

## c E R Lにおける大電力分配系の構築

### CONSTRUCTION OF RF DISTRIBUTION SYSTEM AT C E R L

花香 宣彦<sup>#,A)</sup>, 阿部 慶子<sup>A)</sup>, 石本 和也<sup>A)</sup>, 植武 優悟<sup>A)</sup>, 柴田 篤志<sup>A)</sup>, 吉田 哲郎<sup>A)</sup>,  
明本 光生<sup>B)</sup>, 荒川 大<sup>B)</sup>, 片桐 広明<sup>B)</sup>, 竹中 たてる<sup>B)</sup>, 中島 啓光<sup>B)</sup>, 福田 茂樹<sup>B)</sup>, 松下 英樹<sup>B)</sup>,  
松本 利広<sup>B)</sup>, 三浦 孝子<sup>B)</sup>, 道園 真一郎<sup>B)</sup>

Norihiko Hanaka<sup>#,A)</sup>, Keiko Abe<sup>A)</sup>, Kazuya Ishimoto<sup>A)</sup>, Yugo Uetake<sup>A)</sup>, Atushi Shibata<sup>A)</sup>, Teturo Yoshida<sup>A)</sup>,  
Mitsuo Akemoto<sup>B)</sup>, Dai Arakawa<sup>B)</sup>, Hiroaki Katagiri<sup>B)</sup>, Tateru Takenaka<sup>B)</sup>, Hiromitsu Nakajima<sup>B)</sup>, Shigeki Fukuda<sup>B)</sup>,  
Hideki Matsushita<sup>B)</sup>, Toshihiro Matsumoto<sup>B)</sup>, Takako Miura<sup>B)</sup>, Shinichiro Michizono<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Nippon Advanced Technology Co. Ltd.

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization(KEK)

#### Abstract

Construction of cERL as institution of Energy Recovery Linac has completed at March 2013, the present state is under beam commissioning. The injector of cERL consisting the photocathode DC electron gun and superconductive accelerating cavities (3 2-cells of cavities), superconductive main linac that is composed 2 cavities each of them has 9 cells. It needs stable supply of 1.3-GHz continuous radio frequency wave. 9 lines had consisted to supply rf that oscillated by the klystrons and the semiconductor amplifiers, a line for buncher cavity, 6 lines for injector superconductive cavities, 2 lines for main linac superconductive cavities through the L-band waveguides. Especially, considering running and maintenance, it was hard to install waveguide components efficiently to the limited space near the Injector cavity. Although it became hard work to build the components, it has run satisfactory as a result of making various great efforts. This paper introduces technical report of construction of rf power distribution system.

#### 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 ERL 開発棟では 3GeV ERL (エネルギー回収型線形加速器) のための加速技術確立を目指したコンパクト E R L (cERL) の建設が行われていたが、2013 年度末をもって建設工事が終了し現在はビームコミッションングが進められている<sup>[1]</sup>。

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。入射部ではバンチの繰返し周波数 1.3GHz(CW)の高輝度電子ビームを 500kV 光陰極直流電子銃を用いて生成し常伝導バンチャー空洞 1 台でバンチを圧縮後、2 セルの超伝導加速空洞 3 台で約 5MeV までビームを加速する。その為、入射部は計 4 台の空洞へ 1.3GHz の高周波 (RF)を安定して供給することが必要である。加速されたビームは合流部を通じて周回部に入射され主リニアックで 9 セルの超伝導加速空洞 2 台により約 35 MeV まで加速される。その後、周回部を 1 周したビームは主リニアックに戻り 5 MeV まで減速してビームダンプに捨てられる。このことから cERL での RF の役割は CW 1.3 GHz の RF を RF 源から各空洞へ安定的に供給することである。この計画のために RF 波源の整備、低電力高周波制御系(LLRF)の整備、大電力分配系の整備を行ってきたため、現在順調に RF 運転が遂行されている。本論文では RF 源からの大電力分配系の構築と問題点について報告す

