

将来の加速器のための入力カップラーに関する R&D の最新結果

RECENT RESULTS ON POWER COUPLER R&D FOR FUTURE ACCELERATORS

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)}, 入倉正男^{B)}, 石橋誠^{B)}, 安武浩人^{B)},
手塚勝彦^{B)}, 沖井優一^{C)}, E. Montesinos^{D)}, C. Julie^{D)}

Yasuchika Yamamoto^{#, A)}, Eiji Kako^{A)}, Toshihiro Matsumoto^{A)}, Shinichiro Michizono^{A)}, Akira Yamamoto^{A)},
M. Irikura^{B)}, M. Ishibashi^{B)}, H. Yasutake^{B)}, K. Tetsuka^{B)}, Y. Okii^{C)}, E. Montesinos^{D)}, C. Julie^{D)}

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

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

^{C)} Nomura Plating Co., Ltd.

^{D)} European Organization for Nuclear Research (CERN)

Abstract

In STF at KEK, research and development (R&D) of power coupler for future accelerators mainly for cost reduction has been done since 2013. As a result, power coupler using a ceramic of a new material without titanium nitride (TiN) coating was developed and fabricated, and results which satisfied the specification of the high power test on the test bench were obtained recently. The technology that became the key to success was ultrasonic rinsing on power couplers, which showed that the amount of electrons emitted was drastically reduced. Measurement of secondary electron emission coefficient using many ceramic samples is currently under way separately. On the other hand, the inner surface of power coupler is plated with copper, and when it is used for superconducting cavities, the residual resistivity ratio (RRR) in a low temperature environment becomes a problem. In COI at KEK, the measurement device under low temperature environment has been developed, and measurement is now being conducted using copper plated samples. We will report on the latest results of these R&Ds on power couplers for future accelerators working together with KEK and related companies and overseas laboratories.

1. はじめに

2017 年から国際リニアコライダー(International Linear Collider; ILC)におけるコストダウンのための R&D が日本と米国の協力の下始まった。その主な研究・開発項目は Table 1 に示した通りである。

Table 1: Four Main Tasks for Cost Reduction R&D in ILC as Collaborative Work between Japan and U.S.

Program	Item
A-1	Lower RRR Niobium material
A-2	N ₂ infusion technique
A-3	Power coupler
A-4	Vertical electro-polishing

この内、A-3 にある入力結合器に関する R&D では、銅鍍金、セラミック材料、および窒化チタンコーティング (TiN coating) の 3 つに絞って研究・開発が行われている。TiN coating にかかるコストについては、東芝電子管デバイス株式会社 (TETD) が東京大学にて開催された LCWS2013[1]にて発表した入力結合器のコスト内訳において、かなりの割合を占めることが判明した。そのため、京セラ株式会社にて開発された TiN coating を必要としない新材料セラミックを用いた入力結合器が KEK と CERN の共同研究にて開発された。TiN coating を除くセ

ラミックのロウ付けを含むあらゆる製造工程は、これまで STF のクライオモジュール[2]にて用いられてきた STF-2 カップラー[3-5]と同じであった。入力結合器の製造後、通常、クリーンルーム(Class 1000)にて超純水を用いた洗浄を行い、その後、Class 10 に移動し、大電力高周波試験(ハイパワーテスト)用テストスタンドの組立てを行う。そして、リークチェック、ベーキング、結合度調整などを行った後、導波管に接続し、ハイパワーテストを行い、ILC の技術設計書(TDR[6])に示されたスペックを満足するかどうかを確認される。一方、セラミック材料については次期製造予定の入力結合器に使用予定の候補を見出すことを目的として、様々な調査が行なわれている。また、銅鍍金についても、歩留まりが高く、かつコストの安い、安定した方法を見出すための調査が進められている。

2. ハイパワーテストの結果

新材料セラミックを用いたハイパワーテストは Table 2 に示したように、延べ 4 回に亘り行われた。参考文献[7]ですでに述べたように、2016 年に行ったハイパワー試験では新材料セラミックを用いた高周波窓およびテーパ部における異常発熱により性能が制限されてしまった。高周波窓近くに取り付けられた電子検出器(pick-up antenna)からの信号をモニターしつつ、小さい磁石を発熱部に近づけたところ振る舞いが変わり、また一時的に温度も下がったため、この異常発熱の原因は新材料セラミックから放出された電子が直接当たっていることで引き起こされているものと結論された。

