

# PRESENT STATUS OF THE ILC CONVENTIONAL FACILITY VALUE ENGINEERING

Atsushi Enomoto<sup>1</sup>, Masanobu Miyahara  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801

## Abstract

The Global Design Effort (GDE) was established in August 2005 to design an international linear collider (ILC). The reference design report (RDR) was published in February 2007 with construction costs. This baseline design is to be reviewed during 2009 on the basis of value engineering (VE). This paper reports activities of the conventional facility and siting (CFS) group in GDE, especially, proposals on single tunnel configuration which is one of the main tasks for ILC VE.

## ILC施設VEの現状

### 1. はじめに

ILCは、重心系での衝突エネルギー500 GeVの衝突型電子陽電子線形加速器（リニアコライダ）である。国際協力による建設を前提として、2004年にInternational Technology Recommendation Panel (ITRP)による技術選択が行われ、主加速器には1.3 GHzの超伝導加速空洞が用いられることになった。2005年に国際設計チームGDEが結成され、2007年2月、コストを含む基本設計書RDR[1]が発表された。その後、Technical Design Phase (TDP)に入り、設計の見直しによるコストの低減、大量生産を目指したR&Dなどを行い、2012年までに、建設に向けた準備を整えるべく活動を進めている。

2008年11月、ChicagoのGDE会議において、プロジェクトマネージャ主導の“minimum machine”7項目の提案がなされた。そのひとつとして、次に述べるKlystron Clusterによるシングルトンネル方式の主加速器が提案され、コスト効果の概算が日米のチームから報告された。その後、Klystron Cluster方式に加えて、日本チームからDistributed RF System (DRFS)が提案された。2009年4月、つくばでのGDEの会合で、Accelerator Advisory Panel (AAP)によるレビューが行われ、日本チームは、日本のサンプルサイトにおいて、RDR、Klystron Cluster、DRFSの3つの比較を行い発表した。

GDEは2010年の初め、再度AAPのレビューを行い、TDP2 (2010-2012) のため、RDRの設計を見直した新しい設計基準を確立しようとしている。そのたたき台、Straw-man Baselineとして、昨秋の提案を若干修正したSB2009が提案された。その内容は、以下の7項目である。

- ・ 加速勾配 (31.5 MeV/m) の再評価
- ・ 主加速器とRTMLのシングルトンネル化
- ・ 陽電子源の主加速器終端への移動
- ・ RF電力1/2削減

- ・ ダンピングリング周長1/2化
- ・ 1段BCS
- ・ 電子陽電子源、BDSを1つのトンネルに収容

2009年5月、Hamburgで行われたAccelerator Design and Integration Meeting (ADIM)では、これらの内容をRDRと比較し、そのリスク、長所短所などを議論した。また、9月28日～10月3日、米国アルバカーキで開催されるGDE会議までに、各エリアグループ、テクニカルグループからCFSグループへの情報を提供することが要請された。

### 2. RDRにおけるILC施設の基本仕様

#### 2.1 ILC加速器の特徴

施設設計の立場からILCについて見てみよう。以下の図表に示されるように、ILCは全長約31 kmの直線形の加速器（リニアック）である。KEKの敷地は東西約1 km、南北約1.5 kmなので、長さは約20倍ある。将来衝突エネルギーを1 TeVまで増強するため、敷地の長さは更に全長約50 kmまで必要とされている。一方、総使用電力は衝突エネルギー500 GeVで約200 MW余りであり、KEK受電能力の2-3倍程度である。このことから明らかなように、施設建設の中心は技術的にも、コストの面でも土木にある。

ILC加速器は、電子、陽電子源、ダンピングリング、電子陽電子ビームの衝突エリアBDS (Beam Delivery System) を敷地の中心部4.45 kmに配置している。電子源から出た電子は5 GeVダンピングリングでエミッタンス（ビームサイズと進行方向への向きの積）を小さくしたあと、敷地の端まで10数km輸送され、反転して主加速器でBDSに向かって250 GeV加速される。ダンピングリングから主加速器までの長いビーム輸送系をRTML (Ring To Main Linac) と呼んでいる。

