

STF2 クライオモジュールにおけるインプットカップラーの RF コンディショニング RF CONDITIONING OF INPUT COUPLERS IN STF2 CRYOMODULE

柳町太亮^{#,A)}, 浅野峰行^{A)}, 今田信一^{A)}, 山田浩気^{A)}, 岡田昭和^{B)},
宋戸寿郎^{C)}, 山本康史^{C)}, 加古永治^{C)},

Taisuke Yanagimachi^{#,A)}, Mineyuki Asano^{A)}, Shin-ichi Imada^{A)}, Hiroki Yamada^{A)}, Terukazu Okada^{B)}

Toshio Shishido^{C)}, Yasuchika Yamamoto^{C)} and Eiji Kako^{C)}

^{A)} Nippon Advanced Technology

^{B)} K-vac

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

Cryomodule-1 including eight 9-cell superconducting cavities (CM1) and Cryomodule-2a including four 9-cell superconducting cavities (CM2a) were constructed for STF2 project in KEK-STF. The cool-down tests and high power RF tests were successfully carried out. The RF conditioning procedures at room temperature of twelve input couplers mounted in CM1 and CM2a are reported in this paper.

1. 緒言

KEK-STF では、ILC 仕様のクライオモジュールを建設し、ビームの安定運転実証を行う STF2 計画が進められている。STF 地下トンネル内に 1.3GHz、9セル超伝導空洞(以後空洞)8 台を連結し内蔵する CM1 および空洞 4 台を連結し内蔵する CM2a の設置を完了した。冷却試験ならびに空洞単体における大電力 RF 試験は 2015 年に終了している。本報告では、大電力 RF 試験の事前準備として行ったインプットカップラー単体ごとの室温における RF コンディショニングについて述べる。

2. インプットカップラー

インプットカップラーは、空洞に加速電界を発生させるための高周波電力を供給する同軸型のアンテナである。Table 1 に主な仕様を、Figure 1 に STF2 インプットカップラーの概略図を示す。ILC では、パルス運転であるため高周波損失による発熱に対する強制冷却は必要ではないが、外部からの熱侵入を減らすために 80K と 5K にサーマルアンカーが外導体に取り付け可能になっている。空洞に直接取り付けられるため、低温部に高周波窓が置かれる。また、対流による熱侵入を防ぐためにもう一つ高周波窓が室温部に置かれ、2 重構造となっている。高周波窓間も排気ポートから低温部とは別の排気装置により真空引きされる。高周波窓は、熱伝導率、熱応力、誘電率や純度等を考慮し、セラミックスが材料に用いられている。

Table 1: Specifications of Input Coupler

Frequency	1.3 GHz
Pulsed RF Power	450 kW
RF pulse length / rep. rate	1.5 ms / 5 Hz
Qext range	4~8×10 ⁶

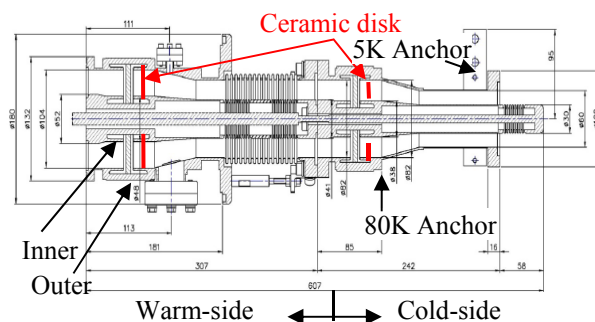


Figure 1: Schematic drawing of an STF2 input coupler.

供給される RF パワーを効率よく導入するために電気抵抗を低くしたい。また外部からの熱侵入による冷却効率の悪化を防ぐために、熱伝導率は低いことが望ましい。電気伝導率と熱伝導率は比例関係にあるため、この相反する特性を得るために薄肉ステンレスに銅メッキを施している。今回は、異なる銅メッキ膜厚および下地メッキを金とニッケルのものを数種類用意し、3 パターンの組み合わせにした。Table 2 に各インプットカップラーにおける銅メッキ膜厚を示す。また、同表に下地メッキの種類を示す。(*=金、なし=ニッケル)

Table 2: Thickness of Copper Plating: (*) Gold Strike Plating, (nothing) Nickel Strike Plating