[#] yasuchika.yamamoto@kek.jp

Table 2: History of High Power Test/Ultrasonic Rinsing for Power Coupler with TiN Coating-free Ceramic (the conditions of ultrasonic rinsing are for the cold part)

Test #	Experiment Period	Result
1	May/2016~Jun/2016	Not keeping at 266 kW (1.5 msec)
Ultrasonic rinsing: 120 W (0.26 W/ℓ)		
2	Jun/2017~Jul/2017	Not keeping at 510 kW (1.65 msec)
Ultrasonic rinsing: 600 W (1.28 W/ℓ)		
3	Sep/2017~Oct/2017	Not keeping at 800 kW (1.65 msec)
Ultrasonic rinsing: 1200 W (2.56 W/ℓ) + WRS		
4	Feb/2018~Mar/2018	3 hours keep at 800 kW (1.65 msec)

2.1 超音波洗浄

放出電子の抑制を狙って KEK と TETD との共同研究の下、2017 年に STF 入力結合器に対して初めて超音波

洗浄を行った。入力結合器に対する超音波洗浄は、すでに海外の研究所において一般に使われている洗浄法で、中性洗剤を混ぜた水温 50 °C の水で(単位体積あたり) 10 W/ℓ の超音波出力で行うが、諸々の制約により今回は Table 3 に示したスペックで行った。

Figure 1 には超音波洗浄中の様子、および防水用パーツが示されている。防水用パーツは、内導体の内側やリークチェック用穴を塞ぐために用いる。Table 2 に示したようにハイパワー試験中の様子を見ながら、超音波洗浄の強度を徐々に引き上げていった。超音波洗浄の第 3 段階にある WRS は”Water Resonant System”のことで、水中の気泡を減らし、超音波の強度を増加させる役割を持つ。この機能により第 3 段階での超音波出力は 1200 W から 1800 W 程度に上がることになる(単位体積あたりとしては 3.8 W/ℓ)。入力結合器に超音波洗浄を用いる際のリスクとしては、母材である SUS316L の表面を覆っている銅鍍金が剥離する可能性がある、ということである。これについては、事前に銅鍍金サンプルを用いた予備試験を十分にを行い[8]、問題ないことを確認した上で実施している。また、Table 3 から明らかであるが、今回実施した超音波洗浄の強度は他の研究所で行われているものと比較すると、およそ 1/3 程度と低い数値であることを注意しておく。

Table 3: Comparison of Specification for Ultrasonic Rinsing Machine in Some Facilities in the World

Company / Institute	TETD	LAL/IN2P3	IRFU/CEA	
Project	STF	E-XFEL	ESS	
Vendor	KAIJO	BANDELIN SONOREX TECHNIK RM 180 UH	VWR (USC2600TH)	Branson Ultrason (B 8525-36)
Power [W]	120 ~ 1200 (incl. WRS)	2000	300	3000
Power per liter [W/ℓ]	0.26 ~ 2.56	10	12	8.6
Frequency [kHz]	38	40	45	25
Water temperature [°C]	~25	50	50 ~ 60	
Detergent	Not used	Tickopur R33 (2.5%)	Tickopur R33 (5%)	Tickopur R 33 (2.75%)
Time duration [min]	30	15	10	
Bath size [ℓ]	468	200	25	350



Figure 1: Power couplers in the ultrasonic rinsing bath at TETD (Left: Warm parts, Center: Cold part, Right: Waterproof parts). The maximum power of ultrasonic rinsing for warm parts was 360 W to avoid the removal of TiN coating from TiN coated ceramics used for warm windows.