る。

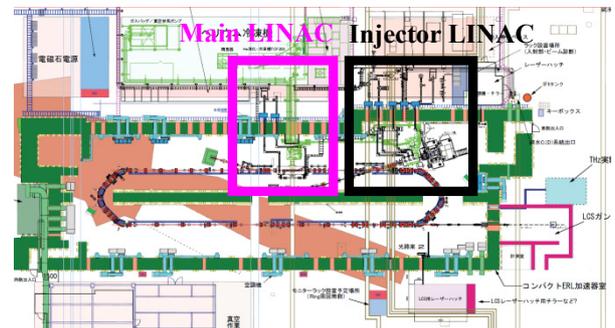


Figure 1: Design layout of the Compact ERL.

#### 2. cERL の RF 構成

当初の cERL の RF 構成は Figure 2 のようなものを考えていた。そのパラメーターは Table1 に示す<sup>[3]</sup>。この計画に従って 20kW、30kW の IOT 等を購入し使用したが、動作が不安定であったためと最近の技術的進展から半導体アンプに切り替えている。現在の RF 源の構成は Figure 3 に示す通りである。入射器の 3 つの超伝導空洞は、2 つのカップラーからフィードされる。また、大電力クライストロンが 1 台しかないので、空洞 2 と空洞 3 は 1 台のクライストロンから電力が分岐されベクターサム制御を行っている。

<sup>#</sup> nat-hana@post.kek.jp

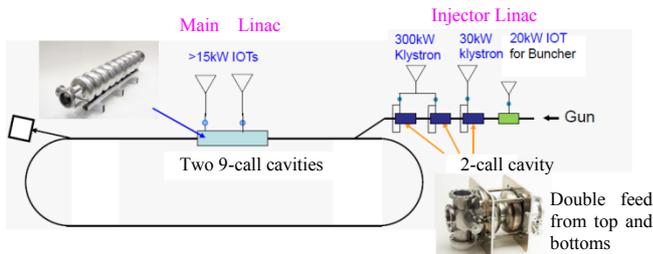


Figure 2:Composition of RF source for cEERL.

Table 1 : Parameter of RF source (35MeV).

	Unit	Buncher	Inj-1	Inj-2	Inj-3	ML-1	ML-2
type of cavity		NC	SC	SC	SC	SC	SC
acceleration voltage	MV	0.14	1	2	2	15	15
$Q_L$			$5 \times 10^5$	$2 \times 10^5$	$2 \times 10^5$	$2 \times 10^7$	$2 \times 10^7$
phase of beam	degree	-90	-15 to -30	-10	-10	0	0
requested power	kW	4.5	10	37	37	11	11
output power	kW	6.2	17	122	11	11	11
RF source		IOT	Klystron	Klystron	IOT	IOT	IOT
Max power	kW	20	30	300	>15	>15	>15

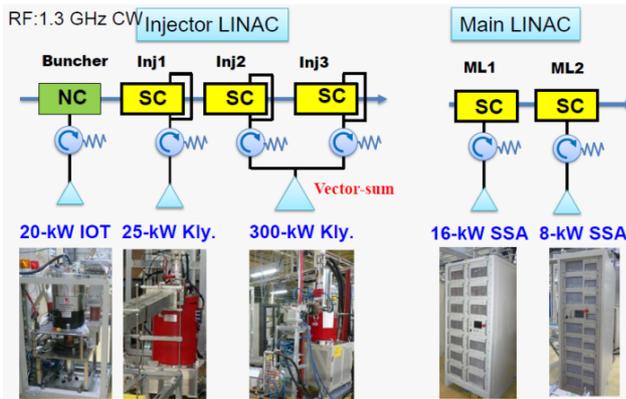


Figure 3 : RF source of cEERL.

