

ILCのためのSTFタイプ入力結合器に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDIES FOR THE STF-TYPE POWER COUPLER FOR ILC

山本康史^{#A)}, 加古永治^{A)}, 松本利広^{A)}, 道園真一郎^{A)}, 山本明^{A)}, 石橋誠^{B)}, 入倉正男^{B)}, 安武浩人^{B)}
Yasuchika Yamamoto^{#A)}, Eiji Kako^{A)}, Toshihiro Matsumoto^{A)}, Shinichiro Michizono^{A)}, Akira Yamamoto^{A)},
M. Irikura^{B)}, M. Ishibashi^{B)}, H. Yasutake^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} TOSHIBA ELECTRON TUBES & DEVICES Co., Ltd.

Abstract

From the view point of mass-production for the power coupler in ILC (International Linear Collider), the fundamental studies for the STF-type power coupler are under progress by the collaboration between KEK and TETD. At present, there are various rinsing procedures for power coupler in the world-wide laboratories. In this R&D, the main topic is to investigate the various rinsing effects in the copper plating and the ceramic through the high power test. In this paper, the first results will be presented.

1. はじめに

近年、超伝導高周波技術が用いられる加速器においては数百台もの超伝導空洞が用いられる加速器が世界標準になっている。たとえば、European Free Electron Laser (E-XFEL)計画[1]では800台、Linac Coherent Light Source II (LCLS-II)計画[2]では300台、European Spallation Source (ESS)計画[3]では100台、などとなっている。当然のことながら、空洞の台数と入力結合器の台数は同数かそれ以上であり、そのため空洞の品質管理と共に入力結合器の品質管理も問題となっている。実際に、E-XFELでは空洞関連のトラブルよりも入力結合器関連のトラブルの方が数多く報告されており[4]、計画全体の進捗を妨げる一要因となっている。入力結合器の品質管理という点では、銅鍍金、セラミックの品質、窒化チタンコーティング(Titanium-Nitride (TiN) coating)、洗浄方法、などが挙げられる。本研究では、世界の研究所で行われている様々な洗浄法について、テストピースを用いた実験によりその効果を調べることを第一目的とする。

2. テストピースの製作

Figure 1 に示してあるものは銅鍍金およびセラミックのテストピースである。数量はいずれも20個ずつである。各スペックは以下のとおりである。

Copper plating sample

- Substrate: SUS316L
- Size: 50 mm x 100 mm x 5 mm
- Thickness of copper plating: 25 μm
- Base plating: Gold strike
- Copper plating: Pyrophosphate

銅鍍金テストピースの#7から#9を製造中、前処理の不具合が発生し、完成品の品質が突然下がってしまった。そのため、不良の銅鍍金を一旦削り取った上で、別の処理ラインを用いて再処理を行った。#10以降は始めから別

のラインで処理を行ったため、特に問題は発生しなかった。#6以前のテストピースには前処理の不具合の影響が残っていると考えられたが、工程品質の影響を確認するため、外観に問題のないものは受け入れることにした。

Ceramic sample

- Purity: 95%
- Size: 19 mm (diameter) x 3mm (thickness)
- Relative permittivity: 8.8 @10GHz
- Dielectric loss tangent: 6×10^{-4} @10GHz
- Resistivity: $>10^{12} \Omega \cdot \text{m}$

セラミックサンプルはこれまで STF-2 のクライオモジュール試験にて用いられてきた入力結合器に使われているセラミックと同様のものである[5]。

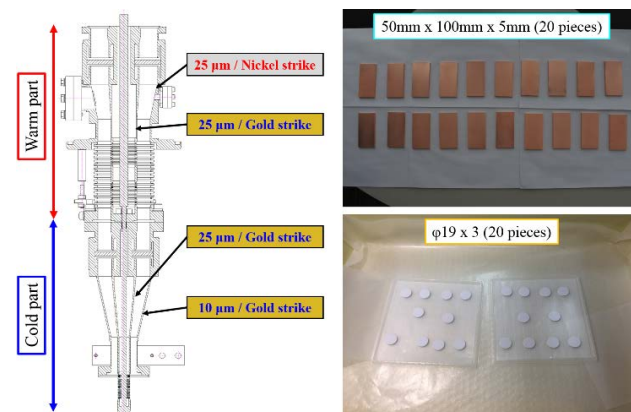


Figure 1: Plug-compatible STF-type power coupler (left), and the test pieces for the copper plating and the ceramic.

