

# サイト検討委員会報告書

長谷川琢哉 (東北大学), 野崎光昭 (神戸大学), 山下了 (東京大学)  
菅原龍平, 田内利明, 竹田繁, 横谷馨 (KEK)

平成13年8月

本検討会では、建設地が満たすべき条件、建設地選定にあたって考慮すべき項目について議論し、本報告書にまとめた。

## 提言

「LC計画推進委員会」の元に作業グループを結成し、サイト候補地(複数)の選定をただちに始めるべきである。

最終建設地決定に至るプロセスについて「LC計画推進委員会」で早急に検討し、基本方針を出すべきである。

## 序文

JLC 構想を具体化するためには、建設地が満たすべき条件を明確にした上で、個々の事例を調査する必要がある。本委員会は、このうちの第 1 段階の作業に着手する目的で、第 1 期推進会議のもとに設置された。

今期の最大の課題は、加速器の対処能力から決まる地盤振動への許容度を、科学的な見地から整理することである。建設地を選定するためには、この他にも多くの点を考慮しなければならず、ここで全体を概観しておくこと、今後の作業のステップを決めやすくなる。ただし、満たすべき条件と望ましい条件、科学的な考慮を越えたレベルで判断すべき事柄などを区別しておく必要がある。

過去になされた作業の経験を生かしつつも、予断に左右されない広い視野のもとで、より科学的に、またオープンな形でこの作業を行なうために、いろいろな方面で活躍している方々に委員をお願いした。身近かに世界最先端の加速器、KEKB や ATF、がある幸運を生かし、そこでの貴重な経験も十分に取り入れて欲しい。

JLC 推進会議議長 ( 第 1 期 )  
岩田正義

# 目次

1	本委員会の目的	1
2	活動経過	1
3	JLC の概要	3
4	地盤振動及び変動の影響	7
4.1	地盤振動及び変動について	7
4.2	主リニアック	9
4.3	最終収束システム	13
4.4	地盤振動及び変動の許容値	18
5	地盤・地質	20
6	施設・設備	21
6.1	トンネル	21
6.2	地上施設	23
6.3	新エネルギーの利用	23
7	自然及び社会的環境に関する立地条件	24
7.1	環境保護	24
7.2	建設期において留意すべき事項	26
7.3	社会的環境・社会資本	27
8	今後のサイト調査	30
9	まとめ	33
10	提言	35
11	付録	36
11.1	世界の A 値 (ATL 則)	36
11.2	Beam Position Monitor	36
11.3	Q-BPM のビームを使った較正に要する時間の推定	38
11.4	Simple Correction に要する時間の推定 (KEKB のバームからの推定)	39
11.5	放射線の安全性	41
11.6	地盤とトンネル工法	42

## 図目次

1	JLC 概念図	3
2	主リニアックでの加速管・電磁石配置	7
3	LINAC シミュレーション：random モデル	11
4	LINAC シミュレーション：ATL モデル	12
5	LINAC：Simple cor. ( $AT=9 \cdot 10^{-10}m$ )	12
6	Pulse-to-Pulse 補正：ランダム	13
7	Pulse-to-Pulse 補正：ATL	13
8	最終収束システム	14
9	disrupted angle のビームオフセット依存性	15
10	ルミノシティのビームオフセット依存性	15
11	最終収束系シミュレーション：ランダムモデル	15
12	最終収束系シミュレーション：ATL モデル	15
13	最終収束系シミュレーション：初期アラインメント	16
14	LINAC でのフィードバック・補正	19
15	地質と地盤振動及び変動の概念図	20
16	サイト調査から建設まで	30

## 表目次

1	委員会経過	2
2	X-band JLC パラメータ	5
3	C-band JLC パラメータ	6
4	運転時の地盤振動の許容値のまとめ	19
5	日本国内で計測された ATL 係数	21
6	新エネルギーの利用	24
7	サイト条件	34
8	世界の A 値 (ATL 則)	36
9	BPM 比較表	38
10	Q-BPM 較正の所要時間	39

## 1 本委員会の目的

JLCは世界最高エネルギーかつ最高輝度(ルミノシティ)の電子・陽電子直線衝突型加速器(リニアコライダー)であり、自然界の基本原理を探り初期宇宙の謎を解明するうえで、これまでの円形加速器に代わる最も強力な研究手段である。JLCは最先端の技術力が要求される国際的な研究施設であり、我が国をはじめとして世界各国からの多数の研究者の叡智の結集により実現されるものである。我が国が中核となるべきプロジェクトであるが、国際協力、特にアジア諸国との連携が重要である。JLCでの世界最高レベルの研究は、我が国の基礎科学の発展、最先端技術の開拓に資するばかりでなく、これらを通して世界に大きく貢献できると期待される。

このような研究施設の立地条件を検討するのが本委員会の目的である。

JLCは、全長約30kmのトンネル内に設置される巨大装置であると同時に、電子・陽電子の2つのビームをナノメートルという極限にまで絞り込み衝突させるという超高精度の制御技術を必要とする。最先端の加速器技術を100%発揮させ、安定した加速器運転を実現するためには、建設地に関する詳細な検討が必要である。特に地盤振動・変動はビームサイズの増大やビームのふらつきを引き起こし、ルミノシティの低下を招くので最重要検討課題である。サイト検討会では、建設地が満たすべき条件、建設地選定にあたって考慮すべき項目について議論し、本報告書にまとめた。

建設コストにも影響を及ぼす地質・地形等の自然条件や電力供給・研究支援体制等の社会的環境についても十分な調査が必要である。また、今後のサイト調査、そして早急に開始すべき活動に関する提言を最後に述べる。

## 2 活動経過

表1に示すように、平成12年9月19日に第一回検討会を開き、以後、月に1回ほど合計13回の検討会を行った。

初回にこれまでに行われてきた予備調査の紹介(報告書、1996年7月)が竹田委員よりあった。この予備調査では、地盤の堅く安定した岩盤が少なくとも30kmの長さのある場所が日本全国に渡って調査された。予備調査が行なわれた硬岩盤地帯以外にも候補地検討作業を広げる可能性があるのか検討するために、一例としてKEKをとりあげ、地盤調査を行なうことが合意され、岩田JLC推進会議議長、菅原機構長の御努力により早急に具体化され実現することとなった。実際の測定は2000年3月に行なわれ、現在データの解析が行なわれている。この結果は別途報告書にまとめる。

第2回目以降、リニアコライダーでの高く安定なルミノシティの維持の観点から、地盤振動・変動の許容レベルの検討を中心に議論を行なった。主リニアックのアライメントそしてエミッタンスの制御のためのフィードバック方法についての説明が横谷委員より行なわれた。また、後の章で詳しく説明される「pulse-to-pulse correction」「simple correction」による主リニアックのエミッタンス増大制御のシミュレーションが久保氏により行われ、本検討会で報告された。

第4、5回目には、サイト条件として考慮しなければならない電力量や冷却方法、そして、加速器を設置するトンネルに関する検討報告が吉岡氏より行われた。これは、主にCバンドの場合に検討されていたものであるが、トンネル構造、受電施設、冷却施設など多くの部分は、Xバンドにも適用することができる。また、風力、太陽光発電などの新エネルギー利用の可能性の検討報告が菅原委員よりあった。

第6回には、新研究所の建設などの情報を得るために、SPring8より松井氏、原氏を招き、SPring8の事始めやそのサイト条件、候補地選定など貴重なお話を伺うことができた。

第7回には、予備調査とほぼ平行して行われていた施設関係の検討結果などが田内委員より紹介された。

第8回にはいろいろな地盤でのトンネルの掘削方法に関する報告が竹田委員からあった。

第8回以降、地盤振動の最終収束システムへの影響についての検討が山本氏により行われた。この最終収束システムは2000年に Pantaleo Raimondi (SLAC) により提案された新しい光学系に基くものである。その最大の特徴は final doublet の間に sextupole (6極電磁石) が挿入され局所的に色補正されることで、これまでのものと違ってその全長がビームエネルギーに比例せず、重心系エネルギー 1TeV まで約 500m で達成できることである。この検討はまだ完結していないので、本報告書では、最終収束システムに関する検討結果については、以前に行なわれたいわゆる conventional な最終収束システムに基づいた検討結果を転載するにとどめる。

シミュレーションで仮定されているビーム位置検出器 (BPM) の実現可能性などについては、通常の検討会に加えて、臨時検討会を開催し、早野氏・新竹氏の報告を受け、集中的に議論が行なわれた。特に、空洞型 (cavity- または RF-) BPM は精密な位置分解能を持ち、100nm 程度までのものなら比較的容易に実用になることがわかった。稼働中の KEKB での BPM の現状も増澤氏、平松氏によって報告された。また、最終収束システムの試験施設である FFTB (SLAC) での BPM 性能、そして、そこでのビームサイズの上限を決めていたものなどの実験結果、体験などが生出氏により報告された。

第1回	2000年9月19日	予備調査の報告(竹田) 建設地の条件についての議論
第2回	2000年11月14日	地盤振動の許容値(横谷) GM2000 報告(竹田) 硬岩盤以外の一例として KEK サイトの地質・地盤振動調査測定方法の検討(竹田)
第3回	2000年12月18日	JLC Alignment tolerance(横谷) GM2000 の報告書(山本) KEK サイトのボーリング調査(竹田)
第4回	2001年1月15日	JLC Facilities (cバンド; 吉岡) LINAC シミュレーション(久保) KEK サイトのボーリング調査: 仕様書(竹田)
第5回	2001年1月31日	JLC Facilities の続き(cバンド; 吉岡) KEKB での BBA の性能(増澤) JLC Tolerance の方針(横谷) KEK サイトのボーリング調査(竹田) サイト選択条件
第6回	2001年3月1日	SPring 8 サイトの地盤、地質そして稼働後の地盤安定性(松井) SPring8 事始め(原) ボーリング調査入札結果など(竹田) 新エネルギーの利用(菅原)
第7回	2001年4月6日	ボーリング調査報告とトンネル工法(竹田) LINAC での BBA(久保) Pantaleo's FF optics(山本) 以前の facility 検討結果(田内)
第8回	2001年4月20日	FFTB での経験(生出) 最終収束システムの振動応答(山本) JLC 軌道補正法の整理(横谷) LINAC シミュレーション: ATL 則(久保) トンネルの現実的なコストの評価と振動データ解析(竹田)
臨時	2001年4月25日	KEKB での BPM(平松) BPMs for JLC(早野)
第9回	2001年5月15日	Cavity-BPM(新竹) 最終収束システムの振動応答; ATL 則(山本) 報告書の0次ドラフト(田内)
第10回	2001年5月29日	LINAC シミュレーション(久保) 報告書の議論
第11回	2001年6月19日	LINAC シミュレーション: Balakin の方法の検討(久保) 報告書の議論
第12回	2001年6月26日	LINAC シミュレーション: Balakin の方法の検討(久保) 報告書の議論

表 1: 委員会経過

### 3 JLC の概要

JLC[1, 2] は、図 1 で示されるように、前段加速、主加速そして最終収束システムより構成され、すべての加速器主要システムは地下トンネル内に設置される。前段加速システムで超高品質のビームが準備される。72 ~ 190 バンチの多バンチ構造を持ち、約  $10^{10}$  電子/バンチの大強度で安定なビームが電子銃で生成される。バンチの時間間隔は 1.4 ~ 2.8nsec である。これらひと固まりのバンチ群をパルスと呼び、各パルスごとに加速される。このときのパルスの繰り返し周波数は 50 ~ 150Hz である。1.98GeV 入射用リニアックでの加速後、ダンピングリングに入射され、細く平行な低エミッタンスのビームに仕上げられる（陽電子ビームラインには、陽電子生成のための 10GeV のリニアック、金属標的で生成された陽電子に対して十分に入射間口の広い前段ダンピングリングが加わる）。こうして得られた超高品質のビームは、より高い周波数の主リニアックで効率よく加速できるよう、そのバンチ長をバンチ圧縮器 (BC1) で 5mm から 0.5mm、そして、8GeV 前段リニアック (pre-linac) で加速後、さらに BC2 バンチ圧縮器により 0.09 ~ 0.2mm に短くされ、主リニアックに入射される。

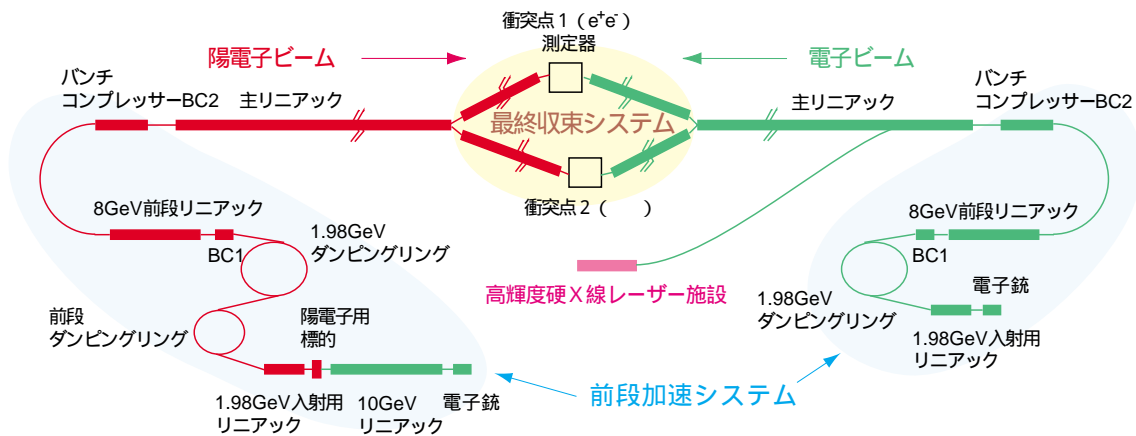


図 1: JLC 概念図 ( JLC Design Study April 1997 )。また、最終収束システムはいわゆる conventional な光学系を採用している。

主加速システムは電子・陽電子ビームを超高質を保ったまま一気に加速する。向かい合う 2 つの主リニアックが一直線に並ぶ。主リニアックは、数十 MeV/m の加速勾配の電場で満たされる加速管と、その加速電場を作り出す大出力マイクロ波増幅管 ( クライストロン )、そしてビーム収束用の 4 極電磁石などから構成されている。この 2 つの主リニアック全長は重心系エネルギー 500(1000)GeV に対して 10(18) ~ 16(23)km である。加速最終段階で、ビームエネルギーは最高エネルギーに達する。

最高エネルギーを得たビームは、主リニアック直後のコリメーションシステムでそのハローが除去される。さらにビームは、最終収束システムで垂直方向に数 nm ( ナノメートル )、水平方向に百数十 nm の大きさまで絞られる。リニアック出口から衝突点まで ( コリメーションシステムと最終収束システム ) を beam delivery section (BDS) と呼ぶ。この長さは重心系エネルギー 500(1000)GeV で 3.6(4.8)km である。

