

## 2. 高周波技術

### 1) RF 電源システム (モジュレータ)

#### (1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要

ILC では、10MW クライストロンで必要とされるフラットな高圧パルスを生成するために、マルクス型電源 (モジュレータ) が使用される。モジュレータの最大出力要件は、5Hz の繰返し率、出力電圧 120kV、出力電流 140A、1.65ms パルスである。

ILC では、主線形加速器 (ML) においてモジュレータが 378 台必要とされている。モジュレータのパラメータ仕様は、次図表のとおりである。この仕様は、3.38 マイクロパービアンズ、65% の効率で 10MW のピーク出力を生成するクライストロン駆動で必要とされるパラメータである。

図表 II-25 主線形加速器モジュレータ (パルス電源) のパラメータ

Parameter	Unit	Specification
Output voltage	kV	120
Output current	A	140
Pulse width	ms	1.65
Pulse repetition frequency	Hz	5 (10)
Max. average power	kW	139
Output pulse flat-top	%	±0.5
Pulse-to-pulse voltage fluctuation	%	±0.5
Energy deposited into klystron during a gun spark	J	< 20

#### 【マルクス型電源の補足説明】 <KEK>

ILC のパルス電源の要求事項は、「トンネル内に設置されるのでコンパクトであること」、「約 378 台も必要になるので低コストであること」、「24 時間運転で高稼働率であること」、「故障してもメンテナンスが容易であること」などである。

図表 II-26 パルス電源のパルス



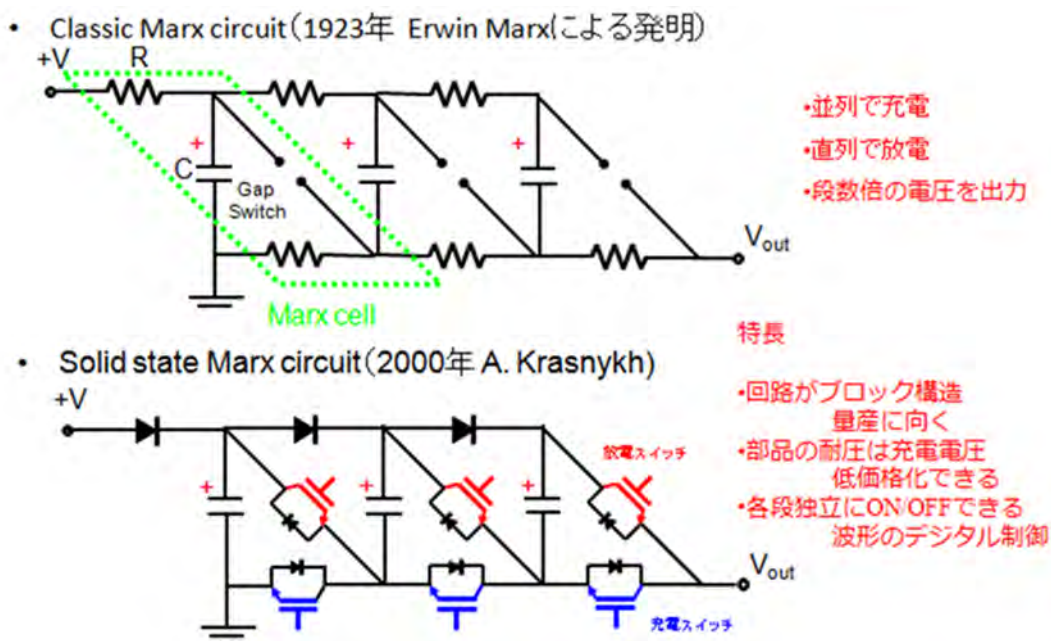
パルス幅が長いので重要なのは平坦部 (フラットトップ) の「平坦度」の維持である。出力電圧が下がるとクライストロンのパワーが下がり、電子を加速する際に悪影響を与えるからである。

平坦度を維持することは大容量のコンデンサが必要になり電源が大型化する。そこでサグ (コンデンサの電圧低下による出力電力波形のパルス平坦部における下降割合) を

補償するための有効技術の一つとして検討されているのがマルクス型電源である。

マルクス型電源（マルクス回路）は、並列で DC を各セルに充電（蓄電）し、それを直列にして放電することによって、各セルの電圧が足し算され、段数倍の電圧を出力できるという原理である。マルクス回路方式の利点は、同じ回路が繰返し使われるので、1つの回路をユニット化し重ね合わせれば、欲しいだけの電圧を得ることができる点である。また、マルクス電源の魅力は、ユニット化で低コストで量産化（低価格の普通の部品を流用できる）できること、波形制御面で柔軟性をもった電源をつくれることにある。

図表 II-27 マルクス回路方式の動作原理



(出典) KEK 資料

## (2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態

### ① ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善

モジュレータから主線形加速器トンネル内のクライストロンにパルスパワーが供給される。従来、大電力モジュレータにはガスあるいは真空のチューブスイッチが用いられていたが、寿命及び信頼性に限界があった。最新の技術により、このようなスイッチに代わり、より信頼性の高い固体素子を用いることが可能である。しかし、固体素子を利用した最新のマルクス電源の試作品実用化が可能であることを実証する必要がある。KEK では SLAC と協力の上で、国内メーカーと共に試作品の製造開発を進めている。

### ②最新開発・製造実態 <KEK>

現在、世界に存在する ILC 向けのマルクス型電源としては、「SLAC-P2 電源」、「チョップパ型マルクス電源」、「DTI 電源」の3種類がある。このうち、KEK では DTI 電源とチ

チョッパ型マルクス電源について検証及び開発を行なっている。原理的にはそれぞれの電源は、ILC・TDRの仕様を満たすとされている。各電源の大きな違いは、ユニット/セルの数、サグの補償方式、装置の電氣的絶縁方法（気中、油中）である。

図表 II-28 ILC 向けマルクス型電源（3タイプ）の概要

	SLAC-P2電源	DTI電源	KEKチョッパ型電源
Unit Voltage	4 kV	6 kV	6.4kV
Number of units (cells)	32(32)	20(20)	20(80)
Input DC	4 kV/1 kV	10 kV	2 kV
Insulation	Air	Oil	Air
Redundancy	N+2	N+1	N+1
Regulation	PWM corrections	16 correction cells	PWM corrections
	1台コピーを製作 P2電源技術の習得 P2電源評価	SLACから貸与 フル試験評価	チョッパ方式 長岡技術科学大学 との共同開発

(出典) KEK 訪問ヒアリング時入手資料

#### a) SLAC-P2 電源 <P2-Marx Modulator>

米国の SLAC で開発されたマルクス型電源である (P1 が一世代目、P2 は二世代目)。この P2 電源はマルクス型電源開発の中で一番進んでおり、ILC・TDR のベースラインに採用されたものである。SLAC-P2 は、32 ユニットの電源を直列に接続してパルスを生成する。ユニットの最大出力電圧 4 kV、最大出力電流 200A、各ユニットの重量は約 22kg 以下である。

SLAC での MBK クライストロンを使用した実証実験の結果、最高出力電力については ILC 基準を満たすことに成功した。また、電力効率については、95%を達成した。なお、最も大きなロスはコンデンサに充電する際に発生している。

SLAC-P2 のメリットは、次の点である。

- ・大気中で稼働しているため、修理やメンテナンスが容易（低コスト）である。
- ・各ユニットにはサグ補償回路が付加され、出力電圧波形の平坦度がよい。
- ・各ユニットに対して回路保護機能、各種モニター（電圧、電流、温度等）機能、波形制御機能を有し電源制御が優れている。

一方、SLAC-P2 のデメリットとしては、他の電源よりセル内の回路を構成する素子数が多いためコストのかかることが挙げられる。

現在、SLAC では、32 ユニット (32 セル) は既に完成し動作実証も完了しているが、長期連続運転するための高エネルギー実証プロジェクトは停止しており、数千時間の稼働に耐えるかどうかの実証は行われていない状況にある。

図表 II-29 SLAC-P2 電源の概要



(出典) KEK 訪問ヒアリング時入手資料

#### b) KEK チョッパ型マルクス電源

チョッパ型マルクス電源は、現在 KEK で開発中の技術であり、セルをチョッパ回路のみで構成し、コストの削減を目指したものである。電源の仕様は、ユニット数 20 (80 セル)、ユニット当たり出力電圧 6.4kV、出力電流 140A である。

チョッパ回路の特徴は、電流を時間的に制御 (パルス幅制御) することによって、フラットな出力電圧波形をつくることのできる点にある。

チョッパ型電源のメリットは次の点である。

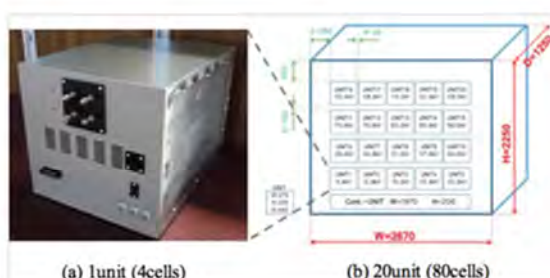
- ・セルの回路 (チョッパ回路) は構成する素子数が少なく、回路動作も単純である。
- ・波形制御はパルス幅制御だけの簡単なものである。
- ・小型化、低価格化が可能である。

KEK におけるチョッパ型電源についての開発状況は、現在ユニットを 2 台製造し、それぞれの性能について実証実験中である。2016 年春にクライストロン電源 1 台分の 20 ユニット (80 セル) を製造し、電源として正常に動作するかの実証を行い、その後総運転時間で千時間程度の連続運転試験を行なう予定となっている。

図表 II-30 KEK チョッパ型電源の概要

1 unit の仕様

Parameters	Specifications
Output voltage	6.4 kV
Output current	140 A
Pulse width	1.7 ms
Repetition frequency	5 Hz
Output pulse flat-top	< 1%(p-p)
Rise time(10-90%)	< 100 $\mu$ s
Number of cells	4(2 kVx4)



2.7 mW, 1.3 mD, 2.3 mH

(出典) KEK 訪問ヒアリング時入手資料

### c) DTI 電源

DTI 電源は、SLAC の P2 電源と同時期に、米国ボストンにある DTI 社が開発したものであり、現在は SLAC によって所有・管理されている (DTI 社から SLAC へ納品)。電源の仕様は、ユニット数 20、ユニット当り出力電圧 6kV である。

SLAC は、独自の P2 電源を開発しているため、DTI 電源の評価を KEK に依頼した。KEK は長期借用の形で DTI 電源を借りて検証している。

DTI 電源のメリットは次の点である。

- ・主セルと補助セルを直列で繋ぎ、全体の安定性が担保される
- ・装置本体が絶縁油につかっており、耐圧に優れているためコンパクトにできる、また冷却もしやすい

一方、DTI 電源のデメリットとしては、修理するには油タンクから出さなければならないなど、メンテナンス面での問題が指摘されている。

DTI 電源 (初号機) は、KEK の STF で試験運転が行われていたが、途中で補助セルの IGBT が短絡故障して本格的な稼働には至っていない。

写真 : DTI 電源



Size 1.5 m x 2.5 m x 2m(H) Oil-filled tank

(出典) KEK 訪問ヒアリング時入手資料

### (3) モジュールの評価と技術的課題

#### a) ILC 向けモジュールの技術的達成度 <欧州>

欧州の研究機関は ILC 向けのモジュールの研究開発には、携わっていないため、技術的達成度の評価の対象外である。

#### b) ILC 向けモジュールの技術的達成度 <米国：SLAC>

##### 【技術的達成の状況と技術面での課題】

SLAC-P2 は ILC の仕様を満たしている電源であるが、長時間運転が実施されておらず、具体的には 500～1,000 時間の運転にとどまっている。

LCLS-II は CW システムであり、高周波源として半導体を使用しているが、ILC はパルス大電力のためモジュール+クライストロンを使用している。したがって、異なる RF 電源となるため、P2 電源の研究は進んでいない。

P2 については、1 ユニット (32 セル) は既に完成し動作実証も完了しているが、2012 年には開発予算もなくなり、長期連続運転の実証の段階でストップしている状況である。現在は、電源そのものが稼動しておらず、再開の目途も立っていない。

##### 【工業化における課題と対策】

P2 電源では、配線部分の多くが外部企業によってなされたが、約 5% に不具合が見つかるなど安定性に問題があったため、配線における細かな仕様を改めて設定した。

電源筐体 (Enclosure) について、P2 では SLAC が自前で作成したが、この部分は比較的容易に外部委託できると考えられるため、今後の検討事項となると考えられている。

絶縁ゲートバイポーラトランジスタ (IGBT) とコンデンサについてはそれぞれ 1 社から仕入れていた。特に IGBT については仕入先のイギリス企業がプロジェクト中に中国の企業に買収され、供給が安定しなくなった。今後、産業化を進める際には複数ベンダーによる供給体制を構築する必要がある。

上記に加え大きな問題点となったのは仕様に関する情報提供についてである。マルクス電源の開発内容については DOE への報告書に纏められ、共同研究を進める KEK と電源技術を持つ某社が開発を引き継いだ。ところが、DOE の報告書の中身だけではベンダーが開発を実施することは難しく、SLAC の担当者とのやり取りが膨大なものとなってしまった。SLAC として技術革新の重要性は認めるものの、KEK が開発主体となった状態で、専門的なノウハウを持たない産業化についてのやり取りをこなすのは非常に大きな負担となった。

他方、FNAL が PIP-II (Proton Improvement Plan-II) でマルクス電源の独自開発を検討しているが、SLAC との非効率な情報共有による開発の遅れが懸念される。ILC を含む国際プロジェクトは研究機関の連携が重要であり、情報共有をより円滑に進める仕組みについて議論する必要がある。

c) ILC 向けモジュレータの技術的達成度 <日本：KEK>

KEK では、独自に開発しているチョップパ型マルクス電源は、ILC のパルス電源への要求事項であるコンパクトであること、高稼働率であること、低コストであること、メンテナンスが容易であることを全て満たしていると判断している。現在、KEK はチョップパ型電源の開発に集中しており、この開発が成功すれば ILC のマルクス電源として利用できるという見通しを持っている。

KEK のチョップパ型電源の技術開発上のポイントは、高性能の半導体スイッチ等のハードウェアの開発と、それを制御するソフトウェアの開発にある。

半導体スイッチについては、高速で正確にオン・オフを安定的に実現することが技術的課題である。また、半導体素子自体の改善（高速化、大電流化、高耐圧化、低損失化）も欠かせないとされている。

さらに、各セルのコンデンサに充電する場合、コンデンサごとのオン・オフや回路の接続・遮断等の制御を行なうソフトとハードが一体化した、パワーエレクトロニクスが必要となるため、その開発も課題である。

KEK が開発しているチョップパ型電源の性能は、高性能の半導体スイッチ（チップ）の開発にかかっている。最近では、日本は SiC（シリコンカーバイド：炭化ケイ素）の開発を行なっている。一部非常に高耐圧かつ高速でロスが少ない半導体チップが市販されるようになってきているが、まだ不十分である。この半導体チップは、他に用途はあまりなく、マルクス電源用に開発しなければならない。このため、現時点では量産品ではなくコスト（価格）の高いことが問題である。

## 2) クライストロン

### (1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要

ILC の空洞を駆動する RF 電力は、10MW の L バンドクライストロン (設計ベースラインが多重ビーム方式に基づく) によって提供される。多重ビームクライストロン (MBK) の現行ベースラインは、電子流を低パービアンスのビーム 6 本に分け、空間電荷効果を弱めながらビーム電圧の低下を可能にするというものである。次図表に MBK の主なパラメータを示す。10MW クラス MBK の設計は、TESLA の概念設計の頃に始まり、E-XFEL プロジェクトを通じて進展した。

図表 II-31 10MW マルチビームクライストロンのパラメータ

Parameter	Specification
Frequency	1.3 GHz
Peak power output	10 MW
RF pulse width	1.65 ms
Repetition rate	5.0 (10) Hz
Average power output (5 Hz)	82.5 kW
Efficiency	65 %
Saturated gain	> 47 dB
Instantaneous 1 dB BW	> 3 MHz
Cathode voltage	> 120 kV
Cathode current	< 140 A
Filament voltage	9 V
Filament current	50 A
Power asymmetry (between two output windows)	< 1 %
Lifetime	> 40,000 hours

写真 : 10MW マルチビームクライストロンの例



(出典) TDR



## 【クライストロンの補足説明】 <KEK>

クライストロンは、大電力の電子ビームを高周波で変調することで、大電力の高周波へ増幅して出力する装置である。具体的には、先ず電子ビームを発射する(DC状態)。そのビームにLLRF(Low level RF)を入力することで、ビームの速度を変え(速度変調)、AC状態で共振し粗密波になった電子の塊から最終的に1.3GHz高周波を出力させるという仕組みである。

電子ビームから高周波へ変換する際のエネルギー変換効率(高周波として出ていく割合)は、ビーム電流が低いほど向上するが、低電流ビームは持っているエネルギーが小さいためより高い電圧をかけなければ高い出力が得られない。高い電圧は、放電が発生するあるいは電源が高価になるなどの問題が多いため、できるだけ低い電圧が望ましい。

その解決策として近年開発されたマルチビーム方式は、比較的低エネルギーのビームを6本用いビーム1本あたりの変換効率を向上させ、全体として(6本の和として)通常50%であったエネルギー効率を65%へと上昇させた。変換効率65%をさらに上げるためには、原理的には、1本1本のビームをさらに低電流にする、ビームの数を増やすなどの方法があり、現在様々な研究が行われている。

## (2) ILCのPR(進捗報告書)に示される技術改善及び最新開発・製造実態

### ①ILCのPR(進捗報告書)に示される技術改善

#### <5.2 RF電源システム、クライストロンの実用化>

TDRに盛り込まれた重要な更新事項の一つに、クライストロン変調器電源の実用化が挙げられる。この実用化は、従来の変調器よりはるかに信頼性が高くコスト効果面で優れた半導体マルクス発生器をTDRのデザインにおいて選択したことに基づいている。このことは、ビーム稼働中の立ち入りを認めないように条件を変更し、遮蔽壁の厚さを減らす決定を行う上で重要な要素である。

### ②最新開発・製造実態

#### a) E-XFEL向け(ILC向け)クライストロンの製造実態

E-XFEL向けの10MWマルチビームクライストロン(ILC向けと同様)を製造し、DESYに納入しているのは、フランスのThales社(Thales Electron Device社)と東芝電子管デバイスの2社である。その他、米国のCPI社も製造しているが、DESYには納入していない。各社の製造の実態は、以下のとおりである。

Thales社は、E-XFELに23台のMBK(同社型式TH1802)を納入した。供給能力(実績)は、年間12台/年である。東芝電子管デバイスは、E-XFEL用のMBK(同社型式E3736H)を7台DESYに納入した(公開資料より情報入手)。

両社のE-XFEL向け(ILC向け)のMBKの性能は、次図表のとおりである。双方のスペックは、周波数1.3GHz、ピーク出力10MW、平均出力約150kW、RFパルス幅1.5msecなどとほとんど変わらないが、効率は東芝電子管デバイスのほうが66%と

若干よい。

図表 II-32 ILC 向け MBK の仕様比較

項目	東芝電子管 デバイス <E3736H>	Thales <TH1802>	CPI <VKL-8301A/B>
周波数 Frequency	1.3GHz	1.3GHz	1.3GHz
ピーク出力 Peak Output Power	10MW	10MW	10MW
平均出力 Average Output Power	151kW	150kW	150kW
効率 Efficiency	66%	63%	65%
利得 Gain	49dB	47dB	
RF パルス幅 Pulse Length	1.5msec	1.5msec	1.5msec
パルス繰返 Repetition Rate	10Hz	10Hz	10Hz
ビーム電圧 Beam Volt.	115kV	116kV	117kV
ビーム電流 Beam Curr.	132A	136A	132A
重量 Weight (全システム)	2,800kg	4,500kg	
全長 Length (全システム)	2.5m	3.15m	

(出典) 各企業公式 Web ページ掲載情報 (2016 年 1 月 12 日現在) 等を参照

写真：東芝電子管デバイス MBK (E3736H)



写真：Thales MBK (TH1802)



写真：CPI MBK (VKL-8301A/B)



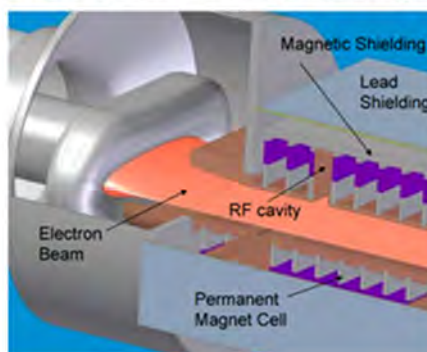
b) ILC 向け MBK の製造コスト低減の取組み <SLAC>

SLAC（米国）は、クライストロンの低コスト化を目指して研究を進めており、シートビーム（Sheet Beam）という技術と永久磁石を使用することで、同じ効率、電圧における製造コストの低減を図った。しかしながら、永久磁石では磁界が強くなく、ビームが壁にぶつかってしまう問題が発生し、高コストであったことから検討を中止した。

図表 II-33 SLAC におけるシートビームクライストロンの概要

### SLAC Sheet Beam Klystron

An elliptical beam is focused in a periodic permanent magnet stack that is interspersed with rf cavities – gives same high efficiency (65%) as multiple beams but less expensive with use of permanent magnet focusing



(出典) SLAC 訪問ヒアリング時入手資料

### (3) クライストロンの評価と技術的課題

#### ①MBKの現製品（技術）は ILC 向けに十分利用可能 <企業>

ILC の MBK のスペックは、120kV、140A、1.65ms、5Hz となっている。一方、Thales 社、東芝電子管デバイス及び CPI 社が DESY の E-XFEL に開発・製造した MBK の仕様は、若干数字的に異なっている部分がある。

しかし、ヒアリングによれば、ILC の仕様に合わせるために多少の機械設計変更は必要となるが、基本的な原理が変わることによる大幅な設計変更は必要ないとされる。したがって、両社の MBK の現製品（技術）は、基本的には ILC 向けに利用可能であり、ILC の要求性能を満たすと判断してよい。

図表 II-34 ILC 向け MBK の仕様比較

項目	ILC (TDR 仕様)	東芝電子管 デバイス <E3736H>	Thales <TH1802>	CPI <VKL-8301A/B>
周波数 Frequency	1.3GHz	1.3GHz	1.3GHz	1.3GHz
ピーク出力 Peak Output Power	10MW	10MW	10MW	10MW
平均出力 Average Output Power	82.5kW (5Hz)	151kW (10Hz)	150kW (10Hz)	150kW (10Hz)
効率 Efficiency	65%	66%	63%	65%
利得 Gain	>47dB	49dB	47dB	
RF パルス幅 Pulse Length	1.65msec	1.5msec	1.5msec	1.5msec
パルス繰返 Repetition Rate	5.0(10)Hz	10Hz	10Hz	10Hz
ビーム電圧 Beam Volt.	>120kV (耐電圧)	115kV	116kV	117kV
ビーム電流 Beam Current.	<140A	132A	136A	132A

(出典) 各企業公式 Web ページ掲載情報 (2016 年 1 月 12 日現在) 等を参照

#### ②MBKの性能改善に向けた技術的課題 <Thales 社、CPI 社>

Thales 社は、同社の MBK モデルの効率の向上に向けた新技術開発に CERN と共に取り組んでいる。CERN では CLIC デモンストレーターにその改良された MBK を使う意図を持っているようである。また、Thales では、クライストロンの寿命期待値を最適化する目的で、長寿命カソード（陰極）の研究開発活動を行なっている。

CPI 社は、MBK は高電圧を必要とする状況下で効率を維持する有効な技術であり、今後も改良を進めていく予定である。具体的には BAC (Beam area compression) と呼ばれる技術（キッカー空洞を追加する）により 15%の効率向上が期待されている。ただし、この技術は 1970 年代に考えられたもので、技術の信憑性については議論の余地がある。

### ③MBKの量産化の可能性と課題

#### ■MBK量産化の前提：

ILCで必要とされるMBK（MLで380台、全体で約440台）を、日米欧3極で分担して6年間で生産すると仮定すると、年間1極当たり20台強となる。

上記の量産化に向けた日米欧の企業における対応の可能性については、以下のとおりである。

#### 【欧州：Thales社の可能性】

Thales社は、E-XFEL用のMBKを年間12台（月1台）製造し、キャパシティとしては、年間15台は可能であると回答している。

#### 【米国：CPI社の可能性】

CPI社の現状でのMBKの生産可能台数は、3ヶ月に1台という生産体制である。現在の設備体制等のままで生産台数を10倍（月間3～5台ほど）にすることは現実的と考えられている。生産体制の拡大は比較的容易だが、品質検査がボトルネックになる。人の増員や設備拡大は比較的容易であるが、精緻な検査には時間が必要とされている。

#### 【日本：東芝電子管デバイスの可能性】

同社ではMBK量産の潜在能力は持っているが、年間20台を超える生産量になると、他プロジェクト向け受注量を前提とする設備増強が必要となる。

MBKの量産化に向けて増強が必要となる主要な設備・機器は、真空排気ベーキング装置と試験装置(MBK専用のテストスタンド、エージング工程も含む)である。これらの設備設置には、ある程度大規模なスペース、高さが必要となる。同社はILC計画への参画を前向きに捉えているが、設備増強に関しては、経済的合理性(ピーク生産期間後対応含む)を考慮し判断したいと考えている。また、ILC建設地域にある加速器研究所設備を活用して、エージング、試験を並行して行う事も納入効率化に繋がると考えている。

### ④ILCに設置するMBKの動作調整面での課題

ILCで設置されるMBK（MLで380台）は、全て設計どおりに性能が出るわけではない。個々のMBKで電圧等の動作パラメータは異なる。各MBKのパラメータをある許容範囲（高低の範囲）に収まるように調整し、効率よく安定して動作する最適値に近づけることが不可欠である。その調整作業を行なう体制構築とマンパワー確保が課題になる。

### 3) 入力カプラー

#### (1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要

「TTF-III」入力カプラーは、TESLA 用に当初開発された。その後、欧州の E-XFEL で使用するために LAL と DESY の協力により改造された。設計の完成度と広範囲にわたる実績から、同カプラーは ILC 用基本電力カプラーのベースライン設計に採用された。次図表に同カプラーの主な仕様を記す。

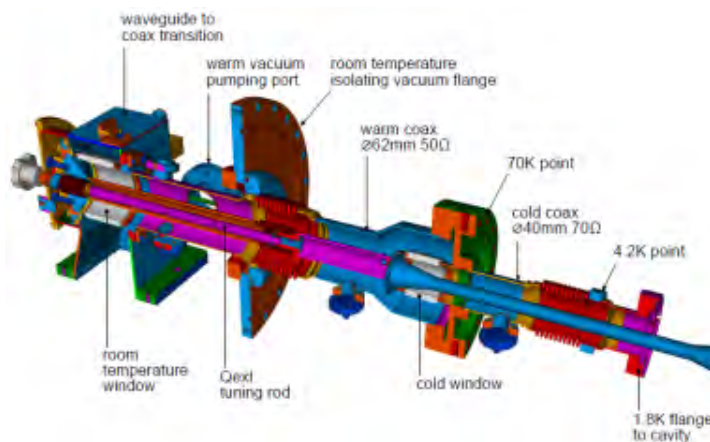
このカプラーはおよそ 130 個の部品から組立てられた複雑な装置である。空洞同様、カプラーも非常にクリーンな環境で組立てる必要がある。

図表 II-35 ILC 入力カプラーのパラメータ

Parameter	Specifications
Frequency	1.3 GHz
Operation pulse width	1.65 ms
Operation Repetition rate	5 Hz / 10 Hz
Maximum beam current	8.8 mA
Accelerating gradient of cavity	31.5 MV/m $\pm$ 20%
Required RF power in operation	$\sim$ 400 kW
Range of external Q value	(1.0 $\sim$ 10.0) $\times 10^6$ (tunable)
RF process in cryomodule	> 1200 kW for $\leq$ 400 $\mu$ s pulse width > 500 kW for > 400 $\mu$ s pulse width
RF process with reflection mode in test stand.	> 600 kW for 1.6 ms pulse width
RF process time	< 50 hours in warm state < 20 hours in cold state
Approximate heat loads	< 0.01 mW (2K static) 0.07 W (5K static) 0.6 W (40K static) < 0.02 W (2K dynamic) 0.12 W (5K dynamic) 1.6 W (40K dynamic)
Number of windows	2
Bias voltage capability	Required

(出典) TDR

図表 II-36 TTF-III (E-XFEL) 入力カプラー概略図



(出典) TDR

## (2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態

### ① ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善

#### < 5.1 SRF 加速空洞及びクライオモジュールの設計と組み込み >

重要性が高く費用の掛かる要素として、加速空洞の入力カプラーが挙げられる。E-XFEL で使用されているカプラーは欧州の企業連合により製造されており、RF コンディショニングは LAL で実施されている。多連空洞やクライオモジュールへのカプラーの組立て・組み込み作業は CEA-IRFU で実施されている。欧州の E-XFEL のカプラー製造及び組立ての経験に基づき、クライオモジュール組み込み中の組立作業を簡素化する目的で、KEK、CEA、CERN、DESY の協力によりカプラーの設計に関して見直しが進められている。

セラミック窓向け新素材は、二次電子放出を抑える効果が期待されており、カプラーの性能安定性及び製造コスト低減に寄与する可能性がある。KEK-STF 型のカプラー設計を採用すれば、多連空洞内のカプラー組立て、さらにクライオモジュール内での組み込みプロセスを簡素化することができる。新しいセラミック窓を使用し、E-XFEL 型 (当初は TTF-III 型) カプラーとのプラグ互換性のある最新型 KEK-STF 型カプラーが、CERN と KEK との協力により設計され試作されている。KEK と CERN の協力により間もなく試験が実施される予定である。

クライオモジュール組立てのプロセスに組み込むなど、コスト低減を目標としてカプラーの設計に関するバリューエンジニアリングを拡大する必要がある。

### ② 最新開発・製造実態

#### a) E-XFEL 向け (ILC 向け) カプラーの製造実態 < 欧州 >

E-XFEL 用カプラーは Thales 社と RI 社が共同で製造している。LAL へは、全体で 670 台のカプラー (契約ベース) が納品される予定になっている。2015 年 9 月現在では、580 個のカプラーが納品済みである。

両社の分担は、銅でコーティングしたステンレス部分及びアンテナ、キャパシタとモータードライブは Thales が製造し、窒化チタンをコーティングしたセラミック (Warm、Cold 両方) アセンブリ製造、導波管ボックスのろう付け、カプラーの電子ビーム溶接 (EBW)、カプラーの洗浄とアセンブリ及び ISO4 クリーンルーム内での RF 検査は RI 社が行った。カプラーは 40 ピースの部品から成る。

RI 社で組立てられたカプラーは、フランスの LAL へ搬送され、RF コンディショニングが行われる。

#### 【RI 社でのカプラー製造実態】

窒化チタンコーティングは社内で行っている。スパッタリングではなく、アンモニア雰囲気中でチタニウムを蒸発させる方式をとっている。DESY が開発した機器及びレシピで行った。1 日当たり 10 カプラーのコーティングが可能である。

カプラーをクリーンルームで、油脂分除去 (degreasing)、洗浄、粒子除去、アセン

ブリした後、2つのカプラーペアを合せてRFコンディショニングのためにフランスのLALに送る（毎週木曜日に8台）。

RI社でのE-XFEL用カプラー製造量は、8カプラー/週、400カプラー/年、稼働時間は5日/週（2シフト）。なお、RI社の生産初期においては、セラミックとEB溶接等に問題があった。

#### 【Thales社でのカプラー製造実態】

E-XFELカプラーは、Thales社トノン工場で生産している。主な工程は、メカニカル部品を生産し組立て、セラミックに部品を真空ロウ付けして銅メッキを行ない、セラミック窓部を製作する。

現在の生産ペースは10個/週。5日/週、2シフト体制で、延べ10シフト/週で生産している。Thales社の製造したカプラーについては、当初は銅メッキに問題があり、不良品がかなり発生した。問題のあった当時の不合格率はおおよそ10%であった。現在は、製造工程が改善され、この問題に起因する不合格率はほぼゼロである。

#### 【LALでのカプラーRFコンディショニングの実態】

LALはE-XFELのカプラーのRFコンディショニングを担当している。

RI社よりLALに搬入されたカプラーは、クリーンルームで梱包が解かれ検査されたのち、リークテストを行い問題がないか確認を行う。次にカプラーのベーキングを84時間かけて行い、RFコンディショニングを開始する前に、真空検査と残留ガス分析(RGA)を行ない検査する。

RFコンディショニングについては、電力ラインは5MWを4分岐して各ライン1MWずつ確保できるようにしており、各ラインには2個のカプラーが装着されるので同時に8個のカプラーのRFコンディショニングができる。RFコンディショニングは5つのステップに分けて行われ、チェック項目はRFパワー、放出電子、Cold Partの温度、各部位の真空度等である。

カプラーのRFコンディショニングの後は、Cold PartとWarm Partを切り離して梱包し、特別な輸送箱に入れられフランスのCEA-IRFU (Saclay)に発送する。

LALで不合格になったカプラーは、RI社に送り返され同社で修理する。生産が軌道に乗った2014年初頭から、現在に至るまでのカプラーの不合格率は概ね5~6%程度である（銅メッキ以外の問題に起因）。

### b) E-XFEL向け（ILC向け）カプラーの製造実態 <米国>

#### 【CPI社における製造の実態】

CPI社BMD(事業部)のパワーカプラーは、電子デバイス業界の標準工程を使用し、これにパワーカプラー特有の工程をに加えることで顧客の仕様にカスタマイズして製作される。

同事業部は、残留抵抗比(RRR)が高い銅でステンレス鋼をメッキする技術を開発した。メッキは、慎重にコントロールされた条件の下、社内で行われる。同事業部の



高 RRR 値の銅メッキは、コーネル大学や DESY から評価されている。

また、セラミックのウインドウに窒化チタン (TiN) でコーティングする技術も開発され、窒化チタンコーティングは慎重にコントロールされた条件の下で社内にて行われる。同事業部の窒素チタンコーティングの工程は DESY の認可を受けている。

同社は、E-XFEL パワーカプラーを週 6 台生産しており、週最大 8 台を生産する能力を有する。現在、LCLS-II 用に改良された 1.3 GHz TTF-3 型及び E-XFEL パワーカプラーを 140 台製造している。LCLS-II カプラーは CW 向けに設計されている。

CPI 社は、週最大 8 台のカプラー洗浄・組立てが可能な ISO6 / ISO4 のクリーンルームを保有し、LCLS-II 用カプラーの 150 度ベーキングも社内で行なっている。

CPI 社は、DESY と直接契約し、製造したカプラーを LAL へ RF コンディショニングのために納入している。LAL には、これまで 20 台納品した。

LAL によれば、CPI 社製カプラーには複数の問題が散見され、最初のカプラーは大量のガス放出があり CPI に返却された。その後、CPI 社が原因の究明を行い、不十分な洗浄による部品の汚染であることが判明し、洗浄工程の改善により問題が解決された。

#### 【LCLS-II におけるカプラーの開発状況】

LCLS-II におけるカプラーの必要数は 280 台で、半数は CPI 社、残りは Thales 社など欧州の企業からの納品となっている。KEK は別のデザインを有している。

カプラーのデザインはほぼ確定しているが、大きな懸念は組立て時の信頼性の確保である。組立てにはクラス 10 のクリーンルームが必要であり、その状態を保ったまま FNAL、JLab に輸送される。カプラーの銅コートは柔らかく、高圧クリーニングを難しくさせている。また、銅プレートの取り扱いも難しい。なお、RF コンディショニングは、LCLS-II では必要とされていない。

加工の簡略化による低コスト化が必要であると認識されており、例えば、電子ビーム溶接は高コストとなることから、代替の方法の検討や、同軸導波管変換器 (WG Box : カプラーを固定する部品) において、製造コストの高い銅のはんだ付けからアルミの機械加工への転換が考えられている。

導波管についてはこれまで精密な技術が必要であったが、1 つのアルミから製造することで、比較的 low コスト化が可能になると考えられている。

#### 【ILC カプラーに向けた提案】

新たな技術開発項目としては、カプラーのデザイン変更によって、銅メッキではなく (銅がはがれて空洞に入ると空洞の性能を維持できない)、銅の円筒を挿入し、銅を直接乗せるなどが考えられる。

窒素ドーピングによる高い Q 値を持つ空洞の製造によって、クライオプラントを低コスト化するか、パルスの延長 (elongation) 及び低電圧化によって RF とビームの効率を向上させることも考えられる。

c) E-XFEL 向け (ILC 向け) カプラーの製造実態 <日本>

東芝電子管デバイスはカプラーの試作品を LAL へ納入し、性能確認評価を完了しているが、最終的に E-XFEL 向けの量産カプラーの納入実績はない。

(3) カプラーの評価と技術的課題

①カプラーの ILC 仕様に対する技術達成度評価

a) E-XFEL 向け (ILC 向け) カプラーの技術的達成度 <欧州: RI 社、LAL>

RI 社と Thales 社の E-XFEL 用カプラーは既に ILC の性能基準に到達しており、課題は特に無いと認識されている。また、LAL は、カプラーを工業スケールで製造し、納入する能力 (最大週 10 個) を実証し、ILC に要求されるカプラーの性能を満たす上で、とくに技術的な障害はないと判断している。

b) E-XFEL 向け (ILC 向け) カプラーの技術的達成度 <米国: CPI 社>

ILC 用カプラーは E-XFEL で使用されるカプラーと同等の仕様であり、技術的課題は特になくともされている。生産における課題としては、コストの削減と生産規模の拡大の両立であると考えられている。

c) E-XFEL 向け (ILC 向け) カプラーの技術的達成度<日本: 東芝電子管デバイス>

技術的には、東芝電子管デバイスのカプラーは、E-XFEL で求められている性能スペックを十分に満たしており、E-XFEL のカプラーとほぼ同様な ILC 向けカプラーへ十分対応できる。

②カプラーの量産化の可能性と課題

■カプラー量産化の前提:

ILC で必要とされるカプラー16,000 台(注)を、日米欧 3 極で分担して 6 年間で生産すると仮定すると、年間 1 極当たり 890 台となる。

(注) カプラーの必要数は、ILC 超伝導加速空洞の全体必要数約 16,000 台に対応している。  
なお、加速空洞の製造予定数は、予備も含めて約 18,000 台が想定されている。

上記の量産化に向けた、日米欧の製造企業における対応の可能性と課題については、以下に示すとおりである。

a) ILC 向けカプラー量産化の可能性と課題 <欧州>

【Thales 社におけるカプラー量産化の可能性と課題】

Thales 社の量産化の見通しは次のとおりである。仮に 7 日/週、3 シフト体制にした場合、延べ 21 シフト/週となり、設備投資無しで生産ペースを倍増可能である。これによ

り年間生産数は1,000台となり、5年間で5,000台、すなわちILCが必要とする全体の約1/3（欧州分担分）を生産できる。さらに設備投資を行い、生産ラインを2倍にした場合、30～40台/週の生産も十分可能である。現在の同社トノン工場のカプラー生産設備は、DESYにより示された仕様に合わせた規模のものが作られた。トノン工場には敷地に十分余裕があるため拡張は容易である。

製造工程の中で重要な電子ビーム溶接については、工場に3,000人が勤務しており、作業習熟のための人員確保は容易である。ILCのような大規模プロジェクトへ対応する場合、エンジニアやポストクが電子ビーム溶接作業をするようではコスト面では折り合いがつかない。専門の工員を確保していくのが重要であると認識されている。

また、重要な銅メッキやロウ付け工程については、銅メッキが一番複雑であるが、ロウ付け工程も銅メッキ工程との相性の良い方法で行う必要があり、Thales社の有する特殊技術のひとつとなっている。普通のロウ付け工程では銅メッキの品質（RRR）が下がってしまう。カプラーの生産では、様々な工程とそのタイミング、大量生産に適した工法などが複雑に絡み合うので難しい。

#### 【LALにおけるカプラーの大量RFコンディショニングの課題】

E-XFELのカプラーの生産力は、約2年で800台（毎週8個の生産ペース）である。ILCの必要量は16,000台であるので、それを達成するためには、現在の生産スピードを10倍に上げて、工期を2倍にすれば、20倍のものを作ることができる。

LALの設備は、容易に2倍にすることは可能であり、3倍を視野に入れることもできる。ただし、RFコンディショニングのスピードを10倍にするとすると、単なる作業場ではなく大きな工場となる。現在、LALでE-XFELに配置されている人員は9人いるが、施設を2倍にしたとしても人員が2倍の18人になるわけではなく少なくて済む。5倍のスケールアップを考える場合は、研究所（LAL）で行うべきか、または企業に委託発注するか、その点も考慮すべきである。

LALでILC用のカプラーのRFコンディショニングは、現状では年間400台であるが、施設投資を行えば年間800台に倍増できる。ただし、16,000台全てをLALでやることは、10年かけてよいのであれば可能かもしれないが、ILC建設期間には限りがあるので、現実的にはLAL単独ではできない。

#### b) ILC向けカプラー量産化の可能性と課題 <米国>

##### 【CPI社における量産化の可能性と課題】

ILCに必要なカプラー数（CPI社は18,000台と認識）から逆算すると、1年当たり約1,200台のカプラーを生産する必要がある（米国ではCPI社のみが5年で生産と仮定）。

これを達成するためには、現在の生産体制から鑑みると、2～3シフトが必要となる可能性があるが、2シフトであれば問題ないと考えている。

カプラーは非常に多くのステップを要する部品であり、量産化には、構造自体の単純化が求められている。TTF-IIIでは、SLACとDESYのデザインでカプラーが考案され、E-XFELを通じて構造が幾分単純化された。

また、最終製品の信頼性を向上させるため、多くの内部検査が設定され、専属の要員を配置することも重要となる。各検査では、写真を含む手順の詳細が示されることも重要であり、検査に客観性を持たせることが不可欠となる。

#### c) ILC 向けカプラー量産化の可能性と課題 <日本>

##### 【東芝電子管デバイスにおける量産化の可能性と課題】

カプラー890台を1社で生産すると仮定した場合、同社の現行の工場設備では対応できない。カプラー組立には高いレベルのクリーンルームの設置が必要になる。その他、大型生産に向けて、電子ビーム溶接設備、真空ろう付け設備が必要になる。但し、これらはそれほど大規模な設備ではなく、またカプラー専用の特別なものではないため、社外パートナー会社や加速器研究所との協業を含めることで対応可能と考えている。

カプラーを量産する場合、銅メッキがポイントの一つとなる。一般工業製品向け銅メッキとは全く異なるレベルの品質が要求され、金属表面処理、メッキ装置の各種パラメータにノウハウが必要となる。

#### d) ILC 向けカプラー量産化の課題 <共通>

カプラーは繊細な部品であり、クリーンルームでの作業が必要となる。カプラーの低温部は加速空洞に直結するため、クリーンさが特に重要となる。

カプラーを量産する場合、銅メッキがポイントの一つになる。

### ③カプラーの設置・維持管理上の課題

ILC 用のカプラーは、1台1台にアークモニターを付けて監視し、メンテナンスすることになるが、16,000台を同時に行なうのは非常に大変な作業になるのではないかとの見方がある。例えば、カプラー1台が年に1回トラブルを起こすと仮定する（あくまでも仮定でありトラブルの程度により実際は異なる）と、16,000台のカプラー全体では、1日当り40回程度（30分に1回）トラブルを起こす計算になる。そうなれば、加速器をほとんど動かすことができない可能性も出てくる。

したがって、ILC では16,000台のカプラーの故障頻度、寿命の推定及び品質管理手法の確立が課題である。特に、カプラーの運転中のトリップレートをどの程度に見積り、それを実現するための方策をどのように確立するかが重要である。

### ④カプラーを日本で集約・結合する場合の課題

ILC 計画への参加各国で製造されたカプラーを各国から日本へ輸送し、日本で集約・結合（組立）する場合の課題を、「場所・輸送」、「性能・品質」、「規制・管理」の視点から整理する。

A：場所・輸送の問題（イシュー）

図表 II-37 カプラーの場所・輸送に係る問題（イシュー）

項目	問題（イシュー）
■長距離海上輸送の問題（イシュー）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・LALは長距離海上輸送の経験がない。想定される主なリスクは、振動や動揺によるアンテナの機械的損傷（外部導体による衝撃）、ネジの緩みに起因する部品からの漏洩などである。</li> <li>・LALは過去に、R&amp;D連携プログラムの枠組み内で、パリから筑波へのカプラー輸送（陸上→空輸→陸上）を経験している。この時も、適切な梱包を使用しており、問題はなかった。</li> <li>・長期保管により、RF コンディショニングの効果が部分的に失われる可能性がある。しかし、カプラーはモジュール組立て後に（高速手順で）再コンディショニングされる。&lt;LAL&gt;</li> </ul>
■陸上輸送の問題（イシュー）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・LALは、RF コンディショニング前にペアで組立てたカプラーの輸送を経験している：ドイツからフランスへ（陸上→陸上、トラックによる 18 時間の輸送）及び米国からパリへ（陸上→空輸→陸上、トラックと航空機による 10～15 日間の輸送）。適切な配送用ボックスを使用したため、問題はなかった。</li> <li>・LALは、カプラー部品の輸送も経験している（RF コンディショニング後に高温部と低温部で別々に輸送）：パリからハンブルクへ（陸上→陸上、トラックによる 24 時間の輸送）。この時も適切な配送用ボックスを使用したため、とくに問題はなかった。E-XFEL プロジェクトの枠組み内で、モジュールに組込んだカプラーはパリからハンブルクへ毎週出荷されている（陸上→陸上、トラックによる 24 時間の輸送）。当機関が知る限り、適切なフレーム及びトラックを使用した場合、大きな問題は発生しなかった。&lt;LAL&gt;</li> </ul>

B：性能・品質の問題（イシュー）

図表 II-38 カプラーの性能・品質に係る問題（イシュー）

項目	問題（イシュー）
■長期的な性能低下の問題（イシュー）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・各サプライヤーは独自の製造工程を有するため、各社の性能に差異が発生する。関係する研究機関と企業が、特に生産量拡大段階で密接かつ迅速に連携することを強く推奨する。それにより、関係する企業は試験結果からの迅速なフィードバックを受け取り、必要があれば製造プロセスを再調整することができる。</li> <li>・カプラーが長期間にわたって同一製造工程で生産されている場合も、性能と品質が変化する可能性がある。これは原材料品質のロット間ばらつきや、サプライヤー又はその外注先の人員体制の変更（作業者に依存する工程（クリーニング、EB 溶接、機械的組立、目視検査、管理など））、</li> </ul>

	<p>工具や機械の劣化、管理及び品質チェックの緩和などに起因する場合がある。厳密な工業監視及び慎重な品質管理計画が不可欠である。</p> <p>&lt;LAL&gt;</p>
--	---

C：規制・管理の問題（イシュー）

図表 II-39 カプラーの規制・管理に係る問題（イシュー）

項目	問題（イシュー）
■規則・規制	・カプラー生産に関してはない。<LAL>

#### 4) 機械式チューナー

##### (1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要

TDR 段階における S1 グローバルプログラムにおいて、(i) レバーアーム型、(ii) ブレード型、(iii) スライドジャック型の 3 種類の異なるチューナーの設計の適確さが技術的に実証された。

##### (2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態

###### ① ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善

###### < 5.1 SRF 加速空洞及びクライオモジュールの設計と組込み >

TDR に続く次の段階では、最も費用対効果の高い設計について調査が行われた。現在、レバーアーム型チューナーの最新版の設計がフェルミ国立加速器研究所 (FNAL) で進められている。設計は、E-XFEL の加速空洞システムで用いられた当初のレバーアーム型チューナーと非常に類似しているが、E-XFEL のチューナーと比較して縦方向に短く設計する必要のある ILC の加速空洞レイアウトに合わせて修正されている。この修正型レバーアームチューナーの設計の ILC 用加速空洞システムへの適合性に関して、FNAL、SLAC 国立加速器研究所 (SLAC)、フランス原子力庁 (CEA)、及び KEK の協力により現在検討が進められている。

E-XFEL の経験に基づく改良版のチューナー設計に関する現在進行中の作業は継続する必要があり、同じく先ほど検討した LCLS の SRF 加速空洞製造とも密接に連携し、試作品の実証が必要である。

図表 II-40 コスト効果の高い機械式チューナー及び入力カプラーの改善方向



(出典) KEK 資料

## 5) ローカル RF パワー供給システム (LPDS)

### (1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要

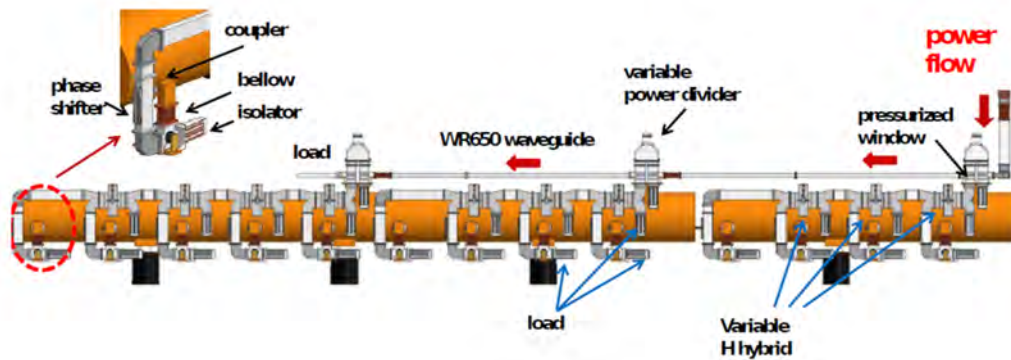
クライオモジュール付近への導波管の配置と取り付けは、KCS (Klystron Cluster Scheme) と DKS (Distributed Klystron Scheme) の両方で同じであり、一般的にローカル RF パワー供給システム (LPDS : Local Power Distribution System) と呼ばれる。

LPDS の設計は、以下を備える必要がある。

- 最低限の RF 損失で空洞に RF 電力を分配するための、費用対効果の高い方策
- 個別空洞への分配電力を遠隔で個別に調整し、勾配性能の±20%の広がりを実現する柔軟性

さらに、DKS と KCS の共通設計を可能な限り保ち、DKS に関してはルミノシティのアップグレードで必要とされる、1 クライストロンごとに 26 台の空洞を運転する構成に対して、比較的容易に再構成できる機能を提供することが望ましい。

図表 II-41 ILC における LPDS の機器全体構成



### 【LPDS の補足説明】 <KEK>

クライオモジュールそれぞれにある 9 台もしくは 8 台の超伝導空洞のうち 13 台へ RF を供給する導波管系を LPDS (Local Power Distribution System) と呼ぶ。

LPDS に対する要求としては、以下のものが挙げられる。

- コストを抑えつつ、個々の空洞の入力パワーとその位相をリモート制御で調整可能にする
- 平均  $31.5 \text{ MV/m} \pm 20\%$  の加速勾配分布 (ばらつき) を持つ超伝導空洞に対して、クエンチしないギリギリのところでパワーを入れ、平均加速電場を最大化する

クライストロンから空洞までは、WR650 という導波管を使う。クライストロンから出た直後の RF 出力は、2 : 1 の分割比のハイブリッドと合成器でパワーを 3 等分に分割し、3 つの LPDS に送る。そのうちの 1 つ (MBK から 34 m 離れる) は、伝送中のパワー損失を減らすために途中 WR770 (WR650 より径が大) の導波管で伝送する。

LPDS は、2 種類の電力分配器 (可変電力分配器、可変 H-ハイブリッド)、移相器、アイソレータから構成される。また、RF 入力と空洞からの RF 反射をピックアップするポートも付いている。



## (2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態

### ① ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善

特に記述無し

### ② 最新開発・製造実態<日本高周波、KEK>

#### a) 導波管

日本で導波管の製造をしているのは、日本高周波と古河 C&B の他、島田理化工業や住友電気工業、三菱重工業が挙げられる。

導波管の口径の大きさは基本的に周波数とパワーによって決まる。周波数が低いと口径が大きくなる。ILC は周波数が 1.3GHz で高いため、J-PARC の 324MHz や 972MHz と比較して口径が小さくなる。導波管の長さは設備全体の設計による。

KEK・STF の導波管の中は基本的に大気圧で真空ではない。ただし、クライストロンから出ですぐの部分は、導波管内の放電抑止のため SF<sub>6</sub> (六フッ化硫黄) で加圧している。しかし SF<sub>6</sub> は温暖効果ガスのため、ILC では導波管の一部を N<sub>2</sub> (窒素) で 1~2 気圧 (ゲージ圧) に加圧して運転する。

SACLA で求められる位相等の精度と比較すると ILC は SACLA の 5 倍ゆり精度でよい。なぜなら、ILC は波長が長いからである。SACLA の 5.712GHz では 1 波長は約 50mm となるのに対して、ILC の 1.3GHz では 230mm と長くなる。導波管は水冷であるが温度は 30°C 程度でよいので、クライオモジュールの冷却とはシステムが異なる。

#### b) ダミーロード

ダミーロードは導波管に電波吸収体を入れたもので、水冷設備で熱を逃がす構造になっている。STF 向けの部品については、ILC で求められる要求を一通り達成している。

#### c) アイソレータ

アイソレータとは、ダミーロードとサーキュレータを組み合わせたものの名称である。クライストロンから出た高周波 (RF) が超伝導空洞へ供給される際、一部の RF は空洞から反射される。その反射波がクライストロンに戻るとクライストロンのセラミック窓を破損する恐れがあるので、アイソレータで RF 伝搬方向を曲げてダミーロードで熱に変え、クライストロンの保護をする。

#### d) 可変電力分配器

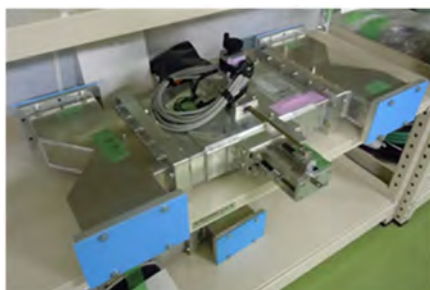
可変電力分配器は、RF 出力比や RF 出力の位相を変更するための装置であり、米国 SLAC で開発され、加圧での運転が可能となっている。

#### e) 可変 H-ハイブリッド

可変 H-ハイブリッドは、KEK で開発・設計されたもので、導波管内のフィンを動かすことによって導波管内の特定のモードの速度を変え、2つの出力ポートの出力比を

変える装置であり、KEK で既に使用している。ただし、今のところ加圧で使えるシステムにはなっていない。

写真：可変 H-ハイブリッド



(出典) KEK 資料

#### f) 可変移相器

可変移相器は、導波管内の管内波長を変更することで位相調整を行う装置である。DESY 製と KEK 製の 2 種類がある。KEK 製のものは、導波管/同軸管構造を切り替えることにより管内波長を変更させる原理である。両者ともに改良・改善の余地はある。