<sup>1</sup> E-mail: atsushi.enomoto@kek.jp

陽電子加速器はやや複雑である。150 GeVまで加速された電子ビームをヘリカルアンジュレータと呼ばれるソレノイドコイルに通しガンマ線を放射させる。このガンマ線を金属標的に当てて発生させた陽電子を、ダンピングリングで低エミッタンス化し、もう一方の敷地の端まで輸送し、反転して陽電子用の主加速器で250 GeVまで加速する。

以上のように、ILCは電子・陽電子源、ダンピングリング、RTML、主加速器、BDSのエリアから構成される。電子リニアックと陽電子リニアックは平面図でみると14ミリラジアンで交差している。また、鉛直面でみると、主加速器だけは地球の曲線に沿って水平面上に設置される。残りの部分、両終端のRTMLやBDSは光学的な直線上に設置される。

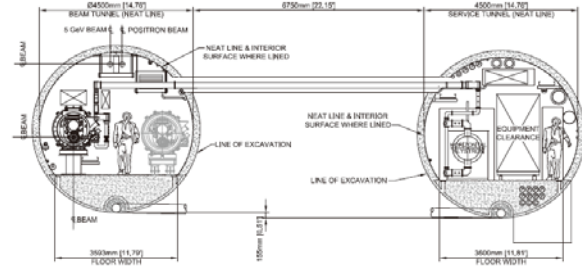


図2) 主加速器トンネル断面図

Parameter	Unit	
Center-of-mass energy range	GeV	200 - 500
Peak luminosity <sup>a)</sup>	cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	2 × 10 <sup>34</sup>
Average beam current in pulse	mA	9.0
Pulse rate	Hz	5.0
Pulse length (beam)	ms	~ 1
Number of bunches per pulse		1000 - 5400
Charge per bunch	nC	1.6 - 3.2
Accelerating gradient <sup>a)</sup>	MV/m	31.5
RF pulse length	ms	1.6
Beam power (per beam) <sup>a)</sup>	MW	10.8
Typical beam size at IP <sup>a)</sup> (h × v)	nm	640 × 5.7
Total AC Power consumption <sup>a)</sup>	MW	230

表1) ILCの基本パラメータ

## 2.2 主加速器トンネル

主加速器トンネルは全長約24 kmあるが、超伝導加速モジュールを設置するビームトンネルと高周波電源等を設置するサービストンネルの2本のトンネルからなる。SLAC (3 km)を代表とする既存のリニアックは、通常このように加速器室と電源室に分かれている。加速器は運転時には放射線を発生するので立ち入ることができず、熱いコンクリートや土でシールドされている。加速空洞やビームライン以外の装置は、できる限り加速器室とは別に、放射線によるノイズの影響や放射化を避けて設置されることが好ましい。また、こうすると、電源などは加速器の運転時にも調整や修理ができて便利である。短い加速器では少なくとも電源室は地上につくる。

RDRではビームトンネル、サービストンネルの直径はともに4.5 mで、2つのトンネルの間はトンネル直径の1.5倍隔てられた。この間隔は主として放射線シールドを考慮して決められた。2つのトンネル間は約500 mおきに連絡通路があり、非常の際には相手側トンネルへの脱出通路となる。