#### 加速器パラメータ

主リニアックに用いられる加速高周波パルスの周波数は 11.4GHz の X バンドと、その 1/2 の 5.7GHz の C バンドの 2 つの場合が考えられている。C バンドの主リニアックは、より高い加速勾配を目指す X バンドに比べて開発要素が少なく、しかも既存の技術をより多く取り入れることができる。実際に C バンドのクライストロン、加速管、パルス圧縮器などは重心系エネルギー 500GeV のリニアコライダーの仕様をすでに満たしている。

ここで紹介される加速器のパラメータ及び次節のルミノシティー向上のための検討課題は X バンドの場合であ

るが、Cバンドについても同様のことができる。

予想されるいろいろの誤差・エラーに対しての許容値をできるだけ大きくするように、十分に広いパラメータ領域を持つ JLC の運転形態が考えられた [3]。その動機は SLC ( SLAC ) においてデザインルミノシティーを達成するのに長い時間を要したことである。その主な原因は予想されていなかった大きなエミッタンス増大であった。そこで、パラメータの最適化を行う過程で、入射用 8GeV リニアック、主リニアック、コリメーション・最終収束システムの 3 ケ所での加速管や電磁石の制作・設置誤差、ビーム位置制御の誤差などに起因するエミッタンス増大の許容値の違う 3 つのパラメータセット A,B,C ( 表 2 を参照 ) が用意された。エミッタンス増大に対する許容値をエミッタンス budget という。

主リニアックでの  $\Delta\epsilon_y$  ( 垂直方向のエミッタンス増大または budget ) は、A,B,C に対して、それぞれ、60%、120%、200% と設定された。ここで、加速管設置誤差の許容値を十分に達成可能である妥当なもの ( 15 ~ 16 $\mu\text{m}$  ) とするために、この誤差に起因する単バンチ横方向 wake field による  $\Delta\epsilon_y$  はその 60% までとした。この条件下で、ほぼ同じルミノシティーを達成するように、主に、ビーム強度、加速勾配、IP での  $\beta$  関数などが最適化された。また、主リニアック出口より衝突点までのコリメーションと最終収束システムでのエミッタンス budget は A、B、C に対してそれぞれ 40%、50%、80% に設定されている。実際の運転形態は A,B,C の局所的なものではなく A~C の間の連続的な設定値でのものとなる。おおまかに、A は小エミッタンス、小電流で、C は大エミッタンス、大電流の運転形態と呼ぶことができるが、どれが容易かは自明ではない。例えば、加速管設置誤差許容値ではほぼ同じで A がややゆるいが、4 極電磁石の振動の許容値では C の方がゆるくなる。

以上の設定では地盤振動による エミッタンス budget は与えられていない。原理的には、想定された budget に余裕があればそれをあてることができる。また、これら budget は 2 乗和というより線形に足されるものと思われる。

#### ルミノシティー向上のための検討課題

加速器が十分にチューニングされたなら、さらに高いルミノシティーを得るために、C のように高電流でしかも A のように低エミッタンスの運転形態を取ることができると思われる。ただし、そのままのパラメータではビーム制動輻射 ( beamstrahlung ) が強く、また、アラインメントの許容値もきつくなり過ぎる。一定のパルス幅の下、バンチ数を倍増しバンチ当たりのビーム強度を下げることであればこれらを回避できる。こうして A から、( 1 ) バンチ間隔を半分の 1.4nsec にしバンチ数を 190 バンチに倍増し、( 2 ) C のトレイン当たりのビーム強度と同じになるようにビーム強度を  $0.55 \times 10^{10}$  に下げ、( 3 ) 主リニアック中でのエミッタンス増大比を A と同じままにダンピングリング後のエミッタンスを 2/3 とよくし、( 4 ) バンチ長を 80 $\mu\text{m}$  と少し短くし、( 5 ) 衝突点でのベータ関数を少しだけよくするというシナリオ、すなわち、X がある。このとき、バンチ強度が下がったために、このビーム制動輻射によるエネルギー損失は標準セットのものより少なくなり、アラインメントの許容値もゆるくなる。このため、ビーム強度を再び A のものに戻しさらにルミノシティー向上の可能性がある。そうしたものが Y である。この Y では、システムのいたるところでビームロ - ディングがひじょうに高くビーム調整が難しくなり、しかも、陽電子の生成数も C に比べて 3 割増加しなければならない。

#### 主リニアックの構成

X-バンドの主リニアックの高周波加速は、8本のクライストロンからの高周波出力パルスを合成したものを4分割し、時間遅延線によって12本の加速管に分配供給する Delay Line Distribution System ( DLDS ) より構成されている。ビーム通過時の加速勾配の実効値は 50 ~ 60MeV/m である。

C-バンドの場合、2本のクライストロンの出力を1つのパルス圧縮装置で3.5倍に増幅し、長さ1.8mの加速管4本に供給する加速ユニットより構成されている。また、長さ8mのこの1ユニットには1個の4極電磁石がビー



	500 GeV					1 TeV		
	A	B	C	X	Y	A	B	C
重心系エネルギー $E_{cm}$ (GeV)	535	515	500	497	501	1046	1008	978
繰り返し周波数 (Hz)	150			100				
バンチ当り粒子数 ( $10^{10}$ )	0.75	0.95	1.1	0.55	0.70	0.75	0.95	1.1
パルス当りバンチ数	95			190			95	
バンチ間隔 (ns)	2.8			1.4			2.8	
バンチ長 $\sigma_z$ ( $\mu\text{m}$ )	90	120	145	80	80	90	120	145
エミッタンス (減衰リング出口) $\gamma\epsilon_x$ ( $10^{-8}\text{m-rad}$ )	300			300			300	
$\gamma\epsilon_y$ ( $10^{-8}\text{m-rad}$ )	3.0			2.0			3.0	
クライストロン peak power (MW)	75							
クライストロン パルス長 ( $\mu\text{s}$ )	1.5							
加速管長 (m)	1.8							
加速管 filling time (ns)	103							
加速管 平均 $a/\lambda$	0.18							
無負荷加速勾配 (MV/m)	72							
有効加速勾配 (MV/m)	59.7	56.7	54.5	54.2	50.2	59.7	56.7	54.5
ビーム電力 (各ビーム) (MW)	4.58	5.58	6.28	6.24	7.99	5.97	7.28	8.18
平均加速位相 (deg.)	10.6	11.7	13.0			10.9	11.4	13.1
加速管設置許容誤差 ( $\mu\text{m}$ )	16.1	15.2	14.6	18.	14.	13.1	11.7	11.9
DLDS nonet 数	23			25		46		
加速管数 (各リナック)	2484			2700		4968		
クライストロン数 (各リナック)	1656			1800		3312		
加速管全長 (各リナック) (km)	4.47			4.86		8.94		
各リナック全長 (km)	5.06			5.50		10.12		
消費電力 (2リナック) (MW)	118			128		160		
エミッタンス (衝突点) $\gamma\epsilon_x$ ( $10^{-8}\text{m-rad}$ )	400	450	500	400	400	400	450	500
$\gamma\epsilon_y$ ( $10^{-8}\text{m-rad}$ )	6.0	10	14	4.0	4.0	6.0	10	14
衝突点ベータ関数 $\beta_x$ (mm)	10	12	13	7	7	10	12	14
$\beta_y$ at IP (mm)	0.10	0.12	0.20	0.08	0.08	0.125	0.15	0.20
衝突点ビームサイズ $\sigma_x$ (nm)	277	330	365	239	239	197	235	260
$\sigma_y$ (nm)	3.4	4.9	7.6	2.57	2.57	2.7	3.9	5.4
ビーム輻射パラメータ $\Upsilon$	0.14	0.11	0.09	0.127	0.163	0.38	0.30	0.25
ピンチ効果	1.41	1.36	1.50	1.36	1.41	1.41	1.46	1.5
ビーム輻射損失 $\delta_B$ (%)	4.5	4.0	3.6	3.52	5.27	10.9	10.3	9.7
ビーム輻射光子数 ( $e^-/e^+$ 1 粒子当り)	1.0	1.1	1.17	0.89	1.12	1.3	1.43	1.51
ルミノシティ ( $10^{33}/\text{cm}^2/\text{s}$ )	9.6	8.7	7.5	17.3	27.8	12.5	10.9	9.7

表 2: X-band JLC パラメータ。

重心系エネルギー $E_{cm}$ (GeV)	500	1000
繰り返し周波数 (Hz)	100	50
バンチ当り粒子数 ( $10^{10}$ )	1.11	1.39
パルス当りバンチ数	144	72
バンチ間隔 (ns)	2.8	2.8
バンチ長 $\sigma_z$ ( $\mu\text{m}$ )	200	200
エミッタンス (減衰リング出口) $\gamma\epsilon_x$ ( $10^{-8}\text{m-rad}$ )	300	300
$\gamma\epsilon_y$ ( $10^{-8}\text{m-rad}$ )	3.0	3.0
クライストロン peak power (MW)	50	100
クライストロン パルス長 ( $\mu\text{s}$ )	3.5	3.5
加速管長 (m)		1.8
加速管 filling time (ns)		296
加速管 平均 $a/\lambda$		0.148
無負荷加速勾配 (MV/m)	39.4	54.8
有効加速勾配 (MV/m)	30.6	43.6
ビーム電力 (各ビーム) (MW)	6.4	8.0
平均加速位相 (deg.)	14.5	14.5
加速管設置許容誤差 ( $\mu\text{m}$ )	30	30
加速管数 (各リナック)	4384	6244
クライストロン数 (各リナック)	2192	3122
加速管全長 (各リナック) (km)	7.85	11.2
各リナック全長 (km)	9.35	13.4
消費電力 (2リナック) (MW)	230	228
エミッタンス (衝突点) $\gamma\epsilon_x$ ( $10^{-8}\text{m-rad}$ )	360	360
$\gamma\epsilon_y$ ( $10^{-8}\text{m-rad}$ )	5.0	5.0
衝突点ベータ関数 $\beta_x$ (mm)	15	30
$\beta_y$ at IP (mm)	0.20	0.20
衝突点ビームサイズ $\sigma_x$ (nm)	332	332
$\sigma_y$ (nm)	4.52	3.21
ビーム輻射パラメータ $\Upsilon$	0.079	0.188
ビーム輻射損失 $\delta_B$ (%)	3.90	8.33
ビーム輻射光子数 ( $e^-/e^+$ 1粒子当り)	1.43	1.61
ルミノシティ ( $10^{33}/\text{cm}^2/\text{s}$ )	14.6	15.5

表 3: C-band JLC パラメータ。(本パラメータは暫定的なものである。)

ム収束用として設置されている。重心系エネルギーが 500GeV は合計約 2200 個の加速ユニットよりできている。ビーム通過時の加速勾配の実効値は約 31 ~ 44MeV/m である。

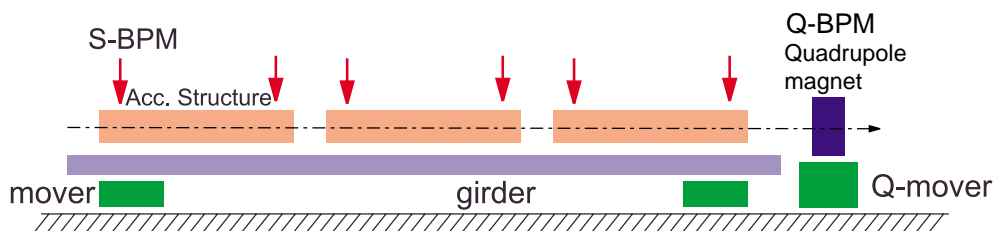


図 2: 主リニアックでの加速管・電磁石配置の概念図。

図 2 のように、各加速管そして各電磁石(特にビーム収束用 4 極電磁石)にはビーム位置検出器( Beam Position Monitor または BPM とも言う)が設置され、ビームがそれぞれの中心を通るように各種フィードバックによりリアルタイムで制御される。これら位置補正の方法は加速管と電磁石の位置そのものを精密可動台(ムーバ-)により動かすもの、4 極電磁石に巻かれた補正コイルによりその磁場中心を調整するもの、4 極電磁石の上流に設置される補正偏向電磁石によりビーム位置を動かすものなどが考えられる。運転時の地盤振動の許容値を算定するには、フィードバック性能のシミュレーションによる評価を必要とする。次章でその詳細を議論する。

主リニアックには普通の線形加速器部分のほかに、diagnostics section および、バイパスが付属されている。diagnostics section はリニアック出口および途中の数箇所に置かれ、ビームの診断(エミッタンス、エネルギーなどの測定) pulse-to-pulse フィードバックなどを行なう。1 箇所数十メートル以上必要と思われるが、詳細な設計はまだ行なわれていない。(表 2 および表 3 のリニアック全長には diagnostics section は含まれていない。)

バイパスは、リニアックの途中からビームを取り出して直接コリメーションシステムへ送るためのビームラインである。低エネルギーの衝突実験を行う場合、加速勾配をさげる、あるいは、リニアック後半部分に高周波加速パルスを入れないようにすればよいが、いずれもビームの質が悪く、ルミノシティが低下する。これを避けるために、ビームがリニアック後半を通らずに衝突点に運ばれるようにするのがバイパスである。このビームラインのためにトンネルはいくらか余裕が必要になる。分岐は diagnostics section に置く。

## 4 地盤振動及び変動の影響

### 4.1 地盤振動及び変動について

リニアコライダーでは極めて微細なビームの衝突を行うため、地盤振動、地盤変動がサイト決定のための重要な因子になる。一般に、スペクトラム密度関数  $P(f)$  は、地盤振動や変動を含めた経験則として、

$$P(f) = \frac{k}{f^2(f_0^2 + f^2)}$$

と表せる [4]。即ち、 $f_0$  ( $=0.01 \sim 0.1\text{Hz}$ ) より高い周波数では  $P(f)$  が  $1/f^4$  に比例して減少し、これを地盤振動域と呼び、一方  $f_0$  より小さな周波数領域では、 $P(f)$  は  $1/f^2$  に比例して減少し、これを地盤変動域と呼ぶことにする。

周波数的に地盤振動域に入るものには通常地震、カルチャーノイズ、波浪がある。この内、体感地震波と波浪は、通常、加速器のベータロン波長程度の距離では位置相関の良い振動となるが、カルチャーノイズは一般に位置相関がないので、この振幅が大きなサイトはリニアコライダーの建設にとっては不適地となる。地震は過去の地震歴を調査し、頻度の少ない、最大振幅時でも機器に損傷を与える確率の小さなサイトを選択すれば問題ない。但し、機器については地震動に共鳴する恐れのある機器構造や設置方式は避ける必要がある。又、ビーム運転時には、早期にビームをダンプする制御方式を導入すべきである。地盤振動では、所謂スローアースクエー

クとかマイクロアースクエークに関して、それらの周期、頻度と振幅、及び継続時間に関する事前調査は必須である。何故なら、衝突ビームの振動によるビームのずれ違いばかりではなく、エミッタンスの増大に關与する恐れがあり、制御も複雑になるからである。