写真：可変移相器

DESY 製



KEK 製



(出典) KEK 資料

### (3) ローカル RF パワー供給システム (LPDS) の評価と技術的課題

#### ① LPDS とクライオモジュールの一体化における技術的課題

ILC では、地上でクライオモジュールと LPDS を一体化して、地下トンネルへ運ぶという計画になっている。一体化にあたり、クライオモジュール (12.6m) の重量は 9 トン、LPDS 系は約 1.3 トンになる。このため、クライオモジュールの片側に LPDS 系の 1.3 トンの重さがかかるという構造になる。LPDS のクライオモジュールへの取付けやインストールの方法について (どこで組立て、試験し、どのようにインストールするか) は、今後の検討課題である。

E-XFEL では、導波管系とクライオモジュールの一体化が既に行われており、ILC に向けて日本 (KEK) 側では検討を始めた状況にある。

KEK では、STF 加速器における様々な実証の一環として、ILC の構成に準じた LPDS のシステム (可変 HB、移相器を用いた LPDS 系 < 4 空洞 × 3 セット >) の構築を予定

している。2016年からのビーム運転では、このLPDS系を使用するが、ILCに要求されている加圧立体回路系、クライオモジュール一体型のLPDSの実現と試験は、その次のステップである。

写真：LPDSと一体化したクライオモジュール（E-XFEL用）



(出典) KEK 資料

## ②導波管等の量産化の可能性 <日本高周波>

### ■導波管量産化の前提：

ILCに必要とされる導波管（仮に3万台と仮定）を、日米欧3極で分担すると年間1極当たり1万台となる。

上記の量産化に向けた日本の企業（日本高周波）における対応の可能性については、以下のとおりである。

日本高周波では導波管及び素子の製造・組立は手作業で行なっているので、現状の設備では年間数十個が受注の最大数である。年間1,000台規模の製造依頼がきた場合には、日本のメーカーはどこも量産化の環境が整っていないので、量産化に向けた検討が必要になる。

ILC向けの導波管及び素子の量産化に対応する場合には、週産25台の製造が必要である。そのためには、人員を100人規模で増やさなければならない。

また、人員増とともに測定治具（ネットワークアナライザー）を揃える必要がある。同社で使用しているネットワークアナライザーは、様々なコンポーネントの測定が可能である。特に特殊な機器ではなく、加速器以外の製造現場でも利用されているが、高級な測定器で1名あたり1台必要になるため、初期投資だけで検査担当者1名あたり約500万円かかることになる。

導波管や素子については、製造はもとより、検査と調整に時間がかかる。現在は1台の検査と調整に1日を要している。しかし、検査のみであれば一時間に1台処理できるため、調整に割く時間が少なければ生産性を上げること（1日当たり3～5台）が可能である。

### ③導波管等の量産化の技術的対応課題 <日本高周波>

#### a) 溶接から鋳物への変更

量産化に向けた製造技術としては、溶接ではなく鋳物にするなどの対応が必要になる。鋳物では治具を使う作業のため、熟練技術者でなくても対応が可能である。したがって、ある程度の技能を持った人員さえ揃えることができれば量産化への対応は可能である。導波管のフランジも鋳物で作れば自動溶接よりも安価になる可能性がある。

なお、導波管の溶接については、通常の工業製品レベルの溶接でよい。また、内面は鏡のように研磨する必要はなく、酸で洗浄し脱脂する程度でよい。

#### b) 磁石・フェライトの品質維持

サーキュレータに使用される磁石は外部から調達するが、同じ品質の磁石を継続的に仕入れることが重要である。

また、フェライト（電波を曲げる誘電体）の品質の均一性も重要なポイントである。フェライトはサーキュレータの心臓部分で、RF特性の安定化や挿入損失に大きくかかわっておりクライストロンから空洞へ効率よく RF を供給するためには同じ品質である必要がある。

#### c) 導波管に入れるガスへの対応

大気中では、電圧が 3kV/mm を超えると放電してしまうため、クライストロンから出力された RF の電圧が 3kV/mm 以下になる最初の分岐まで放電防止のためガスを入れる。入れるガスは SF<sub>6</sub>（六フッ化硫黄）であるが、フロンの 20 倍の威力でオゾン層を破壊するため、使用を規制する動きがある（京都議定書にも記載されている）。このため ILC では加圧した窒素ガスを用いることになっている。ただし、導波管のフランジにパッキンをつけるなどしてガス漏れを防ぐ構造になっているが、漏れを完全に防ぐのは難しい。

#### d) 電波吸収体の改善

電波吸収体は、ダミーロードの中に入っている反射した高周波を吸収する部材である。SiC セラミックスの電波吸収体は高価である。日本高周波で製造している電波吸収体は比較的安価であるが、高価な部品である。電波吸収体が多いとコストが嵩むため、少ないほうがよいが、R&D が必要である。電波吸収体は高熱になるため、高い耐熱性が必要であるとともに、冷却システムが必要となる。現在は、水冷方式を採用している。

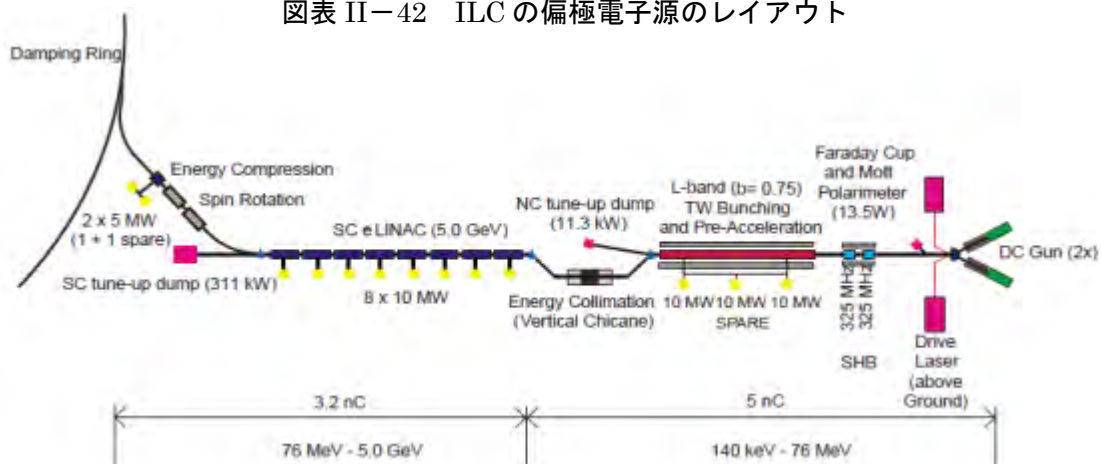
### 3. ビーム技術

#### 1) 偏極電子源

##### (1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要

偏極電子源は、陽電子最終収束部と一緒に、中央領域の加速器トンネル内に配置される。電子ビームは、DC 電子銃内の歪み GaAs 型半導体の光電陰極 (フォトカソード) に照射するマルチバンチ構造 (micro-bunch 繰返し 1.8MHz, 1312 bunches/train, bunch-train 繰返し 5Hz) のレーザーによって生成され、電荷量 4.8nC 以上(電子銃出口)、偏極度 80%以上のバンチトレインとして供給される。2つの独立したレーザー/電子銃システムが冗長性を提供する。常伝導 RF 構造体が、バンチ化と 76MeV までの前段加速に使用され、その後、ビームは超伝導線形加速器の 21 の標準 ILC クライオモジュールによって 5GeV まで加速される。ダンピングリングへの入射前に、超伝導ソレノイドがスピンの向きを垂直方向に回転し、別の超伝導 RF 構造体がエネルギーを圧縮する。

図表 II-42 ILC の偏極電子源のレイアウト



(出典) TDR

図表 II-43 ILC の偏極電子源のパラメータ

Parameter	Symbol	Value	Units
Electrons per bunch (at gun exit)	$N_-$	$3 \times 10^{10}$	Number
Electrons per bunch (at DR injection)	$N_-$	$2 \times 10^{10}$	Number
Number of bunches	$n_b$	1312	Number
Bunch repetition rate	$f_b$	1.8	MHz
Bunch train repetition rate	$f_{rep}$	5 (10)	Hz
FW Bunch length at source	$\Delta t$	1	ns
Peak current in bunch at source	$I_{avg}$	3.2	A
Energy stability	$\sigma_E/E$	<5	% rms
Polarization	$P_e$	80 (min)	%
Photocathode Quantum Efficiency	QE	0.5	%
Drive laser wavelength	$\lambda$	$790 \pm 20$ (tunable)	nm
Single bunch laser energy	$u_b$	5	$\mu\text{J}$

(出典) TDR

(2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態

① ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善

特に記述無し

② 最新開発・製造実態

電子源の開発は日本と米国が先行しており、研究開発は続いている。電子源の開発は、偏極電子を作る「フォトカソード開発」、フォトカソードの量子効率を維持するための超高真空技術及び高電荷のバンチ発生と広がり小さなビームを生成するための高電圧技術等から成る「電子銃開発」、フォトカソードを励起しマルチバンチ構造のビームを発生させる「レーザー開発」から成っており、最近の状況は以下のとおりである。

a) フォトカソード開発

GaAs (ガリウム砒素) -GaAsP (ガリウム砒素リン) の組み合わせの超格子カソードを使うことによって、スピン偏極度~90% で 1%以上の量子効率 (QE=Quantum efficiency) を実現し、2014 年に論文として発表された。量子効率 (QE) とは、光子 1 つに対して電子がいくつ出るかという数値であり、QE が 0.1%程度あれば実用に耐えうるとされ、それ以上に上がればレーザー設備にかかる負荷やコストが下げられる。

図表 II-44 フォトカソードの開発履歴

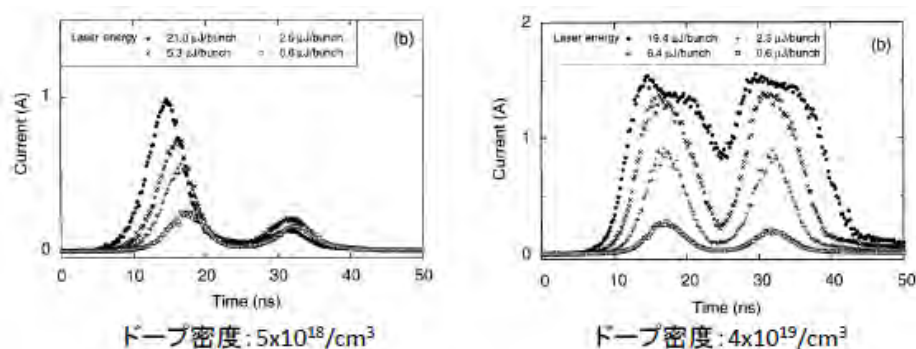
フォトカソードの開発履歴 (偏極度、QEの向上)	
カソードの種類	論文
Bulk GaAs	D. T. Pierce and F. Meier, Phys. Rev. B 13, 5484 (1976)
Thin GaAs	最大偏極度 < 50 %
Strained GaAs	T. Nakanishi et al., Phys. Lett. A 158, 345 (1991).
GaAs on GaAsP buffer	T. Maruyama et al., Phys. Rev. Lett 66, 2376 (1991).
InGaAs on GaAs buffer	T. Omori et al., Phys. Rev. Lett 67, 3294 (1991).
Superlattice	T. Omori et al., Int. J.Mod.Phys.A, Proc.Suppl. 2A, 157 (1993)
GaAs-AlGaAs	Y. Kurihara et al., Jpn. J. Appl. Phys. 34, 355 (1995).
	最大偏極度 > 50 %、QE~0.数% DBR膜でPol. 71% & QE~数%
Strained Superlattice	T. Omori et al., Jpn.J.Appl.Phys. 33, 5676 (1994).
InGaAs-GaAs	T. Nakanishi et al., NIM A 455, 109 (2000).
InGaAs-AlGaAs	T. Nishitani et al., J. Appl. Phys. 97, 094907 (2005).
GaAs-GaAsP	A.V.Subashiev et al., Appl. Phys. Lett. 86, 171911 (2005).
	Pol. ~ 90 %、QE~0.5%
Strain compensated SL	X. Jin et al., Appl. Phys. Lett. 105, 203509 (2014).
GaAs-GaAsP	Pol. ~ 90 %、QE~1.6 %

(出典) KEK 訪問ヒアリング時入手資料

また、フォトカソード開発では、表面電荷制限現象 (電子がカソードの表面にたまって「ふんづまり」を起こす現象) が問題になっていたが、次図表に示されているようにカソード表面 5nm 程度の領域に P 型不純物を高密度 (>5x10<sup>19</sup>/cm<sup>3</sup>) ドープすることによって回避できた。これは 2 バンチの試験であるが、バンチ間隔が ILC の場合

の 555 ns よりも十分短い 20 ns 程度の時間間隔において表面電荷制限現象がキャンセルされていることを示している。

図表 II-45 高密度表面ドーピングによる表面電荷制限現象の回避



(出典) KEK 訪問ヒアリング時入手資料

## b) 電子銃開発

ILC 用の電子銃の開発は、名古屋大学及び Jlab で進められてきた。どちらの電子銃も Load-lock システムを備え、真空を破らずにフォトカソードの交換が可能のため、電子源の停止時間を最小限に抑えられるという特徴をもっている。

### ■名古屋大学 200kV 電子銃 (NPES-3)

2008 年まで名古屋大学で 200kV の電子銃開発を行っていた (2009 年よりこの 200kV 電子銃は KEK にある)。

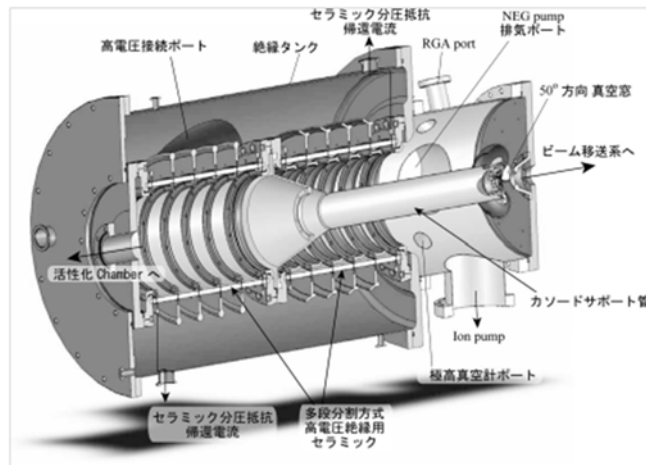
名古屋大学の実験では、200kV 電子銃に装着された GaAs-GaAsP カソードから、バンチあたり 5.6nC のビームを生成可能である (ILC ではバンチあたり 4.8nC が要件)。

名古屋大学で開発されている電子銃 NPES-3 の状況と特徴は次のとおりである。

- ・加速電圧 200 kV
  - カソード表面の加速電界 3.0 MV/m (SLC 電子銃は 1.8 MV/m)
- ・最大電荷量 > 5.6 nC (1ns 幅、GaAs/GaAsP 歪み超格子フォトカソード)
  - 空間電荷制限及び表面電荷制限なく 5.6nC/bunch を生成。
- ・真空  $2 \times 10^{-9}$  Pa (電子銃運転時)

フォトカソードの交換無しで 50  $\mu\text{A}$  の連続ビームを 120 時間以上供給し続けた実績がある。

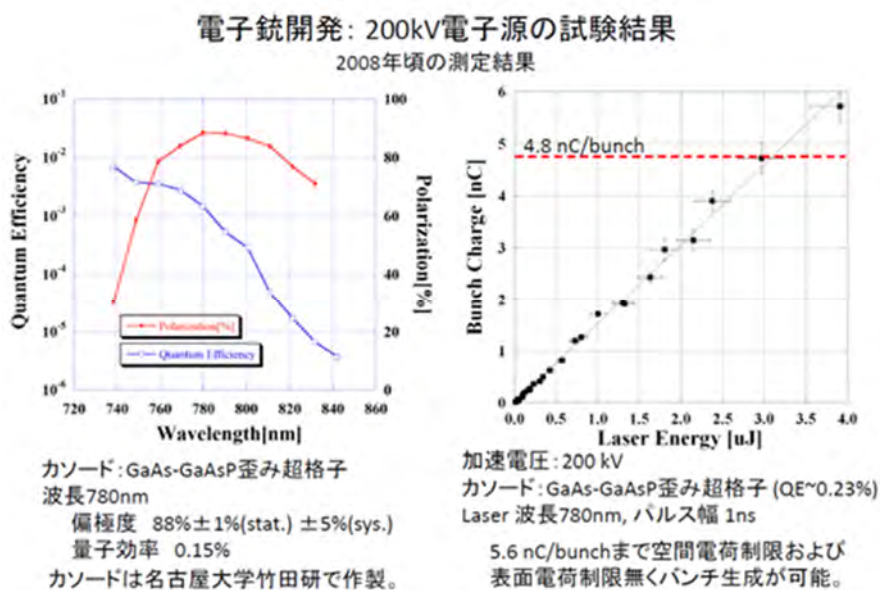
図表 II-46 名古屋大学 200kV 電子銃



(出典) KEK 訪問ヒアリング時入手資料

2008年頃の電子銃 NPES-3 の試験結果は、次図表に示される。図表右は、横軸がレーザーのエネルギーで縦軸がバンチチャージである。レーザーエネルギーを上げていくと電荷制限を受けずにバンチチャージがリニアに上がっていくことが示されている。図表左は、この時使用した GaAs/GaAsP 歪み超格子フォトカソードの量子効率及び偏極度の波長依存性を示している。横軸がレーザー波長で、励起波長 780nm において偏極度 88%、量子効率 0.15% が達成されている。

図表 II-47 名古屋大学 200kV 電子銃の試験結果



(出典) KEK 訪問ヒアリング時入手資料



## ■J Lab の CEBAF 電子銃

JLab の CEBAF (Continuous Electron Beam Accelerator Facility) では、次の仕様の電子銃を開発しており、現存する偏極電子源のなかで最も高い出力のビーム供給を実現している。

- ・ 加速電圧 130 kV
- ・ 真空  $10^{-10}$  Pa 台
- ・ 平均電流 200  $\mu$ A

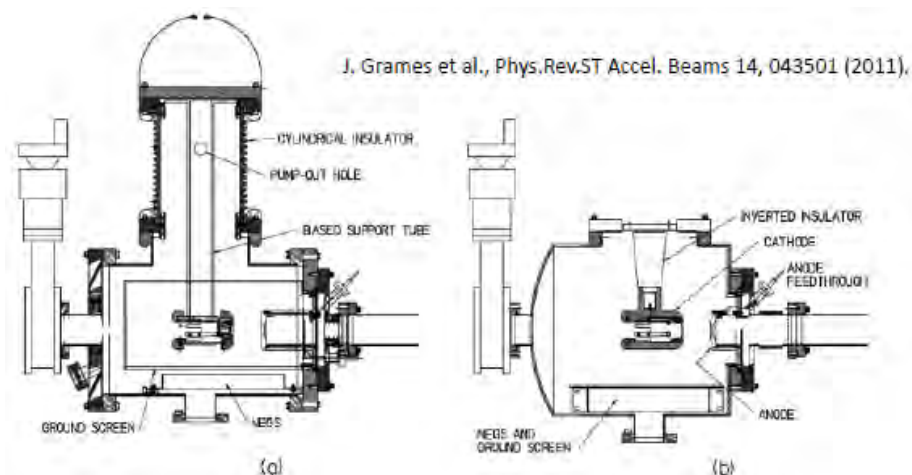
現在 JLab では、次図表の (a)、(b) の 2 台の電子銃を併用して CEBAF ヘスピ偏極電子ビーム(偏極度 85%以上、繰返し 499MHz)を供給している。

図右 (b) は、近年開発された inverted 方式(高電圧セラミックが真空容器の内側に設置される)電子銃で、これを改良した 200kV 電子銃が ILC の電子銃の候補とされている。

なお、ILC の電子銃と CEBAF 電子銃は、平均電流はさほど変わらないが、CEBAF の電子銃は、繰返しや 1 バンチあたりの電荷量が違っている。CEBAF の電荷量 0.4 pC は、ILC の 4.8nC に比較しておよそ一万倍小さいが、これは ILC のマルチバンチ構造と異なり、CEBAF では 499MHz の連続パルスビームを加速するための仕様からくるものである(電子銃より大バンチ電荷が出せない訳ではない)。

また、JLab では CEBAF 電子銃によりカソードの寿命について積極的に実験を行っており、積分電荷量 100 クーロン以上のフォトカソード寿命 (ILC の条件に当てはめて 32  $\mu$ A 出力で 1 カ月以上の連続運転に相当) が得られた報告がある。

図表 II-48 JLab で開発中の CEBAF 電子銃



The CEBAF - ILC 200kV Inverted Gun



Our "Load-locked" GaAs photogun:  
 • Gun Vacuum ~ mid to low  $10^{-12}$  Torr  
 • Large Grain Niobium Electrode

(出典) KEK 訪問ヒアリング時入手資料

さらに近年は、ILC の電子銃に対して求められる条件よりはるかに難しい条件を満たす電子銃(電圧 500kV 以上、平均電流 10mA 以上)の開発が進んでいる状況であり、ILC・TDR に示されている最大電流 3.2 A の実現は既に達成可能の状況にある。

### c) レーザー開発

電子源では、レーザー（光子）を半導体のフォトカソードに当て、半導体の荷電子帯にある電子を励起する。バンドギャップ相当の波長の円偏光レーザーを当てると、光子が電子に吸われて電子は偏極した状態が出てくる。アノード電極とカソード電極の間にかけられた電圧によって、カソード電極の中心についているフォトカソード上で発生した電子群はビームとして加速される。ビームの強度は、フォトカソードの量子効率とレーザーの強度に、時間構造はレーザーの時間構造で決まる。

フォトカソード励起用のマルチバンチ時間構造をもつレーザーシステムの開発は、クライオ冷却 Ti:Sapphire アンプ方式（TDR に記載）のものが、SLAC 主導で 2010 年頃まで行われていた。波長 790nm、繰返し 1.5MHz、 $1.5 \mu\text{J/pulse}$  までの動作確認が行われたようだが、その後の開発の進展の報告が無い（TDR に記述されているが、実証実験の論文や報告の引用が無い）。

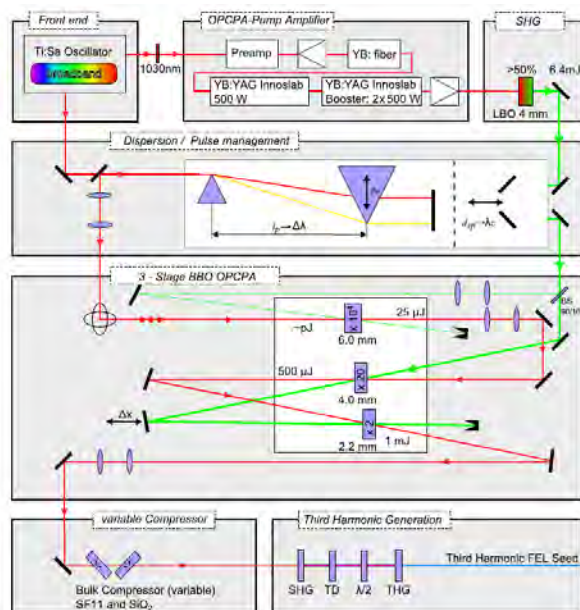
一方で TDR に記載されているレーザーシステムとは異なるが DESY で開発されている FLASH の FEL seeding 用レーザー（OPCPA : optical parametric chirped-pulse amplification）の技術が ILC 偏極電子用レーザーの仕様にかかなり近く、ILC にとって有用と認識されている。

FEL seeding 用レーザー（OPCPA）の主な仕様は、以下のとおりである。

- ・ 波長 : 紫外～赤外の範囲で可変 ( $\Delta\lambda \sim 50\text{nm}$ )
- ・ 繰返し : 3.25 MHz、 $3.5 \mu\text{J/pulse}$  (@800nm, prototype CW laser)  
100 kHz, 1.1 mJ/pulse (@800nm, FLASH-2 seeding laser)
- ・ パルス幅 :  $\sim 30\text{ fs}$

大きく異なる点はパルス幅であるが、これはストレッチャーで 1ns 程度まで伸ばす技術は既に確立された技術である。

図表 II-49 FLASH-2 seeding FEL 用レーザーシステム



H. Hoppner et al., New J. Phys. 17 (2015) 053020 より抜粋  
(出典) KEK より入手資料

### (3) 偏極電子源の評価と技術的課題

#### 【TDR（技術設計報告書）ベースラインへの課題の指摘】

偏極電子源の TDR ベースラインに対して、次の指摘がなされていた。

- SLC (Stanford Linear Collider) の電子源で得られた偏極度は十分なものであったのか。また、SLC と比較して、パルスの繰返しや電荷量が増えている ILC において、電子の目標偏極度を得ることはかなり難しいのではないか。
- 実証されているのは、全て実験室規模でのチャンピオンデータで、全てのスペックを満たした条件での運転実績は無い。また、実証機は世界に無く、長期的に ILC の設計性能を達成できる見込みは立っているのか。

こうした指摘を念頭に置き、偏極電子源の評価と技術的課題についてヒアリングを実施し、その結果を取りまとめると以下のとおりである。

#### 【参考：上記の指摘に対する見解】 <KEK>

SLC 実験開始当初は偏極度が低い状況であったが、1993 年以降の偏極度は十分であり、その証拠として偏極度 65% の状況の実験でレミノシティが 2 桁高い LEP 加速器と同等以上の精度でワインバーク角を決定している事実がある (SLC では最終的に偏極度 80% まで向上)。バンチあたりの電荷量は SLC と比較して特に変わらない。変わるのは、繰返し(マルチバンチ構造及び平均電流)のみ。

一方、加速電圧、カソード寿命 (電子銃の真空性能)、偏極度、量子効率、レーザー

の各々の技術は前述のとおりほぼ確立しており、SLC(SLAC)以外にも CEBAF(Jlab)、ELSA(Bonn 大)、MAMI (Mainz 大) で物理実験に高偏極度ビームを長期間供給した実績があり、「全て実験室規模でのチャンピオンデータ」ということではない。ILC 電子源開発として残る課題は、現状で可能となった各々の技術を全て合わせた総合試験である。個々の技術がほぼ確立している現状で「達成できる見込みが無い」と判断する科学的、技術的な根拠が無い。問題は総合試験を行うための環境整備（電子銃、フォトカソード、レーザーシステム、及びビーム評価システムを 1 つのシステムとして揃えること）にあるが、人材確保（各分野のスペシャリスト）、全システム整備に必要な費用調達が一研究施設では難しい状況にある。

### ①フォトカソード開発の評価と技術的課題 <KEK>

偏極電子源の要素であるフォトカソードについて、TDR 目標値に対する現状の到達点の評価及び開発上の課題を以下に示す。

TDR ではフォトカソードに対して、「偏極度 80%以上」、「量子効率 0.5%以上」の目標値を設定している。これに対してこれまでに開発されたフォトカソードで、下記のもの条件をクリアしている。

これらのフォトカソードは表面電荷制限現象を抑えるための表面への p 型高密度ドーピング対応がなされたものでもある。電子源の運転において、量子効率が低下し十分な電荷量のビーム供給ができなくなった時にカソード交換が必要となる。初期の量子効率が十分高ければカソード交換までの時間はその分長くなる関係にあるため、すでに TDR の目標値はクリアしているが、高偏極度でより量子効率の高いカソード開発は有用である。

図表 II-50 TDR 目標値に対するフォトカソードの性能の到達点

カソード種類（開発元）	偏極度	量子効率	励起波長	備考
歪み補償 GaAs-GaAsP 超格子(名古屋大学)	92 %	1.6 %	780 nm	2014 年発表
歪み AlInGaAs-AlGaAs 超格子 (St. Petersburg)	92 %	0.85 %	825 nm	2007 年 PESP2008 で報告
歪み GaAs-GaAsP 超格子 (SLAC)	86 %	1.2 %	775 nm	2004 年発表

(出典) KEK 作成

### ②電子銃開発の評価と技術的課題 <KEK>

偏極電子源の要素である電子銃について、TDR 目標値に対する現状の到達点の評価及び開発上の課題を以下に示す。

電子銃の加速電圧は最大出力電流値（空間電荷制限値）つまりバンチ電荷量（ピーク電流値）に影響し、その上限値は加速電圧の 3/2 乗に比例して増加する関係がある。TDR では電子銃におけるバンチあたりの電荷量は 4.8 nC が求められている。この値についてはすでに SLC の 120kV 電子銃で 10 nC 相当のバンチ生成が実現されているため、加速電圧は 120kV 程度あれば実現可能であるが、電子銃でより高い加速電圧を実現すること

によって、生成したビームの広がりや、ビーム輸送時の損失を抑えることができるため、より高い電圧の電子銃開発は有用である。

TDR の電子源パラメータには表記は無いが、フォトカソードの寿命も電子源運転上、重要なパラメータである。ビーム供給時のフォトカソードの寿命は、量子効率が  $1/e$  となるまでの時間であり、それは電子銃で生成した電子ビームが電子銃近傍において残留ガスの一部をイオン化し、そのイオンがフォトカソードへ逆加速して衝撃する現象によってほぼ決まるため、電子銃の真空およびビームの平均電流に依存する。

CEBAF では電子銃の真空を  $10^{-10}$  Pa 台の極めて良い真空を実現することによって電子銃近傍で発生するイオンを減らし、ILC のビームに相当する平均電流  $32 \mu\text{A}$  では 1 カ月以上のカソード寿命を実現している。ILC の電子源においても、電子銃およびその近傍の機器の真空を十分に良い状態 ( $10^{-9}$  Pa 台またはそれ以下) にすることは重要である。

カソードの QE が低下し、照射可能な最大のレーザーパワーで励起した場合でも必要な電荷量が得られない状況になった時、フォトカソードを交換することになるが、NPES3、CEBAF 電子銃ともに Load-lock システムを採用しているため、フォトカソードは容易に交換可能である。

図表 II-51 TDR 目標値に対する電子銃の性能の到達点

パラメータ	TDR 目標値	NPES3 (Nagoya)	CEBAF (Jlab)	備考
加速電圧	表記無し	200 kV	130 kV	最大ビーム電流に影響 SLC 電子銃は 120kV
電荷量	4.8 nC	5.6 nC	—	CEBAF は、大電荷運転モード無し
平均電流	$32 \mu\text{A}$	$50 \mu\text{A}$	$200 \mu\text{A}$	Nagoya は連続ビーム、 CEBAF は 499MHz CW
カソード寿命 ( $32 \mu\text{A}$ 相当)	表記無し	> 120 時間	> 1 カ月	電子銃の真空に依存

(出典) KEK 作成

### ③レーザー開発の評価と技術的課題 <KEK>

偏極電子源の要素であるマルチバンチレーザーについて、TDR 目標値に対する現状の到達点の評価及び開発上の課題を示す。

現在開発されているフォトカソードで高いスピン偏極度が得られる波長は 800nm 近傍にあるため、励起レーザーの波長はこれに合わせることは必須である。電子銃においてバンチ電荷量 4.8nC のマルチバンチを生成するため、フォトカソードの QE が 0.2% と仮定した時に必要となる励起レーザー(波長 790nm) 1 パルス当りのエネルギーは約  $3.8 \mu\text{J}$  となる。電子銃のピーク電流は数 A 程度であることから、レーザーパルス幅は 1ns 程度であることが求められる。

以下では、ILC の電子源励起用レーザーとして SLAC 主導で開発が進められてきたレーザーシステムと、ILC のマルチバンチ構造と近い FLASH(DESY)で開発されたレーザーシステム(prototype, seeding 用)について TDR 目標値と比較する。

SLAC 方式と FLASH 方式は光増幅方式が異なる。前者は Cryo 冷却型光増幅方式を採用し、光増幅を行う Ti:Sapphire 結晶を効率よく冷却することによって高繰返しのレーザーパルス列の高効率増幅を実現する。実際に繰返し 1.5 MHz, 1100 pulse/train, 波長 790nm でパルス当りの出力 3  $\mu$ J を達成したことが TDR で報告されている。なお、TDR 目標値を超えるエネルギーまでさらに出力を上げる時に、pump レーザー強度を増やすことによって発生する熱レンズ効果をこの先どこまで抑えられるかに課題がある。

一方で FLASH のレーザーシステムで採用されている OPCPA 方式では、非線形結晶 (BBO) 中で 2 つのレーザー光 (pump 光と signal 光) を特定の条件で交差させることによって pump 光のエネルギーを signal 光へ受け渡して光増幅を行う。prototype 機は波長 700~900nm で波長可変で、繰返し 3.25 MHz の連続出力でパルス当り 3.5  $\mu$ J の出力が得られた報告がある。これを FLASH の seeding FEL 用のレーザーとしてカスタマイズされたレーザーでは、マクロパルス幅が約 1ms、マイクロパルスの繰返し 100kHz でパルス当りのエネルギー 1.1mJ を波長 800nm で実現しており、長期的な安定度も 3%rms で実現している。この方式における出力制限は、主に光増幅を行う非線形結晶 (BBO) の温度変化に伴う増幅効率の低下 (位相整合条件からのずれ) によるものである。つまり、繰返しとパルス当りのエネルギーの積はあまり変えられない関係にある。ILC のマルチバンチ構造は prototype と seeding 仕様の間に位置するため、1.8 MHz の burst モード仕様で TDR 目標値 5  $\mu$ J 以上を十分クリアできることが見込まれるが、その実証が課題として挙げられる。

この他に、SLAC、FLASH の両者のシステムは種レーザーとして mode-lock レーザーを使用していることからパルス幅がピコ秒~フェムト秒の領域となる。最終的にストレッチャーと呼ばれる光学系で 1 ナノ秒程度までパルス幅を伸ばす必要があるが、そこでの損失を抑え、損失分を考慮した上で TDR 目標値をクリアする部分も課題として挙げられる。

図表 II-52 TDR 目標値に対するレーザーの性能の到達点

パラメータ	TDR 目標値	SLAC	FLASH Prototype	FLASH-2 seeding	備考
光増幅方式	—	Cryo 冷却型光増幅	OPCPA (CW)	OPCPA (burst)	
マイクロパルス繰返し	1.8 MHz	1.5 MHz	3.25 MHz	100 kHz	パルス間隔約 555 ns
マイクロパルス数/train	1312	~1100	CW	80 / 800 $\mu$ s	1 train の幅約 730 $\mu$ s
波長	790 $\pm$ 20 nm	Tunable	Tunable	Tunable	フォトカソー

	波長可変		(700-900nm)	(720-900nm)	ドに依存
パルス当りのエネルギー	>5 $\mu\text{J}$	3 $\mu\text{J}$ @790nm	3.5 $\mu\text{J}$	1.1 mJ @800 nm	実質的なカソード寿命に影響
パルス幅	~1ns	ps order	30fs	30fs	
強度の安定度	表記無し	—	—	3% (rms)	ビーム電流の安定度に影響

(出典) KEK 作成

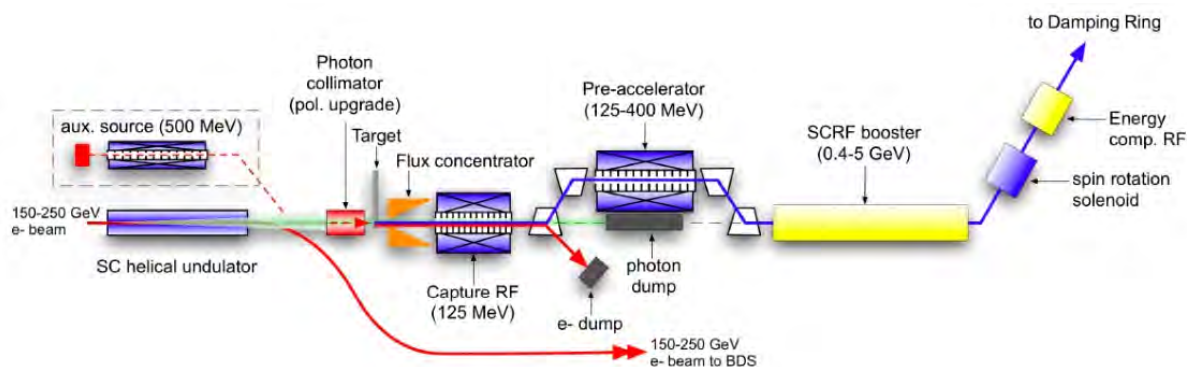
## 2) 陽電子源

### (1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要

陽電子源は光生成により陽電子を発生させる。主線形加速器での加速後、主電子ビームは 147m の超伝導ヘリカルアンジュレータに入射され、電子ビームエネルギーに応じて約 10~30MeV のエネルギーを持つ光子を発生する。電子ビームは光子ビームから分離され、低エミッタンスシケインによって約 2m 水平方向に移動される。

アンジュレータからの光子は、約 500m 下流に設置された 0.4 放射長の回転チタン合金ターゲットに送られ、電子と陽電子が対となったビームを発生する。このビームは、光学マッピング装置 (パルス状フラックス集積装置) によって、常伝導 L バンド RF とソレノイド収束キャプチャーシステムに適合するようにコントロールされ、125MeV まで加速される。電子と残りの光子は陽電子から分離され、廃棄される。陽電子はソレノイド収束により常伝導 L バンド線形加速器で 400MeV まで加速される。ビームはその後、超伝導 L バンド RF により 5GeV まで加速される。ダンピングリングへの入射前に、超伝導ソレノイドはスピンベクトルを垂直方向に回転させ、別の超伝導 RF 構造体がエネルギー圧縮のために使用される。基本設計では偏極度 30%が得られる。最終的に偏極度 60%までアップグレードするために約 220m のアンジュレータ用のスペースが確保されている。

図表 II-53 ILC 陽電子源レイアウト



(出典) TDR



図表 II-54 ILC 陽電子源のパラメータ

Parameter	Symbol	Value	Units
Positrons per bunch at IP	$n_b$	$2 \times 10^{10}$	number
Bunches per pulse	$N_b$	1312	number
Pulse Repetition Rate	$f_{rep}$	5	Hz
Positron Energy (DR injection)	$E_0$	5	GeV
DR Dynamic Aperture	$\gamma(A_x + A_y)$	<0.07	m rad
DR Energy Acceptance	$\Delta$	0.75	%
DR Longitudinal Acceptance	$A_L$	$3.4 \times 37.5$	cm-MeV
Electron Drive Beam Energy <sup>†</sup>	$E_e$	150/175/250	GeV
Undulator Period	$\lambda$	1.15	cm
Undulator Strength <sup>‡</sup>	$K$	0.92/0.75/0.45	-
Undulator Type	-	Helical	-
Undulator Length	$L_u$	147	m
Photon Energy (1 <sup>st</sup> harm cutoff)	$E_{c10}$	10.1/16.2/42.8	MeV
Photon Beam Power	$P_\gamma$	63.1/54.7/41.7	kW
Target Material	-	Ti-6%Al-4%V	-
Target Thickness	$L_t$	0.4 / 1.4	r.l. / cm
Target Absorption	-	7	%
Incident Spot Size on Target	$\sigma_i$	1.4/1.2/0.8	mm, rms
Positron Polarisation	$P$	31/30/29	%

<sup>†</sup> For centre-of-mass energy below 300 GeV, the machine operates in 10 Hz mode where a 5 Hz 150 GeV beam with parameters as shown in the table is a dedicated drive beam positron source.

<sup>‡</sup> K is lowered for beam energies above 150 GeV to bring the polarisation back to 30% without adding a photon collimator before the target.

(出典) TDR

## (2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態

### ①ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善

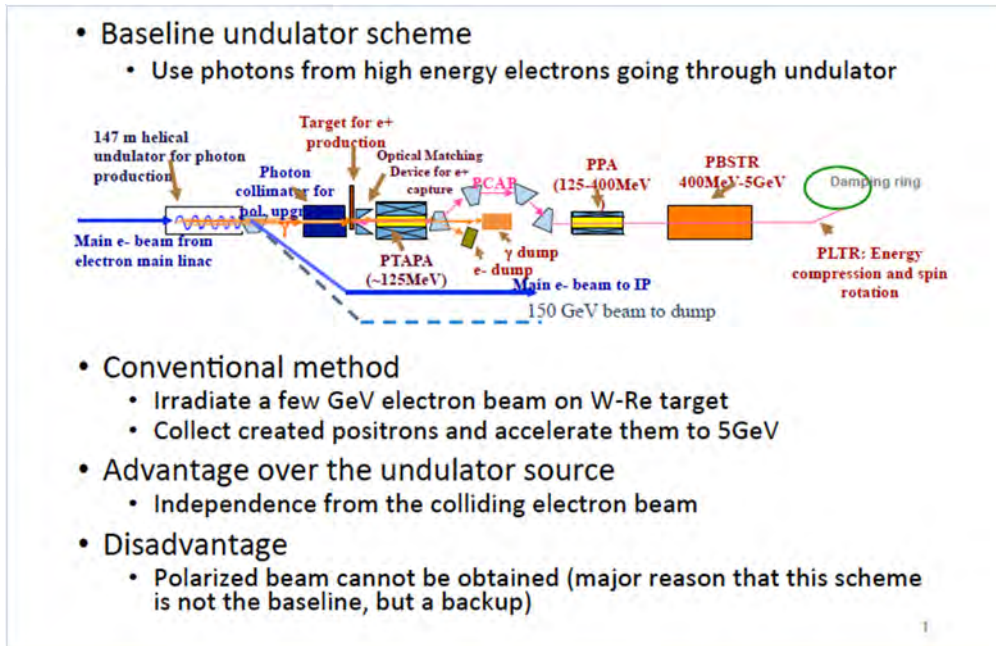
#### <6.2. 陽電子生成>

TDR では、偏極陽電子は長いアンジュレータの中で電子ビームにより生成された光子を変換することにより生成される。変換器の標的の冷却についてはなお相当な研究開発が必要である。さらに、ごく低エネルギーでの稼働の際、陽電子ビーム流束(強度)が十分でない可能性もある。陽電子生成のバックアップシステムに関しては、陽電子が偏極しない従来型の発生源を用いて検討されている。同一のトンネル内に両方のオプションの設置が可能となるよう、このバックアップシステムは現状の TDR 加速器トンネルのレイアウトと互換性を保つ必要がある。

#### <10.6 陽電子生成>

陽電子源には困難が伴っている。陽電子生成用コンバーターのターゲットを含め、アンジュレータを用いた設計に一層重点的に取り組む必要がある。並行して、従来の方式を用いた偏極陽電子を使わない陽電子源の生成も、予備的な解決策として続けなければならない。

図表 II-55 陽電子源の技術実証と対応方向



(出典) Daresbury Lab 訪問ヒアリング時入手資料

## ②最新開発・製造実態

### a) 英国 STFC による「ヘリカルアンジュレータ・モジュール」の開発・実証 <STFC、KEK>

英国 STFC、コッククロフト研究所 (Cockcroft Institute) は、ILC 向けの超伝導ヘリカルアンジュレータのモジュール (アンジュレータ 2 台) を設計・製造した。その仕様は以下のとおり。

各アンジュレータの長さは 1.75m である。この大きさは ILC の実機と同じであり、それを 2 台収めたモジュール (4m) は ILC のプロトタイプである。

ILC の TDR では、アンジュレータ部分の長さは約 250m となっており、4m のモジュールを約 60 個組み合わせて作ることになる。

図表 II-56 ヘリカルアンジュレータ及びモジュールの仕様

■ アンジュレータの仕様
• Period (ピッチ) : 1.15cm
• On-axis field : K=0.92 (0.86T)
• Beam aperture(diameter) (ビーム孔径) : 5.85mm
• Length (長さ) : 1.75m
■ モジュールの仕様
• モジュール : 4m のクライオスタット (4K) にアンジュレータ 2 台

2008年9月に最初の冷却試験を行い、設計磁場の測定を行った。その結果は以下のとおりである。

■磁場強度は、ILCの設定レベルを30%上回った。(実証済み)

■磁場精度は、振幅一様、磁場積分値=0(やや不足)

ヘリカルアンジュレータのクライオジェニック部分(4K)は、磁場精度に関する性能が低かったが、当時の開発チームは時間と費用さえあれば解決できると判断していた。当時は費用も時間もなかったため改善できなかった。

また、実際にビームを通す実験も予定されていたが、予算の制約により、コッククロフト研究所で製作したプロトタイプによるビーム試験は行われていない。

写真：ヘリカルアンジュレータのプロトタイプ  
(コッククロフト研究所)



b) 米国 SLAC による「ヘリカルアンジュレータ」を用いたビーム実験(原理実証)  
<SLAC, KEK>

2009年に米国 SLAC においてアンジュレータ方式の原理実証実験が行われた。実験は、100GeV以上の電子ビームが存在しないため、当時の最高エネルギー(46.6GeV)の電子ビームであった SLAC の FFTB (final focus test beam) を使って行なった。

46.6GeVの電子ビームで陽電子を作るには、コイル一周分のピッチが1.15cmではなく、2.54mm以下である必要があったため、実証実験のために口径1mm以下のコイルを作成し、偏極陽電子の生成に成功した。生成した陽電子の量は少なかったが、陽電子の偏極(50-90%)が確認され、原理は実証できた。

図表 II-57 SLAC でのアンジュレータを用いたビーム実験の仕様

■ SLAC での実験 E166 (SLAC-PUB-12933,14748)

- ・電子ビーム：46.6GeVの SLAC-FFTB 電子ビーム
- ・アンジュレータ：口径0.89mm、長さ1mのヘリカルアンジュレータ  
(pitch 2.54mm, K=0.19, w1=8MeV)で光子を発生
- ・標的：0.25X0のタンゲステン標的
- ・陽電子：発生した陽電子をエネルギーで選別

### (3) 陽電子源の評価と技術的課題

#### 【TDR（技術設計報告書）ベースラインへの課題の指摘】

陽電子源の TDR ベースラインに対して、次のような指摘がなされていた。

- 円偏向アンジュレータを用いたスキーム（MeV 光子の利用）は、実用的可能性について疑問がある。
- 熱的問題をクリアして、安定に利用できるターゲットの設計の目処が立っていないと推測される。
- 電子ビームとのタイミング合せの問題も解決の目処が立っていないと推測される。
- 最近、KEK は電子ビームを固体ターゲットに当てて陽電子を生成する TDR にな案を検討しているが、この方法では陽電子の偏極度が得られない。この場合でも ILC での精密物理実験が十分な意義を持つのか。

こうした指摘を念頭に置き、陽電子源の評価と技術的課題についてヒアリングを実施し、その結果を取りまとめると以下のとおりである。

#### ①ヘリカルアンジュレータの実験の評価 <KEK>

コッククロフト研究所の実験では、磁場強度は ILC の設定値を 30% 上回ったが、磁場精度はやや不足するという結果となった。磁場精度というのは、磁場が本当に綺麗な渦巻きになっていて、どの向きであっても電子に及ぼす影響が均一にあるということである。ILC の要件を満たすためには、もっと正確な渦を作らなくてはならない。

アンジュレータの技術については、理論上（計算上）は実現可能であると考えられているが、可能であればビーム試験を行うことが望ましい。コッククロフト研究所のプロトタイプではビーム試験を行っていない。

現状では、6mm のビームパイプを通るビームの入手が難しいため、試験を行うことは困難である。過去に KEK の ATF での実験実施が考えられたが、現時点では実現していない。

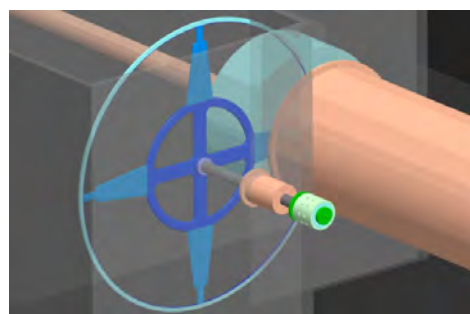
ILC ではアンジュレータのモジュール（4 m）を 60 台並べることになるが、アライメントの条件については、光源（light source application）用のアンジュレータと比較すると条件はゆるい。

#### ②ターゲット問題の評価 <KEK>

標的の技術はさらなる R&D を必要としている。

標的の円周部分はチタン合金で出来ており、渦電流（eddy current）の発生を防ぐため車輪状（スポーク状）になっている。

光が標的の同じ箇所に照射され続けると、発熱が限度を越え標的が破壊されるため、直径 1m 厚さ 14mm の標的を毎分 2,000 回転させる。その時、車輪の円周部は、100m/s（真空中の回転接線速度）の高速で回転するため、冷却方法や軸の耐久性維持が課題となる。



英国の RAL（ラザフォード・アップルトン研究所）において、空気中で動作するモデルが製作され、渦電流の問題に関する研究が行われた。実際は、標的は高真空下におかれる、そのため米国の LLNL（ローレンス・リバモア国立研究所）において、真空中で標的を回す実験を行ったが、しばしば **outgassing spikes** が起こり（真空が破れ）成功しなかった。その後、米国では資金不足となり研究が途絶えている。

現時点（2015 年末）では、この LLNL の標的方式が ILC のプロトタイプになる見込みは薄く、ILC では異なる方式を今後開発し採用する見込みである。

ILC のアンジュレータの標的冷却方法について、現在は水を使わない以下の 2 種類の技術が提案されている（LLNL における標的冷却は水冷方式）。

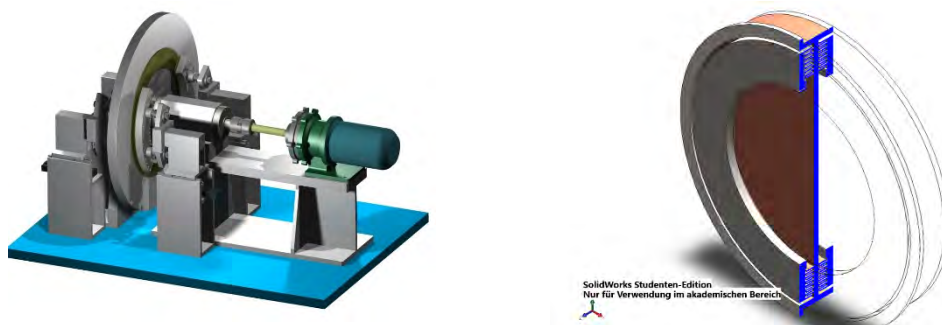
**a) Sliding contact cooling 方式：**

高速回転する標的を摩擦係数の小さい物質（停止している状態）に接触させて、熱伝導で熱をとる方式。摩擦熱が標的の加熱量より小さいことが前提となる。プロトタイプを製作中で、接触させる部品の開発が進められている。空気中の実験しか行われていないが、今後は真空容器を製造し真空中での実験を行う予定である。

**b) Radiation cooling 方式：**

銅とチタン合金を組み合わせて、形状を工夫して表面積を大きくする。銅とチタンを接合したの車輪を回転させ、黒体輻射を利用して熱を取り出す。回転しているチタンから回転している銅、回転している銅から止まっている銅へと熱が移動する仕組み。現在は、まだ設計最適化の段階である。

図表 II-58 Sliding contact cooling 方式（左）、Radiation cooling 方式（右）



（出典）KEK 訪問ヒアリング時入手資料

以上の冷却技術の目途が立つまでには、最低 2 年程度かかる見込みである。実現可能性は高いが、今のところ 100%の確実性は保証できない状況にある。

アンジュレータ同様、標的もビーム試験を行うことが難しい。ビーム試験ができなければ ILC が完成するまで性能が保障できないことになり、ビームの代わりにレーザーを用いて実験するなどして、説得力のある説明をする必要があるとされる。

なお、上記のいずれの方式も消耗品（部品）として交換が必要な部分が出てくるが、高放射線下の装置のため、部品の交換はすべてリモートで行わなければならないという制約がある。

### ③陽電子生成の代替方式（電子駆動方式）の評価 <KEK>

#### a) 電子駆動方式の背景

超伝導の高周波加速空洞と比較して、陽電子源の開発については実現可能性が高いと判断されたため、ILC・TDR 作成の段階ではあまり深い議論がなされていなかったことは事実である。

TDR に示されるアンジュレータ方式の陽電子源について、日本の開発グループは 7～8 年前から、技術的に難しいことを認識していた（標的の開発が難しく、ILC が完成できないと実証できない点等）。

また、当初は米国の LLNL がアンジュレータの研究開発を担当していたが、米国政府からの研究開発費が切れた段階で研究開発が停止してしまった。最近では ANL（アルゴンヌ研究所）が研究開発を引き継ぐことになったが、まだ実際にはスタートしていない。議会で予算がつかなければ研究開発が完全に停止してしまう米国での開発には不確実性があるため、アンジュレータ方式だけに頼るのは、リスクが大きすぎると、日本側は判断した。

以上の背景のもとに、KEK では、アンジュレータ方式の開発が、ILC の建設開始までに完了する可能性は高いが 100%とは言い難いと判断し、万が一うまくいかなかった場合のためのバックアップスキームとして「電子駆動 (e-driven) 方式」を研究開発している。

#### b) 電子駆動方式の概要と開発状況

電子駆動方式は、アンジュレータ方式よりかなり低いエネルギー（数 GeV）で稼働できる、既の実証されているスタンダードな技術である。低いエネルギーの加速器を通した電子を直接金属標的にあてて出てくる電子・陽電子のペアから、陽電子を取り出すというものである。

電子駆動方式は、常伝導ライナックにより、数 GeV の電子ビームを作り、それを金属標的に当てて陽電子を生成する方式である。同方式は、既の実証されているスタンダードな技術であり、KEK には多年にわたる技術的経験と蓄積がある。

電子駆動方式では、ビームパルス構造をダンピングリング (DR) の機能を損なわない範囲で自由に選択できる。このため、例えば、ビームパルスを 63ms に伸ばし、標的への負荷 (thermal stress shock) を緩和することが可能である。

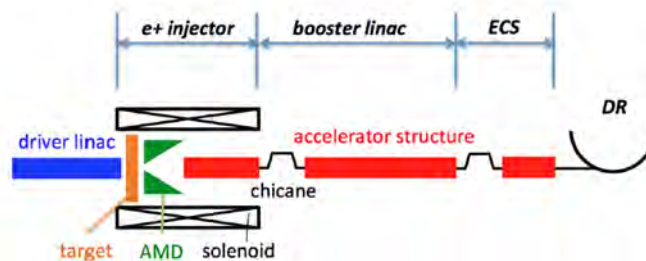
現在までの進捗状況は、以下のとおりである。

- 標的：回転速度 5m/s 各種予備試験完了。2015-16 年度には標的のモデル製作
- 陽電子収量（シミュレーション）： $3 \times 10^{10}$ /バンチを確保
- 設計：AMD、Booster linac の設計必要