Coupler no.	Cold side		Warm side	
	Inner [μm]	outer [μm]	Inner [μm]	outer [μm]
No.11&12	20	3*	10	10
No.13&14	20	3*	10	10
No.15&16	20	5*	20	20
No.17&18	20	5*	20	20
No.21&22	25*	10*	25*	25
No.23&24	25*	10*	25*	25

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

3. RF コンディショニング

3.1 RF コンディショニング

RF パワーを供給したときにインプットカップラーからの放出ガスにより真空が悪化する。このため空洞の大電力 RF 試験前にインプットカップラーの RF コンディショニングを行い、真空悪化を改善しておくことが重要である。今回の RF コンディショニングは室温で行う。800kW クライストロンから導波管を用いてインプットカップラー単体に接続し RF パワー(周波数:1.3GHz、繰り返し数:5Hz)を供給する。空洞に RF パワーが入力されず全反射になるよう空洞の共振周波数を 1.3GHz からはずれるようにしておく。Table 3 に RF コンディショニングにおけるパルス幅と RF パワーの目標値を示す。パルス幅は 20 μ sec、100 μ sec、500 μ sec、1500 μ sec の順番で行う。真空の悪化に気を付けながら慎重に RF パワーを上げ、目標値まで到達したら次のパルス幅へ変更する。パルス幅を広くしたら、また最下限の RF パワーから徐々に上げていく。この繰り返しで最大パルス幅まで RF コンディショニングを行う。500 μ sec、1500 μ sec は、目標値で 30 分間 RF パワーを保持した。Table 4 に空洞真空、インプットカップラーの真空に対するインターロックレベルを示す。真空悪化がみられるまでは、レベルを start の値で厳しく設定した。真空悪化が起こった後は、より高い RF パワーを入力できるようにインターロックレベルを End の値に設定した。

Table 3: Conditioning Results in High Power Tests (Frequency: 1.3GHz, Repetition rate: 5Hz)

Pulse width [μ sec]	20	100	500	1500
Power max. [kW]	300	300	300	100
Keep time at P _{max} [hour]	-	-	0.5	0.5

Table 4: Interlock Levels of Vacuum Pressure during RF Conditioning

	Start / End
Cavity vacuum at CM1 [Pa]	7×10^{-7} / 1×10^{-5}
Coupler vacuum at CM1 [Pa]	4×10^{-6} / 2×10^{-4}
Cavity vacuum at CM2a [Pa]	3×10^{-7} / 1×10^{-5}
Coupler vacuum at CM2a [Pa]	3×10^{-6} / 2×10^{-4}

3.2 RF コンディショニングの過程

RF コンディショニングの過程について、coupler no.12 (cavity:MHI-15)を例として説明する。Figure 2.1, 2.2 に RF パワーと真空の変化を、Figure 3.1, 3.2 に RF パワーと温度変化を示す。ゆっくりと RF パワーを上昇させていくと、①、②に示すパワーで真空が悪化する。それ以降は、低い RF パワーから真空悪化がみられるようになり、時間経過とともに改善されていく。最初のパルス幅では RF パワーを上げた時の真空悪化が激しく、慎重に時間をかけて RF コンディショニングを行うことが重要である。最初の短いパルス幅で時間をかけることによって、それ以降のパルス幅では時間を要しない。RF コンディショニング中の温度上昇は 80K anchor と 80K blade でみられ、

パルス幅が広いときにより大きい。この二か所で大きく温度上昇がみられるのは、80K anchor の内部構造にセラミックス窓があり、そこが発熱の原因となっているためである。80K blade はサーマルアンカーと接続されている部分であり、80K anchor からの熱伝導で上昇している。