### 3. 大電力分配系構築

#### 3.1 入射部の分配系構築

入射部は Figure 4 に示すように加速器室外(シールド外)にある 3 台の RF 源で生成した RF を WR650 導波管を通じて加速器室内(シールド内)の各空洞インプットカップラー計 7 箇所に分配する。入射部の構築において重要なことは以下の 2 点である。①各空洞の 2 フィートの位相を合わせる。Buncher ライン以外の Inj-1、Inj-2、Inj-3 ラインはそれぞれ 2 台のカップラーで上下から供給して加速電場の対称性を高めている。このことから、大電力分配系の設計段階から Inj-1、Inj-2、Inj-3 ラインについては同位相で RF パワーを供給することが重要だった。まず、RF 源からのパワーをマジック T (Figure 5 参照)で 2 分岐してほぼ同位相のまま上下カップラーへ分配する。導波管敷設の距離を事前に計算して同じ電気長になるように上下の導波管を配置する。しかしながら、カップラーの個体差などがあるので電気長を ±30 mm 可動できる機構を設け ±33.5° の位相調整が可能となるような位相器 (Figure 5 参照) を新規製作して組込んだ。この位相器は U リンクを介してフレキシ

ブル導波管の長さを変えるものである。Inj-2、Inj-3 についてはベクターサム制御により 300kW クライストロン 1 台で励振する構成となっているので、その電力分配は、RF 源からの電力をまずシールド外のマジック T で 2 分岐し、更にシールド内のマジック T で 2 分岐する機構となっている。つまり 4 ラインを構築し、各々に位相器を接続して Inj-2 と Inj-3 の位相差を調整できるようにしている。構築後の位相測定で確認したところ大きな誤差も生じることなく位相器の中心付近の僅かな調整範囲に収まる結果を得た。

②空洞からの反射に対する RF 源の保護。空洞からの反射波により RF 源が損傷を受けた場合、RF 源は高価であり、予備品が無いことからビーム試験のスケジュールへの悪影響も懸念される。特に Inj-2、Inj-3 ではパワーの大きい 300kW クライストロンを RF 源としていること、またマジック T で 2 分岐を 2 回繰り返す点を考慮して各 RF 源に適した仕様のサーキュレータ (Figure 5 参照) を RF 源直後に設置した。サーキュレータの第 3 ポートにはウォーターロード (Figure 5 参照) を接続した。また、マジック T にも方向性結合器やウォーターロードを接続することで分岐点でのパワーの測定や反射波の吸収ができた。まとめると、今回入射部で構築した導波管の総距離は Buncher ラインが 21.5m、Inj-1 ラインが 30.281m、Inj-2 ラインが 33.006m、Inj-3 ラインが 35.766m であり、導波管総数 202 個で構成した。

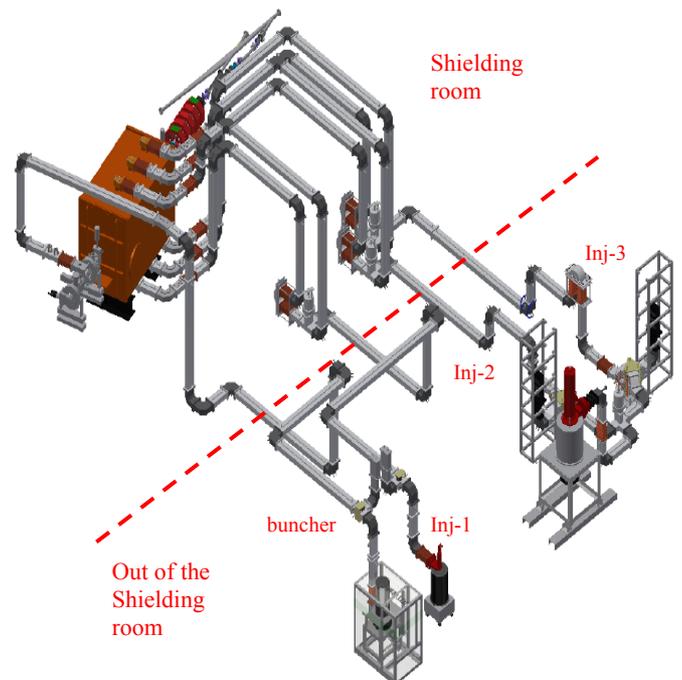


Figure 4: Outline of Injector Linac.