図表 II-59 電子駆動 (e-driven) 方式の全体構成

## E-Driven Schemeの構成

- 4.8 GeV electron linac (drive electron, normal conducting)
- Target
- Capture section (AMD, solenoid, L-band linac)
- Chicane
- Booster linac (normal conducting) → 5GeV
- Energy compressor



(出典) KEK ヒアリング訪問時の配布資料

### c) 電子駆動方式の評価と技術的課題

ILC の電子駆動陽電子源は、過去の電子駆動陽電子源に比べて要求される平均電流は大きい、使われる要素技術の多くは既存加速器の中に仕様の近いものが存在している。例えば駆動用の電子ビームは概ね同様のエネルギーのものが KEK のリニアックとして存在し、また高い繰返し (300 Hz) のリニアックは東北大学に存在する。

AMD など ILC と比べると小型ではあるが本質的には同じものが SuperKEKB の陽電子源に使われている。陽電子捕獲の設計などはシミュレーションをもとに進めているが、これらのシミュレーションが実際とよく合うことは KEKB、トリスタンなどの過去の加速器の経験からわかっている。

ただし、陽電子生成標的 (ターゲット) だけは類似のものが過去にはないため、開発と実証が必要である。標的については、大きな陽電子電流に耐えるように、ビームが1ヶ所に当たり続けることがないように真空中で回転することが重要である。このため KEK では、ターゲットの実機大の試作機を作って回転と高真空の維持が両立することを実証する試験を進めている。また、回転体のシールの対放射線性をテストするために、放射線照射施設で事前に放射線を照射したシール材を使ってテストする予定となっている。

なお、回転体の軸シールについての課題を補足すると次のとおりである。

電子駆動方式では、熱を分散させるための標的の回転スピードが、アンジュレータ方式より遅くてよいため、回転体の軸シールはより現実的である。また、単純な真空の中での回転体の導入技術は、既に電子顕微鏡等の X 線・ガンマ線を発生する装置に

において確立された技術である。ただし、計算上は可能であるが、高い放射線下でシールしなければならない点については、実証が必要である。また、標的は、高放射能下で動かす装置であるため、回転体のシール材（液状）が劣化して真空漏れを起こす可能性がある。この点についても、電子駆動方式のほうが、アンジュレータ方式に比較して対応は容易であるが、実証が必要である。これらの実証は、KEKで進行中、または実施予定となっている。

#### d) 電子駆動方式の開発期間の想定

ILCの建設を開始する前に3~4年の準備期間があれば、少なくとも電子駆動方式についてはほぼ確実に実証可能である。予算の付き方にもよるが、準備期間中にアンジュレータ方式の技術が確立される可能性もあり、その場合はバックアップの電子駆動方式の開発は必要なくなる（コスト削減にもなる）。

#### e) 電子駆動方式により偏極陽電子が得られない点についての評価

電子駆動方式の欠点として挙げられる「偏極陽電子が得られない」ことについては、次のように考えられる。

まず、ILCの素粒子実験の以下の特徴は、ビームの偏極とは無関係に成立する。

- ILCでは素粒子が対消滅するため、余計な粒子が発生せずノイズが極めて少ない環境下で実験できる。
- 電子・陽電子衝突の場合、初期状態（重心系のエネルギーと運動量）が決まっており、完全に制御された実験が可能となる。

次に、ビームの偏極（右巻き、左巻き）があった場合の利点として、以下に示すように「相互作用の型」を選別できるという点が挙げられる。なお、無偏極というのは、右巻きと左巻きが、1対1で混ざっている状態をいう。

- 右巻き電子：弱い相互作用をしない。
- 左巻き電子：弱い相互作用をする。
- 右巻き陽電子：弱い相互作用をする。
- 左巻き陽電子：弱い相互作用をしない。

この利点を利用すると（電子ビーム、または陽電子ビーム、またはその両者の偏極が利用可能になると）、実験において不要な反応を抑制したり、新粒子が発見された際に相互作用の型を決定したりすることができる。

その際に「電子ビームの偏極」さえあれば、基本的な特徴は全て出現する。例えば、対消滅反応では、電子が右巻きの場合、陽電子が無偏極でも自動的に左巻きの陽電子しか反応できない。「右巻き電子」の反粒子は「左巻き陽電子」であるので、「右巻き電子」は「右巻き陽電子」とは対消滅できない。

しかし、「陽電子ビームの偏極」があれば、次のような追加的な利点が発生する。

- 有効偏極度の向上：

有効偏極度が上がり、反応する陽電子の数が増え、捨てられる陽電子ビームが減る。



■有効なスピンの組合せの増加による統計の向上：

例えば、1.24 倍 $\langle e-80\%(R), e+30\%(L) \rangle$ に向上する。

■多様な実験要望への対応可能：

例えば、「右巻き電子」と「右巻きの陽電子」は対消滅しないので、標準理論では粒子がすれ違う。今後、標準理論にはないそうした現象を観測したいという要望が絶対に出ないとは言い切れない。様々要望に応えられる余地を残しておくことも重要である。

以上より、陽電子の偏極が可能になることはもちろん望ましいが、陽電子の偏極が得られなくても、ILC での素粒子実験の特徴が著しく損なわれることはない。陽電子の偏極のメリットと、技術開発を追及したときのリスクを比較して、電子駆動方式を採用するのか、アンジュレータ方式で開発を進めるのか決めればよい。

そもそも、ILC・TDR には陽電子偏極を必ず保証するとは記載されていない。陽電子偏極が得られなくても、ILC を建設する価値がなくなるわけではなく、ヒッグス粒子やトップクォークの探求など基本的なことは十分に可能である。

現在の戦略は、ILC の超伝導加速器を 250GeV で動かすことが最重要事項であり、そのために、まずコンベンショナルな電子駆動方式で確実に ILC を稼働させ、その後何年かかけてアンジュレータ方式を実現し、それへ切り替えていくというものである。したがって、実験を開始するときには必ずしも陽電子の偏極度がなくても実験がスタートできるという判断である。TDR 以降、関係者の間では、ILC では後から段階的に陽電子の偏極を実現できるような設計にしておくべきという議論がなされている。

衝突型加速器実験では一般的に、実験が進むにつれより精密な粒子の性質を調べるために偏極した粒子同士を衝突させるようになる。現象の理解の精度を高めるためには、粒子のスピンの状況を調べるのが重要であるので、実験を詰めていく段階では偏極できるようになるのが望ましい。ただし、最初から完璧な状態で実験できるようにする必要はなく、段階を踏んでステップアップしていけばよいという考え方を ILC 関係者は持っている。

なお、今後アンジュレータ方式の開発・実証に必要な費用は、10 億円以下でできるレベルと考えている。ただし、現在世界ではアンジュレータの研究開発に対する予算はほとんどついていない。

## ⑤ビームの衝突タイミング合せ問題の評価 <KEK>

電子と陽電子のビームが衝突するタイミングは非常に正確に合っていなければならない。衝突点での長さは電子も陽電子も  $300 \mu\text{m}$  (0.3mm) であるため、狙った場所で衝突させるためには、時間的な誤差の許容範囲は長さに換算して  $100 \mu\text{m}$  程度である。米国の SLC (Stanford Linear Collider) のバンチ長は最短で 0.5mm であるため、電子と陽電子ビーム衝突のタイミング合せは、それほど難しい技術ではない。

ビームのタイミングがずれる可能性がある箇所と対応の考え方は以下のとおりである。

a) ダンピングリング (DR)

DR に入った電子バンチはリング内で安定して回れる場所にいくので位置がずれる。ただし、位相の調整は世界中のコライダーで行われているので問題はない。DR から電子バンチを取り出す際に、キックのタイミングがずれてもビームのタイミングがずれることはない。磁場はナノ秒単位の幅を持っており、電子バンチの時間的な幅 (ピコ秒) よりもずっと長い。磁場をかける時間の長さの中に電子バンチが収まっていれば問題ない。

b) バンチコンプレッサー

バンチコンプレッサーでもビームのタイミングがずれる可能性がある。DR を出た直後の電子バンチの長さは 6mm あり、0.3mm まで縮めなくてはならない。バンチコンプレッサーにはメインライナック部分と同じ加速空洞があり、空洞に入れる高周波のタイミングがずれると、出てきた電子の進行方向の位置が少しずれる。そこで設定されている許容誤差は、メインライナックの他の部分より厳しいが、技術的には問題ないと考える。

バンチコンプレッサーの中の RF の振幅・位相誤差による、ルミノシティ低下を 2% 以内にするための RMS 許容誤差は、次図表のとおりである。

図表 II-60 Luminosity 低下を 2% 以内にするための RMS 許容誤差

位相誤差 (correlated)	0.24 deg
位相誤差 (uncorrelated)	0.48 deg
振幅誤差 (correlated)	0.5%
振幅誤差 (uncorrelated)	1.6%

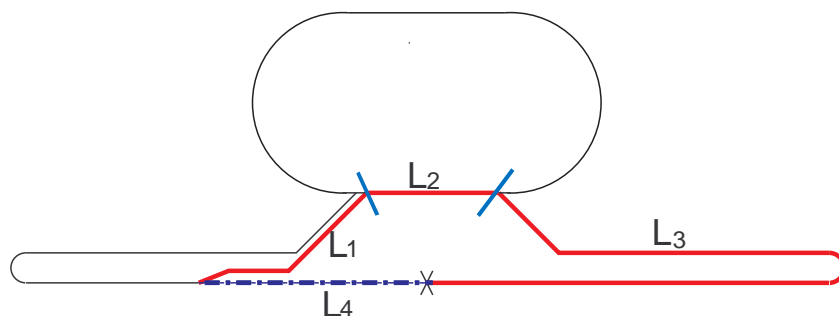
(出典) KEK 作成

線形加速器の折り返し部分で、ビームが回る半径が変わればタイミングもずれるが、頻繁に変わるものではなく安定しており、BPM でビームの通過地点を制御していれば問題ない。

アンジュレータ方式の場合、衝突電子から陽電子が生成されるため、他のコライダーにはない特別な条件  $(L_1 + L_2 + L_3) - L_4 = n \times CDR$  が課せられる (次図表参照)。

建設の際にミリメートル単位で長さを合せることは不可能であり、必ず建設誤差が発生する。その際には、シケイン (chicane: ビームを蛇行させる仕組みであり、最大で 46cm 以上軌道を長くできる) を用いて、建設誤差を調整できる。シケインは図表中の  $L_1$  の位置に設置する。

図表 II-61  $(L_1 + L_2 + L_3) - L_4 = n \times C_{DR}$  の説明図



- L1: 陽電子標的からDR入射点まで
- L2: DR入射点からDR出射点まで
- L3: DR出射点から衝突点まで
- (L1,L2,L3の和しか出てこないので、厳密な定義は不要)

(出典) KEK 作成

### 3) 高速ビームフィードバックシステム

#### (1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要

ILC では、衝突ビームのサイズが小さい (垂直方向=6nm) こと、バンチ数が 1,300 以上あることが特に重要な要素である。小さなサイズのバンチを数多く衝突させることによって高いルミノシティが得られる。高いルミノシティを得るために、バンチ単位でのフィードバックシステムが必要となり、バンチ間が 554ns あることがシステムにとって重要な点となる。

図表 II-62 ILC のビームパラメータ

<b>Beam parameters</b>			
	<b>ILC 500</b>	<b>1000</b>	
<b>Electrons/bunch</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>10**10</b>
<b>Bunches/train</b>	<b>1312</b>	<b>2450</b>	
<b>Bunch separation</b>	<b>554</b>	<b>366</b>	<b>ns</b>
<b>Train length</b>	<b>727</b>	<b>897</b>	<b>us</b>
<b>Train repetition rate</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>Hz</b>
<b>Horizontal IP beam size</b>	<b>474</b>	<b>335</b>	<b>nm</b>
<b>Vertical IP beam size</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>nm</b>
<b>Longitudinal IP beam size</b>	<b>300</b>	<b>224</b>	<b>um</b>
<b>Luminosity</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10**34</b>

(出典) Daresbury Lab 訪問ヒアリング時入手資料 (JAI 資料)

#### (2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態

##### ① ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善

特に関連する記述無し

##### ② 最新開発・製造実態

###### a) ダンピングリング (DR) を周回するビームの高速フィードバックシステム

ILC が必要とするフィードバックシステムは、リアルタイムでプログラム可能な超高速電子システムであり、DR の各平面 (縦、横、又は垂直) における粒子ビームの各単一バンチの動作と不安定性を制御することができるものである。

#### 【高速フィードバックシステムの基本原理】 <INFN-LNF>

高速フィードバックシステムは、水平方向・縦方向・垂直方向に分かれた 3 つの主要ブロック (信号ピックアップ) で構成される。それぞれ、アナログフロントエンド、デジタル (マルチチャンネル) 処理ユニット、アナログバックエンド、増幅器、キッカーから構成される。アナログフロントエンドでは、信号を高周波処理してマルチチャンネル処理ユニットに送る。マルチチャンネル処理ユニットはビームをバンチ (バケ

ット) ごとに分析し、空きバンチスペースに振り分ける。ここでバンチの解析処理を行う理由は、ILC 中の入射部以外の部分で、バンチ (バケット) を予測してフィードバック処理することが難しいからである。

高速フィードバックシステムは、低雑音アナログ電子回路、FPGA とデジタル部品、RF パワーアンプ、ストリップラインまたは空洞キッカーなどの技術要素で構成されている。

ピックアップからキッカーまでの距離は特に決まっていない。しかし、このシステムにおいて、バンチの解析処理 (プロセッシング) には全体で 600ns 必要とする。したがって、例えば、INFN-LNF の DAΦNE は、1 周に 300ns しかかからないリングなので、1 周で特定するのは難しく 2 周で反応するようになっている。ILC・DR のように 3km のリングなら、1 周で解析処理することは可能である。

図表 II-63 DR の高速フィードバックシステムの構成

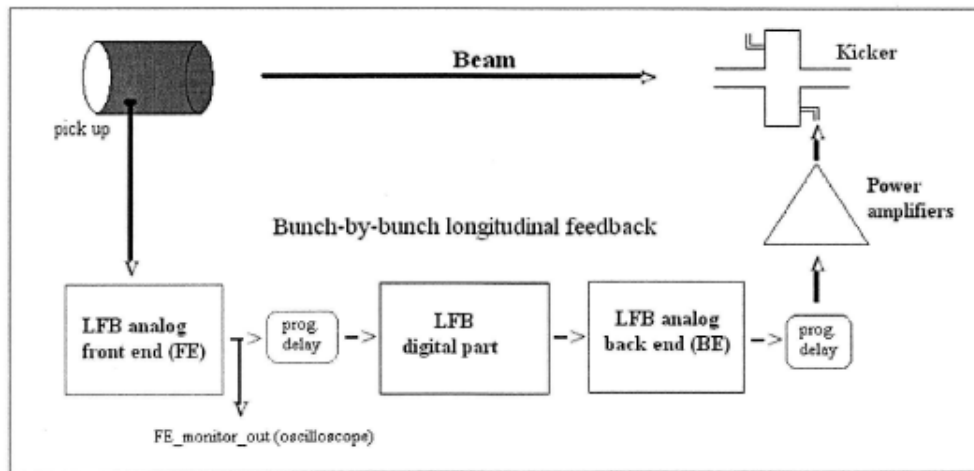


Figure 1: Bunch-by-bunch Longitudinal feedback block diagram.

(出典) INFN-LNF 訪問ヒアリング時入手資料

【高速フィードバックシステムの最近の研究】 <INFN-LNF>

ILC・DR の高速フィードバックシステムに関する研究は、ILC の仕様レベルだけで実施されてきた。しかし、現行のフィードバックシステム (性能が低く、16 ビットではなく 12 ビットで動作) は、現在多くの円形蓄積リングで使用されている。そのうち 6 システムは、DAΦNE で使用されており、ILC・DR の高速フィードバックシステムの研究開発プログラムの基礎として利用可能である。

最近 4～5 年における FPGA の大きな技術的進歩は、ILC のフィードバックシステムを構築する上で、非常に有効である。なお、ILC の高速フィードバックシステムは、12 ビットではなく 16 ビットのアナログ・デジタル変換システムを導入すべきである。

増幅器については、約 1 kW の増幅器が、リング 20 周の減衰時間 (damping time) に必要である。ILC・DR のストリップライン及び空洞キッカー (stripline and cavity kicker) は、現在 DAΦNE で稼動しているシステムを基礎として使える。

## b) ILC 衝突点における高速ビームフィードバックシステム

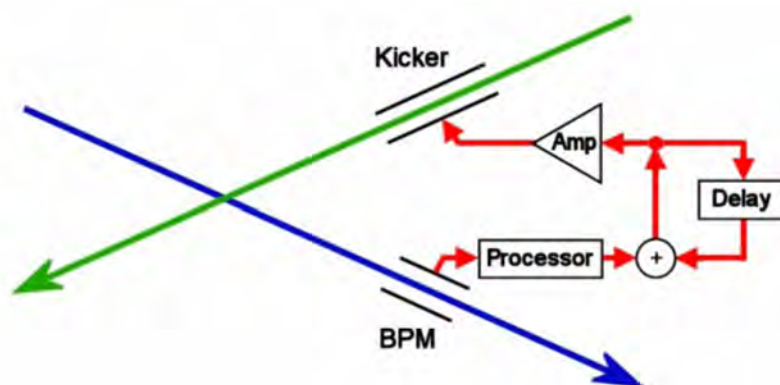
衝突点 (IP) における高速フィードバックシステムは、KEK の ATF2 (先端加速器試験施設) で開発されている。

### 【高速フィードバックシステムの基本原理】 <JAI>

ILC の衝突点 (IP) における高速ビームフィードバックシステムの基本原理は、「ナノ秒スケールでのフィードバック」(FONT : Feedback on Nanosecond Timescales) である。

FONT では出て行く方 (outgoing) のビームラインの垂直方向の位置のずれをビーム位置モニター (BPM) で計測する。その情報をもとにキックの角度を計算し、高速増幅器とキッカーを用いて、次に入ってくる (incoming) ビームの垂直方向の位置を正しい位置に補正する。FONT の遅延時間 (latency time) は、130ns であり、ILC のバンチ間は 550ns であることから、十分に反応できる。

図表 II-64 FONT の概念図



(出典) JAI 資料

### 【高速フィードバックシステムのプロトタイプ製作】 <JAI>

JAI の研究グループは、KEK の ATF2 において、以上のような ILC で想定される高速フィードバックシステムのプロトタイプを製作し実験した。

ATF2 でつくられた ILC の FONT プロトタイプの構成は、次図表のとおりである。ハードウェアとしては、アナログ BPM プロセッサ、デジタルフィードバックボード、ハイパワードライブ増幅器から構成される。

ATF2 実験では、電子ビームを対象に 2 または 3 バンチトレイン (バンチ間隔 140 ~ 300ns) を生成した。これは、ILC の最初の 2 または 3 バンチに相当する。

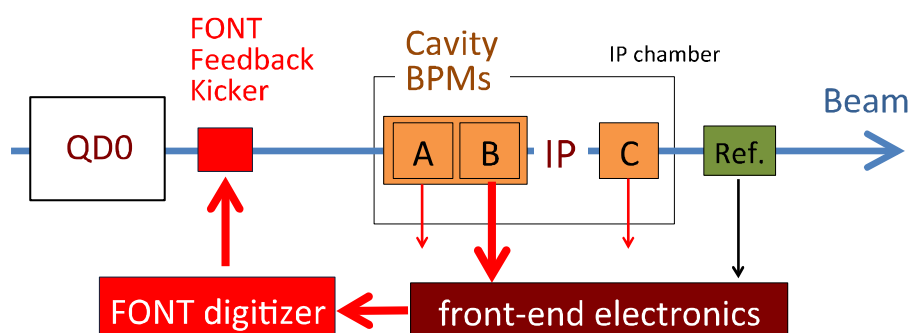
同実験では、バンチ 1 を計測しその情報をループさせて、バンチ 2 及びバンチ 3 をキックするということを実行した。

図表 II-65 ATF2 の高速フィードバックシステムの概要

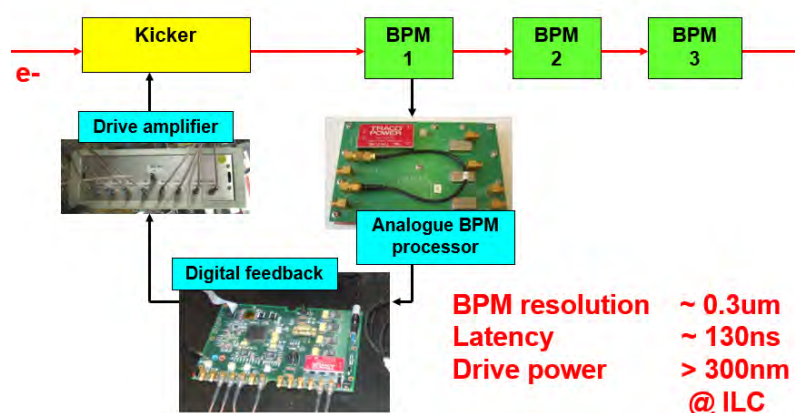
- ATF2 では 3 つのバンチしか作れないが、ILC の長いバンチ間隔に近づけて実験を行っている。ATF2 のバンチ間隔は ILC で想定されているバンチ間隔よりも狭いため、ATF2 で実証できれば ILC では時間的に余裕ができるということになる。
- ATF2 では、最初のバンチを測定し、想定している位置からのずれを算出し、キッカーで電場をかけて 2 つめ以降のバンチを補正する。
- 3 つのバンチは同じパルス磁場で同時に連なってリングから取り出されるため、同じ振動の影響を受けている。ビーム自体はビームラインの振動よりも速いので、ILC でも 1000 バンチが同じ振動の影響を受け、コヒーレントに動いているということになる。
- したがって、1 つめのバンチを測定すれば続くバンチを補正することが可能となる。

(出典) Daresbury Lab 訪問時の JAI ヒアリング結果をもとに作成

図表 II-66 ATF2 で実験された FONT プロトタイプの構成図



## ILC prototype: FONT4 at KEK/ATF



(出典) JAI 資料

図表 II-67 ATF2 で実験された FONT プロトタイプの構成機器

- ストリップライン及び/又は空洞ビーム位置モニター (BPM)
- 超低レイテンシー (約 10 ns) のフロントエンドアナログ信号プロセッサ
- 高速デジタルフィードバックコントローラ
- 高帯域、低レイテンシー、高速立ち上がり時間の高出力ドライバーアンプ
- ビームにインパルスを与えるストリップラインキッカー

(出典) JAI 資料より作成

【高速フィードバックのプロトタイプによる実証結果】 <KEK>

このフィードバックシステムによって、ビームのジッター (揺れ) を抑えられることが実証されている。ATF2 のフィードバックシステムは 130nsec で反応しており、ILC のバンチ間隔は 300~530nsec なので、十分な応答が実現できている。

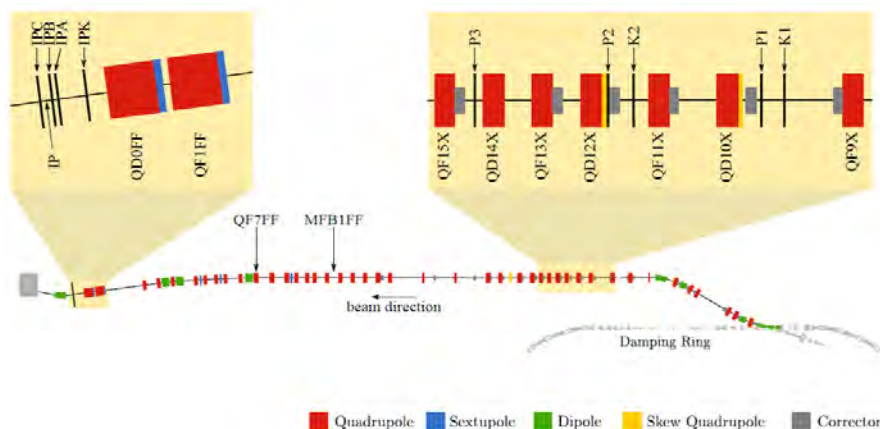
衝突点のフィードバックについて、2nm 分解能の BPM は存在しないが、現状のシステムで実験を行った結果、400nm であったジッターを 47nm まで下げることができた。

当初は、ILC の衝突点におけるビームサイズの 1/3 程度の範囲でビーム位置を安定化させたいと考え、ILC の衝突点におけるビームの垂直方向のシグマが 6nm であるので、2nm の精度のデモンストレーションを行うことを目標としていた。

しかし、ATF2 でその精度の実証実験を行う場合、必要な条件が ILC と大きく異なっている。ILC では、衝突するビーム (陽電子) があるので狙った場所で衝突したかどうかをビーム粒子の散乱で計測するが、ATF2 はコライダーではないため、2nm の精度のある高分解能 BPM での測定が必要となる。この精度の BPM の開発は大変難しいため、現在までに達成している精度で確認実験が制限されている。ATF2 で 2nm の安定度を直接測定することはまだできていないが、ILC で必要な性能は基本的に開発されており、現在はさらなる高度化の追求を行っていると思われる。

ATF2 には上流と下流にフィードバックシステムが搭載されており、下流のシステムが 2nm の精度の BPM を必要とするシステムである。

図表 II-68 ATF2 の構成機器レイアウト



(出典) KEK 訪問ヒアリング時入手資料

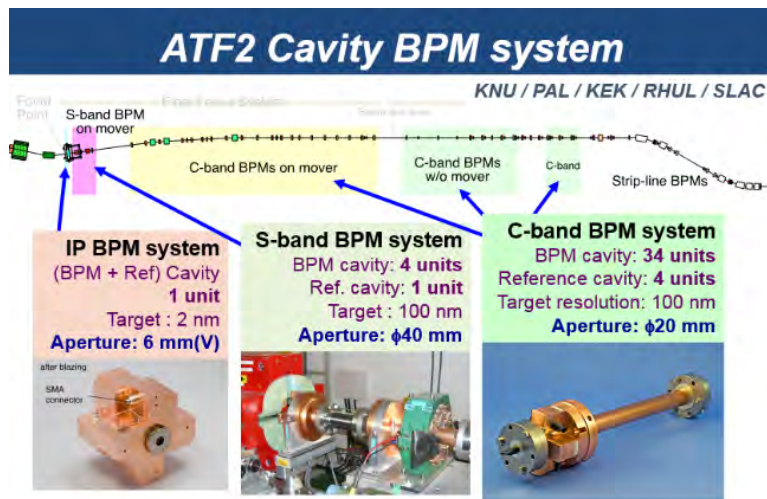


【ビーム位置モニターの開発・実証】＜KEK、PAL、KNU、RHUL、SLAC＞

ILC の多くの場所では 100nm 精度の BPM が必要である。KEK・ATF2 では、実際に約 40 台の空洞型 BPM (CBPM : Cavity Beam Position Monitor) を設置し測定を行った。CBPM は、KEK、PAL、KNU、RHUL、SLAC が研究開発した空洞の BPM である。

ATF2 での実験の結果、非常に高い再現性で実証されている。空洞型 BPM では分解能を小さくすると測定範囲も狭まってしまう。計測結果によれば平均的に 50nm の分解能がある。ILC で必要とされている精度は 100nm であり、この BPM では開発時のビームによる性能試験で 17nm の分解能を確認しているため、技術的には問題ないと考えられている。

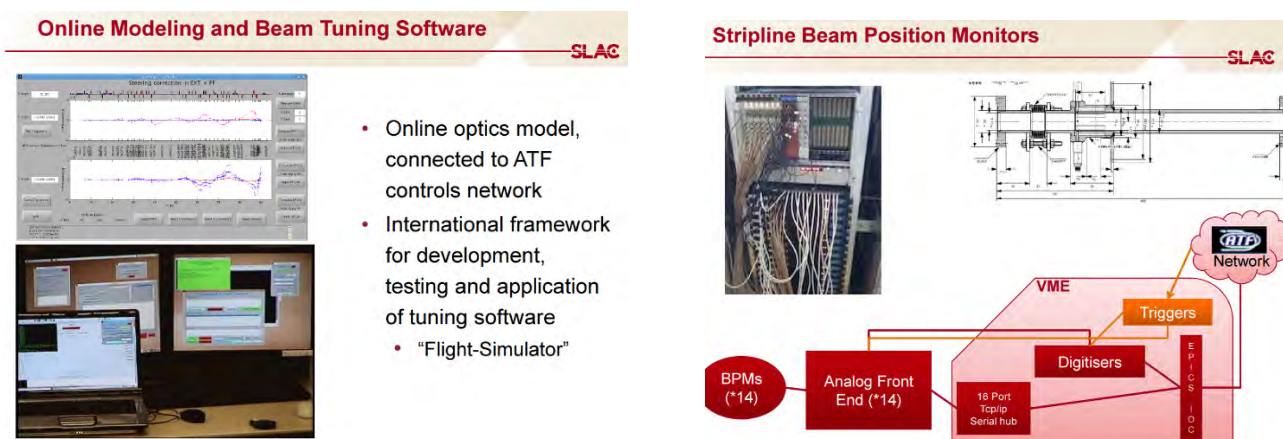
図表 II-69 KEK・ATF2 の空洞型ビーム位置モニターシステム



(出典) KEK 訪問ヒアリング時入手資料

米国の SLAC は、ATF2 を通じてビームの焦点合わせについて成果を上げ、その経過として、BPMs や movers などのハードウェアに加え、様々な管理、調整ソフトウェアを開発するに至った。これらは、よりスケールの大きい ILC に寄与するものと考えられる。主なものは、オンラインモデリングとビームチューニングソフト、ビーム位置モニター、ストリップラインビーム位置モニターなどである。

図表 II-70 ビームチューニングソフト、ストリップライン BPM の概要



(出典) SLAC 訪問ヒアリング時入手資料

### (3) 高速ビームフィードバックシステムの評価と技術的課題

ILC で必要な高速ビームフィードバックシステムは、「ダンピングリング (DR) を周回するビームの高速フィードバックシステム」と「衝突点 (IP) における高速ビーム位置フィードバックシステム」の2つがある。各々についての評価と技術的課題を示すと以下のとおりである。

#### ①DR を周回するビームの高速フィードバックシステムの評価と課題

##### a) DR の高速フィードバックシステムの研究開発に関する評価<INFN-LNF>

INFN-LNF は、「ILC・DR の高速フィードバックシステムの研究開発は、早期に開始する必要がある。なぜなら、DR の要求仕様に対応する高速フィードバックシステムは存在しないから」と認識している。

高速フィードバックシステム開発の今後の主な課題は、高いサンプリング周波数や高ビット数のアナログ・デジタル変換への対応、バケットごとの特定 (address) にあたり大量の処理バンチ数 (又はバケット数) やバンチ間の距離の短さへの対応も課題である。超低雑音システムも必要となる。

高いサンプリング周波数への対応としては、INFN-LNF の DAΦNE では、入射時に高速フィードバックシステムを使っているが、FPGA のサンプリング周波数は 368MHz 程度である。ILC の RF は 650MHz であるので、ILC ではブロック (ピックアップ) を倍増しなくてはならず、ピックアップされた信号を2つのユニットに分配する必要がある。

##### b) DR の高速フィードバックシステムの研究開発に関する評価<KEK>

ILC のパラメータは、現在建設中の SuperKEKB のパラメータと、周長、エネルギー、バンチ数、ビーム電流などの点で極めて近い。ただし、ILC の目標エミッタンス

が小さいため、やや難しくなることは確かである。

現在、ILC のパラメータそのものでの開発は行われていないが、これは当面その必要がないからである。他の高性能リング加速器で開発・使用されているフィードバックの仕様を ILC 用に変更することに本質的な困難はないと考えられる。フィードバックの要求速度は、将来バンチ数を 2,600 に倍増した場合を想定したものであり、初めの段階（すくなくとも 10 年以上）ではずっと緩い。

## ②衝突点（IP）における高速ビーム位置フィードバックシステムの評価と課題

### a) ILC 用のプロトタイプシステムの開発に関する評価<JAI>

英国の JAI は、「ILC 向けの高精度、低レイテンシー、ブロードバンドのマルチバンチビーム監視制御システムを設計・試作し、試験した。この ILC 向けのプロトタイプシステムは、KEK・ATF で開発しているものであり、基本性能は実証されており、ILC での全ての性能要求（遅延時間、BPM 分解能、増幅器のドライブパワー、ビーム補正のダイナミックレンジ）を満たしている。また、ルミノシティも回復することがシミュレーションによって示された。

具体的には、ILC の衝突点で求められる BPM 分解能は  $1\mu\text{m}$  未満のところ  $0.3\mu\text{m}$  未満を達成しており、遅延は  $150\text{ns}$  未満に抑えるべきところ  $130\text{ns}$  未満を達成している。増幅器のドライブパワーは IP でダイナミックレンジ (dynamic range)  $\pm 300\text{nm}$  のビーム矯正を可能にしている。

### b) 高分解能 BPM（ビーム位置モニター）に関する評価と技術的課題 <KEK、JAI>

ATF2 の現状システムで実験を行った結果、 $400\text{nm}$  であったジッターを  $47\text{nm}$  まで下げることができた。この  $47\text{nm}$  という結果は BPM の分解能に依存しているので、高分解能の BPM を搭載できればデモンストレーションをさらにクリアにできると考えられている。

しかし、そのために ILC では不要なレベルの高分解能 BPM が ATF2 では必要であり、簡単にはいかない（この点を誤解される場合が多い）。BPM によって  $\text{nm}$  単位でビーム安定度を計測することは困難であり、 $\text{nm}$  単位で計測可能な機器は現存しない。達成されている世界最高分解能は  $8\text{nm}$  である。

ILC のための技術開発は BPM の分解能を向上させることが目的ではない。高分解能の BPM が無くても、現時点で ILC のフィードバックの技術の基礎は実証できている。

なお、実際に ILC ではそのような精緻な計測（高分解能 BPM による  $\text{nm}$  単位でのビーム計測）は必要ない。ILC では電子と陽電子のビーム対ビーム偏向 (beam-beam deflection) があるので計測は容易である。ビーム間に  $1\text{nm}$  のズレがあると、ビーム対ビームのキック角が  $100\text{micro-rad}$  発生し、下流で  $100$  ミクロンの大きな位置信号として計測される。ILC のマシンチューニングでは、ビーム位置が中心からずれていても、ビーム同士がぶつかってさえいれば、 $\text{nm}$  単位でビームが通る場所を測る必要はない。また、ILC のバンチ間隔は長いので、フィードバックシステムのキッカーは高速キッカーである必要はない。数百  $\text{nsec}$  で応答できればよい。

したがって、ILC で必要な性能は基本的に開発されており、ATF2 では、現在はさらなる高度化の追求を行っていると思われるべきである。

一方で、高分解能 BPM システム開発に係る現在の課題は、ATF2 の仮想衝突点のビーム位置モニターの信号を処理する回路の開発である。BPM そのものは設計通り作れば問題ないが、信号処理回路を作るのは非常に大変であり、求める位置分解能には届いていない。しかし、これは ATF2 で試験する場合に必要となる技術であり、ILC では不要な技術である。

また、ILC ではビーム診断機器が多く使われているが、それらの横断的(transverse)な計測技術については、更なる研究が必要であり、工学(エンジニアリング)的な課題が多く残っている。CBPM はエンジニアリングできる状態にあるが、単価が非常に高い。ILC では数が多いので、工業化して信頼性を保ちつつ価格を下げなければならない。

#### 4) ダンピングリング (DR)

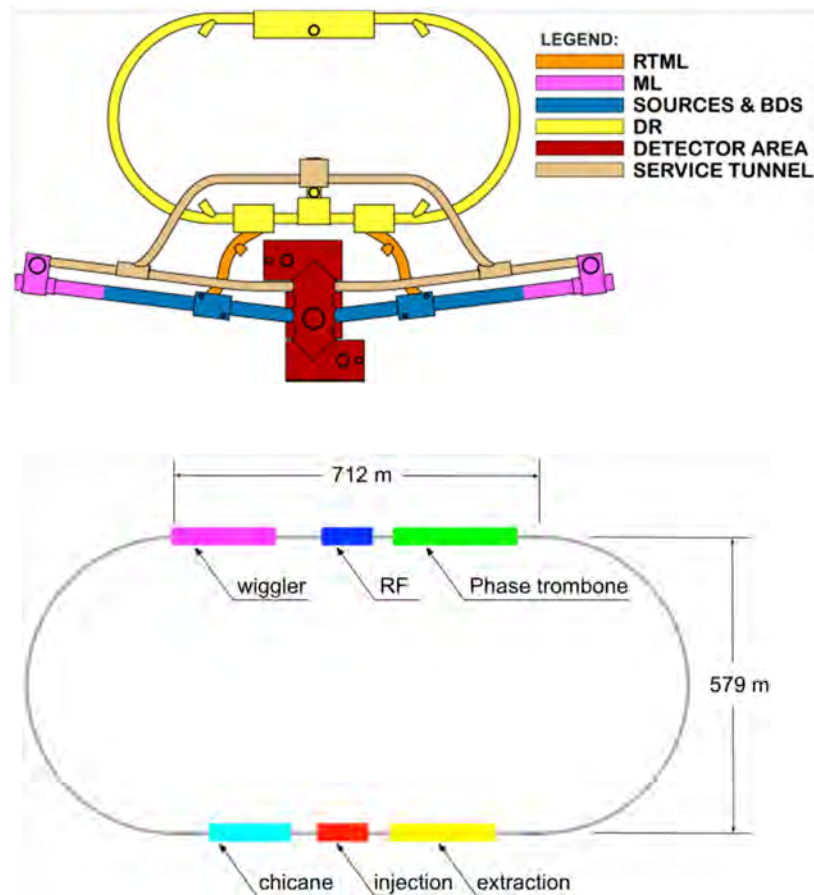
##### (1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要

大きな横及び縦方向のエミッタンスを持つ電子及び陽電子ビームは、ダンピングリングに入射された後、十分なルミノシティを得るために加速器パルス間の 200ms (10 Hz モードの場合は 100ms) 以内にエミッタンスを減衰する必要がある (陽電子ビームの垂直エミッタンスについては 5 桁の減衰)。さらに、3.2km のリング周長に適合するように、約 1ms 幅のビームパルスを、入射時におよそ 90 分の 1 に圧縮し、取り出し時に元にもどさなければならない。

ベースライン設計では、ダンピングリングは 5GeV のビームエネルギーで稼働する電子リング 1 つと陽電子リング 1 つからなる。両リングは同じトンネル内に格納されており、1 つのリングがもう一つのリングの真上に配置されている。アップグレードが可能なように、トンネル内には 3 番目のリング (第 2 の陽電子リング) 用のスペースが用意されている。

ダンピングリング施設は検出器ホールを避けるように衝突領域から約 100m 水平にずらされた中央部に配置される。2 つの輸送トンネルがダンピングリングトンネルをそれぞれ電子及び陽電子主線形加速器トンネルに接続する

図表 II-71 ダンピングリングの全体構成



(出典) TDR

## (2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態

### ① ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善

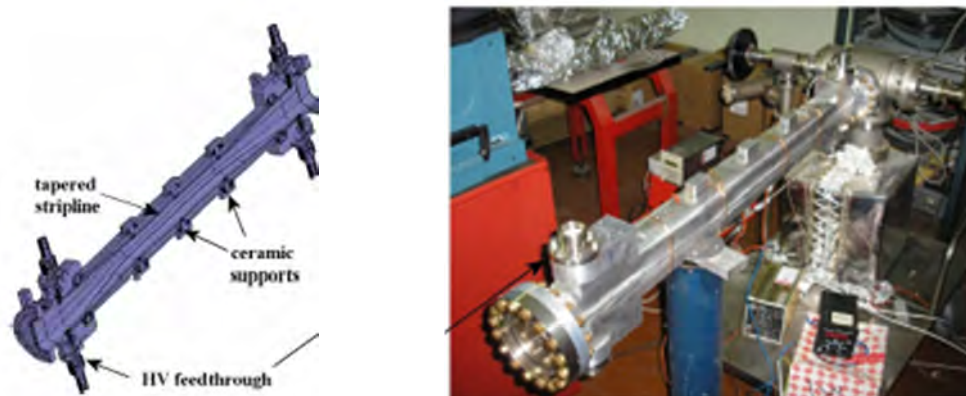
特に関連する記述無し

### ② 最新開発・製造実態

#### a) DR の入射・出射システムの開発実証

入射・出射システムは ILC・DR に不可欠であり、GDE の活動期間中に R&D が実施された。ストリップラインキッカーが INFN-LNF で設計され、DAΦNE の蓄積リング (次図表、写真) に実装され実験が行われた。その結果、必要な成果が得られた。

図表 II-72 INFN-LNF の DAΦNE のストリップラインキッカー



(出典) INFN-LNF 訪問ヒアリング時入手資料

SLAC (米国) では、立ち上がり時間が非常に短く、繰返し率が 3 MHz のパルス変調器 (pulser modulators) の R&D と試験が実施されている。

図表 II-73 SLAC の 3 MHz パルス変調器の性能

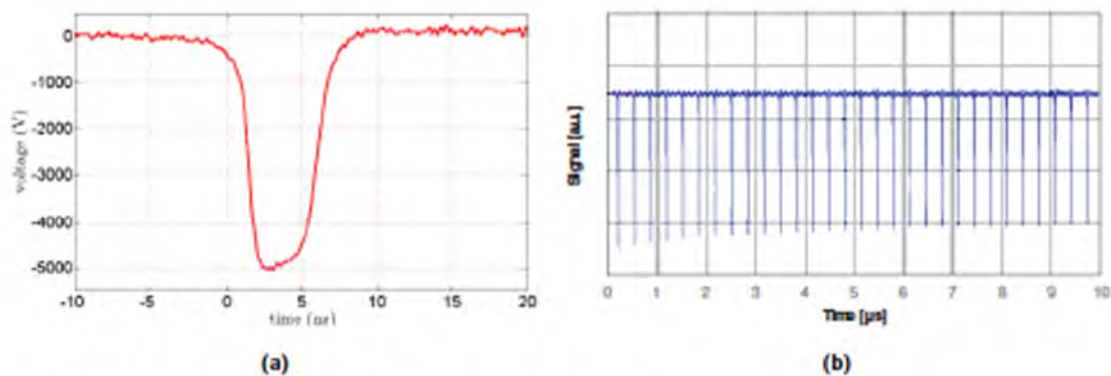
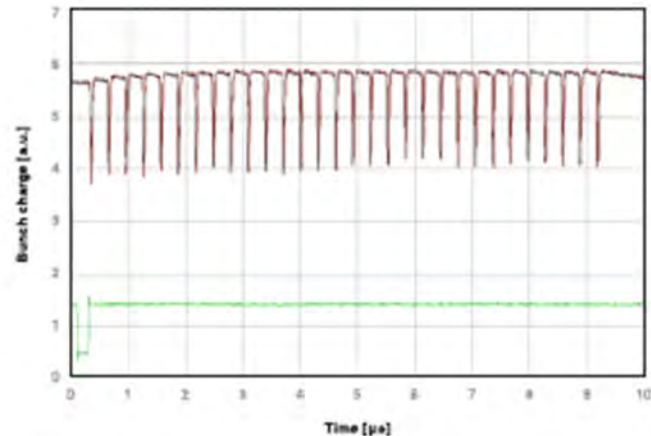


Figure 4.23. DSRD-based driver output; single pulse detail, 3 MHz 30-pulse pulse-train [256].

(出典) SLAC 訪問ヒアリング時入手資料

KEK の ATF でも出射システムの開発と試験が行われている。右図は、ダンピングリングのバンチカレントモニターからの信号を示している。1 トレイン 30 バンチで、適切な間隔 (308ns) でバンチが射出されていることがわかる。

図表 II-74 KEK・ATF のバンチ射出試験結果



(出典) KEK 訪問ヒアリング時入手資料

### (3) ダンピングリング (DR) の評価と技術的課題

#### 【TDR (技術設計報告書) ベースラインへの課題の指摘】

ダンピングリング (DR) についての TDR ベースラインに対して、次のような指摘がされていた。

- DR の軌道修正と安定化、ビーム位置モニター、ビームプロファイル測定システム、低エミッタンスチューニング技術などは、既に第 3 世代光源 (Diamond、SLS、ESRF、SPRING-8 等) で達成又は計画されているものと同様であることの確認が必要である。
- 陽電子リングでの電子雲不安定性、電子リングでの Fast Ion 不安定性についての対策は確立されているかの確認が必要である。
- ILC・DR では、RF 周波数を 500 MHz から 650 MHz にスケールアップし、システムパラメータを最適化するための詳細な工学設計が必要になると考えられる。
- 入出射システムの安定性と信頼性が確保されていることの確認が必要である。特に 42 台の Fast Kicker を協調して安定に運転する必要があるが、その長期運転の信頼性には疑問がある。
- ビームパルスの圧縮と蓄積、引き延ばしを精密に制御するタイミング系の構築の実現性について検証する必要がある。
- DR は陽電子リング-電子リング-陽電子リングの最終的には三層構造となるが、振動や変形等への脆弱性が問題になる可能性がある。

こうした指摘を念頭に置き、DR の評価と技術的課題についてヒアリングを実施し、その結果を取りまとめると以下のとおりである。

① ILC・DRに必要な技術の全体的な達成度の評価と課題 <INFN-LNF>

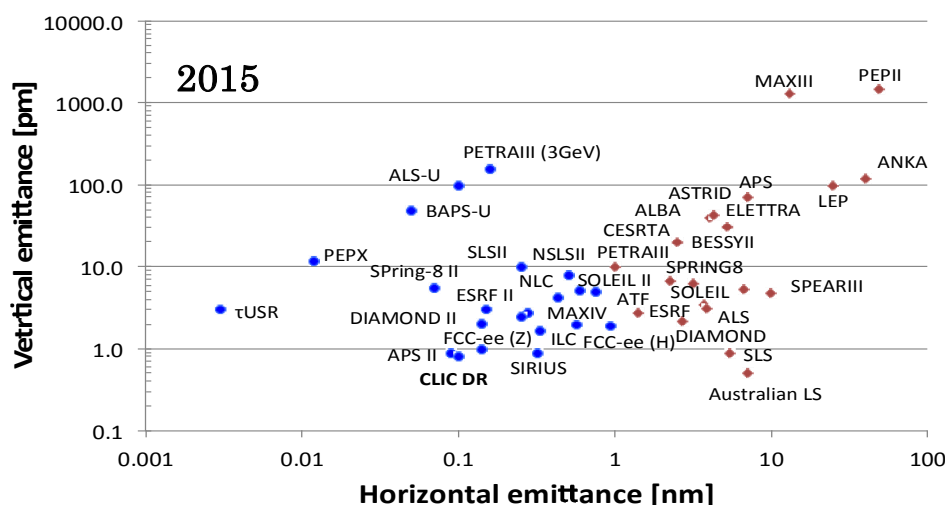
ILC・DRが超低垂直エミッタンスを実現するためには、アライメント公差、軌道修正と安定化、ビーム位置モニター、ビームプロファイル測定システム、及び低エミッタンスチューニング技術が必要である。これらの技術については、第3世代光源において既の実現または計画されている技術としてほぼ達成されている。

例えば、2~3pmの垂直エミッタンスは、Diamond(英国)、ASLS(オーストラリア)、ESRF(欧州)、SLS(スウェーデン)、SSRF(中国)等の第3世代光源で、実証されている。この中で、オーストラリアのASLSでは、1pm以下、最も低い数値で0.33pmの垂直エミッタンスが計測されている。これは量子限界(quantum limit)エミッタンスである。ILC・DRの要件は2pmであることから、ASLSはそれを満たしている。

② 低垂直エミッタンス実現の可能性の評価と課題 <KEK, INFN-LNF>

DRでの超低垂直エミッタンスの技術は世界的に成熟している。次図表は2015年11月にカナダのLCワークショップで公開されたものである。青い点は計画されている加速器で、赤は現存している加速器である。青は赤の加速器の次期計画にあたるもので、多くは施設名に「II」とついている。青で示された次期計画はすでに建設が検討され、実現可能であると判断されている。

図表 II-75 世界の加速器(現存、計画)におけるエミッタンスの達成状況



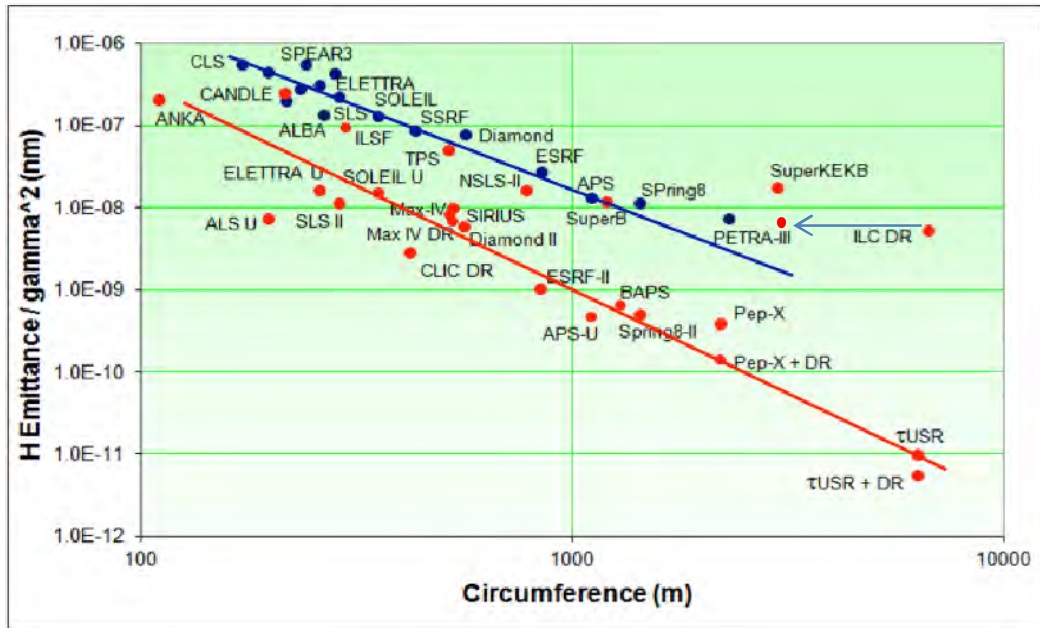
(出典) KEK 訪問ヒアリング時入手資料

世界にある電子・陽電子コライダー及びシンクロトロン光源のうち、数基は ILC・DRに必要なビーム性能と同等の性能(超低エミッタンス、多バンチ数、短いバンチ間隔)を達成している。

次図表は、世界の低エミッタンス蓄積リングの周長とエミッタンス(ビームエネルギーで標準化)の関係を示したものである。ILC・DRは当初は6kmであったが現在は3.2kmである。図表から明らかなように、現存の光源、建設・計画中の光源の多くは ILC・DRの目標よりも小さなエミッタンスを達成している。



図表 II-76 世界の低エミッタンス蓄積リング



(注) 青色＝現在稼動している第3世代シンクロトロン光源  
 赤色＝建設中またはアップグレード計画中の新しい光源（第4世代光源含む）  
 (出典) INFN-LNF 訪問ヒアリング時入手資料

これまでの実績より ILC のダンピングタイムは設計通りに達成されることが確認されている。ILC では横方向 24ms（進行方向 12ms）であり、十分な減衰を期待できる。

したがって、ILC の要件をすべて満たす DR は現状存在しないから実証できていないということでは無い。周辺技術は充分であるというのが共通認識である。また、リニアコライダー関係者の間では、超低垂直エミッタンスより、ナノビームの方が集中すべき課題として認識されている。

### ③電子雲不安定性、Fast Ion 不安定性への対策の評価と課題 <KEK>

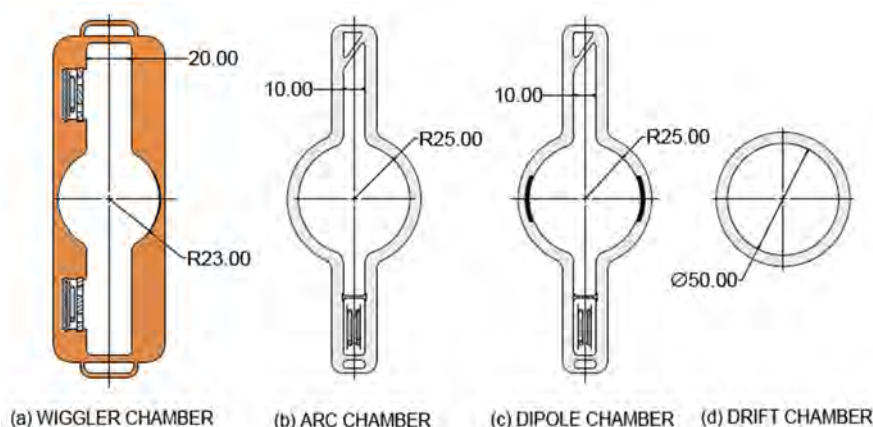
陽電子リングの電子雲不安定性軽減の研究については、CESR-TA (Cornell Electron Storage Ring Test Accelerator) において国際的な研究チームによって大掛かりな研究が行われた。その成果は SuperKEKB にも取り入れられている。

SuperKEKB の陽電子リングには、ILC の陽電子リングと同じ電子雲の不安定性抑制技術が導入されており、2016年2月にはコミショニングを開始する予定である。

SuperKEKB では、ILC・DR と同じバンチ間隔 (4ns) で、エミッタンスは高いが ILC の5倍のバンチ電流を目指している。したがって、ILC・DR の電子雲の不安定性抑制技術は、SuperKEKB の技術によって確立されることになる。

ILC・DR での電子雲不安定性への対処方法は、CESR-TA の研究チームの推薦に従い、次図表のような真空チャンバーを陽電子リングに設置するものである。

図表 II-77 ILC の陽電子リングに設置される真空チャンバーの概要



(出典) KEK 訪問ヒアリング時入手資料

また、放射光が壁を叩いて電子が発生する際に、出てきた電子がビームライン側に来ないようにする細工がなされている。放射光があたる箇所の電子の放出率を改善するとともに、出てきた電子が電子ビームの軸上に来ないように細工をしている。この技術は SuperKEKB でも採用され、研究されている。

ただし、ルミノシティ増強のためにバンチ数を倍増した段階では安定性に確信がもてないため、陽電子の DR についてはもう 1 本リングを増設する可能性がある。TDR に示されるリング 3 本の図は、陽電子リングが 2 本になっているものである。

一方、電子リングでの高速イオン (fast ion) の不安定性対策も十分研究されている。フィードバックシステムによって、高速イオンの不安定性を軽減することができる。0.5 × 10<sup>-7</sup> Pa の真空中で、振幅の増加時間が 20 ターン程度必要になる。20 ターン程度のフィードバックが必要であるが、これはさほど速いフィードバックではないので、十分に実現可能である。SuperKEKB でも実証済みで、最先端の DR が実際にこの条件で稼動している。