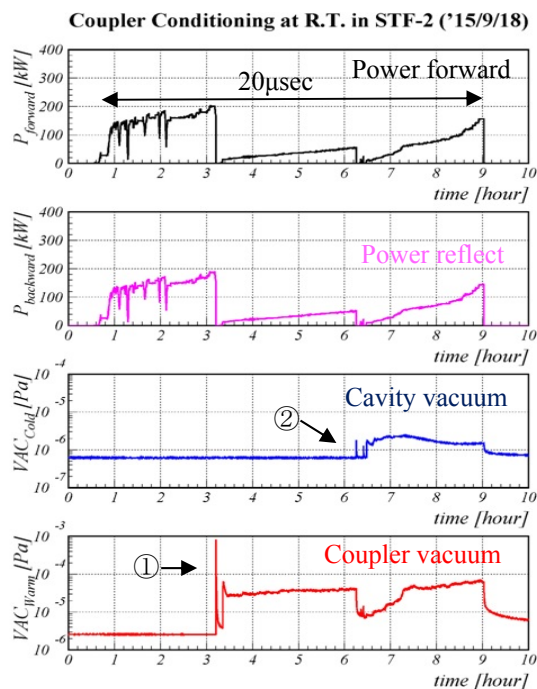


Figure 2.1: Conditioning results of coupler no.12 in the first day.

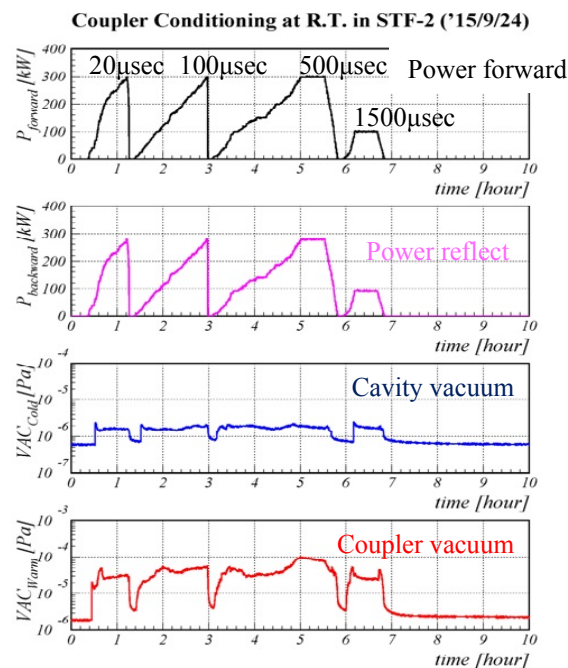


Figure 2.2: Conditioning results of coupler no.12 in the second day.

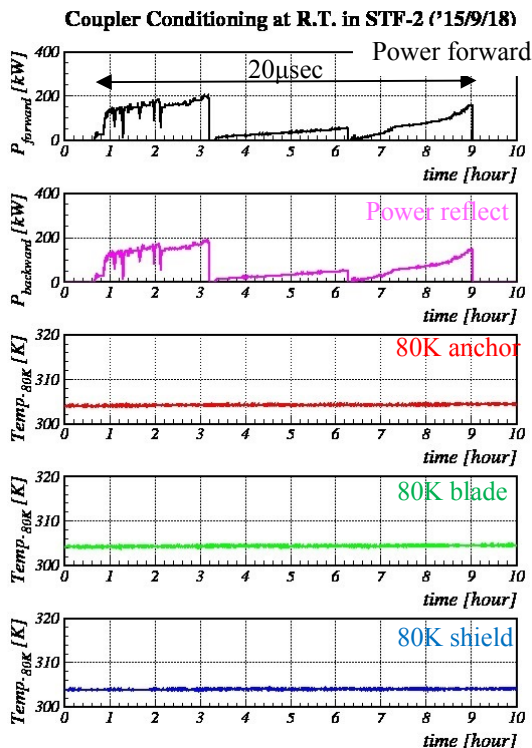


Figure 3.1: Conditioning results of coupler no.12 in the first day.