## 2.3 主加速器トンネルへのアクセス

RDRで取り上げたアジア、アメリカ (FNAL)、

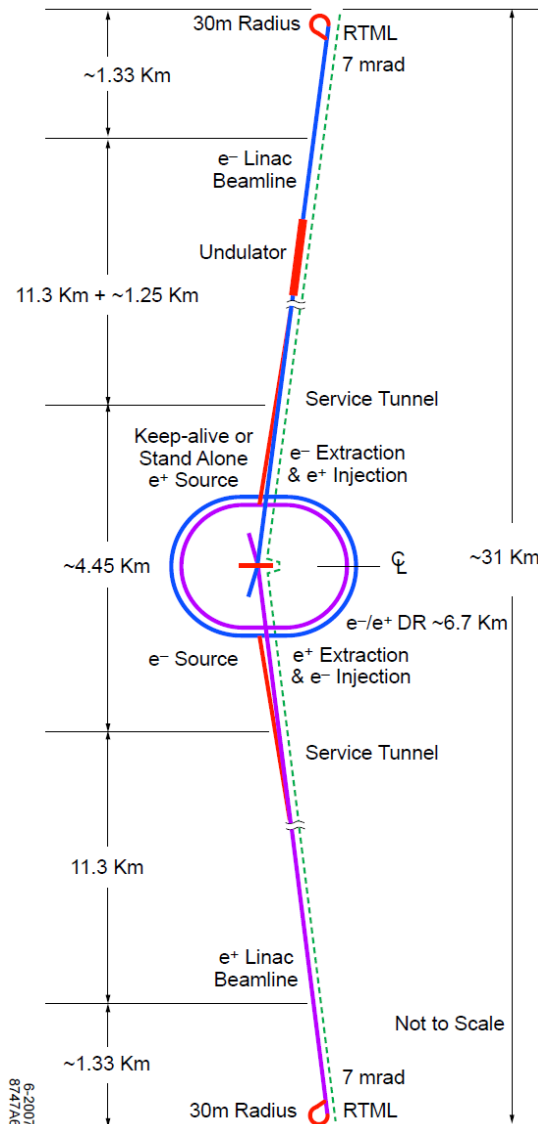


図1) ILCのエリアレイアウト

ヨーロッパ (CERN) のサンプルサイトでは、すべて100 m以上の地下深くにトンネルを設置した。地下10-20 m程度の浅いサイトはRDRでは取り上げず、TDRで検討することにした。このような深いトンネルへのアクセスは地上部が平坦なアメリカサイトでは縦坑を用いる。一方、地上部が山岳で凹凸の激しいアジアサイトでは、既存の道路から勾配が10%以下の斜坑でアクセスする。もちろん、アジアのサイト

でも中央キャンパスの実験室へのアクセスや、トンネルが既設道路の比較的浅い直下に位置する場合は縦坑を選択する。アジアのサイトの場合、斜坑の平均の長さは1 kmを超えることになった。しかし、縦坑に比べて斜坑の単価は安価なので、建設コストの差はあまりない。問題は、斜坑の場合、トンネルと地上アクセスポイントの距離が長くなることによって、地上の冷却塔と地下の冷却装置との間の冷却水や空調配管の管径、長さが大きくなることである。縦坑や斜坑のコストは高いので、できる限りアクセスポイント数を少なくし、約5 kmおきにした。図3で、アクセスポイントは1.0、1.1、1.2、2、3、4、5、6、7、10、11、12/C、13/Aの13か所である。

### 2.4 地下構造の掘削

トンネルの掘削方法には、Tunnel Boring Machine (TBM)を使う方法、発破と大型ドリルやシャベルなどを用いるNew Austrian Tunneling Method (NATM)がある。良質な岩盤にまっすぐなトンネルを高速に掘るにはTBMが適している。しかし、TBMは高価であり、5 km以上の長い距離を掘削しないと割高になる。また、悪質な岩盤だと身動きが取れなくなるトラブルも生じる。良質な岩盤に直径5 m程度のトンネルを5 km程度掘削するとき、掘削スピードは300-600 m/月、コストはきわめて大雑把

に勘定して100万円/mのオーダーである。通常良質な岩盤ばかり続くことはまれであり、いかに地質を知り、適切な対処をして掘削するかがポイントとなる。

複雑な地質やアクセストンネルのように地上から地下にむかって掘り進む場合はNATMが無難である。軟弱な地盤や水脈がありにより、TBMだと水没する心配がある。NATMの掘削コストはTBMに比べ一般的に安価だが、掘削スピードは100-200 m/月と遅い。

