

Development of 20kW input power coupler for 1.3GHz ERL main linac

-The high power test of the main linac coupler -

Kenji Shinoe^{1,A)}, Masato Sato^{A)}, Hiroshi Sakai^{A)}, Kensei Umemori^{A)}, Norio Nakamura^{A)}, Takaaki Furuya^{A)},
Masaru Sawamura^{B)}, Cenni Enrico^{C)}

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

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801

^{B)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

2-4 Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195

^{C)} The Graduate University for Advanced Studies

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801

Abstract

We are developing input power coupler for a 1.3GHz ERL superconducting cavity for main linac^{[1][2]}. We fabricated two power couplers for cERL main linac cryomodule and also made the high power test stand by using CW 1.3GHz 300kW klystron to process the two power couplers before cryomodule assembly of main linac. First, we started the pulse processing with 10us pulse width of 5Hz repetition and successfully fed the 100kW peak power into the two power coupler under traveling wave condition. We could reach the 105 kW peak power with 200us of 20Hz repetition by continuing enlarging the pulse width and repetition. Finally we could also feed the CW 43kW power to the power couplers for 4 hours. No crucial temperature rise and no vacuum leak were observed. These two couplers satisfied the ERL requirements.

ERL 主ライナックのためのカップラー開発

— カップラー実機におけるエージング試験 —

1. はじめに（基本設計と仕様）

これまで我々は 1.3GHz の ERL 用の CW 型超伝導空洞の開発を行ってきた。特に CW 運転に耐える 1.3GHz の ERL 主空洞用のカップラー開発を行ってきた。[2], [3], [4], [5], [6]

1.3GHz ERL 用主ライナックに用いられる入力カップラーについて、必要とされている基本仕様は周波数 1.3GHz で入力パワーが 20kW である。エネルギー回収下では、本来はパワーを供給する必要はほとんど無いが、実際の運転では外乱による影響 (microphonics) などにより空洞が機械的振動を受け、運転周波数に空洞の共振周波数 peak に保つことは難しい。従って、入力カップラーのカップリングを変化させ、負荷 Q 値 (Q_L) を小さくすることで共鳴幅を敢えて大きくさせ、機械的振動に堅牢なパワーの安定供給を実現する必要がある。主ライナック入力カップラーの基本仕様を表 1 に示す。

周波数	1.3GHz
加速勾配	15-20MV/m
入力電力	最大 20kW(定在波)
負荷 Q 値(Q_L)	$1 \times 10^7 \sim 4 \times 10^7$ (可変)

表 1：主ライナック入力カップラーの基本仕様

本カップラーのセラミック窓は TRISTAN から使用

している choke 構造を用いた disk 型のセラミック窓を基本としている [7] が、CW にて 1.3GHz で 20kW のパワー供給入力を行うため、熱負荷対策としていくつかの特徴を持っている。主な特徴として、同軸部のインピーダンスを 50Ω から 60Ω にし、内導体の電力損失の軽減を行った。また、セラミック窓の材質も誘電損失の少ない 99.7% 純度のアルミナセラミックス (HA997) を窓材に採用した。本カップラーはセラミック窓が破断しても空洞本体に問題がないように低温部 (cold 窓) と常温部 (warm 窓) の 2 つの窓を設けている。2 種類のセラミック窓は同一寸法として、製作の簡便性を計っている。また、本カップラーの外導体、内導体にはベローズを用いており、カップラーの先端位置を変化させ、カップリングを可変としている負荷 Q 値としては $1 \times 10^7 \sim 4 \times 10^7$ までかえることを可能とした。また 2K の超伝導空洞への熱侵入はこれらのベローズに薄肉の銅メッキを施すことによって、RF ロスを減らすと同時に熱侵入の軽減を図っている。さらに、5K, 80K の thermal アンカーを Cold 窓部のフランジと Cold 窓に接続することで、CW パワー投入時に生じる空洞以外にて、RF ロスの熱吸収を行っており、熱負荷対策を行っている。内導体は常温側から内導体内部にロッドを挿入し、強制空冷により冷却する。カップラーの詳細図を図 1 に示す。

