資料３－４

KEK 2017-3
DESY 17-180
CERN-ACC-2017-0097

The International Linear Collider Machine Staging Report 2017

Addendum to the International Linear Collider Technical Design Report published in 2013

Linear Collider Collaboration / October, 2017
Editors:Lyn Evans and Shinichiro Michizono

Table of Contents

Table of Contents 1
1. Introduction 2
2. Positron production options 4
2.1 Undulator: baseline design 4
2.2 Conventional: alternative design 4
2.3 Luminosity upgrade schemes 6
2.4 Cost comparison 6
3 Variants of the baseline (Options A/B/C) 7
3.1 Accelerator configuration 7
3.2 Collision timing constraint 7
3.3 Energy margin 8
3.4 Effect of cost-reducing R&D 8
4. SRF R&D and resulting cost reduction 15
4.1 Preparation of niobium materials (processing for sheet fabrication and piping) 15
4.2 SRF cavity fabrication to ensure a high gradient and high Q (with a new surface process demonstrated by Fermilab) 15
4.3 Power input coupler fabrication 16
4.4 Cavity chemical treatment 16
5. Improvement of Luminosity 18
6. Cost estimate for ILC 250 GeV 20
6.1 The cost of accelerator construction 20
6.2 Operational cost 21
References 22

1. Introduction

The Technical Design Report (TDR) of the ILC mainly concentrates on a baseline machine of 500 GeV centre-of-mass with detailed cost and manpower estimates consistent with this option. However, the discovery of a Higgs Boson with a mass of 125 GeV opens up the possibility of reducing cost by starting at a centre-of-mass energy of 250 GeV with the possibility of future upgrades to 500 GeV or even 1 TeV+. The rest of this paper outlines the options for the design of a 250 GeV "Higgs factory". The scientific programme that the machine would offer is the subject of a separate report[1].

A first stage 250 GeV machine would imply the installation of approximately half of the linac of the 500 GeV baseline machine. There are several possible scenarios for the civil construction and conventional facilities of which three are considered in this report.

Option A
Only the tunnel for the 250 GeV machine is constructed and equipped. Increasing the machine energy by extending the tunnel length would then require extensive additional civil engineering at a later date.

Option B
The tunnel length is extended to allow the energy to be increased to 350 GeV (the top quark threshold) at a later date by adding more acceleration structure. Only the downstream part is filled with linac. The remaining tunnel will be left in a bare state (no dividing wall, cooling or ventilation) in order to save money in the first stage. Upgrading the energy to 350 GeV then requires finishing the tunnel and installing extra cavities.

Option C
The complete tunnel and access shafts for the 500 GeV machine is constructed in the beginning and only the downstream part is filled with linac. The remaining tunnel will be left in a bare state (no dividing wall, cooling or ventilation), the same as Option B, in order to save money in the first stage. Upgrading the energy to 500 GeV then requires finishing the tunnel and installing extra cavities.

The first scenario (Option A) represents the lowest cost for the initial phase. The second and third obviously require extra investment in the initial stage but open up a simple possibility of increasing the centre-of-mass energy without major tunneling work.

The main parameters, including luminosity, are initially assumed to be the same as those specified for the 500 GeV baseline scaled to 250 GeV (Table 12.1 of the TDR). This means that the electron and positron sources, damping rings and bunch compressors remain unchanged from the baseline. However, an improved luminosity performance has been worked out and is described in Section 5 of this report.

The beam delivery systems could, in principle, be further optimized for low energy but the overall geometry is still assumed to be consistent with an eventual 1 TeV upgrade.

For positron production, a 5 Hz is still assumed but the lower energy of the electron beam (125 GeV instead of 150 GeV in the baseline) makes it more difficult to produce the

required polarized positron flux. To compensate for the lower energy, the undulator length must be increased by about 60% in order to preserve the photon flux to the convertor target. A more straightforward way of preserving the positron flux would be to use a conventional positron source which would require an additional 3 GeV linac. This option would mean that partial polarization of the positrons would not be possible. The impact on the scientific potential of the machine must be addressed. First indications are that the costs of the two options are very similar.

This addendum to the TDR published in 2013 provides a brief summary of the ILC staging study focusing on the staging energy of 250 GeV with varieties of energy extendability up to 500 GeV.

2. Positron production options

2.1 Undulator: baseline design

The TDR baseline design produces positrons by transporting the primary electron beam through a superconducting helical undulator. The overall layout of the positron source is shown schematically shown in Figure 2-1. In this TDR configuration we expect the minimal electron energy to be 150 GeV and positrons with 30% polarization to be generated.

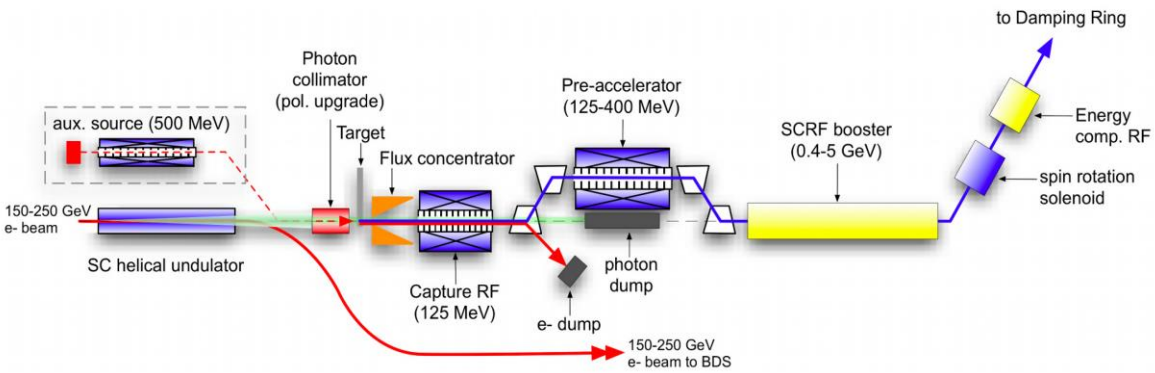


Figure 2-1 Overall layout of the undulator source of positrons.

In the case of a 125 GeV electron beam, the required positron flux can be generated by increasing the undulator length from 147 m to 231 m. This longer undulator positron source is the new baseline for the ILC250GeV staging. Electrons lose ~3 GeV in the undulator and this is compensated by the main electron linac. Owing to this, the number of RF units in the main electron linac is higher than that in the positron linac (already in TDR). The collision timing constraint (described later) should be satisfied in this undulator scheme.

2.2 Conventional: alternative design

An electron-driven (e-driven; conventional source of positrons) design is an alternative to the TDR undulator concept for positron production. Although polarized positrons are not available in this scheme, positron beam commissioning is possible without a 125 GeV electron source.

The e-driven source of positrons consists of a normal conducting (NC) 3 GeV linac, a positron target, and a normal conducting 5 GeV linac. The energy of the driving linac was re-designed to be suitable for operation of 1,312 bunches, leading to a reduction in the linac energy from 4.8 GeV to 3 GeV[2]. The system is shown schematically in Figure 2-2.

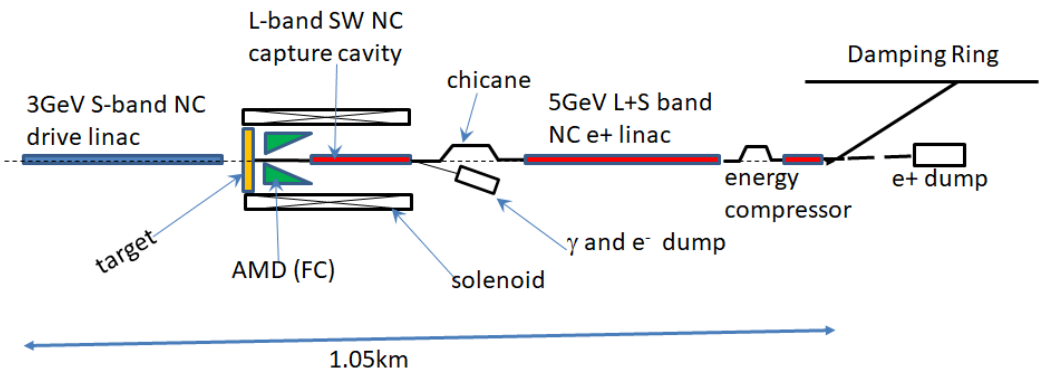


Figure 2-2 Layout of the e-Driven source of positrons.

In this e-driven scheme, different electron bunch patterns will be used, as shown in Figure 2-3. Beam pulses with ~480 ns duration (including ~66 bunches) will be accelerated in the normal conducting linacs. The linacs will operate at 20 pulses every 200 ms, with inter-pulse intervals of 3.3 ms. The remaining 137 ms will be reserved for damping of positrons in the damping ring.

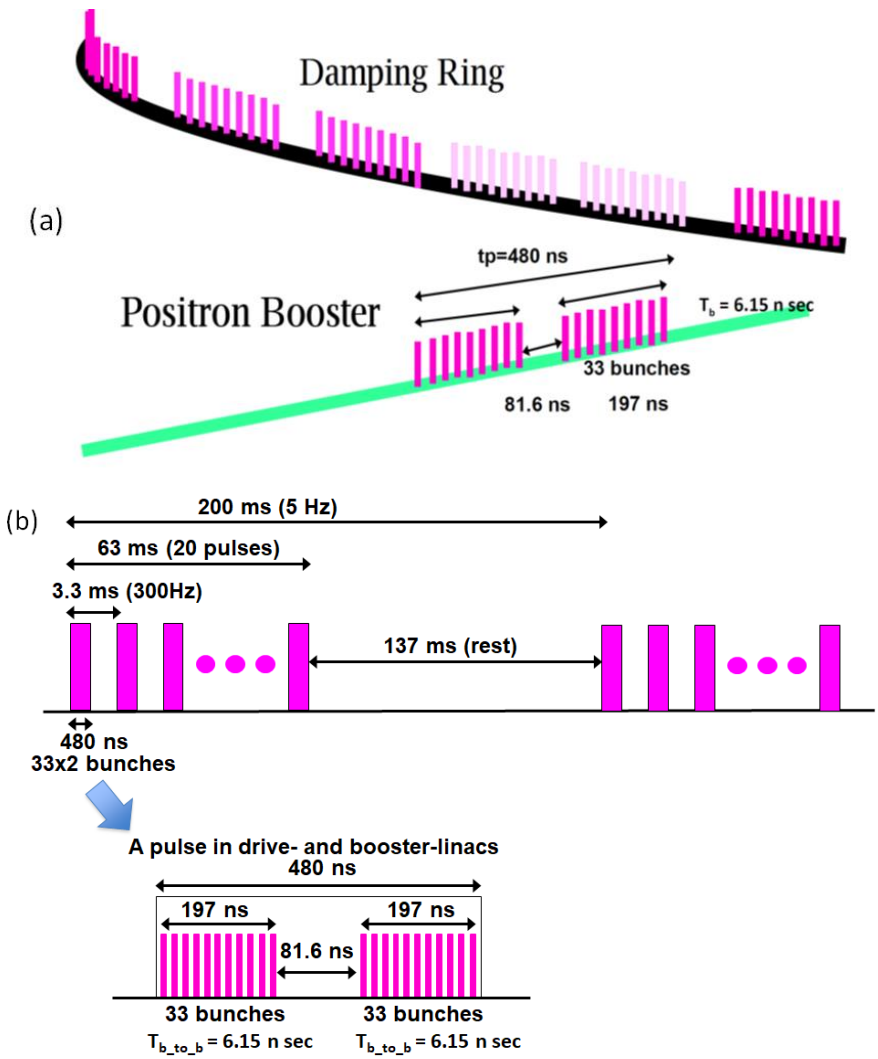


Fig.2-3 Schematic of the beam injection bunches (a) and beam bunch structure (b).

2.3 Luminosity upgrade schemes

Following several years of successful operation of the initial ILC250 a luminosity upgrade is possible. The basic change in the luminosity upgrade is the increase in the number of bunches from 1,312 to 2,625. Since the margin of the electron cloud instability for the positron damping ring is ~3, the number of bunches can probably be doubled without the second positron damping ring in the undulator scheme. We will obtain sufficient information on the necessity of the second ring from superKEKB and first stage ILC.

In the case of the e-driven source of positrons, one more positron damping ring is required because beam-loading compensation is difficult to realize with a 3-ns-wide bunch spacing. In addition, the driving beam linac should be extended from 3 GeV to 4.8 GeV and the modulators of the driving linac and booster should be reinforced owing to longer beam pulse durations.

2.4 Cost comparison

We found that there is no cost difference between accelerator components for the undulator and e-driven source of positrons. Some cost reduction (of the order of a few ten's of MILCU*) associated with the e-driven system is expected, if the space for the timing constraint in the undulator scheme is omitted.

The undulator source will still be considered as the baseline source of positrons. However, an e-driven source of positrons could be adopted initially for ILC250 GeV and be replaced by the undulator source in future upgrades, depending on the technical maturity, because the e-driven source is safer for achieving design luminosity at low electron energies (~125 GeV) and has the big advantage that positron beam commissioning can be done without needing the full electron linac and damping ring. However, it has the disadvantage of no positron polarization.

*The reference currency (the "ILCU") is the United States dollar (USD) as of January, 2012.

3 Variants of the baseline (Options A/B/C)

3.1 Accelerator configuration

The accelerator configuration is shown schematically in Figure 3-1. The change requests post-TDR are included in the baseline design (TDR update).