#### ④RF 周波数のスケーリングと工学設計の必要性の評価と課題 <KEK>

ILC・DR に向けては、RF 周波数を 500 MHz から 650 MHz にスケーリングする必要があるが、500MHz から 650MHz へのスケールは大きな問題とはならない。過去、同程度にスケールした高周波システム開発は多く行われており、むしろ、周波数が上がることによる空洞サイズの小型化などのメリットもある。必要な装置の工学設計 (詳細システム設計) は 1～2 年程度でできる。

#### ⑤ILC・DR の入射と出射システムの評価と課題 <INFN-LNF、KEK>

##### a) 入射・出射システム全体<INFN-LNF、KEK>

DR の入射・出射システムについては、これまで LNF (伊)、SLAC (米)、KEK (日) 等で研究開発と試験が行われてきた。

しかしながら、ILC で要求される入射・出射効率を確保するためには、さらなる研究開発が必要である。ILC の入射・出射システムにおいて重要な要素は、パルスの立ち上がり及び立ち下がり時間、パルス繰返し率、キックの振幅及び振幅安定性、長期信頼性等である。これらのパラメータは個別の試験において達成されているが、ILC ではすべての仕様を同時に達成する必要がある。必要な性能を達成するためには、さらなる R&D が必要である。<INFN-LNF>

<見解がやや異なるため以下を併記>

ILC の入射・出射システムにおいて重要な要素は、高速キッカーのパルスの立ち上がり及び立ち下がり時間、パルス繰返し率、キックの振幅及び振幅安定性、長期信頼性等である。これらのパラメータは個別のハードウェア開発と ATF に於けるビーム試験からパルス電源の長期信頼性を除いてほぼ達成されている。高速キッカーはパルス電源の性能がカギとなる。FID 社のパルス電源は性能をほぼ満たしているが、さらなる性能向上を目指して KEK 等で開発が続けられている。<KEK>

#### b) 高速キッカー (fast kicker) <INFN-LNF、KEK>

リングへの入射方法としては、On-Axis 入射と Off-Axis 入射がある。

Off-Axis 入射は、バンブ軌道により周回しているビームの軌道を少しずらし、入射ビームに少し角度をつけて入射する方法である。入射ビームは中心軌道から振動しながら周回するが、1 周回間にキッカーパルス (キック) が終われば周回を続けることができる。この方法の利点は、キッカーの立ち上がり立ち下がりがゆっくりでもよいこと、蹴り角が On-Axis 入射に比べて少なくすむこと、周回ビームに注ぎ足しが出来ること等である。欠点は、リングのチャンバーを入射ビームが振動しても周回できる大きなアパーチャにする必要があるという点である。INFN-LNF の DA $\phi$ NE や SuperKEKB、放射光リングなどでは Off-Axis 入射が用いられている。

一方、On-Axis 入射は、キッカーによって周回ビームと同じ軌道に入射する方法である。ILC DR の入射方法は On-Axis 入射である。この方法の利点は、ILC DR のようにアパーチャの狭いリングの設計ができることである。反面、キッカーは入射ビームのみを偏向し、周回している次のビームが来る前にキッカーパルス (キック) が終わらなければならない。1,312 バンチでは 6ns、2,624 バンチでは 3ns 後ろに次のバンチがあるため、それまでにキッカーパルスが終了しなければならない。高速キッカーの実験は KEK の ATF で行われており、3ns で立ち上がることが達成されている。

リングからの取出しは入射とは逆に周回ビームに蹴り角を与えることで取出し軌道へと導く。キッカーの動作としてはほとんど同じであり、エミッタンスが小さくなっているのでアパーチャに余裕があるため入射キッカー以上の難しさはない。

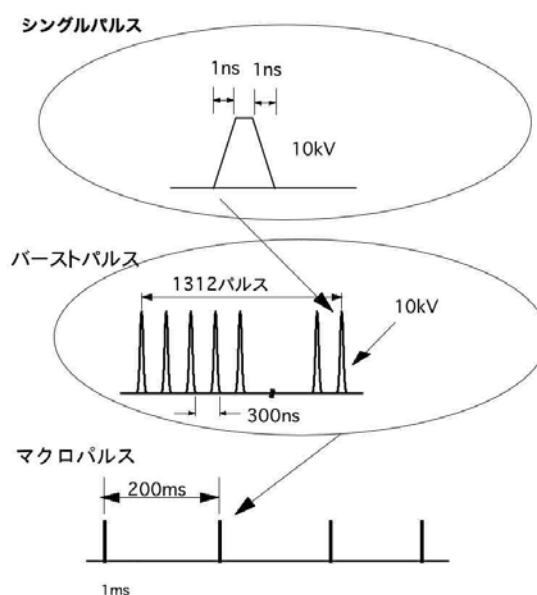
ILC の TDR ではキッカーは電極の長さ 30cm、ギャップ幅 30mm、ドライブパルス +/-10kV の場合、入射・出射に各 21 台、計 42 台のキッカーが必要となる。ドライブパルスは、電圧が高いほど蹴り角を大きくできるため高くしたいが、高速・高電圧パルスを作る技術に難しさがある。Spring8 では次期計画のために高速キッカーを開発しており、繰

返しは低い $45\text{kV}$ 、 $5\text{ns}$  のパルス電源の試験を行っていることから、さらに電圧を高くできる可能性がある。

ILC のパルス電源のパルスのピークは  $10\text{kV}$  では  $2\text{MW}$  に達するが、平均パワーは  $100\text{W}$  以下であり、熱的な問題は発生しない。また、ILC では 21 台のキッカーを高精度に同期させて運転する必要があるが、この点においても ATF で 4 台のパルス電源を  $200\text{ps}$  以下の精度で運転した経験から問題ないと考えられる。現在残っている課題は、長期運転時の安定性と信頼性の評価のみである。

<参考> ILC のパルス電源の仕様

立ち上がり :	$1\text{ns}$
ピーク電圧 :	$10\text{kV}$
マイクロパルス繰返し :	$1.8\text{MHz}(554\text{ns spacing}), 1312$ パルス
バーストの繰返し :	$5\text{Hz}$
発生パルスのpowerは、	
ピークパワー	$P_{\text{peak}} = 10\text{kV} \times 200\text{A} = 2\text{MW}$
平均パワー	$P_{\text{mean}} = P_{\text{peak}} \times 5\text{ns} \times 1312\text{pulse} \times 5\text{Hz} = 65\text{W}$



(出典) KEK 資料

⑥ILC・DR の 3 層構造の評価 <KEK、INFN-LNF>

TDR に示される DR が 3 層になっている図は、陽電子リングが 2 本になっているものである。3 層構造は、機械的にはスタディが必要であるが、深刻な問題は引き起こさないと考えている。実際に建設例 (LEP II) がある。

なお、ILC の陽電子リングの 1 本は、バンチ数を増やして電子雲の不安定性が増した場合に、陽電子のリングを増やして対応するためである。

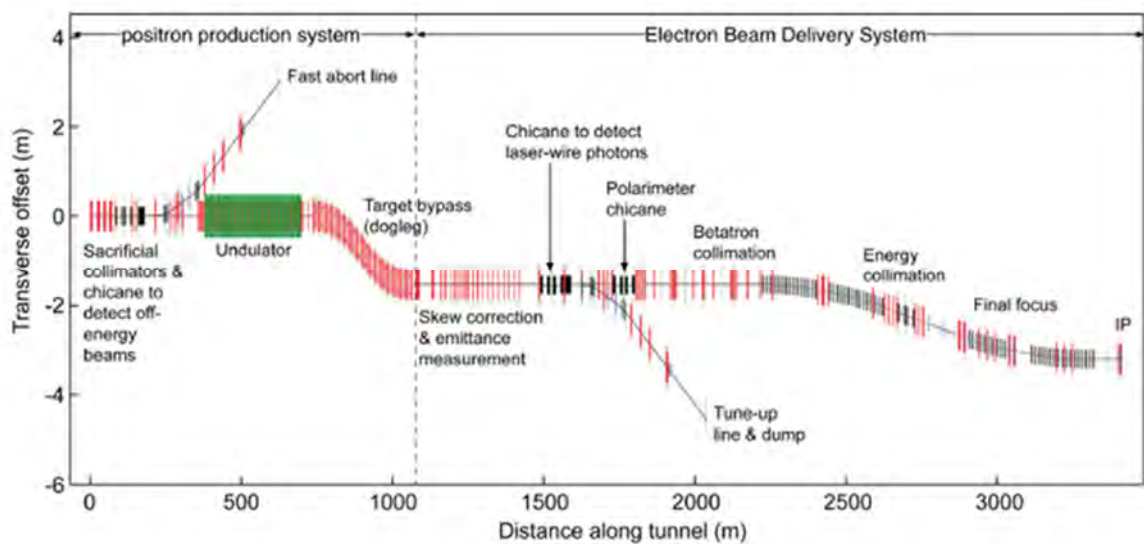
## 5) 最終収束部 (BDS)

### (1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要

ILC の最終収束部 (Beam-Delivery System: BDS) は、高エネルギー線形加速器の終端からの電子ビームと陽電子ビームを輸送する役割を担う。BDS は、ILC で要求される루미ノシティを達成するために必要なサイズまで電子ビームと陽電子ビームを収束し、衝突させ、使用済みビームを主ビームダンプに輸送する。

最終収束部のレイアウトを以下に示す。衝突点に入射する電子・陽電子ビームは 14 ミリラジアン of 交差角を持つ。この 14 ミリラジアン of 交差角によって、両ビームに対して別々の取り出しライン用のスペースが得られるが、効率的に両ビームを正面衝突させるために、水平面でビームバンチを回転させるクラブ空洞が必要となる。また、衝突領域 (IR) ホールにはプッシュプル方式で交互に出し入れできる 2 つの検出器が設置される。

図表 II-78 ILC の最終収束部 (BDS) の全体構成



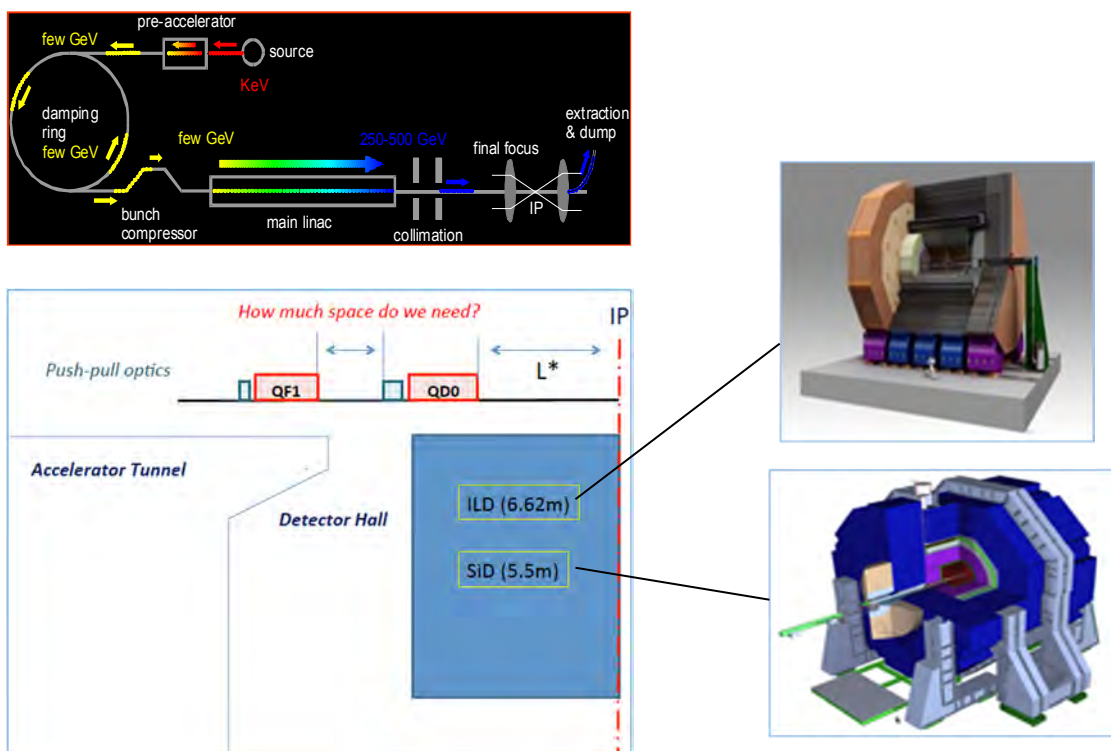
(出典) TDR

### (2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態

#### ① ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善

TDR では、最終収束系の最後の二連四極磁石の端と衝突点の距離は、提案されている 2 つの測定器で異なっていたため、測定器の交換の際に多くの問題が生じている。測定器グループとの討議を経て、この距離を両測定器とも同一にする妥協的解決法が導き出され、設計変更が正式に締結された。

図表 II-79 最終収束レイアウトの変更（最終収束の共通化）  
 ILD (6.62m)、SiD (5.5m) ⇒ ILD、SiD ともに 4.1m に共通化



(出典) KEK より入手資料

### (3) 最終収束部 (BDS) の評価と技術的課題

#### 【TDR (技術設計報告書) ベースラインへの課題の指摘】

ILC の BDS/最終収束についての TDR ベースラインに対して、次のような指摘がなされている。

- 衝突点が狭く、検出器の鉄シールドがビームのシールドを兼ねることになっているが、その場合検出器がないとビームを出射できないことが懸念される。
- 衝突点が狭いために、新竹モニター (ビームサイズモニター) が入れられないが、それによって、ビーム制御上の制約が発生する可能性がある。
- ビームがナノサイズに常に絞れていることをルミノシティモニターだけで行うことには限界がある。

こうした指摘を念頭に置き、BDS の評価と技術的課題についてヒアリングを実施し、その結果を取りまとめると以下のとおりである。

#### ① 検出器とビーム出射の関係についての評価 <KEK>

検出器がなくてもビームの出射は可能である。原理的に壁を作ることも可能であるが、費用や時間などから現実的では無いと考えられている。壁が無い場合は放射線防御のた

め検出器ホールへの立入ができない。検出器建設の観点から、そのような運転期間（加速器の初期状態確認）は短くするよう求められている。

また、検出器には最終収束用電磁石 QD0 が組み込まれており、検出器が無い運転は、別の QD0 を用意しなければビームをナノメートル単位で収束できない。SiD 検出器のグループが最初からビームラインに検出器を設置することを想定しているため、懸念されるような問題はない。

## ②新竹モニターについての評価<KEK>

ILC では、新竹モニターの使用は想定されていない。新竹モニターは、ATF や FFTB など電子ビームしか無い（陽電子ビームと衝突しない）試験加速器でのビームサイズ測定に必要であったが、ILC には必要ない。ILC では電子・陽電子衝突の散乱やルミノシティを計測するなどによってナノビーム調整を行う。

新竹モニターは ILC には必要ないが、ATF2 ではビームサイズの測定に使われている。ATF2 で達成した最も小さいビームサイズは 44nm である。この数値は再現性も高く、確立した技術であるという共通認識がある。現在、更なる研究開発が行われている。

リニアコライダーで通常用いられるビームサイズモニタには様々な種類がある。ILC では 1 $\mu$ m 程度の精度をもったビームサイズモニタを搭載予定であり、その精度で測定可能なシステムは、既に確立している。

## ③ルミノシティモニターについての評価<KEK>

ルミノシティモニターは十分高速・高感度で、これによるビームサイズ測定で基本的には十分と考える。なお、そのほかに、ビーム同志の蹴り角の測定、ビーム輻射の測定、衝突で発生する電子・陽電子対の出射角分布の測定なども、ビームサイズ測定の補助として役に立つ。

## 6) ビームダンプ

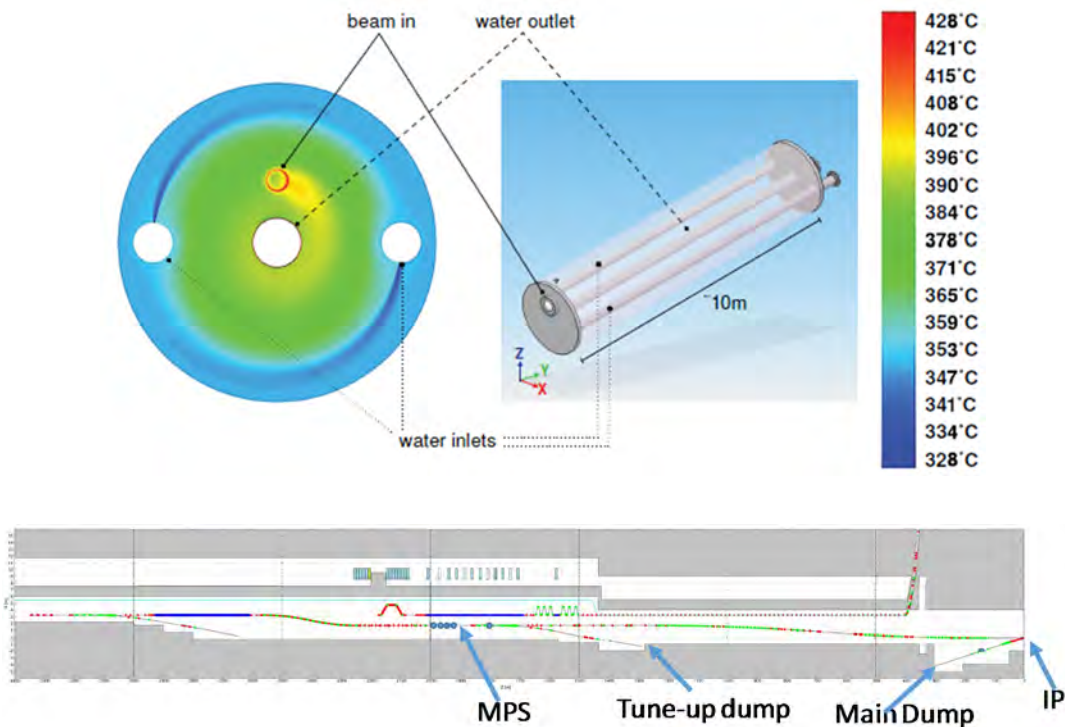
### (1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要

ビーム分配システムは、2つの調整用ダンプと2つの主ビームダンプを含む。これら4つのダンプはすべてビームあたり500GeVで18MWの公称パラメータのピークビームパワー用にすべて設計されている。これは1TeVアップグレードの14MWのビームパワーにも十分である。ダンプは、直径30cm、厚さ1mmのチタン窓が付いた、直径1.8mの円筒形のステンレス製高圧(10バール)水導管で構成されており、またそのシールド及び付随する水システムを含む。設計はSLAC2.2MW水ダンプをもとになされている。

ダンプは11m (30 X<sub>0</sub>)の水によって電磁シャワーカスケードエネルギーを吸収する。各ダンプは、長さ1msのバンチトレインが通過する間、半径6cmの円弧状に荷電ビームスポットを移動するためのビームスイープ磁石システムを搭載している。各ダンプは10バール圧力で動作し、また、水が常にビームを横切って移動し続けるように渦流システムを搭載している。500GeVのビームエネルギーの通常の動作では、水速とビームスイーパーの組み合わせがバンチトレイン中の水温上昇を155°Cに制限する。与圧がダンプ水の沸騰温度を上昇させる。スイーパーに障害が発生した場合、ダンプはダンプ水を沸騰させずに250バンチまで吸収できる。

ダンプ窓の安全性、放射線分解で発生した水素と酸素の処理、及び放射能を帯びた水の封じ込めがフルパワーダンプのための重要な課題である。

図表 II-80 ビームダンプの構造



(出典) TDR



### 【ビームダンプの補足説明】 <KEK>

ILC のビームダンプは、高圧(10 気圧) の水をタンクに入れ、窓(1mm 厚のチタン) を介して使用済みの電子、陽電子ビーム及びビーム間相互作用で発生する高エネルギー光子を受け止めるものである。

ビームダンプは、直径 1.8m、長さ 11m (30X<sub>0</sub>)の円筒形のステンレス容器である。その中に入っている水は、10 気圧の高圧水であり、高圧にしている目的は沸点を上げるためである。

ビームダンプの「窓」は、直径 30cm、厚さ 1mm のチタン合金でできている。この窓にビームが当たるわけであるが、1カ所に 1ms 当たっていると窓が壊れてしまう。このため、ビームは 1ms の間に半径 6cm の円を描くように入射される。そのために、スイーパー (磁場が変わるマグネット) が置かれる。最大 18MW の時の水温は、最高摂氏 155 度までに上昇する。なお、窓にチタン合金を使用する理由は軽くて融点が高い、強度が高いことなどである。

ILC のメインビームダンプは、同じ規格のものが 4カ所 (電子、陽電子それぞれ 2カ所) 。ある。いずれも最大 18MW (電子、陽電子それぞれ 2カ所) が入ってくるという想定である。これは ILC が 1TeV 運転になった場合を見越している。

## (2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態

### ①ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善

特に記述無し

### ②最新開発・製造実態<KEK>

ILC のメインビームダンプは 4カ所あり、いずれも最大 18MW (電子、陽電子それぞれ 2カ所) が入ってくるという想定である。なお、最近では要求そのものが 14MW (×2) 程度に下がってきている一方で、デザインが 18MW のままであるため、設計上はかなり余裕ができてきている。

## (3) ILC のビームダンプの評価と技術的課題

### 【TDR (技術設計報告書) ベースラインへの課題の指摘】

ビームダンプについての TDR ベースラインに対して、次のような指摘がなされていた。

- ビームダンプの窓は、(a) ビームトレインをそのまま当てるとウインドウが破壊される恐れはないのか。(b) ウインドウを保護するため、トレインの時間幅 0.95 ms で、直径 12cm の円周に沿って電子ビームをスイープする。(c) この条件では、円弧上の電子ビームの線速度は約 400 m/sec となり音速を超えるものになるが、問題は生じないか。このシステムの安全性と運転の信頼性をどう担保するのか。
- ビームダンプが壊れると高濃度放射化物を含む 10 気圧の水が吹き出てトンネル内を汚染する恐れがあるが、その対策はされているか。

■高強度放射線環境場での窓材と水の反応による損傷については要検討である。

こうした指摘を念頭に置き、ビームダンプの評価と技術的課題についてヒアリングを実施し、その結果を取りまとめると以下のとおりである。

#### ①ビームダンプ問題の評価 <KEK>

電子ビームの窓上での線速度は音速を超えるが、例え音速の何倍・何十倍となってもそれ自身問題になることはない。問題は、運転の安全性と信頼性の担保である。

ビームは窓上に半径 6cm 円を描くように入射される(1ms で一周)。その際に、もし sweeper が故障した場合どうなるかである。窓上の 1 点にビームが集中した場合、TDR では高圧水であるが 250 バンチの入射で沸騰が始まると計算されている(最大で 2,500 バンチが来る)。

この故障への対応策としては次のことが考えられている。

- a) まず、故障が起こったことが検知されれば、衝突点より約 2.2km 上流の Machine Protection System (MPS) に通知され、最大 50 バンチ程度までで窓への入射は停止する。したがって、沸騰は起らない。それ以降のバンチのうちすでに DR を出ているものは、非常用ダンプ(図頁図表の「tune-up dump」)に捨てられる。また、DR にも故障は通知され、DR から出てきていないバンチは DR の出口で停止する。以上より、故障検知システムが働く場合には、窓に問題は発生しない(安全性は保たれる)。
- b) なんらかの原因でこの通報・停止システムが働かなかった場合でも、沸騰は窓付近ではなく、窓から 2m 程度奥の shower maximum の地点で起こるので(電磁シャワーの性質)、ただちに窓が破壊されるわけではない。それでも 2,500 バンチが全て窓に当れば破壊される可能性があるが、何バンチで窓が壊れるかは実証されていないので実際のところはわからない。また、その予測は非常に難しい。窓の強度は、水流を含めた温度上昇、熱ストレスによる破壊限界、耐久性なども考慮して材質を選択した上で設計されている。しかし、上記のビームシステム事故も含めて、万一の場合の窓の破壊への対策も、まだ十分とはいえないが、考えられている。
- c) 窓は高度に放射能を帯びているため、定期的リモートアクセスで交換できるようになっている。これに伴いダンプの水を定期的に抜くことを予定しており、ダンプの水を十分に受けられるピットが遮蔽構造の内部に設けられている。このピットは万一のダンプ水漏洩の際の流出防止の役割も同時に担う。したがって、窓が破壊されたからといって放射性物質が、「ビームダンプ遮蔽及び放射能閉じ込めのための室」の外に出るということはない。遮蔽構造内に蒸発したトリチウム水は除湿器により回収する。遮蔽構造の内側表面には、あらかじめ結露水の付着を避けるためにコーティングを行っておく。遮蔽構造は 50cm の鉄と 150cm のコンクリートからなり、さらに外側に 200cm のコンクリートを追加して地下水の放射化を避ける。なお、ダンプ本体の交換は考えていない。

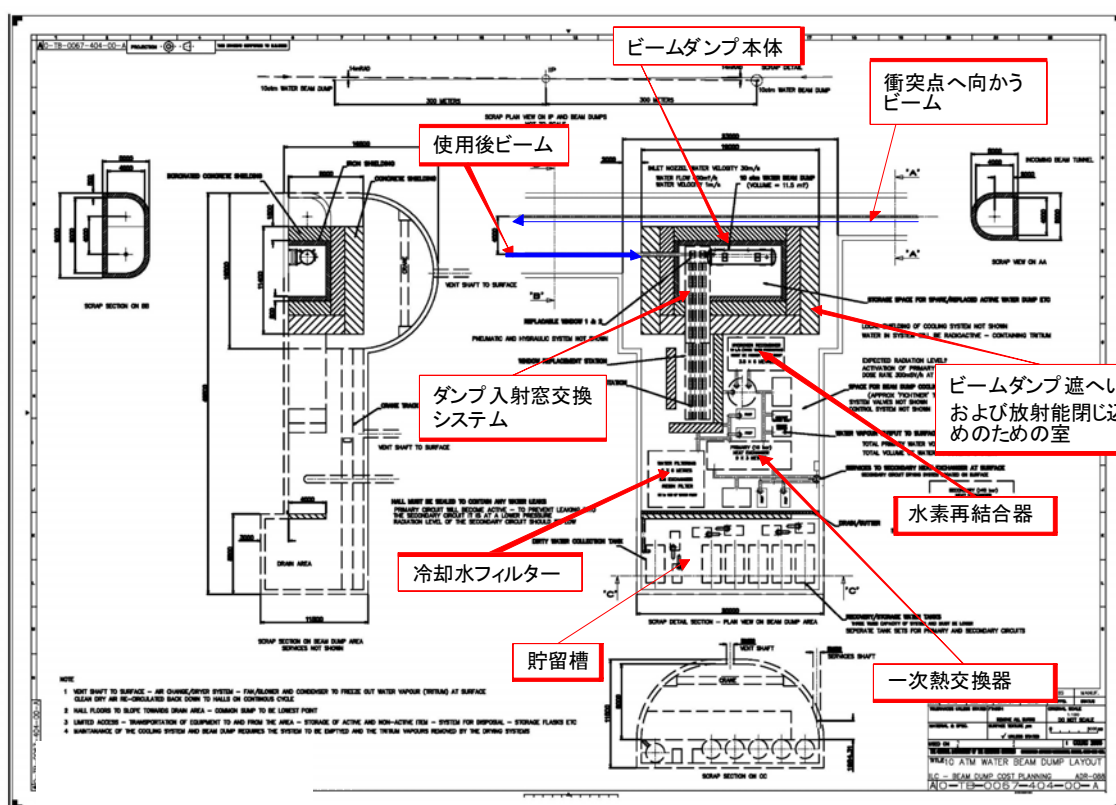
## ②ビームダンプにより発生する放射性物質の管理問題の評価 <KEK>

電子ビームは、ビームダンプ内の水の原子核と反応し、半減期の違う複数種類の放射性核種（主に  $^{15}\text{O}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{11}\text{C}$ 、 $^7\text{Be}$  及び  $^3\text{H}$ ）を大量につくる。このうち、最初の3つの放射性核種は約3時間で崩壊する。 $^7\text{Be}$ はフィルタリングされ外に出される。最も厄介なのは  $^3\text{H}$ （トリチウム：半減期12年）である。

ビームダンプには放射性物質除去装置が付いており、放射性物質は分離され、地下に貯蔵されることになる。長年にわたる放射能は、全てコントロールされ、地上には全く影響が無いように計画されている。

しかし、これらの放射性物質の安全管理は重要な課題である。

図表 II-81 ダンプ施設の概要



2015/11/17 NRI Survey,  
Yokoya

26

(出典) KEK 訪問ヒアリング時配布資料

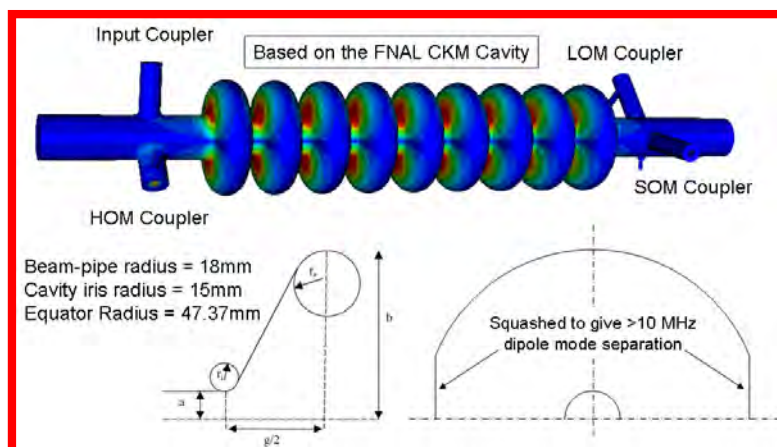
## 7) クラブ空洞システム

### (1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要

クラブ空洞は、バンチが正面衝突するように 14 m-rad の交差角度からバンチを回転させるために必要である。2~3m 長のクライオモジュールの中に設置された、2 つの 3.9GHz の超伝導 9 セル空洞は、衝突点 (IP) から 13.4m の位置にある。空洞は 3.9 GHz TM<sub>110</sub> の  $\pi$  モード 13 セル空洞のフェルミ研究所の設計に基づいている。ILC には 5MV/m ピーク偏向で運転されるこの設計の 2 つの 9 セルバージョンがある。これらが 500GeV ビームを十分に回転させ、250GeV ビームに 100% の冗長性を持たせる。

クラブ空洞システムの最も困難な仕様は、最適な衝突を維持するために入射陽電子と電子の空洞間の無相関ジッターを 61fsec に制御されなければならないことである。JLab ERL 施設での 1.5GHz の 7 セル空洞の原理証明試験は、37fsec レベルの制御を達成し、実現可能性を実証している。空洞の高次と低次調波は IP での不要な垂直偏向を制限するために効果的に減衰されなければならないし、同様に主偏向モードの垂直偏波も減衰されなければならない。

図表 II-82 クラブ空洞のイメージ



(出典)コッククロフト研究所資料

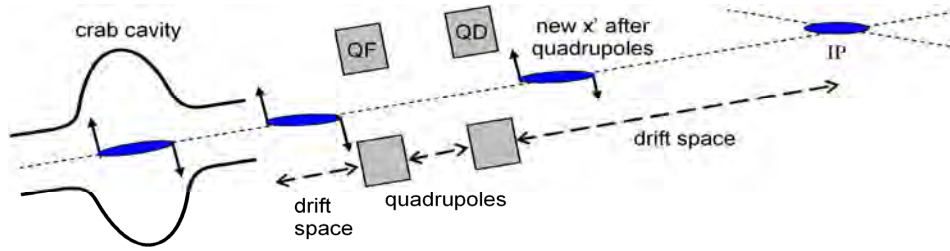
### 【クラブ空洞の補足説明<コッククロフト研究所>】

ILC のクラブ空洞システムは、偏向空洞 (deflection cavity) を用いてビームバンチに回転を与え、同じ交差角度 (14mrad) でバンチを正面衝突させて、高いルミノシティを得るための技術である。クラブ空洞を用いなければルミノシティの 80% が失われる。

ILC のクラブ空洞は TM<sub>110</sub> モードであり (加速空洞は TM<sub>010</sub> モード)、偏向空洞としては低めの 5MV/m で稼動する。また、クラブ空洞は 3kW、パルス 10ms である。

IP (衝突点) から 15m ほど手前にクラブ空洞を設置する。ILC では衝突後ビームとの距離が短いため、小さな空洞が必要となる。3.9GHz の超伝導 9 セル空洞 2 個と 1 つの冷却容器 (cryovessel) で構成されたコンパクトなデザインになっている。

図表 II-83 ILC のクラブ空洞システムの全体構成



(出典) コックロフト研究所資料

図表 II-84 ILC のクラブ空洞のパラメータ

<b>Crossing angle</b>	<b>14 mrad</b>
Number of cryovessels per IP	2
Number of 9-cell cavities per cryovessel	2
Required bunch rotation , mrad	7
Location of crab cavities from the corresponding IP, m	13.4 – 17.4
Longitudinal space allocated per cryovessel, m	3.8
RMS Relative Phase Stability, deg	0.095
RMS Beam Energy Jitter, %	0.33
X offset at IP due to crab cavity angle (R12), m/rad	16.3
Y offset at IP due to crab cavity angle (R12), m/rad	2.4
Amplitude at 1TeV CM, MV	2.64
Max amplitude with operational margin, MV	4.1

(出典) コックロフト研究所資料

## (2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態

### ①ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善

特に記述無し

### ②最新開発・製造実態 <コックロフト研究所>

#### a) クラブ空洞の研究開発

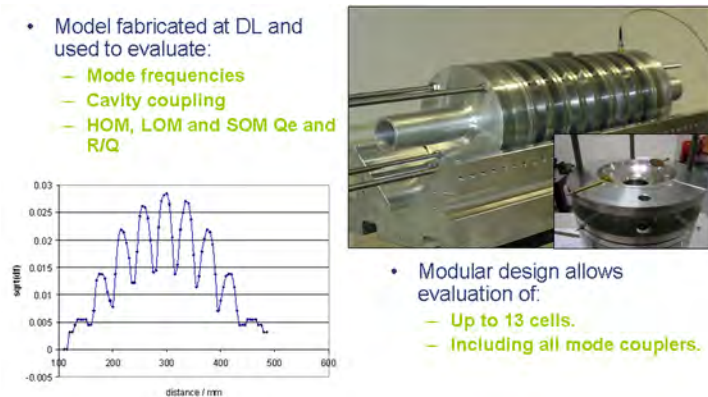
ILC のクラブ空洞の研究は、コックロフト研究所のチームが行っている。チームは、ランカスター大学のメンバーと STFC ASTeC (Accelerator Science and Technology Centre) のメンバーから構成される。

コックロフト研究所は、FNAL 及び SLAC と「クラブ空洞コラボレーション」を行なっている。FNALとは、FLASH 用の 3.9GHz 空洞の研究開発を一緒に行うことで、相乗効果を得ることができた。

コックロフト研究所は、ILC 向けに 9 セルクラブ空洞を設計した。また、1 セル空洞を用いて 2K よりやや高い温度で実験を行った。3.9GHz では BCS resistance が高

めの  $500\text{n}\Omega$  (ナノオーム) を示し、BCS 抵抗が支配的 (BCS dominated) という結果になった。アルミニウム製のプロトタイプ (カプラー含む) 空洞は、インピーダンスが非常に高く、SLAC の HOM カプラーが失敗だったと気づく契機となった。

図表 II-85 コッククロフト研究所の 9 セルクラブ空洞



(出典) STFC Daresbury Lab ヒアリング訪問時配布資料

#### b) カプラーの製造・実験

コッククロフト研究所で行なった 1 セル空洞による実験では、SLAC で製造した HOM カプラーは、ビームに対する影響を適切にダンピングできなかった (高いインピーダンスモードを減衰できなかった)。LOM カプラーと SOM カプラーの設計は完成しており、適切に稼動した。

このため、SLAC の HOM カプラーは再設計する必要がある。設計を修正するには HOM カプラーを 2 個組み合わせる必要があると考えられている。LOM カプラーと SOM カプラーを組み合わせた初期設計 (preliminary design) も存在するが、どう修正するかはまだ最終決定されていない。

### (3) ILC のクラブ空洞システムの評価と技術的課題

#### ①クラブ空洞本体の課題<コッククロフト研究所>

クラブ空洞で偏向させるビームはウェーク場 (wakefield) に非常に敏感であるため、この影響を抑えることが鍵となる。また、偏向加速勾配 (deflecting gradient) の達成にもチャレンジが必要である。

これまで、1 セル空洞での実験しかされていないので、カプラーを装着した 9 セルのプロトタイプを製造する必要がある。

#### ②ダンピングとカプラーの課題<コッククロフト研究所>

カプラーにも次のような課題がある。

- LOM カプラー : multipacting, tuneability, fabrication に課題あり

- ・ SOM カプラー：強いダンピングが必要。tuneability に課題あり
- ・ HOM カプラー：multipacting、tuneability、fabrication に課題あり

特に、SLAC の HOM カプラー設計の修正が必要である。また、カプラーにマルチパクター (multipactor) が発生するかどうかの試験も必要である。

### ③LLRF と同期 (シンクロ) <コッククロフト研究所>

2つのクラブ空洞の間の同期 (シンクロ) は大変重要であり、同期目標 (synchronization target) は 20fs 前後に設定しているが、この実現が課題である。

LLRF (low level radio frequency) システムについて、位相  $0.1^\circ$  ( $0.095^\circ$  phase) 及び振幅 0.3% (0.33% amplitude) の安定度が要求されている。システムは、94fs 以内で同期しなければならないが、実際にはさらに低い数値が望ましく最終的に約 20fs を達成することが目標である。ただし、上記は空洞対空洞の要件で、空洞対ビームの要件はかなりゆるくても問題ない。

コッククロフト研究所ではいくつかプロトタイプを作り、1セル空洞 2個とクライオスタット 1台の上にチューナーを乗せて実験を行った。複数の空洞を安定稼働させることができた。ただし、これは 1セル空洞 2個とクライオモジュール 1台での実験結果であり、空洞を 50m の間隔を置いてつないだときに導波管等を安定して稼働させるためにはさらなる R&D が必要である。

一方、LLRF ボードについて、3.9GHz-LLRF ボードは研究ラボ内でしか製造されていないので、商業ベースに乗りかつ信頼性の高いシステムにしなければならない。

### ④クライオモジュール<コッククロフト研究所>

クライオスタットの設計がないため、設計に着手する必要がある。フェルミラボの 13セル空洞用のクライオスタットが ILC の要件に近いので参考になるかもしれないが、ILC のクラブ空洞用に改造しなければならない。クラブ空洞を緻密にアライメントすることも大変重要な課題である。

実際のクラブ空洞モジュールを製作するためには、HOM カプラーの再設計、次にクライオモジュールの設計が必要である。また、モジュールには、カプラーを装着した 9セルのプロトタイプ空洞を製造する必要がある。なお、カプラーについては、FLASH の 3.9GHz のパワーカプラーを利用可能である。クライオモジュールの設計に 18ヶ月~2年、プロトタイプの製造までには十分な開発リソースと資金があったとしても 3~4年(設計期間込み) かかる見込みである。

ビームを通す実験は、資金があれば 4年以内で可能である。

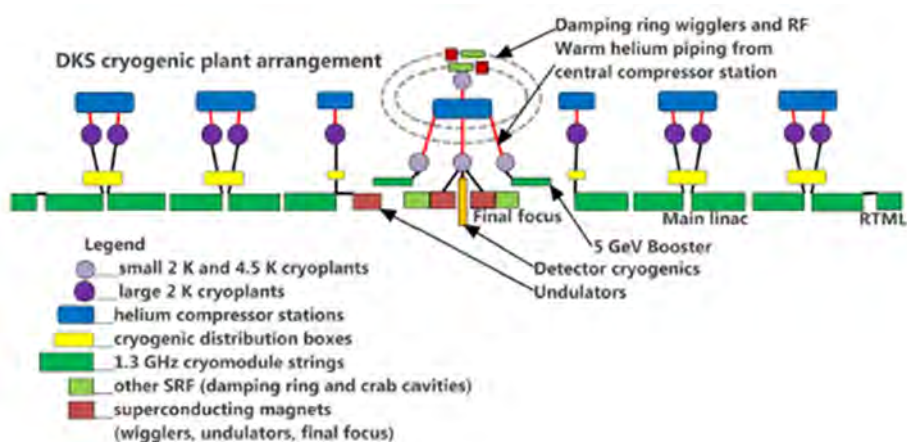
#### 4. クライオジェニクス（低温）技術、磁石技術

##### 1) クライオジェニクスシステム機器の地上配置

###### (1) TDR（技術設計報告書）ベースラインに示される技術の概要

ILC 用クライオジェニクスシステム（山岳地形＜DKS＞用）の配置を次図表に示す。これは、大規模 2K クライオプラントによって冷却される、2～2.5km の長い連続クライオユニットの概念を明確にしたものである。山岳地形用のクライオプラントは合計 10 台となる。

図表 II-86 山岳地形用(DKS)の低温システムに関する全体配置コンセプト



(出典) TDR

DKS 配置のクライオストリング 21 台（合計 189 台のクライオモジュール）で予測される熱負荷と結果として得られる低温プラントのサイズを示すと、結果として得られる低温プラントの生産力は、DKS 配置の 4.5K で 19.0kW に相当する。十分に大規模ヘリウム低温プラントの一般的生産力範囲内にある。

図表 II-87 主線形加速器の熱負荷と低温プラントのサイズ

		40-80 K	5-8 K	2 K
Predicted module static heat load	(W/module)	75.04	10.82	1.32
Predicted module dynamic heat load	(W/module)	58.80	5.05	0.79
Number of cryomodules per cryogenic unit		156 / 189	156 / 189	156 / 189
Non-module heat load per cryo unit	(kW)	0.7 / 1.1	0.14 / 0.22	0.14 / 0.22
Total predicted heat per cryogenic unit	(kW)	21.58 / 26.40	2.61 / 3.22	1.87 / 2.32
Efficiency (fraction Carnot)		0.28	0.24	0.22
Efficiency in Watts/Watt	(W/W)	16.45	197.94	702.98
Overall net cryogenic capacity multiplier		1.54	1.54	1.54
Heat load per cryogenic unit including multiplier	(kW)	33.23 / 40.65	4.03 / 4.96	2.88 / 3.57
Installed power	(kW)	547/669	797/981	2028 / 2511
Installed 4.5 K equiv	(kW)	2.50 / 3.05	3.64 / 4.48	9.26 / 11.47
Percent of total power at each level		0.16	0.24	0.60
Total operating power for one cryo unit based on predicted heat (MW)			2.63 / 3.24	
Total installed power for one cryo unit (MW)			3.37 / 4.16	
Total installed 4.5K equivalent power for one cryo unit (kW)			15.40 / 19.01	

(出典) TDR



## (2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態

### ① ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善

クライオジェニックスシステムのレイアウトに関して進展があった。要件及び制約が類似している LHC において低温工学に携わる担当者と協力して実施した包括的な再検討を踏まえて、クライオジェニックスシステムの構成を新たに定めた。

安全面の観点から地下での冷却剤貯蔵を避け、圧縮機や冷却塔からの機械振動を軽減するために、ヘリウム圧縮機及び 4.5K 冷却及び貯蔵装置は地上に移された。設計変更要請プロセス実施に向け準備が行われている。

### ② 最新開発・製造実態

#### a) クライオジェニックス地上施設のレイアウト・機器リストの作成

クライオジェニックスの地上配置への変更にもなって、地上施設 (クライオジェニックスプラント) のレイアウトプラン、機器のリストもできている。このレイアウト図面や機器リストは、TDR には無かったものであり、その後検討が進んだ結果できたものである。

#### b) クライオジェニックスを巡る議論の論点

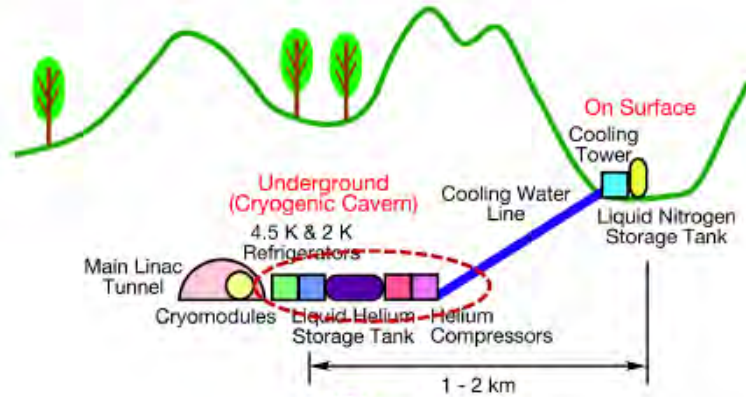
最新の ILC の施設・サイト計画 (CFS : Conventional Facility and Siting) のワークショップでは、なぜ 4.5K の CB を地下に置くことができないのかが議論になった。したがって、4.5K の CB が地下に設置されるという可能性も残されている。

#### c) クライオジェニックスの地上化に伴うコスト増減

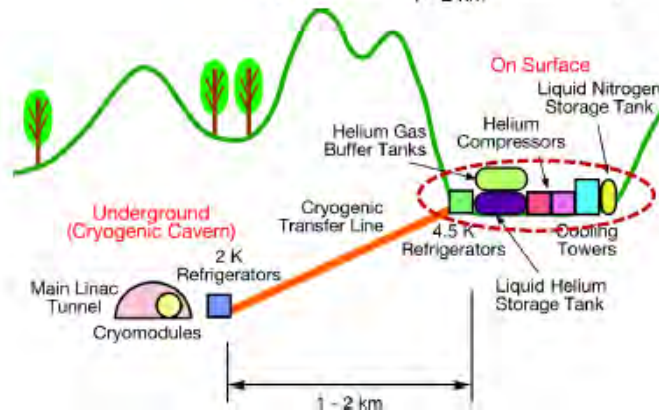
クライオジェニックスを地上に配置することによって、地下空間に置かれる機器はコンパクトになり地下空間が小さくなるため、大幅にコストダウンが可能になるとの見方がある。しかし、詳細にスタディした結果によると、地上にクライオジェニックスを持ってこようがコストは高くなる。その理由は、地上に置くと施設・設備の土地代がかかる、地下の場合花崗岩の岩盤をくり抜くだけで空間ができる (コスト安) などである。したがって、コスト面では今回のクライオジェニックスのスキーム変更は、コスト高の要因となる。

図表 II-88 ILC クライオジェニックシステムのレイアウト変更図  
(ILC-Change Request 0009)

Cryogenics Layout  
In TDR Baseline



Cryogenics Layout  
In new Baseline



(出典) KEK 訪問ヒアリング時入手資料

(3) ILC のクライオジェニックシステムの評価と技術的課題

①LHC (CERN) との類似性からみた ILC システムの評価 <CERN>

LHC の主要技術の一つがクライオジェニックである。全体的に言うと、ILC と LHC は、クライオジェニックの規模や要する技術の点で非常に類似している。

a) ILC のクライオジェニックを地上へ設置することへの評価

ILC のコールドボックスを地下・地上のどちらかに置くかは長い議論があった。当初は地下を想定していた。しかし、TDR の変更要求により現在は主要コンポーネントを地上に置くことが想定されている。CERN は、地下に 2K の冷却ユニット (コールドコンプレッサ) のみを置き、他のユニット (4.5K) は全て地上に置くべきと (KEK に) 提案した。

クライオジェニックプラントを地上に置くべき理由は、次の 3 点である。

- 地下に置くと土木工事コストが非常に高くなる。
- 機器を運転するに当たり地下にあるとアクセス及びオペレーションが困難になる。
- 地上に置くほうが安全である。この安全性の点について、CERN では液体ヘリウム

ムや液体窒素を地下に格納することは安全性確保の観点から禁止されており、全て地上に貯蔵されている。

#### b) クライオジェニックスプラントの実現性の評価

CERNには、4.5Kで18kWのクライオジェニックスプラント、1.8Kで2.4kWのプラント、80Kで600kWのプラントの3種類がある。このうち、LHC加速器のクライオジェニックスプラントとしては、5MWプラントが8基ある。その能力は全体で $8 \times 18\text{kW} = 144\text{kW}$  (4.5K)である。これらのクライオジェニックスプラント(プラント8基、クライオジェニックスアイランド5つ)は、LHC加速器の周りに配置されている。18kW (4.5K)が8ユニット、2.4kW (1.8K)が8ユニットある。

一方、ILCでは、4.5Kで19kWのクライオプラントが10基(合計190kW)想定されており、上記のLHCのクライオジェニックスプラントと規模・システムは非常に類似している。CERNのLHCのクライオジェニックスシステムは、うまく稼働し成功した。ILCでもLHCとほぼ同様のシステムが必要とされており、LHCの経験及び技術が成熟しているという点から、ILCのクライオジェニックスシステムは問題なく機能するとCERNは、判断している。

#### c) クライオジェニックスの長距離輸送ラインの実現性への評価

ILCでも重要になる、クライオジェニックス長距離輸送ラインについては、コスト面はともかく、LHCの経験によればILCにおいても技術的に実現可能である。

LHCの輸送ラインは、全長24kmのマルチプルラインであり、直径600mmのパイプの中に、5本のパイプ(通常の液体ヘリウム用パイプ、超流動液体ヘリウム用パイプ、ポンプ用パイプ等)がある。これらの輸送ラインは、107mごとに超伝導磁石に接続されている。また、8つのQRLセクター(各3.3km)に区分けされている。

輸送ラインの熱負荷試験(heat load measurements)の結果、少ないエネルギーで非常に効率よく冷却していることが実証された。重要なクライオプラント全体での冷却効率については、実際は250W/Wより冷却効率は高く、標準的モデルで220W/Wを達成できている。しかし通常のオペレーションは250Wで行っている。CERNでは、アクセスシャフトの垂直の配管(4.5K→2K)については、パイプそのものは複雑ではないが、据付は非常に複雑で苦労した。

ILCは水平トンネルなので垂直方向の輸送ラインの配管に苦労することはないと推測される。ただし、ILCはアクセス用トンネルの間隔が1~2kmと長いため(LHCは100m)その点で据付作業がLHCに比較して難しくなることが予想される。

### ②LHC (CERN) の経験から示唆される ILC システムの課題 <CERN>

#### a) ヘリウムロスの低減

LHC、ILCともに加速器内部をヘリウムで冷却することが非常に重要である。ヘリウムの取り扱いには様々な制限があり、また市場にあまり出回っていないため調達も困難である。したがって、ヘリウムを加速器の中いかに維持するかが重要なポイント

トになる。LHCにおける運用上の漏洩（operational leaks）等によるヘリウムの喪失は2010年に30%もあったが、2011年には25%になり、2012年には16%にまで減った。CERNは、ヘリウムロスを低減させるために大きな努力を払い、その結果10%まで下げられる見通しを得た。運用上の漏洩は、例えば、年1回メンテナンスのため貯蔵タンクから一部ヘリウムガスを移動させる時、クライオプラントのコンディショニング時等に発生する。

ILCにおいても、ヘリウムロスをいかに少なくするかが対応課題である。

#### b) ヘリウムの安全貯蔵

CERNのヘリウム在庫の総量は170トン、うちLHC用は136トンである。ヘリウムは即時に調達することが難しいため、ヘリウム漏洩事故などで在庫を失った場合に備え、常に戦略的ストレージを15トン抱えている。15トンは加速器1セクター分の冷却分に相当する。CERNのヘリウムガスタンクの容量は、250 m<sup>3</sup> (21bar) で) ×58ユニット、液体ヘリウムタンクの容量は、120,000リットル×6ユニットである。これらのタンクは全て地表に設置されている。この貯蔵容量は、ILCでの想定規模と似ている。

ILCのヘリウム在庫量 (inventory) は84トンであり、LHCの136トンより少ないが、ヘリウムを地表に安全に貯蔵することが、重要である。

## 2) 超伝導磁石

### (1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要

#### ①クライオモジュールの超伝導磁石

クライオモジュールには、空洞 9 台の A タイプ、または空洞 8 台の B タイプの 2 種類がある。B タイプでは、クライオモジュール中心に、超伝導 4 極磁石パッケージ 1 式 (水平・垂直ダイポールアンテナ修正器および BPM) が組み込まれる。

#### ②BDS (最終収束部) の超伝導磁石

ILC の BDS には、異なる種類 (67) の合計 636 個の磁石がある。このうち、86 個は、IP に近い 4 つのクライオスタットにクラスタ化された超伝導磁石とテール折り畳み 8 極磁石である。また、64 個のパルス磁石がある。残りの 474 個の磁石は主に従来型の室温磁石である。

BDS 磁石の主な技術課題は位置安定性である。すべての入射ビームライン 4 極磁石と 6 極磁石は、最小ステップサイズ 50nm で自由度 5 の調整架台の上に置く。必要に応じて磁石が移動できるようにビームに対する各磁石の相対位置データは、磁石の中に挿入された BPM によって得られる。BDS 磁石の絶対磁界強度の許容誤差は厳しく、最も厳しいもので数十 ppm の安定性のある電源を必要とするが、ほとんどの他の磁石の許容誤差はそこまでは厳しくない。磁石の温度変化は強度及び位置の変動につながるため、トンネル内の周囲温度は約 0.5°C、冷却水は 0.1°C 以内の相対温度に制御しなければならない。

### (2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態

#### ①ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善

特に記述無し

#### ②最新開発・製造実態<KEK>

ILC メインライナック用 (クライオモジュール用) の超伝導 4 極磁石は、日本・米国において開発済みである。また、BDS 用の超伝導磁石は米国で開発済みである。

### (3) 超伝導磁石の評価と技術的課題

CERN の LHC の経験や実績を通して、ILC 向けの超伝導磁石技術は基本的に確立済である。なお、支持機構および冷媒からの微弱振動が磁場精度に与える影響の検証が技術的な課題として挙げられている。また、超伝導磁石の量産化の製造面での課題として、品質管理が挙げられている。<KEK>