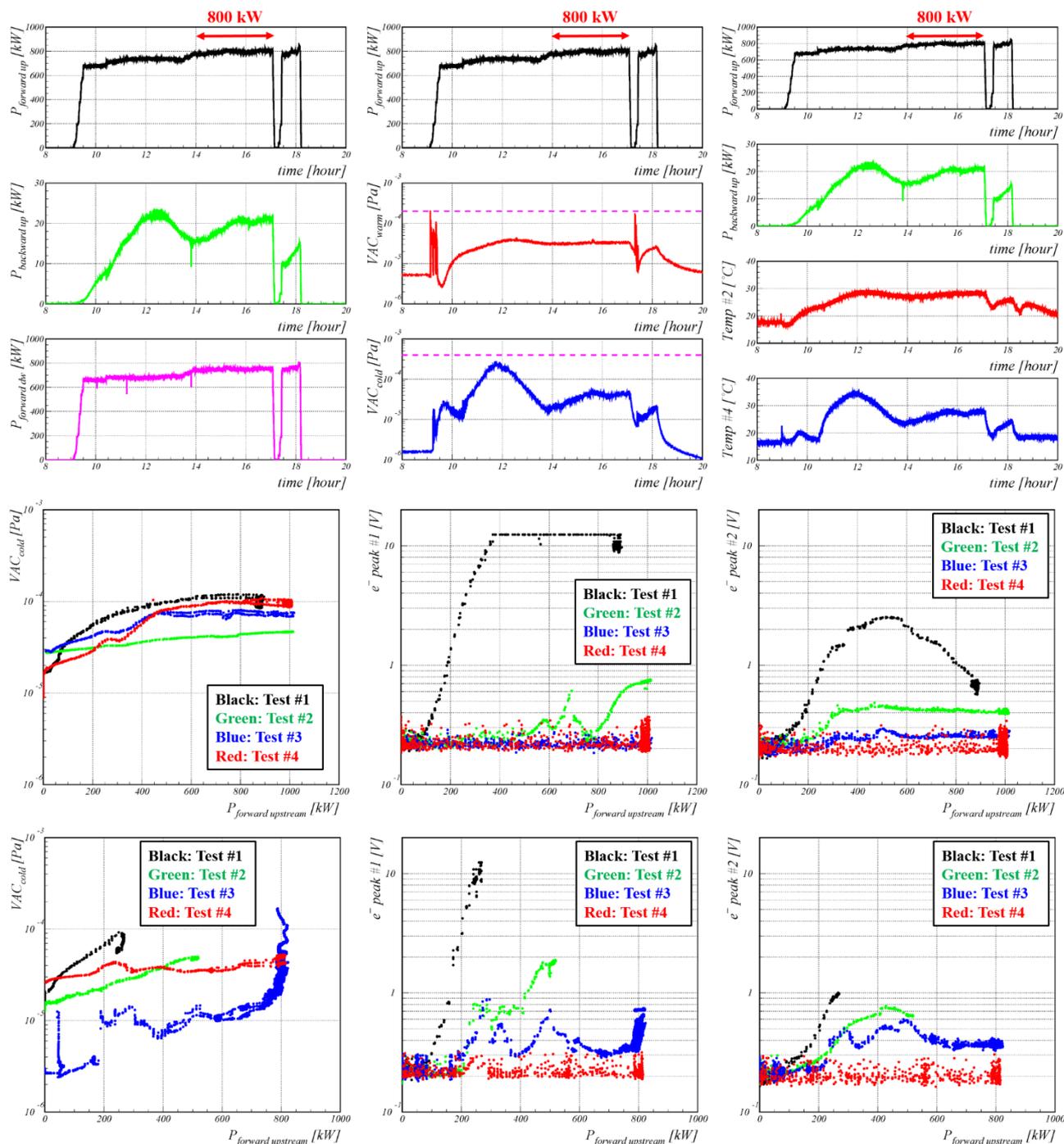


Figure 2: Top three figures show the trend graphs for forward/backward power monitored at upstream and downstream of test bench (left), warm/cold vacuum level (center), temperature at cold window (Temp #2), and temperature at flange (Temp #4) jointed between cold part and waveguide system (right) in Test #4 under the RF conditions of 1.65 msec/5 Hz. Three figures in middle and bottom show the correlation plots between cold vacuum level (left), electron emission at upstream (center) / downstream (right) coupler and forward power for 500 μ sec and 1.65 msec, respectively. In three figures in middle and bottom, four different colours mean as follows; black: Test #1, green: Test #2, blue: Test #3, red: Test #4 as shown in Table 2. Only Test #1 was done for 1.5 msec/5 Hz. The technical interlock level is 4×10^{-4} Pa for cold vacuum, and 2×10^{-4} Pa for warm vacuum shown as purple dotted line in the top center figure. The upper limit in electron signal is 10 V.