- A reduced ML tunnel cross-section is adopted and the central shield wall is changed from 3.5 m to 1.5 m.
- A vertical shaft access to the detector hall is adopted.
- A collision timing constraint (required for the undulator source of positrons) is satisfied.

A TDR-undulator-based positron source is used. This has a collision timing constraint. The length of the undulator is changed from 147 m to 231 m to produce positrons using a 125-GeV-energy beam.

Only the operation of a 5 Hz linac (not a 10 Hz one as envisaged in the TDR) is considered, for maximal cost reduction. The maximal individual cryoline length is 2.5 km ± 10%, the same as for TDR. The non-staging areas are kept untouched (i.e., the e^- source, DR, turn-around, bunch compressor, BDS, and IR).

Option A is a minimal configuration for the ILC250GeV. Option B has a 350-GeV-energy tunnel, and the accelerators are located downstream. A simple tunnel is extended upstream in Option B. Normal wall finish, air-conditioning, lighting, and water drainage will be installed but the central shield wall, AC power line, and cooling water line will not be installed. Option C has a 500-GeV-energy tunnel and accelerators are located at the downstream side.

The average accelerating gradient 31.5MV/m is assumed for each of these options as in TDR. The cases where 35MV/m is assumed after successful R&D are named Option A', B', and C'.

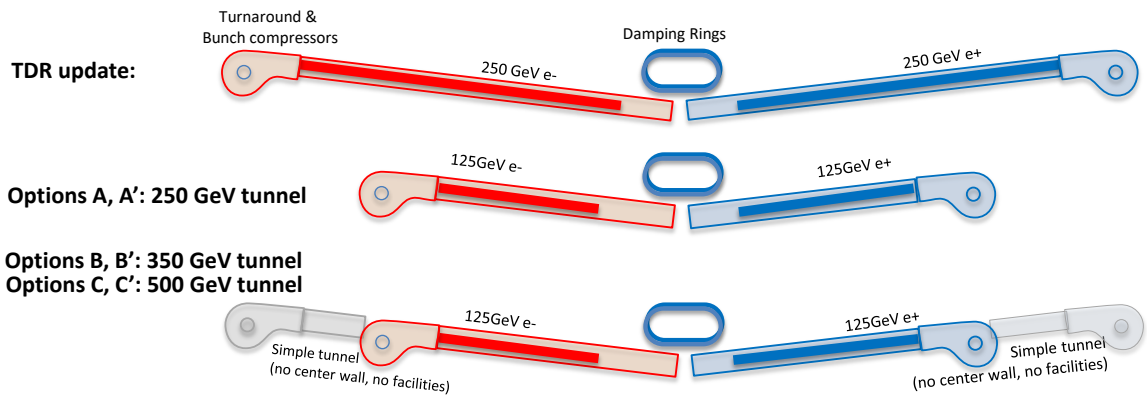


Figure 3-1 Staging options.

3.2 Collision timing constraint

To collide e^-/e^+ at the IP, the collision timing constraint in the case of the undulator e^+ source has to be satisfied. This constraint is schematically shown in Figure 3-2. The following relationship should be satisfied:

$$(L_1+L_2+L_3)-L_4=nxC_{DR}$$

We assume that the damping ring circumference remains unchanged (C_{DR} = 3,238.68 m),though there is still a possibility to change it.

The TDR (after the change request) has n = 10. In this case, 1,473 meters of space for the e^+ ML (and the e^- ML for the energy symmetric upgrade in the future) are added for this adjustment. In the case of Option A, n = 6 is adopted. There is an adjustment space of 583 m in each ML. In the case of Option B, n = 6 (for the energy of 250 GeV) and n = 8 (for the energy of 350 GeV) are adopted. This corresponds to an additional simple tunnel of 3,238 m in each ML. In the case of Option C, n = 6 (for the energy of 250 GeV) and n = 10 (for the energy of 500 GeV) are adopted. This corresponds to an additional simple tunnel of 6,477 m in each ML.

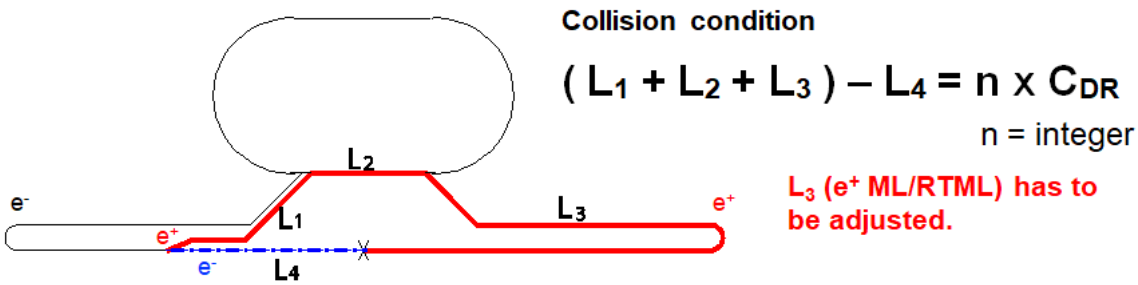


Figure 3-2 Collision timing constraint.

3.3 Energy margin

The energy reach margin for sufficient generation of positrons and safe energy reach of Higgs physics at 250 GeV must be included.

(1) Module margin: We introduced a 2.5% margin (corresponding to the energy of 3.1 GeV in each linac) to reach the target energy of the target experiment (no margin was included in the TDR).

(2) Availability margin: Three RF units were expected to compensate for a cryomodule trip in the TDR (1.5%). The same three RF units (117 Cavities, 13.5 cryomodules) are counted as the availability margin corresponding to 3% in ILC250GeV.

(3) Space margin: This is the cryomodule space to allow for more cryomodules to be installed in the future. The vacant space (to satisfy the collision timing constraint) can be filled with cryomodules in later stages (by introducing additional cryogenics and RF systems)

At all times, 0.5% is required to compensate for cavity phase offset. Therefore, the total energy balance is 2% (=1.5%+0.5%) for ILC500GeV and 6% (=2.5%+3%+0.5%) for ILC250GeV.

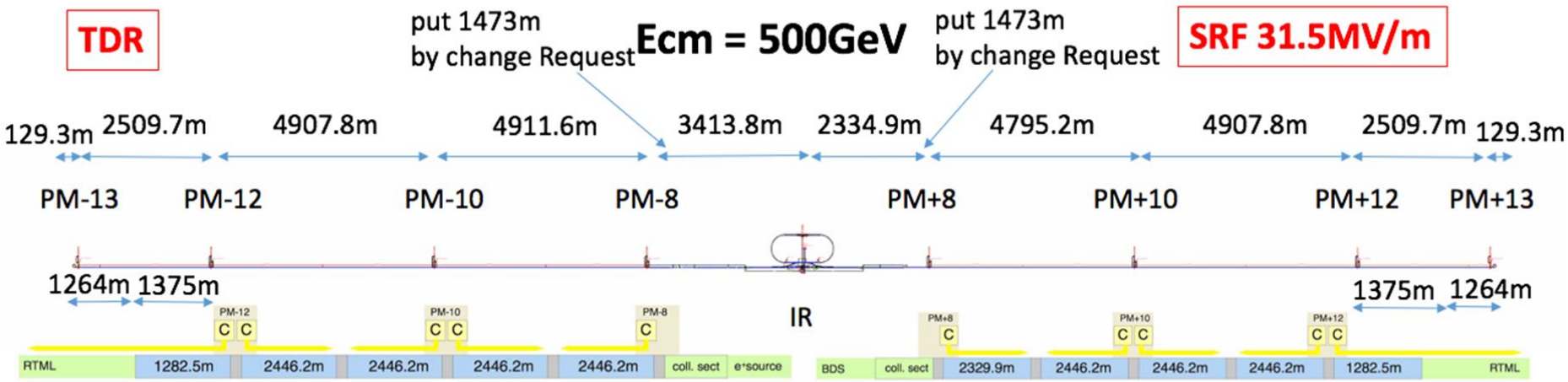
3.4 Effect of cost-reducing R&D

An average cavity gradient of 31.5 MV/m is assumed in the TDR. The staged ILC250 design considers both the cavity gradient of 31.5 MV/m (TDR) and 35 MV/m (in the case of successful cost-reducing R&D). Nevertheless, the overall tunnel length is the same, owing to the collision timing constraint (n = 6). The space of 1,049 m in each ML in the 35 MV/m configuration will be used for the “space margin”. We will not change the RF configuration system even in the case of the 35 MV/m scheme. These baseline configurations are summarized in Table 3-1. Figures 3-3~3-7 show the configurations of the TDR and Options A, B, C, A’. The configurations of options B’ and C’ are the combinations of Option A’ and the simple tunnel in Options B and C.

Table 3-1: Summary of baseline configurations.

Options	Gradient [MV/m]	E_{CM} [GeV]	Total E_{CM} Margin	n	Space margin	Reserved tunnel (each end)	Total tunnel
TDR update	31.5	500	2%	10	1,473 m	0 m	33.5 km
Option A		250	6%	6	583 m	0 m	20.5 km
Option B				6&8		3,238 m	27 km
Option C				6&10		6,477 m	33.5 km
Option A’	35			6	1,049 m	0 m	20.5 km
Option B’				6&8		3,238 m	27 km
Option C’				6&10		6,477 m	33.5 km

TDR Cryomodule configuration



BC						e+inj	Ecm=500GeV	e-inj						BC
51	99	189	189	189	189	24	cryomodules	24	180	189	189	189	99	51
17	22	42	42	42	42	8	RF unit	8	40	42	42	42	22	17
10.0	28.1	53.6	53.6	53.6	53.6	5.0	E gain (GeV)	5.0	51.0	53.6	53.6	53.6	28.1	10.0

Total length of tunnel = 15872.2m+14676.9m+1473m+1473m=33495m

(note: 1 ML unit = 2 RF unit = 9 CMs (in TDR))

Figure 3-3 TDR (ILC 500GeV) configuration.

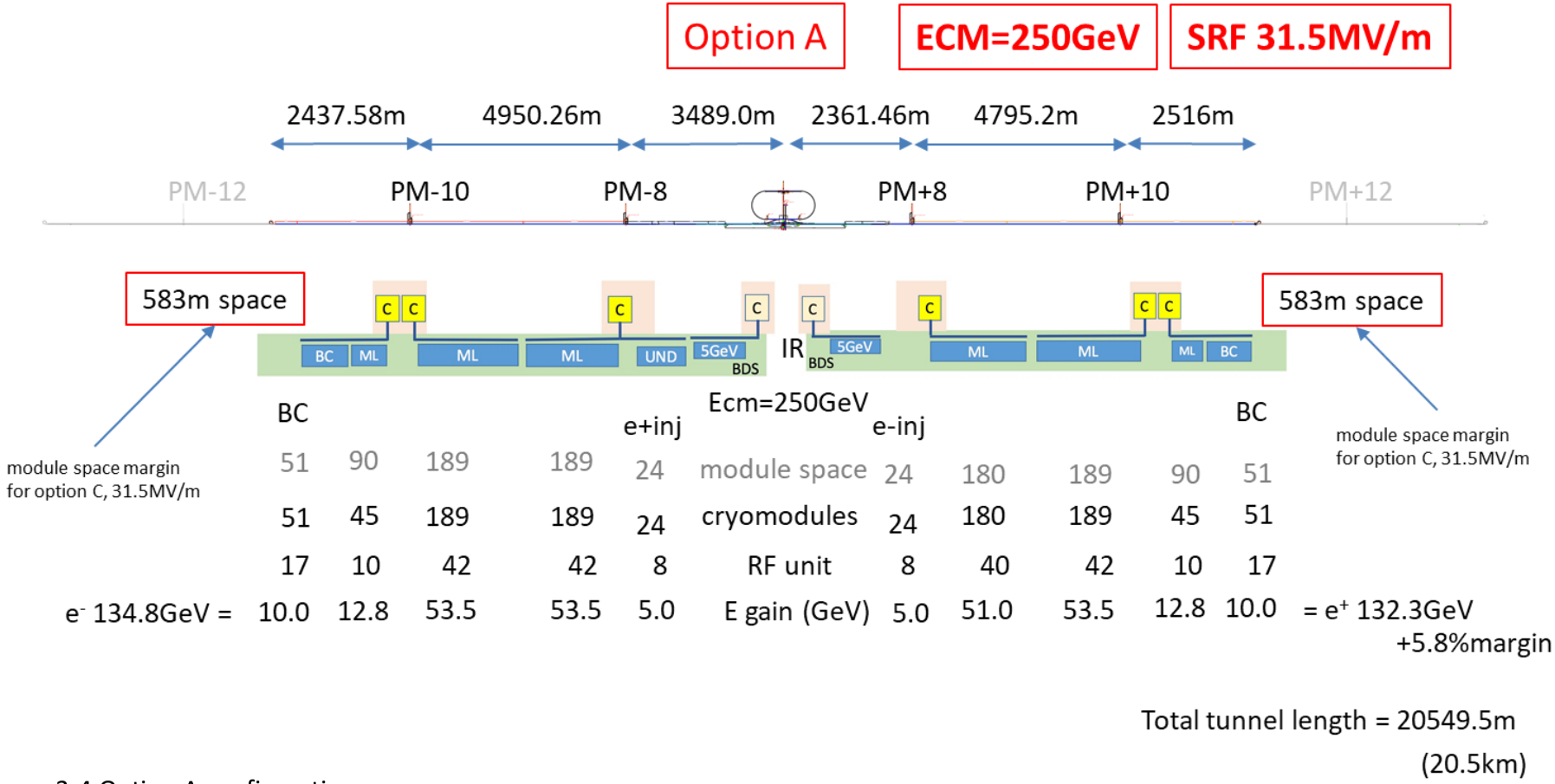
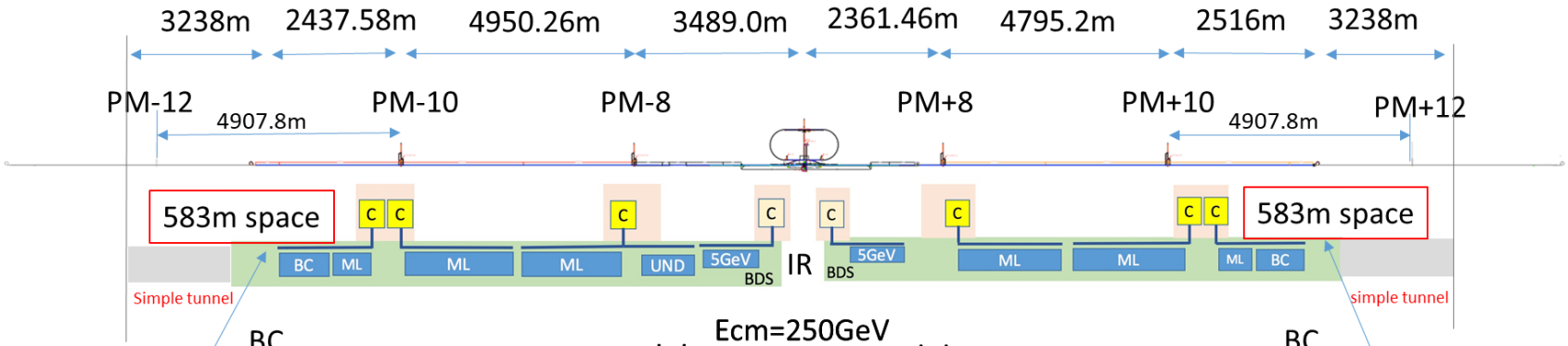


