

ILCに向けた STF タイプの入力結合器の大電力試験および新型セラミックの性能評価

HIGH POWER TEST FOR PLUG-COMPATIBLE 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)}, E. Montesinos^{B)}, C. Julie^{B)}
Yasuchika Yamamoto^{#, A)}, Eiji Kako^{A)}, Toshihiro Matsumoto^{A)}, Shinichiro Michizono^{A)}, Akira Yamamoto^{A)},
E. Montesinos^{B)}, C. Julie^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} European Organization for Nuclear Research

Abstract

From the view point of plug-compatibility for the power coupler in the International Linear Collider (ILC), recommended by Linear Collider Collaboration (LCC) in 2013, new STF-type power couplers with 40mm of input port diameter were re-designed, fabricated and successfully high-power-tested. Moreover, from the view point of the cost reduction for the ILC, another type of power couplers with Titanium-Nitride (TiN) coating-free ceramic were also fabricated and high-power-tested by the collaboration between CERN and KEK. In this paper, the detailed results for the both power couplers will be presented.

1. はじめに

2013年に開催されたLCWS2013[1]にて、LCCからSTFタイプの入力結合器[2]をILCの技術設計書(TDR[3])に掲載されているスペックを満たすように(plug-compatible design)、設計変更することを提案された。この提案を受けて、新たなSTFタイプの入力結合器を設計・製作することになったが、同時にコスト削減を目的とした研究・開発としてTiNコーティングの無いセラミックを用いた入力結合器も製作することになった。以上のことより、新規開発された入力結合器はTiNコーティングを施したセラミックを用いたWarm側およびCold側2台ずつ、TiNコーティングの無いセラミックを用いたCold側2台を製作することになった(入力結合器には二重の高周波窓を設けるようTDRに定められており、そのためWarm部とCold部に分かれる)。Table 1はそのまとめである。

Table 1: Summary of the Plug-compatible STF-type Power Couplers Fabricated in 2014

Coupler	Ceramic vendor	Ceramic colour	Coating
Warm #1, #2	A	White	TiN
Cold #1, #2	A	White	TiN
Cold #3, #4	B	Gray	Free

新STFタイプ入力結合器の開発の経緯を簡単に述べると、2013年より設計が始まり、2014~2015年に製造が行われ、2016年にテストベンチの組立ておよび5MWクライストロンを用いた大電力試験が行われた。大電力試験はTable 1にあるように、Warm #1, #2とCold #1, #2の組み合わせ、およびWarm #1, #2とCold #3, #4の組み合

わせで2回に亘って実施された。

2. 新 STF タイプ入力結合器の高周波設計

高周波設計はHFSS[4]を用いて行われた。具体的な手順としては、以下の3点である。

- 空洞との結合度の計算
- テストベンチモデルによる計算
- セラミック成分の違いを考慮した計算

空洞との結合度の計算に用いたモデルはFigure 1の上図にある”Real End-cell model”と”Symmetric End-cell model”の2つである。結合度の内導体挿入長依存性を調べるには、内導体の突き出し量を変更することで求められる(両図の赤矢印で示されたところ)。結果はFigure 1の左下図に示されている通りで、この図からILCにおける Q_{ext} の必要レンジとして 10^{6-7} を得るには、内導体の挿入長は24~36mmの間で調整できるようにしなければならないことがわかる。これより内導体に用いられるベローズのスペックを決めることができる。

テストベンチモデルの計算はFigure 1の右下図にあるモデルで行われた。ここではドアノブ(導波管と入力結合器を繋いでいるもの)や結合導波管(2つの入力結合器を繋いでいるもの)の最適化を行った上で、内導体の挿入長を変えながら、 S_{11} が<-30dBになるような条件を求めるところにある。結果は、先に求めた内導体の可変長内に最適な条件があることが確認された。