2.2 ハイパワーテストの結果

ハイパワーテストの目標は、パルス幅 1.65 msec、繰り返し

返し 5 Hz の条件で、800 kW を 1 時間以上キープすることである。STF では、通常、20 μ sec の最短パルス幅から始め、徐々に増やしていき、最終的に 1.65 msec に到達

させる。到達目標パワーとしては、500 μsec 以下で 1.2 MW (今回の一連のハイパワー試験では実験時間の関係上、1.0 MW までしか行っていない)、500 μsec 以上で 800 kW である。

Figure 2 の上図は、Table 2 に示された Test #4 の最終段階である 1.65 msec/5 Hz で 800 kW をキープしている状態のトレンドグラフである。図から明らかのように、800 kW を 3 時間以上に亘りキープできており、またその間の真空や温度にも特に異常は認められない。また、テストスタンド上流の方向結合器で測定された反射パワー、Cold 側の真空、温度 Temp #4 (入力結合器と結合導波管との締結部に取り付けた温度計) との間には明らかに相関が認められるということに注意しておく。一方、Fig. 2 の中下図は、500 μsec および 1.65 msec の際の Cold 側真空および上下流の Cold 窓近くの電子出力と投入パワーの相関図で、Table 2 に示した Test #1 から #4 までの履歴が色分けで示されている。電子出力の推移を見ると、超音波洗浄が劇的な効果をもっていることは明らかである (電子出力の上限は 10V であることを注意しておく)。先に述べたように、TETD における超音波洗浄の最大出力は海外の研究所に比べて 1/3 程度であるが、それでも電子出力は最終的にほとんど検出されなかったことは特筆すべきことである。1.65 msec の時の Cold 側真空の Test #3 は 10^{-6} Pa 台から始まっているが、これはパワー投入の前に数時間待機して、真空圧力が下がるのを待っていたことによるもので、超音波洗浄の影響ではないことを注意しておく。今回実施した一連の超音波洗浄は、電子出力には影響を与えたが、真空圧力 (アウトガス) に関しては特に変化は見られなかった。

2.3 発熱現象について

今回使用した TiN coating 不要のセラミックには、ハイパワー試験中に異常な発熱が起り、そのため試験を中断せざるを得なかったが、この発熱現象も超音波洗浄を行った後は徐々に無くなっていき、最終的には問題ないレベルまで下がった。ただし、Fig. 2 の右上図中の Temp #4 のトレンドを見ると分かるように、800 kW 到達前の 750 kW キープ中に一度、温度上昇が見られる。この温度上昇は、あたかもエージングされたかのように、しばらくすると徐々に下がっていき、最後はある温度で安定するようになった。このことから発熱の影響は依然として残っており、超伝導空洞に用いる場合にはリスクが伴うと予想される。一方、常伝導加速器で用いる場合には水冷や風冷が行なえるため使用可能であると思われる。なお、STF のテストスタンドでは 1.65 msec/5 Hz の場合に、入力結合器外表面を数台のファンで風冷している。

今回の試験で用いた入力結合器を、近い将来フランスの LAL/IN2P3 研究所に送り、そこで E-XFEL の入力結合器製造 [9, 10] と同様の条件で超音波洗浄を行うことを計画しており、その後のハイパワー試験で発熱現象がどのように変化するのが注目される。

2.4 ハイパワー試験のまとめ

今回実施した一連のハイパワー試験をまとめると以下のようなになる。

- 超音波洗浄は電子出力の低減に劇的な影響を与える

- TiN coating 不要の新型セラミックは STF のベンチテストのスペックを満足した
- 室温で用いる高周波窓に新型セラミックを用いるのは問題ないと思われる
- 発熱現象は依然として注意が必要である

3. セラミックと銅鍍金に関する study

入力結合器に関しては、他にもセラミック、銅鍍金、窒化チタンコーティングに関する調査・研究を進めているので、ここに簡単に紹介する。詳しくは、本学会のポスター発表 [11] を参照されたい。

3.1 セラミックに関する調査・研究

セラミックに関する調査・研究は、将来の加速器における使用に対して有望な候補を見出し、また超音波洗浄などによる二次電子放出係数の低減を定量的に調べることを目的として、以下の 4 項目の試験・評価を行っている。

- 表面・体積抵抗率(ρ)
- 比誘電率(ϵ)
- 誘電正接($\tan\delta$)
- 二次電子放出係数(δ_{SEE})

表面・体積抵抗率および比誘電率、誘電正接測定については日本ファインセラミクスセンターおよび株式会社 AET にて行い、二次電子放出係数測定については本機構内にある走査型電子顕微鏡 (scanning electron microscope, SEM) を用いて行い、最近、セラミックの二次電子放出係数測定に成功したところである。

3.2 銅鍍金に関する調査・研究

銅鍍金に関する調査・研究は、歩留まりの高い安定した銅鍍金法を見出し、またコストダウンにつながる技術を開発することを目的として、以下の 3 項目の試験・評価を行っている。