縦坑は加速モジュール運搬エリア、装置や人の運搬用エレベータ、非常階段、冷却、空調用パイプなどの設置エリアが必要なため、ILCの場合、直径が9-16 mと大きく、湧水や土圧の対策をしつつ徐々に掘り進むため、掘削スピードは20-30 m/月であり、コストも高い。

実験室（幅25 m、長さ120 m、高さ39 m）やアクセスポイント地下のホール（幅16 m、長さ49 m、高さ18 m）は、地下発電所や燃料貯蔵庫などで多く掘削されている大きさの地下構造物であり、硬い岩盤に掘削する場合は技術的には十分可能である。

### 2.5 トンネルへのRFユニットの配置

加速器の最少単位は9セル加速空洞である。9空洞が一つの冷凍容器（クライオモジュール）に収容される。マイクロ波は1台のクライストロンから3台のモジュールに供給される。これをRFユニットと

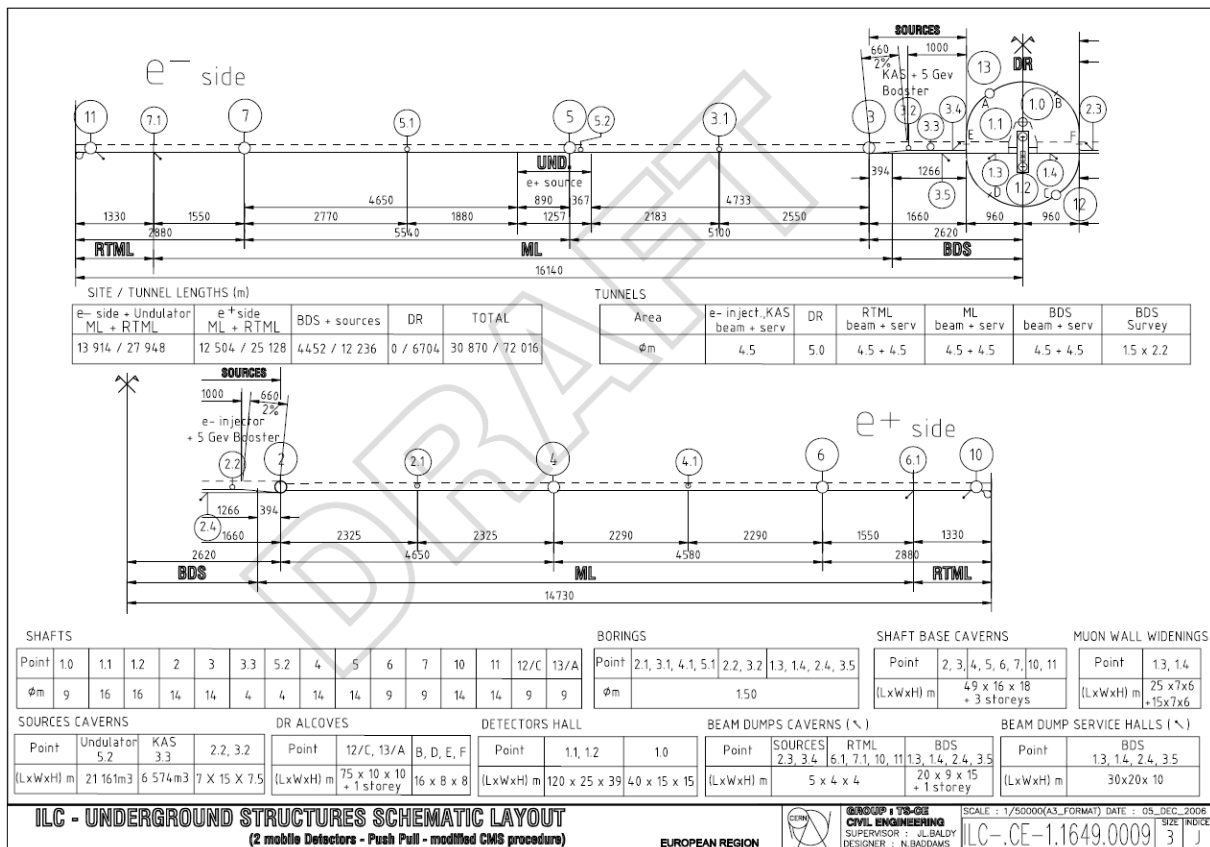


図3) ILC施設の基本寸法



呼ぶ。3台のモジュールのうち真中はビーム収束用の4極電磁石を収容するため8空洞である。

RFユニット4台で2K Heの最少供給単位である1ストリングを構成する。ストリングには2.5 m長のエンドボックス（常温部）が含まれる。1台の冷凍機は長さ約2.5 km、最大16のストリングス（64RFユニット）にHeを供給する。表3に、RFユニットの配置寸法とCFSグループでまとめた施設寸法の関係を示した。

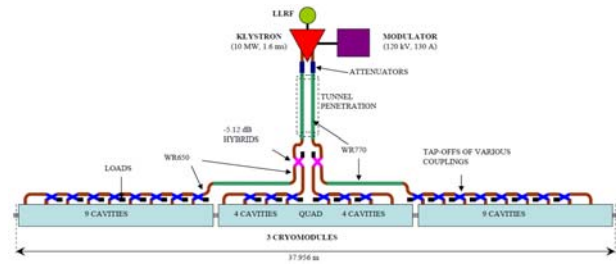


図4) RFユニット

2.6 電力の供給

サイト電力は、近くの275-500 kVの高圧幹線から導入し、中央変電所で66 kVに変圧し、サービストンネル内を各アクセスポイントの地下ホールに配電する。ここで、6.6 kVに変圧してサービストンネル内に配電する。6.6 kVは2系統あり、一系統はRF電源用で、高電圧開閉器（ring main unit）を通じて、38 m毎のRF電源に直接供給される。