Figure 3-4 Option A configuration.

Option B

SRF 31.5MV/m

Ecm = 250GeV tunnel=350GeV length, accelerator at downstream



module space margin for option C, 31.5MV/m

module space margin for option C, 31.5MV/m

	BC				e+inj	Ecm=250GeV	e-inj				BC	
	51	90	189	189	24	module space	24	180	189	90	51	
	51	45	189	189	24	cryomodules	24	180	189	45	51	
	17	10	42	42	8	RF unit	8	40	42	10	17	
e^- 134.8GeV =	10.0	12.8	53.5	53.5	5.0	E gain (GeV)	5.0	51.0	53.5	12.8	10.0	= e^+ 132.3GeV

+5.8%margin

tunnel length = 14114.8m+12910.7m=27025.5m (27.0km)

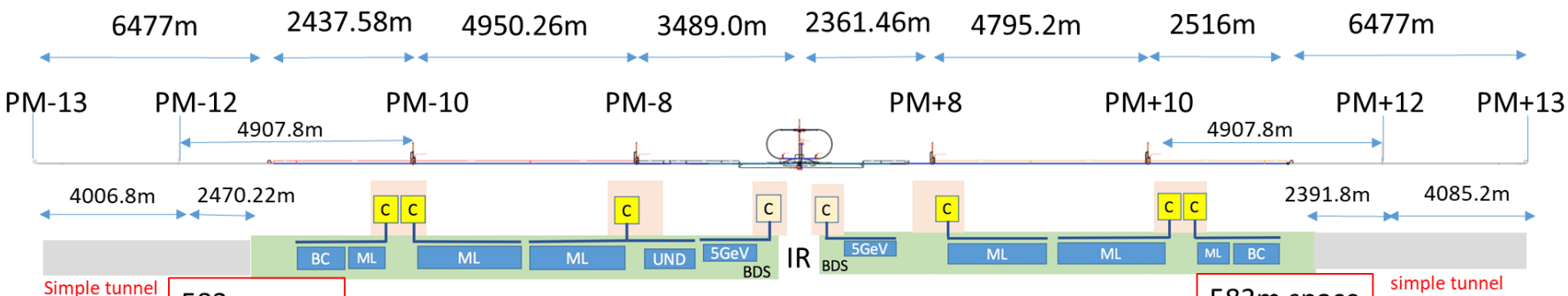
simple tunnel length = 3238m+3238m=6476m (6.5km)
(n=2 extension on both end)

Figure 3-5 Option B configuration.

Option C

SRF 31.5MV/m

Ecm = 250GeV tunnel=500GeV length, accelerator at downstream



583m space

583m space

Ecm=250GeV

	BC				e+inj		e-inj				BC	
	51	90	189	189	24	module space	24	180	189	90	51	
module space margin for option C, 31.5MV/m	51	45	189	189	24	cryomodules	24	180	189	45	51	module space margin for option C, 31.5MV/m
	17	10	42	42	8	RF unit	8	40	42	10	17	
e^- 134.8GeV =	10.0	12.8	53.5	53.5	5.0	E gain (GeV)	5.0	51.0	53.5	12.8	10.0	= e^+ 132.3GeV +5.8%margin

tunnel total length = 17353.8m+16149.7m=33503.5m (33.5km)

simple tunnel length = 6477m+6477m=12954m (12.9km)
(n=4 extension on both end)

Figure 3-6 Option C configuration.

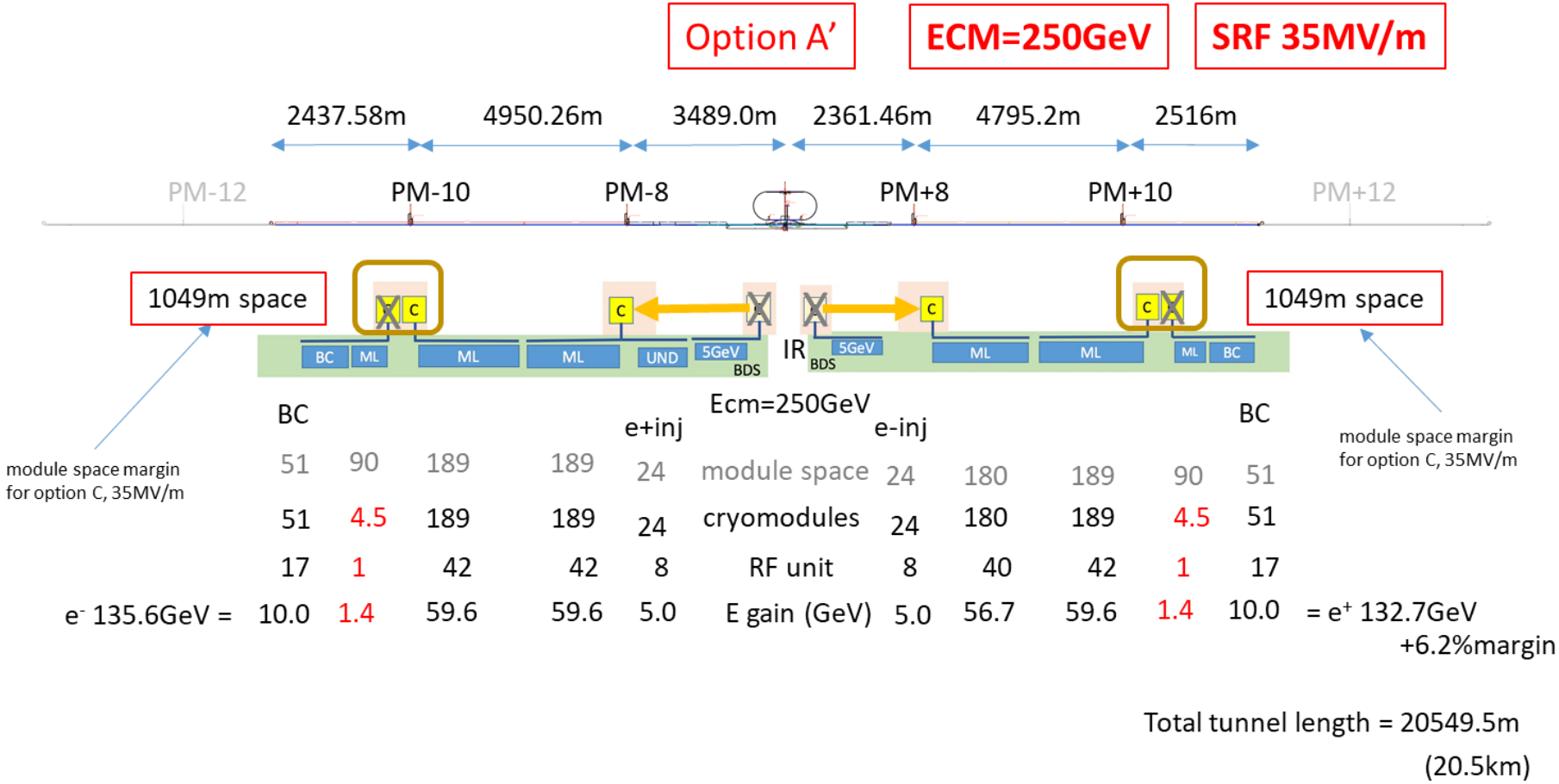


Figure 3-7 Option A' configuration.

4. SRF R&D and resulting cost reduction

The main fraction of the accelerator construction cost is attributed to the main linac (ML) with superconducting RF (SRF) technology. Thus, our main focus for cost reduction is associated with the SRF technology. We consider the following four areas in R&D:

4.1 Preparation of niobium materials (processing for sheet fabrication and piping)[3]

The cost of niobium materials for fabrication of SRF cavity cells and end groups is relatively high, owing to the use of a rare material and an elaborated preparation process. R&D aims to reduce the cost of materials by optimizing the production of Nb ingots and by optimizing the disk/sheet and pipe forming process, to prepare for cavity fabrication. The TDR (and also XFEL, LCLS-II) specified the residual resistivity ratio (RRR) to be >300. Low RRR material limits the maximum cavity gradients, and we propose to optimize the purity of ingots with a lower RRR (> 200 and 250 on average) with acceptable specific residual content such as Ta, and to simplify the fabrication of Nb sheets/disk using direct slicing from Nb ingots, to maintain clean surfaces, by eliminating forging, rolling, and mechanical polishing/grinding processes. We expect a major cost reduction related to the fabrication of Nb sheets for SRF cavities, as shown in Figures 4-1 and 4-2.

Figure 4-1 Large-grain Nb sheet.

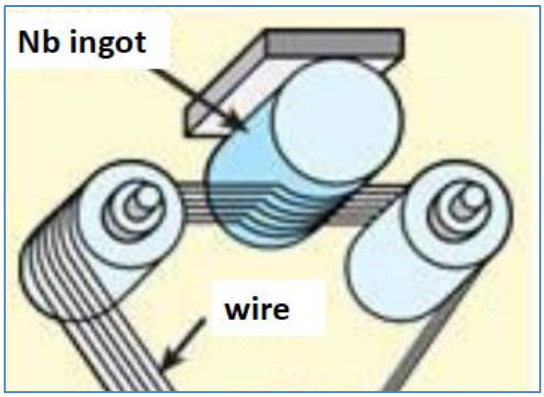


Figure 4-2 Direct slicing from the Nb ingot.

4.2 SRF cavity fabrication to ensure a high gradient and high Q (with a new surface process demonstrated by Fermilab)[4]

Recent SRF cavity R&D results reported by Fermilab have shown that improvements in the accelerating gradients by 10% and above, and Q by a factor of 2, with respect to standard ILC cavity treatment may be possible. Performance characteristics of cavities are shown in Figure 4-3. Improvement is achieved by modified 120°C vacuum baking of cavities with nitrogen infusion at 120 °C, directly after a heat treatment process at ~ 800°C. The new treatment should make it possible to operate cavities at higher gradients, thus reducing the SRF linac length. Because the new process can eliminate the second round of electro-polishing (EP), reduction in the chemical surface treatment cost is also expected. Higher Q and a flatter Q versus E_{acc} curve could lower the cost of cryogenics and ensure more cost-effective operation.

We expect an average 35 MV/m cavity gradient (up from TDR's 31.5 MV/m at the TDR), where $Q_0 \sim 1.6 \times 10^{10}$ (0.8×10^{10} at 35 MV/m in the TDR) leading to a smaller number of cavities and cryogenic systems.

The same RF distribution system (shown in Figure 4-4) can be used in the 35 MV/m operation. However, we are planning to develop a higher efficiency klystron (with a maximal power of 11 MW and efficiency of 71%). The development of such high-efficiency klystrons is anticipated at world-wide accelerator laboratories, and offers potential energy consumption savings.

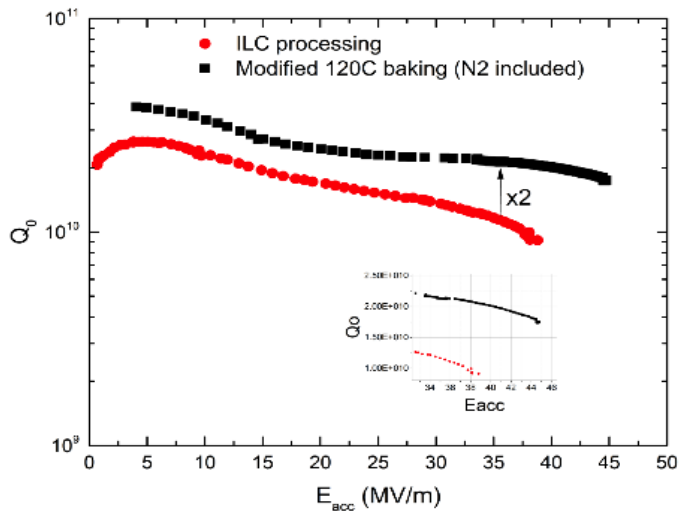


Figure 4-3 Higher performance with N-infusion treatment.