【位相器】

Uリンク 1 台に 2 台のフレキシブル導波管を接続して駆動機構によりフレキ部を伸縮させる構造。



【マジック T】

RF 入力を 2 方向に分岐して均等に出力する。反射波はウォーターロードを用いて吸収する。4 ポート構造。



【サーキュレーター】

Buncher の RF 源直後に敷設。反射をウォーターロードを用いて吸収。3 ポート構造。日本製。



【サーキュレーター】

Inj-1 の RF 源直後に敷設。ロシア製



【サーキュレーター】

Inj-2、Inj-3 の RF 源直後に敷設。3 ポート構造。日本製。



【ウォーターロード】

Inj-1、Inj-2、Inj-3 のマジック T に敷設。日本製。



Figure 5: Phase shifter, magic T, circulator, water load.

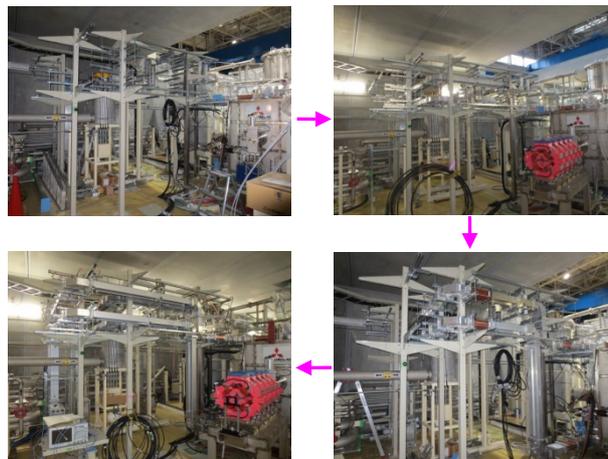


Figure 7: Process of Injector Linac (inside).

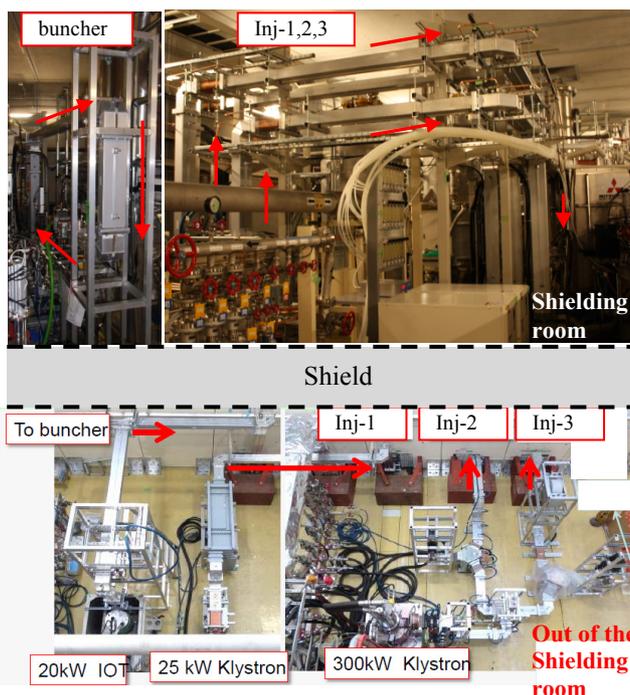


Figure 8: Completed Injector Linac.