一方地盤変動領域に入るものには、地球潮汐や海洋潮汐、大気潮汐、気圧、地下水位、日射の影響、プレートテクトニクス、地下深部の活動といったものが入る。この内、潮汐は長距離に及ぶ位置相関のある現象なので、リニアコライダーの建設では特に問題にはならないが、これらの振幅が  $10 \sim 100 \mu\text{m}/\text{km}$  であること、及び軟弱地盤ではトンネルの構築方式に強く依存するものの、変動の残差成分が大きく残ることを忘れてはならない。これはアライメントの変動となり、エミッタンスを増大させる原因になる。日射による地表面の歪の影響はサイトによるが、地下 20m に及ぶと言われている。アライメントの日較差となって現れる危険性があるから、トンネルの構築方法、地上との接続方式に注意を払う必要がある。プレートテクトニクスは所謂ドリフト成分となるが、加速器の寿命以内でトンネルを破壊するような変動はないと思って良い。但し、地殻変動にはその過去の歪を開放するためにドリフトする成分もあり、当然この変動には着目して、サイトを選定すべきである。残りの変動成分がブラウン運動のような変動を示す成分で、ATL モデルという経験則(地盤のフラクタルな変動で理論的に説明しようという研究はある)に分類される。この変動は加速器のアライメントに關係し、主としてエミッタンスの増大に關与する。また、いわゆる設置誤差(静的なランダム分布)とは異なり、時間的に変動する関数となる。

4.2 節以降では、リニアコライダー各部分の内で、最も地盤の影響を受ける主リニアックおよび最終収束システムにおける地盤振動・変動の許容レベルを検討する。この検討を進める際には、その時間依存性と位置依存性の両者を区別する必要がある。速い振動は補正が難しいが、遅い変動はより大きな振幅に対しても補正が可能である。また、近い2点での変動の違いは、遠く隔たった2点での違いより、ビームに対する影響が大きい。したがって、許容レベルを考える上では、厳密には振動・変動の周波数・波長の關係を含むモデルが必要になる。本報告書では、つぎの2つの簡略化したモデルのみ扱うが、最終的には、サイト候補地での測定値を用いたシミュレーションが不可欠である。

**ランダムモデル** 相異なる磁石・加速管は全く異なる乱雑な運動をすると仮定する。この場合、変動は唯一のパラメータ、すなわち位置変動の rms (2乗平均の平方根) で表される。このモデル自身は時間経過を問題にしない。

**ATL モデル** 距離  $L$  だけ隔たる2点  $P_1$ 、 $P_2$  が地盤変動によって時間  $T$  の間にそれぞれ  $y_1$ 、 $y_2$  だけ移動したとすると、ATL モデルでは

$$\langle (y_2 - y_1)^2 \rangle = A \times T \times L \quad (1)$$

が成り立つとする。A はサイトによって決めるパラメータで、m/sec の次元をもつ。このモデルは簡単なためにシミュレーションにしばしば用いられるが、数秒以下の短周期成分、メートル以下の短波長成分には適当でない。

世界の A 値の例を付録 11.1 に示した。

許容レベルを数値的に表現するには、許容されるエミッタンス増加を指定する必要がある。エミッタンス増加をもたらす原因はさまざまであるが、ここでは地盤変動に起因する増加の許容値として、10% (rms) を採用する。

## 4.2 主リニアック

主リニアックの役割はビーム加速であるが、その間にビームの質(エミッタンス)を悪化させないことが絶対条件である。ビーム軌道の面から見た場合、主リニアックのもっとも重要な構成要素は、加速管と4極電磁石である。エミッタンスを悪化させないためには、主リニアックが厳密に直線的であればよいが、加速管・4極電磁石を必要な精度で当初から直線的に設置することは不可能であり、ビームを使って徐々に直線性を改善してゆくことになる。最終目標はリニアックの直線性そのものではなく、あくまでもエミッタンスである。

ひとたびエミッタンスのよいビームが得られても、地盤変動により次第に悪化してゆく。このため軌道補正が常に必要である。したがって、軌道補正の方法と地盤振動・変動の許容レベルには密接な関係がある。

当初から完全な直線上に設置することが不可能である以上、仮に地盤変動が全くない場合でも軌道補正は必要であり、各種の軌道補正装置に条件が課せられる。これらの条件はサイト選択には直接関係を持たないが、必須条件として満たされていなければならない。これには、次のような事項がある。

- 各4極電磁石にはビーム位置を測定するモニター(Q-BPM)を付属させるが、このBPMの位置分解能(相続く2回のビーム位置測定の違いの精度)が、 $1\mu\text{m}$ 以下(C-bandでは $2\mu\text{m}$ 以下)であること。これにより、ビームを用いた較正(下記のQ-BPMアライメント)で、4極電磁石の磁場中心とBPMの原点の間の差が $2\mu\text{m}$ 以内(C-bandでは $4\mu\text{m}$ 以内)に抑えられる。
- 同様に各加速管にもBPM(structure-BPM, S-BPM)が付属される。この絶対精度(加速管中心とビーム位置の差の測定精度)が $15\mu\text{m}$ 以下であること。(C-bandの場合は $30\mu\text{m}$ 以下)
- そのほかに、加速管の加工精度に関する条件がある。

なお、これらの条件が満たされていても、完全にゼロでない限りこれに付随するエミッタンス増加が地盤とは関係なく常に存在する。前記の地盤に起因するエミッタンス増加の許容値(10%)は、これらの地盤によらない成分を除いたものである。

また、加速管と4極電磁石との設置誤差には根本的な違いがある。ビームが加速管の中心をはずれて通過する場合、ビーム自身が誘起する電磁場(ウェーク場)によってビームが蹴られる。この蹴り角はバンチの先端と後端とで異なる。しかし、同じ大きさのずれに対する蹴り角は、4極電磁石の方がはるかに大きい。したがって、後述のように、4極電磁石の場合、各電磁石の $10\text{nm}$ の変動でもリニアック出口でのビームの重心位置のずれは垂直方向に $0.4\sigma_y$ になる。しかし、4極電磁石はバンチ全体を一様に蹴るのでエミッタンス増大は小さい。各磁石の変動が $O(1\mu\text{m})$ になってはじめてエミッタンス増大も問題となる。

これに対して、加速管の場合、 $1\mu\text{m}$ 以下の変動では全く問題ない。一方、これが $O(10\mu\text{m})$ になると、ビーム位置誤差が問題になると同時に、バンチの頭尾を別々に蹴る効果であるためエミッタンス増大も問題になる。

通常のサイトであれば、 $10\mu\text{m}$ の地盤変動をもたらす時間は、加速管の位置補正に必要な時間より十分長いので、精密可動台(ムーバ-)による加速管の位置補正は比較的ゆっくりと行えば良い。以下の議論では、加速管はstructure-BPMの読みによって常にビーム位置にあわせられるものとする。したがって、加速管そのものは地盤変動に対する条件を与えない。上記のstructure-BPMの要求精度はこれで決まる。ただし、これは、加速周波数の選択が、地盤変動条件に影響しないという意味ではない。主リニアック全体を考慮した場合、4極電磁石の強さの最適値は、加速周波数により異なり、高周波ほど4極電磁石は強くなる。このため、一般に高周波のほうが地盤変動許容値は厳しい。

まず、設置および軌道補正の手順の概略をまとめる。なお、以下の図表等には $y$ (鉛直)方向のエミッタンスのみ現れている。これはリニアックの設計上 $y$ 方向のエミッタンスが $x$ 方向よりはるかに小さく、地盤と影響を受けやすいためである。また、以下で示される主リニアックのシミュレーションの条件は、ビームエネルギー( $E_{beam}$ )、ビーム強度( $N$ )そしてバンチ長( $\sigma_z$ )がそれぞれ $E_{beam}=500\text{GeV}$ 、 $N=1.01 \times 10^{10}$ そして $\sigma_z = 125\mu\text{m}$ であり、

QBPMの相対位置精度が $2\mu\text{m}$ である。一般に、許容値の基準の一つとして用いられるエミッタンス増大はビームエネルギーの平方根に比例する( $\Delta\epsilon/\epsilon \propto \sqrt{E_{beam}}$ )

### (1) 初期アライメント

建設当初、および地盤変動の集積が非常に大きくなった場合などの、サ-ベイによるアライメント。その間実験はできない。

従来方法(レ-ザ-トラッカー、レベル望遠鏡、水準器などを使う方法)[6, 7, 8, 9]では、約2,000台におよぶ電磁石のアライメントに1年ほどかかってしまう。レ-ザ-光と光センサ-、伸張ワイヤ-法、水管レベル法その他の近代技術と、パソコン制御のム-バ-を組み合わせ、高能率化を図った新しいアライメント方法を開発する必要がある。必要な精度は、300m以上の長距離にわたる直線性についてはmmのオ-ダ-、100m以下には数100 $\mu\text{m}$ 程度であり、これらの精度は、従来方法でも達成できる。

初期アライメントを行なう頻度は地盤変動によって決まるが、継続的な運転中は絶えず軌道補正を行なっているので加速器は地盤変動に追従できる。問題となるのは、夏期シャットダウンのような長期運転休止後の再開時である。そのたびに初期アライメントを繰り返すのは望ましくない。したがって、3ヶ月程度の間の地盤変動が上記の数値以下である必要がある。ATLモデルでは $A \lesssim 1 \times 10^{-16}\text{m/s}$ (ここで、 $\langle \Delta y^2 \rangle = (300\mu\text{m})^2$ ,  $T=3$ ヶ月、 $L=30\text{m}$ )に相当する。

### (2) Q-BPM アライメント

ビームを用いて、各4極電磁石とそれに付属するBPMの原点をあわせる。これは各4極電磁石について個別に行なう必要があり、その方法によって数時間~数十時間を要する[付録11.3参照]。その間実験は中断する。ひとたび較正された後は長期間にわたってこれが保持される必要がある(これは、地盤の問題ではなく、BPMのハードウェアの問題である)。このアライメントの精度はrmsで $2\mu\text{m}$ とする。なお、この較正にはビームを用いるが、4極電磁石1台の較正中のビームの揺れ(jitter)は $2\mu\text{m}$ より十分小さくなければならない。

図3は、Q-BPMアライメントの要求精度、および後述のsimple correctionの限界を調べたものである。初期アライメントに $0 \sim 400\mu\text{m}$ のランダム誤差、Q-BPMアライメントに標準偏差 $0 \sim 4\mu\text{m}$ の誤差があった場合の、軌道補正後のエミッタンス増加がプロットされている。これにより、Q-BPMアライメントが $2\mu\text{m}$ 以内ならエミッタンス増加が25%以内におさまることがわかる。(このエミッタンス増加は地盤変動と関係なく存在するものである。)現存または開発中のBPMについては付録11.2を参照。

### (3) Advanced correction

次項の補正法により十分小さなエミッタンスが得られない場合、各種の高度な補正法を行なう。Dispersion free(5ヶ所ほどのdiagnostics sectionごとにすべての4極電磁石の強さを10%程度変えながら全体を補正する) Wake free(ウェーク場の影響を含めたDispersion free法の拡張)などがある。Emittance bump(特定の場所で軌道的位置を加速管中心から意図的にずらす)などのように、ビームサイズモニターを使うものもある。必要な時間は方法によって大きな幅があるが、数分から1日程度。この補正中はmachine studyとし、実験は中断される。

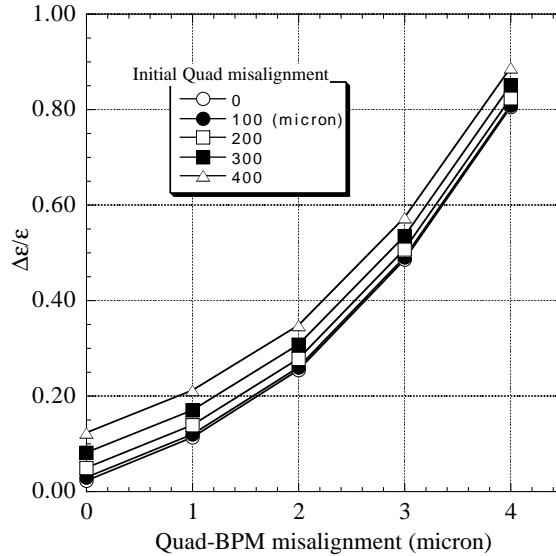


図 3: Simple correction の補正限界(ランダムモデル) , 4 極電磁石のランダム位置誤差 0 ~ 400 $\mu\text{m}$  の場合、simple correction 後の残留エミッタンス増大を Q-BPM の相対位置精度の関数として図にしたもの。プロット点は違った乱数の種による 100 回のシミュレーションの平均値である。

#### ( 4 ) Simple correction

全 Q-BPM の読みから行列方程式を解いて各 4 極電磁石の位置を動かすことで補正する。運転中の Q-BPM 値以外の情報(ビームサイズモニターの情報、4 極電磁石の強さを変えた場合の情報など)を必要としない。したがって、物理実験と両立する。Simple correction は 10 秒に 1 回程度行なうことが可能と考えられる [付録 11.4 参照]。

補正方法は基本的にビーム重心位置の補正であるが、エミッタンスも自動的に補正される。しかし、地盤変動の集積が大きくなると、位置は補正されてもエミッタンス増加が無視できなくなる。

ランダムモデルでのシミュレーションによると、地盤変動の rms 値が  $\lesssim 300\mu\text{m}$  であれば、地盤変動によるエミッタンス増加は 10% の許容値以下である(図 3)。図 4 は、ATL モデルの場合のシミュレーション結果で、これは、Q-BPM の誤差が前記のように  $2\mu\text{m}$  あるときに、simple correction による軌道補正後のエミッタンス増加をプロットしたものである。 $A \times T < 9 \times 10^{-10}\text{m}$  であれば、地盤変動によるエミッタンス増加が 10% 以下になることがわかる。(  $A \times T = 0$  でのエミッタンス増加は Q-BPM の誤差によるものであるので除く。)なお、図中の誤差棒は使用乱数による変化範囲の 1 標準偏差を示したものであり、その分布は一例として、 $A \times T = 9 \times 10^{-10}\text{m}$  の場合について図 5 にプロットしてある。誤差棒は図 4 のそれに対応する。

上記の地盤変動限界を超えた場合は、前項の Advanced correction が必要になる。

なお、これまで多くの加速器で行なわれている軌道補正は、4 極電磁石の近傍に設置された補正磁石によってビームを蹴るものである。これに対して、上記の説明では 4 極電磁石を動かすとしたが、かわりに補正磁石を使用しても同様の結果を得るアルゴリズムが存在する。補正磁石の位置が 4 極電磁石に十分近ければ補正磁石の磁場励起は 4 極電磁石の磁場中心を動かすのと同等である。(したがって、上記の記述は、4 極電磁石を移動する補正法を採用することを主張するものではない。)ただし、このときの補正磁石の磁場精度は a few % (要求磁場中心精度 / 初期設置精度 =  $2\mu\text{m} / \text{数 } 100\mu\text{m}$ ) が要求される。

