し、モニター系の信号をもとに、反射 RF や放電が発生した場合に高速で RF を遮断し、加速器構成機器や RF 系構成機器への悪影響を最小限に抑えることを目的としており (MPS)、放電検出による RF 遮断に関しては $1 \mu\text{s}$ 以下を可能としている[1]。放電検出時のオシロスコープの波形を Fig. 4 に示す。

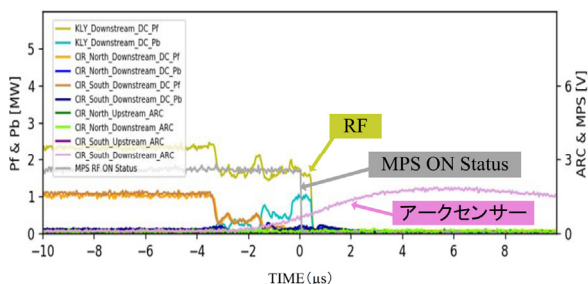


Figure 4: Waveform that detected discharge.

3. ビーム運転前の RF 出力分配と位相調整

クライオモジュールの超伝導加速空洞は、1326 mm の間隔で配置されている。これは、1.3 GHz のビームが光速まで加速された場合の波長 230 mm の、5.75 倍の値である。この加速空洞において、加速勾配に対する RF の位相を最適にするため、ビームの進行方向に向かって空洞ひとつごとに RF の位相をプラス 90 deg する必要がある。移相器によって調整可能な位相範囲は 70 deg 程度であるため、ビーム運転前に導波管路にスペーサーを挿入して位相を調整する。STF2 加速器の RF 系に使用されている導波管 WR650 の 1.3 GHz における管内波長は 322 mm であり、ここから必要なスペーサーの厚さを計算する[2]。スペーサーの挿入を容易にするため、各 LPDS 間の導波管路に U 字構造を設けており、必要な厚さのスペーサーを二分割して挿入できる (Fig. 5)。ビーム運転に向けて、各 LPDS について可変ハイブリッドの分配比調整 (等分配) と、スペーサーによる位相調整を行った。また、移相器は $\pm 35 \text{ deg}$ で使用できるよう、センタリングを行った。

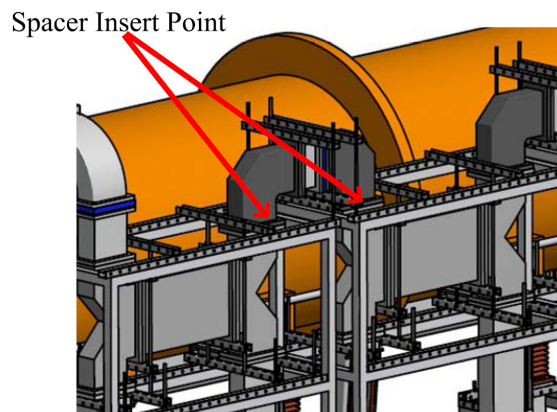


Figure 5: Spacer insert point.

4. ビーム運転中の可変ハイブリッドと移相器の調整

ビーム運転中、クライオモジュールにおいて平均加速電界をできるだけ大きくするため、LPDS の可変ハイブリッドを遠隔操作し、各空洞に供給する RF パワーの分配比を調整した。今回のビーム運転では、平均加速電界 31.5 MV/m でのフィードバック制御に成功した (Fig. 6)。この調整により RF の位相も変化するため、ビームプロファイルモニターを確認しながら移相器を遠隔操作し、RF の位相が最適となるよう調整を行った。全ての空洞において遠隔操作による調整が可能 ($\pm 35 \text{ deg}$ 以内) であり、ビーム運転前に行ったスペーサーによる位相調整が、適切であったことを示している。ビーム運転期間終了時の各空洞の位相と、ビーム運転前との差 (移相量) を Table 1 に示す。空洞 #10~#12 の値が若干マイナス側に大きいのは、CM-1 と CM-2a の連結部分の寸法誤差のためと考えられるが、移相器の可動範囲内で充分調整可能であった。

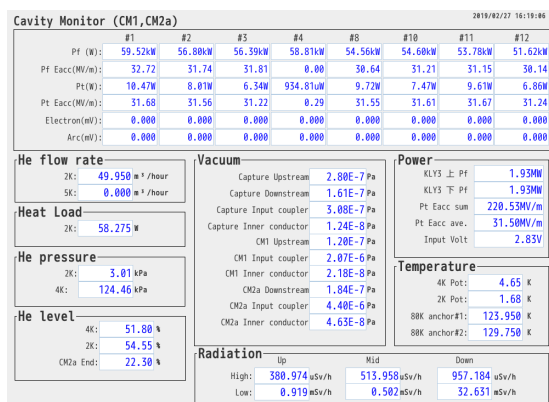


Figure 6: Cavity monitor at acceleration electric field of 31.5 MW/m.