3. 銅鍍金を用いた基礎的研究

現在、世界の研究所で用いられている入力結合器の洗浄法としては、主に以下の3種類がある。

- 超純水洗浄; STF
- 超音波洗浄; E-XFEL, ESS
- オゾン水洗浄; Super-KEKB

[#] yasuchika.yamamoto@kek.jp

3.1 熱処理

完成した銅鍍金テストピースは、入力結合器の製造工程を再現させるために、セラミックのロウ付け条件である800°Cで30分の熱処理にかけられた(Figure 2の上写真)。熱処理後の銅鍍金表面を調べたところ、Figure 2中央に示したような多数の熱膨れ(blisters)が端の領域に集中して現れた。熱膨れが発生したテストピースは#2と#4で、

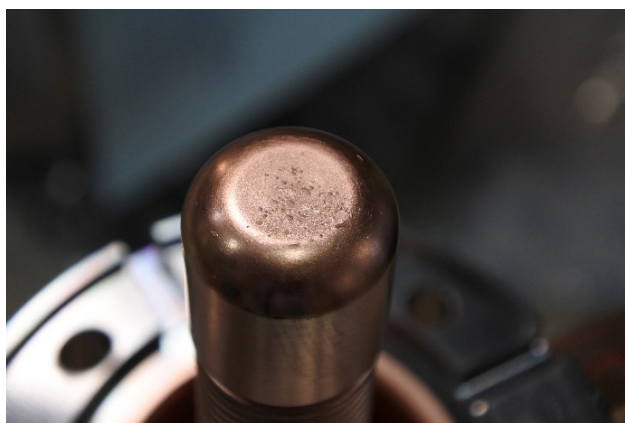
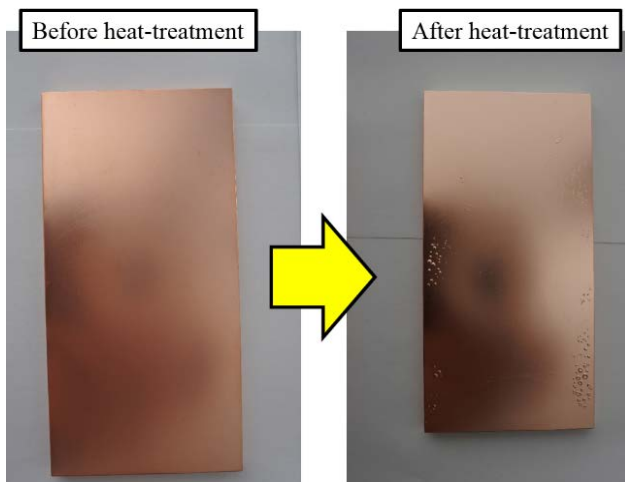
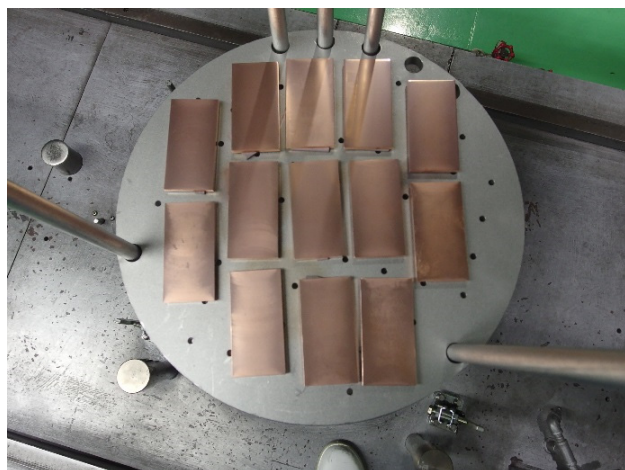


Figure 2: Plug-compatible STF-type power coupler (left), and the test pieces for the copper plating and the ceramic (right).