## 5. インフラ土木技術

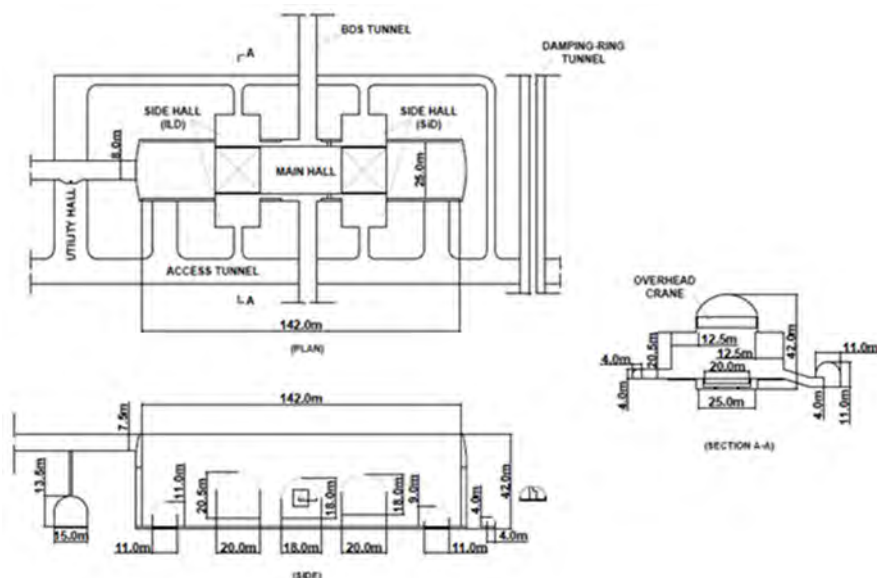
### 1) 実験空洞へのアクセス方法変更 (立坑アクセスへ)

#### (1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要

TDR ベースラインでは、衝突点空洞 (IR : Interaction-Region Hall) は、地下深くに建設され、検出器のパーツをアクセストンネル (AT) から IR ホールに搬入し、検出器を組立てる設計になっている。

IR ホールは、検出器 2 台を組立てる十分な場所だけでなく、ビームラインに据え付ける検出器の稼働用の場所も有するメインホール (長さ 142m、幅 25m、高さ 42m) により構成される。両側にはいくつかの作業場所があり、さらに出口用トンネルループがある。DR 機器を含む中央域ビームライン機器すべて、及び検出器構成部品はこの IR ホールアクセストンネルから搬入される。

図表 II-89 ILC の衝突点空洞の構造



(出典) TDR

#### (2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態

##### ① ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善

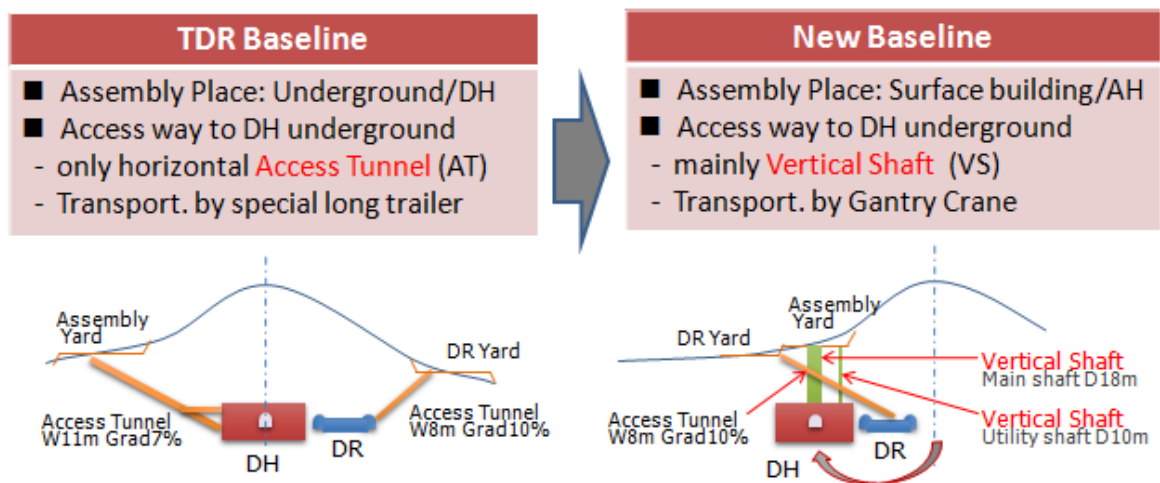
###### < 4. 地質調査及び土木工学調査 >

TDR に記した山間地での設計からの大きな変更点の一つに、加速器と測定器を設置する実験空洞へのアクセス方法が挙げられる。当初の設計では実験空洞は地下深くに作られることになっており、長いトンネルを通らなければアクセスできなかった。ILC の建設場所を最適化することにより、地表にずっと近い場所に実験空洞を設けることが可能となり、主要アクセスを CERN の ATLAS 検出器や CMS 検出器と類似した立坑に変更

することができた。

この変更案に対し厳密な変更管理プロセスが承認前に実施され、変更により生じる得る様々な影響が最終決定前に文書に記録された。この新しい設計は、ATLAS 実験や CMS 実験の経験からも推奨され、当初の設計と比べてコスト中立的である。実験ホールの新しい区域に対する地質調査が、同様に東北大学や岩手県からの支援を受けて今後継続される予定である。

図表 II-90 衝突実験空洞へのアクセス方法の変更（立坑アクセスへ）



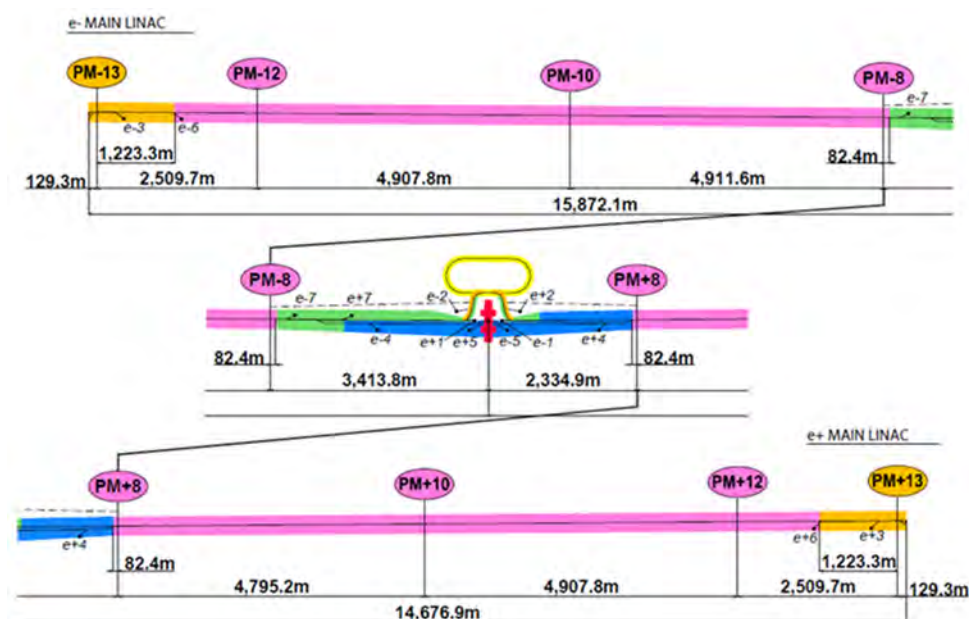
(出典) KEK 訪問ヒアリング時入手資料

## 2) 主線形加速器 (ML) トンネルの延長

### (1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要

ILC の全体的なサイトレイアウトは、次のとおりとなっている。

図表 II-91 ILC の主線形加速器 (ML) のレイアウト



(出典) TDR

### (2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態

#### ① ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善

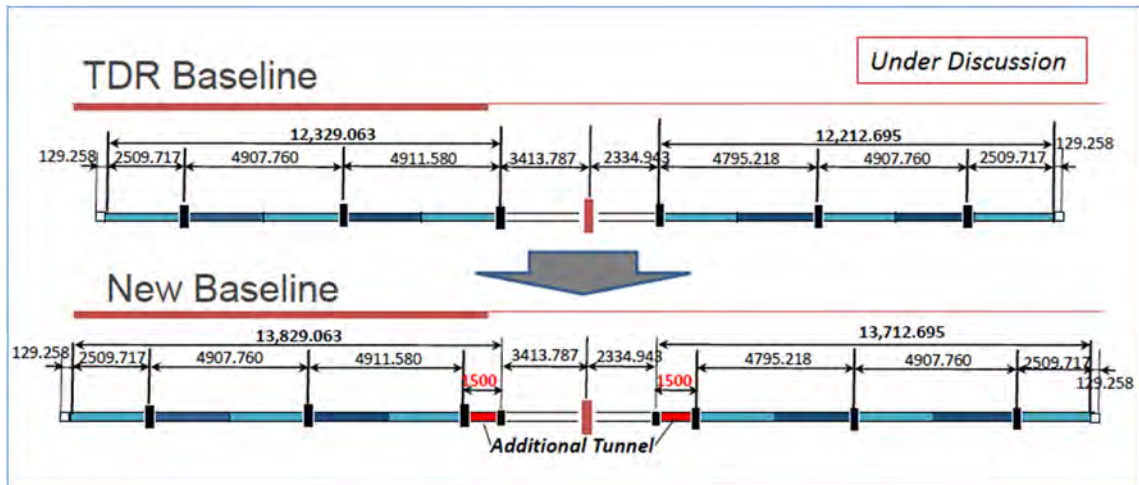
##### < 4. 地質調査及び土木工学調査 >

変更管理手続きの対象となる 2 つ目の重要な変更は、主線形加速器トンネルを電子側、陽電子側両方とも約 1.5km 延長することを要請したことである。その理由は 2 つある。一つ目は、衝突点で陽電子が電子と衝突するようにするために必要なタイミング制約に合わせ、ビームラインの全長を調整することである。

二つ目の理由は、必要な加速勾配である 31.5MV/m に達することが加速空洞製造期間全体を通して不可能な場合でも、最低限の費用でさらに多くのクライオモジュールを設置し設計エネルギーである 500GeV での ILC 運用が可能となるよう、十分な余地を確保することである。



図表 II-92 主線形加速器（メインライナック）トンネルの延長



(出典) KEK 訪問ヒアリング時入手資料

### (3) 主線形加速器（ML）トンネル（ML）延長の評価と技術的課題

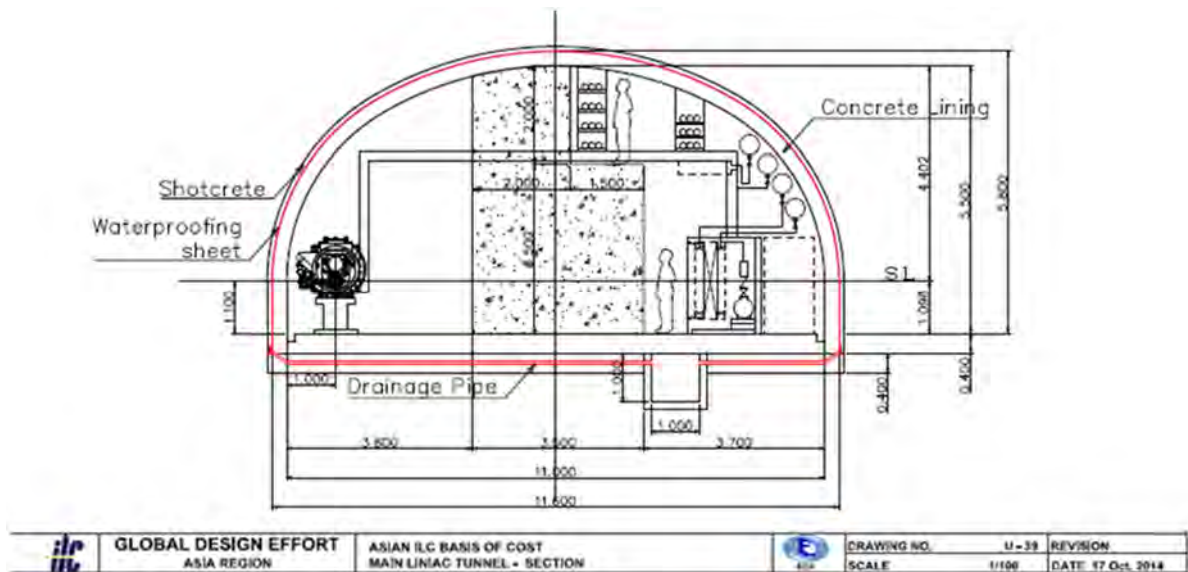
主線形加速器（ML）トンネルの 3km の延長（電子側 1.5km、陽電子側 1.5km）については、単なる長さの延長であり、トンネルの工法等の技術的変更を伴うものではないため、トンネル工法（後述）に問題がない限り、技術的な課題はないと判断される。＜KEK＞

### 3) 主線形加速器 (ML) トンネル内の遮蔽壁の厚さ変更

#### (1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要

TDR では、主線形加速器 (ML: メインライナック) トンネルでは、ビーム稼働中を含め、サービストンネルに常に人員の立ち入りが必要となる想定され、そのため、サービストンネルと加速器を分離する非常に厚い (3.5m) 遮蔽壁が想定されている。

図表 II-93 TDR ベースラインに準じた ILC トンネル断面図



(出典) KEK より入手資料

#### (2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態

##### ① ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善

###### <4. 地質調査および土木工学調査>

トンネル設計上の別の変更が検討されている。当初の設計では、ビーム稼働中を含め、サービストンネルに常に人員の立ち入りが必要となる想定となっていた。そのため、サービストンネルと加速器を分離する非常に厚い (3.5m) 遮蔽壁が含まれていた。ビーム稼働中に全面的な出入りを可能にするという要件があれば便利にはなるが、他の加速器ではそのような必要性はこれまで一度もなかった。例えば、LHC では、ビーム稼働中の立ち入りは禁止されている。

装置の信頼性が大きく向上した現在、ILC についてもこの要件は削除可能となるだろう。人員の立ち入りが必要となるような加速空洞の調整などのハードウェアの試運転の際に必要な X 線遮蔽のみを確保すればよく、遮蔽壁を大幅に薄くすることが可能である。これによりトンネルの断面を小さくしてコスト低減ができる。変更管理手続きにおいて全面的に承認されれば、この変更がベースライン設計に反映される。

## ②最新開発・製造実態<KEK>

中央隔壁の厚さの変更が、技術的検討課題となっており、2.5mや1.5m案が検討されている。壁厚は放射線の多数のパラメータによって決まってくるため、ワークショップでは放射線の専門家を交え、さらに詳細に検討される予定である。

最新時点では、中央隔壁の壁厚を1.5mにすることが有力視されている。壁厚を2.5mや1.5mに変更することによって、TDRでは62.7㎡であったMLトンネルの掘削断面積は、57.2㎡～51.9㎡に減少し、大幅なコストダウン（2割程度削減）が達成できると試算されている。このコストダウンの金額のおよそ半分ぐらいのコストでMLトンネルの延伸（3km）ができると見積もられており、差し引きするとILC全体としては計画変更によってコストダウンが可能になるとされている。

図表 II-94 主線形加速器（ML）トンネル内の遮蔽壁の厚さ変更（薄壁化）の代案

	Baseline SW3.5m	Option-1 SW2.5m	Option-2 SW1.5m
Cross Section	<p>Original B/T 62.73m<sup>2</sup> 11.0</p>	<p>Revised 10m x 5.5m 57.24m<sup>2</sup> 10.0</p>	<p>Revised 9m x 5.5m 51.92m<sup>2</sup> 9.0</p>
Cross Section	W11m x H5.5m 62.7 m <sup>2</sup>	W10m x H5.5m 57.2 m <sup>2</sup>	W9m x H5.5m 51.9 m <sup>2</sup>

(出典) KEK 訪問ヒアリング時入手資料

### (3) MLトンネル内の遮蔽壁の厚さ変更の評価と技術的課題

#### 【TDR（技術設計報告書）ベースラインへの課題の指摘】

加速器トンネル内の遮蔽壁に関するTDRのベースラインに対して、次のような課題が指摘されていた。

■ILC 運転時に加速器の維持管理のため作業員がトンネル内の保守通路にアクセスできる構造となっており、プラント事故やヘリウムガス漏れ等の重大事故発生時にトンネル内の作業員の十分な避難時間の確保が難しいなどの問題が発生する。

■ILC のトンネルの中に設置する放射線遮断のための壁（3.5m）については、運転中に人が入ることを断念し、厚さを薄くすればコストがより安くなると考えられる。

こうした指摘を念頭に置き、トンネル内遮蔽壁の評価と技術的課題についてヒアリングを実施し、その結果を取りまとめると以下のとおりである。

### ①遮蔽壁の厚さ変更（薄壁化）の評価と技術的課題<KEK>

現在、ILC の PR（進捗報告書）では、ML トンネル内へのビーム稼働中の立ち入りを禁止し、遮蔽壁の厚さを 3.5m (TDR) から 1.5m 程度に変更する方向で検討されており、それらが実現すれば、上記の TDR ベースラインに対する課題は全て解消することになる。すなわち、ILC 運転時に加速器の維持管理のため作業者がトンネル内の保守通路に入ることはないため、プラント事故やヘリウムガス漏れ等の重大事故発生時には、トンネル内に作業員はいない。また、遮蔽壁の厚さを薄くすることによって、コスト低下が見込まれる。

したがって、上記の TDR ベースラインに対する指摘課題に対して、現変更計画案（遮蔽壁の薄壁化）は十分に対応できることになる。なお、ILC の運転停止中におけるヘリウムガス漏れ等の重大事故発生時に、トンネル内作業員に十分な避難時間が確保されるかについては、TDR 作成時に避難シミュレーションを含む検討作業が実施済みとなっている。<検討結果の詳細は、本報告書の「7) ILC トンネルにおける事故対策想定と技術的課題」に記載>

#### 4) BDS トンネルの形状・断面の見直し

##### (1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要

TDR では、BDS トンネルは、サービストンネルと BDS ビームトンネルの 2 本に分けて計画されている。

##### (2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態

###### ① ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善

特に記述無し

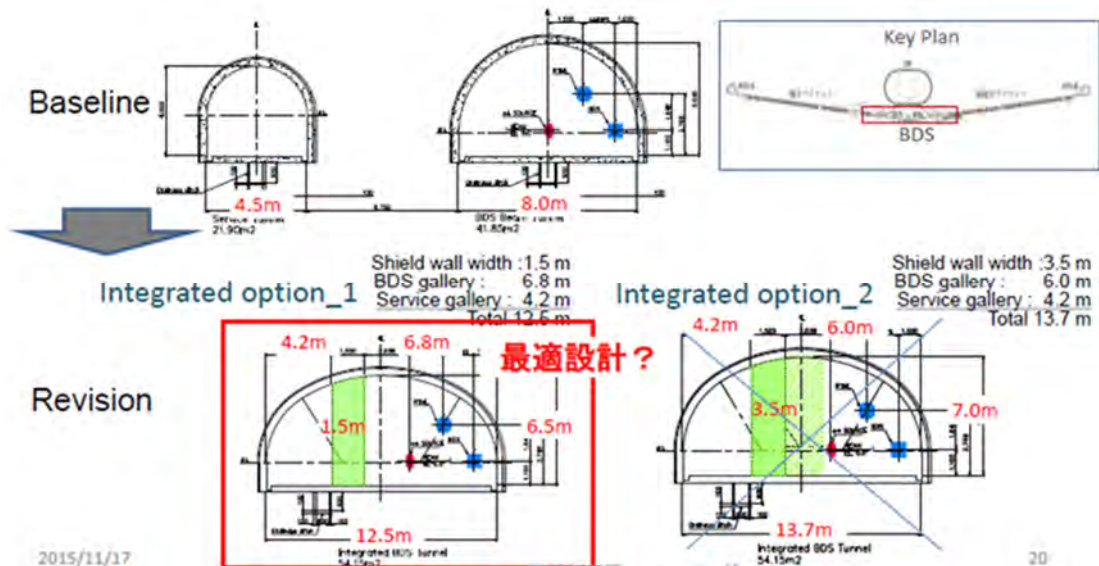
###### ② 最新開発・製造実態

最新の状況では、BDS5.5 km 区間のレイアウトをツイントンネルからシングルトンネルへ変更することが、KEK を中心に検討されており、LCC 内に設置されている施設・サイト計画のワークショップ (CFS) においてもそれを踏まえて議論されている。

##### (3) BDS トンネルの形状・断面の見直しの評価と技術的課題

ML トンネルと同様に厚さ 1.5m の中央遮蔽壁を前提に、BDS の区間をシングルトンネル化するとどうなる断面になり、どれくらいのコストになるかが検討の課題である。

図表 II-95 BDS トンネルのシングル化の途中検討図



(出典) KEK 訪問ヒアリング時入手資料

## 5) ILC トンネルの建設・工法の技術的課題

### (1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要

ILC の主線形加速器 (ML) トンネルは幅 11.0m、高さが 5.5m あり NATM (New Austrian Tunneling Method) で掘削する。建設後、中央のコンクリート壁により平行した 2 つの坑道に分ける。アクセストンネルも NATM で掘削するが、厚さ 10m~20m の地表層を貫通する箇所は NATM では掘削せず、鉄筋補強が必要である。IR ホールは上から下へ掘削する。アクセストンネルに接続する頂設部からベンチカット工法で掘り始め、掘削が進んだ後に、地下空洞壁にロックボルトで補強する。

### (2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態

#### ① ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善

特に記述無し

#### ② 最新開発・製造実態 <KEK、土木専門家>

最新の ILC 山岳トンネル工法は、NATM 工法 (ナトム: New Austrian Tunneling Method) <sup>1</sup> が想定されている。

NATM 工法では、まず花崗岩の岩盤の中を発破掘削でくり貫いて空洞をつくり、鋼製支保工を立て、吹付けコンクリート (基本設計では、10cm 厚さ) を施工する。次に、吹付けコンクリート面からトンネルの半径方向に地山を削孔し、モルタル固定方式のロックボルト (鉄筋棒) を挿入する。これらの鋼製支保工と吹付けコンクリートとロックボルトを一次支保部材と呼び、その有無、大きさ、厚さ、長さなどは、掘削される地質の安定性や健全性によって決められることになる。

一次支保部材を施工した後に、その内側に防水シートを設置する。その後、二次覆工コンクリート (ライニングコンクリートともいう) が打設される。二次覆工コンクリートと呼ぶ) の厚さは、30cm である。この 30cm という厚さは、高速道路や新幹線のトンネルを始めとして、一般的な厚さである。最後に床版コンクリートを打設する。

山岳トンネルの掘削方法には、NATM 以外にも「矢板工法」、「TBM (Tunnel Boring Machine)」などがあるが、大断面の掘削可能な NATM 工法が、近年、日本の標準的なトンネル工法となっている。

---

<sup>1</sup> NATM は昭和 50 年代になって本格的に日本に入ってきた。例えば、青函トンネルは当初は矢板工法で施工されていたが、途中から NATM の施工方法が採用されるようになった。

図表 II-96 ILC 山岳トンネルで想定されている NATM 工法の概要

### NATM工法 ① 掘削



### NATM工法 ② ずり出し



### NATM工法 ③ 吹付け・支保



### NATM工法 ④ 防水・鉄筋



### NATM工法 ⑤ 覆工コンクリート

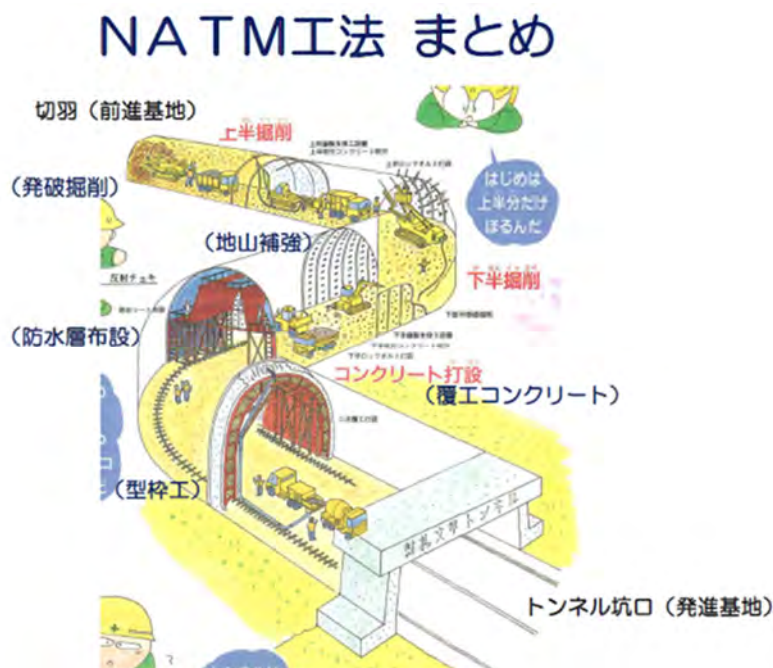


### NATM工法 覆工コンクリート完了



(出典)「山岳トンネルの施工概要」KEK

図表 II-97 ILC 山岳トンネルで想定されている NATM 工法の概要 (まとめ)



(出典)「山岳トンネルの施工概要」KEK

### (3) ILC トンネルの建設・工法の評価と技術的課題

#### 【TDR (技術設計報告書) ベースラインへの課題の指摘】

ILC のトンネルに関する TDR のベースラインに対して、次のような課題が指摘されていた。

- ILC 施設特有の要件に応じた基準等 (例えば、施工精度等)、大断面トンネルや大規模地下空洞の支保工の設計方法、トンネルや地下空洞を掘削している際の管理基準などについては、ILC 建設工事の課題として検討が必要である。

こうした指摘を念頭に置き、KEK、トンネル土木専門家、建設事業者への ILC トンネルの建設・工法の評価と技術的課題についてヒアリングを実施し、その結果を取りまとめると以下のとおりである。

#### ① ILC トンネル建設のマネジメントの評価と技術的課題<土木専門家、建設事業者>

##### a) インハウス・エンジニアの組織化

ILC の大型地下空間建設計画の問題として、インハウスのエンジニアがいないことが挙げられる。ILC の地下空間の設計思想を決め、関係者をまとめていくためには、インハウスのエンジニアの組織化が必要である。特に、地下空間構築に関する CM (コンストラクション・マネジメント) を実施できる専門家が人材として不可欠である。

ILC のような大規模プロジェクトであれば、現段階でも、インハウス・エンジニアが 20~30 人は必要である。その構成は、契約、地質、土木、設備等の各分野の専門家



が想定される。

#### b) 建設のルールづくり

ILC の地下空間建設において早期に検討が必要なのは、建設方法と建設契約方式である。特に重要なのは、地下空洞建設時に遭遇する地質変化や湧水に関連するリスクを誰が取るのかのルールを決めることである。例えば、事前に予想ができず、工事に重大な影響を及ぼすような地質が出た場合の対策費用を発注側と受注側とでどのように負担するのかなどの（契約に織込む）ルールづくりである。

#### c) 情報化施工の導入

トンネル工事は、土木分野の中でも特殊な工事である。トンネル掘削時に遭遇する地質や湧水の状況は、地上から実施する事前調査や試験では十分に把握しきれず、遭遇する時点で検討することになる。こうした対応手法は、「情報化施工」と呼ばれる。この手法では、当初設計をタイムリーに、上手く、経済的な方法で変更することが重要となる。特に、地下構造物の建設では、情報化施工が不可欠である。

情報化施工では、計画・調査、設計・解析、施工、計測のプロセスを順に実施するのではなく、PDCA サイクルを、さらに大掛かりに捉え、全体サイクルとして大きく繰り返しながら進めていくことになる。このため、建設費は、事前見積がかなり難しく、施工中にインハウス・エンジニアが、掘削作業を担当する施工業者の要求や情報を専門的見地から見極め、コントロールしていくことが重要となる。

#### d) 環境アセスメントの長期化の回避

ILC の建設工事は環境への影響が多岐に渡るため、環境アセスメントの長期化が予想されるが、工事着工の遅れが生じないように適切な環境アセスを実施していくことが求められる。その適切な実施に当っては、誰（監督官庁、住民等）に対して何をどのように説明するのかを事前に想定して、説明に必要な環境アセスを行なうことが重要である。そのためには、インハウスのエンジニアが、建設工事や研究施設の全体計画が周辺環境に与える影響を入念に検討し、環境アセスの計画立案と実施を行なっていくことが重要である。

#### e) 工事準備期間の不足

ILC・TDR では、ILC 建設のゴーサインが出てからの準備期間は 4 年ということになっているが、これはかなり短い。トンネル及び大空洞の調査、試験、計画期間（基本設計・詳細設計）、横坑試験、さらに平行して地権者との交渉や環境アセスメントの準備の期間を含めて考えると、4 年という準備期間では足りないことが懸念される。

例えば、ILC 建設予定地である北上において良好だといわれている花崗岩盤について、現時点での工期が、適切か否かを判断するための調査が不足している。また、大空洞についても、基本的な調査とそれに基づく計画を作り、調査横坑と原位置試験を行って約 1 年かけて評価し、詳細設計を固めるのには GO サインが出てから 4 年という準備期間は短いと現時点では判断される。

#### f) 土木工事と加速器設置工事の期間輻輳問題への対応

ILC では、着工から運転開始まで 9 年間において、土木工事期間と加速器等の設置工事期間に輻輳（ふくそう）作業が発生すると予想される。トンネルの掘削の完了後に機器が搬入されることになるが、これらを完全に分離する工程を組む場合、全 9 年では完了しない可能性がある。想定工事期間で、トンネル工事と機器据付工事の輻輳作業を回避できるかは個別の具体的検討が必要であり、土木と加速器の関係者がきちんと議論することが必要である。

### ②ILC トンネル建設工事の評価と技術的課題<KEK、土木専門家、建設事業者>

#### a) トンネル工事の NATM 工法は妥当

ILC のトンネルで想定されている NATM 工法は、地質対応等に柔軟に対応できるという点で有効である。岩盤が良好であるならば、TBM（トンネルボーリングマシン）のほうが、NATM より工期は短縮されるが、地山が悪いところでは TBM が止まり、工期の延びる可能性があるため、リスクヘッジの意味でも NATM は掘削方法に柔軟性があり妥当である。

#### b) トンネル全体の強度は確保

山岳トンネルの特徴は、岩盤の強度でトンネルが支えられるという構造を持つことである。岩盤が元々持っていた強度が、くり貫かれた後も維持されるという特性を活用している。周辺の岩盤の強度がトンネル空間を安定させるということであり、例えば KEK の現在の加速器トンネルとは構造が全く違っている。KEK のトンネルは土を掘削し、1 m 程度の厚さのコンクリート構造物を埋めて土を被せており、コンクリートそれ自体がトンネルの強度を決める構造体となっている。

したがって、ILC 山岳トンネルの覆工コンクリートは、トンネルの構造体とは関係無く、厚さが薄くても問題ない。なお、北上では、花崗岩岩盤の上に土が堆積しているが、トンネルは土の層に接することはない。花崗岩岩盤が安定しているレベル（強度が維持されくり貫くことが可能な位置）に ILC のトンネルつくることが計画の前提となっている。

#### c) 地下大空洞（検出器ホール）の工事に係る問題<土木専門家>

ILC では検出器ホール（DH）の大空洞掘削に課題がある。空洞周辺の花崗岩は硬質であり、掘削後の空洞の安定性は高い。しかし、発達している割れ目や不連続面は、生成過程の状況によっては開口していたり、脆弱であったりする（一部の積み木ブロックを抜くと積み木が崩れるというイメージ）。現場では、空洞掘削中に岩盤ブロックが割れ目に沿って大きく抜け落ちるといった現象につながるようになる。花崗岩を掘削してつくる DH は大空洞となるため、トンネル部とは違った岩盤空洞特有の調査と設計が必要となる。

ILC の北上サイトでは、実際の地下空洞のサイズや形状、吹付けコンクリートの厚さや補強、ロックボルトの長さなどを決めたりする岩盤空洞の設計などの視点からの

調査はほとんど実施されていない。今後、施工計画や工事費の見積りの精度を高めるためにも、地下空間の施工方法や設計方法の方針を策定し、その方針に沿って実施する詳細設計に必要な地質調査や試験を実施する必要がある。

さらに、大空洞について、通常は断層・破碎帯や初期応力の情報無しに詳細設計は確定できないが、期間が短いため初期応力の調査等が十分にできないのではないかと懸念がある。ただし、ILC の場合、トンネルの向きや大空洞の位置がほぼ決まっているため、横坑調査で初期応力がわかっていても大空洞の向きを変更できないため、設計対応せざるを得ない。

## 6) ILC トンネルにおける湧水及び温湿度の管理の想定と技術的課題

### (1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要

#### ①上下水道設備

厚いトンネルライニングの外側の流入水は、各アクセスホールにあるタンクに集められる。トンネル内に漏れる水は間隔を置いて配置されている縦坑に集めてポンプでアクセスホールにあるタンクに送られる。水は放射能の有無をモニターし、有る場合は汚物集合タンクに保存する。放射能がない場合は、水は流入水と一緒にポンプで地上に送られる。水の一部は、砂で濾過して冷却塔の補給水として使用する。

#### ②換気空調設備

新鮮な空気は地上にある空調設備で処理される。空気は夏には冷却除湿、冬は加温してアクセストンネル内に設置された大口径ダクトにより地下構造物に送られる。ダクトの無いトンネル内では空気は流速約 0.5 m/s で送風される。そのトンネル内の温度は 29℃、湿度は 35%である。作業用トンネルは冷水を使いファンコイルユニットで冷却される。その空気は地上に排気される。大気圧はダクト内のダンパーで調節して作業用トンネル内の気圧をビームトンネル内より僅かに高める。

### (2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態

#### ①ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善

特に記述無し

#### ②最新開発・製造実態 (最新の処理方法等)

##### a) ILC トンネルの地下水の処理方法 <KEK、土木専門家>

ILC のトンネルは、地下深く (最大 500m 強の土被り) に建設され、そこには地下水 (湧水) がある。トンネル内に流れ込まないように湧水を止めようとする、大きな水圧 (最大、高さ 500m 分の静水圧) が作用することになり、二次覆工 (コンクリート) と防水シートでは全く抵抗できない。

ILC では、トンネルの二次覆工背面に防水シートが設置され、湧水がトンネル内部空間に流れ込まないように導水処置が施される。この防水シートの背面に流れる湧水は、覆工コンクリートの脚部背面に設置されるドレーン (導水溝) に、一旦、集められ、その後、トンネルの底盤コンクリートの下側に設置される中央排水溝を通じて、坑外へ排水される。

##### b) ILC トンネルの管理排水の方法 <KEK、土木専門家>

トンネルの中で発生した湧水とトンネルの外側の湧水は、完全に分離される構造になっている。また、ビームの放射線によってトンネルの外側の水が放射能汚染されることの無いように、トンネルのコンクリート厚は決まっている。

### c) ILC トンネルの温度・湿度管理の方法 <KEK、土木専門家>

ILC のトンネル内は別の空調システム（ファンコイルユニット）により、一定の温度・湿度に保たれるように計画されている。目標設定室温は 25℃、湿度については管理上の困難さがあるが 40～60%程度に維持することが想定されている。

設置される発熱機器の冷却については、加速器の発熱はクライオジェニクス（液体ヘリウム）で抑える。磁石やクライストロンの電源等の発熱機器は、基本的には水冷で冷却する。

## (3) ILC トンネルの湧水及び温湿度管理技術の評価と課題

### 【TDR（技術設計報告書）ベースラインへの課題の指摘】

ILC の山岳トンネルの水管理に関する TDR のベースラインに対して、次のような指摘がなされている。

■ILC 施設運用時に発生する地下水は、そのほとんどは、地下実験空洞を含めたトンネル群に発生する恒常湧水である。従来のトンネル工事においては、恒常湧水は基本的には地下水そのものであることから特別な対応が取られていない場合も多い。しかし、ILC では加速器実験時に発生する放射線による地下水への影響を考慮する必要があり、放射線管理区域の覆工防水工が重要となる。

■ILC では、ビームトンネルや衝突実験ホールなどの放射性管理区域となる領域の覆工防水工に関しては、従来の交通トンネルと異なり、より確実な防水機能を維持できる方式の採用が必要とされる。

こうした課題を念頭に置き、KEK、トンネル土木専門家、建設事業者への ILC トンネルの建設・工法の評価と技術的課題についてヒアリングを実施し、その結果を取りまとめると以下のとおりである。

### ①トンネル地下水の処理方法の評価と技術的課題<土木専門家、建設事業者、KEK>

#### a) 地下水の処理方法

地下水については、「トンネルが地下の深部にあるというイメージから、トンネルが水に囲まれ高い水圧がトンネルにかかり、トンネル内のドライな環境を保つことが難しい」という疑問が出される場合が多い。この点について、まず、山岳トンネルに対する大きな誤解がある。山岳トンネルの設計の基本思想は、トンネル外の水を敵対視するのではなく、トンネルの外で排水をして水圧を抜いていくというものである。

こうした思想のもとに、ILC のトンネル構造物では、「坑内水を坑外に導水する」という設計の考え方で設計・施工されることになる。すなわち、周辺地山からの湧水は、覆工や底盤の背面に設置されたドレーンや排水溝を通じて、ILC トンネルの内部に流れ込むことなく、直接、坑外に排水されることになる。したがって、トンネル空間の内部では、湧水はほとんどないと推測される。

また、トンネル内への湧水は、トンネルの掘削時に最大値を示すことになるが、事前にスムーズに坑内水を坑外へ排水する仕組みを計画して、有効的な対応策（貯水ピ

ットとポンプ設置など)をタイムリーに実施することが重要である。その際に、貯水ピットにつながるトンネルの中央排水路は、できる限り水が自然に流れるぐらいの勾配をつける必要がある。しかし、本トンネルはジオイドに沿って施工されるので、勾配のついた導水工との間に高低差が生じることになる。それをどう処理するかが課題である。例えば、途中でポンプアップして流すような対処方法が考えられる。

総合的に判断すると、トンネルの地下水(湧水)は完全に管理できると考えて問題はない。ただし、山岳トンネルは「掘ってみなければ何が起こるかわからない」ともいわれており、地下水量等を前もって予測することは困難な側面もある。しかし、突発的な多量湧水に遭遇した場合でも、トンネル掘削中の対応を含めて経験豊富な技術者の臨機応変な判断によって、タイムリーで適切な対応が出来れば十分に処理・管理できる。また、トンネル供用時の水処理も容易になる。

#### b) 施工中の多量の湧水処理方法

一方で、ILCのトンネル施工が予定されている花崗岩類は、その生成過程で岩盤内部にひび割れ(クラック)が発生し易く、そこに地下水が貯まり易い。その地下水が貯まった割れ目や弱層をトンネル掘削する場合、多量の湧水に遭遇することになる。

六甲トンネルを含めて過去の施工経験から、垂直の割れ目が卓越した花崗岩や貫入岩(ひん岩)を掘削する場合、ILCトンネル掘削中に、多量の突発湧水が発生する可能性が高いと推定されている。ただし、この湧水の量は、工事の時に最大値を示すが、その後、徐々に減少していくことになる。

北上サイトのILCのトンネルは、青函トンネルと同じように、掘削中に遭遇するであろう多量の湧水をうまく排水できないと、トンネル全体が水没するような構造形式になっている。したがって、湧水を施工中(施工後も含めて)にどう処理するかが大きな課題である。例えば、遭遇する地下水を掘削工事に悪い影響を与えないようにいかに減少させるか(水抜きボーリング等)、有効かつ経済的な排水施設(ポンプアップ施設等)をいかに計画するかなどは重要な技術的な課題に挙げられる。

一方、トンネル内部に湧水が流出しないように、二次覆工の背面に設置される防水シートには、当初は大きな水圧が作用しないように計画されている。しかし、永年的な導水溝の目詰まりによる作用水圧の増加や二次覆工打設時のシートの緊張などによって、シート同士の溶着部分や背面の一次支保との固定点などに応力集中が発生し、漏水の原因となる可能性は残されている。このため、シートの内側に打設される二次覆工の打設継ぎ目には止水板などを施工して、トンネル内部への湧水が少なくなるような対策が必要となる。湧水対策としては、先行ボーリング調査を実施して、事前に湧水箇所を探り、グラウト注入(止水剤を注入すること)などの可能性の検討をすることも必要である。

#### c) 管理排水の方法

防水対策を十分講じたとしても、トンネルの二次覆工コンクリートのひび割れやコールドジョイント等から発生する微量の湧水を避けることはできない。これがトンネル内の管理水となる。現時点で、ILCトンネル内の管理水の発生量を正確に算定する

ことは難しいが、万一、トンネル施工後に流れるほどの湧水が発生するようであれば、側溝、導水パイプ、貯水槽を設置して、集水して処理（モニター管理）する。一方、湧水が滴る程度であれば、トンネル内に屋根や滴水皿を設置して精密実験装置に水滴が掛からないようにする、あるいは自然蒸発させるなどで対処できる。

ILC 運転時のビームの放射線による地下水汚染の可能性については、水の放射化を防ぐためには、コンクリート厚が 30cm あれば十分に汚染は防げると言われており、ILC の二次覆工コンクリートの背面の湧水が放射化されることはないと考えられている。しかし、防水シートの外側の水を清水として扱うためには、トンネル壁のコンクリートの厚みが放射化を防ぐのに十分かの再検討が必要である。

十分なコンクリート厚があれば、トンネルの外側の湧水はそのまま地上にポンプアップして河川に放流しても安全である。ただし、防水シートの外側の水で清水であっても、河川に放流するのであれば、地元住民からはモニタリングへの要望が出てくると想定され、きちんとした対応が必要である。

## ②トンネル内の温度管理の評価と技術的課題<土木専門家、建設事業者>

ILC トンネルの目標設定室温は 25℃程度である（KEK の見解）。空気が流入するトンネルであれば、流入する外気温に影響を受ける。しかし、外気を遮断すると、トンネルの深度や周辺岩盤の地熱温度などにも影響を受けることになるが、トンネル内の気温は、目安値としては外気の年平均気温と同じぐらいで一定になると考えて良い（経験則による）。トンネル内で発生する熱量がわかれば、温度は熱等量や熱伝導などの関係式から概略計算できる。このように、まずは ILC トンネル内の温度推計を行なうことが課題である。

## ③トンネル内の湿度管理の評価と技術的課題<土木専門家、建設事業者>

ILC トンネル内の湿度は、40～60%程度に維持することが想定されているが（KEK の見解）、コンクリートが湿っているため、無対策の場合 80～90%程度になる。

しかし、通常の管理設備で対応すれば制御可能である。コンクリートの割れ目から水が染み出るようなことがあれば防水対策を完璧にしなければならないが、空調をきちんと行えば、トンネル内が水浸し状態になるようなことはない。密閉せず空気を流すことによって、トンネルの内部は結露するか乾燥する。平均気温が 15 度のトンネルに暖かい空気が入るとトンネル内は結露し、湿度は 80%位になる。逆に、外気が冷たければトンネル内は乾燥する。

結露については、トンネル二次覆工の内表面に結露の可能性はある。外気と接する区間では、水分を含んだ空気が、急に冷やされると、二次覆工の表面などに水滴がつくことになる。

## 7) ILC トンネルにおける事故対策想定と技術的課題

### (1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要

#### <安全対策：火事>

ILC 地下トンネルにおいて最も重要なことは、火災が発生したときの安全な避難場所である。しかし、アクセスホールを経由して地上に到達するまでの距離は 5~6 km にもなる可能性があり、別の退避ルートが必要になる。2本の坑道を接続する ML 沿いの 500m 毎にあるアクセス通路がこの役目を果たし、これによって他の坑道を避難ルートにすることができる。トンネルから退避して地上に達するためにはアクセスホールおよび 5km 毎のアクセストンネルを経由する。急いで出口に向かったとしても、地上に到達するまで最大 1 時間要する可能性がある。火災が検出された場合、アクセス通路の仕切りドアやダンパーは自動的に閉鎖され煙の避難ルートへの流入を防ぐ。

2つの坑道は、それぞれ別々にアクセスホールから換気される。緊急時に煙をコントロールする別のシステムはない。主換気装置は火災発生時には自動的に排煙機能に切り替わる。加速器や実験装置が水によって損傷を受けることを避けるため消火用スプリンクラーは設置しない。ML トンネルに配備してある標準的な非常用装備は、煙感知器/火災感知器、火災警報装置、非常灯、出口誘導灯、避難誘導灯、消火器である。

#### <安全対策：ヘリウム>

ML トンネル内には大量の液体ヘリウムがあるので、いたる所に酸素欠乏モニターが必要になる。酸素濃度が許容濃度以下になると緊急措置がとられ、警報音が鳴る。主換気装置は非常モードに切り替わりトンネル上部からヘリウムガスはトンネル上部からアクセストンネル内の排気用立坑により外部に排出される。

### 【ILC の安全防災対策の補足説明】 <KEK>

日本案の ML (メインライナック) トンネルは、ビームラインのあるトンネル部と高周波機器のある RF サービスギャラリーが、中央の遮蔽壁で分離された構造になっている (次図断面図参照)。これをツイントンネルと呼んでいる。

このツイントンネルにおける防災・避難の基本的考え方は次のとおりである。

万が一、片側のトンネルで火災が発生したと想定すると、反対側のトンネル部が避難路となる。煙感知機が作動して、両トンネル間にある二重の防火扉が閉鎖される (当然ながら、避難には退避ドアとして使用)。火災区域からの避難が確認された後、排煙設備が稼働して煙を地上に放出する。煙は、アクセスホールからアクセストンネルの排煙ダクトを利用して地上に排出する。一方、避難路は新鮮空気を供給し、歩行若しくは電気自動車にて安全に非難する。

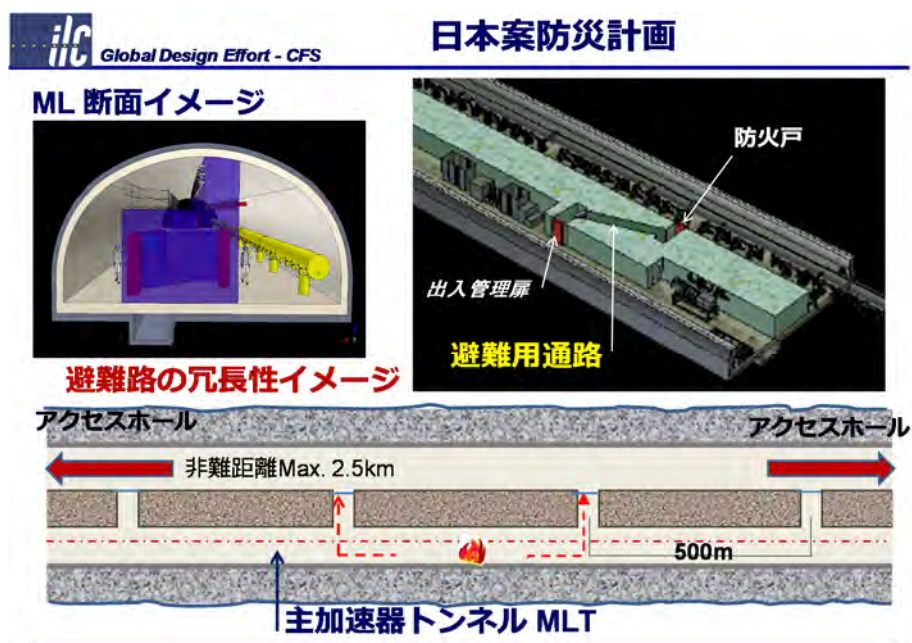
以上のように、日本で想定される ML トンネルの安全防災対策は、ツイントンネル構造になっていることを利用して、避難上の冗長性を確保する (非常時の退避がより確実・安全に行なえる) ことをベースにしている。

こうした安全防災対策は、TDR 時にかなり議論され、国際的にも共有されており、



また ILC の予算にも計上されている。なお、具体的な設計は、基本設計段階で実施することになる。

図表 II-98 ILC の ML トンネルの防災計画（日本案）



(出典) KEK 資料

(2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態

① ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善

特に記述無し

② 最新開発・製造実態 (最新の対応方法等)

a) ILC トンネル・大空洞の耐震設計 <KEK>

地下構造物は、一般に地震の被害を受け難いとされている。それは、地下と地表面での地震動による加速度記録を比較した結果、最大加速度が深度に応じて減衰するという観測事実によって裏付けられている。地震影響に関する土木構造物設計の考え方について、土木学会は、阪神・淡路大震災を受けて「耐震基準等基本問題検討会議」を設置し、地震防災性の向上に関する「土木構造物の耐震基準等に関する第二次提言」(1996年)を公表した。

また、2011年の東北地方太平洋沖地震は、土木構造物に対して大きな被害を及ぼしたが、トンネル等の地下構造物に関しては顕著な被害を受けたという報告はほとんど見られない。具体例では、北上山地の地下(花崗岩盤内)に設置された国立天文台・江刺地球潮汐観測施設(岩手県奥州市)の精密計測装置は、東日本大震災でもほとんど損傷を受けることなく、その後も観測活動が継続されている。

しかしながら、ILCは、全長30km以上の長大トンネル及び大規模地下空洞を利用

する国際的な最先端実験施設となることから、その耐震・安全性の確保には最大限の配慮が求められる。そのため、ILC 地下構造物の耐震設計に関しては、土木学会が「国際リニアコライダー施設（ILC）の土木工事に関するガイドライン」（2014年12月）の中で提案している「ILC 施設の具備すべき耐震性能」（案）に基づいて技術検討を進めている。

特に、検出器を設置する実験ホール空洞の耐震設計については、消防法規定による「地下石油備蓄基地」、ならびに高圧ガス保安法による「石油ガス国家備蓄基地」などの耐震設計指針に準拠しながら構造計画を進めている。

図表 II-99 ILC 施設が具備すべき耐震性能（案）

対象	地震動	性能レベル	適用及び備考
加速器 トンネル	L1 地震動	性能レベル I : 無補修で機能維持（注 1）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 加速器トンネル、アクセストンネル、その他のトンネルに適用</li> <li>・ 線状構造物であるトンネルの耐震は、坑口部、断層破砕帯や地質急変部、分岐部や断面変化部等において検討が必要</li> </ul>
	L2 地震動	性能レベル II : 早期に機能が回復（注 2）	
実験 ホール	L1 地震動	性能レベル I : 無補修で機能維持（注 1）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実験ホール、アクセスホールに適用</li> </ul>
	L2 地震動	性能レベル II : 早期に機能が回復（注 2）	

（注1） 内部の実験施設に影響を及ぼさないように、覆工からのコンクリートはく落を回避する。

（注2） 早期に機能が回復するように、覆工構造の不安定化、覆工からの大規模なコンクリートはく落を回避する。

参考：L1 地震動：使用期間中に 1～2 回発生すると考えられる地振動（弾性加速度；<0.5G 想定）

L2 地震動：大規模なプレート境界地震及び内陸直下型地震など、発生確率の極めて低い地震動（弾性加速度>1.0G 想定）

（出典） KEK 作成資料

#### 【耐震設計の補足見解】 <建設事業者>

土木学会のトンネル標準示方書によれば、良好な地山中に建設される地下施設は、原則として地震の影響を考慮する必要はないとされている。既往の地震動の計測結果によれば、地表に対して地下深部の地震動は半分以下になる観測結果が多くあり、したがって、通常のトンネルでは耐震設計せず、また、地下空洞のような構造物でも設計震度が小さい事例が多い。

海溝型巨大地震であった平成 23 年 3 月 11 日の東北太平洋沖地震の際には、北上地域でも大きな地震動が観測されたが、基本的にはトンネル等の地下構造物の地震被害は報告されていない。

内陸の直下型地震であった兵庫県南部地震や新潟県中越地震では、地表構造物では最大震度 7 程度の大きな被害を受けたが、トンネル等岩盤内の地下構造物については覆工の剥落等は生じたが大きなトンネル崩壊は発生しなかった。

### (3) ILC トンネルの事故対策の課題

#### ①閉鎖性・気密性に起因する問題 <土木専門家>

ILC の研究施設は、その閉鎖性・気密性によって安定した実験ができるという利点を考慮して、地下に建設されることになった。しかし、それによって出入り口が限定されることになり、火災、ヘリウムリーク、地震、雨水・地下水の浸水、停電などの事故発生に対してどう対応するかが大きな課題である。これらの事故対応については、かなり特殊な検討が必要である。例えば、地下構造物は、煙の処理の考え方など建築構造物と全く異なっており、それを踏まえた防災計画を設計する必要がある。

#### ②電源喪失時の対応課題 <建設事業者>

ILC のトンネルで電源喪失となった場合、排水ポンプ停止によるトンネル水没の可能性、火災発生やヘリウムリークの危険性などが増大する。特に、後者については、ポンプが動かなくなった場合、傾斜しているアクセストンネルからの水もすべて加速器トンネルに流れ込むことになる。電源が止まった場合でも水没しないよう地形が許すところに排水トンネルを作るなど、自然の力を使った排水の仕組みも必要である。

#### ③火災（煙）への対応の課題 <土木専門家>

火災時のトンネル内の煙のコントロールは難しい。通常の建物物では煙は上方に上がるため、垂れ壁を天井に設置すれば、上がった煙が広がらないとしている。しかし、トンネル内では、上がった煙は、天井部を遠くまで走ることなく、煙の玉になってトンネル内に局部的に溜まると考えられる。トンネル内では熱をもった煙は、一度天井に上がるが、トンネルの二次覆工や周辺の岩盤（低温になっている）で冷やされてさがってくる。その状態の煙に一方向から空気を送っても、煙はその場でぐるぐる回るだけで、反対方向へ流れて行き難い。

このため、アクセストンネルから空気を送り、隣のアクセストンネル（5km 先）から煙を出そうとしても難しい。高速道路のトンネルでも、車の排気ガスを外に出すのに巨大なファンが必要であるだけでなく、延長が 1.5km 超えると片押し排気は難しいとされている。特に、熱を発する試験装置や機器が密集している ILC の ML トンネルでは、内側に溜まった煙を、片側からの簡易な送風により排煙することは難しい。

一方、現設計では煙をトンネル内の各ブロックで遮断するという考え方になっている。逃げてそのブロック内に人がいなければ良いが、(怪我をして倒れているなど) 人がその中にいる場合を想定して、別途、新鮮な空気を供給する装置が必要になる。対策としては、内部の人に供給する給気ダクトや煙を逃げさせる排気ダクトの設置などが考えられる。

以上のように、火災時の煙の制御・排出や新鮮な空気の供給に関しては、ILC トンネルの閉鎖性・気密性が最も大きな問題となる。5 km ずつのアクセストンネル以外にも、観測用のボーリングなどが活用できるのであれば、火災時だけでも駆動するような地上との給排気施設の可能性を検討すべきである。

#### ④ヘリウムリークへの対応課題 <土木専門家>

ヘリウムリークについては、ヘリウムは空気より軽く天井を走るので煙や空気よりもコントロールしやすい。排気用ダクトがあれば外に排気される。

#### ⑤耐震設計上の対応課題 <建設事業者>

良好な花崗岩盤中に建設される ILC 施設については、基本的には耐震設計等の検討は不要と考えられるが、有識者会議での中間とりまとめによれば適切な耐震設計とコスト検討等を詳細に行うこととされている。

この具体の検討を実施する場合には、地点を概略特定したうえで、入力地震動の適切な設定、解析評価手法の選定、評価基準の適切な設定等が課題となる。

地点が特定された後には、良好な岩盤中のトンネルに比べて地震影響リスクが大きいアクセストンネルの坑口部、及び、断層破碎帯や地質急変部等における影響評価が課題である。また、トンネルと空洞の交差部や立坑との交差部等の耐震設計等も課題である。