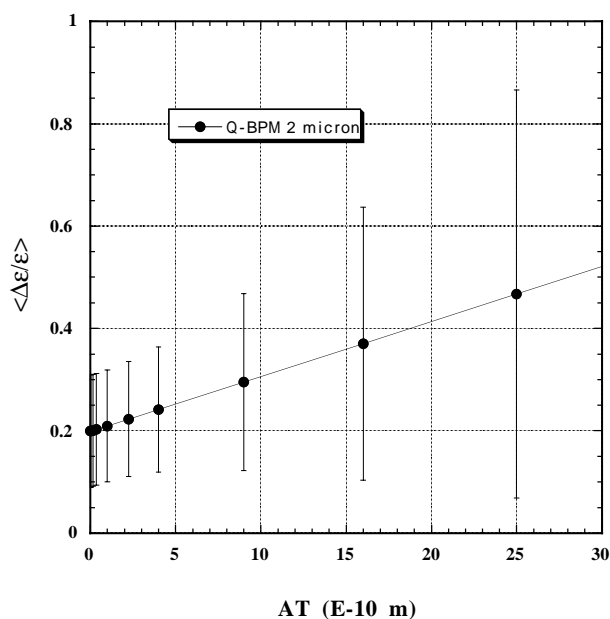


図 4: Simple correction の補正限界 (ATL モデル)。4 極電磁石の位置誤差を ATL モデルで与えて simple correction を行なったときの残留エミッタンス増大を  $AT$  の関数として図にしたもの。100 回のシミュレーションの平均値とそのばらつきを誤差棒として表している。Q-BPM の相対位置精度は  $2\mu\text{m}$  としている。

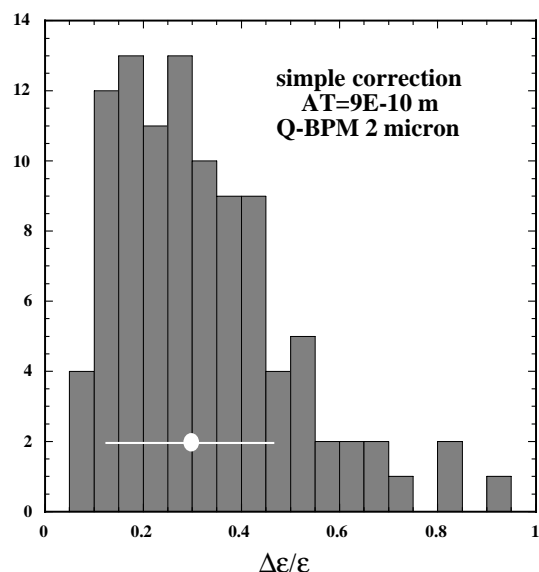


図 5: 使用乱数の違いによるエミッタンス増加値の分布。図 4 の ATL モデル  $A \times T = 9 \times 10^{-10} \text{m}$  に対応する。Q-BPM の相対位置精度  $2\mu\text{m}$ 。

#### ( 5 ) Pulse-to-pulse の重心フィードバック

4 極電磁石の位置振動がランダムモデルで  $10\text{nm}$  以内 ( C-band の場合  $20\text{nm}$  以内 ) であれば、ビームの振動は rms でビームサイズの  $0.4$  倍以下であり、これによるルミノシティの減少は小さい (  $5\%$  程度 ) ので、補正の必要はない。

これを越えた場合、振幅が十分小さければ、エミッタンスは増加せず、ビーム位置がずれるだけであり、5 ケ所ほどの diagnostics section および衝突点直前で、過去の数 10 パルスの測定結果を使ってビームの重心フィードバックを行なえば十分である。フィードバックは一般に繰返し周波数の  $1/10$  の速さ ( 約  $10\text{Hz}$  ) で適用できるとしている。

地盤変動が、ランダムモデルで約  $0.25\mu\text{m}$  ( 図 6 )、ATL モデルで  $A \times T \approx 0.5 \times 10^{-14} \text{m}$  ( 図 7 ) に達すると、エミッタンス増加が  $10\%$  の許容値を超えるので、数箇所での重心フィードバックだけでは不足になり、Simple correction が必要になる。また、これらの許容値はこの重心フィードバックの行われる diagnostics section の数の平方根に比例するものと思われる。

#### ( 6 ) Intra-pulse フィードバック

JLC のビームは 1 つのパルスが  $2.8\text{nsec}$  間隔の 95 個のバンチからなる。はじめの数個のバンチの位置を測定して、残りのバンチにフィードバックすることができれば、 $150\text{Hz}$  の地盤振動にも対処できることになる。さらに、これをパルス内で繰り返せれば  $\text{MHz}$  以上の変化にも対応可能になる。しかし、Intra-pulse フィードバックが技術的に可能か否か確かではないので、地盤振動の許容値を評価する時にはこの速いフィードバックを仮定しない。



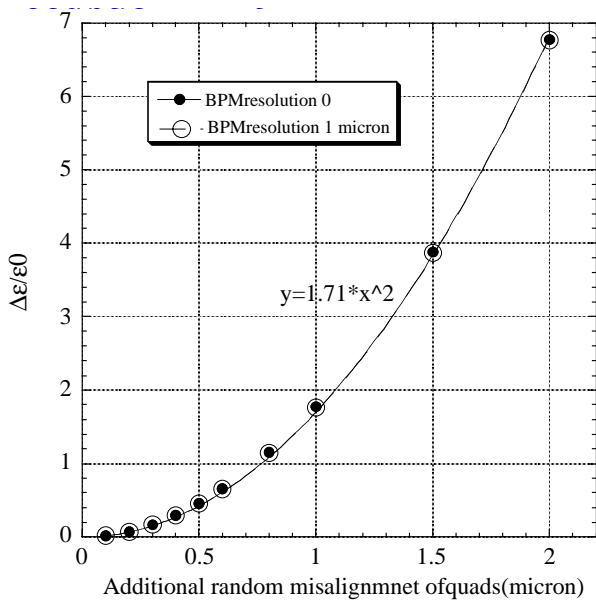


図 6: ランダムな地盤変動を仮定した時の Pulse-to-pulse の重心フィードバックのシミュレーション結果。

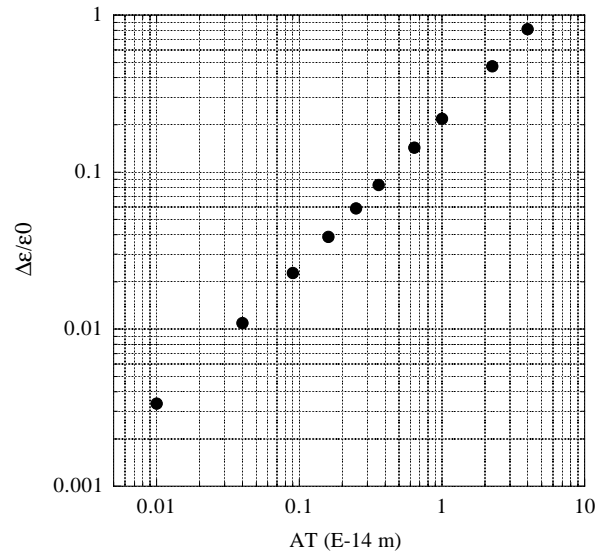


図 7: ATL モデルで 4 極磁石の位置誤差を与え、Pulse-to-pulse の重心フィードバックのみで補正したときのエミッタンス増加。

### 4.3 最終収束システム

conventional な光学系、すなわち、JLC-1(December,1992) 及び JLC Design Study(May, 1997) の最終収束システムの場合を先ず述べる [12]。ただし、JLC-1 のものは  $E_{cm} = 500\text{GeV}$  のもので、JLC Design Study のものは  $E_{cm} = 1.5\text{TeV}$  まで適応できる設計となっている。したがって、前者の最終収束システム全長は約 500m で、後者のものは約 1600m である。JLC-1 の光学を図 8 に示す。以下の章は本検討会で直接検討されたものではなく、JLC-1 レポート [1] と生田・山本両氏の論文 [12] に基くものである。また、本検討会で検討・議論された新しい最終収束システムについては地盤振動に関する検討結果がまだ得られていないためこの章では取り扱わない。しかしながら、2 つのシステム的全長、ビームサイズなどほとんど同じなため、以下の議論は新しいシステムでも有効である。

4 極と 6 極電磁石の位置、強さなどについて 4 種の許容値がある。

先ず、ビームが磁場中心を離れて通過するときに蹴られることによる許容値である。一般に、強さ  $k$  の 4 極電磁石での垂直方向のビーム位置のオフセットを  $\Delta_y$  とすると、衝突点でビーム位置 ( $\Delta_y^*$ ) は、 $\Delta_y^* = k\Delta_y\sqrt{\beta\beta^*}\sin\delta\psi$  と見積もられる。ここで、 $\beta$  はこの 4 極電磁石での  $\beta$  関数であり、 $\delta\psi$  はそこから衝突点までの位相差である。最終収束系で最も厳しいのは衝突点に最も近く設置される 4 極電磁石 QC1 (衝突点よりの距離  $=\ell^*$ ) で、 $\beta_{QC1} = \ell^{*2}/\beta^*$ 、 $k_{QC1} = 1/\ell^*$  として  $\delta\psi = 90^\circ$  であるので、 $\Delta_y$  の垂直方向のズレがあるとき、衝突点でビームは同じ垂直方向に同じ大きさ  $\Delta_y^* = \Delta_y$  だけずれてしまう。これはフィードバックの効かない 10Hz 以上の速い振動の許容値を決定している。

2 番目のものは、ビームのスポットサイズの増大を与える電磁石の変動によるものである。この許容値で最も厳しいのは QC4 と QM1 で、10% のビームサイズ増大に対応して、それぞれ 160nm と 140nm である。すべての電磁石に設置される BPM を使用する軌道フィードバックにより、この許容値は達成されなければならない。このとき、BPM の位置精度は 100nm 以下でなければならない。

3 番目のものは、電磁石の相対的な強さ誤差である。最も厳しいのは QC1 で、10% のビームサイズ増大に対応して、 $\Delta k/k \sim 1 \times 10^{-5}$  である。電源の安定性、リップルなどをこのレベルで制御しなければならない。

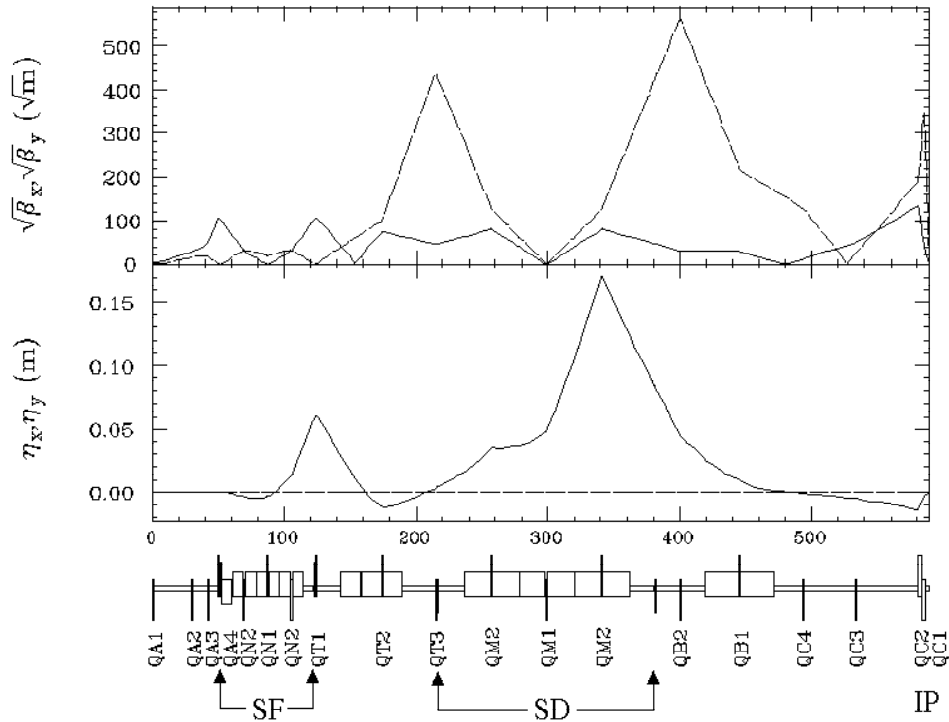


図 8: 最終収束システムの光学 ( JLC-1, December, 1992 ) ここでビームエネルギーは 250GeV である。

4 番目のものは、電磁石の skew 回転角の誤差である。最も厳しいのは QC1 と QC2 で 10% のビームサイズ増大に対応して、 $3\mu\text{radian}$  である。

#### ナノメータ衝突：オフセットとビームサイズの増大

まず、2つのビームの衝突点での垂直方向の位置オフセット  $\Delta_y^*$  ( 相対距離 ) によるビーム・ビームの disrupted angle ( 偏向角 )  $\Delta_y'$  は、 $\Delta_y' = 56\mu\text{rad} \times (\Delta_y^*/\sigma_y^*)$  ( ただしバンチ内粒子数  $N = 1 \times 10^{10}$  ) で表せる ( 図 9 )。位置分解能  $1\mu\text{m}$  の BPM を用いれば、このオフセットは測定でき、10Hz でフィードバックができる。ただし、この式の有効な範囲は  $\Delta_y^*/\sigma_y^* \leq 5$  であるが、シミュレーション結果の図 10 の示すようにそれ以上のオフセットの時でもこのビーム・ビームの偏向は正面衝突を維持するのに役に立つものである。フィードバックの働かない 10Hz 以上の領域での地盤振動の大きさが  $0.5\sigma_y^*$  ( a few nm ) であれば、ルミノシティの損失は 5% 程度にすぎない ( 図 10 )。ただし、問題となるのは衝突点の両側に最も近く設置される2つの最終収束電磁石の相対位置の差であるので、それらのサポートシステムにより相対位置を保つことができれば、この地盤変動の許容値を大きく取ることができる。

#### Orbit Correction と Dispersion Free Orbit Correction

次に、ビームが電磁石の磁場中心からずれて通過することによるビームサイズの増大は、補正磁石 ( steering correctors ) によってビームを各収束電磁石の磁場中心に戻す orbit correction、そして、これらの補正磁石による衝突点でのオフセットに比例する残差の dispersion ( residual linear dispersion ) を取り除く dispersion-free-orbit-correction ( DFOC ) で、 $3\mu\text{m}$  までのランダムな地盤変動に対してほとんどなくすることができる ( シミュレーション結果、図 11 )。また、ATL 則に従う地盤振動モデルの場合のシミュレーション結果を図 12 に示す。図中の