もう一系統は通常電力用で、2-K冷凍容器の単位（ストリング）である4 RFユニット（～152 m）毎に設置される変圧器によって、400/200/100 Vの低電圧に変換され一般機器に供給される。サイト総電力は216 MWである。装置別には、RF源が47%、冷凍システム17%、通常設備15%、電磁石12%、冷却設備8%、またエリア別にみると、主加速器が62%、ダンピングリング12%、陽電子源10%、RTML8%、BDS4%、電子源、ダンプがそれぞれ2%である。

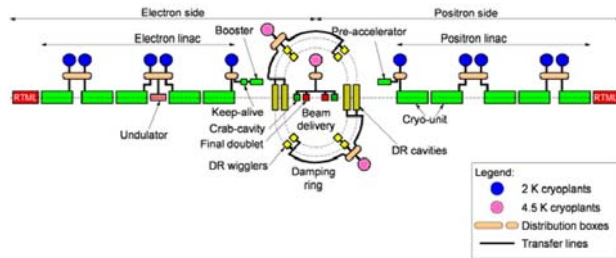


図5) 冷凍システム全体図

Area System	RF Power	Conventional Power				Emer Power	Total (by area)
		Conv	NC Magnets	Water Systems	Cryo		
Sources e <sup>-</sup>	1.05	1.19	0.73	1.27	0.46	0.06	4.76
Sources e <sup>+</sup>	4.11	7.32	8.90	1.27	0.46	0.21	22.27
DR	14.0	1.71	7.92	0.66	1.76	0.23	26.29
RTML	7.14	3.78	4.74	1.34	0.0	0.15	17.14
Main Linac	75.72	13.54	0.78	9.86	33.0	0.4	134.21
BDS	0.0	1.11	2.57	3.51	0.33	0.20	7.72
Dumps	0.0	3.83	0.0	0.0	0.0	0.12	3.95
Totals (by system)	102.0	32.5	25.6	17.9	36.9	1.4	216.3

表2) ILCの消費電力

2.7 装置冷却水

サイト電力216 MWのうち、冷凍機に使用される電力等を差し引いた、約180 MWの消費電力による熱負荷は、35℃の純水と6.6℃の冷水によって、それぞれ、150 MWと32 MW冷却される。6.6℃の冷水はラックの冷却とファンコイルによるサービストンネル空調に用いられる。冷却水システムは、