今回製造された入力結合器には二種類のセラミックが用いられているため、それぞれの高周波特性を考慮した計算も行った。2つのセラミックの高周波特性および二次電子放出係数はref.[5, 6]に示している通りである。テストベンチモデルを用いた計算を行ったところ、内導体の突き出し量を変えることで良いマッチング条件が得られることがわかった。

[#] yasuchika.yamamoto@kek.jp

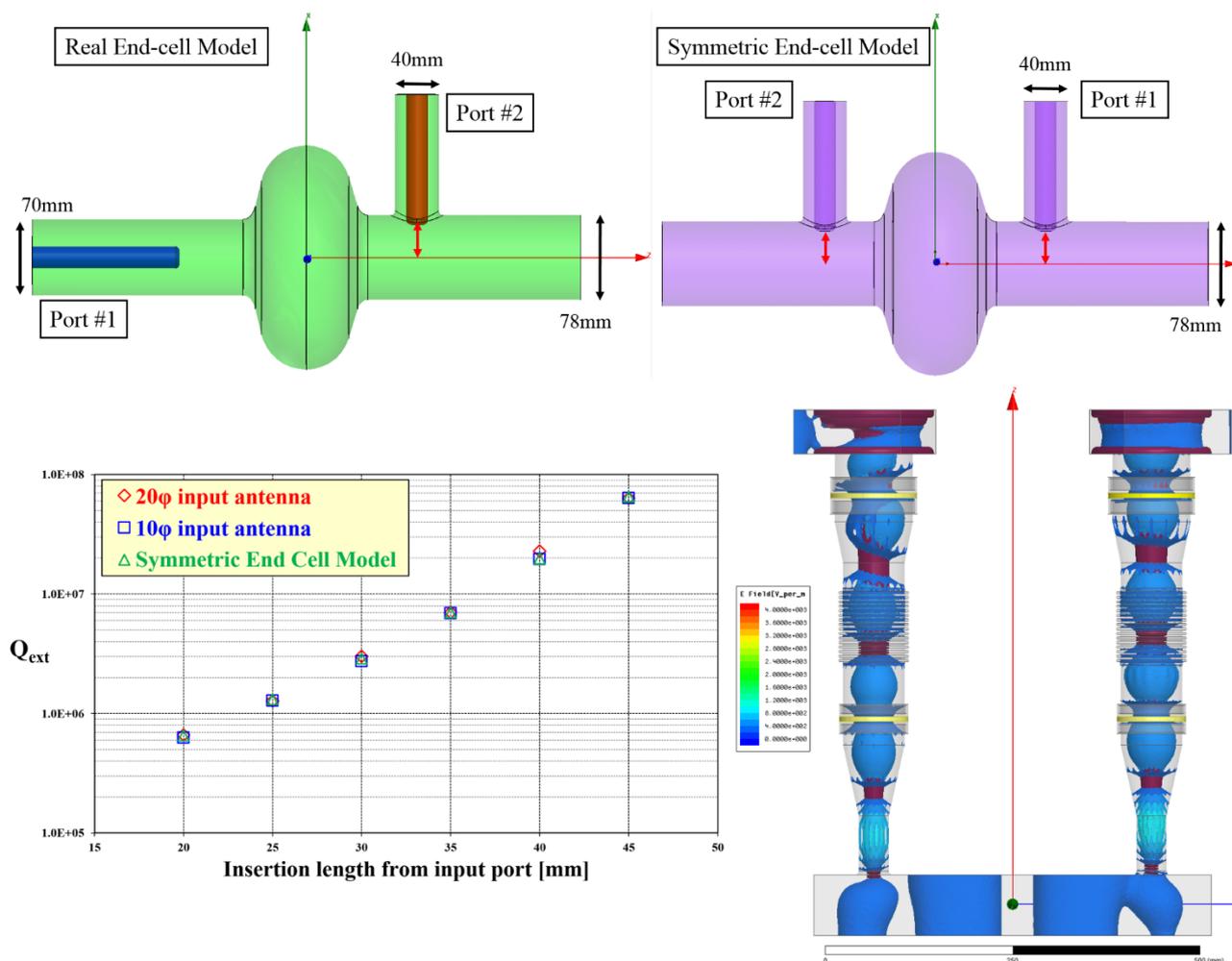


Figure 1: Two models for the calculation of the coupling to the cavity in the top two figures, the correlation plot between Q_{ext} and the insertion length from the port of power coupler (shown as the red arrow in the top two figures) in the bottom-left figure, and the full test bench model with the animation of electric field in the bottom-right figure. For the range of external Q , the necessary specification for ILC is 10^{6-7} .

3. 製作・受け入れ検査・組立て・結合度調整

3.1 製作・受け入れ検査

製作されたのは Table 1 に示したように、Warm 部 2 本と Cold 部 4 本である。この内、コーティングの無いセラミックを用いた Cold #3, #4 は CERN との共同開発である。Figure 2 の上図に plug-compatible 設計による STF タイプ入力結合器の断面図を示す。その特徴は、TESLA 型空洞に付いている 40mm 径の入力ポートに取り付けられるようテーパ部分が長いことと、内導体に長いベローズがあり Q_{ext} の調整範囲が ILC スペックを満たすようになっていることである。Warm/Cold の内外導体それぞれの銅鍍金条件を Table 2 に示す。この条件は STF-2 クライオモジュールに組み込まれた最後の 4 本の入力結合器と同じものである。