Table 1: Phase Shifter Regulation

Cavity	Phase at After	Phase Shift
	Beam Operation [degree]	Amount [degree]
#1	55.87	10.45
#2	156.64	15.78
#3	-122.06	8.55
#4	—	—
#8	61.71	16.43
#10	-151.66	-21.58
#11	-52.42	-13.46
#12	36.29	-17.94

5. ビーム運転

5.1 RF 電子銃のビーム運転

ビーム運転期間中に、RF 電子銃の高周波系に関連して発報したインターロックについて、グラフにプロットしたものを Fig. 7 に示す。縦軸は RF 出力、横軸は左から発報した順である。期間中のインターロック発報回数は 395 回で、そのうち導波管内放電は 1 回と、ほとんど発生しなかった。これは、導波管路の二分分割化が効果的に機能していたことを示している。322 回発報した全反射インターロックは、空洞内の真空悪化に伴う全反射 RF を検出し、高速で RF を遮断することにより、真空悪化している空洞に次の RF パルスを入力して、更に真空悪化させることを防いでいたものである。全反射 RF 検出時のオンシロスコプの波形を Fig. 8 に示す。

5.2 キャプチャーライオモジュールのビーム運転

ビーム運転期間中に、キャプチャーライオモジュールの高周波系に関連して発報したインターロックについて、グラフにプロットしたものを Fig. 9 に示す。縦軸は RF 出力、横軸は左から発報した順である。全発報回数 65 回のうち、デジタル系上限リミットの発報が 26 回あった。ビーム運転終了後、CCM2 入口近くの導波管フランジ面に放電痕が見つかった (Fig. 10)。ビーム運転中にこの部分で放電が発生し、デジタル系上限リミットが発報していた可能性がある。

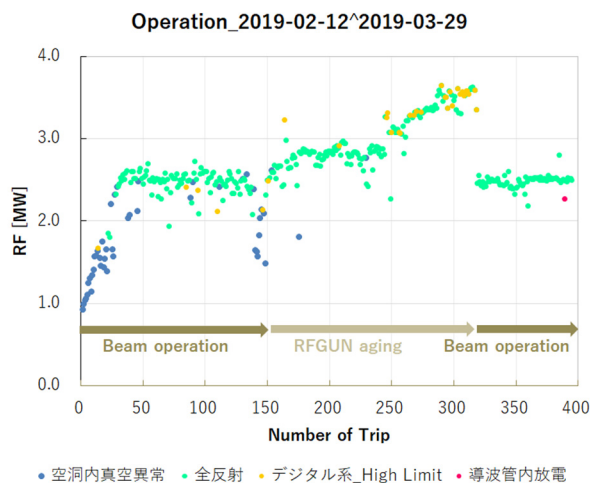


Figure 7: RF GUN interlock history.

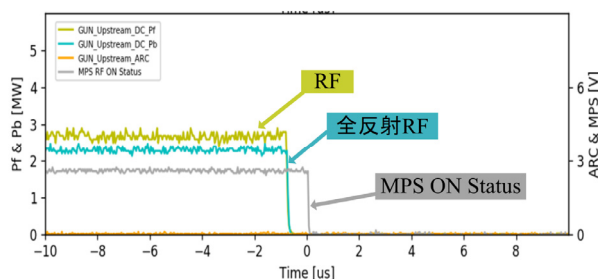


Figure 8: Waveform that detected reflected RF.

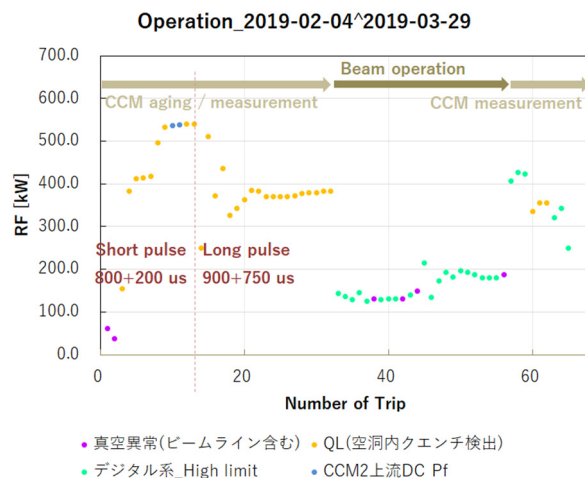


Figure 9: CCM interlock history.