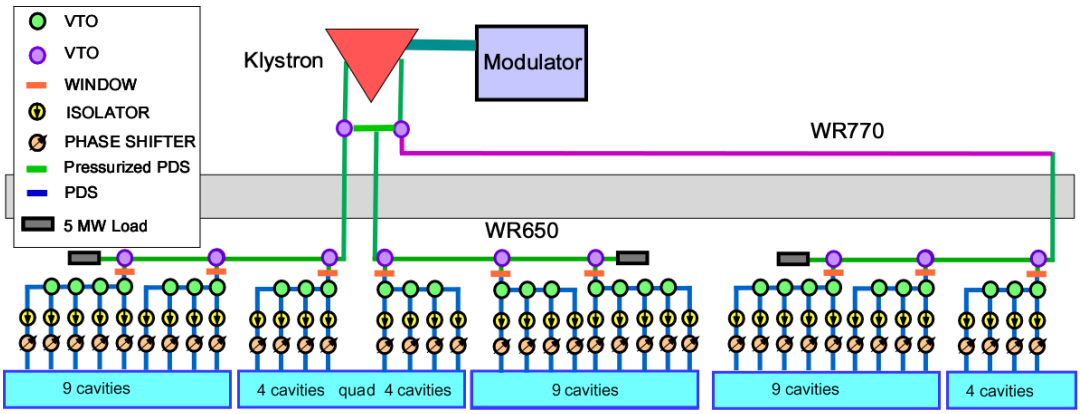


Figure 4-4 RF distribution system at the main linac.

4.3 Power input coupler fabrication[5]

R&D aims to optimize the material (for the ceramic windows) and the Cu-plating procedure, as well as the mechanical design for cost effective assembly with the SRF cavity string. New ceramic window material, with low secondary electron emission yield, developed in Japan, is promising for the fabrication cost reduction, because the coupler can be fabricated without an anti-multipactor coating (TiN).

4.4 Cavity chemical treatment[6,7]

The change in the SC-cavity chemical treatment from using Horizontal electropolishing (EP) and Sulphur-acid+HF as proposed in the TDR, to Vertical EP + non-HF solution + Bipolar EP, will lead to substantial process cost reduction. This involves development of cathode electrodes and non-HF with a bipolar voltage power supply for smooth surfaces. The effects are: simpler infrastructure, shorter processing time, cheaper solution, cheaper solution waste process, and a safer process without HF.

If the R&D will be successful, we expect a ~10% reduction compared with the TDR accelerator cost at ILC500GeV. In the case of ILC250GeV, the reduction would be ~6% (compared with the ILC500 TDR cost), because the number of SRF systems at the main linac would be halved and the cryogenics design would be further optimized.

5. Improvement of Luminosity

The accelerator described in the TDR is based on the best optimization for E_{CM} = 500 GeV. The machine parameters at lower energies are given in Table 2.1 (vol.3.II) but they are basically obtained by scaling from 500 GeV. Some improvement of the machine design parameters may be achieved through re-optimization for E_{CM} = 250 GeV for the first stage.

We consider re-optimization of luminosity at 250 GeV. The luminosity is proportional to P_B/E x $(\delta_{BS} / \varepsilon_{ny})^{1/2}$, where P_B is the beam power, δ_{BS} the loss of energy associated with beamstrahlung, and ε_{ny} the normalized vertical emittance. To increase P_B is costly and to decrease ε_{ny} requires tighter alignment tolerance of the main linac. Therefore, we choose to accept a larger δ_{BS}, which is still small (~1%) at 250 GeV. The best way to increase δ_{BS} is to reduce the horizontal beam size at the IP by reducing the horizontal normalized emittance ε_{nx} (on the other hand, reducing the horizontal beam size by reducing β_x would cause synchrotron radiation background). This is achieved by slightly changing the design of the damping rings (using longer dipole magnets in the arcs). This will not cause a significant cost increase (B*L, magnetic field times length, is the same).

The new set of parameters is listed in Table 5-1 together with the TDR sets of parameters for 250 GeV and 500 GeV. The resulting luminosity is 1.35×10^{34} /cm^2/s at 250 GeV, a factor 1.65 higher than that for the TDR (note: the values for the TDR have been corrected by the Change Request 5).

Several issues are under study:

- The vertical disruption parameter D_y is now ~35, higher than ~25 in the TDR. This will require a more accurate beam position feedback at the IP.
- The background owing to the larger δ_{BS} and the increase in the number of incoherent pairs may significantly affect the detector's performance.

The change of ε_{nx} will not increase the luminosity at 500 GeV, because δ_{BS} is already large (4.5%), but tuning the final focusing system will become somewhat easier because β_x can be relaxed.

Table 5-1: New beam parameters optimized for ILC250GeV.

			TDR		New
Center-of-mass energy	E_{CM}	GeV	250	500	250
Bunch population	N	e10	2	2	2
Bunch separation		ns	554	554	554
Beam current		mA	5.78	5.78	5.78
Number of bunches per pulse	Nb		1312	1312	1312
Collision frequency		Hz	5	5	5
Electron linac rep rate		Hz	10	5	5
Beam power (2 beams)	P_B	MW	5.26	10.5	5.26
r.m.s. bunch length at IP	σ_z	mm	0.3	0.3	0.3
relative energy spread at IP (e−)	σ_E/E	%	0.188	0.124	0.188
relative energy spread at IP (e+)	σ_E/E	%	0.15	0.07	0.15
Normalized horizontal emittance at IP	ε_{nx}	μm	10	10	5
Normalized vertical emittance at IP	ε_{ny}	nm	35	35	35
Beam polarization (e−)		%	80	80	80
Beam polarization (e+)		%	30	30	30
Beta function at IP (x)	β_x	mm	13	11	13
Beta function at IP (y)	β_y	mm	0.41	0.48	0.41
r.m.s. beam size at IP (x)	σ_x	nm	729	474	516
r.m.s. beam size at IP (y)	σ_y	nm	7.66	5.86	7.66
r.m.s. beam angle spread at IP (x)	θ_x	μr	56.1	43.1	39.7
r.m.s. beam angle spread at IP (y)	θ_y	μr	18.7	12.2	18.7
Disruption parameter (x)	Dx		0.26	0.26	0.51
Disruption parameter (y)	Dy		24.5	24.6	34.5
Upsilon (average)	Y		0.020	0.062	0.028
Number of beamstrahlung photons	n_γ		1.21	1.82	1.91
Energy loss by beamstrahlung	δ_{BS}	%	0.97	4.50	2.62
Geometric luminosity	Lgeo	e34/cm^{2}s	0.374	0.751	0.529
Luminosity	L	e34/cm^{2}s	0.82	1.79	1.35

6. Cost estimate for ILC 250 GeV

6.1 The cost of accelerator construction

The cost estimate is carried out with the ILCU. The TDR defined the "ILCU" as the United States dollar (USD) as of January, 2012. RF unit cost and other unit cost is calculated from TDR. The staging cost is obtained by subtracting the decreased number of units. Reduced volume production effect and price fluctuation from 2012 are ignored because these depend on the different components.

The construction cost for Option A is lower by ~34% compared with ILC 500GeV. In this estimate, 6% of total energy margin from having additional cryomodules is included (2% for the ILC 500 GeV case) for sufficient generation of positrons and safe energy reach for Higgs physics at 250 GeV, as mentioned in Section 3.3. In addition, the "space margin" is reserved owing to the timing constraint shown in Table 3.1. If we add the cost reduction in the SRF system resulting from the R&D effort, the expected cost reduction for Option A' becomes ~40%. It should be noted that the length of the tunnel is kept the same as Option A.

As for the human resources, Option A (A') requires 75% of those needed for the TDR 500 GeV baseline.

For Options B (B') and C (C'), the expected construction cost reductions are ~33% (~39%) and ~31.5% (~37.5%), respectively, with a similar level of reduction in human resources requirement to that obtained for Option A.

Table 6-1: Summary of the staging cost

	e+/e- collision [GeV]	Tunnel Space for [GeV]	Value Total (MILCU)	Reduction [%]
TDR	250/250	500	7,980	0
TDR update	250/250	500	7,950	-0.4
Option A	125/125	250	5,260	-34
Option B	125/125	350	5,350	-33
Option C	125/125	500	5,470	-31.5
Option A'	125/125	250	4,780	-40
Option B'	125/125	350	4,870	-39
Option C'	125/125	500	4,990	-37.5

The Value estimates broken down by the following system, i.e. Main Linac (ML), the electron and positron Ring to Main Linac (RTML), Common, Damping Ring (DR), Beam Delivery System (BDS), Positron source, Electron source and Interaction Region (IR), are shown in Figure 6-1. The cost reduction from the TDR is mainly coming from the main linac owing to the smaller SRF system and shorter tunnel length. The difference from Option A to A' (B to B', and C to C') results from the cost reduction R&D. Simple and empty tunnels are added to the upstream side in the case of Options B and C (B' and C'), resulting in the cost difference between Options A, B, and C. "Common" consists of common parts in the ILC laboratory, such as the main campus, the main AC power station, general computing system (laboratory networking, e-mail system, business computers etc.), accelerator installation and control systems. The main campus and computing system costs are saved according to the reduction in human resources. The installation and control system costs are saved due to the reduction

of the main linac energy. Some slight cost reduction at the electron and positron sources between A and A' (or B and B', C and C') results from the SRF system used in these sources.

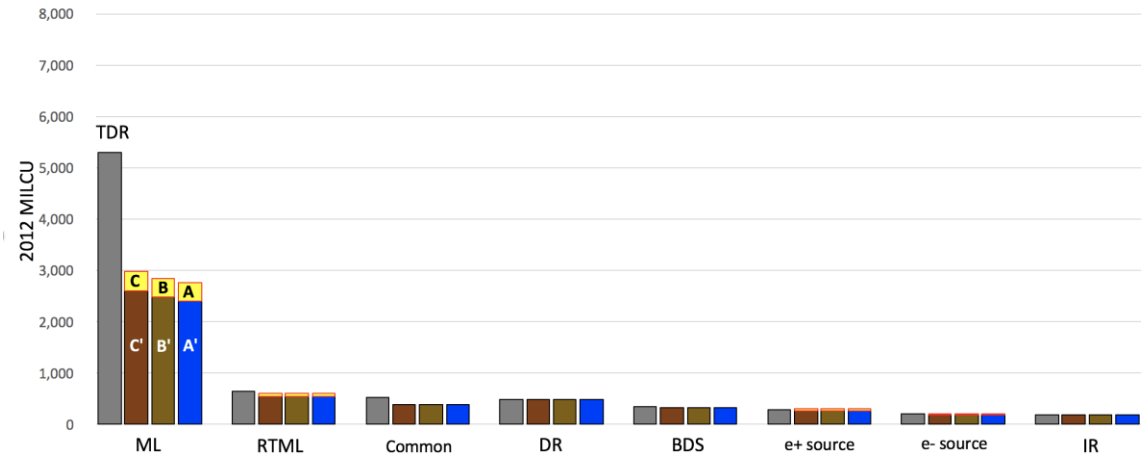


Figure 6-1 Distribution of the ILC value estimate by area system. The numbers give the estimate for each system in MILCU.

6.2 Operational cost

Electric power for the ILC 500 GeV operation was ~164 MW. The electric power in Options A and A' will be ~129 MW and ~ 125 MW or less, respectively. The operational cost may then be reduced by ~23%, and by even more than 25% if the SRF cost-reduction R&D will be successful.

References

[1] K. Fujii, *et al*. [LCC Physics Working Group], "Physics Case for the 250 GeV Stage of the International Linear Collider", arXiv:1710.07621 [hep-ex].

[2] M. Kuriki *et al.*,"A start to end simulation of E-driven Positron Source for ILC", Americas Workshop on Linear Colliders 2017 (AWLC17), Menlo Park, USA, 2017.
https://agenda.linearcollider.org/event/7507/contributions/39362/attachments/31758/47887/MKuriki_EDriven.1.pdf

[3] P. Kneisel *et al*., " Review of ingot niobium as a material for superconducting radiofrequency accelerating cavities", NIM A 774 (2015) 133-150.