受け入れ検査は基本的に目視で行うが、Cold #1 の内導体先端部に銅鍍金不良が見つかった。この原因として、セラミックのロウ付けを行うための熱処理中に銅鍍金膨れ(blister)が発生したものと考えられる(Figure 2 右下図)[7]。この部分は電界が最も強くなる領域のため、大電

力試験中に不具合が発生する恐れもあったが、スケジュールの関係で先に進むことになった。

Table 2: Summary of Copper Plating Condition

Warm		Cold	
Inner	Outer	Inner	outer
25μm	25μm	25μm	10μm
Gold strike	Nickel strike	Gold strike	Gold strike

3.2 組立て・結合度調整

テストベンチの組立ては KEK 内超伝導高周波試験施設(STF)の Class 10 クリーンルーム(ISO6 相当)にて行われた。通常、STF では Cold 部の内側のみ超純水洗浄を行い、Warm 部についてはイオンガンによるクリーニングのみを実施している。真空パーツについては detergent を用いた超音波洗浄を行い、一晩乾燥させてから組み立てに用いる。真空シール材としては、Warm と Cold の連結部についてはヘリコフレックスを用い、結合導波管の接続部にはインジウムワイヤを用い、Cold 部と結合導波管の接続部にはヘキサゴナルシールを用いている。真

空パーツの接続部には無酸素銅のガスケットを用いている。組み立て後、真空排気を行い、真空圧力が 10^{-3} Pa 以下になったらリークチェックを行う。典型的なリークレートは 10^{-10} Pa·m³/sec である。その後、100°Cで 48 時間のベーキング(結合導波管部は 90°C)を行い(結合導波管

にインジウムワイヤを使用しているため温度が上げられない)、最後に内導体の突き出し量を変えながら S_{11} が最小となる点に合わせて一連の作業が終了する。Figure 3 に一連の作業内容を示す。