5.3 クライオモジュールのビーム運転

ビーム運転期間中に、クライオモジュールの高周波系に関連して発報したインターロックについて、グラフにプロットしたものを Fig. 11 に示す。縦軸は RF 出力、横軸は左から発報した順である。運転開始当初、クライストロンの RF 出口付近に取付けたアークセンサーが計 14 回の発報を繰り返す、導波管内放電が発生している可能性が

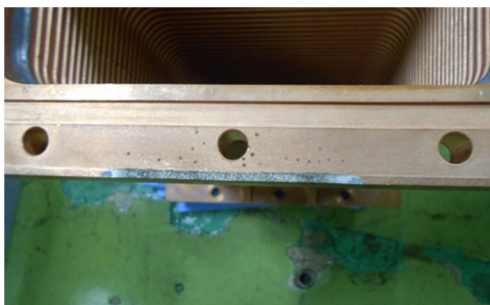


Figure 10: Discharge mark on flange of CCM2 line.

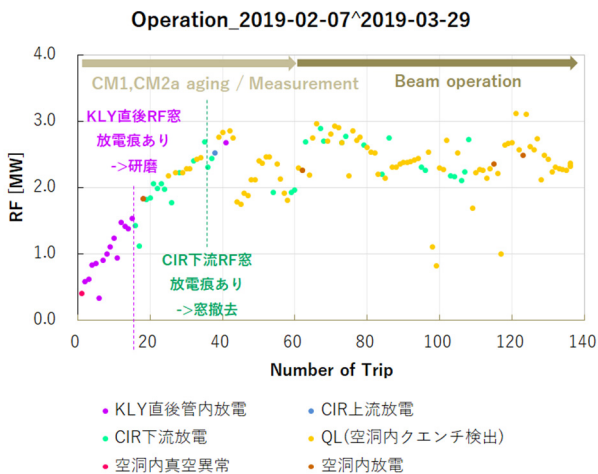


Figure 11: RF CM1 CM2a interlock history.

あったため調査を実施したところ、クライストロン本体の導波管取り付けフランジに放電痕が見つかった (Fig. 12)。このフランジはクライストロンと一体で交換不可能なため、スコッチブライトを使用して手作業で研磨を行い、研磨後、圧力シートを用いてフランジ面の健全性を確認したところ、放電は収まった。ビーム運転中のインターロック発報は 135 回で、このうち導波管内放電が 33 回あった。これは、クライストロンの出口から 3dB ハイブリッドで分配されるまでの間、導波管は 1 系統であるのに対し、RF の入力レベルが 2~3 MW とやや高いことが一因となっている可能性がある。今後 ILC の実現に向け、導波管路の見直し等の対策を、適宜行っていく。尚、CM1 の Cavity#4 は機械チューナーの動作不良のため、ビーム運転には使用しなかった。

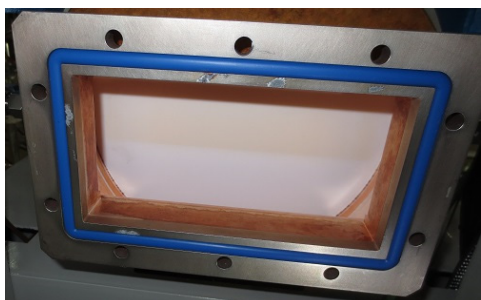


Figure 12: Discharge mark on flange of MBK.

6. まとめ

STF2 加速器の運転に向けて構築してきた RF 出力分配系、モニター系及びインターロック系は、おおむね適切に機能したものと考えている。今後も ILC 実現を視野に入れた加速器の運転計画に応じて、導波管路、モニター系及びインターロック系の適宜アップデートを行う。

参考文献

- [1] N. Numata *et al.*, “Construction of RF System for RF Gun Operation at KEK-STF”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, THP059.
- [2] M. Egi *et al.*, “RF Power Distribution System for STF2 at KEK”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016, TUP037.