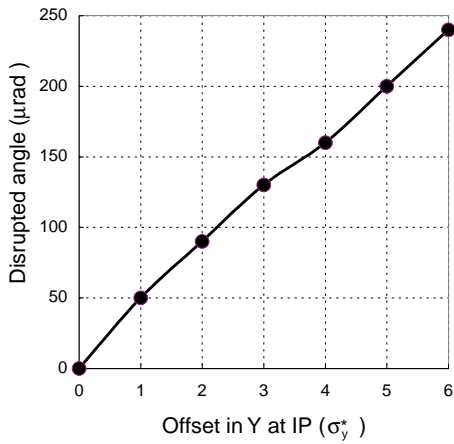


図 9: 衝突点での垂直方向のオフセットを持つビームの disrupted angle: CAIN による計算、ここでビームパラメータは JLC-A のもので、2つのビームは  $\pm 4\text{mrad}$  の水平角度をもつ Crab crossing で衝突している。

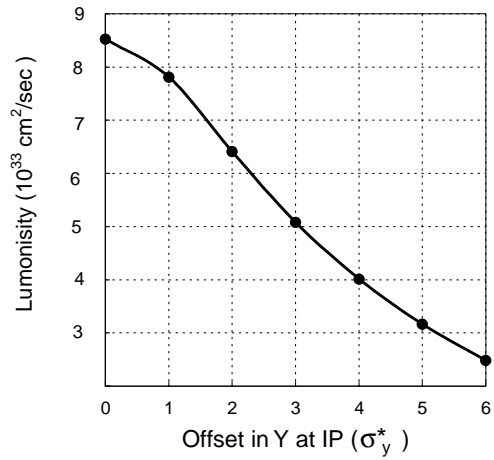


図 10: 衝突点での垂直方向のオフセットを持つビーム衝突のルミノシティ: CAIN による計算、ここでビームパラメータは JLC-A のものである。

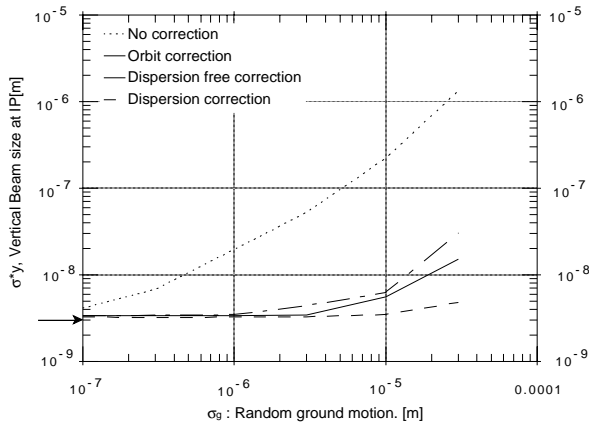


図 11: ランダムな地盤振動の衝突点でのビームサイズに与える影響についてのシミュレーション結果 (JLC-1, December, 1992)。軌道補正前後での衝突点での垂直方向のビームサイズ  $\sigma_y^*$  が示され、左の縦軸の矢印はその設計値を指し示している。

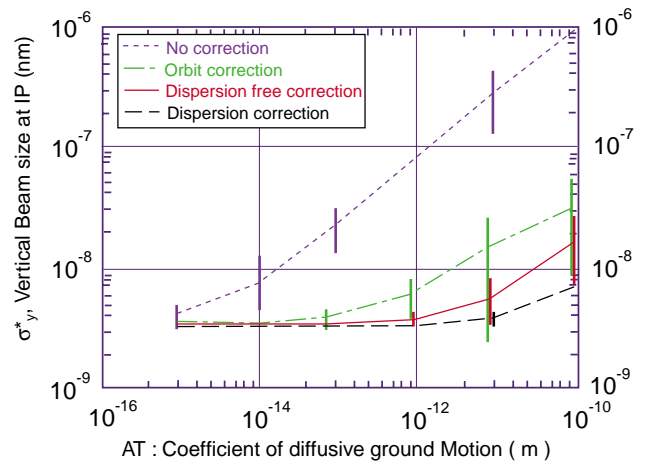


図 12: ATL 則の地盤振動の衝突点でのビームサイズに与える影響についてのシミュレーション結果。誤差棒は 16 個の違った磁石の配置での標準偏差を表している。

Dispersion correction とはシミュレーションならではのもので、予め分かっている residual linear dispersion を補正して得られた非現実的なものであるが、究極目標といえる。ここで BPM の位置分解能として 100nm を仮定している。

ATL 則に注目し、ビームサイズが 10% 増大する時の AT 値は、orbit correction の場合が  $AT=2.5 \times 10^{-14}m$  であり、DFC の場合、 $AT=1 \times 10^{-12}m$  である。

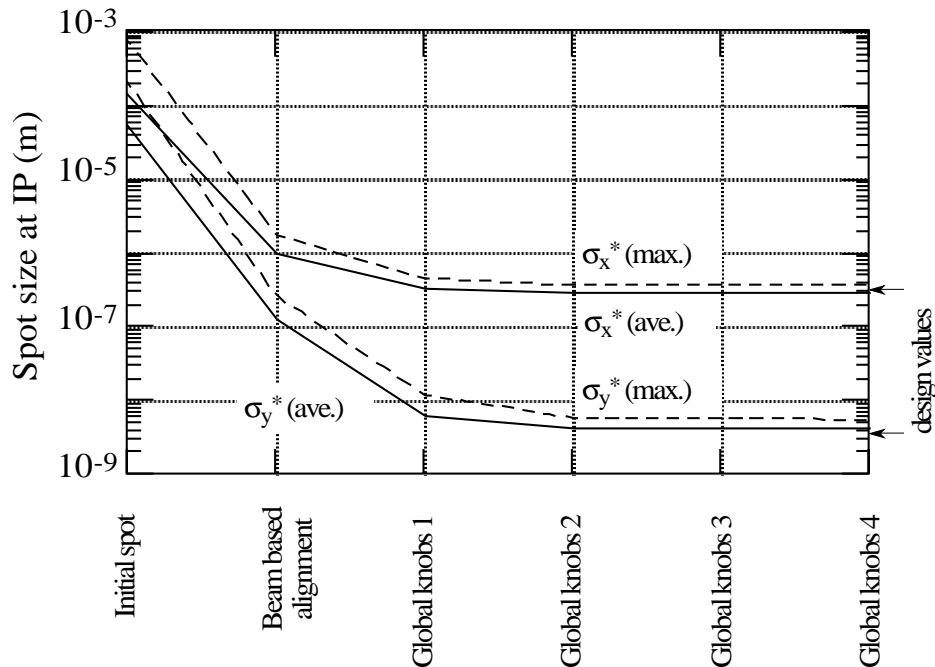


図 13: ビームスポットサイズの最小化の初期誤差からのシミュレーション結果。実線は 12 回のシミュレーションの平均を示し、ダッシュ線はその中の最大値を示している。チューニングは、Beambased alignment、4 サイクルの global knobs で行われた。

### ビーム調整 (BBA と Global knobs)

最終収束系ビームライン上の電磁石等の初期設置後から各種ビーム調整によってデザインのビームサイズを得るまでの過程を検討する。すべての 4 極、6 極電磁石の初期設置誤差は垂直、水平方向ともに  $\sigma = 100\mu m$  のガウス分布をしており、それらの相対的な強さや skew 回転角の誤差もそれぞれ  $\sigma = 0.1\%$  と  $\sigma = 0.1mrad$  のガウス分布をしていると仮定したときのシミュレーション結果を図 13 に示す。このときのガウス分布は  $3\sigma$  までとした。また、異なるランダム数の種による 12 回のシミュレーションの平均をその結果としている。最初の衝突点でのビームサイズは  $100\mu m$  を超えるものであったが、 $2\mu m$  の分解能をもつ BPM を使用して行う Beam-based alignment (BBA) によってビームサイズは  $\sim 1\mu m \times 0.1\mu m$  まで回復した。この後、いくつかの global knobs を変えビームスポットサイズの最小になるところを探した。ここで、スポットサイズは 5% の精度で測定されるものと仮定されている [11]。3 サイクルの global knobs を適用すると、スポットサイズはデザインの大きさにすることができた。このときの 12 回のシミュレーション結果のスポットサイズの最大のもは 3.9nm であり、その平均は 3.5nm であった。

一般に、global knobs とはビームライン上に並んでいる 6 極電磁石の非線形効果やその skew 成分 (回転) を打ち消すもの、dispersion を打ち消すもの、衝突点でのビーム waist 位置を変えるものなど、その用途によって予め用意された電磁石群の調整用の『つまみ』である。これら global knobs は実験を中断せずに行うこともできる。

したがって、ビームサイズ増大に対して DFC では対応できなくなったときにも使用される。その所要時間の評価は、ビームサイズまたはルミノシティーの十分精度(数%)ある測定にかかる時間そして試行回数などに依存するため現時点では難しいが、FFTB や KEKB の経験から 1~2 シフト(8 時間/シフト)程度であると見積もることができる。この global knobs による補正では不十分となれば Beam-based alignment が必要となるであろう。

#### 4.4 地盤振動及び変動の許容値

主リニアックに対する地盤振動・変動の許容値をその値の小さい順にまとめると以下のようになる。また、図 14 に振幅と時間の平面での各種フィードバック・補正可能な範囲を示した。これらの許容値はそれぞれのエミッタンス増大が 10% になる、すなわちルミノシティが 5% 減ずる条件に対応している。

- 4 極電磁石の位置振動がランダムモデルで 10nm 以内であれば、ビームの振動は rms でビームサイズの 0.4 倍以下であり、これによるルミノシティの減少は 5% 程度である。この 10nm は我々の想定している最も速いフィードバックの繰り返し周波数である 10Hz 以上の補正できない地盤振動の許容値である。
- これを超えた場合、Pulse-to-pulse の重心フィードバックが必要。その速さは 10Hz であるから地盤振動への条件として、

$$10\text{Hz 以上の振動振幅} < 10\text{nm} \quad (2)$$

この領域では、ATL モデルは適用できない。

- 振動が rms で  $0.25\mu\text{m}$  を超えた場合、あるいは、 $A \times T \approx 0.5 \times 10^{-14} \text{ m}$  となった場合は、Simple correction がさらに必要になる。10 秒間隔でこれを行えんとすると、

$$10 \text{ 秒間の地盤変動} \lesssim 0.25\mu\text{m} \quad (3)$$

$$A \lesssim 0.5 \times 10^{-15} \text{ m/sec} \quad (4)$$

前者の条件は、ランダムな地盤変動のうちの波長約 100m 以下の成分に関するものである。所用時間 10 秒は simple correcton に使用される 4 極電磁石のムーバ - の速度 (ムーバ - 法) で決まる。これらの所要時間の評価については付録 11.3 を参照。Simple correction は、steering 電磁石で行なう (steering 法) ことも可能である。これに要する時間は 1 秒程度でよいので、上記の条件は

$$1 \text{ 秒間の地盤変動} \lesssim 0.25\mu\text{m} \quad (5)$$

$$A \lesssim 0.5 \times 10^{-14} \text{ m/sec} \quad (6)$$

とゆるくなる。

なお、Pulse-to-pulse feedback は各 diagnostics section で行なうとしているが、さらに多くの場所で行なうことも可能である。その場合上記のランダム変動の上限値は feedback を行なう点の数の平方根に比例し、ATL モデルの  $A$  の値は点の数に比例してゆるくなる。

- Simple correction の限界は、ランダムモデルで約  $300\mu\text{m}$ 、ATL モデルで、 $A \times T < 9 \times 10^{-10} \text{ m}$  である。Advanced correction に要する時間の評価は難しいので、これを地盤変動の許容値に直すには大きな不確実性が伴うが、およそ  $10^4$  秒とすれば、 $10^4$  秒間の地盤変動  $\lesssim 300\mu\text{m}$ 、 $A \lesssim 9 \times 10^{-14} \text{ m/sec}$  ということになる。

以上の許容値は  $E_{beam} = 500\text{GeV}$  のものであるが、 $E_{beam} = 250\text{GeV}$  のときの許容値はランダム変動振幅に対しては約  $2^{1/4}$  倍、ATL モデルの  $A$  の値に対しては約  $\sqrt{2}$  倍だけ緩和される。

これらの許容値を最終収束システムのものも含めて、補正方法そしてその所用時間とともに表 4 にまとめた。

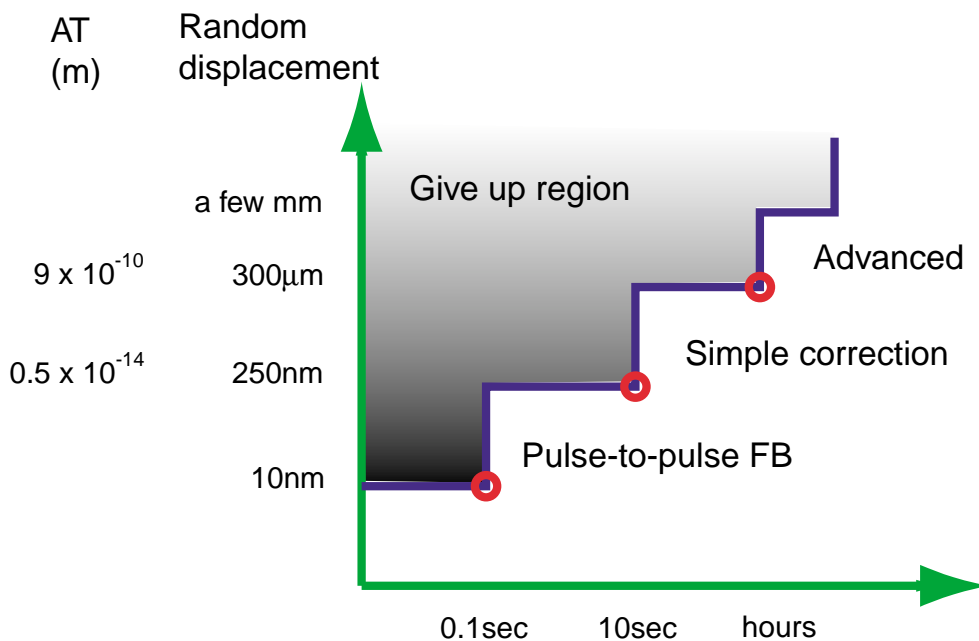


図 14: 主リニアックにおける変位量 / 時間と補正法の関係

補正方法	所用時間	適用最大変位量	最大 AT(m)	最大 A(m/s)	$T(A = 10^{-18} \text{m/s})$
<b>主リニアック</b>					
不可	0.1 秒以下	10nm			
P-to-P FB	0.1 秒	250nm	$0.5 \times 10^{-14}$	$0.5 \times 10^{-15}$	1 時間 23 分
Simple	約 10 秒	300 $\mu\text{m}$	$9 \times 10^{-10}$	$9 \times 10^{-14}$	28.5 年
Advanced	数時間	a few mm			
<b>最終収束システム</b>					
不可	0.1 秒以下	$(0.4\sigma_y^*)$			
Orbit	0.1 秒	1 $\mu\text{m}$	$2.5 \times 10^{-14}$	$2.5 \times 10^{-13}$	6 時間 57 分
DFOC	0.1 秒	3 $\mu\text{m}$	$1 \times 10^{-12}$	$1.7 \times 10^{-17}$	11.5 日
Global knobs	8 ~ 16 時間				
BBA	O(1) 日				