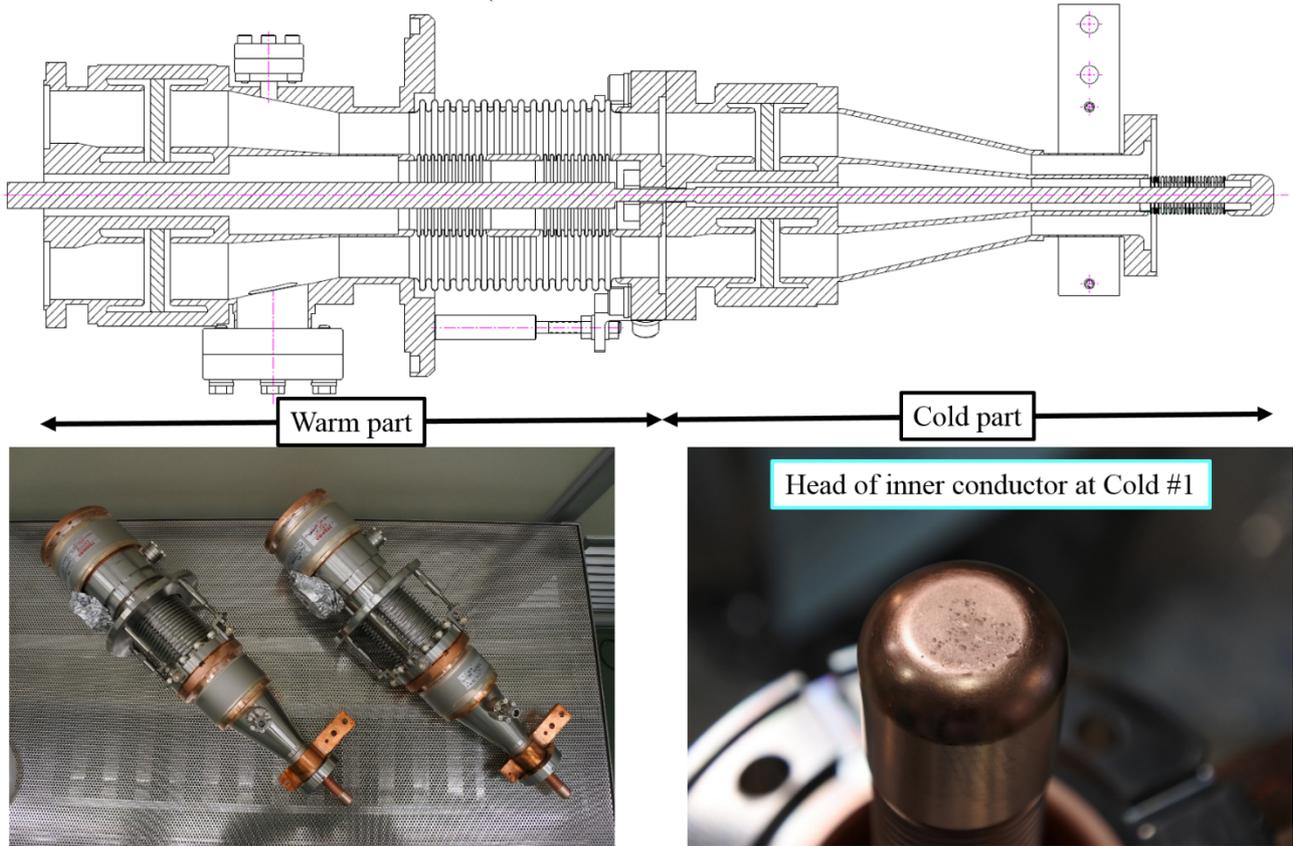


Figure 2: Cross-sectional drawing of the plug-compatible STF-type power coupler (top), connection of the warm and cold part (bottom-left), and many blisters generated on the head of the inner conductor of Cold #1 (bottom-right).



Figure 3: Status of the assembly work in the clean room, the baking, and the low power test by the network analyser. From left to right in the top figures: the ultrapure water rinsing, cleaning by the ion gun, and jointing between the warm and cold parts. From left to right in the bottom figures: the pumping and the leak check, the baking, and the low power test.

