

cERL における 300kW (CW) クライストロン組み込み

INSTALLATION OF A 300KW KLYSTRON AT CERL

石本 和也^{#, A)}, 阿部 慶子^{A)}, 花香 宣彦^{A)}, 安 和彦^{A)}, 明本 光生^{B)}, 荒川 大^{B)}, 片桐 広明^{B)}, 川村真人^{B)}, 設楽 哲夫^{B)}, 竹中 たてる^{B)}, 中尾 克己^{B)}, 中島 啓光^{B)}, 福田 茂樹^{B)}, 本間 博幸^{B)}, 松下 英樹^{B)}, 松本 修二^{B)}, 松本 利広^{B)}, 三浦 孝子^{B)}, 道園 真一郎^{B)}, Feng QIU^{B)}, Kazuya Ishimoto^{#, A)}, Keiko Abe^{A)}, Norihiko Hanaka^{A)}, Kazuhiko Yasu^{A)}, Mitsuo Akemoto^{B)}, Dai Arakawa^{B)}, Hiroaki Katagiri^{B)}, Masato Kawamura^{B)}, Tetsuo Shidara^{B)}, Tateru Takenaka^{B)}, Katsumi Nakao^{B)}, Hiromitsu Nakajima^{B)}, Shigeki Fukuda^{B)}, Hiroyuki Honma^{B)}, Hideki Matsushita^{B)}, Shuji Matsumoto^{B)}, Toshihiro Matsumoto^{B)}, Takako Miura^{B)}, Shinichiro Michizono^{B)}, Feng QIU^{B)}

^{A)} Nippon Advanced Technology Co. Ltd.

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

Abstract

Compact Energy recovery linac (cERL) had been built in March 2013, and beam commissioning at present time. Injector part of cERL consists of a buncher cavity and three 2-cell superconductive cavities(SCC). The main linac consists of two 9-cell SCC.

Rf sources of 8 kW solid-state amplifier (SSA) is used for the buncher cavity, 25 kW klystron for the Injector1, 300 kW klystron for Injector2 and 3. High power rf to the main linac cavities are provided from 8 kW SSA and 16 kW SSA, respectively.

The 300 kW klystron assembly was replaced on December 2014. The assembly consists of klystron, magnetic coil and stand frame. Installation was carried out with careful works to avoid any damages or injuries. This paper summarizes the process of klystron assembly installation, construction of the waveguide system, interlock, monitor setting and high power test.

1. はじめに

コンパクトエネルギー回収型線形加速器(cERL)の建設は 2013 年 3 月をもって工事が終了し、現在はビームコミッショニングを進めている^[1]。

cERL は Figure 1 に示すように入射部、主リニアック、周回部で構成される。入射部はバンチャー空洞と超伝導加速空洞(2 セル空洞 3 台)からなり、超伝導主リニアックは 9 セル空洞 2 台で構成されている。ここへ 1.3GHz、CW の大電力高周波を安定に各空洞へ供給をすることが高周波源の役割である。

バンチャー空洞は 8kW 半導体アンプ、入射空洞は第 1 空洞が 25kW クライストロン、第 2・第 3 空洞には 300kW クライストロン 1 台から大電力高周波が供給されている。主リニアック空洞は 8kW 半導体アンプと 16kW 半導体アンプを使用し大電力高周波を各々の空洞へ供給している^{[2][3]}。

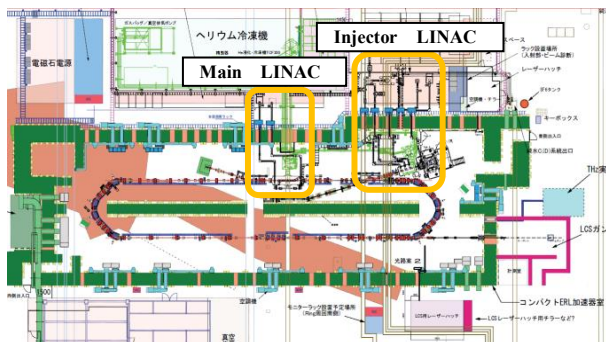


Figure 1: Layout of the compact ERL.