## 8) その他土木工事に関連する検討事項と技術的課題

### (1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要

特に記述無し

### (2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態

#### ① ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善

特に記述無し

#### ② 最新開発・製造実態 <KEK>

##### a) ILC-TOT によるアクセストンネルの最適ルート探索

KEK が CERN との連携で、イギリスの会社 (ARUP 社) に発注し、ILC のための独自の ILC-TOT (Tunnel Optimization Tool) というツール (プログラム) を開発してスタディしている。

これは、アクセストンネルの最少のコストでできる最適なルートを、加速器のロケーションと地上の地形・地質・インフラ情報等をパラメータとするシミュレーションによって探し出すというものである。

具体的には、アクセストンネルは平均勾配 9%以下でなければならないこと、アクセスのための幹線道路の近くでなければならないこと、あまり複雑な山岳地形ではないことなどの条件をインプットしてシミュレーションする。

##### b) ILC 関連機器の輸送ルートの検証

東北大学と岩手県は、衝突点の新たな地質調査を行った (2015 年度)。また、ILC の冷凍機は、LHC の冷凍機 (20kW) とほぼ同じサイズのものになる。この LHC の冷凍機を使って、実際に北上周辺の既存幹線道路を搬送し、物理的に輸送が可能か否かの実証実験を東北大学が中心となって行った。こうした具体的な検証も TDR ではほとんどなされなかったが、その後は進展している。

写真：冷凍機の搬送実証実験 (北上周辺)

Case Study: 20kw 冷凍機の搬送



(出典) KEK より入手

### III. 国内外研究機関・企業へのアンケート・ヒアリング調査結果

ILC の技術的実現可能性、ILC の加速器製作における技術的課題、ILC の加速器製作におけるコスト削減に向けた取組についての情報収集と知見の把握を目的として、欧米諸国及び日本の代表的研究機関（加速器科学）及び企業（加速器・関連製品）への訪問ヒアリング調査を行った。なお、訪問ヒアリングに先立って、アンケート調査票訪問先に送付し、収集する情報の量と質の向上を図った。

#### 1. アンケート・ヒアリング対象機関

アンケート調査及びヒアリング調査の対象研究機関、企業、訪問年月日は、以下のとおりである。

##### 【研究機関】

国名	機関名	訪問年月日
ドイツ	ドイツ電子シンクロトロン研究所 DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron)	2015年10月1日
スイス	欧州合同原子核研究機関 CERN (European Organization for Nuclear Research)	2015年9月30日
イタリア	国立原子核物理研究所-加速器・応用超伝導研究所 INFN-LASA (The Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Laboratorio Acceleratori e Superconductivita Applicat)	2015/9/29 (他の場所でヒアリング)
	国立原子核物理研究所-フラスカティ国立研究所 INFN-LNF (Laboratori Nazionali di Frascati)	2015年10月8日
フランス	CEA宇宙基礎科学研究所 CEA-IRFU (Institute of Research into the Fundamental Laws of the Universe)	2015年10月5日
	CNRS線形加速器研究所 CNRS-LAL (Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire)	2015年10月6日
英国	STFCデアズベリー研究所 STFC (Science and Technology Facilities Council) Daresbury Laboratory	2015年10月7日
米国	SLAC国立加速器研究所 SLAC National Accelerator Laboratory (SLAC)	2015年11月9日
	トーマス・ジェファソン国立加速器施設 Jefferson Lab (Thomas Jefferson National Accelerator Facility) (JLab)	2016年11月13日
	フェルミ国立加速器研究所 FNAL (Fermi National Accelerator Laboratory <Fermilab>)	2015年11月16日
日本	国立研究開発法人 理化学研究所 放射光科学総合研究センター RIKEN SPring-8 Center	2015年8月4日
	大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 KEK (High Energy Accelerator Research Organization)	2015年9月3日 2015年11月17日

【企業】

国名	企業名	訪問年月日
ドイツ	Babcock Noell GmbH	2015年9月28日
	RI Research Instruments GmbH	2015年10月2日
フランス	Alsyom	2015年10月5日
	Air Liquide	2015年10月5日
	Aperam	2015年10月5日
	Thales Electron Devices	2015年10月6日
イタリア	Ettore Zanon S.p.A.	2015年9月29日
米国	Advanced Energy Systems (AES)	2015年11月11日
	Communications & Power Industries(CPI), LLC	2015年11月12日
	C. F. Roark Welding & Engineering Co., Inc. (ROARK)	2015年11月17日
日本	三菱重工業株式会社	2015年11月26日
	株式会社地盤システム研究所	2015年12月9日
	日本高周波株式会社	2015年12月10日
	東芝電子管デバイス株式会社	2016年1月6日
	株式会社大林組、清水建設株式会社	2016年1月26日

## 2. アンケート・ヒアリング調査項目

アンケート調査及びヒアリング調査の項目（両者同一）は、以下のとおりである。

Q1. 回答の対象とする技術又は製造品（設備・機器・部品）	①回答の対象とする技術又は製造品（設備・機器・部品）について（選択肢より回答）
Q1. ILCの技術又は製造品（設備・機器・部品）の現状と課題	①ILCの技術又は製造品（設備・機器・部品）の現状と課題について a: 技術・製造品の性能検証試験の実施状況について b: ILCが求める要求性能に対する現在の達成状況、今後の見通しについて c: ILCが求める要求性能を達成するための主な技術的課題について
	②（調査先研究機関、企業における）技術の開発状況や特徴について（保有技術の状況と特徴、技術の処理能力等）
	③（調査先研究機関、企業における）製造・組立・性能試験の各ラインの現状について a: 対象ライン b: 処理能力 c: 主要工程（概略） d: 施設規模 e: 人員 f: 費用（概算）
	④（調査先研究機関、企業における）製造・組立・性能試験の各ラインの将来見通しについて a: 対象ライン b: 処理能力 c: 主要工程（概略） d: 施設規模 e: 人員 f: 費用（概算）
	⑤製造品及び各種コンポーネントを日本で集約し、結合する場合に予想される問題点とその対策について a: 「場所・輸送」に関わる問題について b: 「性能・品質」に関わる問題について c: 「規制・管理」に関わる問題について
Q3. ILCの製造品（設備・機器・部品）の量産化の課題と実現可能性	①ILCの製造品（設備・機器・部品）の量産化の課題について
	②ILCの製造品（設備・機器・部品）の量産化の実現可能性について a: 量産化手法のメニューについて b: 量産化手法の技術的な実現可能性・実現時期について c: 量産化手法の経済的な実現可能性について
Q4. ILCの製造品（設備・機器・部品）のコスト削減の課題と方策	①小型化や高性能化の点で、代替可能性のある技術又は製造品（設備・機器・部品）があるか
	②代替可能な技術又は製造品がある場合： a: 技術開発の主体 b: 技術開発の内容・水準について c: 技術の試験実証の状況について d: 技術の実用化に向けた課題について e: 技術の実用化までの期間について f: 技術の実用化までのコスト（概算）について



### 3. アンケート・ヒアリング調査結果

アンケート調査及びヒアリング調査の結果得られた主な知見・情報を、要約してまとめると以下のとおりである。取りまとめは、ILCの主要な技術・製品ごとに行なっている。なお、相手先の要望等の事情により、掲載していない情報があることに留意されたい。

#### 1) 欧州の研究機関・企業への調査結果

項目		超伝導加速器技術 超伝導空洞 <DESY>
1. ILCの要求性能に対する達成状況、今後の見通し、技術的課題	ILCの要求水準に対する現在の達成状況、今後の見通し	<ul style="list-style-type: none"> <li>工業ベンダー2社が製造したXFEL用超伝導空洞808個のうち、約750個をDESYで試験</li> <li>ベンダーのうち1社はILC仕様の空洞を生産しており、納品時で30 MV/m(±7 MV/m RMS)の平均性能を達成</li> <li>両社とも、空洞の約25%をさらに表面再処理し、全体で30 MV/mの平均性能を達成</li> </ul> <p>&lt;参考&gt;ILC空洞の目標: 運転時平均 31.5MV/m、製作時平均35MV/m 90%以上</p> <p>-XFEL空洞の欠陥率は、全体の1%</p> <p>-欠陥の理由は、製作の初期段階のミス、製作現場の人員交代時の引き継ぎミス</p>
	ILCの要求性能を達成するための技術的課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>より安定した空洞生産により、勾配拡散を低減し、28 MV/mを超える領域での歩留りを向上する必要あり</li> <li>より高い再処理率と再検査率、並びに空洞の過剰生産の増大を予算化すべき</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>XFEL空洞性能の変化・・・34MV/m 82%(再処理2回) ⇒ 34MV/m 94%(再処理3回)=ILCの水準</li> <li>ILC(TDR)の空洞当り縦測定1.25回(再処理1~2回) ⇒ 縦測定1.5回(再処理1~3回)に増加させるべき</li> <li>空洞再処理の際のポイントは、電解研磨(EP)と高圧洗浄(HPR)処理</li> </ul>
2. ILC用製造品やコンポーネントを日本で集約・結合する際の問題点	場所・輸送に関わる問題	
	性能・品質に関わる問題	
	規制・管理に関わる問題	
3. 製造品の量産化の課題と実現可能性	製造品の量産化の課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>長期間に渡り全ての部品の品質を保ちつつ、生産・組立・試験をスケジュールに間に合わせる</li> </ul>
	製造品の量産化の実現可能性	<p>○大量の部品・工程の品質管理(EDMSの導入)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>EXFELでは、大量の報告書を管理し、全ての部品・個体についてのデータにアクセスできるEDMS(電子文書管理システム)を採用。</li> <li>企業には、データのアップロードを徹底(企業秘密漏洩に配慮)。DESY / IRFU(Saclay) / LALで発見された問題は即時に相互共有。</li> <li>スピードとチェックポイントの多さが重要。個体1台につき700個のパラメータを管理し、自動化ソフトにより問題が発見された個体にアラート発生</li> </ul>

項目		超伝導加速器技術	超伝導空洞 <Rf>
		超伝導空洞 <Zanon, INFN-LASA>	超伝導空洞 <Rf>
1. ILCの要求性能に対する達成状況、今後の見通し、技術的課題	ILCの要求水準に対する現在の達成状況、今後の見通し	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zanonは、1996年から2009年までの期間にTESLA-EXFEL型の空洞を約70個生産した。</li> <li>また、DESY向けにEXFEL型空洞を420個製造・納入した。これらの空洞はチタンタンクに内蔵され、化学処理されて、搬送用に供された。</li> <li>2011年から2015年までの期間、空洞納入数は週4個になり、ピーク時には週5個に達した。</li> <li>加速勾配性能: 最大40 MV/m、35%は30 MV/m以上、8%は35 MV/m以上を達成</li> <li>ZanonがEXFEL生産向けに適用した表面処理サイクル(最終段階でBOP)は、他社よりも「性能志向」が弱いと評価されたが、35 MV/m以上の性能を達成することは可能である。性能レベルは、様々な材料特性と適切な製造・処理工程の組み合わせによって達成される。</li> <li>製造サイクル全体の改良と安定化により、ILCの性能レベルは達成可能である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>現在までに、Rfの工場で1,400個以上の空洞を生産した。1995年以降、RfはTESLA/EXFEL型の空洞を様々な顧客(DESY, FNAL等)に合計650個以上納入した。最近、SLACからLCLS-IIプロジェクト向けのEXFEL型空洞を132個受注した。</li> <li>業務範囲は、空洞の機械的製造、表面処理、クリーンルーム内組立、完成空洞の納入まで、多岐にわたる。</li> <li>EXFEL型空洞の生産はRfにおいて量産化されており、RF試験に向けた表面処理を含む。</li> <li>EXFELプロジェクト向けに空洞420個を生産</li> <li>空洞の連続生産は、2013年3月～2015年10月</li> <li>空洞の加速勾配は、平均33 MV/mを達成(目標は23.6 MV/m)</li> <li>DESYによるXFEL空洞の検査結果(実データ)を示す。処理後の数値は高圧洗浄をした空洞を含めて全体を計測しなおしたものの。</li> <li>max: 処理前33.2 +/- 6.5 処理後35.0 +/- 4.1 [MV/m]</li> <li>Usable: 処理前29.1 +/- 7.3 処理後31.5 +/- 4.9 [MV/m]</li> </ul>
	ILCの要求性能を達成するための技術的課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>EXFEL用空洞の生産中に、37 MV/mを超える加速勾配を正式に達成した。</li> <li>この水準以上では生産率(歩留り)は下がるが、要求された目標はこれより低かった。</li> <li>サイクルと設備の改良により、ILC要求レベルを達成できた。</li> <li>空洞の性能向上に向けて、最も重要なのは化学研磨(BCP)ではなく、クリーンルームで最終の電解研磨(EP)を施すこと</li> </ul>	
2. ILC用製造品やコンポーネントを日本で集約・結合する際の問題点	場所・輸送に関わる問題	<ul style="list-style-type: none"> <li>管理上の問題は、輸出入税のコストを最適化することである。コスト、物流、及び時間の問題。航空輸送は、輸送時間の問題を解決するが、コストを増加させる。</li> <li>空洞の輸送(海上輸送または航空輸送)は、適切な梱包システムが使用されていれば、性能が低下することはないはずである。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>空洞の輸送に関しては問題ないと思う。</li> <li>最も安全で速い輸送方法は航空貨物である。</li> <li>EXFEL向けの出荷(陸路)では何も問題は起きなかった。</li> </ul>
	性能・品質に関わる問題	<ul style="list-style-type: none"> <li>適切な設備と良好なメンテナンスを行えば、性能が低下することはない。これは基本的に、製造工程及び完成した空洞の保管に当てはまる。製造中の重要な要因(critical factor)は、クリーンルーム作業の信頼性の継続的な維持である。</li> <li>空洞の性能低下を防止するため、製造中の化学製品の劣化やフィルターの寿命を管理・監視する必要がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rfは、空洞性能の長期的な性能低下は予想していない。</li> </ul>
	規制・管理に関わる問題	<ul style="list-style-type: none"> <li>現時点では判断できないが、欧州で「安全」であれば日本でも「安全」であるはずである。可能であれば、該当する安全要件を複数国生産に対応して調整すべきである。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rfは、欧州圧力容器設備の安全規則と矛盾する安全規則があるとは認識していない。</li> </ul>
3. 製造品の量産化の課題と実現可能性	製造品の量産化の課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>空洞を量産するために取り組むべき課題は以下のとおり。</li> <li>量産に適したサイズの特設クリーンルームの可用性</li> <li>訓練され、熟練したクリーンルームオペレータの確保</li> <li>低コスト、高スループットの電子ビーム溶接(EBW)方法の開発</li> <li>同等の迅速かつ適切なサブセンブリの準備ライン(化学及びプリアセンブリ)</li> <li>ILCの目標35MV/m以上を、28~29MV/mに下げることが量産化の点からは望ましいのではないかと。テストがほとんど不要など、生産コストを最小化できるため</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>問題ないと思う。</li> </ul>
	製造品の量産化の実現可能性	<ul style="list-style-type: none"> <li>量産化方法のメニューに関する特記事項は以下のとおり。</li> <li>(1) 製造ラインの自動化 自動化可能な製造工程は、深絞り、成形、及び一部の機械加工工程である。操業は、関連する市場分野の企業に委託可能である。 上記(サブコンポーネント製造者の認定)は非常に迅速に行うことができる。</li> <li>(2) 製造設備のアップグレードと大型化 製造工程の生産性は、クリーンルーム設備の性能向上及び規模を増大することによって高めることができる。</li> <li>(3) 製造人員の交替システムの採用 EXFEL向けの生産は2交替で実施していた。ILC向けの量産も同様に2交替で実施できるはずである。</li> <li>量産化方法の技術的実現可能性については以下のとおり。</li> <li>ILC向け量産は、製造業者数社で分担すれば対応可能</li> <li>ILC向け空洞の数量と生産スケジュールにより、下請業者の利用を増やし、外注できない工程(EBW、表面処理、クリーンルーム工程)の生産能力を増強することによって要求に対応可能</li> <li>設備アップグレードのフィジビリティは、当社の生産量が決定してから2年以内。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rfは、ILC向けの量産を開始する準備ができています。</li> <li>現在の空洞生産能力は、週5日操業、2交替勤務で年間200個である。週7日操業、3交替勤務にすれば、生産能力を2倍にすることが可能である。</li> <li>さらなる追加投資や最適化により、空洞生産量は年間500個(週10個)または5.33年間で2,667個まで増やすことができる。</li> </ul>

項目		超伝導加速器技術	クライオモジュール(アセンブリ) <ALSATOM>	クライオモジュール(アセンブリ) <CEA-IRFU>
1. ILCの要求性能に対する達成状況、今後の見通し、技術的課題	ILCの要求水準に対する現在の達成状況、今後の見通し	<ul style="list-style-type: none"> <li>ALSATOM社は、XFELへ出荷するクライオモジュール(12m×7トン)100台の組立と統合をフランスのCEA-IRFU(Saclay)の施設で実施</li> <li>クライオモジュールの組立(約500パーツ)は、以下の工程から構成される。 <ul style="list-style-type: none"> <li>○クリーンルーム内における空洞と低温カバーの組立及びアライメント</li> <li>○ヘリウムテタンパイプ(ジャケット)溶接、チューナシステム統合</li> <li>○コールドマスマンブリ</li> <li>○空洞のアライメント</li> <li>○真空容器(クライオスタット)内の組立</li> <li>○高温カバー、圧送ライン組立</li> <li>○出荷前の最終試験と準備</li> </ul> </li> <li>現在達成されている性能は、加速勾配の最高値はXM59(クライオモジュール)レベルで、257MV(AMTF)が得られた。これは、空洞当たりの平均値31MV/mに相当する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>CEA-IRFU(Saclay)では、EXFEL向けの65番目のクライオモジュールを出荷完了。現在は68番目のモジュールの作業が進行中。</li> <li>モジュールの製作ペースは、4日に1台、週1台のペースでDESYへ出荷</li> <li>モジュールの製作総数は、全部101台。最後のモジュールは2016年4月に出荷予定</li> <li>モジュールの組立・製作は、ALSATOM社に委託。IRFUは、敷地内に工場を建設しスペースを提供。作業工程を管理</li> <li>モジュールXM59は、8個の空洞が軒並み線測定で34MV/m以上を記録しILC品質を達成。ただし、モジュール試験では31MV/m</li> <li>モジュール60台の平均で加速勾配の劣化は約6%である</li> </ul>	
	ILCの要求性能を達成するための技術的課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>性能部品単位での信頼性及び再現性(空洞、カバー等)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>モジュールの性能を高めるためには、クリーンルーム内での作業が大半。他要因も検討したが、性能劣化の原因はクリーンルーム内での作業以外に考えられる要因はない。作業員、作業工程、ツール等に起因する微粒子の混入が問題と認識している。</li> </ul>	
2. ILC用製造品やコンポーネントを日本で集約・結合する際の問題点	場所・輸送に関わる問題	<ul style="list-style-type: none"> <li>機器のサイズによる輸送上の制約</li> <li>容積の定義</li> </ul>		
	性能・品質に関わる問題	<ul style="list-style-type: none"> <li>輸送環境条件(振動、衝撃、酸化等)に起因する性能低下のリスク</li> </ul>		
	規制・管理に関わる問題	<ul style="list-style-type: none"> <li>製造工程内で適用される日本と欧州の規格・規制の違い</li> <li>規格・規制の変化(更新)</li> </ul>		
3. 製造品の量産化の課題と実現可能性	製造品の量産化の課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>○供給部品の信頼性及び可用性</li> <li>○モジュール組立の最初の工程でカバーや空洞等の不適合項目を発見できれば対応可能。工程の途中で発見された場合は解体必要となる。重要部品の"reliability"が非常に重要</li> <li>○重要部品の性能再現性(空洞、カバー)</li> <li>○効率的な一貫製造工程を維持する能力</li> <li>○生産フローの速度に影響を与えずに、製造工程における不適合品を管理する能力</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○管理面の課題(CEA-IRFU)</li> <li>○品質管理の改善、特に納品される部品について、ベンダー側とのインターフェース改善。7日/週で稼働可能な人員配置および機材管理。欧州の圧力機器指令(PED)への対応及び非破壊検査</li> <li>○製造面の課題(Alsatom社)</li> <li>○空洞の多くはILC要求仕様を達成。問題は、モジュールに組立後の加速勾配維持。品質安定化が必要。オペレータや技術者の世代交代をスムーズに行える体制も必要</li> </ul>	
	製造品の量産化の実現可能性	<ul style="list-style-type: none"> <li>量産化手法のメニューは、作業場の規模及び生産設備の拡充、労務管理、生産人員の体制(シフト等)、効率的な生産「ムダ」の削減、物流・在庫管理、サプライヤー管理、品質管理(製品及びシステム)、設定管理である。</li> <li>効率化により、モジュール組立サイクルを現在の4日から3日に短縮することは可能。真空引き等の時間を要する工程があるため、それ以上短縮することはできない。</li> <li>量産化手法の技術的実現可能性・実現時期は、以下のとおり。 <ul style="list-style-type: none"> <li>○作業場の規模及び生産設備:1.5~2年(建屋建設の必要性によって異なる)</li> <li>○人員の増強:6ヶ月+3ヶ月の訓練</li> <li>○連続生産能力の増強:9ヶ月</li> </ul> </li> <li>量産化手法の経済的な実現可能性は、作業指示書及び技術要件に従って規定される。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IRFU(Saclay)は、EXFELモデルを仮定し、生産ラインを拡張することで、ILCクライオモジュール全体の30%を5年間で製作を担当することが可能</li> <li>年間120台(3日で1台ペース)のクライオモジュール組立・製作が可能</li> <li>SaclayのEXFEL用施設のうち、90%はILCに対応可能。残りの10%の部分は1~2年で拡張可能</li> <li>IRFUは、ILC建設の際にはEXFEL等で得られた技術ノウハウを、コンソーシアムの形で世界と共有していくことを望む。例えば、他種でのモジュール製造ラインの立ち上げに際して、有効なアドバイスが可能</li> </ul>	

項目	クライオモジュール(テスト) <DESY>	クライオモジュール <RI>
1. ILCの要求性能に対する達成状況、今後の見直し、技術的課題	<p>ILCの要求性能に対する現在の達成状況、今後の見直し</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・現在、EXFELモジュール80台の平均勾配(27.2 MV/m)は、ILCの加速勾配設計値31.5MV/mを、14%下回っている。</li> <li>・現在、<u>修繕作業が必要な不適合項目のあるモジュールは、全体の5%</u></li> <li>・EXFELモジュールアセンブリは改善傾向にあり、残りのモジュールで性能が向上する可能性はある。</li> <li>・31.5MV/mの達成は、依然として課題であるが、達成不可能ではない。</li> </ul> <p>ILCの要求性能を達成するための技術的課題</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ILC向けには、モジュールアセンブリにおける性能低下の原因とその対策をより良く理解することが必要となる。</li> <li>・EXFELモジュールの最大の問題は、<u>カプラーとモジュールの接合部のベローズに穴が空き、真空が壊れてしまうこと。</u></li> </ul>	<p>クライオモジュール &lt;RI&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・RIは、25年以上にわたり、世界の顧客向けに超伝導RFモジュール(SRF)を生産している。例えば以下のとおり。 <ul style="list-style-type: none"> <li>○CERN(LEPプロジェクト)向けのSRFモジュール(24台)</li> <li>○ダーズベリー(英国)等向けのSRFモジュール(6台: GHzの9セル&lt;XFEL型&gt;空洞2個を使用)</li> </ul> </li> <li>・モジュールは、一般的に5~15 MV/mの加速勾配で動作。</li> <li>・RIは、単体部品の製造、モジュールの組立、顧客への出荷、客先での設置、及びモジュール性能(加速勾配及び極低温損失)を実証するためのRF試験を実施</li> <li>・ILC用クライオモジュールで35 MV/mを確保するためには、クリーンルーム内におけるモジュール組立技術をRIで確立する必要がある。</li> <li>・ただし、クライオモジュール組立技術はXFELの空洞製造時にRIで使用した組立技術と実質的に同じ。</li> </ul> <p>(RIの課題)クリーンルーム内におけるモジュール組立技術及び適切なクリーンルームインフラの欠如</p>
2. ILC用製造品やコンポーネントを日本で集約・結合する際の問題点	<p>場所・輸送に関わる問題</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・完全なクライオモジュールは標準的な40フィートのコンテナには長すぎるため、対応が必要</li> <li>・クライオモジュールは、振動に関して厳しい制約条件があり、特殊な“damped”フレーム内に納め、輸送中の加速度を記録するために計装される必要</li> <li>・陸上輸送ルートは舗装された道路を通るように慎重に選定すべき</li> <li>・日本への出荷は、飛行機又は船の利用が前提。取扱いは不明であるが、「衝撃」への対応が必要</li> <li>・日本と外国間の輸送方法については試験する必要がある。必要があれば、海上輸送又は航空貨物用の特殊な輸送用フレームを開発しなければならない。</li> </ul> <p>性能・品質に関わる問題</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・EXFEL向け空洞の「性能低下」の問題は、初期受入れ時の空洞性能と完成モジュールの性能の格差である。</li> <li>・EXFEL向けの実績では、両者において7~10%の平均勾配の減少が見られるが、CEA-IRFU(Saclay)における最新のモジュール組立では改善の傾向が見られる。(なお、EXFEL向けの生産で達成された勾配はILC要件を約10%下回りに留意)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・適切な輸送用フレームが使用される限り、クライオモジュールの出荷について大きな問題はないと考える。</li> <li>・ただし、モジュールの長さが標準的な航空貨物の制限寸法を超えるかどうかに関する調査は必要である。</li> <li>・RIは、モジュールを海外へ陸路及び航空貨物によって出荷した実績がある。</li> </ul> <p>RIは、クライオモジュールの長期的な性能低下は予想していない。RIのモジュールは、12年以上にわたって顧客の装置内で性能低下することなく動作している。</p>
3. 製造品の量産化の課題と実現可能性	<p>製造品の量産化の課題</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ILCクライオモジュールの連続生産に関する根本的な障害は想定していない。</li> <li>・既存の試験・再処理インフラの能力は、人員増強によってモジュール1.5台/週(空洞10~15個/週)まで向上可能</li> <li>・より高い生産速度が必要な場合、インフラの建設(+追加人員)が必要で倍増すると、<u>週当たり約3台のモジュール製作が可能</u></li> <li>・過去の実施調査によれば、XFELモジュールを前提とすると、最大でモジュール10台/週の生産は技術的に可能</li> <li>・低性能空洞の表面再処理及び再試験能力を増強することによって、ILCの加速勾配目標は達成できるかもしれないが、追加コストが発生する。しかし、モジュール組み立て時に見られる性能低下は依然として対処する必要あり</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・問題ないと考える。</li> <li>・XFEL向けの量産は、製造企業がCEA(フランス)のインフラを使用して行っている。</li> </ul>
製造品の量産化の実現可能性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・モジュール生産が1.5台/週を超える場合、EXFEL向けインフラに加えて追加のインフラが必要となる。完全な3シフト労働が必要となる可能性があるが、必須ではない。それ以上に、非常に高い生産速度を達成するためには専用のインフラが必要となり、産業への依存度が高くなる可能性が高い。</li> <li>・EXFELモジュール1台の総コストは、約1.5 MEUR(百万ユーロ)プラス試験コスト0.2 MEURである。ILCでは、専用設備の自動化に投資することによってこれらのコストを削減できる可能性がある(DESYS調査)。また、最初の生産量増強後、検査率を100%から(例えば)33%まで下げることで試験コストを低減することが可能</li> </ul>	

項目	高周波技術	
	カプラー <RI>	カプラー <LAL>
1. ILCの要求性能に対する達成状況、今後の見通し、技術的課題	ILCの要求水準に対する現在の達成状況、今後の見通し	<ul style="list-style-type: none"> <li>EXFELカプラーの生産は、フランスのThales Electron Devices (TED) とのコンソーシアムにより実施。製造量、分担等は以下のとおり。</li> <li>(a) EXFELプロジェクト向けにカプラー670個を生産</li> <li>(b) カプラーの連続生産は、2013年4月～2015年末</li> <li>(c) カプラーは通常、フル稼働で48時間以内に製造される</li> <li>(d) TEDは、単体部品を製造し、アセンブリをろう付けし、銅めっきして、外部及び内部導体を製造</li> <li>(e) RIは、セラミックウィンドウのアセンブリをろう付けし、セラミックをTiNコーティングし、カプラーの低温部品と高温部品をEB（電子ビーム）溶接し、RF調整前にカプラーをクリーンルーム内で組立て</li> <li>・現在のカプラー生産能力は、週5日稼働、2交替勤務で年間400個</li> <li>・週7日稼働、3交替勤務にすれば、生産能力を2倍にすることが可能</li> <li>・さらなる追加投資や最適化により、カプラー生産量は年間1,000個(週20個)または5.33年間で5,334個まで増やすことが可能</li> </ul>
	ILCの要求性能を達成するための技術的課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>RIのカプラーは既にILCの性能基準に到達しており、課題は特に無し</li> <li>ILCに要求される性能を満たす上で、とくに技術的な障害はない、生産速度の再スケールが重要である。</li> <li>ILC向けカプラーの生産は、複数の生産拠点を関与させる必要がある。その際には、全ての供給者に同レベルの要件を適用しなければならない。</li> </ul>
2. ILC用製造品やコンポーネントを日本で集約・結合する際の問題点	場所・輸送に関わる問題	<ul style="list-style-type: none"> <li>カプラーの輸送に関しては問題ない。</li> <li>最も安全で速い輸送方法は航空貨物</li> <li>EXFEL向けの出荷（陸路）では何も問題は起きなかった。</li> <li>主なリスクは、振動や動揺によるアンテナの機械的損傷、ネジの緩みに起因する部品からの漏洩など。</li> <li>LALは、ペアで組み立てたカプラーの輸送経験あり。米国からパリへ（陸上→空輸→陸上）、トラックと航空機による10～15日間の輸送。適切な配送用ボックスを使用したため、問題無し。</li> <li>R&amp;D連携プログラムで、パリから筑波へのカプラー輸送（陸上→空輸→陸上）をしたが、適切な梱包により問題はなかった。</li> <li>長期保管により、RF調整の効果が部分的に失われる可能性はあるが、カプラーはモジュール組立て後に（高速手順で）再調整される。</li> </ul>
	性能・品質に関わる問題	<ul style="list-style-type: none"> <li>RIは、カプラー性能の長期的な性能低下は予想していない。</li> <li>RIで製造したカプラーは、15年以上にわたってFLASHで性能低下することなく動作している。</li> <li>サプライヤーは独自の製造工程を有するため、性能の差異がでる。研究機関と企業が、生産量拡大段階で密接かつ迅速に連携することを強く推奨。</li> <li>カプラーが長期間同一製造工程で生産されている場合も、性能と品質が変化する可能性あり。これは、原材料品質のロット間ばらつき、サプライヤー又はその外注先の人員体制の変更、工具や機械の劣化、管理及び品質チェックの緩和などに起因。厳密な産業監視及び慎重な品質管理計画が不可欠。</li> </ul>
	規制・管理に関わる問題	特に無し
3. 製造品の量産化の課題と実現可能性	製造品の量産化の課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>問題ないと考える。</li> <li>LALは、XFELで、計画通りの納入速度でカプラーを量産できる可能性を示した。ILCの必要量はXFELよりもはるかに大きい。納入速度をX倍するには、設備と人員も同じ倍数で増やせば可能である。</li> <li>LALは、ILCの納入要件を満たすため、研究成果とXFELで得られたノウハウを全世界の研究ラボと共有することを提案する。</li> </ul>
	製造品の量産化の実現可能性	<ul style="list-style-type: none"> <li>EXFELプロジェクトにおいてLALが実施した準備及び調整工程の大半は既に自動化されている。</li> <li>ILC向けの量産要件を満たすには、以下のようなシナリオが考えられる： <ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 人員、設備、及び開発ソフトウェアをX倍する</li> <li>(2) RFステーション及びクリーンルーム表面を改良して、生産速度を増やす</li> <li>(3) 生産人員を増やし、交代制を採用する</li> </ul> </li> <li>上記(1)～(3)の経済的な実現可能性については以下のとおり。 <ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 既存の施設をX倍に拡張するコストは、施設のコストに同じ倍数を乗じることに等しい。</li> <li>(2) RFステーション及びクリーンルーム表面の改良は、同じ生産速度を得るために施設をX倍に拡張するよりも安価である可能性がある。</li> <li>(3) 交代制を採用した場合、現在の通常労働時間におけるコストの2倍近いコストがかかる。</li> </ul> </li> </ul>

項目		高周波技術	
		カプラー <Thales>	クライストロン <Thales>
1. ILCの要求性能に対する達成状況、今後の見通し、技術的課題	ILCの要求水準に対する現在の達成状況、今後の見通し	<ul style="list-style-type: none"> <li>・現在までに、Thales社は、(RIと連携して)自社施設で低温カプラーを800個以上生産している。また、同社はLAL及びEXFEL向けにもカプラーを生産している。</li> <li>・現在の生産能力は、2シフト体制、週5日操業でカプラー400個/年である。3シフト体制、週7日操業にすれば、生産能力を2倍にすることができる。追加投資や最適化により、カプラーの生産能力を1,000個/年(20個/週)、即ち5.33年で5,334個まで増やすことができる。</li> <li>・カプラーは既にILCの目標性能に達している。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・同社が製造しているMBK(マルチビームクライストロン)のモデルTH1801(垂直)およびTH1802(水平)は、同社の製品ポートフォリオのカatalog製品であり、磁石とシールドを内蔵したターンキーソリューションである。生産ファイルや製造関連文書はシリーズ生産および大量生産に対応している。両モデルとも、10MW/150kW/1.5msのRFパルスで63%以上の再現可能な高効率で送出する。</li> <li>・さらに、現在進行中の研究は、65%を超える効率が達成可能であることを示している。</li> <li>・一方、クライストロンの寿命期待値を最適化する目的で、長寿命カソード(陰極)の研究開発活動が行われている。同社は現在、1シフト当たり12本以上のクライストロンを生産・試験する能力を有する。</li> </ul>
	ILCの要求性能を達成するための技術的課題	なし	ILCの目標コストに適合する高生産歩留まりを達成するため、再現可能な高効率を体系的に実現する可能性を調査する。
2. ILC用製造品やコンポーネントを日本で集約・結合する際の問題点	場所・輸送に関わる問題		
	性能・品質に関わる問題		
	規制・管理に関わる問題		
3. 製造品の量産化の課題と実現可能性	製造品の量産化の課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・現在のカプラーの生産ペースは10台/週(5日/週、2シフト体制)である。仮に7日/週、3シフト体制にした場合、設備投資なしで生産ペースを倍増可能である。これにより年間生産数1,000台となり、5年間で5,000台、すなわちILCが必要とする全体の約1/3(欧州分担分)を生産できる。</li> <li>・さらに設備投資を行い、生産ラインを2倍にした場合、30~40個/週の実産も十分可能である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ILCの場合はMBK600台を5年間で生産(3極で分担)することになる。これをThales社が行うとすると、生産ペースを最低2倍にする必要がある。現在生産ペースのボトルネックはコンディショニング用のテストスタンドのみである。</li> <li>・ILCでは専用のテストベンチを用意することになる。また人員についても専属チームを作ることになる。これらを通してさらに生産性を上げていくことが可能である。</li> </ul>
	製造品の量産化の実現可能性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・EXFEL向けカプラーはRI社と共同で生産したが、ILCでは供給量が大きくなるため、設備投資も含めて検討し、Thales社単独で生産することも検討していく。</li> <li>・カプラー製造の際にポイントとなる電子ビーム溶接(EBW)、真空ろう付けや銅メッキ技術等については、次のように対応可能である。</li> <li>(1)EB溶接機を2016年に購入(これによりILCカプラーへ対応可)。EB溶接の作業習熟のための専門人員確保・訓練(社員の活用)</li> <li>(2)真空ろう付け、銅メッキは、EXFELカプラーの製造を通して得た特殊技術・ノウハウを活用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・MBKのコンディショニング用のテストスタンドを増やすための必要投資額は1~2十億ユーロ程度である。これにより容易に生産量を2倍にできると考えている。</li> <li>・MBK生産のための新システムを導入するには、部品調達に8カ月、設置および周辺設備(電気、冷却等)の整備に6~8カ月、全体で1.5年程度かかると予想される(これには、コンティンジェンシーを含む)。</li> </ul>

項目		ナノビーム技術
1. ILCの要求性能に対する現在の達成状況、今後の見通し	ILCの要求水準に対する現在の達成状況、今後の見通し	<p><b>陽電子源(ヘリカルアンジュレータ) &lt;STFC, Cockcroft Institute&gt;</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>STFCは、全長4メートルのILC超伝導ヘリカルアンジュレータモジュールの設計、製作、組み立て、試験に成功</li> <li>STFCは、製造に必要なすべての主要プロセスを実施し、フルスケールのILCアンジュレータモジュール(現在までに世界で製作された唯一のモジュール)を1個製作した。このモジュールはプロトタイプであるが、ILCの仕様を満たす</li> <li>ILCのアンジュレータの長さは250m、したがって約4mのモジュールを約60個組み合わせて製作する</li> <li>モジュールの性能について、磁気性能は、ILCで必要とされるフィールドレベルを30%上回った。低温性能は低かったが、時間とリソースがあれば問題解決可能と判断。リソースがあれば、ビームによるアンジュレータの試験も実施できた。</li> <li>なお、STFCは、ILC向けのヘリカルアンジュレータの開発を2010年頃に中止した。</li> </ul> <p><b>電子・陽電子ダンピングリング &lt;INFN-LNF&gt;</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ILC減衰リング(DR)は、電子及び陽電子用の2個の蓄積リング(円周3.2 km、エネルギー5 GeV)で構成されている。これらのリングは、ビームの横方向エミッタンスを数桁(垂直e+エミッタンスの場合は5桁)低減するために必要</li> <li>世界中の電子陽電子コライダー及びシンクロトロン光源のうち数基は、ILCのDRに必要なビーム性能と同等の性能(超低エミッタンス、多くのバンチ数、短いバンチ間隔)を達成している。</li> <li>ILC減衰リングに関連する技術の最先端は以下の通りである: <ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 超低垂直エミッタンス: アライメント公差、軌道修正と安定化、ビーム位置モニター、ビームプロフィール測定システム、及び低エミッタンスチューニング技術は、既に第3世代光源(Diamond, SLS, ESRF, SPring-8等)で達成又は計画されているものと同等。</li> <li>(2) 真空: 電子DR真空システムの要件は、現在運転中のシンクロトロン光源と同様。真空システムの設計は電子雲の不安定性を軽減する技術が必要であるため、陽電子リングの要件は最も厳しい。電子雲の不安定性軽減に使用されるシステムはTDRIに記載。これらのDR向けの研究は、CesrTA加速器(コーネル大)で実施済み。DRの陽電子リング向けと同システムは、スーパーKEKBに採用。このシステムは、DRIに関して5倍高いバンチ電流と、同様のバンチ間隔(4ナノ秒)で試験される。</li> <li>(3) RFシステム: KEKBの超伝導RF空洞に基づいている。その空洞の性能は、DRの主な要件を満たしている。DR運転に向けてRF周波数を500 MHzから650 MHzにスケールアップし、システムパラメータを最適化するためには、詳細な工学設計が必要である。</li> <li>(4) 磁石と電源: 5 GeV蓄積リング用の従来のシステムに基づく。超伝導ウイグラーはCesrTAの設計に基づき、DRの要件を満たしている。</li> <li>(5) 計装及びフィードバック: 必要とされる計装はかなり標準的であり、第3世代光源に似ている。超低垂直エミッタンスを監視するためのX線ビームサイズモニターが製作され、CesrTAで試験済み</li> <li>(6) 入射/取出しシステム: DRの性能達成に不可欠。GDEプログラムの段階で、ストリップラインキッカーを設計し、LNFのDAFNE蓄積リングで試験し、必要に応じて運用された。立ち上がり時間が非常に短く、繰り返し率が3 MHzのキッカーバルス変調器の研究開発がSLACで実施中。キッカーバルサーはKEK ATFで試験し、適切なバンチ距離のバンチを抽出した。しかし、ILCパラメータで要求される入射/取出し効率を確保するためには、さらなる研究開発が必要。</li> </ul> </li> <li>第3世代シンクロトロン光源で達成された性能と、将来の性能向上及びSuperKEKB向けに提案されている性能は、ILCのDRで達成可能な性能の評価基準となる。</li> <li>TDRIで提示された格子はILCの要件を満たしている。オーストラリアン・シンクロトロン光源では、1 pm rad以下のビーム垂直エミッタンス <math>\epsilon_y</math> が達成されている。DRで要求される幾何学的エミッタンスは <math>\epsilon_y = 2</math> pm radである(正規化エミッタンス <math>\gamma \epsilon_y = 20</math> nm radに相当)。</li> <li>入射/取出しシステム: 性能達成のために重要な要素は、バルスの立ち上がり及び立ち下がり時間、バルス繰り返し率、キックの振幅および振幅安定性、長期信頼性など。これらの全てのパラメータは、個別の試験において達成済み。DR向けの注入/抽出システムにおいて必要なすべての仕様を同時に達成するためにはさらなる研究が必要</li> </ul>
	ILCの要求性能を達成するための技術的課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>ヘリカルアンジュレータに大きな技術的障壁はない。さらにリソースを投入すれば極低温設計を改良できる。</li> <li>標的(conversion target)の開発は、ILC建設の障壁になるような課題ではないが、アンジュレータほど習熟した技術ではない。実装するにはさらなるR&amp;Dが必要</li> </ul>
2. ILC用製造品やコンポーネントを日本で集約・結合する際の問題点	場所・輸送に関わる問題	
	性能・品質に関わる問題	
3. 製造品の量産化の課題と実現可能性	規制・管理に関わる問題	
	製造品の量産化の課題	
製造品の量産化の実現可能性	<ul style="list-style-type: none"> <li>プロトタイプデザインはあるので、企業と協力して2年程度で2台目プロトタイプは製造可能。それがILCの要件を満たしていれば、STFC監修のもと企業に量産初回(pre-production)のモジュールを製造させ、3~4年目で必要量60台の製造は達成可能</li> </ul>	

項目		ナノビーム技術	
		ビームモニター・フィードバック技術 <INFN-LNF>	ビームモニター・フィードバック技術 <JAI>
1. ILCの要求性能に対する達成状況、今後の見通し、技術的課題	ILCの要求水準に対する現在の達成状況、今後の見通し	<p>・高速フィードバックシステム (Fast Feedback System) は、リアルタイムでプログラム可能な超高速電子システムであり、蓄積又は減衰リングの一平面 (縦、横、又は垂直) における粒子ビームの各単一バンチの動作と不安定性を制御することができる。同システムは、多数の異なる技術要素 (低雑音アナログ電子回路、FPGAとデジタル部品、RFパワーアンプ、ストリップラインまたは空洞キッカー) で構成される。</p> <p>・ILCのDRの高速フィードバックシステムに関する研究はILCの仕様レベルだけで実施された。しかし、現行のフィードバックシステムは性能が低く、多くの円形蓄積リングで使用されている16ビットではなく12ビットで動作する。この商用のフィードバック処理ユニットは、ILCのDRの高速フィードバックシステム向けの研究開発プログラムの基礎として利用可能である。</p> <p>・ILCでは、縦、横、又は垂直平面におけるバンチ・バイ・バンチ運動を制御するため、3つのフィードバックシステム (完全に同一ではない) を使用する。</p> <p>・不安定性の観点から、出力約1 kWのパワーアンプは約20回のリング回転の減衰時間を与えることを考慮する必要がある。</p> <p>・必要となるストリップライン及び空洞キッカーは、DAFNEで運用中の現行システムに基づいたものを使用できる。</p> <p>・高速フィードバックシステムの研究開発プログラムは、できるだけ早期に開始する必要がある。なぜなら、現時点では、ILCのDRの要求仕様に対応する高速フィードバックシステムは存在しない。</p> <p>・ここ4～5年のFPGA技術 (※) の大きな進歩は、フィードバックシステムの新バージョンを構築する上で非常に有用と思われる。</p> <p>・ILCのDRの各振動面にフィードバックシステムを実装する必要がある。スペアパーツとして他のシステムも必要である。</p> <p>(※) FPGA (field-programmable gate array) は、製造後に購入者や設計者が構成を設定できる集積回路であり、広義にはPLD (プログラマブルロジックデバイス) の一種である。</p>	<p>・英国JAI (ジョンアダムス研究所) は、ILCにおけるバンチ間レイン間のビームフィードバックを提供する目的で、高精度、低レイテンシー、ブロードバンドのマルチバンチビーム監視制御システムを設計・試作し、試験した。</p> <p>・このシステムのILCへの応用の最も重要な点は、ILC相互作用点において、ルミノシティが最大となるようなビーム衝突へのフィードバックである。なお、ビームレイン間のビームフィードバックは装置全体に幅広く応用されている。</p> <p>・各システムは以下で構成されている:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ストリップライン及び/又は空洞ビーム位置モニター (BPM);</li> <li>○超低レイテンシー (約10 ns) のフロントエンドアナログ信号プロセッサ;</li> <li>○高速デジタルフィードバックコントローラ;</li> <li>○高帯域、低レイテンシー、高速立ち上がり時間の高出力ドライバーアンプ;</li> <li>○ビームにインパルスを与えるストリップラインキッカー。</li> </ul> <p>・上記のプロトタイプシステムはKEK-ATF/ATF2のビームラインに配備され、試運転及び試験されている。</p> <p>・全てのILC性能仕様を満たしている:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○BPM空間分解能&lt;1µm;</li> <li>○BPM信号処理レイテンシー&lt;10 ns;</li> <li>○デジタルコントローラが357 Ms/sで動作;</li> <li>○相互作用点でビームにダイナミックレンジ±250 nmのキックを与えるドライバーアンプ;</li> <li>○閉ループフィードバックレイテンシーが約140 ns (計画されたILCバンチ間隔におけるバンチ間補正の要求を満たしている)</li> </ul>
	ILCの要求性能を達成するための技術的課題	<p>・ILCの高速フィードバックシステムの主な技術的課題は以下のとおり。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○高いサンプリング周波数</li> <li>○高ビット数のアナログ・デジタル変換</li> <li>○処理バンチ数 (又はバケット数) が多いこと</li> <li>○バンチ間の距離が短いこと</li> <li>○超低雑音システムが必要</li> </ul>	<p>・技術的障害は、想定していない。</p> <p>・計画された相互作用領域内にフィットするように部品設計の詳細な工学的最適化を実施する必要がある。</p>
2. ILC用製造品やコンポーネントを日本で集約・結合する際の問題点	場所・輸送に関わる問題		・想定していない。
	性能・品質に関わる問題		・想定していない。
	規制・管理に関わる問題		・想定していない。
3. 製造品の量産化の課題と実現可能性	製造品の量産化の課題		・基本的でない。地元企業に外注する。
	製造品の量産化の実現可能性		



## 2) 米国の研究機関・企業への調査結果

項目		超伝導加速器技術		
		超伝導空洞 <SLAC>	超伝導空洞 <AES>	超伝導空洞 <Jefferson Lab>
1. ILCの要求性能に対する達成状況、今後の見通し、技術的課題	ILCの要求水準に対する現在の達成状況、今後の見通し	・製造技術を持たず、製造を民間企業に、検査は他米国研究機関が担当	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Fermi Labからの受注により、これまでに36個のILC規格空洞を製造。</li> <li>・上記のうち32個の空洞は一貫して性能仕様を超えており、80%以上の空洞でILC要件の35 MV/mを上回る</li> <li>・LCLS-IIの最初の2つのクライオモジュール用の空洞16個には、全てAES製の空洞が使用される</li> <li>・ニオブ板からの加工、プレスによる整形、電子溶接と化学研磨を担当</li> <li>・ニオブの電子溶接用にカスタマイズされた大型電子ビーム溶接機を保有しており、高い研磨技術をもつ</li> <li>・空洞の電子溶接とBOP(化学研磨)についてはAESで担当するものの、その後の電子研磨、高水圧トリートメント、チューニング、テストについてはFermi labにて実施</li> <li>・クライオモジュールへの組み立てもFermi labが担当した</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・LCLSII</li> <li>・FNALにあるOMIはJ-labにて試験された空洞が入っている</li> </ul> <p>【全体】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・空洞の開発は以下の4つの手順でなされている</li> <li>S0. 35MV/mを達成するcavityのYield</li> <li>S1. 一つのクライオモジュールで31.5MV/mを達成するcavity形状の決定</li> <li>S2. 加速ビームを用いたシステムとしてのテスト</li> <li>S3. 工業化に向けたプロダクション方式の確立</li> <li>・S0とS1については、DESY、FLAN、INFN、KEKが、S2とS3については、DESYのFLASH、FNALのNML、KEKのSTF2で展開中である。</li> <li>・S0では、各機関がアッセンブルしたTESLA形状、Fine-grain Nb cavityが、TDRが求めるQ0=8 X 10<sup>9</sup>と35mv/mを達成している。</li> </ul>
	ILCの要求性能を達成するための技術的課題		<ul style="list-style-type: none"> <li>・加速勾配、Q値ともにILC仕様に見合った空洞を製造する技術を保有</li> <li>・LCLS-IIIにおける入れでは、コスト高のため、逸注した</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2005年に設定した目標であるYield 90%、35MV/mを達成は実現していないし、Repeatable 電子研磨技術 (EP)によるクリーニングとハンドリングの信頼性確保について検証が進められている。</li> <li>・J-labでは上記達成のため、約60の9セル空洞に120のEPを実施し、約200の縦試験がなされた。</li> </ul>
2. ILC用製造品やコンポーネントを日本で集約・結合する際の課題	場所・輸送に関わる問題	米国研究機関、民間企業では、加速空洞を日本で集約、結合する際の課題について議論がなされていない模様		
	性能・品質に関わる問題			
	規制・管理に関わる問題			
3. 製造品の量産化の課題と実現可能性	製造品の量産化の課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・超伝導加速空洞の生産および設置で最も大きなボトルネックは検査(AT)である</li> <li>・ILCでは1日約1つのクライオモジュールを完成させる必要があるが、1つの施設におけるATの実施には2週間程度必要とされている</li> <li>・現在検査が実施できる機関は欧州に4箇所、米国に2箇所しかなく、今後日本に作るとしても世界で生産される速度に追いつかない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・同社の現在の施設・スタッフでは、年間約50個の空洞を生産できる能力を保有</li> <li>・現状の設備をすべて活用し、ダブルシフトを実施したとすれば100くらいまでは可能。</li> <li>・最も大きな課題は技術者をはじめとする生産人員の確保</li> <li>・現在の従業員数は19名で、2名の物理学者、6名のエンジニア、7名の製造技術者、4名の管理部門職員で構成</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・量産化については企業によって検討が進められている。</li> </ul>
	製造品の量産化の実現可能性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上記の検査ボトルネックを解消するため、TDRでは、すべての空洞ではなく、25~30%について検査することを提案</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・長期とはいえ、一時的なプロジェクトに、企業規模を大きく上回る投資をすることは難しい</li> <li>・Fermi labなどの共同研究において、ILCの費用を建設と運営に分けて考えた場合、建設については7年間ほどで、米国においては、民間企業ではなく、政府が主導するThe Factoryという目的会社により運営されるべきと提案</li> <li>・米国であれば、FNALがThe Factoryを推進する母体となるべきであり、JLABはそれを研究面からサポートする機関と考えるのが一般的</li> <li>・ILCの仕様を満たす企業を育成するには約2年ほどかかる</li> <li>・ILCでコスト削減が可能となる分野は全体的であるが、特にデザインをシンプルにするなど、コンセプトデザインの段階での程度のコスト削減が可能と試算</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・現状では代替形状や代替原料の検討が進められている。これらは、コスト削減や能力の強化、リスク削減に寄与する取り組みでもある。</li> <li>・素材の低価格化については、ニオブインゴットからシートへの切り取り技術の検討が進められている。</li> <li>・上記が確立すれば、世界ニオブ資源量の9割を誇るブラジルで産出される「パイロクロア」が利用可能となり、(これまではRRR値や純度で劣るとされていた)、ILCにおけるニオブ供給量の問題を解決できる。</li> <li>・この技術によって、原料コストを約50%低減できる可能性がある。</li> <li>・しかし、この技術で作成された空洞は9セルで一定の性能が確認されたものの、ILC仕様である加速勾配と値を達成したわけではない。さらに、低いRRR値を持つインゴットから作成した空洞がクライオモジュールとしてILC仕様を満たす性能を発揮するかも未知数である。</li> <li>・また、形状についての研究として、KEKで考案されたIOHIROを改良したLow surface field (LSF)の開発が進んでいる。1空洞ベースで50MV/mを視野に入れたモデルだが、9セルへの組み立ては資金が無く実施されていない。</li> </ul>