[4] A. Grassellino *et al.*, " Unprecedented quality factors at accelerating gradients up to 45MVm^{-1} in niobium superconducting resonators via low temperature nitrogen infusion", Supercond. Sci. Technol. **30** (2017) 094004.
https://doi.org/10.1088/1361-6668/aa7afe

[5] Y. Yamamoto et al., "Fundamental Studies for the STF-type Power Coupler for ILC", Proc. of SRF2017, Lanzhou, China, 2017, MOPB064,
http://vrws.de/srf2017/papers/mopb064.pdf

[6] E.J. Taylor et al., "Economics of Electropolishing Niobium SRF Cavities in Eco-friendly Aqueous Electrolytes without Hydrofluoric Acid", Proceedings of SRF2015, Whistler, BC, Canada.
http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/SRF2015/papers/mopb092.pdf

[7] J. Taguchi et al., "R&D of Electro-polishing (EP) Process with HF-free Neutral Electrolyte by Bipolar-pulse (BP) method", Proc. of SRF2017, Lanzhou, China, 2017, TUPB097,
http://vrws.de/srf2017/papers/tupb097.pdf

資料３－４（参考）
（高エネルギー加速器研究機構仮訳）

KEK 2017-3
DESY 17-180
CERN-ACC-2017-0097

国際リニアコライダー加速器のステージングに関する報告書 2017

2013 年発行 国際リニアコライダー技術設計書に対する追補

リニアコライダー・コラボレーション / 2017 年 10 月
編集：Lyn Evans、道園　真一郎

目次

目次・・・

1. はじめに

ILC の技術設計報告書（TDR：The Technical Design Report）は、主に 500 GeV（重心系エネルギー） のベースラインに集中し、このオプションに沿った必要なコストや労働力の見積もりを詳述したものであった。しかし、質量が 125 GeV のヒッグス粒子が発見されたことで、250 GeV の重心エネルギーからスタートし、将来的に 500 GeV または 1 TeV にアップグレードすることでコストを削減できる可能性が開けた。本文書は、250 GeV の「ヒッグスファクトリー」の設計オプションを概説する。当該施設が提供する科学的プログラムは別の報告書で取り上げる[1]。

250 GeV マシンの第 1 ステージは 500 GeV のベースライン・マシンのリニアックの半分のものを設置することになる。その建設工事には複数のシナリオが存在し、本報告書ではそのうち 3 つのオプションについて検討する。

オプション A

250 GeV マシンのトンネルのみを建設する。トンネルの長さを延長することによりマシンのエネルギーを上げるためには、後日付加的な土木工事が必要となる。

オプション B

後日、加速構造を追加することで 350 GeV のエネルギー（トップ・クォーク閾値）増強を可能とするように、トンネル長を延伸しておく。第 1 ステージのコストを削減するため、リニアックは下流のみに入れ、残りのトンネルは簡素化した状態（分割壁、冷却、換気がない）とする。エネルギーを 350 GeV にアップグレードする場合は、トンネルを仕上げ、追加の空洞を設置する必要がある。

オプション C

最初に、500 GeV マシンのトンネルとアクセス・シャフトを建設する。その際、オプション B と同様、第 1 ステージのコストを削減するため、リニアックを下流のみに入れ、残りのトンネルは簡素化した状態（分割壁、冷却、換気がない）とする。 エネルギーを 500 GeV にアップグレードする場合は、トンネルを仕上げ、追加の空洞を設置する必要がある。

最初のステージにおいて最もコストが低いのはオプション A である。一方で、オプション B、C は最初のステージにおいて明らかに多くの投資を必要とするが、大規模なトンネル工事を伴うことなく、シンプルに重心系エネルギーを増大させる可能性を宿している。

ルミノシティを含む主要なパラメータは当初、500 GeV ベースライン・マシンを 250 GeV マシンにスケーリングしたものと同一とする（TDR 表 12.1 参照）。つまり、電子・陽電子源、ダンピング・リング、バンチ圧縮器はベースラインから変更しない。しかし、ルミノシティ性能の向上は可能であり、これは本レポートの 5 章に詳述している。

ビーム・デリバリー・システムは、基本的に、低エネルギー向けにさらに最適化されるが、全体的な形状は最終的に 1 TeV にアップグレードする場合と一致させるものとする。

陽電子発生には依然として繰り返し 5 Hz を考えているが、電子ビームのエネルギーを低くする （ベースラインの 150 GeV ではなく 125 GeV とする）ことで、必要な偏極陽電子フラックスを発生させることが難しくなる。これを補うため、アンジュレータの長さを約 60% 長くし、陽電子ターゲットへのフォトン・フラックスを維持する必要がある。陽電子生成方法としては、3 GeV のリニアックを要する従来型の陽電子源を使用することが挙げられるだろう。このオプションは、陽電子の部分的な偏極は不可能であり、この陽電子源の科学的ポテンシャルに対する影響を検討しなくてはならない。なお、この 2 つのオプションのコストは非常に似通っていることが最初に示された。

2013 年に発行された TDR に対するこの追補は、エネルギーが 250 GeV の場合および 500 GeV までのエネルギーへの拡張性のバリエーションに焦点を当てた ILC のステージング研究について、簡潔なサマリーを提供するものである。

2. 陽電子源オプション

2.1 アンジュレータ: ベースライン設計

TDR のベースライン設計は、らせん型超伝導アンジュレータを通して一次電子ビームを輸送することにより陽電子を発生させるというものである。陽電子源の全体的なレイアウトを図 2-1 に模式的に示す。この TDR 構成において、最少の電子エネルギーを 150 GeV とし、偏極度 30%の陽電子を発生する。

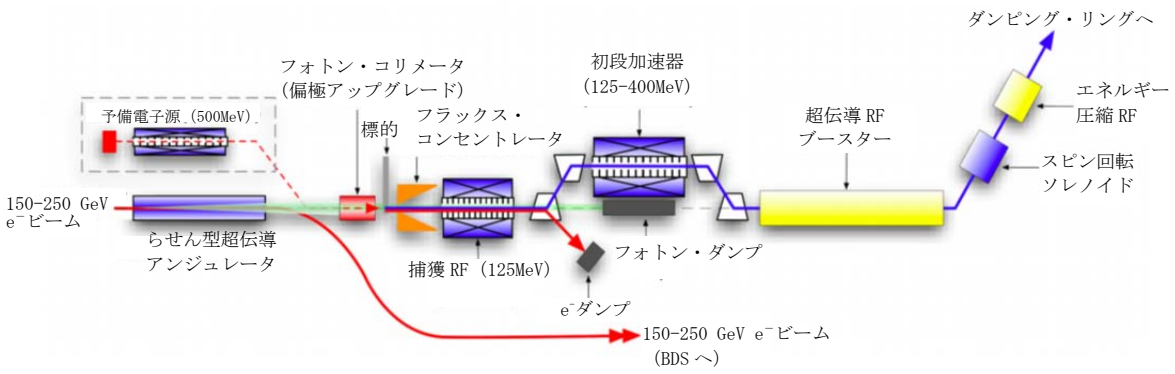


図 2-1 アンジュレータ陽電子源の全体的なレイアウト

125 GeV 電子ビームの場合、アンジュレータの長さを 147 m から 231 m に延伸することにより、必要な陽電子フラックスを発生させることができる。ILC250GeV のステージングには、この延伸したアンジュレータ陽電子源を新たなベースラインとする。アンジュレータ内で電子は 3 GeV のエネルギーを失い、これはメインの電子リニアックで補填される。このことにより、メイン電子リニアックの RF ユニットの数は陽電子リニアックよりも多くなる（TDR にて既述）。このアンジュレータ・スキームは、衝突のタイミングに関する制限（後述する）を満たさなければならない。

2.2 従来式：別の選択肢

電子駆動 （e-driven; 従来式の陽電子源） を使う設計は、陽電子発生における、TDR アンジュレータ方式とは別の選択肢である。このスキームにおいては、偏極陽電子は発生させられないが、125 GeV 電子源を使用せずに陽電子ビームのコミッショニングが可能である。

電子駆動による陽電子源は、常伝導（NC） 3 GeV リニアック、陽電子標的、常伝導 5 GeV リニアックで構成される。リニアックの駆動エネルギーは 1,312 バンチの運転に合わせて再設計され、4.8 GeV から 3 GeV へと下がった[2] 。図 2-2 にシステム概念図を示す。

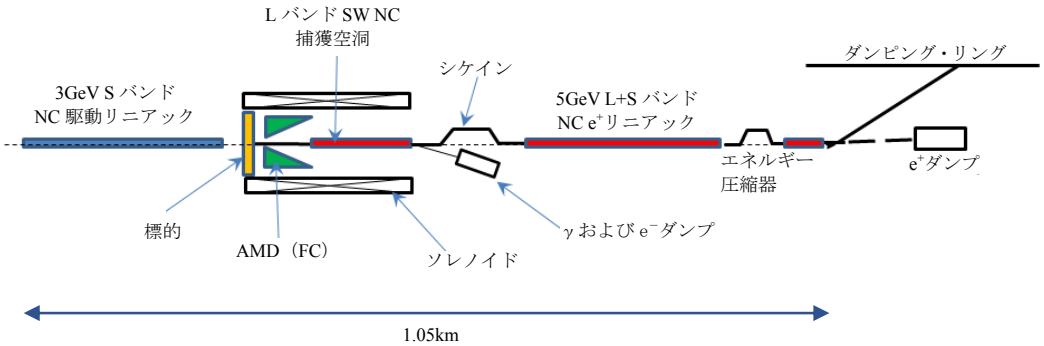


図 2-2 電子駆動型陽電子発生のスキーム

この電子駆動方式においては、図 2-3 に示すように、異なる電子バンチ・パターンが使用される。常伝導リニアックにおいては、持続時間が~480 ns のビーム・パルス（~66 バンチを含む）が加速される。リニアックは 200ms ごとに 20 パルス、パルス間の間隔 3.3ms で運転される。残りの 137ms はダンピング・リングにおける陽電子減衰に充てられる。

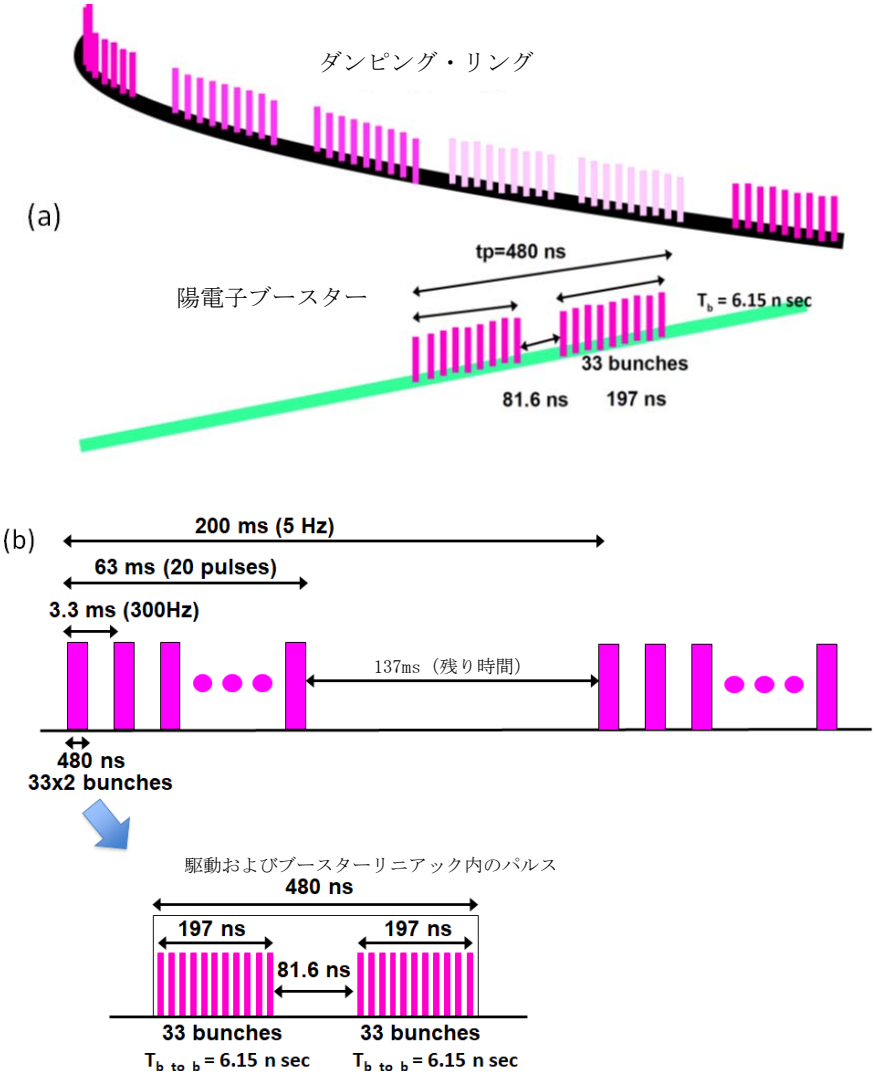


図 2-3 ビーム入射バンチ（a）およびビームバンチ構造（b）の概念図

2.3 ルミノシティ・アップグレード・スキーム

ILC250GeV を数年間運転した後、ルミノシティのアップグレードが可能となる。ルミノシティ・アップグレードにおける基本的な変更点は、バンチの数の増加（1,312→2,625）である。陽電子ダンピング・リングにおける電子雲不安定性のマージン（余裕度）は~3 であるため、2 つ目の陽電子ダンピング・リングを設置することなくバンチ数を倍増することがおそらく可能である。我々は、2 つ目のダンピング・リングが必要かどうかについて、SuperKEKB および ILC 第 1 ステージから十分な情報を収集できるだろう。

電子駆動陽電子の場合には、もう一つの陽電子ダンピング・リングが必要である。これは、3-ns のバンチ間隔では、ビーム・ローディング補償が困難なためである。加えて、パルス持続時間が長くなるため、駆動ビーム・リニアックは 3 GeV から 4.8 GeV に拡張しなければならず、駆動リニアックおよびブースターのモジュレータを強化する必要がある。

2.4 コスト比較

検討の結果、陽電子源について、アンジュレータ方式と電子駆動方式の加速器コンポーネントにコストの大きな違いはなかった。アンジュレータ方式のタイミングの制限のための空隙を省略するならば、電子駆動システムに関して幾らか（数十 MILCU*）のコスト削減が見込まれる。