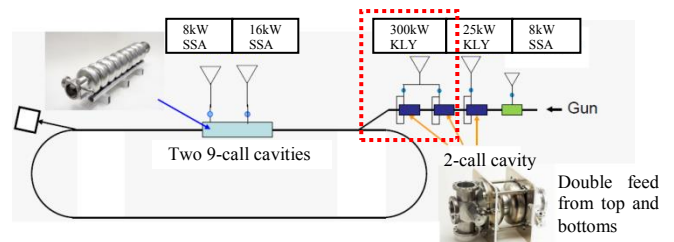


Figure 2: Composition of RF source for cERL.

2014 年 12 月に第 2・第 3 空洞に使用している 300kW クライストロン(Figure 2)の入れ替え作業を行った。本論文ではクライストロン組み込みから単体での電力試験について報告する。

2. クライストロン入れ替え

クライストロンは高周波源として、高効率・高利得で安定した高周波の供給が可能である^[4]。一方で、外部電源を必要とし、取扱いに専門的な知識や技術を要するため、取扱いを間違えると破損やクライストロンの寿命を縮めてしまう恐れがある。クライストロンの一般的な構造図を Figure 3 に示す。クライストロンは衝撃に非常に弱く、衝撃を与えたことによって①RF 出力窓部(セラミック製)のひび割れ、②ヒーターの断線が起り得る。組立、移動、設置に関わるすべての作業において繊細かつ慎重な作業が作業者に要求される。

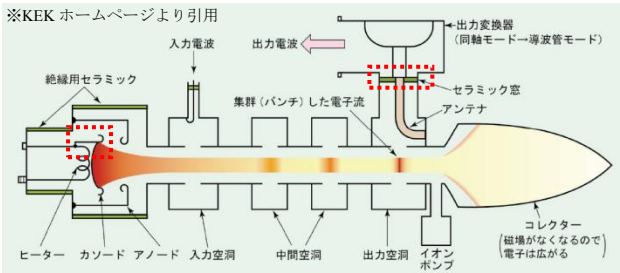


Figure 3: Common construction drawing of klystron [5].

2-1 信号・電力ケーブル類の処理

入れ替え作業はまず感電防止の為、クライストロン電源の上流側である 6.6kV の供給ラインの真空遮断器(VCB)をオフして VCB を引き出した後、コンデンサーに放電棒を設置してから作業を行った。この作業において重要なのは、高圧ゴム手袋等の保護具の着用、開放及び放電棒設置箇所の表示を明確にし、復旧時に短絡事故を起こさないようにすることである。また、電力ケーブルの取り扱い時にはクライストロン電源をオフしたからと過信せず必ず検電を実施することも重要である。

信号ケーブルは曲げによる負荷によって位相が変わらないよう、取扱い時には曲率半径を大きくとるなど細心の注意を払った。また接続部に埃などが入ると表示値に誤差が出る可能性がある為、取り外した後は専用のキャップを取付け、接続する際はエアダスターを使用し埃を飛ばしてから接続を行った。

2-2 導波管・冷却水ホース作業

cERL の L バンド連続波 1.3GHz には WR-650 のアルミ製矩形導波管を使用している。内寸は 165.10×82.55mm である。電力ピークパワーが低い為、SF₆ などの絶縁ガスは使用していない。導波管の切り離し作業前には操作盤に作業中の張り紙をしてから作業にあたった。これは作業中に誤って高周波源を投入されてしまうなどの事故を未然に防ぐ為である。組み込み及び取り外した導波管は内部や接合フランジ面に傷や汚れ、放電痕等が無いか確認を行った。再組み込みの導波管については必ずエアダスターでブローし、アルコールでフランジ面を清掃してから組み込みを行った。

cERL 棟では、シールド内の放射線で汚染される可能性のある冷却水を A 系統、汚染の可能性の低いシールド外を循環する冷却水を C 系統と称している。冷却水ホースの繋ぎ替えは C 系統の①コレクター、②電磁石、③クライストロンボディー+RF 出力窓の 3 系統について作業を行った。

特に注意しなければならないのはホース内の残圧によって冷却水が飛散し、電磁石コイルやオイルタンク内部に冷却水が混入することであ

る。これにより絶縁能力の低下を引き起こし、最悪クライストロンを故障させてしまう可能性がある。そのためヘッダー側のドレインバルブで圧力を抜き、冷却水の飛散を防ぐ為ウェスやフィルムシートをクライストロン周囲に養生して作業を行った。