受け入れ検査では異常は見られなかったものの、銅鍍金処理に不具合が発生したと考えられるものであった。別のラインで処理したテストピースには異常は見られなかった。また、これらの熱膨れは Plug-compatible 設計による STF タイプ入力結合器の Cold #1 の内導体先端部に見られたものと同様であった(Figure 2の下写真)[6]。原因としては、おそらくは銅鍍金処理中に発生した水素ガスが表面に残留しており、それが熱処理中に膨張したことで、銅鍍金表面に熱膨れを発生させたものと考えられる。しかしながら、完成後の受け入れ検査の段階でこの種の銅鍍金不良を見抜くのは非常に難しく、各工程の品質管理が如何に重要で、かつ難しいかを感じさせる結果であった。

3.2 超音波洗浄の研究

銅鍍金テストピースに対する超音波洗浄の試験は、Table 1に示したように超音波の出力レベルを120Wから1200Wまで4段階で上げていくことで行われた。各段階での銅鍍金表面は、デジタル顕微鏡(MIYOSHI UK-03)を用いて観察された。最後の超音波洗浄では、水泡を減らし、超音波出力を約1.5倍に上げる効果をもつ Water Resonant System (WRS)が用いられた。最後の洗浄前までは表面に何の変化も見られなかったが、最後の洗浄後は熱膨れがあったテストピース#2の熱膨れ部から銅鍍金の剥離が発生した。また、テストピース#4の表面には損傷を受けたものと考えられる白痕が二カ所に発生した。これら一連の試験の様子を Figure 3に示す。以上の結果は、超音波洗浄が(特に高い出力レベルにおいて)不具合のある銅鍍金に対して損傷を与える可能性がある、ということを示唆する。同様の試験を Cold #1 に行くと、先端の熱膨れが剥がれ落ちる可能性があるということである。

Table 1: Condition of the Study for USR

# of USR	Power level	Rinsing time	WRS
1 st rinsing	120 W	30 min.	w/o
2 nd rinsing	360 W	30 min.	w/o
3 rd rinsing	1200 W	30 min.	w/o
4 th rinsing	1200 W	30 min.	w/

3.3 テストピース#2に関する剥離試験

1回目と3回目の超音波洗浄の試験の間に、いくつかのテープを用いた剥離試験を行った。そのスペックは Table 2に示したとおりであるが、テストピース#2の熱膨れ部がどれほどの密着性を有しているかを調べるのが目的である。日本ではこの種の剥離試験を行う際、Japanese Industrial Standard (JIS H 8504:1999)で定められた方法を用いるのが一般的である。Table 2にある CELLOTAPE No. 405がJISに最も近い粘着力を有していることがわかる。剥離試験の方法としては、Figure 4に示したように、まず熱膨れ部にテープを貼り、10秒間待ち、その後垂直方向に引きはがす、という流れで行った。