アンジュレータ陽電子源は、依然として陽電子源のベースラインである。しかし、技術の成熟度によっては、ILC250 GeV にはまず電子駆動陽電子源を採用し、その後のアップグレード時にアンジュレータ源に置き換えることも考えられる。これは、電子駆動陽電子源は、低い電子エネルギー（~125 GeV）においても安全に設計ルミノシティを達成でき、かつ陽電子ビーム・コミッショニングにフルスケールの電子リニアックとダンピング・リングを必要としないという大きなメリットを有するためである。しかし、陽電子の偏極ができないというデメリットがある。

*基準通貨（ILCU）は 2012 年 1 月時点の米ドル（USD）

3 ベースラインのバリエーション （オプション A/B/C）

3.1 加速器の構成

加速器構成の概念図を図 3-1 に示す。以下の項目の TDR 発行後のチェンジ・リクエストによる設計変更は、ベースライン設計に含まれている （TDR アップデート）。

- 断面積が小さい ML トンネルを採用し、中央のシールド壁の厚さを 3.5 m から 1.5 m に変更する。
- 検出器ホールへの垂直シャフト・アクセスを採用する。
- 衝突タイミングの制限を満たす （アンジュレータ・ベースの陽電子源に課せられる要件）

TDR に記載されたアンジュレータ・ベースの陽電子源を使用する。この陽電子源には、衝突タイミングに制限がある。125-GeV エネルギーのビームを使用して陽電子を発生させるため、アンジュレータの長さを 147 m から 231 m に変更する。

最大のコスト削減のため、（TDR で計画された 10 Hz ではなく）5 Hz でリニアックを運転する事のみを考える。個々のクライオラインの最大長は TDR と同様、2.5 km ± 10%とする。ステージング対象外のエリア （電子源、DR、ターンアラウンド、バンチ・コンプレッサ、BDS、IR） は変更しない。

オプション A は、ILC250GeV の最低限の構成である。オプション B は 350GeV エネルギー・トンネルを有し、加速器は下流に設置される。オプション B では簡素化トンネルを上流に延伸する。簡素化トンネルでは、壁の仕上げ、空調、照明、排水は通常のものを設置するが、中央のシールド壁、AC 電力ケーブル、冷却水ラインは設置しない。オプション C は 500GeV エネルギー・トンネルを有し、加速器は下流に設置される。

これらのオプションの各々について、平均の加速電界を TDR と同様に 31.5MV/m としている。研究開発が成功した後に平均の加速電界を 35MV/m とするものをオプション A’、B’、C’と呼ぶ。

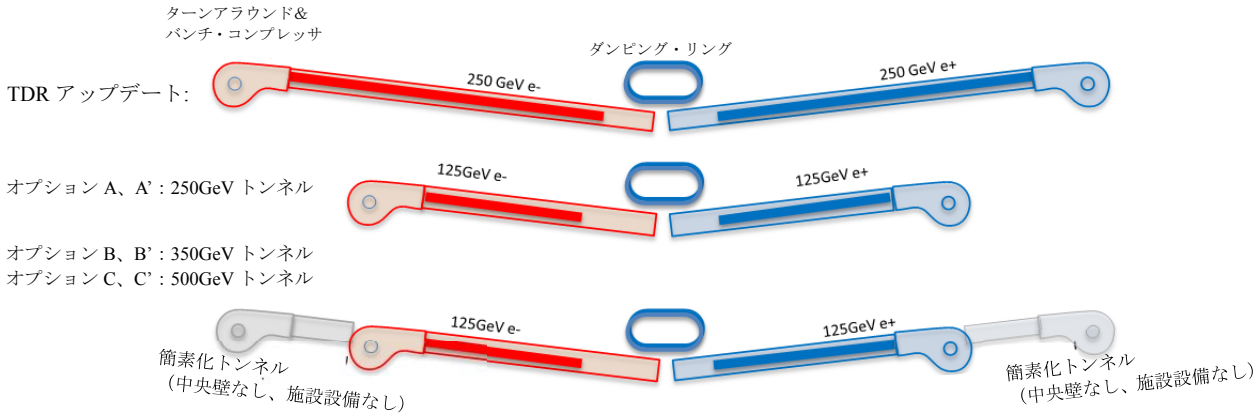


図 3-1 ステージング・オプション

3.2 衝突のタイミングにかかる制限

アンジュレータ・ベースの陽電子源を使用する場合、電子と陽電子を IP において衝突させるためには、衝突のタイミングにかかる制限を満たさなくてはならない。この制限の概

念図を図 3-2 に示す。以下の関係が満たされる必要がある。

（L_1+L_2+L_3）-L_4=nxC_{DR}

我々は、ダンピング・リングの周長は変更しない（C_{DR} = 3,238.68 m） ことを考えているが、これを変更する可能性も依然として残っている。

TDR （チェンジ・リクエストによる設計変更後） では n = 10 である。この場合、陽電子 ML に（および将来のエネルギー対称アップグレードのため、電子 ML にも）、1,473 メートルの空間が調整のために追加される。オプション A においては、n = 6 が採用される。各 ML に 583 m の調整スペースが付加される。オプション B の場合、n = 6 （エネルギーが 250 GeV）および n = 8 （エネルギーが 350 GeV）が採用される。これはそれぞれ、各 ML 内の 3,238 m の簡素化トンネル追加に対応する。オプション C の場合、n = 6 （エネルギーが 250 GeV）および n = 10 （エネルギーが 500 GeV の場合）が採用される。これは各 ML への 6,477 m の簡素化トンネルの追加に対応する。

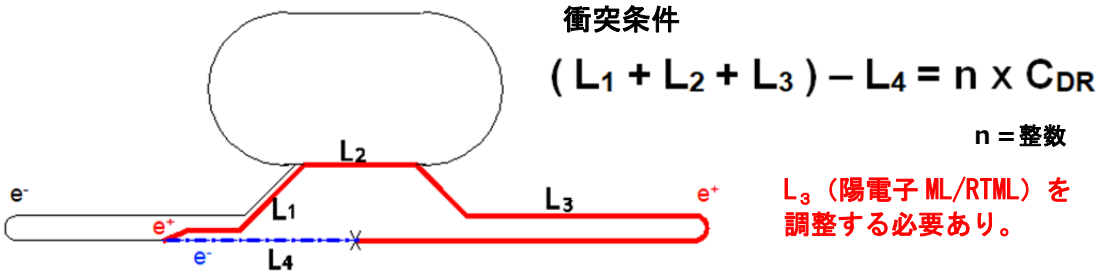


図 3-2 衝突タイミングにかかる制限.

3.3 エネルギー・マージン

十分な量の陽電子を発生させるためのエネルギーの到達マージン、および 250 GeV におけるヒッグス物理のための余裕をもったエネルギー到達マージンを含める必要がある。

(1) モジュール・マージン: 我々は、目標となる実験の目標エネルギーに到達するまでに 2.5%のマージン （各リニアック 3.1 GeV のエネルギーに相当） を設定する（TDR ではマージンは含めていなかった）。

(2) 使用可能マージン: TDR では、クライオモジュール・トリップによるエネルギー欠損を補填するための 3 つの RF ユニットが予備として考えられていた（1.5%）。使用可能マージンとして、TDR と同じ 3 つの RF ユニット （117 台の空洞、13.5 台のクライオモジュール）が考慮されている。これは ILC250GeV の 3%に相当する。

(3) 空間マージン: これは、将来的により多くのクライオモジュールを設置できるようにするためのクライオモジュールの空間である。（衝突タイミングにかかる制限を満たすための）何もないスペースには、後々のステージにおいて（クライオジェニクスと RF システムを追加導入して）クライオモジュールを入れることができる。

また、空洞の位相オフセットによるエネルギー損失を補填するため、常に 0.5%が必要で

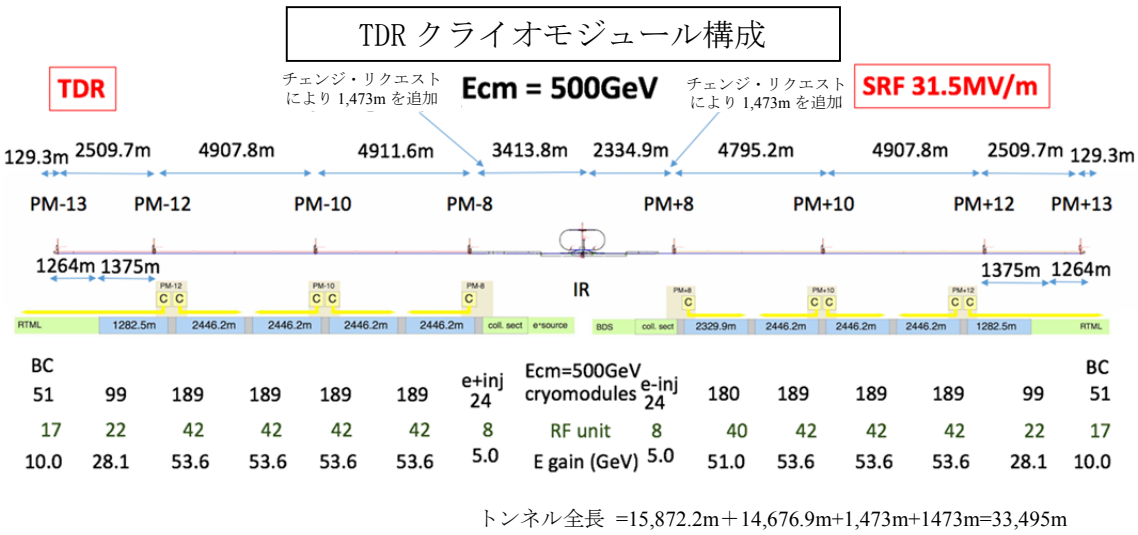
ある。従って、エネルギーの余裕は ILC500GeV の場合 2% （=1.5%+0.5%）、ILC250GeV の場合 6% （=2.5%+3%+0.5%）となる。

3.4 コスト削減のための研究開発の影響

TDR では平均の空洞電界を 31.5 MV/m としていた。ILC250GeV のステージング設計では、31.5 MV/m （TDR） および 35 MV/m （コスト削減の研究開発が成功した場合）の双方を検討する。しかし、衝突タイミングにかかる制限から、トンネルの全体長は同一である （n = 6） 。35 MV/m 設定における各 ML 内の 1,049 m の空間は「空間マージン」として使用される。我々は 35 MV/m においても RF のシステム構成を変更しない。これらベースラインの構成を表 3-1 にまとめる。図 3-3~3-7 は、TDR およびオプション A, B, C, A’の構成を示す。オプション B’および C’の構成は、オプション A’とオプション B および C における簡素化トンネルとの組み合わせである。

表 3-1: ベースライン構成のサマリー

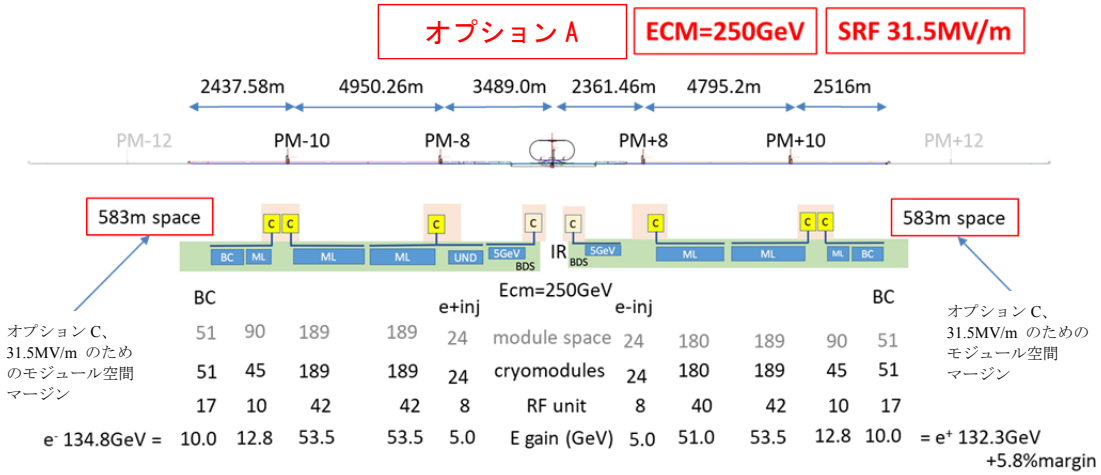
<table>
<tr><th>オプション</th><th>電界
[MV/m]</th><th>E_{CM}
[GeV]</th><th>合計 E_{CM}
マージン</th><th>n</th><th>空間
マージン</th><th>トンネル
リザーブ長
（両端）</th><th>トンネル
全長</th></tr>
<tr><td>TDR アップデート</td><td rowspan="3">31.5</td><td>500</td><td>2%</td><td>10</td><td>1,473 m</td><td>0 m</td><td>33.5 km</td></tr>
<tr><td>オプション A</td><td rowspan="6">250</td><td rowspan="6">6%</td><td>6</td><td rowspan="3">583 m</td><td>0 m</td><td>20.5 km</td></tr>
<tr><td>オプション B</td><td>6 & 8</td><td>3,238 m</td><td>27 km</td></tr>
<tr><td>オプション C</td><td>6 & 10</td><td>6,477 m</td><td>33.5 km</td></tr>
<tr><td>オプション A’</td><td rowspan="3">35</td><td>6</td><td rowspan="3">1,049 m</td><td>0 m</td><td>20.5 km</td></tr>
<tr><td>オプション B’</td><td>6 & 8</td><td>3,238 m</td><td>27 km</td></tr>
<tr><td>オプション C’</td><td>6 & 10</td><td>6,477 m</td><td>33.5 km</td></tr>
</table>