表 4: 運転時の地盤振動の許容値のまとめ。表中の適用最大変位量とは距離相関のないランダムな地盤変動成分の変位量である。最大 AT は主リニアックではエミッタンス増大が 10%、最終収束システムではビームサイズが 10%増大する時のものである。また、実験を中断して行われるものは”Advanced”と”BBA”である。

最終収束システムの場合はビームサイズの増大が 10%を許容値設定の基準とした。衝突点での 2 つのビームのずれによるルミノシティの損失は 5%とした。ただし、衝突点を挟んで設置される 2 つ最終収束電磁石の相対位置がそれらのサポートシステムによって保たれるならこの許容値 ( $0.4\sigma_y^*$ ) は考えなくてよい。また、最終収束システムでの global knobs による補正の限界を与える AT 値の評価をしなければならない。

表中の適用最大変位は地盤振動の中で距離相関のないランダムな振動成分の変位であり、同行の補正の限界を示すと同時に次に行われる補正の所用時間内での地盤変動の許容値を示している。また、AT 値より同様に計

算された A の許容値が表に載せてある。

この中で最も許容値の厳しいものは主リニアックでは Pulse-to-pulse フィードバックの適応限界である。すなわち フィードバックの間に合わない周波数 10Hz 以上、そして simple correction の所用時間 1 ~ 10 秒間の比較的遅いランダムな地盤変動の振幅が、それぞれ 10nm、そして 250nm 以下でなければならない。最終収束システムでは、dispersion-free-orbit correction の適応限界で、AT が  $1 \times 10^{-12} \text{m}$  以下でなければならない。サイトに固有な A 値の許容値を求めるには時間 T が必要である。前章で議論したようにビーム調整に必要な時間を正しく評価しなければならない。1 例として、T を Global knobs によるビーム調整の所用時間 16 時間とすると、表 4 のように  $1.7 \times 10^{-17} \text{m/s}$  となる。また、このビーム調整の限界から Beam-Based-Alignment の必要となる地盤変動の許容値も検討されなければならない。

## 5 地盤・地質

リニアコライダーが設計性能(積分ミノシティ)を発揮するためには、建設サイトの地盤振動・変動に対していくつかの条件が課せられることが明らかになった。ここでは地盤振動・変動と地質との関連性について述べる(図 15 参照)。表 5 には竹田委員が同一装置で計測し、同一方法で解析した日本各地の ATL 係数(ATL モデルにおける A 値)を示した。

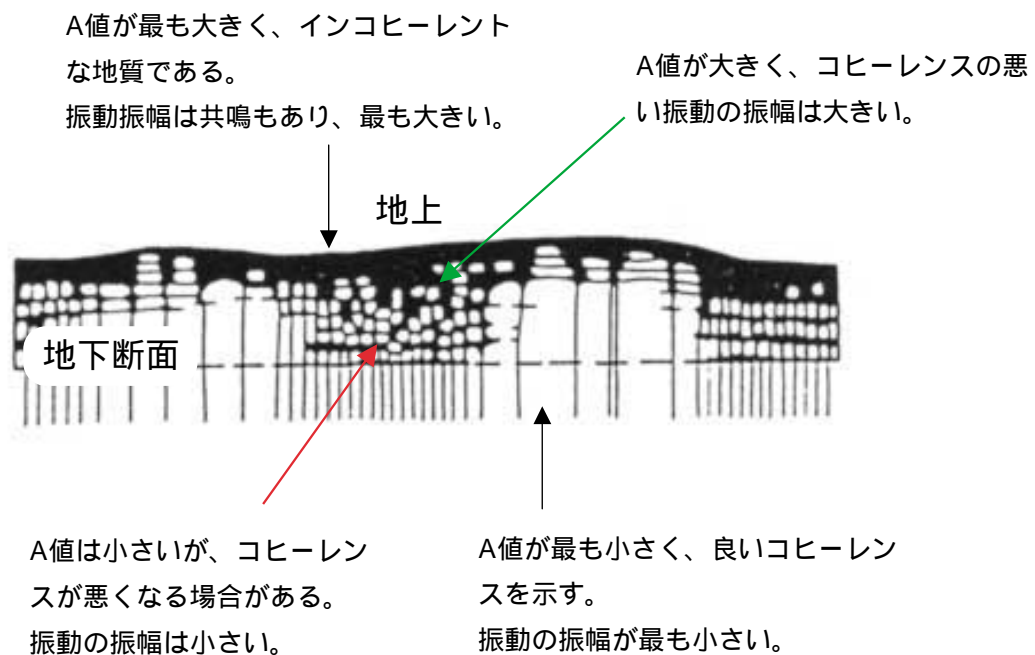


図 15: 地質と地盤変動及び振動の関係の概念図。白い塊は岩塊を表し、黒塗りの部分は風化した土砂を表す。縦線は節理や亀裂等を表す。

風化が進んでいない“新鮮な”岩盤は、地盤振動の振幅が小さい、ATL 係数が小さい、弾性波速度が大きい、離れた位置でのコヒーレンスが高い等の特徴を持っている。これらは硬い岩盤が一体となって動くことから容易に理解できる。しかし、岩盤中に多くの節理(割れ目)や断層破碎帯が存在すると、“一枚岩”が分断されるためコヒーレンスが悪くなる。また、年代と共に地下水等の影響を受けて風化が進行すると、硬い岩盤でも特に地表近くでもろくなる。このような“軟岩”ではコヒーレンスが低下し、振動の振幅および ATL 係数は大きくなる。堆積物が岩化していない“軟弱地盤”では、地盤振動の振幅と ATL 係数は最も大きく、コヒーレンスは



No.	場所	A( $10^{-18}$ m/sec)	地質
1	KEKB トンネル	40.	粘土、砂礫
2	六甲-1	36.	花崗岩(断層近し)
3	六甲-2	33.	花崗岩
4	宮崎	15.	閃緑岩
5	釜石-1	0.14	花崗岩(ひび割れ、水)
6	釜石-2	0.057	花崗岩
7	佐々連	0.050	緑片岩
8	江差-1	0.0057	花崗岩(浮石)
9	江差-2	0.0020	花崗岩

表 5: 日本国内で計測された ATL 係数

ほとんどない。

地質年代が古い地層は、一般に硬く安定した地盤を形成する。日本の山岳部には中生代・白亜紀以前に形成された硬岩帯(主に花崗岩帯)が広く分布する。海外には、堆積岩が長い地質年代を経て広域硬岩帯となった例も多いが、我が国にはこのような堆積岩帯は少ない。日本の平野部には岩化していない堆積物で形成された新生代・第四紀(特に完新世)以降の地盤が多い。

リニアコライダーの建設サイトとしては、地盤振動・変動の条件から硬岩地帯が望ましいと考えられるが、花崗岩帯でも風化が進み、節理の多い場所がある(表 5 の No.2~4)。また、同じ岩質でも地域固有の地質環境や人的環境により地盤振動・変動に差異が認められる場合もあるので(表 5 参照)、サイト候補地選定に当たっては文献調査、弾性波測定等による綿密な予備調査を実施する必要がある。

次節で述べるように、トンネル建設において地質はトンネル工法についてはコストと工期を左右する重要な要因でもある。加速器性能に直接関係する地盤振動の振幅や ATL 係数の測定には多くの時間と労力を要するので、予備調査段階での地質調査による事前の候補地絞り込みが必要となろう。

## 6 施設・設備

### 6.1 トンネル

トンネルの基本設計、建設サイト、トンネル工法は互いに密接に関連しており、いずれも、コストや工期だけでなく、加速器の性能も左右する重要な要因である。サイトの検討に当たってはこれらの関連性を十分に理解しておかなければならない。

JLC 建設においては以下のようなトンネル工事が必要となる。

主リニアック: 全長約 30km で、JLC の中で最大の施設である。全体を 1 本の大きなトンネル(直径が 7~10m)に収容する 1 トンネル方式と、加速管、収束電磁石、(X-band の場合は DLDS も)を設置する加速管トンネル及びクライストロン等の電力供給システムを設置するクライストロントンネルの 2 本のトンネル(それぞれ直径 3~4m)に分離する 2 トンネル方式が考えられる。2 トンネル方式では、平行する 2 トンネルの間に貫通孔を通し、高周波の伝送、電力供給、冷却水供給等を行う。2 トンネル方式の利点は、(1)クライストロントンネル内では加速器本体から発生する放射線の影響が小さいので、加速器運転中の保守が容易である;(2)クライストロントンネルで発生する機械振動の影響が加速器本体に伝わりにくい;(3)厳しい温度調整が必要な加速管トンネルと、比

較的條件の緩い電力供給系が分離されるので効率的な冷却システムを構築できる等である。ただし、地盤によっては2トンネル方式を採用できない場合もある；軟弱地盤では先に掘削したトンネルが後から掘削するトンネルの影響を受けることがある。軟弱地盤で2トンネル方式を採用する場合は、トンネル間の間隔を十分に開ける等、地盤変動に関する慎重な検討と対策が必要になる。

アクセストンネル：抗口から主リニアアックトンネルまでのアクセス路が、全体で4～5本必要になると考えられる。工事期間中は掘削機の搬入やずり搬出等に利用される。トンネル数、トンネル長、傾斜等はサイトの地形に大きく依存するので個別に検討する必要がある。適切なアクセストンネルが確保できないサイトは、工期やコスト増につながるのを避けるべきであろう。

実験ホール：衝突点に実験装置を設置する空間が必要である。内径40m、長さ100m程度になる。実験装置の搬入には直径10m以上の搬入口と研究者、作業員等が頻繁に出入りするための出入口が設置される。地上部分は加速器稼働時にも頻繁な交通が予想されるので地元の理解が必要である。

機械用地上連絡孔：冷却水及び換気のための配管を主リニアアックトンネルから地上へ通すための比較的小さな（直径約2m）連絡孔が機械棟毎に全体で10本程度必要になる。連絡孔の長さや傾斜は建設サイトの地形によるが、冷却水圧の条件から高低差が100mを越すことは望ましくない。

その他：主リニアアックの他にもダンピングリング、電子及び陽電子入射器、電子及び陽電子前段加速器等の加速器施設が必要であるが、主リニアアックに比べて規模が小さく数も少ないので、サイトを検討する際の大きな問題とはならないであろう。

施工方法は以下の3工法に大別できる。どの工法を採用するかはトンネルの用途と建設サイトの地盤に大きく依存する。

NATM (New Austrian Tunneling Method)：我が国の硬岩地帯で広く採用されている典型的な山岳トンネル工法である。発破または削岩機で掘削した後をロックボルト等で補強しながら掘り進む。断面形状が自在であり、地質の変化に柔軟に対処できる、初期コストが小さい等の利点がある。ただし掘削時に（特に発破を用いる場合）周辺岩盤の損傷が大きく、地盤のコヒーレンスが失われるとの報告がある。JLCが硬岩地帯に建設される場合は、主リニアアック以外のトンネル（トンネル長が短い、形状が様々）の掘削にはこの方式が適している。

TBM (Tunnel Boring Machine)：掘削機が円形断面を削りながら進む。均質な硬い岩盤に最も適した工法で、安全かつ高速に安定した掘削が可能である。海外では広く採用されており、我が国でも普及しつつある。月進850mという記録もある。カッターで岩を削り取っていくので周辺岩盤の損傷が小さい。TBM製作という初期投資が必要なので、一般的に短いトンネルには不適とされる。また軟弱地盤や断層破碎帯が多く存在するような地盤には適さない。JLCが硬岩地帯に建設される場合は、一定の断面形状で長い距離を掘り進む主リニアアックトンネルの掘削に最適の工法である。

シールド工法：TBMとシールドを行う装置が一体となったものである。先端のTBMで掘削しながら、円筒形のコンクリート内壁を構築していく。軟弱地盤や都市部で採用されている。シールドマシンは高価であるが、地盤によってはシールド工法を採用せざるを得ない。

その他：上記の工法の他にも開削式（露天掘り）や沈埋式等があるがJLCの建設において考慮すべき工法でない。

これらを総合的に判断すると、JLCのトンネル建設という観点からは、建設サイトは均質な硬岩地帯がベスト

であるといえる。極端に岩質が硬くない限り、TBMを用いた安定した高速掘削が可能であり、簡単な覆工(トンネル内壁の補強)で十分な強度を得ることができる。覆工費用は全体のトンネル工費の中で大きな割合を占めるので、サイトの検討に当たってはトンネルの掘削だけでなく、どのような覆工が必要になるかについても十分な検討が必要である。

付録 11.6 に地盤とトンネル工法をまとめて表にした。

## 6.2 地上施設

加速器周辺設備に関する検討は C-バンドリニアック ( $E_{cm} = 500\text{GeV}$ ) の場合に詳細な検討が行われている。地上施設に関連する項目は加速周波数にはあまりよらないので、主としてその結果を引用する。

電力供給システム：総電力は約 300MW と見積もられる。まず、既存の送電ライン (275kV 以上が望ましい) まで近いことが立地条件となる。配電・受電設備のコストを抑えつつ、効率的な制御システムを構築するために、地上の中央変電所 (受電能力 450MW) 1ヶ所で受電し、66kV に変圧したのち、トンネル内に設置する約 10ヶ所のサブ変電所 (受電能力 30MW) に配電する。地上の中央変電所用地として約 2500m<sup>2</sup> の土地を取得しなければならない。

冷却システム：加速器の冷却システムには分散方式を採用し、地上に 10ヶ所程度の機械棟 (冷却塔および関連設備) を設ける。冷却水の熱交換には水冷式と空冷式が考えられる。一般に水冷式の方が熱交換能力は高いが、1日 1万トン程度の冷却水の補給が必要で、周辺地域に対して十分な市水・井水の供給能力が要求される。また冷却水に添加する薬液を適切に処理しなければならない。一方、空冷式の場合は維持管理が簡単で環境に優しいシステムを構築できる。ただし、熱交換能力が外気温に左右されるため、立地条件として夏期の平均気温を考慮しなければならない。地上には約 1000m<sup>2</sup> の機械棟が 10ヶ所程度必要となる。これらの土地取得が容易であり、施設建設に対する地元の理解が得られなければならない。

研究施設および関連施設：世界各国から集まる多数の研究者のために最低限必要な研究基盤 (研究棟、実験準備棟、計算機棟、管理棟等) が実験サイトの近隣に確保できなければならない。