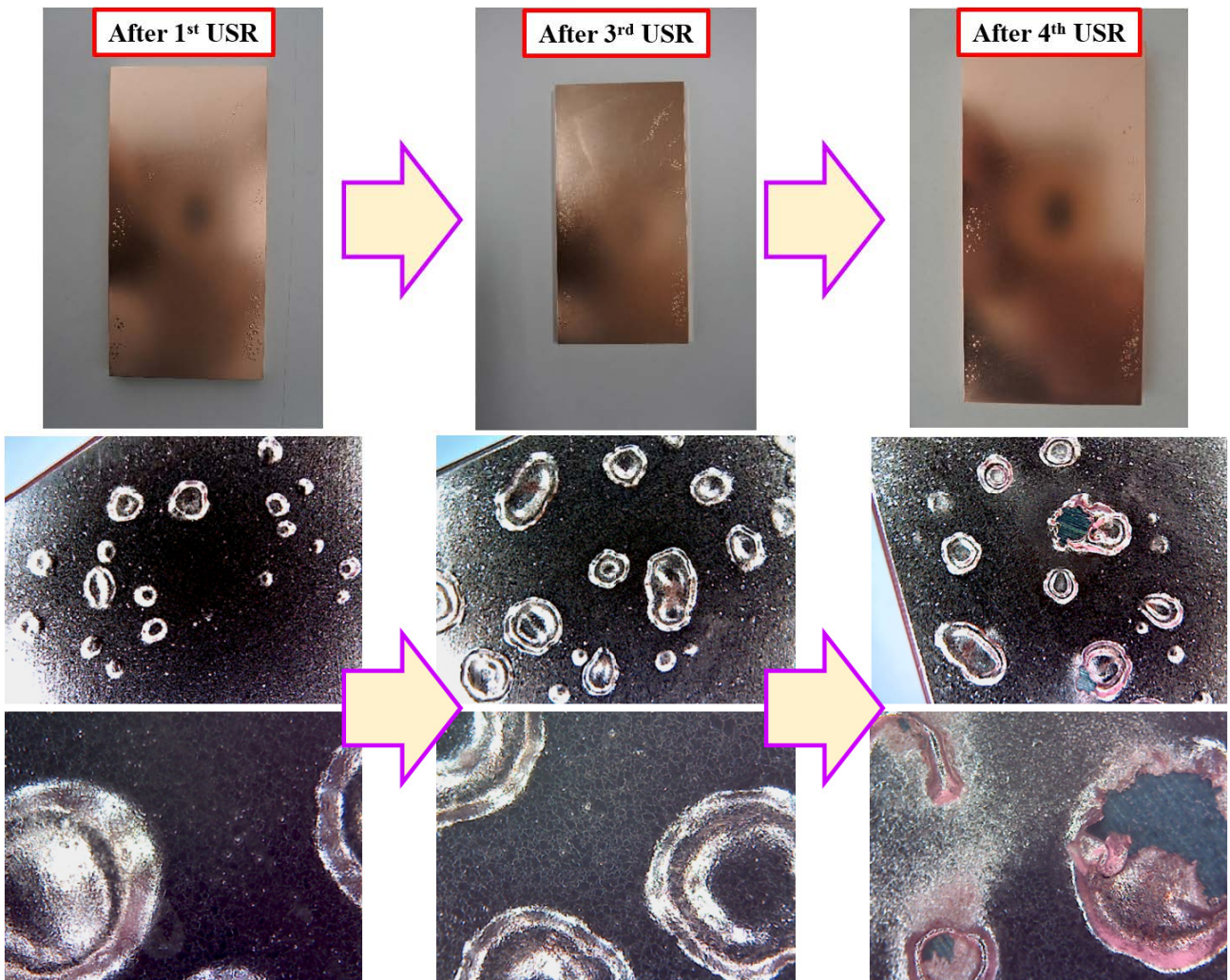


Figure 3: Change of the surface for test piece #2 in the study of the ultrasonic rinsing. After the heat treatment, many blisters appeared, not changed after the 3rd ultrasonic rinsing (left and center), however, in the last rinsing, blisters were partly peeled off (right).

剥離試験は、粘着力の小さい方から行われ、最後の剥離試験後も表面にはいかなる変化も観測されなかった。このことから、銅鍍金の熱膨れは意外に頑丈な構造を有することがわかった。

3.4 オゾン水洗浄の研究

オゾン水洗浄は、KEKB 用の入力結合器のために長年に亘り用いられてきた洗浄法である[7]。今回のオゾン水洗浄試験ではテストピース#10、#11、#12が用いられた。その洗浄条件は以下の通りである。

- Concentration: 7~8 ppm
- Rinsing time: 20~30 sec
- Flow rate: 2 l/min

Figure 5 に示した方法でオゾン水洗浄を行ったところ、銅鍍金表面には剥離や変色などは観測されず、オゾン水洗浄では特に損傷を与える危険性はないものと判断された。

Table 2: Specifications for JIS and Each Tape

Content	Tape width	Adhesion strength
JIS		8 N / 25 mm
3M #244	18 mm	2.7 N / 25 mm
CELLOTAPE No. 405	15 mm	9.8 N / 25 mm
3M #2525	18 mm	18.8 N / 25 mm



Figure 4: Three kinds of tape used for the peeling test.