トンネル全長 =15,872.2m＋14,676.9m+1,473m+1473m=33,495m

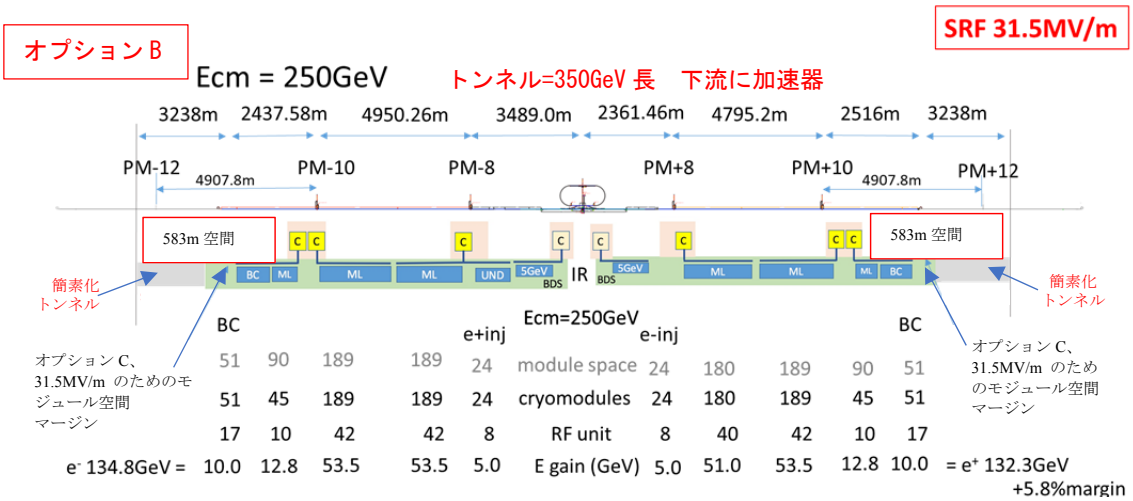
（注: 1 ML ユニット ＝2 RF ユニット ＝9 CM （TDR において） ）

図 3-3 TDR （ILC 500GeV） 構成



トンネル全長 =20,549.5m （20.5km）

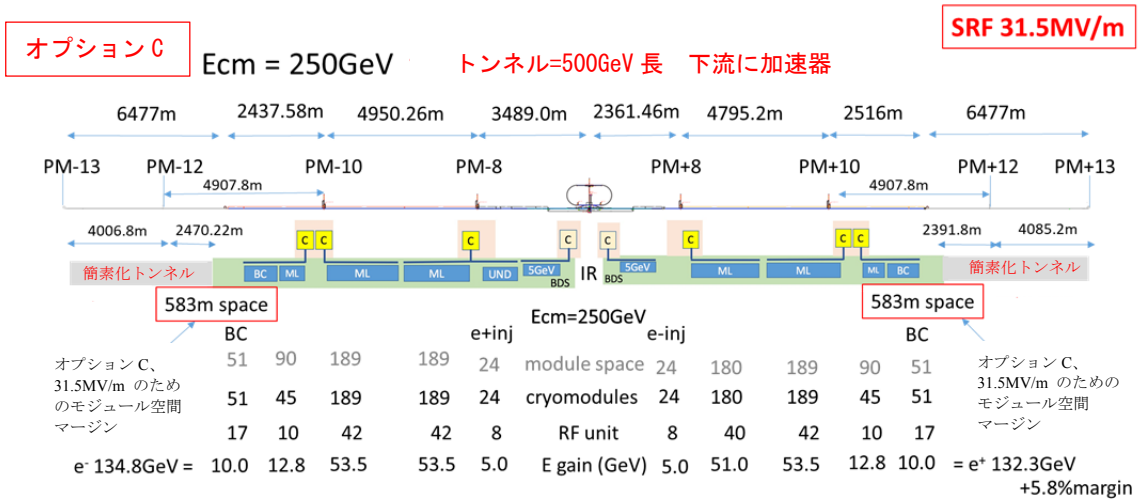
図 3-4 オプション A 構成



トンネル全長 =14,114.8m+12,910.7m=27,025.5m （27.0km）

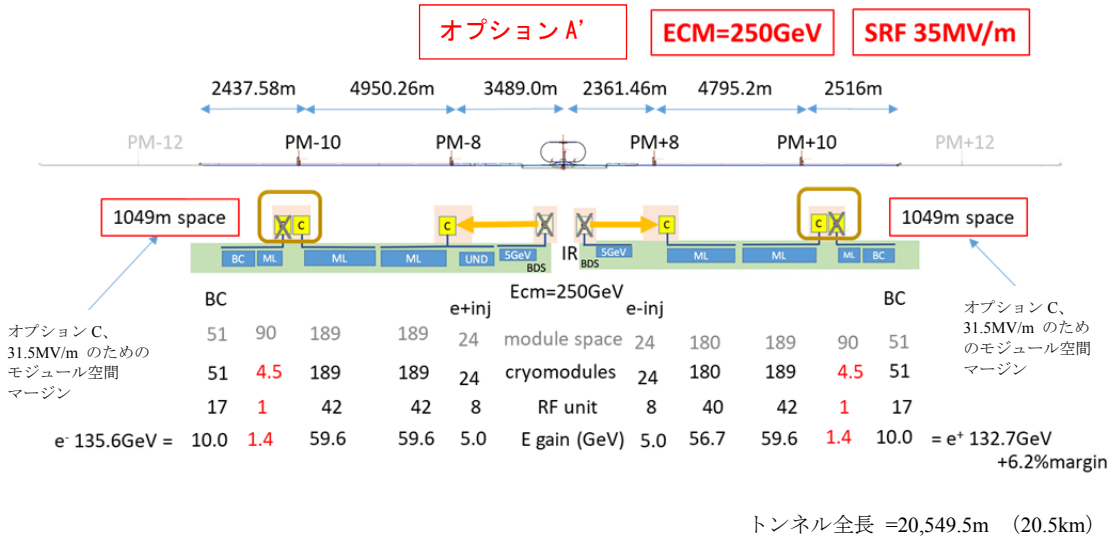
簡素化トンネル長 = 3,238m+3,238m=6,476m （6.5km）
（n=2 両端で延長）

図 3-5 オプション B 構成



トンネル全長 =17,353.8m+16,149.7m=33,503.5m （33.5km）
簡素化トンネル長 = 6,477m+6,477m=12,954m （12.9km）
（n=4 両端で延長）

図 3-6 オプション C 構成



トンネル全長 =20,549.5m （20.5km）

図 3-7 オプション A' 構成

4.　SRF の研究開発とその結果としてのコスト削減

加速器建設コストの最も大きい要素は超伝導 RF （SRF）技術によるメイン・リニアック（ML）にかかるものである。したがって、コスト削減に向けた我々の主なフォーカスは SRF 技術に関するものとなる。我々は、以下の 4 つの領域の研究開発について検討する。

4.1 ニオブ材料の準備（シート製造とパイピング）[3]

SRF の空洞セルおよびエンド・グループを製造するためのニオブ材料のコストは、レアメタルの使用および複雑な加工プロセスを求める為、相対的に高い。研究開発は、ニオブ・インゴットの製造を最適化すること、およびディスク／シートおよびパイプ成形プロセスの最適化により、材料コストの削減を目指す。TDR （および XFEL、LCLS-II）は、残留抵抗比 （RRR）を>300 とすることを指定している。RRR が低い材料は最大空洞電界の制限要因となるため、我々は Ta などの特定の残留物は許容し、ある程度 RRR が低めのインゴット（平均で ＞200 および 250）となるよう純度を最適化することを提案する。また、Nb インゴットからの直接スライスとすることで、鍛造、圧延、機械研磨プロセスを省き、Nb のシート／ディスクの製造プロセスを簡素化するとともに清浄な表面を維持することを提案する。我々は、SRF 空洞向け Nb シートの製造について、大きなコスト削減を見通している（図 4-1 および 4-2）。

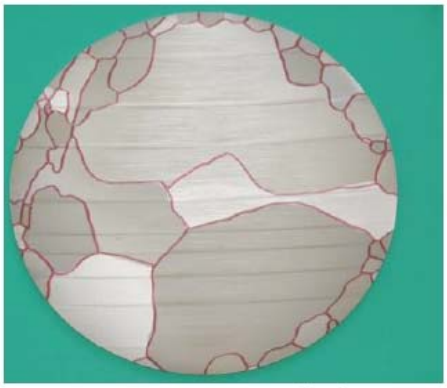


図 4-1 ラージグレイン Nb シート

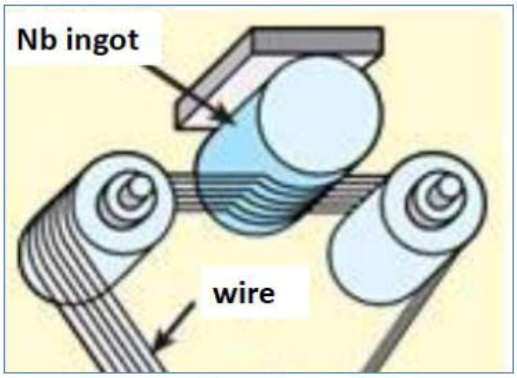


図 4-2 Nb インゴットからの直接スライス

4.2 高電界および高 Q 値を確実にする SRF 空洞製造（Fermilab で実証された新表面処理）[4]

Fermilab が実施した最近の SRF 空洞研究開発の結果、標準的 ILC 空洞処理について、加速電界を 10%以上、Q 値を 2 倍に増大できる可能性がある。空洞の性能特性を図 4-3 に示す。最高 800°C の温度での熱処理プロセスの直後、修正された 120°C の真空ベイキング中の窒素注入により向上が可能である。この新しい処理により、空洞を高電界で運転することができ、結果として SRF リニアックの長さを短縮することが可能となる。この新しい処理方法は電解研磨（EP）の２回目のプロセスを省くことができることため、化学処理コストの

削減も期待される。より高い Q 値 とよりフラットな Q v.s. Eacc 曲線特性により、クライオジェニクスのコストを低減し、より経済的な運転を確保できる可能性がある。我々は、$Q_0 \sim 1.6 \times 10^{10}$（TDR では 35 MV/m で 0.8×10^{10}）のときの平均の空洞電界を 35 MV/m と予測している（TDR の 31.5 MV/m から上昇）。これは空洞およびクライオジェニック・システムの数を減らせることにつながる。

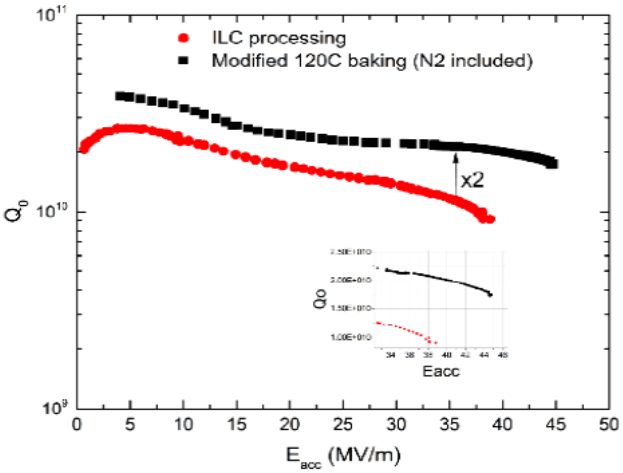


図 4-3. 窒素インフージョンによる超伝導加速空洞の高性能（高電界、高 Q 値）化

同じ RF 分布システム（図 4-4）も 35 MV/m の運転に使用することができる。しかし、我々は、より効率が高いクライストロン （最大出力 11 MW および最大効率 71%）の開発を計画している。こうした高効率クライストロンは世界的な加速器研究所で期待されており、省エネルギーのポテンシャルを有している。

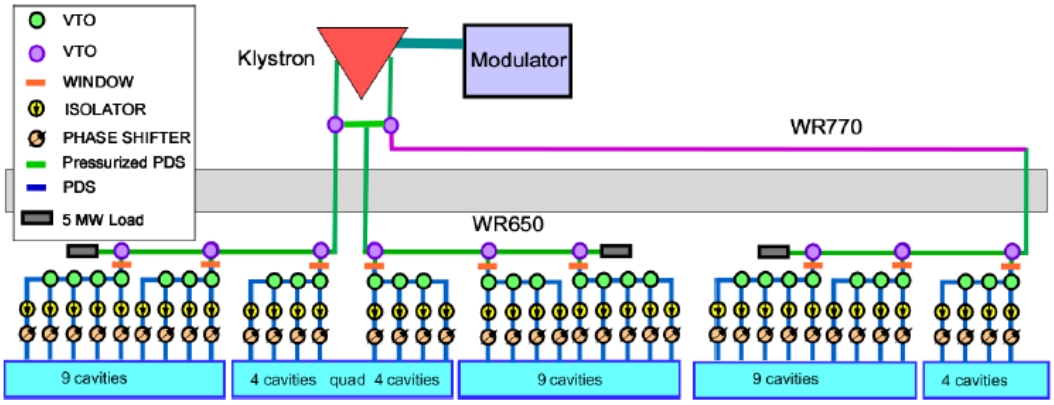


図 4-4 ILC メイン・ライナック高周波クライストロンおよび電力分配システム

4.3 パワー入力カプラーの製造[5]

この研究開発は、（セラミック窓のための）材料と銅メッキのプロセスを、SRF 空洞のストリング（連結）との経済性の高い組み立てのための機械的設計と合わせ、最適化することを目的とする。二次電子放出率が低い、日本製の新しいセラミック窓材料（を採用すること）が、製造コストの削減に有望である。これは、カプラーの製造時にマルチパクタ防止コーティング（TiN）を必要としないためである.