¹ kenji.shinoe@kek.jp

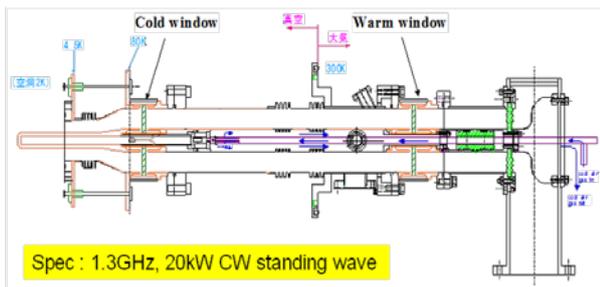


図 1 : E R L 主空洞用カプラー詳細図

特に、昨年は図 1 に示すカプラー 1 号機を作成。それを用いて、断熱槽を用いた液体窒素温度冷却条件下でのテストスタンドを用いたハイパワー試験を行い、定在波で 1.3GHz CW 25kW のパワー投入が可能であったこと、及びその後液体窒素と常温の熱サイクル試験を 10 回以上行い、Cold 部のセラミック窓の割れがないことを確認し、本カプラーが RF 設計、及び熱設計上問題ないことを確認した[6]。今年はその結果を受け、現在、KEK に建設中の Compact ERL (cERL) 用の 2 空洞を収納する主空洞用 Cryomodule のための実機カプラー 2 台の製作を行った。特にその module 組み込み用のカプラーのプロセスを行うためのハイパワーテストスタンドを構築し、カプラーの process を行った。本文ではこのパワーテストの詳細を説明する。

2. カプラーハイパワー試験

本機カプラー (2、3 号機) を作成した。特に、cryomodule に組立てる前に、ハイパワーによるカプラーの processing を行い、2 次電子放出を抑制すること、また、その後 clean な環境にて組立てを行うことから、2 個のカプラーを同時にパワーテストが行えるようにテストスタンドの設計を行った。

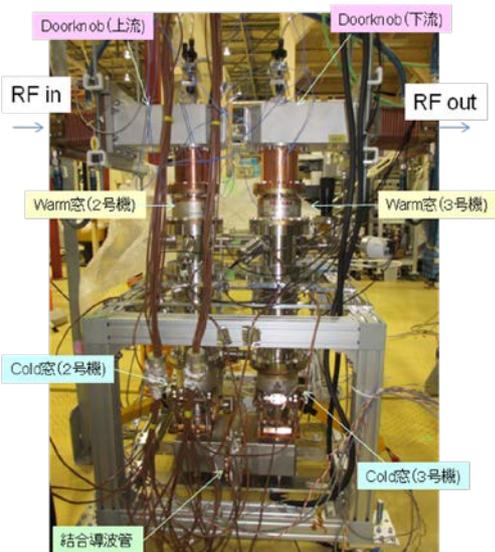


図 2 : 製作したカプラー 2、3 号機とカプラーテストスタンド。

図 2 が設計に合わせて、作成したカプラー 2、3 号機のテストスタンドである。組立は全て class10 のクリーンルーム環境下で行い、カプラー内部は超純水洗浄したのちに class10 のクリーンルーム内で一晩乾燥させ、組立を行う。この後、ベーキングを 150 度以上で 48 時間行った。到達圧力は C.C.G.にて warm 部 1×10^{-7} Pa, cold 部 4×10^{-7} Pa が得られた。