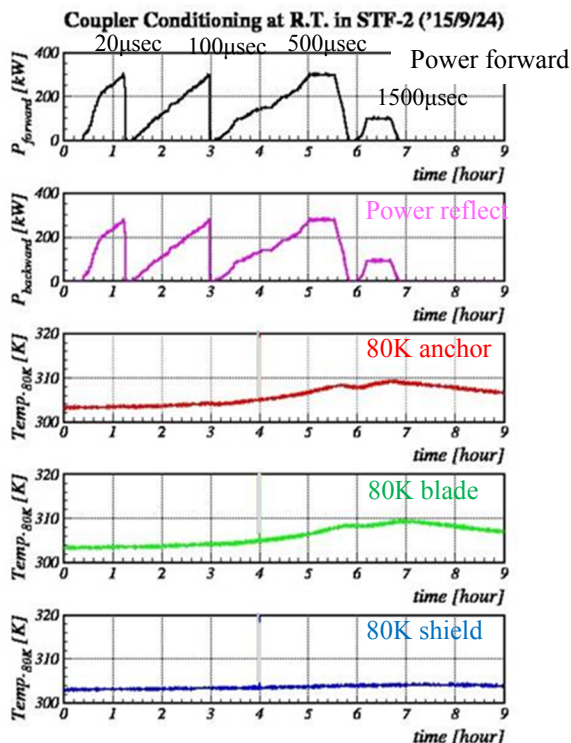


Figure 3.2: Conditioning results of coupler no.12 in the second day.

3.3 RF コンディショニングの結果まとめ

各インプットカップラーにおける Table 3 に示した Power max.まで到達する RF コンディショニング時間を Table 5.1, 5.2, 5.3 および Figure 4 に示す。すべてのインプットカップラーにおいて、はじめのパルス幅 20µsec で最も RF コンディショニング時間を要し、Total の約 7 割を占めている。それ以降の 100µsec、500µsec、1500µsec では短い時間で目標値の RF パワーに到達できた。Table 2 に示す Coupler no.11~14, Coupler no.15~18, Coupler no.21~24 の 3 パターンの組み合わせごとに、RF コンディショニングを終了するまでに要した時間を平均すると、Coupler no.11~14 は 16.4 時間、Coupler no.15~18 は 16 時間、Coupler no.21~24 は 23.5 時間である。これらの平均時間でみると、Coupler no.21~24 は時間がかかっているように見えるが、Coupler no.11, 13, 15, 17 を平均すると 20 時間であり、Table 2 に示した各々のメッキ処理では RF コンディショニング時間の差は大きくはないと考えられる。

Table 5.1: Conditioning Time Up to Maximum Power Level in Coupler No. 11 ~ 14 (CM1)

Cavity no.	14	15	17	18
Coupler no.	11	12	13	14
20 [µsec]	14.0	9.3	9.8	7.8
100[µsec]	3.0	1.6	3.7	2.0
500[µsec]	3.0	2.0	4.9	2.0
1500[µsec]	0.60	0.28	0.87	0.55
Total	20.6	13.1	19.2	12.4

Table 5.2: Conditioning Time Up to Maximum Power Level in Coupler No. 15 ~ 18 (CM1)

Cavity no.	19	20	21	22
Coupler no.	15	16	17	18
20 [µsec]	12.8	6.0	15.7	8.5
100[µsec]	2.9	2.0	2.6	3.0
500[µsec]	3.9	2.2	2.5	1.5
1500[µsec]	0.03	0.07	0.07	0.08
Total	19.6	10.3	20.9	13.0

Table 5.3: Conditioning Time Up to Maximum Power Level in Coupler No. 21 ~ 24 (CM2a)

Cavity no.	23	24	25	26
Coupler no.	21	22	23	24
20 [µsec]	19.6	15.7	14.2	21.8
100[µsec]	2.2	2.6	2.6	3.5
500[µsec]	2.1	2.6	3.2	2.4
1500[µsec]	0.18	0.28	0.52	0.60
Total	24.1	21.1	20.5	28.3

Figure 5 にパルス幅が 1500 μ sec の時の各インプットカップラーにおける RF コンディショニング中の温度上昇を示す。温度上昇が大きくみられたのは 80K Anchor と 80K Blade であった。今回の RF コンディショニングでは目標値の RF パワーを保持した時間が 30 分程度で温度上昇の最大をむかえ、最大で Coupler no. 21 の 7K で、全体的に 5K 前後が多くみられた。80K Anchor での温度上りはセンサー付けている付近にセラミックス窓があり、そこが原因となって発熱しているためだと考えられる。80K Blade も同様に高いのは熱伝導によって 80K Blade がついているアンカーが 80K Anchor がついている部分より温められたためである。Figure 5 と Table 2 より同じメッキパターンでも 80K Anchor および Blade の温度上昇にばらつきがあり、5K 前後の上昇が同様にみられるため、メッキ処理による温度上昇に大きな差はないと考えられる。