- Residual resistivity ratio (RRR) 測定
- 剥離テープ・超音波洗浄を用いた密着性試験
- 銅鍍金内部の不純物測定

RRR 測定については、本機構内の小型冷凍機設備を用いて行い、フランスの IRFU/CEA 研究所と共同で実施している。銅鍍金の密着性試験については TETD との共同研究にて行い、不純物測定については野村鍍金株式会社およびフランスの LAL/IN2P3 研究所と行っている。

3.3 窒化チタンコーティング (TiN coating)

第 2 章で述べたように、新型の TiN coating 不要のセラミックを超伝導空洞用入力結合器に適用するのはまだ早く、TiN coating は依然として必要な技術である。したがって、コストダウンを目的として、いかに効率よく大量に処理できるかという調査をタイゴールド株式会社と協力して進めているところである。

4. まとめ

2013 年に東京大学で開催された LCWS2013 [1] 以降、本研究の主要テーマであった TiN coating 不要の新型セラミックを用いた入力結合器の開発が始まったが、STF におけるテストベンチのスペックを満足したことで将来の

加速器への適用可能性が出てきたものと思われる。発熱の原因については依然として未解明の部分もあるが、現在進めているセラミックの study から何らかの情報がもたらされるものと期待される。一方、銅鍍金と TiN coating の study については来年の IPAC19 または SRF19 にてまとまった結果を発表することを目標に鋭意努力しているところである。

謝辞

TiN coating 不要の新型セラミックについては京セラ株式会社で開発されたものを使用しました。また、京セラ株式会社の吉住氏および横山氏には特にお世話になりました。入力結合器の大電力試験用テストスタンドの設営・運転・制御については、岡田氏(株式会社ケーバック)、浅野氏、今田氏、柳町氏、山田氏(以上、日本アドバンステクノロジー株式会社)、早川氏(関東情報サービス株式会社)に手伝っていただきました。銅鍍金の RRR 測定については、飯竹氏(株式会社ケーバック)および寺嶋氏(関東情報サービス株式会社)に多大な貢献をしていただきました。銅鍍金サンプルの製作については、田口氏、中嶋氏(株式会社野村鍍金)および沓名氏(元株式会社野村鍍金)にお世話になりました。各研究所で用いられている超音波洗浄装置のスペックについては、フランスの C. Arcambal 氏(IRFU/CEA 研究所)および W. Kaabi 氏(LAL/IN2P3 研究所)から情報をいただきました。以上の方々に対し、改めて感謝申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

- [1] International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2013); <http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/lcws13/>
- [2] Y. Yamamoto *et al.*, “Achievement of Stable Pulsed Operation at 31 MV/m in STF-2 Cryomodule at KEK”, in *Proc. of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Sapporo, Japan, Aug. 2017, pp. 22-26.
- [3] E. Kako *et al.*, “Advances and Performance of Input Couplers at KEK”, in *Proceedings of SRF2009*, Berlin, Germany, pp. 485-490.
- [4] S. Imada *et al.*, “Assembly Procedure of Input Couplers for STF-2 Cryomodule”, in *Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Aomori, Japan, Aug. 2014, pp. 1062-1065.
- [5] T. Yanagimachi *et al.*, “High Power Test of Input Couplers at Test-Stand for STF2 Cryomodule”, in *Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Aomori, Japan, Aug. 2014, pp. 602-604.
- [6] ILC Technical Design Report; <http://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [7] Y. Yamamoto *et al.*, “High Power Test for Plug-compatible STF-type Power Coupler for ILC”, in *Proc. of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Sapporo, Japan, Aug. 2017, pp. 776-780.
- [8] Y. Yamamoto *et al.*, “Fundamental Studies for the STF-type Power Coupler for ILC”, in *Proc. of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Sapporo, Japan, Aug. 2017, pp. 422-427.
- [9] W. Kaabi *et al.*, “Overview of Recent Advances in Coupler Design, Technology, Fabrication and Conditioning”, in *Proc. of SRF2015*, Whistler, Canada, Sep. 2015.
- [10] C. Lievin *et al.*, “Status of the Fundamental Power Coupler

- Production for the European XFEL Accelerator”, in *Proc. of SRF2015*, Whistler, Canada, Sep. 2015, pp. 1364-1366.
- [11] Y. Yamamoto *et al.*, “Research on Ceramic and Copper Plating for Power Couplers”, in *Proc. of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Nagaoka, Japan, Aug. 2018, THP053.