4. 大電力試験

組みあがったテストベンチを大電力試験エリアに移動させ、導波管と接続する。Figure 4 は最終状態の様子である。大電力試験のスペックを Table 3 に示す。STF ではエージングの効率化と不具合発生リスク軽減のため、最短のパルス幅である 10 μ sec から始めて、徐々にパルス幅を広げていく、という方式が取られている。モニター信号は、Warm/Cold 部の真空圧力、Cold の窓付近にある電子放出検知用プローブ、Warm の窓付近にあるアークセンサー、テストベンチ上下流にある方向結合器、および導波管バンド部にあるアークセンサー、などである。この内、真空圧力、アークセンサー出力、方向結合器からのパワーをインターロックシステムに用いている。真空圧力の閾値は 2×10^{-4} Pa である。後半の Warm#1, #2 と Cold #3, #4 の組み合わせで行った大電力試験では、CERN から送られた自動エージング用モジュール、および真空圧力判定用モジュールが導入された。真空圧力判定用モジュールで Warm と Cold のどちらの真空圧力が高いかを判定し、その圧力がある閾値を超えないように自動エージング用モジュールでクライストロン出力を調整する、という仕組みである。真空圧力が下がっていくにつれて、入力パワーも徐々に上がっていくので、特にマニュアル操作を必要とせず、便利である。

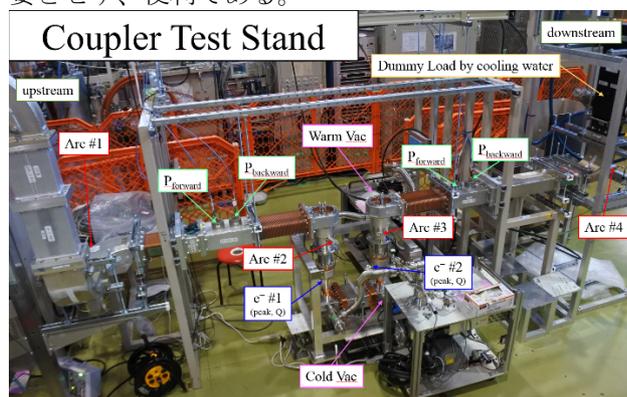


Figure 4: High power test stand for power coupler in STF.

Table 3: Operational Condition of High Power Test

Pulse width [μ sec]	Repetition rate [Hz]	Max. power [kW]
10	5	1200
30	5	1200
100	5	1200
500	5	1200
1500	5	800
1650	5	~700

Figure 5 の左図は、入力パワー、反射パワー、Warm/Cold それぞれの真空圧力のトレンドグラフを表している。パルス幅 1500 μ sec と 1650 μ sec の場合(TDR には 1650 μ sec まで要求されている)である。通常、常温環境下での大電力試験では RF duty が高くなると、Cold 部の内導体温度が上昇し、アウトガス量が増え、その結果、真空圧力の上昇を招き、定格パワーまで到達できない。一方、低温環境下ではこのようなことは起きず、Cold 部の真空圧力が高くなることはほとんどない。したがって、常温での大電力試験は入力結合器にとって過酷な条件で行っている試験であるといえる。

テストベンチの結合導波管には Cold 部の先端が覗けるようビューポートが設けられているが、通常、大電力試験中は常に Cold 部に蛍光が見える(Figure 5 中央)。この蛍光は(高周波の繰り返し周波数と同じ)5Hz で明滅を繰り返しており、また Cold 部の真空圧力とも相関がある。Figure 5 右図は 500 μ sec の時の Cold 部真空圧力と入力パワー、および電子放出検知用プローブからの信号との相関図である。電子放出検知用プローブの信号は、まず絶縁アンプ回路を通し、その後ピークホールドモジュール[8]に送られ、そこでパルス内のピーク値を検出する。また、パルスの積分値も求められる。上図がピーク値、下図が積分値を表す。一見して明らかなように、真空圧力と電子放出の振る舞いには相関がみられ、またピーク値と積分値の間には微妙な差もみられる。これらの振る舞いは入力結合器ごとに異なっており、個体差があることがわかっている(事実、Electron #1 と #2 とはそれぞれのピーク値が一致していない)。入力パワーが高くなるにつれて、Cold 真空が徐々に上がっているのは、内導体の発熱によるアウトガスの影響である。