Figure 5: Ozonized water rinsing for the test piece of the copper plating.

Test piece #	As delivered	After 800°C heat-treatment	After 1 st USR (120W, 30min, w/o WRS)	After 2 nd USR (360W, 30min, w/o WRS)	After 3 rd USR (1.2kW, 30min, w/o WRS)	After 4 th USR (1.2kW, 30min, w/ WRS)
1	Storage					
2		Blister	No change	No change	No change	Partly peeled, white-colored
3			No change	No change	No change	No change
4		Blister	No change	No change	No change	Partly white-colored
5	Storage					
6			No change			
7	Good gloss	No change	No change			
8	Good gloss	No change	No change			
9	Good gloss	No change	No change	No change	No change	No change
Test piece #	As delivered	After 800°C heat-treatment	After O ₃ rinsing (30sec)			
10		No change	No change			
11		No change	No change			
12		No change	No change			

Figure 6: Summary of study for copper plating samples. Test pieces #1 ~ #6 (Yellow) experienced the malfunctioning in the pre-cleaning process. Test pieces #7 ~ #9 (Light blue) experienced grinding the “No good” copper plating surface, and was processed by another line. Test pieces #10 ~ #12 (Purple) was processed by another line.

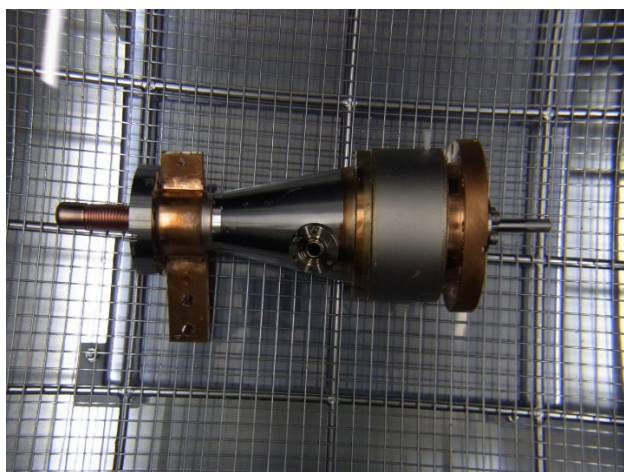


Figure 7: Ultrasonic rinsing for the plug-compatible STF-type power coupler by the same condition as the first rinsing for the copper plating samples.

Figure 6 は一連の銅鍍金テストピースを用いた試験のまとめである。重要な点は、銅鍍金のための前処理の不具合が後の工程に悪影響を及ぼす可能性がある、ということである。

4. カプラの超音波洗浄と大電力試験

銅鍍金のテストピースを用いた一連の調査の後、plug-compatible 設計の STF タイプ入力結合器に対して超音波洗浄が試みられた。Figure 7 は超音波洗浄を行っている様子である。図のように1本ずつ実施された。Cold #1 の先端部に見られた熱膨れには特に変化は見られなかった。Table 3 に各研究所で実施されている超音波洗浄の条件をまとめておく。表にあるように STF の条件は一番低いものである。

Table 3: Comparison of Ultrasonic Rinsing Procedures in Various SRF Projects [8, 9]

Content	STF	E-XFEL	ESS
Power [W]	120	2000	3000
Power per liter [W/ℓ]	2.6	10	8
Frequency [kHz]	38	35	25
Water temperature [°C]	~25	50	50
Detergent	none	Tickopur R33 (2.5%)	Tickopur R33 (2.75%)
Time duration [min]	30	15	10
Bath size [ℓ]	468		375