2-3 クライストロンの安全な吊り上げ

クライストロン本体、電磁石、専用架台にはそれぞれ吊り上げ用のボルト穴があるがクライストロンの重心は RF 出力窓が重い為、そのまま吊り上げるとバランスを崩し、破損につながる。そこで今回は Figure 4 のような専用の吊り治具を製作、さらにチェーンブロックを用いて吊り治具と専用架台を固定し、吊り上げることで安全に作業を遂行できた。総重量はおよそ 1.3t であった。準備から移動完了まで、作業員 4 名で 2 時間程度を要した。

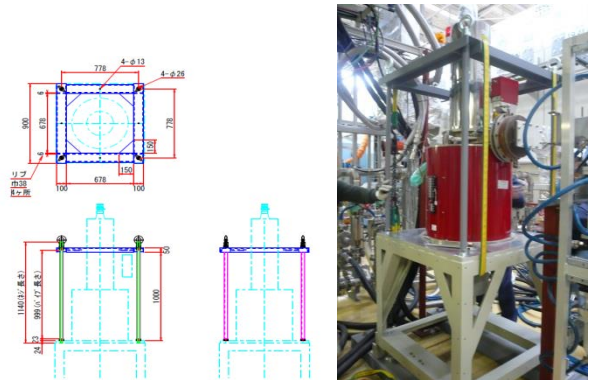


Figure 4: Hang carry jig of klystron.

3. 300kW クライストロンアセンブリ

クライストロンは Figure 5 のように①架台、②電磁石、③クライストロン本体の 3 つに分かれた状態で納品される。これらを①-②-③の順で組み上げた。クライストロン本体を組み込む際は、下部のフランジの径が電磁石の開口径と 10mm 程度しか調整代が無いので壁面に当たって衝撃を与えないように慎重に行った。その様子を Figure 6 に示す。

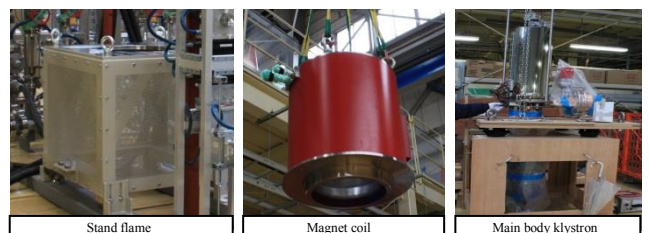


Figure 5: Three parts of preassemble klystron set.



Figure 6: Adjustment of clearance between main klystron and magnet coil.

組み込み作業が終了後、絶縁油を 150 注入し、脱泡の為 24h 置く事で組立を終了した。その後、撤去と逆の手順でケーブルの配線、冷却水ライン、電源を復旧し導波管をテストラインに繋ぎ込んだ。

4. インターロック動作試験

クライストロンの大電力試験を行う前にインターロックの動作確認を行った。安全に運転を行うために必須である。インターロックは大きく分けて①クライストロンのヒーターや電磁石に関連する LV 系、②高圧に関係する HV 系、③高周波出力に関係する RF 系の 3 つに分けられる。Table1 に 300kW クライストロンに関するインターロック一覧を示す。今回のクライストロン入れ替え作業に関わるインターロックの動作を確認した。

Table 1: Interlock List of 300kW Klystron

LV 系	HV 系
非常停止スイッチ 1-現場盤	盤内温度異常
非常停止スイッチ 2-制御盤	主回路 AC 過電流
オイル槽 1 油面異常	直流出力過電流
オイル槽 2 油面異常	直流出力過電圧
オイル槽 3 油面異常	オイル槽 1 温度異常
放電棒	オイル槽 2 温度異常
外部インターロック 1(IP I(H2))	オイル槽 3 温度異常
外部インターロック 2(Kly Mag P.S.1 V(H))	オイルポンプ過熱
外部インターロック 3(Kly Mag P.S.2 V(H))	オイル槽 1 オイル流量不足
外部インターロック 4(Kly Body Cool)	オイル槽 2 オイル流量不足
外部インターロック 5(Kly Mag Cool)	オイル槽 3 オイル流量不足
外部インターロック 6(Kly Heater V(H))	SCR 同期用電源異常
外部インターロック 7(Kly Mag Temp)	IGBT スイッチ異常
外部インターロック 8(Kly Mag Temp Interlock)	IGBT スイッチ用電源異常
	扉開放
	ヒーター電源インターロック
	外部インターロック 2(Kly Mag P.S.1 I(H.L))
	外部インターロック 3(Kly Mag P.S.2 I(H.L))
	外部インターロック 4(Kly Collector Cool)
	外部インターロック 5(IP I(H.L))
	外部インターロック 6(Temp Diff Monitor 1&2)
	外部インターロック 7(Kly Door)
	外部インターロック 8(Safety)
	ディスチャージセンサー異常
	VCB センサー異常