Figure 6 は STF で実施された入力結合器の大電力試験におけるエージング時間を示す。Warm#1, #2 と Cold #1, #2 の組み合わせは図中の"40mm 1&2"であり、これまで製作された入力結合器のエージング時間と比べて遜色のない結果となった。一方、Warm #1, #2 と Cold #3, #4 の組み合わせである"40mm 3&4"の方は、500 μ sec 以上になったところで Cold のテーパ部に異常な発熱を観測し、大電力試験は敢え無く中断となってしまった。調査の結果、パワーレベルがある閾値を超えると電子放出検知用プローブから異常な出力が観測され、同時に真空圧力の増大と温度上昇を招いていることがわかった。セラミックの二次電子放出係数が高いことが一つの原因であったようである。また、元々誘電損失が大きいセラミックを使用していたため発熱の影響も無視できないものと考えられる。今回の結果を受けて、コーティングの無いセラミックの製造条件にフィードバックをかける必要がある。

本プロシーディングでは紙幅の関係上、一部の説明が割愛されているが、以上のことは ref [9]に詳細に書かれているので、興味のある読者はそちらを参照されたい。

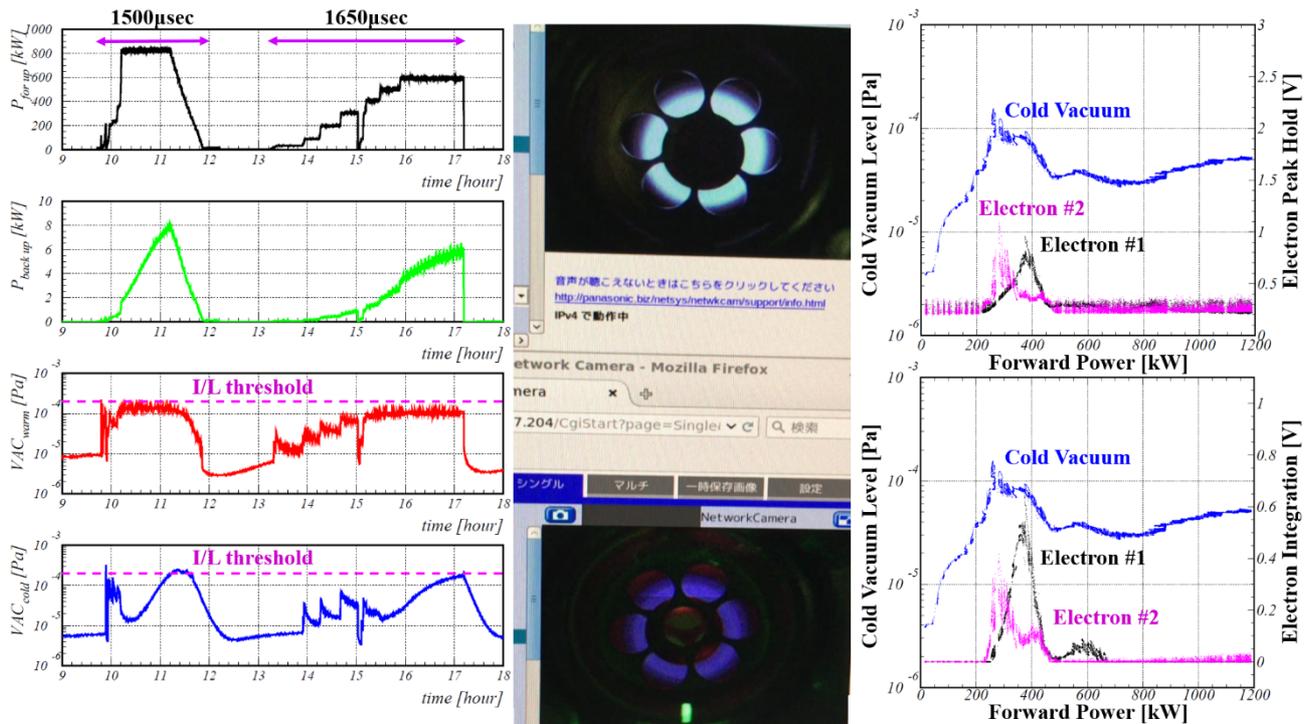


Figure 5: Left figure shows the trend graph for the forward/backward power, and the both vacuum of the cold and warm part which technical interlock level is 2×10^{-4} Pa shown as the purple dotted line. Center figure shows the luminescence in the both cold parts during the high power test. Right figures show the correlation plots between the cold vacuum level and the electron emission for the forward power.

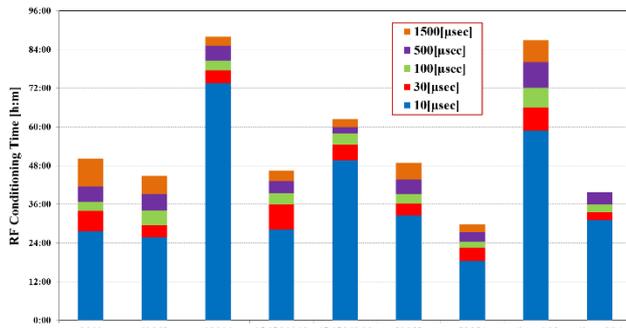


Figure 6: Summary of RF conditioning time for every power coupler in STF. “40mm 1&2” is the power coupler with the TiN-coated ceramic, and “40mm 3&4” is the coating-free. #9-#10 were used for the capture cryomodule, and #11-#24 for the STF-2 cryomodules.

5. まとめと今後の展望