超音波洗浄後、2 本の入力結合器は大電力試験用テストスタンドに 2016 年の場合と同様に組み込まれた[6]。低電力・大電力試験のプロセスもほとんど同じに実施し

た。ただし、諸々の事情によりパルス幅の条件が多少異なっている。Figure 8 は超純水洗浄を行った 2016 年と超音波洗浄を行った 2017 年の入力結合器の RF conditioning の実施時間の比較を示す。2017 年のパルス幅 500 μ sec のところで、2016 年よりも経過時間が長くなっているのは真空悪化によりなかなかパワーがあげられなかったことによる。

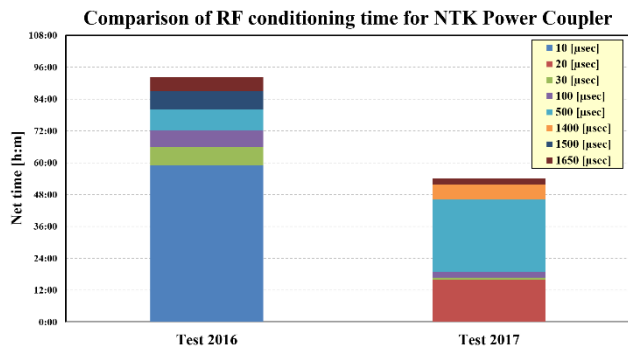
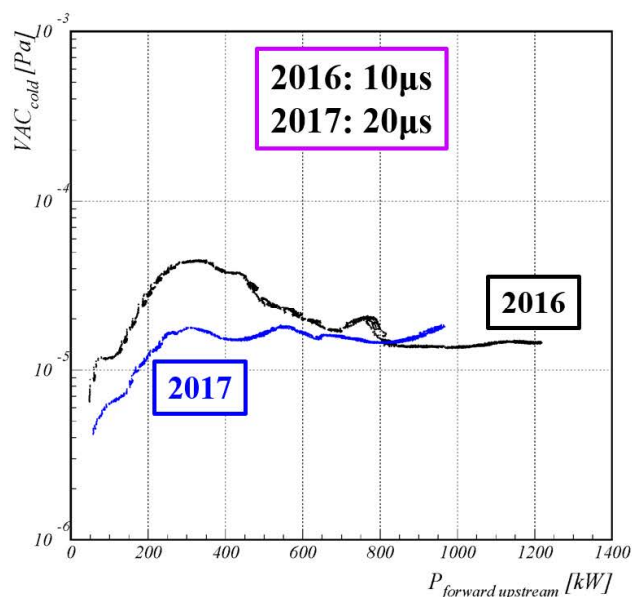


Figure 8: Comparison of the RF conditioning time between the ultrapure water rinsing in 2016 and the ultrasonic rinsing in 2017 for the plug-compatible STF-type power coupler.

Figure 9 は入力パワーと Cold 部真空圧力の相関図を示す。左が 10-20 μ s のパルス幅における比較で、右が 500 μ s の時の比較である。これらの図を見ると、超音波洗浄を行った 2017 年の方の真空圧力が下がっており、超音波洗浄の効果があったことがわかる。一方、Warm 部真空圧力は 2016 年とほぼ同じ結果であった。最近、コーティングをしていないセラミックを用いた別の入力結合器でも同様の試験を行ったところ、真空圧力の低下とともに電子出力レベルも下がっており、やはり超音波洗浄の効



果があったことが判明した。これらの結果は別の会議で発表予定である。

5. まとめと今後の予定

超音波洗浄自体は銅鍍金に対し、損傷を与えることはないものの、銅鍍金に元々不具合があった場合には、剥離や変色が発生する恐れがあることがわかった。銅鍍金の過程に不具合が発生した場合は、その後の工程に悪影響を及ぼす可能性がある。入力結合器に超音波洗浄を行うと、真空圧力や電子出力が下がり、コンディショニングがスムーズに進むことがわかった。