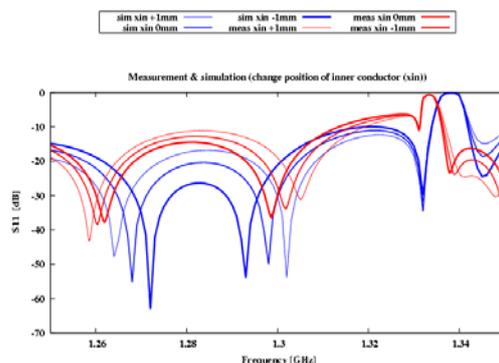


図 3 : Cold 部内導体の挿入長を変えた時の S11 の測定値 (赤線) の様子と計算値 (青線) の比較。横軸は周波数、縦軸は反射(S11) (dB)を示す

まず、RF 設計が計算通りであるかどうかを測定するために上部ドアノブ部を通じて、片方の導波管(port1)から、もう片方の導波管(port2)までの透過と反射の測定を行った。図 3 の赤線がその測定結果である。我々のカプラーは Cold 窓のベローズが付いており、内導体の挿入長を変えることでカプラー間の結合度も調整可能であるので、その変化も測定したものを図 3 に示している。計算結果(HFSS による simulation 結果)が図 3 の青線で示している。設計目標である $S11 < -25\text{dB}$ に調整されてカプラースタンドが製作されているのがわかった。特にベローズ込みで行った計算結果が実測と非常に合致することが分かった。

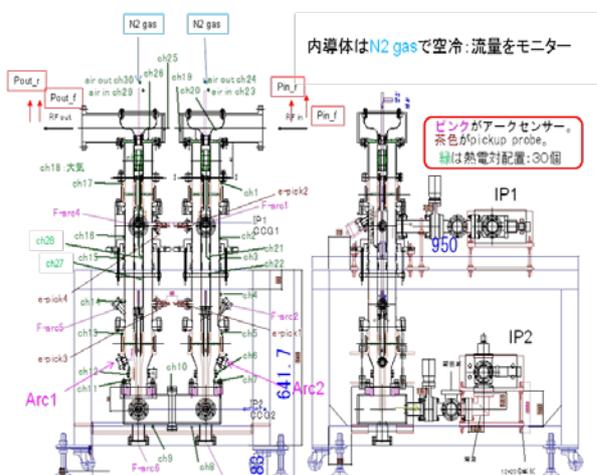


図 4 : ハイパワー試験時のセットアップ

図4がハイパワーテスト時のセットアップである。投入パワーの設定は20kWの定在波が我々の要求であるが、テストスタンドでは進行波でのプロセスとなるため、電場ピーク値条件で同等の条件となる4倍の80kW以上の進行波の投入が必要条件である。そのため、1.3GHz CW 300kW Klystronからcirculatorを通じ一方のドアノブからパワーを2つのカップラーを結合導波管を通じ、投入。その後、パワーはもう一方のドアノブから出ており、ダミーロードに吸収される。カップラースタンドの前後のパワーは方向性結合器にてモニターされカップラー内でのパワー収支、及び反射の有無などを常時モニターし、パワーレベルに合わせたインターロックを設けた。(カップラーテストスタンド上流のパワーの入射、反射をPin_f, Pin_rとしている。)内導体は窒素ガスで独立に冷却。流量は120l/minに設定し、流量をモニターした。また外部は最終的にはファンで強制空冷を行った。cold窓同士で挟まれた導波管結合器部の真空、またcold窓とwarm窓に挟まれた箇所(2,3号機の両方を1つの真空としてモニター)を独立にイオンポンプで排気し、それぞれCCGでモニターした。真空のインターロックの値は両方とも1×10⁻⁴ Paである。パワー投入時発生する2次電子はcold窓両面、warm窓真空面を見込むビューポートに全てアークセンサー(図4のF-arc1,2,3,4,5,6)を設置モニターし、インターロックをかける。特にモジュールでの使用を考慮し、アークセンサーは石英のfiber typeのものを使用し、その発光を光電子増倍管で検出することで1us程度の早い反応速度でインターロックをかけられる仕様とした[8]。但し、宇宙線による偶発的な発光を避けるため、10us以内に3発以上の発行現象が起こった時、もしくは10us以上発光が連続的に続いた時のみをプロセス中に生成される連続的な2次電子による発光とみなし、2次電子の成長を避けるためにインターロックでパワーを落とすようなロジックを用意した。同時に、2次電子のモニターとして、warm部の真空部にprobe(図4のe-pick 1,2,3,4)を設置し、付随する発光と関連する2次電子を直接オシロスコープでモニターする。内導体、外導体部の各ベローズまたcold窓, warm窓などに熱電対を配置し、温度上昇を合計30点モニターした(図4の緑文字ch1-30)。