Plug-compatible 設計に基づく新 STF タイプ入力結合器の性能試験はひとまず成功したといえる。今後はクライオモジュールに組み込んで、モジュール試験での性能評価を行う必要がある。一方、コスト削減を目的として製作されたコーティングの無いセラミックについては、まだ製造条件が最適化されたとはいいがたく、今回の大電力試験の結果を元に新規開発を行う必要がある。

昨年度より、民間会社との間で入力結合器の洗浄効果に関する共同研究が始まっている。現在は、これまで STF では行われていなかった超音波洗浄を Cold 部に実施し、再び大電力試験を行っているところである[7]。今

後は、超音波出力を上げていく方向と、オゾン水洗浄に進む方向とが検討されている。

参考文献

- [1] LCWS 2013; <http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/lcws13/>
- [2] E. Kako *et al.*, “Advances and Performance of Input Couplers at KEK”, Proceedings of SRF2009, pp. 485-490, Berlin, Germany.
- [3] ILC Technical Design Report (2013); <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>.
- [4] High Frequency Structural Simulator; <http://www.ansys.com/products/electronics/ANSYS-HFSS>
- [5] <https://www.ngkntk.co.jp/english/product/list/property.html>
- [6] K. Iwamoto *et al.*, “Preliminary Study of Low SEE Coefficient Alumina for Coupler Window”, TTC Meeting 2014, KEK, Japan.
- [7] Y. Yamamoto *et al.*, “Fundamental Studies for the STF-type Power Coupler for ILC”, MOPB063, SRF2017, Lanzhou, China.
- [8] Y. Yamamoto *et al.*, “Development of Peak-hold Module for Electron Emission in STF-type Power Coupler for the ILC”, Proceedings of IPAC2017, pp. 1034-1036, Copenhagen, Denmark.
- [9] Y. Yamamoto *et al.*, “High Power Test for Plug-compatible STF-type Power Coupler for ILC”, MOPB064, SRF2017, Lanzhou, China.