## 6.3 新エネルギーの利用

電力の一部を自家発電で賄おうとする新エネルギーの利用は、最近、化石エネルギーの枯渇や環境問題等で国際的に注目されている分野であり十分に考慮する必要があると思われる。一つのキーワードはコージェネレーション (cogeneration) というもので、『ひとつのエネルギーから複数のエネルギー (電気、熱など) を同時に取り出すこと』を意味している。廃熱利用なども入る。

ジェットエンジン一台で 40MW の電力を生み出す能力を持つなどいろいろある新エネルギーの中から太陽光と風力発電の場合の建設費や発電能力などを検討してみる。太陽光発電では 1m<sup>2</sup> 当たりの平均日照量を 0.9kW×4.2 時間/日とし、エネルギー変換効率を 14% とする。また、その建設費は出力定格 1kW 当たり 100 万円とする。風力発電では、直径 40, 50, 60m (定格 400, 750, 1,200kW) のものをそれぞれの半径距離だけ間隔を開けて総延長 20km に渡り並べることとし、発電効率は 1MW のデータを使用する。その建設費は出力定格 1kW 当たり 15 万円とした。検討結果をまとめると表 6 から明らかなように、太陽光発電は発電能力で現実性に乏しい。JLC 運転による年間の電力料金の 200 億円 (この値は 10 円 / kWh で見積もったもの) を念頭に置くと、風力発電は余分にその建設費は必要であるが考慮したほうがよいかもしい。参考文献 [13]- [17]。

	面積	建設費 (億円)	発電量 (MW)		
太陽光発電	20m × 20km	330	8.9		
風力発電					
風車直径	台数		(6 m/s <sup>†</sup> )	8 m/s <sup>†</sup>	10 m/s <sup>†</sup> )
( 40m )	333	200	27	51	72
( 50m )	266	299	40	76	108
( 60m )	222	400	53	101	144

表 6: 新エネルギーの利用：太陽光発電の発電量は日本での平均日照量を入れた年間平均発電量、† 平均風速。

## 7 自然及び社会的環境に関する立地条件

JLC は世界最高エネルギーの  $e^+e^-$  衝突型加速器を用いた大規模国際協同実験プロジェクトである。素粒子物理や原子核物理、FEL での物性物理・生命科学等の学問分野で革新的な飛躍をもたらすだけでなく、世界最先端の研究者及び技術者が集う場である。また、自然環境に与える影響を最小限に抑えることは当然の義務である。建設期及び研究遂行の全ての期間において、地域社会の協賛を得られなければならない。更にこれをもたらす膨大な波及効果、教育効果、地域産業育成、国際化、等を享受できるような受け入れ環境が整っていることが望ましい。

ここでは、時期的に建設期特有のものを実験遂行期のものに分けて考える。今回のレポートの基礎となっているのは、KEK のトリスタン / B-ファクトリーや播磨の Spring-8 など国内での大型実験施設建設で培われた経験、ヨーロッパ素粒子研究所の LEP (円形加速器であるが周長が 27km であり規模が似ている) の建設に対する検討結果、当委員会における最近の世相を反映させるための再検討、などである。今後、地下水に対する影響、地盤沈下等による影響、生態系に対する影響等更に詳しい研究が必要となることが想定される。周辺住民及び自治体の賛同と協力が得られることがサイト選定に当たっての必須条件である。特に環境アセスメントが必要である場合、周辺住民及び自治体の理解と協力はプロジェクトの早期稼働を左右する最も大きい要因の一つである。

### 7.1 環境保護

まず最重要な懸案事項として挙げるべきことは、動植物、文化財、放射線 [付録 11.5 を参照]、地下水脈、そして騒音・景観悪化などの公害である。外部への影響に関する設計条件として、

- 放射線、放射能
- 騒音、振動
- 非電離放射線 ( マイクロ波の漏洩など )
- 一般排水
- 一般排気
- MIST, PLUME ( 水煙など )

があげられる。環境に与える影響を極力押さえる設計が要求される。

サイト選定において最重要な条件は以下のものである。

- 法令により保護された希少動植物の生息域は避けなければならない。

- 地上施設、トンネル建設による遺跡等（史跡、文化財、埋蔵文化財、宗教施設等）の破壊は、地域社会（場合によっては国家）にとって大問題である。これらが既に確認されている、あるいは出現が予想されるサイトは避けるべきである。
- 樹木の伐採、地形の改造、道路新設、河川の改修は少なく済むほうが望ましい。
- トンネル建設の地下水脈への影響、つまり生活・農工業用水への影響、地盤沈下等、が少ないと予想されるサイトが望ましい。地域社会の生活・産業用水への影響や地盤沈下の可能性について、十分な環境アセスメントを行う必要がある。地盤が砂礫や亀裂の多い地盤では、トンネルが地下水脈と交叉する箇所が増えるため、更に十分な漏水防止策及び排水設備の強化が必要となる。地下水脈がトンネル上部の地層、岩盤で遮られ、トンネルに影響されず流れるサイトは、地下水脈の影響を考える上では最良である。この場合、JLCによる地下水脈への影響は、実験機材搬入や工事のための立坑やアクセストンネルによるものに限られるため、局所的なものに留まる。実際 LEP のトンネルは不透水性のモラッセと呼ばれる岩盤に主に掘られ、表層のモレーンを流れる地下水に影響を与えないように選ばれている。
- 加速器の冷却のために水冷式を採用する場合は、特別な配慮が必要である。この場合、1日1万トン程度の冷却水の補給が必要となるため、十分な市水・井水の供給能力が要求される。更に、冷却水に添加する薬液を適切に処理しなければならない。  
一方、空冷式では、99%以上の冷却水は JLC 内部で循環されるため地下水の利用は年間数万トン程度であり、外には出ていかない。これが全て外に洩れた最悪の状態を考えても、生体系に与える影響は国の環境基準を満たすように設計できる。
- 放射線による影響：JLC は  $e^+e^-$  加速器であるので、付録 11.5 にあるように、放射線強度は一般的に問題にならない量であるが、十分な安全設計と住民感情に対する配慮を怠ってはならない。JLC プロジェクトで新たに生じる放射線の影響は自然放射能と比べ無視できる範囲であるが、地域住民の心理に与える影響は特に気を付けるべきである。このため周辺住民と良好な関係を保ち情報公開や啓蒙活動を通じた正しい理解が得られることが必須条件である。

上記以外の公害に関しては、特に地表施設（研究中心サイト、地上変電・冷却施設、アクセストンネル入口、工所用仮施設等）で以下のことが重要である。

- 景観：地上設備が地域の景観を損なわないような配慮が必要であると共に、景観が特に問題となるような地域は避けるべきである。樹木の伐採、地形の改造などにより景観を損なわないように、取り払われた樹木の植え直し、植林などは設計当初から考慮に入れる。景観がレジャーや観光資源となっている場所もなるべく避けるべきである。工事中の盛り土、切り土などによる一時的な景観の悪化も、別荘地やレジャーの中心地の場合、一時的でもこれは大きな問題となり得る。
- 騒音・排気ガス：地上設備の騒音を低減すると共に、騒音が問題となるようなサイトは避けるべきである。ただし、建設期間を除くと騒音は敷地境界 50dB 以下に押さえることを目標として設計を行う。最も大きな騒音源は冷却塔送風機、建屋の換気、空調排気音、変圧器のうなりからのものである。建設期には、掘削や重機械からの騒音が予想される。防音設備などで軽減はできるが、地上設備は付近 100m 程度に地域住民の住宅がないところを選ぶのが望ましい。法令としては、公害対策基本法、騒音防止法、自治体の条例がある。
- 工所用機材の運搬、残土の搬出等にもなう路面の劣化・悪化、交通規制の必要性。
- 工事のための作業員の集結による住民感情への影響。特に 24 時間交替体制で工事を行なう場合は夜間の状況に留意する必要がある。

建設期には工事用機材のもたらす排気ガス、騒音、発破が必要なときはこの音響と周辺住民への心理的圧迫、衛生や健康、子供への危険などへの不安がないように十分な配慮と地域への説明が行なえる環境が必要である。

これらを保護する関連法令の代表として、環境影響評価法がある。

環境影響評価法 現行の環境影響評価法の定めるところの関係手続きを経る必要がある。更に昨今の環境に対する国民的関心の高まりをうけ、JLCプロジェクト全体が自然及び社会環境に与える影響を注意深く検証する必要がある。JLCプロジェクト自身は現行の環境影響評価法の定める対象事業の中には明確に対応するものはないが、それらに準ずる大規模なプロジェクトとして法令で定める事業（2条2項1号）として取り扱われる可能性が非常に高い。JLCの大部分の施設は地下にあり、地上の環境には影響を与えない。しかし、冷却塔等地上施設の建設には環境面で十分に配慮する必要がある。例えば、法令により保護された希少動植物の生息域は避けなければならない。評価自身は環境評価実施の必要性を判定するスクリーニングを経て、現地調査、最終評価と続く。元の環境を損なう部分の少ないサイト、環境に配慮した地上設備の配置、そして計画段階から地域と緊密な協力体制をとれるところを選ぶことが、研究の早期開始を実現するためには必要不可欠である。更に国の定める法律以外に、条例や要綱として地方独自の基準を持つ地方自治体が多数あることにも十分留意すべきである。

JLC建設において、環境影響評価法の対象となる新たな河川工事や大規模な林道整備はなるべく避けるべきである。研究者、技術者、工事関係者のための宿泊施設の新規造成も土地区画整備事業や新住宅市街地開発事業として取り扱われると環境影響評価法の対象となることがある。一方で、地方自治体との緊密な関係が得られれば、これら新事業は地域振興に生かすことも可能であろう。地方自治体が緊密な関係を行なえるサイトを選ぶことがまず重要である。

## 7.2 建設期において留意すべき事項

JLC計画が有機的に機能し、世界に貢献する物理・技術成果を世界に先駆けて押し進めるためには、土木建設と実験装置設置、物理実験準備をある程度同時に押し進めなければならないだろう。建設期には、トンネルや研究施設建設のための土木工事と、加速器や粒子測定器といった実験設備の搬送・設置、更に実験開始前からのシミュレーション等による準備という3面から考える必要がある。ここでは、サイト選定にあたって望ましい条件を列挙する。

サイトを選定する上で、建設期に注意すべき事項は以下のようになる。

- 公害への配慮：工事中の騒音等：騒音、交通渋滞、排気ガス等による地域住民への影響が少ないと予想されるサイトが望ましい。トンネル建設における発破の使用もなるべく減らせるところが望ましい。
- 重機の交通：測定器、加速器部品等重いもの（超伝導ソレノイド電磁石の最大130t程度）を搬入できる道路が必要。さらに、測定器の搬送では、10-20km/h程度のゆっくりした輸送が必要な場合が多くある。道路の十分な耐加重性、道路幅、測定器搬入等のために必要なら、交通規制が行なえる程度の交通量であること。拡張工事が必要な場合、地元や地方自治体にとって将来的に有意義であることが必要である。工事用重機は一般的に分解して搬入できるので問題ない。サイトによっては工事用道路（完成後に一般道路として使用する可能性も含む）の建設が必要になるであろう。この場合自治体の協力が必須である。
- 雪の影響：冬に豪雪地帯となる場所では搬送時期に制限が付くのでサイト選定では多少注意が必要である。
- 残土処理：トンネル掘削による残土の総量は約100万m<sup>3</sup>、総重量は数百万トンとなる。残土輸送のコストも考えると、近隣に十分な廃棄場所を確保できること、または再利用（採石場の埋め戻し、埋め立て等）で

きることが望ましい。残土処理の観点からは、トンネルをできるだけ小さく作ることが望ましい。内径はきまっているが、実際に掘る外径は地盤・トンネル工法によるためサイトに強く依存する。

- 近郊港湾：測定器のかなりの部分、及び、加速器の一部部品は海外や地方大学から輸送されてくることが予想されている。このため近郊に大型クレーンを持つ港湾があると輸送にとって大きなメリットとなる。
- 土木労働条件の整備、労働力の確保：建設に携わる作業員・技術者の多くは請負企業及び地元から派遣される。近隣でこれらの労働力を確保できることが望ましい。
- 技術者・研究者の労働条件の整備：加速器を付設するのに要する国内外からの技術者・研究者の長期滞在人数は数百人になる。一時的な住宅を確保できなければならない。
- テスト施設等：加速器・測定器の設置・建設の段階で、簡易な解析、テスト、定期的な情報交換を行なえる施設が地元にあることが望ましい。近郊に更に複雑な解析を行なえる既存の大学・研究機関等があると更に便利である。尤も高速ネットワークや衛星回線を初期の段階で充実させることで、これらの一部代用とすることは可能である。

### 7.3 社会的環境・社会資本

サイト選定にあたっては社会的環境について十分考慮しなければならない。社会的環境は、( 1 ) 研究資材等の調達能力、( 2 ) 地域社会へ与える影響、( 3 ) 研究者・技術者からみた研究環境・生活環境の3項目に大別できる。

研究のために必要な資材、解析装置、加速器・測定器メンテナンスに必要な技術をもつ企業や既存研究施設が周辺にあることが望ましい。例をあげれば、B-factory 実験で加速器のメンテナンスのために企業から派遣してもらっている技術者の人数は200人程度である。JLCでは、メンテナンスに少なくとも同じ程度が必要と考えられ、これら技術者・資材が付近の都市から調達できることが望ましい。

海外の大きな研究所は独自の技術者を多数常時雇っている場合が多く、研究所内部で修理のための物品製造など行なうことが多い。一方、KEKなどの国内研究所の研究支援体制を海外の研究所と比較した場合、物品製造や諸作業を機構外の業者に発注する比率が高い。このような支援業者が近隣に常駐し、また研究必需品の供給・保守体制が整っていることが望ましい。この観点から言えば既存の大規模研究機関あるいは技術系産業基盤が近隣に存在することが望ましい。一方、JLCからの需要により、このような技術を持つ業者が新たに周辺に派生する期待が高いことを考えれば、地域振興、新たな技術力育成というメリットもある。地域の振興策として、これらに力を注いでいる自治体周辺がサイトとして望ましい。

建設期の一時的な人口増加と比べると、加速器が稼働始めたあとの定常的な人口増加はゆるやかであると予想されるとは言え、世界最高エネルギーの電子・陽電子衝突装置に魅力を感じ集まってくる研究者・技術者の数はCERNでのLEP実験やLHC実験に匹敵するものとなる。(LEP実験では約2000人程度の研究者が研究に常時携わっており、LHCでは更に増えると予想されている)JLCにおける研究に必要な物資・人員を供給する企業・業者も周辺に集まってくることも期待される。更にJLCで同じビームや施設を用いて共同研究ができることが期待される電子・原子核散乱やFELによる生物・物性物理化学などを行なうならば、更に研究者の数は増加する。これからの実験形態としてネットワークを通じた地域解析センターやリモートモニター装置などによりある程度世界的分散処理・モニターは行なえるようになるが、最先端技術を開発しつつ世界を圧倒的にリードする研究成果を挙げ続けるためにはどうしても実験現場での研究が必要となる。更に研究者が集まることから生じる新しいアイデア、思いもつかなかった派生技術、国際標準を自ら確立できるなど、物理研究にとどまらない世界的・社会的な大成果が強く期待されるのはCERNの現状を見れば明らかである。IT革命の基礎となったWWWはCERNで開発されたことは一般にも知られている。