目標が80kW以上のハイパワーであるため、いきなり連続波によるパワー投入は行わず、まずは10us,5Hzのpulseのパワーをklystronで生成し、目標到達peak powerは余裕をみて100kWとして、pulse processingを最初に行った。最初にpeak powerで75kWまでスムーズに到達したが、その後、アークによるインターロックでパワーが落ちた後は20kW程度から真空の悪化と同時にアークセンサーによる信号が常時出る状態が続いた。図5(右)が23kW時のアークセンサーからの信号である。Pulseのパワー投入時のみに連続的なpulseのpeakが見られるtypicalなアークの信号が

オシロスコープで得られている(fiber④(warm窓), ⑥(cold窓)Cold側)。それに付随してwarm窓(fiber④)に関する信号)のelectron probeに大きな信号が得られており、真空悪化に伴い、2次電子の成長が見られているのが分かった。これらの反応を時間をかけて徐々にprocessを行った。totalで22時間かけて100kWのpeakに到達した。

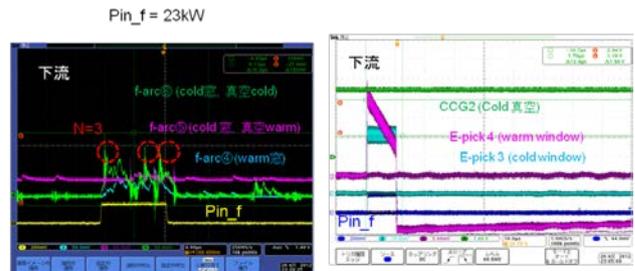


図5：(左) pulse process時にみられるfiber arcの信号。(右) それに付随するelectron probeからの信号。

次にpulse幅を広げ、CWでもカップラーにハイパワーが投入可能かを調べた。図6がpulse幅を広げながら、パワー投入を行った履歴である。前日までの10us,5Hzのprocessのおかげで、100kWまでは同条件でパワーはスムーズに投入可能であった。その後、pulse幅を30us, 100us, 200usと広げていった。

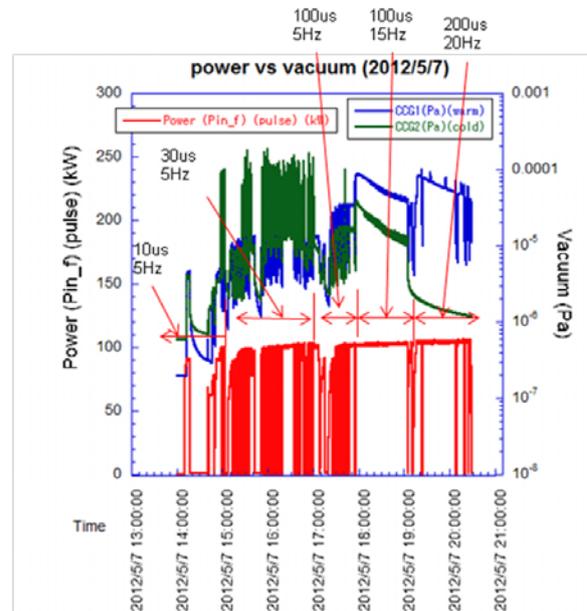


図6：pulse process時のパワー投入の履歴。赤が投入パワー(Pin_f)、青と緑がそれぞれCCGのモニター値(warm部、Cold部)。

pulse幅を広げることでprocessのpower levelが少し下がり、再度processが必要であった。たとえば、図6の30us,5Hzでのpower投入時では10usですでにprocessが終わっていた70kW levelでCold窓及びwarm窓が2次電子の成長により、1×10⁻⁴ Paまで悪化し、そこから100kWまでは再