最後に今後の予定を述べると、入力結合器を用いた超音波洗浄の試験は、Warm 部に対しても行い、また超音波出力を上げて行うことも予定している。最終的には、E-XFEL の条件を目指す予定である。KEKB でも試されてきたオゾン水洗浄も試す予定である。また、今回の発表には間に合わなかったが、セラミックサンプルの二次電子放出係数を測定することで、様々な洗浄効果を定量的に調べる予定である。セラミックサンプルは、コーティング有りと無しが二種類が用意されている。

謝辞

Special thanks are given to E. Montesinos (CERN) for the rental of the auto-conditioning and vacuum distributor modules in the high power test of the power couplers; H. Sakai in ARES Group in Super-KEKB for the use of the ozonized water rinsing machine; T. Okada (K-VAC) and S. Imada (NAT) for the assembly work in the clean room, the pumping/baking, and the low power test; N. Hanaka, K. Ishimoto, and N. Numata (NAT) for the maintenance of HLRF system; A. Hayakawa (KIS) for the maintenance of

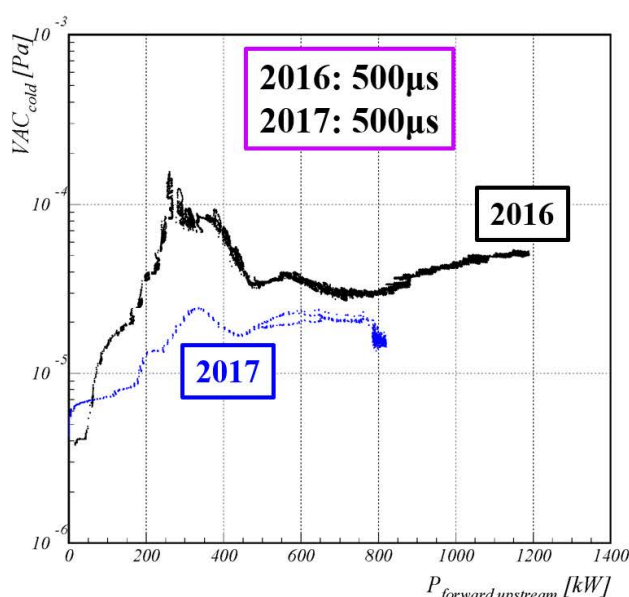


Figure 9: Comparison of the vacuum level in the cold part during the high power test between 2016 and 2017. Left; Result of the short pulse width (10 μ sec in 2016, and 20 μ sec in 2017). Right; Result of the long pulse width (500 μ sec in 2016 and 2017).

operation and monitoring system for the high power test bench.

参考文献

- [1] E-XFEL; <http://www.xfel.eu/>
- [2] LCLS-II; https://portal.slac.stanford.edu/sites/lcls_public/lcls_ii/Pages/default.aspx
- [3] ESS; <https://europenspallationsource.se/>
- [4] D. Kostin and W. Kaabi, World Wide Fundamental Power Coupler meeting #3; <https://indico.cern.ch/event/642503/>
- [5] Y. Yamamoto *et al.*, “Achievement of Stable Pulsed Operation at 36 MV/m in STF-2 Cryomodule at KEK”, THYA02, SRF2017, Lanzhou, China.
- [6] Y. Yamamoto *et al.*, “High Power Test for Plug-compatible STF-type Power Coupler for ILC”, MOPB064, SRF2017, Lanzhou, China.
- [7] Y. Kijima *et al.*, “Input Coupler of Superconducting Cavity for KEKB”, pp. 2040-2042, EPAC2000, Vienna, Austria.
- [8] D. Kostin, private communication, Jul. 2017.
- [9] C. Arcambal *et al.*, “Conditioning of the Power Couplers for the ESS Elliptical Cavity Prototypes”, Proceedings of IPAC2017, pp. 957-959, Copenhagen, Denmark.