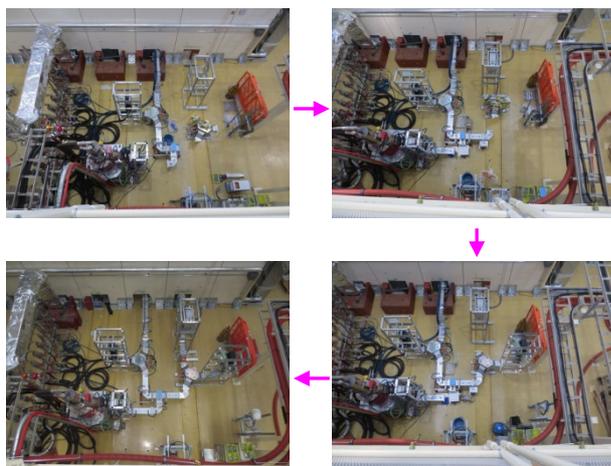


Figure 6: Process of Injector Linac (outside).

3.2 入射部導波管構成作業における問題点

入射部への導波管組込については 2 つの難しい状況があった。1 つ目は Figure 9 で示すように狭いスペース内に大量の導波管を敷設するため、導波管の組込作業が困難であったこと。特にシールド内の空洞付近では作業スペースが限られた。Inj-1、2、3 の入力カップラーに組み込む場合、カップラーセンター同士の間隔が 426 mm、導波管同士の隙間が 200 mm 程度であった。下ラインの高さは 0.5m に導波管 3 ラインを配置させる。平行する上ラインの高さは 2000~2500 mm に導波管 3 ラインを配置する。高さ制限や幅の制限がある中で、数多くの導波管を定位置

に配置することは非常に困難を極めた。導波管を敷設する順番を間違えると、違う導波管が干渉してしまいフランジの繋ぎ合わせを幾度となく繰り返しながら完成させた。足場もあまり確保できない状況下で不安定な姿勢のまま導波管を正確に繋ぎ合わせるには、事前によく準備をしかつ状況把握をきちんとすることが重要であった。例えば、ボルト・ナット・工具等、使用状況に応じて適正工具を準備しておくことや、組み込む導波管の準備を事前に用意することなどである。また、補助作業者と作業の流れの中でお互いの状況を確認しながら進めることも重要で、そのような注意を重ねることで難しい作業も無事故で終わることができた。

2 つ目の難しさは、導波管の固定方法と固定位置に困難を極めたことである。上記でも挙げたようにスペース確保が非常に難しい中で、各々高さの違う導波管をどのように保持して固定するか、手順も含めて難しかった。導波管を固定する際に導波管素管部を固定してしまうとフランジ面と素管の溶接部に負荷がかかり亀裂等の影響が生じる場合がある。その為、全ての保持箇所はフランジ側面とし、支持する間隔に応じて補助的に素管をサポートする事を原則とした。Figure 7 で判るように支柱材を天秤形状にし、支柱間をダクターチャンネルで橋渡することで、どの位置でもフランジ面の固定が可能となった。常に準備の段階から導波管の敷設位置に応じたサポート材を考案し、モックアップを進めながら確認することを幾度となく実施した。その結果、狭いエリアや高所な場所でも導波管を配置でき、状況に応じた固定方法を確立することができた。完成後は当初考えられていたスペースよりも広く確保できたことから、以降のメンテナンスも十分に行えている。



Figure 9: State of Injector Linac.

### 3.3 主ライナックの分配系構築

Figure 10 に示すように、シールド外に配置された 2 台の半導体アンプから生成された RF は、WR650 導波管を通じてシールド内の各空洞インプットカップラ 2 箇所分配到される (Figure 11 参照。)主ライナックの導波管ラインはビームラインの上流側を ML-1、下流側を ML-2 ラインとして構築している。

導波管の総距離は ML-1 ラインが 18.51m、ML-2 ラインが 16.895m、導波管総数 62 個で構成した。主ライナックの構築は入射部に比べて大きな困難は生じなかったが、導波管組み込み作業は慎重に行った。また、入射部同様にサーキュレーターとウォーターロードを設置して RF 源保護に努めた (Figure 12 参照)。