RF 系																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	MR-MPS CPU	MR-MPS OPT	MR-MPS OPT	MR-MPS OPT	MR-MPS OPT	MR-MPS OPT	MR-MPS TTL	MR-MPS TTL	MR-MPS TTL	MR-MPS TTL	MR-MPS TTL	MR-MPS TTL	MR-MPS TTL	MR-MPS TTL	MR-MPS TTL	MR-MPS TTL
0	POWER	30kW 放電棒	導波管1 水	ヒパック放電棒 水	/	/	Vac	ARC #3	KLY OUT	/	KLY Pf	/	/	MMS	LOCAL/REMOTE	
1	DATA	15kW 放電棒	導波管2 水	ヒパック放電棒 水	/	/	/	ARC #4	FBI p TCA	/	KLY Pb	/	/	/	LOCAL/OFF	
2		Ct 水	予備	/	/	/	/	ARC #5	/	/	/	/	/	インターロック出力	RF OFF	
3		KLY 水	HV ON	/	/	/	/	ARC #6	/	/	/	/	/	インターロック出力	RF OFF	

5. 電力試験

5-1 電力試験時のコンポーネント構成

電力試験の構成を Figure 7 に示す。高周波の電力測定について、導波管ラインの 2 ヶ所に方向性結合器(Directional coupler)を組み込み、3 種類の測定器を用いて計測した。ここで重要になってくるのが測定器への入力レベルの確認である。機器によって適正な入力レベルがあり、その入力レベルを超えたパワーが機器に入ると故障の原因になる。その為、ネットワークアナライザーを使用し方向性結合器の結合度、ケーブルロス、ローパスフィルター、分配器などを個々に測定し、最大出力パワーに応じてアッテネーターを組み込んだ。その後トータルのロスを計算し、測定機器の OFFSET 値へ入力した。測定器を Figure 8 に示す。

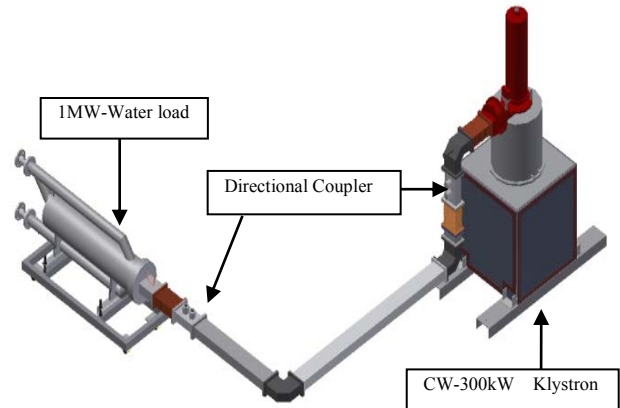


Figure 7: Waveguide layout of RF power test.

機器名	最大入力レベル (dBm)	最大出力 (300kW → dBm)	測定ロス合計 (dBm)	最大入力レベル (最大出力ー測定ロス合計)
Gigatronics 製 Power Meter	±23	84.77	(Pf)	(Pf)
			70.105	14.665
Mini Circuits 製 USB Power Meter	±20		(Pb)	(Pb)
			66.1558	18.6142
THAMWAY 製 VSWR Meter	-80 ~ +10		(Pf)	(Pf)
			98.3	-13.53
			(Pb)	(Pb)
			98.9	-14.13

Figure 8: RF measuring equipment and its property.

5-2 電力試験結果

KEK において電力試験を行い、使用上問題のないことを確認した。

クライストロンのパービアンスの計算式を(1)に示す。パービアンスはメーカー提示値 0.80~0.98 の範囲内であった。測定結果を Figure 9 に示す。

$$P = \frac{Ik}{Eb^{3/2}} \quad (1)$$

Eb : ビーム電圧
 Ik : ビーム電流
 P : パービアンス

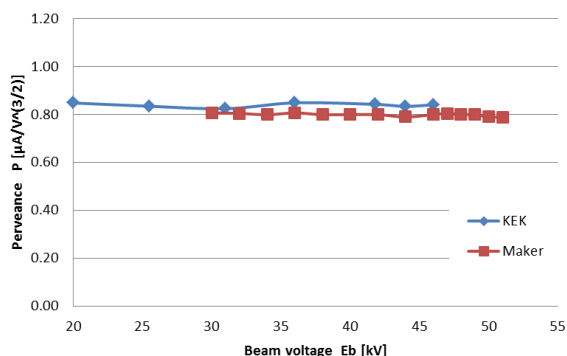


Figure 9: The result of 300kW klystron perveance property by KEK and maker.