4.4 空洞の化学処理[6,7]

超伝導空洞の化学処理についての変更点は、TDR で提案された水平（姿勢で）電解研磨（EP）および硫酸+フッ酸（HF）を使用するものから、鉛直 EP ＋ 非 HF 溶液+ 双極性 EP を使用する方式への変更である。これにより（作業効率が大幅に向上し）処理コストの大幅な削減につながる。平滑な表面を得るためには、陰極の電極および双極性電源の開発が必要である。その効果は、インフラの簡素化、加工時間の短縮、低価格化、低価格な処理液の廃棄処理、および HF を使用しない安全な処理に及ぶ。

研究開発が成功した場合、我々は TDR に記載された ILC500GeV での加速器のコストと比べて~10%のコスト削減を見込んでいる。ILC250GeV の場合、コストの削減幅は~6% となるであろう（ILC500 TDR コストとの比較）。これは、メイン・リニアックの SRF システムの数が少なくなること（効果が半減する一方）、およびクライオジェニクスの設計がさらに最適化されることによる（半減よりは若干削減効果が増加する）。

5. ルミノシティの向上

TDR に示された加速器は ECM = 500 GeV に合わせた最適化をベースとしている。低いエネルギーにおける加速器のパラメータを表 2.1 に示す（vol.3.II）。しかし、これらは基本的に 500 GeV からのスケーリングにより得られたものである。第 1 ステージには ECM = 250 GeV に合わせて最適化をし直すことにより、一部の加速器設計パラメータの改善が可能である。

我々は 250 GeV に合わせたルミノシティの再最適化を検討する。ルミノシティは

$$P_B/\mathrm{E} \times (\delta_{BS} / \varepsilon_{ny})^{1/2}$$

に比例する。ここでP_Bはビーム電力、δ_{BS}はシンクロトロン輻射（beamstrahlung）によるエネルギーの損失、ε_{ny}は鉛直方向の規格化エミッタンスを意味する。P_B を大きくすることはコストがかかり、ε_{ny} を小さくするためにはメイン・リニアックについてより厳しい設置許容値を必要とする。したがって、我々は大きいδ_{BS}を受け入れることを選択する。これは 250 GeV においてはまだ小さい値である（~1%）。δ_{BS} を大きくする最善の方法は、IP における水平方向ビームサイズを、水平方向規格化エミッタンスε_{nx}を減らすことにより、小さくすることである。（一方で、βxを減らすことにより水平ビームサイズを小さくすると、シンクロトロン放射による背景事象を引き起こす）。これは、ダンピング・リングの設計をわずかに変化させる（アークでより長い双極子磁石を使用する）ことにより実現可能である。これは大きなコスト増にはつながらない（B*L すなわち磁場かける長さは同一）。

新しいパラメーター式を、TDR の 250 GeV および 500 GeV のパラメータとともに表 5-1 に示す。得られるルミノシティは 250 GeV で 1.35×10^{34} /cm^2 /s となり、TDR の 1.65 倍高くなる （注：TDR の値はチェンジ・リクエスト 5 を受けて修正されている）。

以下の複数の論点について、現在研究が進められている。

- 鉛直方向のディスラプション・パラメータ Dy は~35 になり、これは TDR の ~25 より高い。このことから IP におけるより正確なビーム位置フィードバックが必要である。
- 大きいδ_{BS} および対発生したペアの数の増加による背景が検出器の性能に大きく影響する可能性がある。

ε_{nx}の変更によって 500 GeV のルミノシティを上げることは出来ない。これは、δ_{BS}がすでに大きいためである （4.5%）。しかし、βxがリラックスできることから、最終収束システムの調整は、かなり容易になると考えられる。

表 5-1: ILC250GeV のために最適化された新しいビームパラメータ.

			TDR		New
重心エネルギー	E_{CM}	GeV	250	500	250
バンチあたり粒子数	N	e10	2	2	2
バンチ間隔		ns	554	554	554
ビーム電流		mA	5.78	5.78	5.78
パルスあたりのバンチ数	Nb		1312	1312	1312
衝突頻度		Hz	5	5	5

電子リニアック繰返し		Hz	10	5	5
ビーム電力（2 ビーム）	P_B	MW	5.26	10.5	5.26
IP における r.m.s.バンチ長	σ_z	mm	0.3	0.3	0.3
IP における相対エネルギー広がり（e^-）	σ_E/E	%	0.188	0.124	0.188
IP における相対エネルギー広がり（e^+）	σ_E/E	%	0.15	0.07	0.15
IP における水平方向規格化エミッタンス	ε_{nx}	μm	10	10	5
IP における鉛直方向規格化エミッタンス	ε_{ny}	nm	35	35	35
ビーム偏極　（e^-）		%	80	80	80
ビーム偏極　（e^+）		%	30	30	30
IP におけるベータ関数　（x）	β_x	mm	13	11	13
IP におけるベータ関数　（y）	β_y	mm	0.41	0.48	0.41
IP における r.m.s.ビームサイズ（x）	σ_x	nm	729	474	516
IP における r.m.s.ビームサイズ（y）	σ_y	nm	7.66	5.86	7.66
IP に r.m.s.ビーム角度広がり　（x）	θ_x	μr	56.1	43.1	39.7
IP に r.m.s.ビーム角度広がり　（y）	θ_y	μr	18.7	12.2	18.7
ディスラプションパラメータ（x）	Dx		0.26	0.26	0.51
ディスラプションパラメータ（y）	Dy		24.5	24.6	34.5
イプシロン　（平均）	Y		0.020	0.062	0.028
Beamstrahlung フォトンの数	n_γ		1.21	1.82	1.91
beamstrahlung によるエネルギー損失	δ_{BS}	%	0.97	4.50	2.62
幾何学的ルミノシティ	Lgeo	e34/cm^{2}s	0.374	0.751	0.529
ルミノシティ	L	e34/cm^{2}s	0.82	1.79	1.35

6. ILC 250 GeV のコスト見積もり

6.1 加速器建設にかかるコスト

コストの見積もりは ILCU を用いて実施した。TDR では“ILCU”を 2012 年 1 月時点の米ドルと定めている。RF ユニットやその他のユニットのコストは TDR を基に算出している。ステージングでのコストは、削減されたユニット分のコストを差し引くことで求めた。生産量の減少による影響と 2012 年からの価格変動は、コンポーネント毎に異なるため無視した。

オプション A の建設コストは ILC 500GeV と比較して~34%低くなる。この評価には、3.3 節で述べたように、必要十分な量の陽電子生成を行うこと、ヒッグス物理実験に必要なエネルギー250 GeV に安全に到達することのために、追加のクライオモジュールを備えることで得る全体のエネルギー・マージン 6%を含む（ILC 500 GeV では 2%とした）。加えて、表 3.1 に示したタイミングに関する拘束条件を満たすため、”空間マージン”が確保されている。研究開発の成果として期待される SRF システムのコスト削減分を加えた場合、オプション A’として見込まれるコスト削減は ~40%になる。ここでのトンネルの長さはオプション A と同じであることを注記する。

労働力は、オプション A （A’） では TDR 500 GeV ベースラインで必要とされたそれの 75%となる。

オプション B （B’）および C （C’）については、予測される建設コスト削減はそれぞれ ~33% （~39%） および~31.5% （~37.5%）となる。労働力の削減については、オプション A の場合と同様の結果であった。

表 6-1: ステージングコストの概要

	e^+/e^- 衝突エネルギー	トンネルの空間 [GeV]	総額（MILCU）	削減率 [%]
TDR	250/250	500	7,980	0
TDR アップデート	250/250	500	7,950	-0.4
オプション A	125/125	250	5,260	-34
オプション B	125/125	350	5,350	-33
オプション C	125/125	500	5,470	-31.5
オプション A’	125/125	250	4,780	-40
オプション B’	125/125	350	4,870	-39
オプション C’	125/125	500	4,990	-37.5

図 6-1 に、次に掲げるシステムごとの価格を示す : 主リニアック（ML）、電子および陽電子ダンピング・リングから主リニアックまでのビームライン （RTML）、共用部、ダンピング・リング（DR）、ビーム・デリバリー・システム （BDS）、陽電子源、電子源、および衝突点領域 （IR）。TDR からのコストの削減は主に主リニアックに由来しており、SRF シス

テムの小型化とトンネル長の短縮によるものである。オプション A と A’ （B と B、および C と C’） の差は、コスト削減のための研究開発に由来するものである。オプション B および C （B’および C’）においては単純な空のトンネルが上流側に設置される。これがオプション A、B、C のコスト差をもたらしている。「共用部」とは、ILC 研究所における共有の部分をいう。具体的には、メイン・キャンパス、主受電ステーション、一般的コンピュータ・システム（研究所内ネットワーク、e メール、ビジネス・コンピュータなど）、加速器の設置作業および制御システムを含む。メイン・キャンパスおよびコンピュータ・システムのコストは必要な人員数の削減に従い抑えられている。加速器の設置および制御のコストは、主リニアックのエネルギーが小さくなったことに従って押さえられている。電子源および陽電子源における A および A’ （または B および B’、C および C’）間のわずかなコスト削減は、これらのビーム源に使用される SRF システムに由来するものである。

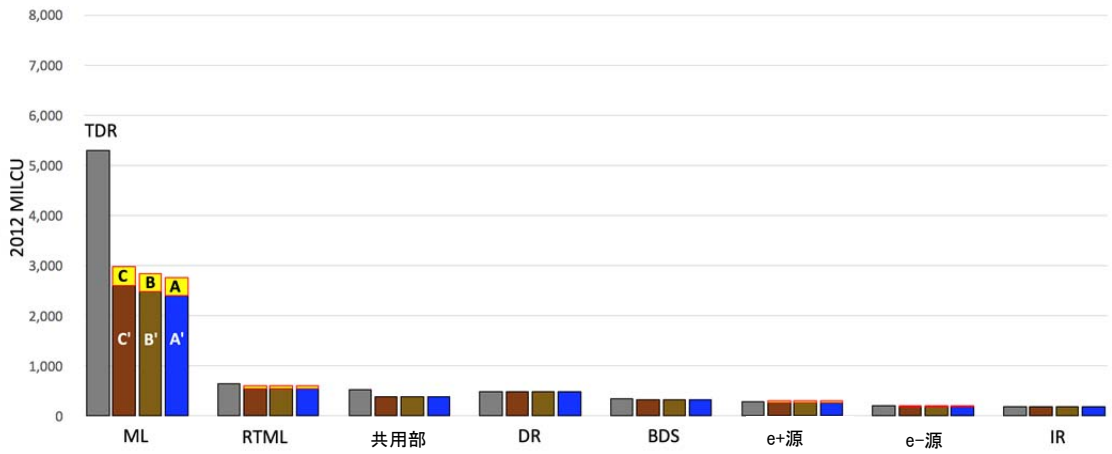


図 6-1 加速器システムごとの ILC の価格見積もり。数字は MILCU で算出した各システムの見積もり額を示す。

6.2 運転コスト

ILC 500 GeV の運転にかかる電気量は~164 MW であった。オプション A および A’で使用する電力はそれぞれ~129 MW、~ 125 MW またはそれ以下と推測する。そのため運転コストは~23%削減され、さらに SRF のコスト削減の研究開発が成功した場合には 25%以上の削減となる。

参考資料

[1] K. Fujii, *et al*. [LCC Physics Working Group], "Physics Case for the 250 GeV Stage of the International Linear Collider", arXiv:1710.07621 [hep-ex].

[2] M. Kuriki *et al.*,“A start to end simulation of E-driven Positron Source for ILC”, Americas Workshop on Linear Colliders 2017 (AWLC17), Menlo Park, USA, 2017. https://agenda.linearcollider.org/event/7507/contributions/39362/attachments/31758/47887/MKuriki_EDriven.1.pdf

[3] P. Kneisel *et al*.,“Review of ingot niobium as a material for superconducting radiofrequency accelerating cavities”, NIM A 774 (2015) 133-150.

[4] A. Grassellino *et al.*,“Unprecedented quality factors at accelerating gradients up to 45MVm^{-1} in niobium superconducting resonators via low temperature nitrogen infusion", Supercond. Sci. Technol. **30** (2017) 094004. https://doi.org/10.1088/1361-6668/aa7afe

[5] Y. Yamamoto et al., “Fundamental Studies for the STF-type Power Coupler for ILC”, Proc. of SRF2017, Lanzhou, China, 2017, MOPB064, http://vrws.de/srf2017/papers/mopb064.pdf

[6] E.J. Taylor et al., “Economics of Electropolishing Niobium SRF Cavities in Eco-friendly Aqueous Electrolytes without Hydrofluoric Acid”, Proceedings of SRF2015, Whistler, BC, Canada. http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/SRF2015/papers/mopb092.pdf

[7] J. Taguchi et al., “R&D of Electro-polishing (EP) Process with HF-free Neutral Electrolyte by Bipolar-pulse (BP) method”, Proc. of SRF2017, Lanzhou, China, 2017, TUPB097, http://vrws.de/srf2017/papers/tupb097.pdf