度 process が必要であった。その際の arc sensor の信号を図 7 に示す。図 7 に見られるようにアークセンサーの信号の一部は power 投入から 10us では反応が見られず、その後遅れて arc の信号が見られた点である。特にこの反応は徐々に後退していき、process が進んでいる様子が見られた。最終的にはこの信号が power 投入時も無くなっていき、真空も良くなる様子が見られた。最終的に 200us, 20Hz の pulse process を行い、105kW の peak power に到達した。その際にはアークセンサーからの全ての信号は無くなり、真空も良いレベルで落ち着いた。

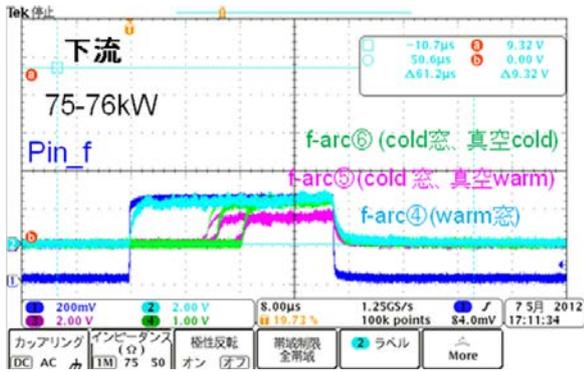


図 7 : 30us 5Hz での pulse process 時の Pin_f と下流のアークセンサの信号の様子。(Pin_f=76kW)

その後、pulse 幅をさらに広げていった。但し、200us 以上の pulse 幅での power 投入は process をメインに行わず、ある程度の power 投入レベルで 1 時間 power レベルが keep できるかの確認を行い、pulse 幅に対する keep 出来る power レベルの調整を行った。

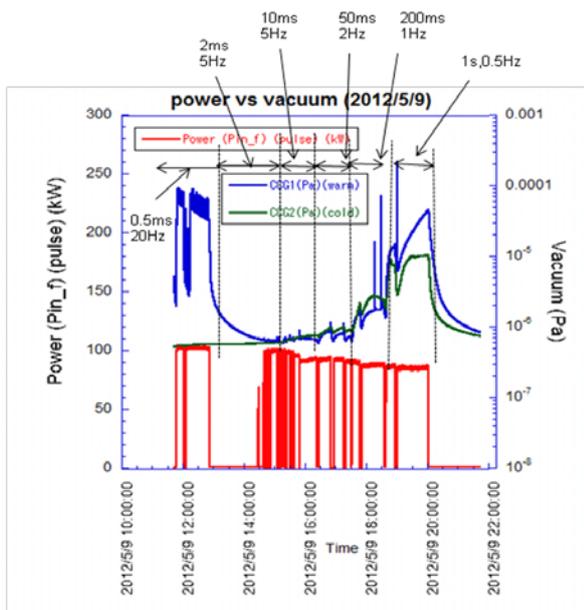


図 8 : 0.5ms 以上の pulse process 時の power 投入の履歴。赤が投入 power (Pin_f)、青と緑がそれぞれ CCG のモニター値 (warm 部、Cold 部)

図 8 が pulse 幅をさらに広げた時の power 投入履歴である。0.5ms, 2ms, 10ms, 50ms, 200ms, と pulse 幅を広げて行き、最終的に 1s, 0.5Hz の power 投入を行った。pulse 幅を広げるにつれ、1 時間 interlock がかからず keep 出来るレベルは低くなり、1s, 0.5Hz で 1 時間アークセンサーの反応なしで、keep 出来るレベルは到達 power レベルは 85kW であった。結果として、Duty 50% 1s もの long pulse で 80kW 以上の power 投入が可能であり、ERL の要求が満たされた。