- ・地上の冷却塔と熱交換器・ポンプ
- ・アクセストンネル内一次冷却水配管
- ・アクセスポイント地下ホール熱交換器・ポンプ
- ・サービストンネル内2次冷却水配管
- ・4 RF毎の熱交換器・純粋装置・ポンプ
- ・3次冷却水配管

からなる。1次冷却水はグリコールを混ぜた不凍水

AS	RDR Cryogenic Layout								
	Shaft#	RF-unit nos		Cryogenic System		Dimension (m)			
		Σ	Σ	Requirements	CFS				
RTML	11	16	16	16	4 strings	619.796			
e- Linac		40			10 strings	1545.740	1549.566	1549.566	1550
	7				warm drift	3.826			
		64		160	16 strings	2471.684	2479.336		
					warm drift space	3.826		4646.198	4650
		56		282	14 strings	2163.036	2166.862		
					warm drift space	600.000	890.000	1257.000	1257
		5			undulator	290.000			
					warm drift space	367.000	367.000		
		58		122	13 std+2 sht strings	2241.448	2245.274		
					warm drift space	3.826		4720.784	4733
BDS		8	8	8	space for 3.5% more	368.600			394
					KAS, Booster, BDS				1266
					BDS, Damping Ring				960
		8	8	8	e- source, Booster, BDS				960
e+ Linac		64		278	16 strings	2471.684	2475.510		
					warm drift space	3.826		4646.198	4650
		56		238	14 strings	2163.036	2170.888		
					warm drift space	3.826			
	4				12 std+2 sht strings	2087.124	2094.776		
					warm drift space	3.826		4574.112	4580
		64			16 strings	2471.684	2479.336		
					warm drift space	3.826			
	6				10 strings	1545.740	1549.566	1549.566	1550
	40				4 strings	619.796			28210
RTML	10	16	16	16					

Cryomodule	12.652 m
End box	2.500 m
Warm drift space	7.652 m
RF unit	Cryomodule x 3 = 37.956 m
Standard String (4 RF or RF unit x 4 + End box =	154.324 m
Short String (3 RF units) RF unit x 3 + End box =	116.368 m

表3) RFユニット配置

で29.4℃で地下に配水される。2次冷却水は32.2℃の処理水、3次冷却水は35度で装置に供給されΔTが～11℃で戻る。戻り配管は熱絶縁される。

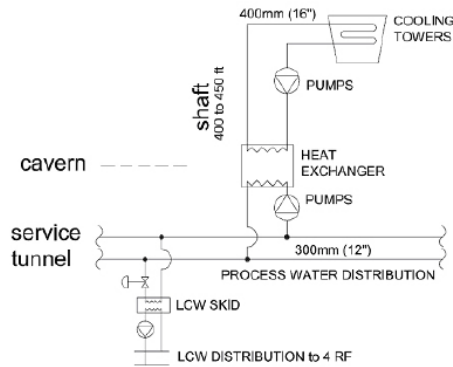


図6) 冷却系システム

Components	Tunnel	Total (kW)	Average (kW)	To Water (kW)	To Air (kW)
RF Charging Supply 34.5 KV AC-8 KV DC	service	4.0	4.0	2.8	1.2
Switching power supply 4kV 50kW	service	7.5	7.5	4.5	3.0
Modulator	service	7.5	7.5	4.5	3.0
Pulse transformer	service	1.0	1.0	0.7	0.3
Klystron socket tank / gun	service	1.0	1.0	0.8	0.2
Klystron focusing coil (solenoid)	service	4.0	4.0	3.6	0.4
Klystron collector/ body/windows	service	58.9	47.2	45.8	1.4
Relay racks (instrument racks)	service	10.0	10.0	0.0	-1.5
Circulators, attenuators & dummy load	beam	42.3	34.0	32.3	1.7
Waveguide	beam	3.9	3.9	3.5	0.4
Subtotal Main Linac RF unit (KW)			120		