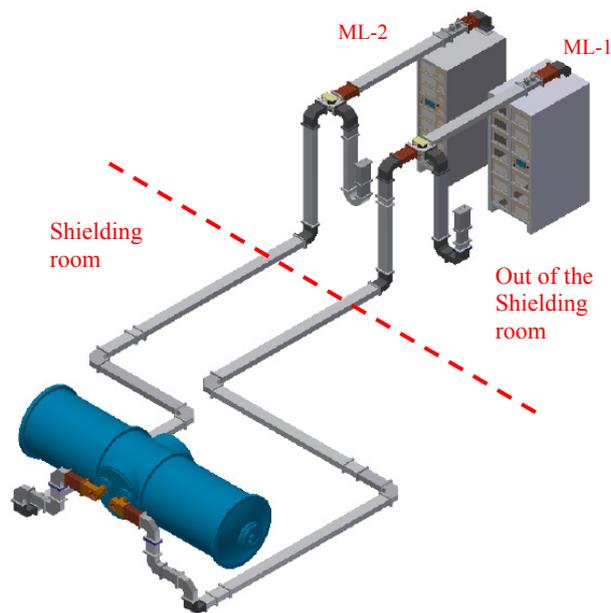


Figure 10: Outline of Main Linac.



Figure 11: Coupler of Main Linac.

【サーキュレーター】  
ML-1、ML-2 の RF 源直後に敷設。反射をウォーターロードを用いて吸収。3 ポート構造。日本製。



【ウォーターロード】  
ML-1、ML-2 のサーキュレーターに敷設。日本製。



Figure 12: Circulator, water load.

### 3.4 主ライナック構築後の状況

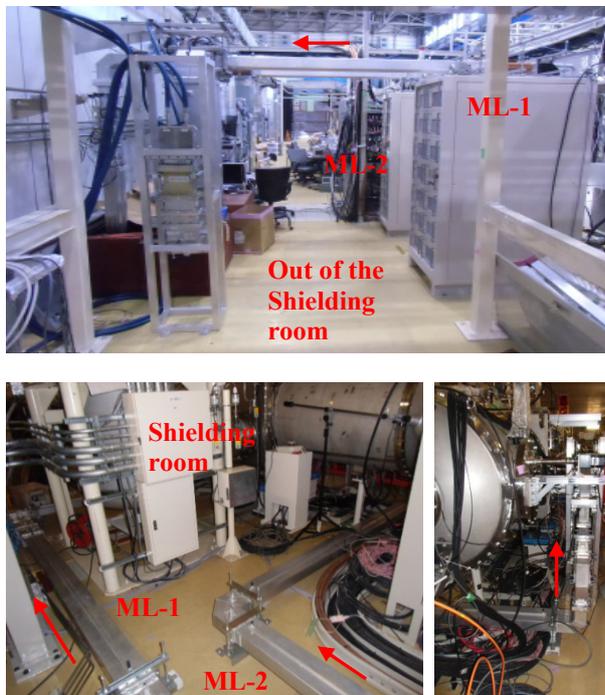


Figure 13: Completed Main Linac.

## 4. 今後への展開

cERL の大電力分配系については一段落した。当初の cERL の計画からは縮小されていることから、今後において増強する場合には、構築作業が必要となるかもしれない。現在は、RF 波源が安定に動作するように注意を払い、低電力高周波制御系についても力を注ぐ必要がある。また、予算あれば、テストベンチなどの整備が必要であると考えている。

### 参考文献

- [1] S.Sakanaka, et al., “コンパクト ERL 入射部の建設と周回部の建設状況”, Proc.10th PASJ, Nagoya, SUP027 2013
- [2] T.Miura, et al., “cERL 入射器の高周波システム”, Proc.10th PASJ, Nagoya, SUP050 2013
- [3] T.Miura, et al., “KEK における cERL の高周波源”, Proc.7th PASJ, Himeji, THPS049 2010