項目		超伝導加速器技術	超伝導加速空洞<ROARK社>	超伝導加速空洞<Fermi Lab>
1. ILCの要求性能に対する達成状況、今後の見通し、技術的課題	ILCの要求水準に対する現在の達成状況、今後の見通し		<ul style="list-style-type: none"> <li>1.3GHzの9セル空洞や、SSR1スポーク共振機 (spoke resonator) をFermi Labに提供してきたが、<u>ILC仕様を満たすものではない。</u></li> <li>研究所と共に技術開発を行う企業ではなく、<u>研究所によって提示された仕様にしたがって製造を行う企業である。</u></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>これまで20のILC仕様加速空洞の処理及び試験を担当した。</li> <li>特に2Kという低温、かつ中規模加速勾配20MV/mにおけるQ値 (抵抗値) の著しい改善について先進的な知見を持つ</li> <li>Low-loss shape及び、Re-entrant形状の1セル空洞が開発され、<u>5QMV/mという加速勾配を達成した。</u></li> <li>同様にLSF形状という<u>新たな空洞形状の開発</u>によって加速勾配が向上する可能性がある。</li> </ul>
	ILCの要求性能を達成するための技術的課題		<ul style="list-style-type: none"> <li>現在、ILC仕様の空洞を製造するための認証を受けていない</li> <li>ニオブの整形やBCPまでは担当できるものの、高度技術が必要となる電子研磨やチューニング、クリーンルームを必要とする製造技術は保有していない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>現状、空洞については製造、検査共に技術的要件を達成するだけの技術を保有</li> <li>加速勾配の上昇に伴い、Q値が下がる、「Medium field Q slope」と呼ばれる現象が確認される。Fermi Labでは追加処理 (HF洗浄) によって問題の軽減を図っている</li> <li>電界放電 (Field emission) によって、XFEL空洞の性能が下落する現象も確認された。この問題については、2回目の高水圧リンスによって軽減されるほか、空洞の試運転の際によく利用される、高出力の周波数調節 (high power rf conditioning) を行うことによって低減される</li> </ul>
2. ILC用製造品やコンポーネントを日本で集約・結合する際の課題	場所・輸送に関わる問題	米国研究機関、民間企業では、加速空洞を日本で集約、結合する際の課題について議論がなされていない模様		
	性能・品質に関わる問題			
	規制・管理に関わる問題			
3. 製造品の量産化の課題と実現可能性	製造品の量産化の課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>現在の企業規模を考えると自己投資ではなく国などからの支援が必要</li> <li>スペースについては余剰があるので問題ない</li> <li>人材育成、特にEB溶接技術の伝承が大きな課題で、国立研究機関とのコラボレーションが必要であることは間違いない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>特に試験において、ILCが他プロジェクト (例: PIP-II や PIP-III など) との比較してどれだけ重要かによって検査施設をどれだけ使えるかが判明</li> </ul>	
	製造品の量産化の実現可能性	<ul style="list-style-type: none"> <li>今後設備投資の機会があれば、以下の領域を優先させる。この領域は今後9セル空洞の製造を進める上で原料から完成までを一手に担うために必要なものという認識</li> <li>真空熱処理機器におけるクライオポンプ、RGA Analyzer、窒素を挿入する仕組み (nitrogen backfill) の導入</li> <li>ISO Class 10のクリーンルーム (カーテンなどのsoft wall 式で、20フィート×40フィート)</li> <li>高水圧洗浄システム (HPR system)</li> <li>電子研磨システム (EP system)</li> <li>9セルの大きさに対応した超音波洗浄装置 (Ultrasonic cleaner)</li> <li>超純水システム (UP water system)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>爆着 (explosion bonding) でのニオブと銅の接合による空洞製造コストの低減</li> <li>インゴットからの切り出し技術の確立による空洞製造コストの低減</li> </ul>	

項目		超伝導加速器技術		
		クライオモジュール <Jefferson Lab>	クライオモジュール<Fermi lab>	クライオジェニックプラント<Jefferson Lab>
1. ILCの要求性能に対する達成状況、今後の見通し、技術的課題	ILCの要求水準に対する現在の達成状況、今後の見通し	<p>【LCLSII】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・40のクライオモジュールを2020年初頭の稼働に向けてFlabとJlabそれぞれで生産する。</li> <li>・生産体制としては、Fermi labとJ-labはSaclayと同規模の生産体制が存在する。全く同じ生産ラインを有しており、4日に1個作ることができる。</li> <li>・一つのクライオモジュールを一つのラボが平均6週間で組み立てる。2つのラボであることから、3週間に1台組み立てられる計算である。組み立てには試験も含まれている。</li> <li>・STFと同じ規格のクライオモジュールを製造する。</li> <li>・組み立てについては、1ヶ月に約1台が可能である。これは、クラス10のクリーンルームにおける作業を含むものである。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・J-labで検査された8つの空洞を用いたクライオモジュールの組み立てを行い、クライオモジュールとして31.5MV/mが達成された。</li> <li>・現在年間12のクライオモジュール試験に対応する規模を有する。</li> </ul> <p>【FAST】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・Fermilab Accelerator Science and Technology Facilityにおいて、20MeV/Vパワーの光線を上記クライオモジュールで6ヶ月間加速することに成功した。</li> </ul> <p>【LCLSII】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・17のCWクライオモジュールの組み立てを担当する予定。このモジュールの加速勾配は16MV/mである。</li> <li>・また2つの3.9GHzクライオモジュールの組み立ても担当予定。</li> <li>・Q値は、気温2K、20MV/mという状況下において、ILC仕様の約2倍を達成している。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Jefferson Labにおけるクライオジェニックプラントの研究はミンガン州立大学におけるFacility for Rare Isotope Beams (FRIB)用の研究によってなされている。</li> <li>・4.5Kまで冷却する cold boxを有し、50%以上のshield load及び、新たにデザインされた300-80Kの熱交換機を組み込んでいる</li> <li>・主要なコンプレッサーは、6つのコンプレッサーが設計されており、Ganni Cycle Floating Pressure Technologyを適用している</li> <li>・基本構造はCEBAFのCHL2と呼ばれるクライオジェニックプラントとほぼ同だが、メンテナンス性の向上、高圧フレームの強化、低圧ユニットの増設による冷却の効率化などが図られている</li> <li>・現在、4.5Kシステムについては開発が終了し、配管などの導入などを終て、2017年12月に利用可能となる</li> <li>・ILCに必要なとされる2Kシステムについては上記4.5Kと同様の技術を用いて達成され、2018年3月に利用可能となる予定</li> <li>・尚、この取り組みはWork for Others Agreementと呼ばれるDOEによる官民協力プログラムの元2015年に開始され、2018年12月までに続けられる。WFOは、2017年を通じて平均7名の常勤をカバーし、2018年は2人の常勤をカバーしている</li> </ul>
	ILCの要求性能を達成するための技術的課題	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実験室レベルでの2Kは既に達成されており、プラントレベルでの実施についても技術的難易度が高いわけではない。</li> <li>・ただし、上記FRIBでは1つのクライオプラントであるのに対し、ILCでは8つ(加速空洞ごとに4つ)のプラントが必要であるということから、プラントの構成や配置についてFRIBとは大きく異なるだろう。</li> </ul>
2. ILC用製造品やコンポーネントを日本で集約・結合する際の課題	場所・輸送に関わる問題	米国研究機関、民間企業では、加速空洞を日本で集約、結合する際の課題について議論がなされていない模様		
	性能・品質に関わる問題			
	規制・管理に関わる問題			
3. 製造品の量産化の課題と実現可能性	製造品の量産化の課題	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>・検査施設が他プロジェクト(例:PIP-IIやPIP-IIIなど)で使われる可能性があり、ILCに割けるかどうかは不明である</li> </ul>	-
	製造品の量産化の実現可能性	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>・今後2年間で、検査に必要な冷蔵容量を300L/hrから600L/hrに倍増させ、検査可能数を増やすことが可能である</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・現在、5名の常勤と設計のために2つのコントラクター、1名のFRIBデザイナー兼エンジニアを置いており、実際の製造については、外注が進んでいる</li> </ul>

項目		高周波技術	
		マルクス電源<SLAC>	ケーブル<CPI>
1. ILCの要求性能に対する達成状況、今後の見通し、技術的課題	ILCの要求水準に対する現在の達成状況、今後の見通し	<ul style="list-style-type: none"> <li>マルクス回路はそれぞれのユニットが並列で充電、直列で放電する仕組み</li> <li>コンデンサの数だけ電圧を上昇させることができ、結果として大型コンデンサを必要としないため、省スペース、省コスト化が可能</li> <li>最大電圧が4kV、最大電流を200Aの電源を試作</li> <li>最高電力についてはILC基準を満たすことに成功した。また、高電場のノイズ (high electric field noise) の影響は確認されなかった。</li> <li>各ユニットの重さは50ポンド以下 (約22kg) となるように設計し、メンテナンス性を向上。</li> </ul>	【LCLSII】 <ul style="list-style-type: none"> <li>必要とされている280のケーブルのうち約半分を受注・製造中 (CW)</li> </ul> 【XFEL】 <ul style="list-style-type: none"> <li>150の1.3GHzケーブルを製造</li> <li>必要とされている3.9GHzケーブルのすべてを受注・製造予定</li> </ul> 【TTF3】 <ul style="list-style-type: none"> <li>113の1.3GHzケーブルを製造中</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>XFELとTTF3で合わせて200以上のケーブルを製造予定</li> </ul>
	ILCの要求性能を達成するための技術的課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>長時間運転は実施しておらず、500~1000時間運転にとどまっている。</li> <li>2012年にDOEからの開発予算がなくなってしまったので現在電源そのものが稼動しておらず、再開のめども立っていない。</li> <li>LCLSIIはCWシステムであり、まったく異なるモジュレータを使用している。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>XFELとの違いはあるものの、ILC仕様のデザインは確定しており、技術的課題はない</li> </ul> 【以下SLACによる指摘】 <ul style="list-style-type: none"> <li>ケーブルの銅コートは柔らかいので、高圧クリーンが難しい。銅プレートは扱いが難しい</li> <li>Fabrication simplificationによる低コスト化。具体的にはE-beam weldingは高コストなので、これ以外の方法の開発が望ましい</li> </ul>
2. ILC用製造品やコンポーネントを日本で集約・結合する際の課題	場所・輸送に関わる問題	日本における集約・結合する際の問題点は認識されていない模様	日本における集約・結合する際の問題点が認識されていない模様
	性能・品質に関わる問題		
	規制・管理に関わる問題		
3. 製造品の量産化の課題と実現可能性	製造品の量産化の課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>配線部分の多くが外部企業によってなされたが、約5%に不具合が見つかるなど安定性に課題</li> <li>絶縁ゲートバイポーラトランジスタ (IGBT) とコンデンサについてはそれぞれ1つの企業から仕入れていた。特にIGBTについては仕入先のイギリス企業がプロジェクト中に中国の企業に買収され、供給が安定しなくなった。今後産業化を進める際には複数ベンダによる供給体制を構築する必要あり</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>現状毎月16~24台のケーブルを製造しているが、現状の設備では最大60台まで増産可能</li> <li>TDRで示された18000台を3種で割った、6000台という数字については、達成可能であるものの、大きな投資を要するもので、決して容易ではない</li> <li>特に現状の4~5倍となる人員の確保が非常に難しく、最低2年ほどの準備期間が必要</li> </ul>
	製造品の量産化の実現可能性	<ul style="list-style-type: none"> <li>外部の囲い部分 (Enclosure) について、SLACが自前で作成したが、この部分は比較的容易に外部委託可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>※Fermi labと量産化についての調査を実施し、トータルで7年ほどの期間があれば6000台のケーブルは製造可能であるという認識である。この7年には先述の2年の準備期間は含まれていない。</li> </ul>

項目	高周波技術		その他
	クライストロン <SLAC・CPI>		ビームダンプ<SLAC>
1. ILCの要求性能に対する達成状況、今後の見通し、技術的課題	ILCの要求水準に対する現在の達成状況、今後の見通し	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ SLACは、世界で唯一、クライストロンのデザインからプロトタイプ生産、組み立て、テストまでを担当可能</li> <li>・ SLACで必要とされた300機ほどを生産し、4000時間(約7年程度)稼働。機器の修理も実施</li> <li>・ CPIでは、ILC規格に最も近い、MBK (multiple beam klystron)としてVKL-8301A/Bを製造</li> <li>・ 周波数は1.3GHz、10MWピーク、(150Kw平均)のパワー、1.5msのパルスというスペック</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 2.2MWのパワーを持つビームのダンプについては1967年にSLACにて開発・製造された。非常に古いデザインだが、TDRデザインのスキームの元となっている。</li> <li>・ 液体シミュレーション上ではILCで発生する平均パワー約18MWのビーム用のダンプは可能という認識。</li> </ul>
	ILCの要求性能を達成するための技術的課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ XFELでは受注を勝ち取ることはできなかった(Thales と東芝が受注)ため、現在動いている施設で導入されている機器は存在しない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 現在、ビームダンプに関する研究はほとんど行われていない</li> <li>・ 水の放射能汚染が課題</li> <li>・ ビームが直接当たるチタン合金の窓(Window)が破壊されないように、窓の耐久性確保や緊急時にビームの軌道进行操作し、一点に熱量が集中しないようにするなどの工夫が不可欠</li> <li>・ 上記を実証するには、まずILC規格より小さなダンプシステムをテストする必要あり</li> </ul>
2. ILC用製造品やコンポーネントを日本で集約・結合する際の課題点	場所・輸送に関わる問題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ CPIでは航空輸送も海上輸送も対応可能。</li> <li>・ 特に大型機器については海上輸送を中心に欧州や中国への輸送経験がある。中国への輸送へは湿度への対応としてビニールで覆い、塗装がなされているので日本への輸送についても問題なし。</li> </ul>	ビームダンプは量産する必要がなく、日本における集約・結合する際の問題もない
	性能・品質に関わる問題	-	
	規制・管理に関わる問題	-	
3. 製造品の量産化の課題と実現可能性	製造品の量産化の課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 生産体制の拡大は比較的容易だが、品質検査がボトルネック</li> </ul>	ビームダンプは量産する必要なし
	製造品の量産化の実現可能性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ MBKについては3ヶ月に1台という生産体制だが、現在の設備体制などを鑑みるとこの数字を10に(月に3~5台ほど)することは「現実的(realistic)」</li> </ul>	

項目		ナノビーム技術	
		偏極電子源 <SLAC>	偏極電子銃<Jefferson Lab>
1. ILCの要求性能に対する達成状況、今後の見通し、技術的課題	ILCの要求水準に対する現在の達成状況、今後の見通し	<p>【LCLSII】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・LCLSII用に開発された電子銃は電子エネルギーがILC規格の10分の1である。この電子銃はRF電子銃と呼ばれ、偏極度が必要ないため、ILCとは大きく異なる仕様となっている。</li> <li>・具体的には、電子エネルギーが4.0GeV、平均電子ビームパワーが0.25MWで、双方共にILC仕様からは大きく下回るものの、2017年の後半に製造する予定。</li> </ul> <p>【SLC】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・SLCでは1990年より、偏極電子源を開発し、研究を進めてきた。GaAsのフォトカソードを用いた電子銃で、<math>4 \times 10^{10}</math>の電子数と、ILC仕様の2倍のチャージを誇っていた。周波数は120Hzである。ただし、電流は2<math>\mu</math>AでILCの約100分の1、電圧についても、120kVでILCの140~200からは見劣りする。</li> </ul>	<p>【CEBAF】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・2011年に以下のスペックを持つ電子銃を開発</li> <li>○電圧:200kV →TDR達成</li> <li>○偏極度:80% →TDR達成</li> <li>○フォトカソードからの平均電流:180<math>\mu</math>A(最大は4mA) →TDRは14.4mA</li> <li>○レーザーパルス:780nm →TDRの790+/-20の範囲内</li> <li>○レーザーパルスの繰り返し:1500MHz →TDRに明示されておらず</li> <li>・フォトカソードはGaAsPを利用</li> <li>・高電流×高電圧に耐えうるよう、<math>10^{-12}</math>にも及ぶ真空状態を構成しているほか、使用前に400°Cの熱で水素分子を除去している。この真空空間は電子銃が使用されていない状況でも継続される。</li> <li>・電荷量についてはCEBAFの仕様上1pC以下で、TDRの4.8nCとは依然乖離がある。</li> <li>・上記のレーザーパルスの繰り返しに関しては、3施設へ同時にビームを供給する設計が大きな影響を及ぼしている。(1施設あたり500MHzとなる。)</li> <li>・200kV→350kVのアップグレードを実験中。</li> </ul>
	ILCの要求性能を達成するための技術的課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・SLCで使われた電子銃について、長時間稼動にかかる実験は行われておらず、稼動エネルギーも低い。具体的には、SLCの約100倍となる電流にフォトカソードが耐えられるのかという課題については、実証機がないため実証されていない。</li> <li>・</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上記の電荷量に加え、以下の4点が指摘された。</li> <li>1. バンチ繰り返しレート(1.8MHz)の達成。 →100MHzであれば比較的容易に達成可能である。</li> <li>2. 上記にある4.8nCの電荷達成 →特に1nsという短いパルス内に収めることが難しい。</li> <li>3. 電子銃からの高電流(TDR規格では72<math>\mu</math>A)状態での稼動。 →電子銃内の真空状態が大きく影響する。この数値はフォトカソードからの電流とは異なる。また、バンチごとの電荷が影響するため、CEBAFの数値と比較することはできない。尚、SLACのSLCも2<math>\mu</math>Aであり、大きく見劣りする</li> <li>4. フォトカソードからのピーク電流(TDR規格は4.8A)の達成 →フォトカソードの質に左右される。現状のフォトカソードからこれほど大きな電流を生成した実験はない。</li> <li>・また、長期稼動にかかる研究は全くなされていない。</li> </ul>
2. ILC用製造品やコンポーネントを日本で集約・結合する際の問題点	<p>場所・輸送に関わる問題</p> <p>性能・品質に関わる問題</p> <p>規制・管理に関わる問題</p>	電子銃・陽電子銃については、量産する必要がない。	
3. 製造品の量産化の課題と実現可能性	<p>製造品の量産化の課題</p> <p>製造品の量産化の実現可能性</p>		

項目		ナノビーム技術	
		陽電子源<Argonne National Lab>(Fermiにて説明)	ナノビーム制御<SLAG>
1. ILCの要求性能に対する達成状況、今後の見通し、技術的課題	ILCの要求水準に対する現在の達成状況、今後の見通し	<ul style="list-style-type: none"> <li>2008年~09年、UK-Daresbury Labにて研究が実施され、ターゲットのスピードは2000rpmが最適と見いだすものの、09年の予算カットで研究がストップした</li> <li>2011年~13年、LLNLにおいて、ターゲットの温度管理をターゲット空間を真空に保ちつつ達成するシールの開発を進めるが、13年予算カットで開発が終了</li> <li>2015年、アルゴンヌ国立研究所にて、新たな方法論によりLLNLの課題に対応中、ターゲットの部材の候補と大気圧下での温度管理の可能性を示唆する研究は終了した。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ビーム制御技術についてはATF2におけるKEKとの共同研究が紹介された程度で米国研究機関による独自の開発は確認されなかった。【ATF2】※詳しい内容についてはKEKでも説明有</li> <li>ATF2は、ILCのスケールダウン版としてFinal Focus Systemをテストするプロジェクトである。</li> <li>Bunch Chargeが<math>\sim 0.16\text{nC}</math>についてBeam Sizeの平均が44nmで、標準偏差が3nmを達成。</li> <li>またフィードバックシステム(ビームチューニング、ビームポジションモニター、オンラインキャリブレーションなど)を開発し、ビームの安定化に寄与した。</li> </ul>
	ILCの要求性能を達成するための技術的課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>現在アルゴンヌにて実施されている研究は予算の関係上来年で降継続されるか不透明。</li> <li>上記の研究については、陽電子生成のための金属ターゲットを適切に管理するためのもので、アンジュレータを用いた陽電子生成そのものの実験ではない。アンジュレータを用いた偏極陽電子生成の実験はビームを実際に加速させなければ実施できないため、実証に向けたハードルは高い</li> <li>KEKにて、別方法で陽電子を生成する方法を実験中</li> </ul>	-
2. ILC用製造品やコンポーネントを日本で集約・結合する際の問題点	場所・輸送に関わる問題 性能・品質に関わる問題 規制・管理に関わる問題	電子銃・陽電子銃については、量産する必要がない。	制御システムについては量産する必要がない。
3. 製造品の量産化の課題と実現可能性	製造品の量産化の課題 製造品の量産化の実現可能性		

### 3) 日本の研究機関・企業への調査結果

項目	超伝導加速器技術 超伝導空洞 <三菱重工>
<p>1. ILCの要求性能に対する達成状況、今後の見直し、技術的課題</p> <p>ILCの要求水準に対する現在の達成状況、今後の見直し</p> <p>ILCの要求性能を達成するための技術的課題</p>	<p>(1) ILC向けのテスト空洞(1.3GHz TESLA-like超伝導加速空洞)を34台製造し、KEKに納入しており、機械的評価としても高圧ガス保安法に則り製造している。34台のうち1台はスピン加工技術検証向けに生産し、高エネルギー加速器研究機構(KEK)へ納入。KEKによって表面処理、縦測定による性能評価が実施された。</p> <p>(2) cERL(コンパクトエネルギー回収型ライナック)向け1.3GHz空洞を5台生産し、高エネルギー加速器研究機構へ2012年納入済みで、加速電界の目標20MV/mlに対し、加速電界27MV/mを達成している。</p> <p>生産性向上を目指し、電子ビーム溶接(EBW)用真空チェンバーに9連空洞4本の自動電子ビーム溶接技術を開発済み。</p> <p>・ILC向け超伝導加速空洞の要求性能に対する達成度: (1)ILC向け超伝導加速空洞の累計生産台数: 34台 (2)加速電界の達成状況: ⇒35MV/mの目標に対し#12-#26空洞の平均加速電界は35.2MV/m、生産台数の93%以上が目標を達成。 ⇒直近の#27-#30空洞は真空チェンバーの真空引き1回(1バッチ)の間に4空洞を連続製造。加速電界は最高34.9MV/m、平均29.2MV/mで2空洞がILCの仕様を満たした。</p> <p>開発当初から電子ビーム溶接の健全化に向け下記を実施: (1)赤道部、アイリス部溶接ビードの改善 (2)電子ビーム溶接前に化学研磨の実施 (3)空洞の電子ビーム溶接前の組立をクリーンルームで実施 (4)電子ビーム溶接機の排気系をオイルフリーに変更 (5)製品温度を非接触温度計で確認</p> <p>・超伝導加速空洞に関する「保有技術の状況と特徴」「処理能力」: (1)空洞製造 ・ハーフセトリム加工: 旋盤加工時の真空チャックによる工数削減 ・電子ビーム溶接: 電子ビーム溶接装置の真空チェンバーの真空引き一回(一バッチ)の間に4空洞を連続で自動溶接する技術 ・強め輪/フランジレーザー溶接: 空洞内面に影響しない強め輪/フランジのレーザー溶接による工期短縮・コスト低減 ・その他: 構造・材質の見直しによる部品点数、工数の削減 (2)表面処理 ・化学研磨: 製造工程における部品の化学研磨処理技術 ・電解研磨: KEK仕様による電解研磨装置製造実績あり ・その他表面処理: KEK仕様に対応可能 (3)検査・性能試験 ・KEKの指導により対応可能。</p>
<p>2. ILC用製造品やコンポーネントを日本で集約・結集する際の課題</p> <p>場所・輸送に関わる問題</p> <p>性能・品質に関わる問題</p> <p>規制・管理に関わる問題</p>	<p>(1) クライオモジュールの長距離海上輸送に関わる問題 ①海上コンテナ輸送の場合、船上へ/船上からの荷揚げ/荷下ろし時にクライオモジュールへ与える衝撃を緩和する機構の開発・実証が必要。陸送についてはEXFELプロジェクトで実績あり。 ②①に関係し、クライオモジュールの組立場所(ILCサイト、KEK、各メーカー等)の検討が必要。</p> <p>クライオモジュールの連結時のダスト侵入防止など、クリーンルーム外での作業の影響を排除する仕組みが必要。</p> <p>(1)高圧ガス保安法の合格証発行から完成検査までの有効期限 ②各国による高圧ガス関連法規が異なることに起因する問題 ①日本国内では高圧ガス保安法で規定される ②欧州ではEUの圧力装置指令で規定され、TUV社が設計・評価・承認までを受け持つ。 ③米国ではASME工業基準で規定され、設置される研究組織の長が承認する。日本でILCを建設する場合、欧州メーカーはTUVの指導により日本で高圧ガス保安法を満足するよう準備することが可能であるが、米国メーカーについてはTUV社以外に日本の高圧ガス保安法を満足するよう指導できる機関があるか確認が必要。</p>
<p>3. 製造品の量産化の課題と実現可能性</p> <p>製造品の量産化の課題</p>	<p>(1)低コストなクライオモジュール・空洞の設計の検証・確認 ・現在の欧州のXFELの設計は20年以上前の設計で、現時点の技術では必ずしも低コストとは言えない為、見直しが必要: 空洞、チタン製ヘリウム溜ジャケット、エンドグループ等の案はTTC2015で報告済み。 (2)低コストで効率的な空洞表面処理方法の開発 ・低コストの電解研磨液が使用可能なパルス電流電解研磨技術の開発: 野村鍍金が硫黄を用いないアルカリ電解研磨技術を開発中。 ・縦型電解研磨装置の開発: 空洞製造工程のほとんどが立てた状態での作業になるため電解研磨装置も縦型処理が可能になると作業効率が向上する (3)低コスト・安定性に優れたチューナーの開発: 簡易な中間検査手法の確立 (4)低コストで大量処理可能な電子ビーム溶接方法の開発: 電子ビーム溶接の真空チェンバーの真空引きに時間が掛かるため、一回の真空引き(1バッチ)の間に複数本の加速空洞を連続で電子ビーム溶接可能な装置開発が必要。当社では4本を1バッチで溶接できる自動化装置を実証済み。 (5)空洞の内面検査装置、電子ビーム溶接ビードの局所研磨装置開発: 既にKEKと京都大学が連携して装置化済み。量産に向けて貸与が望ましい。また、検査や補修に先駆け、欠陥場所、特にクエンチ位置を特定するため空洞表面温度分布計測装置、放射線計測装置、音響放射計測装置など (6)低コストで効率的な空洞縦測定装置の開発: 縦測定では空洞冷却時間が長いため複数の空洞を同時に冷却・電界計測可能な縦測定装置が必要 (7)その他装置の自動化: 周波数プリチューニング装置の自動化</p>
<p>製造品の量産化の実現可能性</p>	<p>ILC用の超伝導加速空洞の量産化に向けて、次のような手法の導入が考えられる。</p> <p>(1)製造ラインの自動化 ⇒製造工程のうち、ダンベルやエンドグループの一体電子ビーム溶接は可能。現在空洞4本バッチ処理装置を実証済み。 ⇒外観検査、周波数検査の自動化 (2)製造設備の高度化・大型化 ⇒ILC向けに表面処理レンビ・装置の最適化、当社への設置検討が必要。 ⇒電子ビーム溶接装置については仮に三菱重工が製造する本数を2000~3000台と仮定すると、現状保有する装置に加え、小型あるいは中型の電子ビーム溶接装置を追加することで対応可能。 (3)生産労働力のシフト制の導入: ⇒製造工程は、2あるいは3シフトにより生産量を増強できるが、作業毎に待ち時間が異なり、作業工程、製造装置配置、作業員の複数作業掛け持ちを合わせて全体で最適化が必要。</p> <p>・ILC建設の前に量産技術が確認できる数百台規模の加速器建設プロジェクトが必要</p> <p>(1)製造ラインの自動化: 電子ビーム溶接における4空洞バッチ処理装置を実証済み (2)製造設備の高度化・大型化: ILC向けに表面処理レンビ・装置(縦型EPなど)の最適化については国内の研究機関で検討をお願いしたい。 (3)生産労働力のシフト制の導入: 最適な作業工程・製造装置配置・作業員の作業分析を実施し量産ラインを設置する必要がある。</p>



項目		超伝導加速器技術 超伝導加速空洞 <KEK>
	ILCの要求水準に対する現在の達成状況、今後の見通し	<p>(1)E-XFEL空洞の製造時性能(加速勾配)のバラつき等の原因特定の見証の状況</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>生産のオンラインのものに対しては、間接的な統計分析による原因追求の解析が行われている。</li> <li>①メーカーによる加速勾配性能の分布の違いの見証はされている(RIとZanon)</li> <li>RI社のほうがILCのレンジに忠実であり電解研磨を2回やっている。その結果、Zanon社に比較して空洞の性能は出ている。Zanonは、最初はEPをやりますが、最後はBCP(化学研磨)のため、性能が若干落ちている。</li> <li>②性能を決めている原因の割合分布により、性能低下の原因の分析はされている。</li> <li>③再テスト空洞のHPR(高圧洗浄)後の性能分布変化と処理による原因の割合分布の変化の分析もされている。</li> <li>④オフラインでの空洞製造(ILC-Higrade)がDESYで行われている。20~30台つくっており、その製造過程で、性能制限理由の追求(研究)が行われている。しかし、ILC-Higrade空洞は、E-XFELと同じプロセスを過らせず、E-XFEL用空洞の性能低下の原因については、間接的な検証と言わざるを得ない。</li> </ul>
1. ILCの要求性能に対する達成状況、今後の見通し、技術的課題	ILCの要求性能を達成するための技術的課題	<p>(1)加速空洞の性能低下の原因についての見解</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>原因特定の見証が間接的であるので確定的なことは言えないが、推定できる原因は以下のとおり。</li> <li>①EPの方がCPより性能が高くなるので、ニオブ内表面の平坦性や欠陥があった場合の欠陥の助長性の辺りで両者の違いが出ていると推測</li> <li>②2回目のHPR処理で性能が上がるため、空洞内表面にパーティクルが付着していると予想</li> <li>・実際、日本で作った空洞にはこれらの表面の欠陥がでている。</li> <li>・電解研磨すると必ず硫黄(パーティクル)が付着する。DESYではEPを行った後に、エタノールで洗っているが、硫黄はエタノールでは取りにくい。日本(KEK)側はそれを指摘しているが、DESYはエタノールプロセスを変えない。硫黄のパーティクル付着も原因として怪しい。</li> <li>・日本や米国は、硫黄が取れる界面活性剤(洗剤)をつかっている。</li> <li>・結論:ニオブ内表面の平坦性(欠陥)とパーティクル付着が疑われるが、確定的なことは言えない。</li> </ul> <p>(2)空洞の性能低下とクリーンルームのクリーン度の関係についての見解</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>加速空洞のクリーンルームには人が入って作業するので、人に付着したゴミが出ることは間違いない。しかし、それをロボット化できるかと言うと、それだけの規模ではない。</li> <li>・ISO4等のクリーンルームのレベルは、検査で決めている。検査機を置いて、人はそこから離れた状態で検査している。検査結果がよくても、人が入って作業をすれば途端にゴミが増える。CEA-IRFU(Saclay)では、空洞の接続作業中には、その上にもものを置かない、その上で人も作業してはいけないというルールを設定した後に性能があがった。</li> </ul> <p>(3)空洞の性能低下をもたらすパーティクル問題以外の欠陥についての見解</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>性能低下の問題には、パーティクル以外にも製造上の欠陥が確実にある。例えば、電子ビーム溶接が不完全でニオブとニオブがきれいに溶けず、ところどころにポイドができるとそれが表面に現れクエンチを起こす。こうした問題もある。</li> </ul>
2. ILC用製造品やコンポーネントを日本で集約・結合する際の課題点	場所・輸送に関わる問題	
	性能・品質に関わる問題	
	規制・管理に関わる問題	
3. 製造品の量産化の課題と実現可能性	製造品の量産化の課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・空洞の性能低下の原因追究は、工業化(量産化)の前にやるべきである。XFELの空洞についてDESYでは、原因特定の見証を実際には一部やったが、量産化に入った段階では、そのような検証をやっている余裕はなく、検査の結果ダメだったものしか解析していない。</li> <li>・日本の企業であれば原因の究明は徹底してやるのに対して、ヨーロッパの企業は夫雑扱ではないかという点についてはその通りであるが、欧州の空洞製造企業は中小企業でビジネス規模も小さいのでそこまでやるのは厳しいという状況にあるのではないかと。</li> </ul>
	製造品の量産化の実現可能性	

項目		超伝導加速器技術	
		クライオモジュール(アセンブリ) <三菱重工>	クライオモジュール <KEK>
1. ILCの要求性能に対する達成状況、今後の見通し、技術的課題	ILCの要求水準に対する現在の達成状況、今後の見通し	<ul style="list-style-type: none"> <li>・KEKにて、Fermilab、INFN、DESY、SLACの国際協力のもと、ILC向けS1-Globalプロジェクトとして2010年にクライオモジュールCM-A、CM-Cでビーム加速試験を実施。その後KEKのILCに向けてSTF2プロジェクトを納入し、検証済み。</li> <li>・サポートポストの低コスト化と耐荷重についても実証済み。</li> </ul>	クライオモジュールの性能低下(Degradation)への対応状況 <ul style="list-style-type: none"> <li>・空洞単体→モジュールのDegradationの原因特定の検証については、生産のオンラインのものに対して、直接的検証は行われておらず、間接的な統計分析による原因追求の解析が行われているのみである。</li> <li>・直接検証には、モジュールを分解して空洞の中を見る必要があり、分解プロセスの中でゴミ等の混入があり得るので、直接検証による原因特定は難しい。</li> <li>・これまでは、モジュール内の空洞位置による加速勾配性能劣化の違い、性能を決めている原因の割合分布、クリーンルーム内作業手順の違いによる性能劣化の違いなど、間接的な検証である。その中では、作業手順を変えた結果性能が良くなったという報告は一部されている。</li> </ul> (2)複数のモジュールの連結による性能低下と対応状況 <ul style="list-style-type: none"> <li>・複数モジュールの連結によるDegradationについては、数台規模のstudyは、DESYのFLASH加速器で行われており、その技術に基づいてE-XFELの建設が行われているので、E-XFELにおける成果が技術蓄積された結果となる。</li> </ul>
	ILCの要求性能を達成するための技術的課題	特になし	(1)空洞→モジュールのDegradationの根因についての見解 <ul style="list-style-type: none"> <li>・原因特定は確定的ではないが、考えられる原因として以下が挙げられる。</li> <li>①パーティクル混入しやすい作業工程の問題(例えば、空洞接続の際に上で作業した、上から覗き込んだなど)</li> <li>②組立手順時のミスや真空排気手順時のミスなど手順の遵守が未成熟であったこと</li> <li>③カップラー内面の銅メッキ不具合の発生の問題(この問題はほぼ解決済み)</li> </ul> 結論:モジュールのDegradationの主な原因としては、パーティクルの混入が疑われる。 (2)空洞→モジュールのDegradationの解決策についての見解 <ul style="list-style-type: none"> <li>①改善されつつあるE-XFELのモジュール組立の作業工程手順を、ILCの各ハブラボに徹底させる。</li> <li>②各ハブラボは、E-XFELの組立手順と同時に、クリーン度に関連する部品(ボルト・ナット等)および治具の調達と扱いに習熟する。</li> <li>③各ハブラボは、部品表面に発生するフレークおよびパーティクルを最小にする技術を採用する。(ボルトの一つ一つに電解研磨をかけるなどの対応も必要になるかもしれない)</li> </ul> (3)複数モジュールの連結による性能低下への対処策についての見解 <ul style="list-style-type: none"> <li>①E-XFELの成果を待つ。完成後に工学的にどうであったかの検証が可能</li> <li>②LCLS-IIの工程にはE-XFEL成果がfeedbackされるため、LCLS-IIの成果が出ると同時に検証が可能</li> <li>③KEKのSTFのクライオモジュールを利用したモジュール連結のstudyはできるが、規模が小さい(数台程度の連結)ので、統計的には解析できないなど制約あり</li> </ul>
2. ILC用製造品やコンポーネントを日本で集約・結合する際の問題点	場所・輸送に関わる問題	超伝導加速空洞と同じ	
	性能・品質に関わる問題	超伝導加速空洞と同じ	
	規制・管理に関わる問題	超伝導加速空洞と同じ	
3. 製造品の量産化の課題と実現可能性	製造品の量産化の課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・組立方法</li> <li>・サーマルシールドの低コスト化</li> <li>・磁気シールド</li> <li>・現地溶接の低減</li> <li>・構造への接触熱伝導の採用</li> </ul>	(1)ILCクライオモジュールの量産化(日本で年間100台)の体制 <ul style="list-style-type: none"> <li>・日本におけるクライオモジュール部品の製造はメーカーに依頼することになる。クライオモジュールの組立には、その前段階として企業が仕上げた超伝導空洞の高電界試験があり、空洞内部のクリーン度を保ったまま組み立てていくために大型クリーンルームとモジュール組立治具が必要である。</li> <li>・それらインフラはハブラボが調達し、試験、組立は基本的にはハブラボが行うことになる。これは、基本的には現在のCEA-Saclay(E-XFEL用のモジュールの組立)のやり方と同じである。組立の作業員は業務委託等により企業から調達することになる。</li> </ul> (2)量産化の技術面・運用面の課題 <ul style="list-style-type: none"> <li>・クリーンルーム内で使用する治具、部品および排気システムを、クリーン度を上げて管理し、クリーンルーム内組立作業の工程を手順通りに高品質に行うように作業員を訓練し管理することである。E-XFELの技術やLCLS-IIの技術をベースにしたクリーン技術が使われることになる。</li> </ul>
	製造品の量産化の実現可能性	・技術の検証後採用までに約2年間と推定	

		高周波技術
項目		モジュレータ(マルクス電源) <KEK>
1. ILCの要求性能に対する達成状況、今後の見通し、技術的課題	ILCの要求水準に対する現在の達成状況、今後の見通し	<p>・現在、世界に存在するILC向けのマルクス型電源としては、「SLAC-P2電源」、「チョッパ型マルクス電源」、「DTI電源」の3種類がある。このうち、KEKではDTI電源とチョッパ型マルクス電源について検証及び開発を行なっている。</p> <p>・原理的にはそれぞれの電源は、ILC・TDRの仕様を満たすとされている。各電源の大きな違いは、ユニット/セルの数、サグの補償方式、装置の電気的絶縁方法(気中、油中)である。</p> <p>【チョッパ型マルクス電源について】</p> <p>・チョッパ型マルクス電源は、現在KEKで開発中の技術であり、セルがチョッパ回路のみで構成し、コストの削減を目指したものである。</p> <p>・同電源のメリットは、構成する素子数が少なく回路動作も単純であること、波形制御はパルス幅制御だけの簡単なものであること、小型化・低価格化が可能であること、である。</p> <p>・KEKにおける同電源の開発状況は、現在ユニットを2台製造し性能について実証実験中。2016年春にクライストロン電源1台分の20ユニット(80セル)を製造し、電源として正常に動作するかの実証を行い、その後総運転時間で千時間程度の連続運転試験を行なう予定</p> <p>【SLAC-P2電源、DTI電源について】</p> <p>・SLAC-P2電源32ユニット(32セル)は既に完成し動作実証も完了しているが、長期連続運転するための高エネルギー実証プロジェクトは停止しており、数千時間の稼働に耐えうるかの実証は行われていない。</p> <p>・DTI電源(初号機)は、KEKのSTFで試験運転が行われていたが、途中で補助セルのIGBTが短絡故障して本格的な稼働には至っていない。</p>
	ILCの要求性能を達成するための技術的課題	<p>・KEKチョッパ型電源の技術開発上のポイントは、高性能の半導体スイッチ等のハードウェアの開発と、それを制御するソフトウェアの開発にある。</p> <p>・半導体スイッチについては、高速で正確にオン・オフを安定的に実現することが技術的課題。また、半導体素子自体の改善(高速化、大電流化、高耐圧化、低損失化)も不可欠</p> <p>・コンデンサなどのオン・オフや回路の接続・遮断等の制御を行なうソフトとハードが一体化した、パワーエレクトロニクスの開発も課題</p>
2. ILC用製造品やコンポーネントを日本で集約・結合する際の問題点	場所・輸送に関わる問題	
	性能・品質に関わる問題	
	規制・管理に関わる問題	
3. 製造品の量産化の課題と実現可能性	製造品の量産化の課題	<p>・KEKが開発しているチョッパ型電源の性能は、高性能の半導体スイッチ(チップ)の開発にかかっている。</p> <p>・最近では、日本はSiC(シリコンカーバイド:炭化ケイ素)の開発を行なっている。一部非常に高耐圧かつ高速でロスが少ない半導体チップが市販されるようになってきているがまだ不十分</p> <p>・この半導体チップは、他に用途はあまりなく、マルクス電源用に開発しなければならない。このため、現時点では量産品ではなくコスト(価格)の高いことが問題</p>
	製造品の量産化の実現可能性	

項目		高周波技術	
		クライストロン <東芝電子管デバイス>	カブラー <東芝電子管デバイス>
1. ILCの要求性能に対する達成状況、今後の見通し、技術的課題	ILCの要求水準に対する現在の達成状況、今後の見通し	<ul style="list-style-type: none"> <li>・同社は、E-XFEL用の10MW、1.3GHzマルチビームクライストロン(MBK)をDESYに納入した。同社は、このクライストロンは同様の仕様にてILCでも使われる(仕様がほとんど同じ)と認識している。</li> <li>・ILCのMBKのスペックは、120kV、140A、1.65ms、5Hzとなっている。一方、同社がDESYに納入したMBKの仕様は、ILCのスペックと微妙に違っているが、調整によって対応可能である(多少の設計変更が必要となるが、大幅な設計変更は必要ない)。基本的な原理等は全く変える必要はない。同社のMBKの技術は、基本的にはILCの要求性能を満たしているといえる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・東芝電子管デバイスはカブラーの試作品をLALへ納入し、性能確認評価を完了しているが、最終的にE-XFEL向けの量産カブラーの納入実績はない。</li> <li>・技術的には、同社のカブラーは、E-XFELで求められている性能スペックを十分に満たしている。ILCのカブラーもE-XFELのカブラーと同様であるとするなら、同社はILCへ十分対応できる。</li> </ul>
	ILCの要求性能を達成するための技術的課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>&lt;一般的な課題&gt;</li> <li>・ ILCの電源仕様が決まっている場合には、それに合わせてMBKの設計を多少見直す可能性はある。</li> <li>・特に、マルクス型電源を前提とする場合には検証する必要があるが、電源が何型であれ、クライストロンにきちんとした波形が来れば問題ない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・技術的な課題は特にない。</li> </ul>
2. ILC用製造品やコンポーネントを日本で集約・結合する際の問題点	場所・輸送に関わる問題		
	性能・品質に関わる問題		
	規制・管理に関わる問題		
3. 製造品の量産化の課題と実現可能性	製造品の量産化の課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・同社ではMBK量産の潜在能力は持っているが、年間20台を超える生産量になると、他プロジェクト向け受注量を前提とする設備増強が必要となる。</li> <li>・MBKの量産化に向けて増強が必要となる主要な設備・機器は、真空排気ベアキング装置と試験装置(MBK専用のテストスタンド、エージング工程も含む)である。これらの設備設置には、ある程度大規模なスペース、高さが必要となる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・カブラー890台(※)を1社で生産すると仮定した場合、同社の現行の工場設備では対応できない。カブラー組立には高いレベルのクリーンルームの設置が必要になる。その他、大型生産に向けて、電子ビーム溶接設備、真空ろう付け設備が必要になる。但し、これらはそれほど大規模な設備ではなく、またカブラー専用の特別なものではないため、社外パートナー会社や加速器研究所との協業を含めることで対応可能と考えている。</li> <li>・カブラーを量産する場合、銅メッキがポイントの一つとなる。一般工業製品向け銅メッキとは全く異なるレベルの品質が要求され、金属表面処理、メッキ装置の各種パラメータにノウハウが必要となる。</li> </ul> <p>※ILC用カブラー16,000台を3極で分担し、6年間で製造すると年間1極当たり890台</p>
	製造品の量産化の実現可能性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・同社はILC計画への参画を前向きに捉えているが、設備増強に関しては、経済的合理性(ピーク生産期間後対応含む)を考慮し判断したいと考えている。</li> <li>・また、ILC建設地域にある加速器研究所設備を活用して、エージング、試験を並行して行う事も納入効率化に繋がると考えている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>&lt;以下は、一般的な課題&gt;</li> <li>・カブラーは、平行して複数台を流せるため製造だけであれば、それほど高いハードルではない。しかし、カブラーは製造後に1台ずつコンディショニングが必要になり、時間と手間がかかる。</li> <li>・世界でカブラーをつくれる会社は同社を含め限られる。ILC後の需要も不透明であるので、1社だけでは設備投資が大変になる。</li> </ul>

項目		導波管、ダミーロード、アイソレータ <日本高周波>	LLRF <日本高周波>
1. ILCの要求性能に対する達成状況、今後の見通し、技術的課題	ILCの要求水準に対する現在の達成状況、今後の見通し	<p>【導波管】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・クライストロンから出てすぐの導波管はSF<sub>6</sub>(六フッ化硫黄)で加圧する見込みだが、ILCでは5MWのクライストロンが想定されているため導波管を真空に引く必要はない。真空を引くとすると、導波管の仕様が全く異なり、値段も桁違いになる。ILCも当初X-bandを使うという案があり、日本高周波で真空を引ける導波管を試作したが、その後、真空にしない案が採用された。</li> <li>・SACLAで求められる精度と比較してILCの要件は容易である。</li> </ul> <p>【ダミーロード】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・STF向けの部品の製造実績があり、STF部品はILCで求められる要求を一通り達成しているが、ダミーロードについては不具合があり、耐電力についてまだ達成できていない。他メーカーで成功したという話を聞いている。</li> </ul> <p>【アイソレータ】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ダミーロードとサーキュレータを組み合わせたものの名称。クライストロンの保護をする。</li> </ul>	<p>【LLRF(Low-level RF system)】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・J-PARCのLLRFを製造した実績あり。STFのLLRFシステムはJ-PARCを参考にして作られているので、ILCと同じ要件であるSTFのLLRFの技術は既に確立されている。</li> <li>・LLRFは様々なパーツの位相を合わせる大変重要な機能を持っているが、ILC用のLLRFはパルスが長いのできほど難しい技術ではなく、既存の技術でできるというよい。</li> <li>・LLRFを製造可能な企業は日本高周波を含めて国内に5~6社存在する。海外でも、それぞれの国にLLRF製造可能な企業があると思われる。</li> </ul>
	ILCの要求性能を達成するための技術的課題		
2. ILC用製造品やコンポーネントを日本で集約・結合する際の問題点	場所・輸送に関わる問題	・導波管や素子の工場から現地までの輸送は特に問題ない。4tトラック等で北上まで陸送が可能。	
	性能・品質に関わる問題		
	規制・管理に関わる問題		
3. 製造品の量産化の課題と実現可能性	製造品の量産化の課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・以前KEKの要請でILC向けの大量生産にかかる設備投資を試算した。ILC向けの導波管及び素子では、週産25台の製造が必要であり、人員を100人規模で増やさなくてはいけない。また、人員増とともに測定治具(ネットワークアナライザ)を揃える必要がある。</li> <li>・日本高周波で使用しているネットワークアナライザは、様々なコンポーネントの測定が可能。特に特殊な機器ではないが高級な測定器であり、初期投資がかかる。</li> <li>・導波管や素子については、製造はもちろんであるが、検査と調整に時間がかかる。現在は1台の検査と調整に1日を要しているが、調整に割く時間が少なければ生産性を上げる(1日当り3~5台)が可能である。</li> </ul>	
	製造品の量産化の実現可能性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・年間の製造可能数を算出するのは難しい。例えば、KEKのSTF用のアイソレータについては、既存設備で12台程度を製造し、4~5ヶ月かかった。</li> <li>・フェライト等の材料の調達に2~3ヶ月かかる。手作りで作っているため、現状の設備では年間数十個が受注の最大数である。</li> <li>・国内では1,000台規模の量産化の環境は整っていない。</li> <li>・製造ラインを設置するスペースや、溶接ではなく鋳物にするなどの対応も必要になる。現状では量産化のための人員がいない。鋳物でやると、治具を使った作業になり熟練した技術者でなくてもできるようにするため、技能を持った人員を揃えることができれば量産化への対応は可能。</li> <li>・導波管のフランジも鋳物で作れば自動溶接よりも安価になる可能性がある。</li> </ul>	

	ビーム技術	
	スピニ偏極電子源 <KEK>	陽電子源(ヘリカルアンジュレータ) <KEK>
ILCの要求水準に対する現在の達成状況、今後の見通し	<ul style="list-style-type: none"> <li>電子源の開発は、フォトカソード開発、電子銃本体の開発、フォトカソード励起のためのレーザー開発から成る。</li> <li>①フォトカソードの開発について; <ul style="list-style-type: none"> <li>GaAs-GaAsPの組合せの超格子カソードを使うことによって、100個あたり1個(スピニ偏極度<math>\sim 90\%</math> &amp; <math>QE &gt; 1\%</math>)以上の量子効率を実現し、2014年に論文として発表された。</li> </ul> </li> <li>②電子銃の開発について; <ul style="list-style-type: none"> <li>2008年まで名古屋大学で200kVの電子銃開発を行っていた。(2009年よりこの200kV電子銃はKEKにある。)</li> <li>JLabではinverted gunの開発が進んでいる。</li> <li>名古屋大学の実験では、200kV電子銃に装着されたGaAs-GaAsPカソードから、パンチあたり5.6nCのビームを生成可能(ILCではパンチあたり4.87Cが要件)。</li> <li>JLabではカソードの寿命について積極的に実験実施。ILCの条件に当てはめて50 uAで約3週間の運転に相当する100クーロン以上のカソード電荷寿命が得られたようである。</li> </ul> </li> <li>③レーザー開発について; <ul style="list-style-type: none"> <li>カソード励起用のマルチパンチ時間構造をもつレーザーシステムの開発がSLACで2010年頃まで行われていたが、その後の開発の進展の報告は無い。</li> <li>DESYで開発中のFLASHのFEL seeding用レーザー(OPCPA)の技術がILCにとって有用と認識されている。</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ILCのアンジュレータ部分は全長150<math>\sim</math>200m、個々のアンジュレータは1.75m。</li> <li>①陽電子が蛇行する際の渦の1巻き長さ: <math>\lambda = 1.15\text{cm}</math></li> <li>②軸上の磁場: <math>B = 0.86\text{T}</math></li> <li>③ビームが通る穴の直径: 約6mm</li> <li>英国STFCの Cockcroft研究所で、1.75mのアンジュレータのプロトタイプ2台の製造実績あり。ILCの実機と同じ大きさで、このプロトタイプ2台を収めたモジュールはILCのプロトタイプと言って差し支えない。</li> <li>アンジュレータ方式の原理実証実験では、100GeV以上の電子ビームが存在しないため、当時の最高エネルギー(46.6GeV)の電子ビームであったSLACのFFTB (final focus test beam)を使った。また、46.6GeVの電子ビームで陽電子を作るには、コイル一周分のピッチが1.15cmではなく、2.54mm以下である必要があったため、実証実験のために口径1mm以下のコイルを作成し、偏極陽電子の生成に成功した。生成した陽電子の量は少ないが、原理は実証済み。</li> </ul>
ILCの要求性能を達成するための技術的課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>ILCの電子源を実現する上での、現時点での技術的課題は、レーザーの開発である。特に、ILCのエネルギーの幅にぴったり合った780nmの波長のレーザーを作ることが課題である。780nmという波長は、他に需要がないので、R&amp;Dのための資金調達が難しいという問題を抱える。世界の開発状況は以下のとおりである。</li> <li>SLACではMode-lockレーザーと再生増幅器を用いて必要なパルス幅を実現する計画があったが、2006年のDOE Review以降の進展に関する資料は不明。</li> <li>DESYには増幅システムOPCPA(optical parametric chirped-pulse amplification)があり、その仕様はILC偏極電子用レーザーの仕様にかなり近い。</li> <li>①波長: <math>\sim 800\text{nm}</math>(<math>\Delta\lambda \sim 50\text{nm}</math>)、②線速: 3.25 MHz、3.5 uJ/pulse</li> <li>③パルス幅: <math>\sim 30\text{ fs}</math>、④パルス幅: ストレッチャーで数100ps程度まで伸ばせる見込み。</li> <li>電子銃とカソードについてはSLCの頃から技術的に完成されていると思ってよい。改良は続いているが、さらに優れたものを作っているだけで、この時点でILC用の電子銃を作る技術がないということではない。ILCと全く同じ仕様のもが存在しないというだけで、資金さえあれば製造が可能である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>アンジュレータの技術は、計算上は実現可能であるが、ビーム試験が行われていない。Cockcroft研究所のプロトタイプではビーム試験を行っていない。現状では6mmのビームパイプを通るビームを作ることが難しいため、試験を行うことが困難。過去にKEKのATFで実施計画があったが実現していない。</li> <li>プロトタイプの測定の結果、磁場については必要な値を30%上回ったが、磁場精度はやや不足。ILCの要件を満たすためには、もっと正確な渦を作らなくてはならない。</li> <li>真空中で標的を回す実験は成功していない。標的の冷却技術の習熟までには、最低2年かかる見込み。実現可能性は高いが、今のところ100%の確実性は保証できない。</li> <li>アンジュレータ同様、標的もビーム試験を行うことが難しい。ビーム試験ができなければILCが完成するまで性能が保証できないことになり、ビームの代わりにレーザーを用いて実験するなどして、説得力のある説明をしなければならない。検討されているいずれの方式も消耗品として交換が必要な部分が出てくるが、高放射線下の装置のため、部品の交換はすべてリモートで行わなければならない。</li> </ul>
場所・輸送に関わる問題		
性能・品質に関わる問題		
規制・管理に関わる問題		
製造品の量産化の課題		
製造品の量産化の実現可能性		

項目	ビーム技術	
	陽電子源(電子駆動方式) <KEK>	電子・陽電子ダンピングリング<KEK>
1. ILCの要求性能に対する達成状況、今後の見通し、技術的課題	<p>ILCの要求水準に対する現在の達成状況、今後の見通し</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・KEKでは、アンジュレータ方式の陽電子源開発が、ILCの建設開始までに完了する可能性は高いが100%とは言い難いと判断し、万が一うまくいかなかった場合のためのバックアップスキームとして「電子駆動(e-driven)方式」を研究開発している。</li> <li>・電子駆動方式は、常伝導ライナックにより、数GeVの電子ビーム(drive electron beam)を作り、それを金属標的に当てて陽電子を生成する方式である。同方式は、既に実証されているスタンダードな技術であり、KEKには多年にわたる技術的経験と蓄積がある。</li> <li>・現在までの進捗状況は、以下のとおりである。 <ul style="list-style-type: none"> <li>■標的: 回転速度5m/s 各種予備試験完了。2015-16年度には標的のモデル製作</li> <li>■陽電子収量(シミュレーション): <math>3 \times 10^{10}</math>/バンチを確保</li> <li>■設計: AMD、Booster linacの設計必要</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ダンピングリングでの超低垂直エミッタンスの技術は世界的に成熟している。ILCの要件をすべて満たすダンピングリングは現状存在しないから実証できていないということでは無い。周辺技術は充分であるというのが世界的な共通認識。</li> <li>・陽電子リングの電子雲不安定性軽減技術は国際的な研究チームによって大掛かりな研究が行われ、Super-KEKBでも採用されてさらなる研究開発がされている。</li> <li>・<math>0.5 \times 10^{-7}</math> Paの真空で20ターン程度のfeedbackは実現可能。Super-KEKBでも実証済み。最先端のダンピングリングが実際にこの条件で稼働している。</li> <li>・RF加速系によりシンクロトロン振動が励起されるということはほぼない。充分な精度でコントロールされており、様々な施設のダンピングリングで実証されている。</li> <li>・ILCのダンピングリングの入出射システムにおける個別パラメータについては、ATFでビームによる試験開発が行われ、長期信頼性以外は全て達成された。</li> <li>・特定のバンチ間隔でダンピングリングに入れて、特定のバンチ間隔でリングから取り出す実験をATFで実施済み。技術としては既に実証されている。</li> </ul>
ILCの要求性能を達成するための技術的課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・陽電子生成ターゲット(陽電子生成標的)は類似のものが過去にはないため、ターゲットの開発実証が課題</li> <li>・KEKでは、ターゲットの実機大の試作機を作って回転と高真空の維持が両立することを実証する試験を推進中</li> <li>・重要課題は、回転体の軸シール技術。計算上は可能であるが、高い放射線下でシールしなければならない点について実証が必要。また、標的は高放射線下で動かす装置であるため、回転体のシール材(液状)が劣化して真空漏れを起こす可能性がある。この点についても、実証が必要(これらの実証は、KEKで進行中、または実施予定)。</li> </ul>	
2. ILC用製造品やコンポーネントを日本で集約・結合する際の問題点	<ul style="list-style-type: none"> <li>場所・輸送に関わる問題</li> <li>性能・品質に関わる問題</li> <li>規制・管理に関わる問題</li> </ul>	
3. 製造品の量産化の課題と実現可能性	<ul style="list-style-type: none"> <li>製造品の量産化の課題</li> <li>製造品の量産化の実現可能性</li> </ul>	