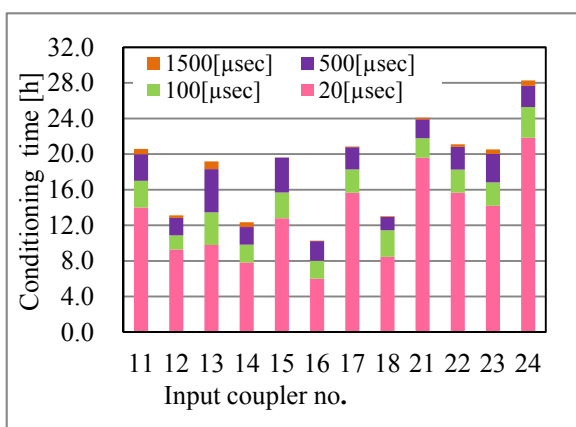


Figure 4: Summary of conditioning time up to maximum power level in Coupler no. 11~18(CM1), 21~24(CM2a).

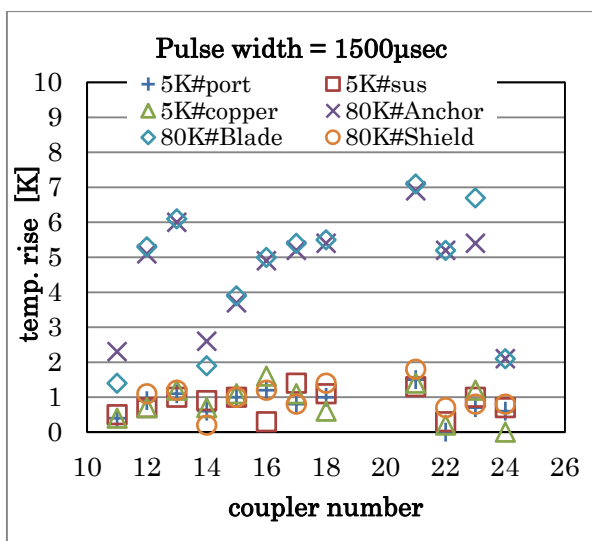


Figure 5: Temperature rises during conditioning with pulse width of 1500 μ sec in coupler no. 11~18(CM1), 21~24 (CM2a).

4. 結言

KEK-STF の地下トンネルに ILC 仕様のクライオモジュールである CM1 および CM2a の設置が完了した。冷却後の低温での大電力 RF 試験をする前に各空洞に取り付けられているインプットカップラーの RF コンディショニングを室温で単体ごとに行った。

単体の RF コンディショニング終了までにかかった平均時間は CM1 が約 16 時間、CM2a が約 24 時間であった。平均時間のパルス幅 (20 μ sec、100 μ sec、500 μ sec、1500 μ sec) の割合は、20 μ sec が 7 割を占め、それ以降では RF コンディショニング時間がかからなかった。RF パワーの上昇に伴って真空が悪化するため、慎重に RF パワーを上げていくことが重要である。RF コンディショニング中のインプットカップラーの温度はセラミックス窓がある 80K サーマルアンカー部分が高かった。CM1 と CM2a のインプットカップラーに施したメッキ処理の範囲では、RF コンディショニングの時間および温度上昇に大きな差は見られなかった。今後は、2K へ冷却後に複数台の空洞に同時に大電力 RF を供給し、大電力 RF 試験を行う予定である。

参考文献

- [1] Eiji Kako, "Development of Superconducting Cavities for ILC", CSSJ vol.48 No.8 (2013).
- [2] Hiroaki Umezawa, "Measurements of RRR and thickness on thin Cu-plating used for input coupler in superconducting cavities", PASJ10 (2010) SAP053.
- [3] Taisuke Yanagimachi, "High power tests of input couplers at test-stand for STF2 cryomodule", PASJ11 (2011) SAP048.
- [4] Sinichi Imada, "Assembly procedure of input couplers for STF2 cryomodule", PASJ11 (2011) SUP041.
- [5] Okada Terukazu, "String Assembly of 9-cell SC cavities for STF2 CM1 and CM2a cryomodules", PASJ11 (2011) SUP046.
- [6] Yasuchika Yamamoto, "ILC に向けた STF Phase-2 計画の進展", HIGH ENERGY NEWS (2016) Volume 34 Number 4, p277-286.