クライストロンはビーム電圧 Eb により出力パワーが変化する。メーカーでは充電電圧 50kV で飽和出力 300kW まで試験を行っているが、KEK においては、ビーム運転時に数十 kW 程度しか出力しない事や、設備の都合上、充電電圧 46kV で試験を行った。その場合のメーカー飽和出力は 230kW であり、KEK においての試験では、Gigatronics 社製パワーメータの表示値 Pf=210kW で、おおむねメーカー試験と同様の結果が得られ、矛盾の無いことを確認した。

入出力特性のデータを Figure 10 に示す。1MW ウォーターロードの冷却水の温度差と流速をパラメータとして電力を算出した値(カロリメトリック法)と Gigatronics 社製パワーメータの読み値をプロットした。

ウォーターロードには 2 ポートの水晶温度計を使用した。取り付け箇所は Figure 11 の冷却水 IN・OUT 部の 2 か所に設置し温度をモニターした。流量計は最大流量 500ℓ/min のフロート式流量計を使用し、試験時の流量は 350 ℓ/min であった。

カロリメトリック法で計算した値と Gigatronics 社製パワーメータの表示値に差が生じているが、これはウォーターロードへ供給している冷却水の流量が

多少変動していたことと、パワーセンサーの非線形性などの誤差から生じていると考えられる。

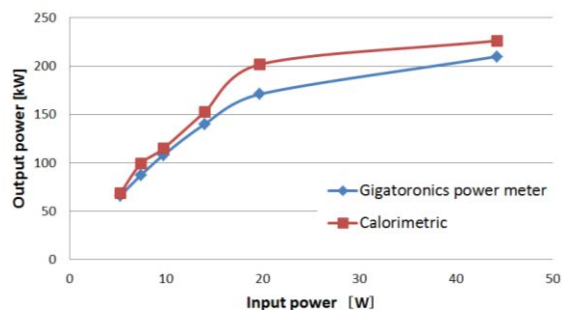


Figure 10: Comparison of the result of power meter and calorimetric Input-output characteristics.

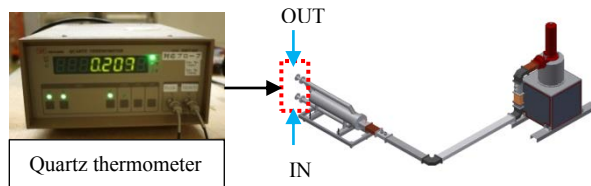


Figure 11: Quartz thermometer for calorimetric power measuring.

6. まとめ

今回 300kW 連続波クライストロンの入れ替え、動作試験を行い、現在ビームコミッションで使用しているが、安定に運転できている。

今後も cERL の将来計画に沿って、高周波源設備の増設が考えられるのでクライストロンの移設や設置、各作業においての手順書の整備を順次進めていき、安全かつ迅速に作業を遂行できるような体制を整える必要がある。

また電力試験における RF 電力測定で取り入れている、カロリメトリック法の精度向上の為、冷却水の流量の安定度をどのようにして改善するかが今後の課題である。

参考文献

- [1] 坂中章吾, 他, “コンパクト ERL 入射部の建設と周回部の建設状況”, Proceedings of the 10th PASJ, Nagoya, Aug. 3-5, 2013 SUP027.
- [2] 三浦孝子, 他, “cERL 入射器の高周波システム”, Proceedings of the 10th PASJ, Nagoya, Aug. 3-5, 2013 SUP051.
- [3] 花香宣彦, 他, “cERL における大電力分配系の構築”, Proceedings of the 11th PASJ, Aomori, Aug. 9-11, 2014 SUP057.
- [4] 福田茂樹, 他, “加速器と電子管技術”, Proceedings of the 10th PASJ, Nagoya, Aug. 3-5, 2013 SUOTL1, MOOTL1.
- [5] <http://www-acc.kek.jp/KEKB/explanation/klystron.pdf>