項目	ビーム技術	
	ビームモニター・フィードバック技術<KEK>	ビームダンプ <KEK>
1. ILCの要求性能に対する達成状況、今後の見通し、技術的課題	ILCの要求水準に対する現在の達成状況、今後の見通し	<ul style="list-style-type: none"> <li>ILCでは1<math>\mu</math>m程度の精度をもったビームサイズモニタを搭載予定であり、その精度で測定可能なシステムは、既に確立している。</li> <li>ATF1に搭載されているビームサイズモニタ               <ol style="list-style-type: none"> <li>レーザーワイヤ測定器(パルス): 強いレーザーを一瞬だけ電子ビームにぶつけて強度分布を測る。</li> <li>レーザーワイヤ(CW): ミラーで挟んだ光のcavityの中で電子ビームを行ったりきたりさせて、そこにさらにレーザーを継ぎ足し、強度が高くなったレーザーを用いてビームサイズを測る。</li> <li>XSRビームサイズモニタ: X線領域のシンクロトロン放射光を用いてCCDで計測する。リアルタイムで画像を認識しビームの大きさを測るので、計測スピードが非常に速い。</li> </ol> </li> <li>ビーム位置モニタについては、ATF2では約40台の空洞型BPMを設置し、測定を行っている。非常に高い再現性で実証されている。</li> <li>ATF2には上流と下流にフィードバックシステムが搭載されており、下流にあるものが2nmの精度のBPMを必要とするシステム。このフィードバックシステムによって、ビームのジッター(揺れ)を抑えられることが実証されている。ATF2のフィードバックシステムは130nsecで反応しており、ILCのバンチ間隔は300~530nsecなので、十分な応答が実現できている。</li> <li>衝突点のフィードバックについて、2nm分解能のBPMは存在しないが、現状のシステムで実験を行った結果400nmだったジッターを47nmまで下げることができた。47nmという結果はBPMの分解能に依存しているため、高分解能のBPMを搭載できればデモンストレーションをさらにクリアにできる。ILCのための技術開発は分解能を下げるのが目的ではないため、フィードバックの技術の基礎は実証できている。</li> </ul>
	ILCの要求性能を達成するための技術的課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>ILCでは、衝突するビーム(陽電子)があるので狙った場所で衝突したかどうかをビーム粒子の散乱で計測するが、ATF2はコライダーではないため、2nmの精度のある高分解能ビームポジションモニタでの測定が必要となる。この精度のBPMの開発は大変難しいため、現在までに達成している精度で確認実験が制限されている。ATF2で2nmの安定度を直接測定したいと言うことではまだ出来ていないが、ILCに必要な性能は基本的に開発されており、現在はさらなる高度化の追求を行っていると思われる。</li> </ul>
2. ILC用製造品やコンポーネントを日本で集約・結合する際の問題点	場所・輸送に関わる問題	
	性能・品質に関わる問題	
	規制・管理に関わる問題	
3. 製造品の量産化の課題と実現可能性	製造品の量産化の課題	
	製造品の量産化の実現可能性	



## IV. 他の国際共同大型プロジェクトのリスク要因調査

本調査では、過去に実施及び現在進行中である代表的な国際共同大型プロジェクトについて、プロジェクトの計画及び実施期間において、当初から想定することができず、コストの超過やスケジュールの遅延を発生させてしまった事例や、当初想定していた以上のコストの超過やスケジュールの遅延を発生させてしまった事例について、文献調査にて、整理を行った。

対象とした国際共同大型プロジェクトは、次のとおりである。

国外：CERN、ITER、ISS、すばる望遠鏡、ALMA、  
国内：SPring-8、スーパーカミオカンデ、KAGRA、LHC、KEKB、J-PARC

上記対象から、公的機関が公表した情報において、当該情報が把握されていた国際共同大型プロジェクトは、「大型ハドロン衝突型加速器 (LHC)」「国際熱核融合実験炉 (ITER)」「国際宇宙ステーション (ISS)」の3つのプロジェクトに係る事例であり、公表情報から整理された内容とプロジェクトの概要を次のとおりに取りまとめた。

1. 大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) /欧州合同原子核研究機構 (CERN)
  - 1) プロジェクトの概要
  - 2) コストの超過、スケジュールの遅延等の事例
    - 事例1-1) プロジェクト参加企業の破産によるプロジェクト費用の増加
    - 事例1-2) 工事開始後の予期せぬ岩盤の発見及び大規模出水によるプロジェクト費用の増加
    - 事例1-3) 下請業者への発注等に関わる管理ミスによるスケジュールの遅延
    - 事例1-4) 度重なる建設・試験時の故障等
2. 国際熱核融合実験炉 (ITER) /国際核融合エネルギー機構 (ITER Organization)
  - 1) プロジェクトの概要
  - 2) コストの超過、スケジュールの遅延等の事例
    - 事例2-1) 機構設立に伴う複雑な手続きによるスケジュールの遅延
    - 事例2-2) 詳細設計の実施によるプロジェクト全体コストの67%の増加
3. 国際宇宙ステーション (ISS) /国際宇宙基地協力協定
  - 1) プロジェクトの概要
  - 2) コストの超過、スケジュールの遅延等の事例
    - 事例3-1) 共同実施国の作業遅延による、関係作業を受け持つ国における費用の増加①
    - 事例3-2) 共同実施国の作業遅延による、関係作業を受け持つ国における費用の増加②
    - 事例3-3) リスクを加味していないタイトなスケジュール設定に伴う将来の費用増大リスクへの警鐘
    - 事例3-4) プログラム実施機関における増加し続ける予算への牽制

## 1. 大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) / 欧州合同原子核研究機構 (CERN)

### 1) プロジェクトの概要

目的	質量の起源のヒッグス粒子や超対称性粒子などの新粒子を発見し、物質の究極の内部構造を探索する
建設期間	14年 (1994年～2008年)
総建設費	約5,000億円
参加	CERN加盟国+日・米・露・カナダ・インド等協力

LHC 加速器 (Large Hadron Collider) は欧州合同原子核研究機構 (CERN, セルン研究所) により建設され、2009 年より物理運転を開始した世界最大のハドロン衝突型加速器である。

LHC 加速器の円周の長さは 27 km でフランスとスイスの国境をまたぎ、地下約 100 m の位置に、次の施設が設置されている。

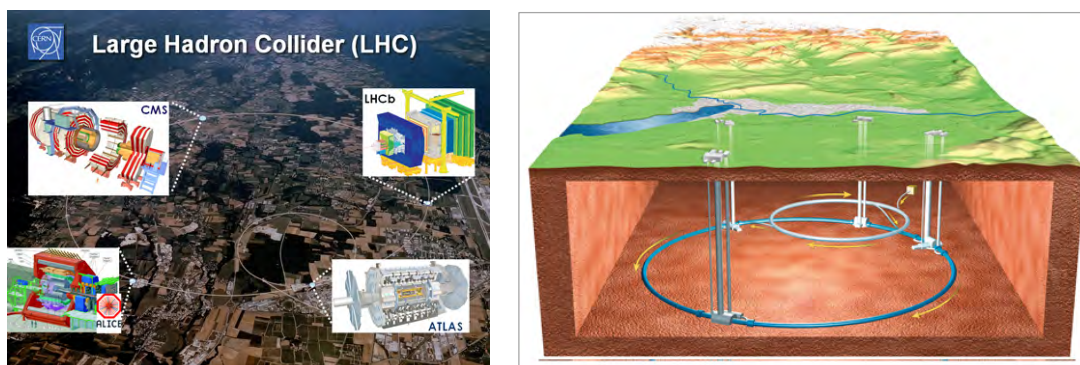
- ①加速されたの軌道を保つための超伝導マグネット、
- ②粒子を実際に加速させる加速空洞、
- ③6つの実験施設

LHC の各実験グループでは、それぞれ狙っている物理が異なる。

例えば、ATLAS 実験や CMS 実験では、LHC での高エネルギー陽子・陽子衝突に着目し、衝突によって発生する粒子を解析することにより、物質の質量をになう未発見のヒッグス粒子の発見などを超える新しい物理の探査などを目指している。

ALICE 実験は、陽子の約 200 倍以上の質量を持つ鉛の原子核同士を高エネルギーで加速・衝突させ、温度にして4兆度以上という、人類が生成できる 最も高温の状態を生成する。それによってビッグバン直後に存在したとされる宇宙のひとつの形態、クォーク・グルーオンプラズマに着目した実験である。

図表 IV-1 CERN LHC の外観と断面図



(出典) LHC-ALICE 実験日本グループホームページ

## 2) コストの超過、スケジュールの遅延等の事例

想定されていなかったリスクが発生した結果、コストの超過やスケジュールの遅延等が発生した事例で、関連する公的機関より公表されている事例として、「プロジェクト参加企業の破産によるプロジェクト費用の増加」、「工事開始後の予期せぬ岩盤の発見及び大規模出水によるプロジェクト費用の増加」、「下請業者への発注等に関わる管理ミスによるスケジュールの遅延」、以上3つが把握された。

### 事例1-1) プロジェクト参加企業の破産によるプロジェクト費用の増加

出典：	The Cost and Schedule Review Committeeによる2002年12月1日の報告（Cost and Schedule Review Committee Report）から
内容：	・ Project Director は Committee に対して、 <u>ベンダーのうちの1社が破産</u> したため magnet cryostats のコストに 700 万 CHF のオーバーランが発生したことを報告した。

### 事例1-2) 工事開始後の予期せぬ岩盤の発見及び大規模出水によるプロジェクト費用の増加

出典：	The Cost and Schedule Review Committeeによる2003年12月15日の報告（Cost and Schedule Review Committee Report）から
内容：	・ 工事開始後に2つの大型 LHC cavern の再設計を行わなければならないリスクが発生した。 ・ LHC cavern を支える柱建設に係る掘削中に予期せぬ岩盤が現れたことにより、柱の位置の大規模な移動に係る再設計が開始された。 ・ 再設計では、LHC cavern の頂部と床に巨大な鉄骨梁が新たに導入され、耐力壁、頂部、床に元の設計よりもかなり多くの鉄筋補強、コンクリートが必要になった。 ・ また、Committee は、ポイント5のメインシャフトに <u>大規模な出水</u> が発生しており、それらの水漏れ修理は、ポイント5で予定されている作業完了後、当初予定されていなかった別の契約が締結され、実施されなければならないことを把握した。

### 事例1-3) 下請業者への発注等に関わる管理ミスによるスケジュールの遅延

出典：	The Cost and Schedule Review Committeeによる2003年12月15日の報告（Cost and Schedule Review Committee Report）から
内容：	・ 製造下請業者で起きた <u>teething troubles(初期的トラブル)</u> (注 the fault caused the machine to lose the near absolute-zero temperature) により、Cryogenic Distribution Line (QRL) に係る CERN との契約業者が、設備等の導入要件を満たすための生産体制の強化ができなかったこと及び、同契約業者が設備等の導入作業の下請業者と共に行う工事現場での準備が適切になされていなかったことが明らかとなった。 ・ 必要な書類の作成や、工事現場における下請業者に対する適切な管理体制が構築されるまでの間、CERN との契約業者は現場での作業を中止しなければならなかつ

<p>た。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 遅延は残念であるが、適切な仕様、トレーニング、管理体制がないまま作業を継続していた場合に比べ、作業を停止することでほぼ確実にこれらの問題をより迅速に解決できると期待される。</li> <li>・ 今後、CERN との契約業者は、これらの設備等の導入スケジュールに合わせて、プロジェクトの推進を可能とするために、QRL 関連設備を供給する工事現場以外の場所で作業する下請業者とともに、初期生産・品質管理の問題を完全に解決する必要がある。</li> <li>・ 契約によると、今後数週間のうちに本格的に作業が再開されると予想されている。</li> <li>・ <b>Project Management</b> は、これらの問題に関連する遅延によって、ベースラインのスケジュールに比べて QRL 導入に約 13 週間の遅れが生じてしまったと推定している。</li> </ul>
---

**事例 1－4) 度重なる建設・試験時の故障等**

<p>出典： LHC 加速器の現状と CERN の将来計画/近藤敬比古(KEK 素粒子原子核研究所)/ 2008 年 12 月 5 日から</p>
<p>内容：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ LHC 加速器では先進的な技術が各所で使われている。そのため建設終盤段階からビーム周回成功までの 2 年あまりの間には、予期しないトラブルがかなり発生した。</li> </ul> <p>[ヘリウム分配ラインのトラブル]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 超伝導マグネットに液体ヘリウムを供給するラインは QRL と呼ばれ、27 km のトンネル全周にわたってマグネットと並行して設置されている。2004 年 6 月にこのラインを数 km にわたって設置し冷やしたところ、ヘリウムパイプを所々で支えるグラスファイバーのスライド板が割れて真空リークが発生してしまった。材料が原因だったがスケジュールが大幅に遅れた。工事を請け負った Air Liquid 社を訴えては時間がかかりすぎるので、結局 CERN のマンパワーと 41 億円相当の追加予算を投入して修理を行った。</li> </ul> <p>[Inner Triplet の圧力テストでの破損]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ Inner Triplet とは衝突点の前後に設置されたビーム収束用の四極マグネットセットである。その半分のマグネットを日本が開発・製造し、あと半分のマグネットとクライオジェニクス組込み全部をフェルミラボが担当した。1 セットの長さは約 30 m で全部で 8 セットある。個々のマグネットは日本でもフェルミラボでもテストされたが、全長 30 m のセットのテストは地上で行わないまま地下に据え付けられた。2006 年 11 月に Inner Triplet の圧力テストを初めてしたところ、超流動ヘリウム熱交換パイプが座屈、破断してしまった。フェルミラボで行われたロウ付け作業に起因する問題だった。新材料を発注し、すべて地下トンネル内で取り換えられた。</li> <li>・ さらに 2007 年 3 月末に、熱交換器を交換後初めて行った Inner Triplet セットの圧力試験中に 20 気圧で大きな破裂音が起こり、KEK 製マグネットがビーム軸方向に 10 cm 以上動いてしまった。マグネットを支持する GFRP 部品が軸方向の不均衡力に耐えきれず破壊されたことによる。支持部品はフェルミラボ担当であるが、（後から考えて当然の）不均衡力の発生を完全に見落としていたことによる。</li> </ul> <p>[大量のヘリウム漏れ事故]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 2008 年 9 月 10 日に成功したファーストビームの直前までは、8 セクターのうち、</li> </ul>

6 セクターまでが 5.5 TeV 相当、一つが 5.3 TeV 相当の電流までパワーテストされていた。セクター34 のみが 4TeV までしかテストされてなかったのも、ビーム再開直前の 9 月 19 日にセクター34 のパワーテストを行った。

- ・電流が 8.7 kA (5.15 TeV 相当) に達した 11 時 18 分に、ダイポール C24 と四極マグネット Q24 の間をつなぐ超伝導ケーブルバスの結線部で抵抗領域が発達した。0.39 秒後に抵抗による電圧が 1V になって電源が電流上昇を保持できなくなり、0.46 秒でトリップシスロー減電モードになり、0.86 秒後に速い電流減少が始まった。最初の 1 秒で電気的なアークが発生しヘリウム容器に穴が開き、断熱真空容器の中へ液体ヘリウムが漏れ出した。
- ・事故の直接原因はマグネットの間の結線部での抵抗値の増加→発熱→アーク発生である。この結線部では両マグネット端からの超伝導ケーブルは長方形の安定化銅と 3 枚のスズ銀ハンダ板に挟まれて電磁誘導ハンダ付けされている。ジョイントあたりの発熱を 100 mW 以下に抑えるため接続部の抵抗は 0.5 nΩ 以下であることが要求されている。
- ・今回の原因の結線部の抵抗は 200 nΩ 程度だったと推定されている。おそらくハンダ板をハンダ付けの際に入れ忘れたのではと推定されるが、その部分は溶解してしまったので確認できない。ちなみにこのようなケーブル接続部はリング全体で 10,000 ヲ所以上ある。

## 2. 国際熱核融合実験炉（ITER）/国際核融合エネルギー機構（IO）

### 1) プロジェクトの概要

目 標	核融合エネルギーの科学的・技術的実現可能性を実証する
計 画	35 年間、 運転開始：2020 年頃（予定：当初 2016 年）、 核融合反応開始：2027 年頃（予定）
参加極	日本、欧州、米国、ロシア、中国、韓国、インド
建設地	フランス・カダラッシュ
費 用	建設費 130 億ユーロ（当初 50 億ユーロ）、運転費年間 2.8 億～5.3 億ユーロ

ITER 計画は、平和目的の核融合エネルギーが 科学技術的に成立することを実証するため、人類初の核融合実験炉を実現しようとする超大型国際プロジェクトである。

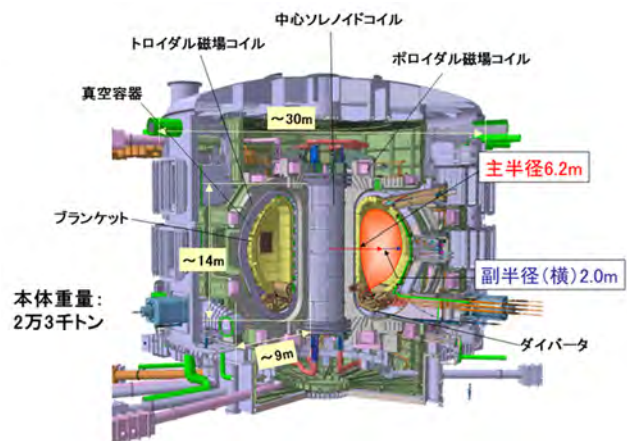
ITER 計画は、2019 年の運転開始を目指し、日本・欧州連合(EU)・ロシア・米国・韓国・中国・インドの 7 極により進められている。

ITER の目標は核融合炉と同じレベルの温度、密度などのプラズマを実現することで、三重水素、(トリチウム)と重水素という実燃料を用いて、大出力長時間の燃焼を行うことである。また、核融合の安全性を実証するものともなる。

図表 IV-2 ITER の概要



(出典) 国際熱核融合実験炉の国際機関  
ホームページ



## 2) コストの超過、スケジュールの遅延等の事例

想定されていなかったリスクが発生した結果、コストの超過やスケジュールの遅延等が発生した事例で関連する公的より公表されている事例として、「機構設立に伴う複雑な手続きによるスケジュールの遅延」、「詳細設計の実施によるプロジェクト全体コストの67%の増加」以上2つが把握された。

### 事例2-1) 機構設立に伴う複雑な手続きによるスケジュールの遅延

出典：
ITER 機構による HP 上でのスケジュール遅延に関する解説 (Most frequently asked questions about the ITER Project) より <a href="https://www.iter.org/faq">https://www.iter.org/faq</a>
内容：
<ul style="list-style-type: none"><li>ITER Organization の設立、そしてプロジェクトを管理する世界クラスのシステム構築に当初の予測よりも多くの時間を要することとなった。</li><li>特定された遅れの原因は以下の通り。<ul style="list-style-type: none"><li>✓ <u>協定書や契約書の署名の遅れ、</u></li><li>✓ <u>設計のレビューや設計変更に伴う長々しいプロセス、</u></li><li>✓ <u>nuclear components のための複雑な承認手続き。</u></li></ul></li><li>これらの原因に対して、パフォーマンス向上のための是正措置が講じら、新たなプロジェクト全体の更新スケジュールが、2015年11月に、ITER Council の ITER's governing board に提出された。</li><li>ITER Council は機構の中で、全体スケジュールおよび関連するリソースについて独立審査を実施する機能を有しており、提出された更新スケジュールに基づき、スピードアップ及びコスト削減のために可能となる追加的措置について検討を進めている。</li><li>Council は、2016年6月までに、これらのレビューを完了させ、ファーストプラズマまでの全体スケジュールについて合意に達する予定である。</li></ul>

### 事例2-2) 詳細設計の実施によるプロジェクト全体コストの67%の増加

出典：
ITER 機構による HP 上でのコスト上昇に関する解説 (Most frequently asked questions about the ITER Project) より <a href="https://www.iter.org/faq">https://www.iter.org/faq</a>
内容：
<ul style="list-style-type: none"><li>2001年の設計に基づく ITER の元の建設コスト見積もり額は50億ユーロであった。</li><li>この見積もりは当時の入手可能な最良の情報に基づいており、いくつかの人件費、費用の段階的上昇、コンティンジェンシーは含まれていなかった。</li><li>2008年、詳細な設計レビューによって核融合科学の進歩をふまえた ITER マシンの</li></ul>

変更が必要となった。vertical stability や Edge Localization Mode (ELM) coils の追加を含むこれらの変更は、2010年のベースラインに組み込まれ、全体コストに追加された。

- ・ また、ITER メンバーの数が 4 から 7 へ変更された事実もまた、設計においてはるかに多くのインターフェース（結果として複雑さ）が作られることでコスト増加の原因となった。
- ・ コスト増加の第 3 の重要な要素は、建物の建設費が 2001 年の見積もり以降大幅に増加したことである。原材料コストは 2 倍（鋼）、3 倍（コンクリート）に増加した。
- ・ ITER Organization は、元の 2001 年の見積もりに比べてコストが 67% 上昇したと推定されている。
- ・ この増加の原因はおよそ次のように考えられる。
  - ✓ 設計の最終決定 29%
  - ✓ 設計努力の増加に起因するスケジュール延長 24%
  - ✓ マシン組立に関連する費用増加 8.5%
  - ✓ 科学の進歩に関わるハードウェア変更 5.5%



## <ITER 関連参考資料>

### (1) ITER の経緯 (主なリスク関連)

#### ■ ITERの経緯

- 1985年 米ソ首脳会議で核融合の国際共同開発に合意。日欧にも呼びかけてITER計画が発足
- 2001年 最終設計書が完成して工学設計活動が終了。工学設計に基づくITERの建設費用の見積額は「50億ユーロ」
- 2005年 日欧露米韓中の6極による政府間協議において、建設サイトがカダラッシュ(仏)に決定
- 2006年11月 ITER機構設立協定、イーター特権免除協定署名。第1回暫定イーター理事会開催(パリ)。
- 2007年10月 ITER国際核融合エネルギー機構設立。建設開始(当時は2016年運転開始予定)
- 2008年 詳細な設計レビューによって、ITERマシンの設計に大きな変更があった。
- 2013年10月 “2013 ITER Management Assessment” 報告書が作成されITER理事会に提出
- 2014年2月 ITER理事会開催
  - ・ 機器や建屋の設計が最大23ヵ月遅れているとの報告あり。当初は2015年に建屋建設終了予定
  - ・ 理事会は、計画の遅れを取り戻すためITER機構の再編を合意
    - (例) 設計管理の専門部署の新設し、機器の設計変更へ迅速に対応
- 2014年7月 本島機構長が、ITERの運転開始が2022年又は2023年頃に延びる可能性に言及(取材対応)
- 2015年1月 ITER機構の機構長が本島氏からBigot氏に代わる
  - ・ Bigot機構長は、ITER全体プロジェクトのボトムアップレビューを指示。→その結果は、“baseline”と呼ばれる
- 2015年11月 ITER理事会開催
  - ・ ITER全体の「更新スケジュール」(baseline)が提出される
  - ・ 現在、更新スケジュールのレビューを実施中。2016年6月までにレビュー完了。新スケジュールに合意予定。

### (2) ITER におけるスケジュール遅延とコスト増大に関する評価・分析・提案

「2013 ITER Management Assessment 最終報告書」(2013年10月)より

#### ■ ITERのスケジュール遅延とコスト増大への対応方向

- スケジュール遅延とコスト増大の原因は、以下の点である(選択して掲載)
  - ・ ITER機構(IO)内に強い「プロジェクトマネジメント文化」が欠如していた
  - ・ IOに大規模プロジェクトマネジメントと産業分野の経験者数が少なかった
  - ・ IOの意思決定プロセスが機能していなかった
  - ・ IO内のシステムエンジニアリングと設計統括部門の質と統率力が不十分であった
  - ・ IOが、効率的かつ効果的なマネジメント組織として運営されなかった
  - ・ ITERプロジェクト全体に、強い「原子力安全文化」が欠如していた
  - ・ ITER理事会が承認した最新のベースラインスケジュールが非現実的であった
  - ・ IO職員は、DAのコストやリスク削減等に向けてのインセンティブが与えられず、コンフリクトが発生した
  - ・ IO内には、シニア・マネージャの人数が多すぎ、人員構成が「煙突構造」であった など
- ITERのマネジメント改善の提案(recommendation)は、以下である。
  - ①プロジェクト文化の創造 ②機構長の交代促進
  - ③機構長に衝突解決の責任を持たせる ④シニア・マネージャの人数を減らす
  - ⑤システムエンジニアリングの強化 ⑥原子力安全文化を根付かせる
  - ⑦現実的なITERプロジェクトスケジュールの設定 ⑧IOとDAの関心を一致させる
  - ⑨IOの官僚主義の低減 ⑩人的資源システムとツールの戦略資産としての活用
  - ⑪助言・評価の仕組みの改善

### 3. 国際宇宙ステーション (ISS) /国際宇宙基地協力協定

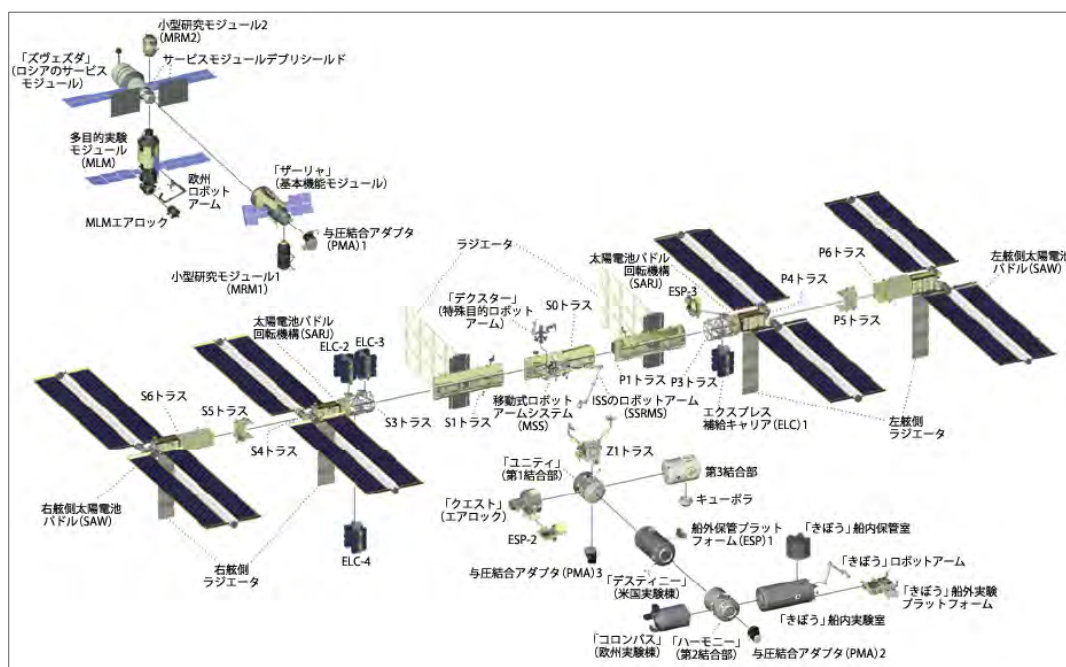
#### 1) プロジェクトの概要

目的	大規模な有人宇宙施設を建設し、運用する
計画	1998年建設開始。2011年に完成
参加	日本、米国、ロシア、欧州、カナダの世界15カ国が協力。パートナー各国が各々開発した要素(パーツ)で成り立ち、各要素を担当の国が責任を持って運用し、全体のとりまとめを米国が行う。
建設地	フランス・カダラッシュ
費用	日本8,260億円、米国7兆6,800億円、欧州9,000億円、カナダ1,500億円(～2013年)

国際宇宙ステーション (ISS) は、地上から約 400km 上空に建設された巨大な有人実験施設で、1 周約 90 分で地球の周りを回りながら、実験・研究、地球や天体の観測などを行っている。

国際宇宙ステーション (ISS) は、国際パートナー各国がそれぞれに開発した要素(パーツ)で成り立っており、各要素の打上げには、米国のスペースシャトルやロシアのロケットが使用されている。米国が ISS 全体の運用について調整を行い、米国、ロシア、日本、欧州 (ESA の 11 ヶ国)、カナダの各国・機関がそれぞれ開発した ISS のシステムや装置を運用している。

図表 IV-3 ISS の構成



(出典) 宇宙ステーションきぼう報・情報センターホームページ

## 2) コストの超過、スケジュールの遅延等の事例

想定されていなかったリスクが発生した結果、コストの超過やスケジュールの遅延等が発生した事例で関連する公的機関より公表されている事例として、「共同実施国の作業遅延による、関係作業を受け持つ国における費用の増加」が2件、「リスクを加味していないタイトなスケジュール設定に伴う将来の費用増大リスクへの警鐘」、「プログラム実施機関における増加し続ける予算への牽制」、以上4つが把握された。

### 事例3-1) 共同実施国の作業遅延による、関係作業を受け持つ国における費用の増加①

出典： 米国会計検査院（GAO）による報告（SPACE STATION-Cost Control Problems Continue to Worsen（1997年6月18日））から
内容： ・ロシア政府がサービスモジュールをスケジュール通りに提供できるか、という最近認識された問題を受け、NASAは3つのステップからなるリカバリープランの実行を開始した。 ・現在進行中のステップ1では、サービスモジュールの稼働の8ヶ月の遅れに合わせたステーションスケジュール調整と、サービスモジュールの最長1年の遅延に備えたステーションの暫定的な必須機能の開発に注力する。 ・ステップ1の主な活動としては、サービスモジュールに先行するステーションコンポーネントの軌道への打ち上げ延期と、サービスモジュールの推進機能に替わる予備の一次的代替品の製造が含まれる。ステップ1の1998年度までの活動費は、2億5千万ドルから3億ドルと推定される ・ステップ2は、さらなる遅延やロシア政府がサービスモジュールを提供できない場合に対処するNASAのコンティンジェンシープランである。ステップ2は、サービスモジュールの電源、制御、居住機能の恒久的な代替になる可能性がある。NASAのステップ2の初期費用見積もりは7億5千万ドルである。 ・ステップ3においては、ステーションの再補給業務といった、ロシア政府が持つはずであった財政的責任と運営責任の全てあるいはほとんどを米国とその他の国際パートナーが引き受けることになるであろう。ステップ3のコストは推定されていない。 ・リカバリープランは、宇宙ステーションの開発活動に直接的な影響を与えることに加え、スペースシャトルプログラムにさらなる要件を課する。しかし、リカバリープランがスペースシャトルプログラムに与える全ての影響についてはまだ分かっていない。

### 事例 3-2) 共同実施国の作業遅延による、関係作業を受け持つ国における費用の増加②

出典： 米国会計検査院（GAO）による報告（INTERNATIONAL SPACE STATION-U.S. Life-Cycle Funding Requirements（1998年5月））から
内容： <ul style="list-style-type: none"><li>・1995年6月時点の見積から、1998年4月に実施されたISSの開発費の見積に係る、174億ドルから219億ドルへの上昇は、スケジュール遅延、元請業者による funding reserves によってカバーされない追加的活動、搭乗員帰還機の追加コスト、ロシア製のサービスモジュールの遅れによって発生するコストに起因する。</li><li>・1995年6月の時点では、NASAは組立完了を2002年6月と予測していた。ロシアのプログラムの遅延等により、組立シーケンスの最後のフライトは今では2003年12月に予定されており、その18ヶ月の遅れで開発コストは20億ドル以上増加した。</li><li>・またNASAはサービスモジュール提供の遅れを軽減するために Interim Control Module の開発等の活動を行ってきた。NASAはこれらの活動費用が2億ドルを超えると推定している。</li></ul>

### 事例 3-3) リスクを加味していないタイトなスケジュール設定に伴う将来の費用増大リスクへの警鐘

出典： 米国会計検査院（GAO）による報告（INTERNATIONAL SPACE STATION-U.S. Life-Cycle Funding Requirements（1998年5月））から
内容： <ul style="list-style-type: none"><li>・組立スケジュールは、将来重大な製造遅延が起こらないことを前提としている。</li><li>・NASAの Aerospace Safety Advisory Panel による1997年のアニュアルレポートによると、ソフトウェア、ハードウェア、テストの問題によって同プログラムのスケジュールはリスクにさらされており、「ソフトウェア開発スケジュールはほとんど不可能なほどタイトである。仮に、他の何かが（ステーションの）deployment にさらなる遅延を引き起こさなくとも、ソフトウェア開発が遅延を引き起こすであろう」とレポートで部分的に述べられている。</li><li>・さらにレポートでは、搭乗員帰還機の開発スケジュールが「極めて楽観的」であることが指摘されており、帰還機の開発の遅れによってステーションの活動が制約される可能性があることに言及している。</li><li>・また integrated testing が「安全性への非常に建設的な一歩」である一方、このテストで発見されるかもしれない必要な変更のための空きが現在のスケジュールにはない、と述べている。</li><li>・開発プログラムの遅延によって、最低でも給与、契約業者の間接費、sustaining engineering といった固定費が計画よりも長期にわたって続くため、コストが増加することが予見されている。</li></ul>

・ 2003 年度に向けた見積もりで、これらの遅延等を加味して NASA がコストを費やしていくと仮定すると、スケジュールのずれ 1 ヶ月につき 1 億ドルを超える追加コストが同プログラムに必要となるであろう。

**事例 3-4) プログラム実施機関における増加し続ける予算への牽制**

<p>出典： 米国会計検査院（GAO）による報告（INTERNATIONAL SPACE STATION-Challenges to Increased Utilization May Affect Return on Investment（2015年7月10日））から</p>
<p>内容：</p> <ul style="list-style-type: none"><li>・ NASA は ISS プログラムに毎年多大な投資を行っている。GAO による NASA の 2016 年度予算見積もりの分析によると、同機関は ISS の運営、維持、研究、クルーや貨物の ISS への輸送にかかるコストは、2015 年度から 2020 年度の間に約 10 億ドル、約 53%も増加し、40 億ドルを超えることを予想している。</li><li>・ 予想される ISS の総コスト増加のほとんどは、クルーと貨物の民間企業による輸送に対する ISS プログラムの支払いに起因する。</li><li>・ 貨物とクルーを ISS へ輸送するための予算は、現在のところ、2016 年度から 2020 年度で 7 億ドル超の増加となる予定で、その時点で ISS の予算総額の 55%超を占める。</li><li>・ NASA はまた、2018 年の ISS へのフライト用としてロシアからソユーズ 6 座席を購入するプロセスを開始したが、国内の営利主体が 2018 年の輸送要件を満たすことができると NASA が決定する場合、それらの機体は NASA の ISS への第一の輸送手段となり、結果的に、購入済みのソユーズのシートについては予備の輸送手段となり、費用の当該用途における重複となることが懸念されている。</li></ul>

## <ISS 関連参考資料>

### (1) ISS プロジェクトの経緯 (主なリスク関連)

#### ■ 国際宇宙ステーション(ISS)プロジェクトの経緯

- 1982年 NASAによる概念設計開始
- 1984年 レーガン大統領のGOサイン、各国への呼びかけ
- 1985年 日・欧・加の参加
- 1988年 参加国の政府間協定締結、開発段階へ移行
- 1993年 設計の見直し、ロシアの参加
- 1994年 国際宇宙ステーションの全体構成、スケジュール等が決定
- 1996年 米・露間で宇宙ステーションの役割分担について基本合意
- 1997年 開発の遅れにより露サービスモジュールの打ち上げ延期(1998年3月→同年11~12月)
- 1998年10月 露サービスモジュールの打ち上げが3ヶ月遅れとなることが確認
- 1998年11月 ISS最初のモジュール「ザリヤ」(基本機能モジュール) 打ち上げ
- 1998年12月 ISS2つ目のモジュール「ユニティ」(結合モジュール1) 打ち上げ
- 2000年 7月 ISS3つ目のモジュール「ズヴェズダ」(ロシアのサービスモジュール) 打ち上げ
- 2001年 2月 「デスティニー」(米国実験棟) 打ち上げ
- 2008年 2月 「コロンバス」(欧州実験棟) 打ち上げ
- 2008年 6月 「きぼう」船内実験室、「きぼう」ロボットアーム 打ち上げ
- 2009年 9月 宇宙ステーション補給機(HTV)技術実証機 打ち上げ
- 2011年 1月 宇宙ステーション補給機「こうのとり」2号機(HTV2)

### (2) ISS における主なコスト&スケジュールリスク要素の評価・分析

「ISSに関するコスト査定・評価特別委員会の報告書 (Chabrow レポート)」

(1998年4月) より

#### ■ ISSに関するコスト査定・評価・・・要約 (Executive Summary) (1998年4月)

- 国際宇宙ステーション(ISS)プログラムは、過去4年間で、非常に挑戦的かつ技術的に複雑な努力を定義し実行することにおいて、顕著で妥当な進展をみた。
- 本プログラムの規模、複雑性、および野心的なスケジュール目標は、21億ドルの年間予算上限、または174億ドルの全体予算上限の中で合理的に達成される水準を超えてしまった。
- 多くの重大なリスク要素が、ISSプログラムの費用とスケジュールへの悪影響を持たらしつつある。
- ロシアのジョイントパートナーシップ協定の履行に関するスケジュールの不確実性は、ISSプログラムへの主要な脅威となっている。
- 1999年度の議会への提出予算は、ベースラインISSプログラムを実行し、正常なプログラムの成長をカバーし、既知の重大なリスクに対応することには、十分ではない。1億3,000万ドル~2億5,000万ドルの追加的年間予算が必要となる。
- ISSの組立完成は、2003年12月を越えて、1年から3年遅延する見込みである。

#### ■ ISSにおける主なコスト&スケジュールリスク要素(Cost and Schedule Risk Elements)

- ロシア製サービスモジュール
  - ・ ロシアの予算の枯渇により、ISSの主要モジュールの一つであるサービスモジュールが大幅に遅れている
- ロシアのロジスティクス/推進支援
- ハードウェア認証テスト
  - ・ 大量のハードウェア(ソフト含む)の多くは、製造計画の遅れ、又は開発・認証途上にある
- ソフトウェア開発とインテグレーション
  - ・ 複数の国や地域のサプライヤーによって開発された膨大なソフトの統合化とテストの時間的余裕がない
- 搭乗員帰還機(CRV: Crew Return Vehicle)
  - ・ ISSにとってのクリティカルパスであるが、NASAのX-38プロジェクトは遅延し、予算も枯渇しつつある
- 米国研究機関のスケジュール遅延
- マルチエレメント統合テスト(METI)
- 軌道上でのISS組立の複雑性
  - ・ 衛星軌道上の宇宙ステーションの組立の複雑性はNASAやパートナー国の経験を超えている
- 部品・予備の不足
- 訓練

■ ISSにおける主なコスト&スケジュールリスク評価例

ESTIMATES OF SCHEDULE SLIPPAGE  
ASSOCIATED WITH MAJOR RISK ELEMENTS

POST-REV. C SLIP (MONTHS TO ASSEMBLY COMPLETION)

Risk Elements	Most Optimistic	Least Optimistic
Russian Service Module	4	24
Russian Logistics Support	3	9
Flight H/W Delivery (Qual)	3	12
MEIT II (Cumulative)	2	6
Software Integrations	2	6
Training (Cumulative)	2	6
Crew Return Vehicle	6	18
MEIT III (Cumulative)	3	6
US Laboratory	2	6
Assembly Complexity	3	12
<b>ROOT-SUM-SQUARE</b>	<b>10</b>	<b>38</b>

ESTIMATES OF COST GROWTH  
ASSOCIATED WITH MAJOR RISK ELEMENTS

POST-REV. C COST (BILLIONS OF DOLLARS TO COMPLETE)

Risk Elements	Most Optimistic	Most Pessimistic
Total Schedule Slippage*	1.800	4.900
Russian Service Module**	0.000	0.400
Russian Logistics Support**	0.000	0.000
Flight H/W Delivery (Qual)	0.075	0.450
MEIT II (Cumulative)	0.010	0.080
Software Integrations	0.075	0.375
Training (Cumulative)	0.010	0.060
Crew Return Vehicle	0.120	0.680
MEIT III (Cumulative)	0.040	0.230
US Laboratory	0.050	0.250
Assembly Complexity	0.015	0.075
<b>ROOT-SUM-SQUARE (RSS)***</b>	<b>0.174</b>	<b>0.968</b>

## 4. 考察

今回収集された、「当初から想定することができず、コストの超過やスケジュールの遅延を発生させてしまった事例」については、ISO IEC ガイド 73 等で規定されている外的要因（組織を取り巻く環境に起因するリスク）と内的要因（組織内部の事情や条件により生じるリスク）の双方で発生している。

具体的には、次のようなリスク例が確認された。

### ①外的要因（リスク）の例

- 自然起因リスク：(地質障害、地下水発生 等)
- パートナー起因リスク：(研究開発予算停止、発注先事業者破産、業者側トラブル、業者作業員の質低下 等)
- 科学技術起因リスク：(科学技術の進歩による想定技術の陳腐化 等)
- 原材料価格起因リスク：(建設資材、素材の調達価格高騰 等)

### ②内的要因（リスク）の例

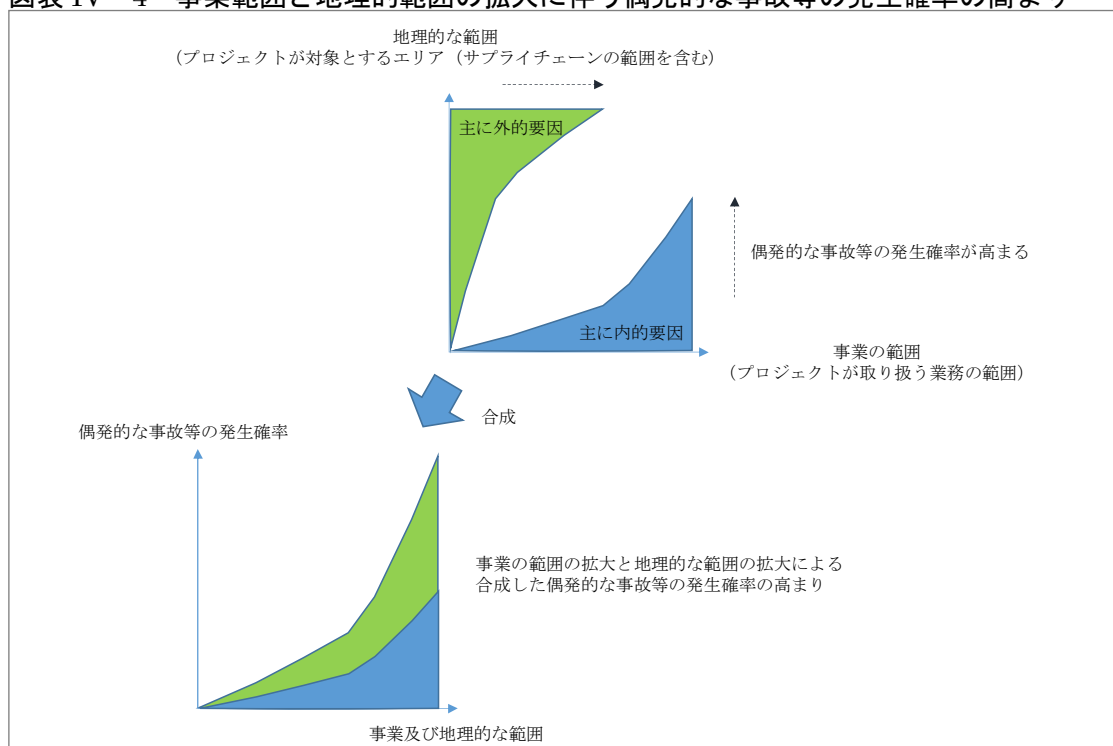
- マネジメント起因リスク：(PM 文化・人材不足、インハウスエンジニアリング機能の脆弱性、意思決定過程不備 等)
- 設計起因リスク：(設計ミス、設計大幅変更、in-kind 方式の設計調整・複雑性 等)
- 開発・試験起因リスク：(中核機器 R&D の遅れ、認証試験の遅れ、ソフト/システム開発と統合化テストの遅れ、システム変更の余裕時間の不足 等)
- 工事・組立起因リスク：(施工・作業ミスによる性能低下・事故発生、in-kind 方式調達機器の不整合 等)
- サプライチェーン起因リスク：(入札不調、交渉不調、遅延賠償責任、ロジスティクスコスト、部品・予備の不足 等)
- 手続起因リスク：(安全審査承認手続きの困難さ 等)

大型プロジェクトは、「事業範囲」（プロジェクトが取り扱う業務の範囲）と「地理的範囲」（プロジェクトが対象とするエリア、サプライチェーンの範囲を含む）の双方が、広い（大きい）という特性を持つ。このうち、事業範囲の広さ（拡大）は、主に内的要因による偶発的な事故等の発生確率を高めると推測される。一方、地理的範囲の広さ（拡大）は、主に外的要因による偶発的な事故等の発生確率を高めると推測される。

大型プロジェクトの推進に向けては、これらを踏まえ、適切なリスクマネジメントを行なっていくことが重要である。



図表 IV-4 事業範囲と地理的範囲の拡大に伴う偶発的な事故等の発生確率の高まり



(出典) 野村総研作成

一般的にリスクマネジメントでは、「リスク」の項目明確化、リスクの影響度の評価（発生確率と発生時の影響のマトリクスで評価）、対応方策の検討、対応策の実行とモニタリングなどが求められる。

本調査の対象リスクの前提としてしている「当初から想定することができず」ということは、そもそも「リスク」として明確化できていない状況であり、伝統的なリスクマネジメントの領域では、「ペリル（損失を引起す偶然事故それ自体）」や「ハザード（損失発生潜在的要因または拡大要因）」と呼ばれる要因に分類される。

リスクマネジメントの観点から今回対象とした大型プロジェクトをみると、プロジェクト実施主体についてはリスクの明確化は必ずしも十分ではなかったと推測される。しかし、外部のリスク評価機関により実施されたアセスメントでは、当該プロジェクトのリスク洗い出しと影響度評価等が適切に行なわれている例もみられる。また、その結果を受けてプロジェクト実施主体において、技術面のみならず、資金調達、サプライチェーン管理、人材調達・育成・管理など様々な面からのアプローチでリスク軽減へ向けた取組みが実行されている例もある。

こうした事例による経験を踏まえて、ILC の大型プロジェクトとしての適切なリスクマネジメントのあり方を考えていくことが望まれる。



省略標記用語集  
(アルファベット順に掲載)

省略表記	正式名称	日本語名称 (一部解説)
AC	Alternating Current	交流
AES	Advanced Energy Systems, Inc.	企業名 (米国)
ALMA	Atacama Large Millimeter/submillimeter Array	アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (アルマ望遠鏡)
AMTF	Accelerator Module Test Facility	加速器モジュール試験施設
ANL	Argonne National Laboratory	アルゴンヌ国立研究所
ASLS	Australian Synchrotron Light Source	豪州シンクロトロン光源
ASTeC	Accelerator Science and Technology Centre	加速器科学技術センター
ATF	Accelerator Test Facility	加速器試験施設
BCP	Buffer Chemical Polishing	化学研磨
BDS	Beam-Delivery System	最終収束部
BPM	Beam Positioning Monitor	ビーム位置モニター
CB	Cold Box	冷凍機
CBMM	Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração	企業名 (ブラジル)
CBPM	Cavity Beam Position Monitor	空洞型ビーム位置モニター
CEA-IRFU	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives -Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de L'Univers ( Institute of Research into the Fundamental Laws of the Universe)	フランス原子力・代替エネルギー庁 宇宙基礎科学研究所 (所在地: Saclay)
CEBAF	Continuous Electron Beam Accelerator Facility	連続電子ビーム加速器施設
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (European Organization for Nuclear Research)	欧州合同原子核研究機関
CESR-TA	Cornell Electron Storage Ring Test Accelerator	コーネル大学電子蓄積リング試験加速器
CM	Cryomodule	クライオモジュール
CNRS-LAL	Centre national de la recherche scientifique -Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire	国立科学研究センター 線形加速器研究所
Cornell	Cornell University	コーネル大学
CPI	Communications & Power Industries	企業名 (米国)
Cu	Copper	銅
CW	Continuous Wave	連続波

DAΦNE	Double Annular Φ Factory for Nice Experiments	フラスカティ国立研究所 電子・陽電子加速器 (ダフネ)
DC	Direct Current	直流
DESY	Deutsches Elektronen-Synchrotron	ドイツ電子シンクロトロン研 究所
DKS	Distributed Klystron Scheme	分散型クライストロンスキ ーム
DOE	Department of Energy	米国エネルギー省
DR	Damping Ring	ダンピングリング (減衰リ ング)
EBW	Electron Beam Welding	電子ビーム溶接
EP	Electropolishing	電解研磨
ESRF	European Synchrotron Radiation Facility	欧州シンクロトロン放射光研 究所
EUR	Euro	ユーロ
E-XFEL	European X-Ray Free-Electron Laser	欧州 X 線自由電子レーザー
FE	Field Emission	電界放出
FLASH	Free-electron -LAsEr in Hamburg	DESY の自由電子レーザー研 究施設
FNAL	Fermi National Accelerator Laboratory	フェルミ国立加速器研究所
FONT	Feedback on Nanosecond Timescales	ナノ秒スケールでのフィード バック
FPGA	Field-Programmable Gate Array	製造後に購入者や設計者が構 成を設定できる集積回路
GAO	U.S. Government Accountability Office	米国会計検査院
HC	Hydrocarbon	炭化水素
HEHG	High Efficiency High Gradient	高効率・高加速勾配
HOM couplers	Higher-Order-Mode couplers	(カプラーの名称)
HPR	High Pressure Rinsing	高圧洗浄
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor	絶縁ゲートバイポーラトラン ジスタ
ILC	International Linear Collider	国際リニアコライダー
INFN-LASA	Istituto Nazionale di Fisica Nucleare -Laboratorio Acceleratori e Superconduttività Applicata (Italian National Institute for Nuclear Physics -Laboratory of Accelerators and Applied Superconductivity)	国立原子核物理研究所・加速 器・応用超伝導研究所

INFN-LNF	Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Laboratori Nazionali di Frascati (Italian National Institute for Nuclear Physics -Frascati National Laboratory)	国立原子核物理研究所・フラス カティ国立研究所
IP	Interaction Point	衝突点
IR	Interaction Region Hall	衝突点空洞
ISS	International Space Station	国際宇宙ステーション
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor	国際熱核融合実験炉
JAI	John Adams Institute	ジョンアダムス研究所
JLab	Thomas Jefferson National Accelerator Facility	トーマス・ジェファーソン国立 加速器施設
J-PARC	Japan Proton Accelerator Research Complex	大強度陽子加速器施設
KAGRA	KAGRA	日本(岐阜県)に建設中の大型 低温重力波望遠鏡
KCS	Klystron Cluster Scheme	集合型クライストロンスキーム
KEK	High Energy Accelerator Research Organization	高エネルギー加速器研究機構
KEKB	KEKB	高エネルギー加速器研究機構 の衝突型加速器
LAL	Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire	線形加速器研究所 (所在地: Orsay)
LCLS-II	Linear Coherent Light Source II	SLACにて建設中のX線自由 電子レーザー施設
LHC	Liner Hadron Collider	大型ハドロン衝突型加速器
LINAC	linear accelerator	線形加速器
LLNL	Lawrence Livermore National Laboratory	ローレンス・リバモア国立研究 所
LLRF	Low level Radio Frequency	低電力高周波
LOM couplers	Lower Order Mode couplers	(カプラーの名称)
LPDS	Local Power Distribution System	ローカルパワー供給システム
MBK	Multi-Beam Klystron	多重ビームクライストロン
ML	Main linear accelerator	主線形加速器
MPS	Machine Protection System	機器保護システム
MSU	Michigan State University	ミシガン州立大学
NATM	New Austrian Tunneling Method	新オーストリアトンネル工法 (ナトム)

Nb	Niobium	ニオブ
OPCPA	Optical Parametric Chirped-Pulse Amplification	光学パラメトリックチャープパルス増幅
PIP	Proton Improvement Plan	FNAL の陽電子関連プロジェクト
PR	Progress Report	進捗報告書
QE	Quantum Efficiency	量子効率
QRL	Cryogenic Distribution Line	冷媒輸送ライン
RAL	Rutherford Appleton Laboratory	ラザフォード・アップルトン研究所
RF	Radio Frequency	高周波
RGA	Residual Gas Analyzer	残留ガス分析機器
RI	Research Instruments GmbH	企業名 (ドイツ)
RMS	Root Mean Square	二乗平均平方根
ROARK	Roark Welding & Engineering Co., Inc.	企業名 (米国)
RRR	Residual-Resistivity Ratio	残留抵抗比
SACLA	SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser	理化学研究所の X 線自由電子レーザー施設
SLAC	SLAC National Accelerator Laboratory	SLAC 国立加速器研究所
SLC	Stanford Linear Collider	スタンフォード線形加速器
SLS	Swiss Light Source	スイス光源
SOM couplers	Same Order Mode couplers	(カプラーの名称)
SPring-8	Super Photon Ring - 8 GeV	兵庫県の大型放射光施設
SRF	Superconducting Radiofrequency	超伝導高周波
SSR	Single Spoke Resonator	単一スポーク共振器
SSRF	Shanghai Synchrotron Radiation Facility	上海光源 (中国)
STF	Superconducting RF Test Facility	超伝導 RF 試験施設
STFC	Science and Technology Facilities Council	科学技術施設庁
SuperKEKB	SuperKEKB	KEK の衝突型加速器
TBM	Tunnel Boring Machine	トンネルボーリングマシン
TDR	Technical Design Report	技術設計報告書
TESLA	TESLA	空洞の様式名
TTF	TESLA Test Facility	DESY の TESLA のためのテスト施設
USD	US Dollar	米国ドル
VT	Vertical test	縦測定