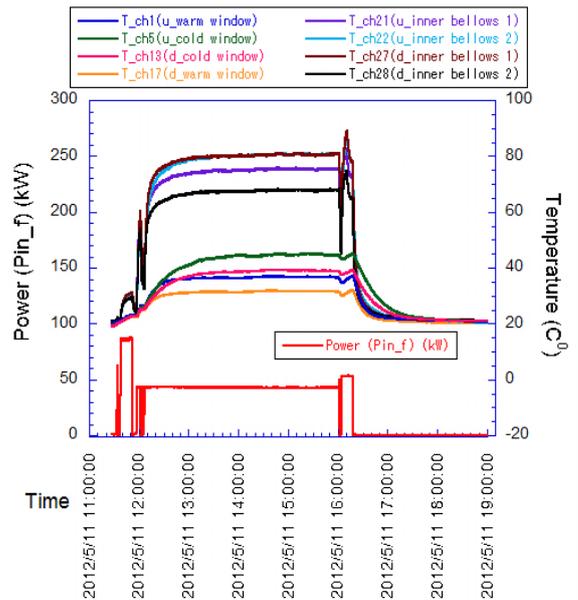
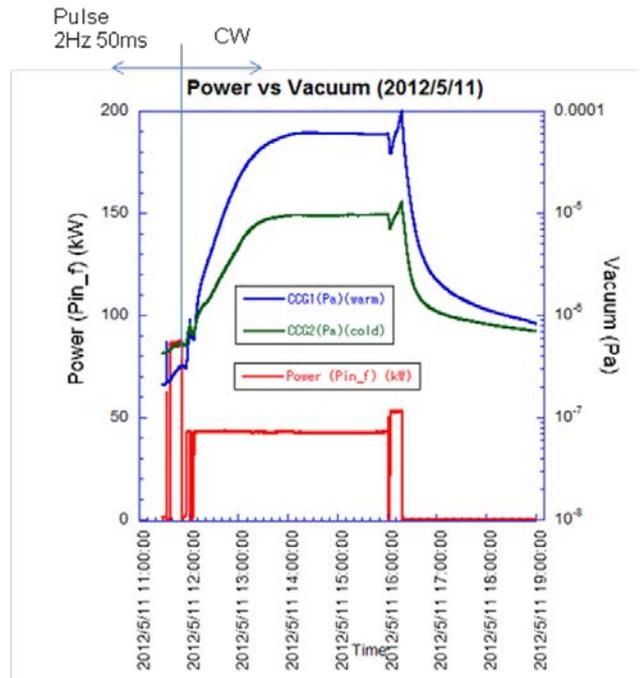


図 9 : 40kW CW power 投入の履歴。(上)投入 power (Pin_f) と真空のグラフ。(下) 投入 power と温度上昇のグラフ。

最終的に熱負荷のテストも兼ね、CW で 40kW のパワー投入を長時間行った。図 9 がその時に結果である。最初に確認のため、2Hz 50ms の pulse で 80kW まで投入ののち、CW で 43kW のパワーと投入。4 時間パワーが keep 可能であり、真空の値が 1×10^{-4} Pa 以下で安定した後、減少することを確認した。図 9 (下) にその際のカプラーの温度上昇を示している。青(ch1)、緑(ch5)、紫(ch21)、水色(ch22)がそれぞれ 2 号機の Cold 窓、warm 窓、内導体ベローズの 2 か所の温度上昇を示している。また、ピンク(ch13)、橙色(ch17)、茶色(ch27)、黒(ch28)がそれぞれ 3 号機の Cold 窓、warm 窓、内導体ベローズの 2 か所の温度上昇を示している。窓の温度は外部に熱電対を取り付けており、温度上昇は外部のファンの強制空冷により最大、40°C 程度までしか温度が上がらない。一番温度上昇が見られた部分は、内導体のベローズ部であり、43kW 投入時では室温(20°C)から 80°C($\Delta T=60^\circ\text{C}$)まで温度が上がっている。但し、言い換えるならば、内導体は 120l/min の窒素ガスの強制空冷のおかげで、温度上昇が $\Delta T=60^\circ\text{C}$ で抑えられており、急激な温度上昇はないことが分かる。その後、50kW にパワーを増加したが、外部冷却が足りず、真空が 1×10^{-4} Pa 以上となり、インターロックがかかり、20 分程度しかパワーを keep できなかった。cryomodule 挿入後、カプラーは液体窒素により外部冷却されるため、50kW (定在波で 25kW) 程度のパワー投入は可能と思われる。熱負荷テストとしても ERL の要求を満たすことがわかった。