表4) 主加速器RF熱負荷

### 3. シングルトンネルー今後の課題

#### 3.1 なぜシングルトンネルか

主加速器をビームトンネルとサービストンネルの2本にすることの長所は装置の放射線破壊やノイズによるトラブル、装置の調整や維持のほかに、非常時の避難路として片方のトンネルを使える長所もある。一方シングルトンネルにする長所は第1にコストである。RTMLも含めると25 km以上のトンネルが省略できる。トンネル単価を~100万円/m とすると250億円コストを削減できる。トンネル直径が大きくなる分等を考慮してもかなりのコスト削減が期待される。

#### 3.2 シングルトンネル方式の種類

サービストンネルの中で3分の2を占めるのがRF電源である。シングルトンネル方式には、DESYのTESLA/XFEL方式、GDE米国チームの提唱するKlystron Cluster方式、GDE日本チームの提唱するDistributed RF System (DRFS) [2]のほか、RDRの2トンネルを単純に1本にまとめる案も考えられる。これらはRF源の電力供給方法の違いによる。

TESLA/XFEL方式はパルスモジュレータの直流部分を地上に5 km毎にまとめ、ステップアップトランス以下を加速空洞とともに地下トンネルにおく。

Klystron Clusterはクライストロンまで地上に配置する。ただ、マイクロ波の減衰が大きいので電源は2.5 kmおきにまとめ、上下流両側に、1.25 km先までマイクロ波を供給する。RFユニット35台分のマイクロ波を合成し、最大350 MWを内径40 cm

の円形導波管で、32台のRFユニットに供給する。導波管でのマイクロ波損失は約10%ある。このKlystron Cluster方式は地上から地下へのアクセス距離が平均1.2 kmもあるアジアのサイトには不利である。マイクロ波の損失を10%に抑えるには内径60 cmの導波管が必要になり、オーバーサイズなので不要なモードによる余計な損失が出る可能性が増加する。導波管の温度差による膨張は $\Delta T$  10°C、1 km当り、12 cmにもなる。導波管を冷却したとしてもRFのon/offによる長さの制御は容易ではない。長さの変化を吸収する構造が必要である。

これに対して、日本のサイトに合ったマイクロ波の供給方式であるDRFSを日本側が提案し検討中である。これは、Klystron Clusterとは全く逆の方法でRDRの13分の1の電力のクライストロンを用いる。特長はクライストロンの電圧が低いためRDRのような大型のステップアップトランスが不要であること、1台のクライストロンから2台の空洞にRFを供給するため、導波管もシンプルで実装密度が高いこと、空洞電場のばらつきやトラブルへの対処が緻密になることなどがあげられる。

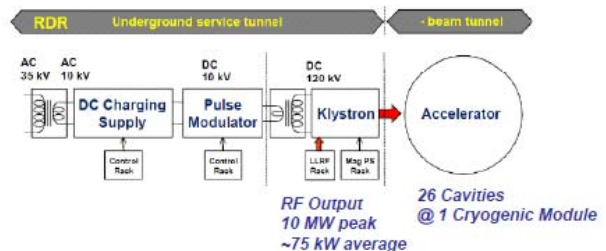


図7) RF電源システム

#### 3.3 シングルトンネルの安全

加速器における防災については、これを直接規制する法律はない。従来、一般建築物ではなく、共同溝のような工作物として扱い、個別に関係当局と協議してきた。シングルトンネルの安全の問題は今後の重要な検討課題の一つである。火災対策については、防火区画を設け、防火・防煙壁を設ける、あるいは一定間隔で避難室を設けるなどの案が考えられている[3]。

#### 参考文献

- [1] INTERNATIONAL LINEAR COLLIDER REFERENCE DESIGN REPORT 2007, ILC-REPORT-2007-1, and KEK Report 2007-2.
- [2] 福田茂樹, "ILCの新提案一分布型RFシステム(DRFS)", 第6回日本加速器学会年会.
- [3] Masami Tanaka, "Fire Safety for ILC Single Tunnel", KEK Report 2009-5.