これらのテスト後、再度真空リーク check を行ったが、セラミック窓の割れや窓からのリークは観測されなかった。

3. まとめと今後

ERL 用主ライナック用に実機 2 号機、3 号機の 2 台を製作。定格 20kW の定在波のパワーレベルと同等の 80kW 以上の進行波によるカプラーの process を行うべく、CW 1.3GHz 300kW の klystron を用いた 2 台のカプラーを組み合わせたテストスタンドを製作し、ハイパワー試験を行った。

最初に 10us, 5Hz の pulse process を行い、pulse で最大 105kW(20Hz, 200us)、また 1s, 0.5Hz の long pulse で 85kW の進行波のパワーを 1 時間 keep 可能であった。CW 運転では主に熱負荷の check のため、43kW までパワーを投入。内外冷却下で 4 時間 keep 可能であった。温度上昇は内導体で最大 80°C であったが、この温度上昇で抑えられていることがわかった。Total の process 時間は 34 時間であった。

Fiber を用いたアークセンサーはセンサーモジュールの改良により、効果的に interlock として働いた。特に反応速度は 1us 程度であり、cERL での運転に十分な仕様であった。

パワーテスト後もセラミック窓の割れは見受けられず、今後は cERL 用の主空洞の cryomodule にインストールされ、空洞へのパワー投入に用いら

れる予定である。

4. 謝辞

ハイパワーテストスタンド製作に当たって 1.3GHz 300kW Klystron 及び low level 系の準備をして頂きました RF Grp の三浦氏、福田氏、道園氏、荒川氏、中島氏に感謝いたします。特にアークセンサーに関して、色々、改良を一緒に行いました矢野氏に感謝いたします。テストスタンドでのパワー校正作業を行った久保氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] S.Sakanaka, et al. Proc of IPAC10, Kyoto (2010), p2338-2340
- [2] K.Umemori et al., Proc. of SRF2009 Workshop, Berlin, (2009) p355.
- [3] H.Sakai et al., Proc. of IPAC10, Kyoto, (2010) p2953-2955.
- [4] 阪井寛志, 他: 「ERL主ライナックのための入力カプラーの開発現状 -30kW IOTを用いたカプラコンポーネントテスト-」, 第6回加速器学会プロシーディングス, 東海, p866-868 (2009).
- [5] 篠江憲治, 他: 「ERL主ライナックのための入力カプラーの開発現状 -改良セラミック窓のハイパワー試験-」, 第7回加速器学会プロシーディングス, 姫路, p511-513 (2010).
- [6] 篠江憲治, 他: 「ERL主ライナックのための入力カプラーの開発現状 -試作カプラー1号機におけるハイパワー試験-」, 第8回加速器学会プロシーディングス, つくば, p1300-1302 (2011).
- [7] 加古永治, 他: 「STFベースライン超伝導空洞用大電力高周波入力結合器」, 第3回加速器学会プロシーディングス, 仙台 p136-138 (2006).
- [8] 矢野喜治, 他: 「cERL用アークディテクターの開発」, 第6回加速器学会プロシーディングス, 東海, p323-138 (2009).