地域近郊(通勤圏内)に、数千人程度の人口増加に対応した医療衛生設備、上下水道処理能力、住宅供給能力、子供の教育施設等が必要となる。

JLCで様々な物理、技術研究を行なう研究者は世界中から集まる。様々な宗教を持つ人々も集まること、家族や子供の教育、スポーツ、レジャーなどに対しても様々な考え・生活様式が異なる人々が集まることを注意深く検討する必要がある。一般的には国際化を望む声が高い国内事情ではあるが、地方によっては様々な異種文化を持つ国々の人が集まることで生じるかもしれない問題を危惧する声もあるだろう。研究者はアジア・欧米始め、世界中から集まる。地域住民だけでなく、多数の外国人も快適に生活できる環境が必要である。更に地方自治体が積極的に国際化を進めている場合、スムーズな研究サポートが得られる。これが実際の国際協同実験では重要であることはKEKやCERNなど他の国際研究所の例を見ても明らかである。様々な宗教を持つ人々も集まるので、宗教色の極端に強い地方は避ける方がよい。レジャーに対する考え方が日本人とかなり違う人々も多い。付近にショッピング、レジャー等楽しめる場所があることが本質的だと考えている人々がいることも事実である。家族で滞在する場合、配偶者や子供に対する配慮も重要である。自治体が率先して国際化を目指している、又は既に国際化が進んでおりこのメリットを強く認識しているところがよい。

社会資本に関して、具体的項目に分けて以下に列挙する。

- 加速器運転・研究施設維持：電力供給、冷却水供給（水冷式の場合）、排水処理について十分な能力を持つこと。
- 研究支援体制：旋盤加工など技術を持つ支援業者が近隣に常駐し、また研究必需品の供給・保守体制が整っている、又は地方自治体が整備に力を入れていることが重要である。
- 高速通信網：加速器の運転やデータ解析に不可欠である高度情報ネットワークを容易に整備できることが重要である。これは、研究自身のためだけでなく、研究支援及び研究成果公表、教育的観点からの一般情報公開早期の研究開始のために、重要である。
- 会議場・宿泊施設：研究施設での大規模な会議開催の必要性を考えると、近隣に十分な収容能力を持つ宿泊施設や会議場が必要となる。
- 人口の増加による影響：地域近郊（通勤圏内）に、数千人程度の人口増加に対応した医療衛生設備、上下水道処理能力、住宅供給能力、子供の教育施設等が必要となる。これは研究者サイドだけでなく、地域の社会環境基盤と言う意味で、まず始めに考えるべき重要事項であろう。地方行政との緊密な協力が必須条件である。
  - － 住宅：多数の研究者・技術者（及びその家族）が常駐するため、通勤可能圏内に十分な数の住宅が確保できなければならない。研究が始まる前後4、5年は特に現場に研究者が集中することが予想される。
  - － 教育施設：研究者・技術者の家族の教育環境（保育園、小学校、中学校等）が整備されなければならない。特に多数の外国人に対する教育施設が充実していることが望ましい。
  - － 健康管理施設：近隣に総合病院等の医療施設が必要である。
  - － 緊急対応施設：近隣に消防、警察、救急病院等の緊急対応施設が必要である。
  - － 文化的施設：多数の長期滞在者のために、近隣に娯楽施設等、最低限の文化的施設が必要である。
- 交通（道路）：建設が終了し実験遂行時には大型装置搬入の頻度は低い。代わりに通勤による交通渋滞等が問題となる可能性がある。高速道路からのアクセスが便利であることが望ましい。来訪者や研究者の家族の便を考え、公共交通機関が整備されていることが望ましい。
- 交通（空港）：研究施設には遠方の大学及び海外から多数の研究者が訪れるので、（国際）空港からの便がよいことが望ましい。
- 気候：極端に厳しい気候でないこと。

国際的な文化基盤、望ましい社会基盤の整備には地元自治体の協力が不可欠である。



## この章のまとめ

以上見てきたように、社会的環境・自然環境を考慮したサイト選定の条件は非常に多岐に渡っている。必須条件は地元自治体と地域住民の全面的サポートである。周辺住民と良好な関係を保ち情報公開や啓蒙活動を通じた正しい理解が得られることが最重要である。どうすれば自治体との緊密な協力体制が可能であるか、どのように自治体と議論を進めていくか早急に検討し、いくつかの具体的な候補地で自治体の担当者と導入的な議論をしてみることが、これからの最優先課題であろう。具体的な進め方に関する提言は第 10 章を参照。

以下、この章を整理するために、要点を箇条書きにする。

- 希少動植物・生態系
- 歴史・宗教建造物: 史跡、文化財、埋蔵文化財、宗教施設
- 環境調査法
- 樹木の伐採、地形の改造、道路新設、河川の改修
- 水資源への影響
- 放射線による影響、特に地域住民の心理に与える影響
- 薬品による影響
- 工事車両の通行
- 重機の交通
- 住民との緊密な情報交換：
  - 景観
  - 騒音
  - 残土処理
  - 発破の使用
- 人口の増加による影響
- 医療衛生設備、上下水道処理能力、住宅供給能力、子供の教育施設、消防、警察、救急病院等の緊急対応施設、多数の長期滞在者のために、近隣に娯楽施設等、最低限の文化的施設
- 外国人の受入：
  - 気候
  - 雪の影響
  - 近郊港湾
- 通勤路・高速道路等
- 空港
- 土木労働条件の整備、労働力の確保
- 技術者・研究者の労働条件の整備
- 研究支援体制：旋盤加工など技術を持つ支援業者、研究必需品の供給・保守体制
- テスト施設等
- 高速通信網
- 会議場・宿泊施設

## 8 今後のサイト調査

今後の建設までの流れにおいて、サイト関連の必須作業は大きく分けて7区分に分けられる。第一期から第七期のそれぞれで必要な調査、トンネル工事等設計、及び実際の施工計画等を効率良く行うための概略が図16に示してある。ここで示してある時間は目安ではあるが、専門的知識・経験と現実的な考察のもとに算定したものである。ただし、作業を進めていく途中でサイトの候補地の絞り込みの数、自治体との間の情報交換や設計等の進め方、などにより短縮・延長いずれも起こりうる。現状を素早く判断し常に効率良い作業行程・人材配置を見直しつつ進めるべきである。

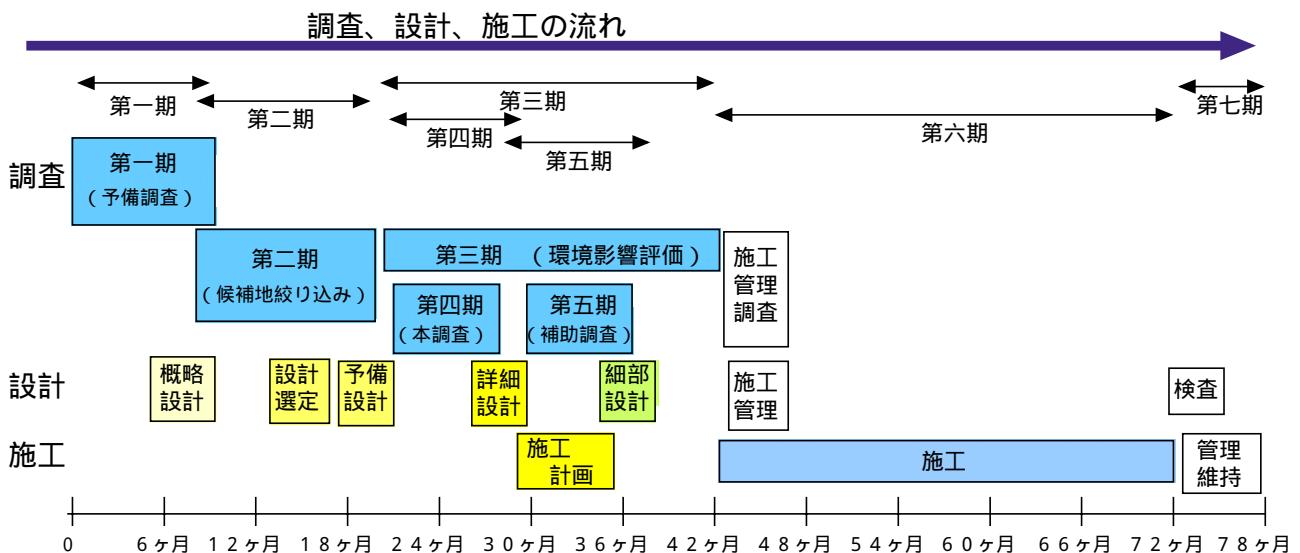


図 16: サイトの調査・決定から建設までの流れ

**第一期** 調査としては、いわゆる予備調査にあたる。ここでは主に文献や今までに得られている情報を元に候補地の属性を検討し、優先順位を付ける。それぞれのサイト特性に該当する概略設計を同時にすすめ、地形・地質等を考慮に入れた上での大まかな問題点を洗い出す必要がある。

**第二期** 予備調査で得られた結果を吟味し、サイト候補地を絞り込む作業を行う。必要に応じて現地の視察も行い、地質状況の概略や地域の社会自然環境をさらに詳しく把握する。候補地の本格的な調査のための調査資料を作成する。候補地の絞り込みでどこまで絞り込めるかは全体の時間スケールを大きく左右する最大要因のひとつである。まずは1、2箇所に絞ることを目標にすべきであろう。絞られた候補地に関して、設計を選定し予備設計を行う。

**第三期** 環境影響評価へ向けた流れである。これを行うためには、環境をなるべく損なわない工事の作業行程をある程度概算する必要がある。例えば工事車両のルート、残土等の処理方法などもこれに含まれる。第四期での本調査の結果、さらに補助調査の結果を検討し、最終的に環境影響評価準備書を作成、関連機関や住民への十分な説明をへたのち、審査を受けることになる。この部分は自治体の協力が不可欠であり、地元からの誘致活動が大いに望まれるところである。

**第四期** サイトの最終確定に必要な本調査を行う。結果は環境影響評価及び詳細な設計に反映される。

**第五期** 第四期での本調査に引き続き、補助調査を行い、設計の細部を詰めることと、施工・掘削方法の詳細を決める。

**第六期** 実際の施工を行う期間である。管理基準を設定し、先進導坑の掘削をへたうえで本格施工・掘削を行う。

第七期 施工の後の検査および管理維持を行う。

以下にそれぞれの作業行程で必要な項目および留意すべき観点を挙げる。

#### 第一期

- [1] 既存資料の収集と解析
- [2] 空中写真等の判読
- [3] 要注意箇所抽出
- [4] 第一段階の候補地絞り込み
- [5] 調査資料の作成
- [6] 現地踏査計画の立案

#### 第二期

- [1] 現地踏査
- [2] 概略の地質状況把握
- [3] 要注意箇所の物探又はボーリング
- [4] 調査結果の整理と対策の検討
- [5] 候補地の詳細比較・検討
- [6] 候補地の絞り込み

#### 第三期

- [1] ルートの比較、選定
- [2] トンネル断面形状の決定
- [3] 概算予算の算定
- [4] 環境に影響を与える行為、要因の抽出
- [5] 地域概要把握
- [6] 事後予測と評価項目選定
- [7] 現地調査と予測評価に基づく環境影響評価案作成
- [8] 環境影響評価準備書作成
- [9] 関連機関、住民への説明
- [10] 審査

#### 第四期

- [1] 現地調査、踏査、物探、ボーリング調査
- [2] 地質構成、変動、振動特性の把握、物化特性の把握
- [3] 坑道、主要施設等の地形、地質断層、湧水、地圧等の把握
- [4] ルート微調整と確定

#### 第五期

- [1] 現地調査、ボーリング
- [2] 工区区分、施工法、掘削法の詳細検討
- [3] 予算、工程、設備の詳細検討

## 第六期

- [1] 管理基準設定
- [2] 先進導坑の掘削
- [3] 掘削データの評価
- [4] 地山の再評価
- [5] 本施工
- [6] 掘削データの評価

## 第七期

- [1] 管理基準値の設定
- [2] 観察・計測
- [3] 健全性の検討と評価

## 9 まとめ

本委員会で得られたサイト条件を(1)地盤振動・変動に対する許容値、(2)施設・設備に対する条件、(3)自然・社会環境に対する条件の3つに区分して以下にまとめた(表7を参照)。地盤振動・変動に関しては様々なシミュレーションと検討を行ったが、最も厳しい条件を与えるものだけを取り上げた。

### 地盤振動・変動

- 初期アライメント：長時間を要する初期アライメントを長期運転休止後の再開時に毎回行うことは、加速器の実効稼働時間(積分ルミノシティ)を実質的に低下させる。これを避けるために地盤変動に課せられる条件は：30m程度離れた2点間の3ヶ月間の変動が約 $300\mu\text{m}$ 以下であること。
- 軌道補正フィードバック：ビームのエミッタンス増大を10%以下に抑えるための軌道補正(実験と平行して行う)が有効であるための条件は：約10秒間のランダムな地盤変動の振幅が約 $0.25\mu\text{m}$ 以下であること。これはATL係数が $5 \times 10^{-16}$  m/sec以下であることに相当する。最終収束システムではdispersion-free-orbit-correctionの適用限界からATが約 $10^{-12}$ m以下。
- 軌道補正不能：高い周波数の常微振動によるエミッタンス増大は、軌道補正フィードバックで制御することができない。軌道補正が不要になる条件は：常微振動スペクトルを10Hz以上の周波数領域で積分した値が10nm以下であること。

### 施設・設備

- トンネル：トンネルの長さはエネルギーや加速勾配にもよるが、全長30km程度の直線トンネルが必要である。
- 地上施設：機械棟( $1000\text{m}^2 \times$  約10ヶ所)および中央変電所(約 $2500\text{m}^2$ 、1ヶ所)の建設用地を主リニアックに沿って取得し、研究棟等の研究施設用地を実験サイトの近隣に確保できなければならない。
- 電力供給：高電圧送電線(275kV)が実験サイトの近くを通り、約300MWの電力が供給されること。
- 冷却システム：水冷式・空冷式を問わず、十分な冷却水が供給されること。水冷式の場合は特に必要量が多くなるので十分な検討を要する。平均気温(特に夏期)は冷却能力に影響を与えるので低い方が望ましい。

### 自然・社会環境

- 環境保護：法令で保護される希少動植物の生息域や、地上施設の建設予定地に文化財が存在する、またはトンネル建設により埋蔵文化財が出現する可能性の高い場所は避けること。
- 生活環境保護：トンネル建設による水脈の変化、地上施設による景観の悪化、残土処理による地元の負担増等が生じないようなサイトの選定、施設の設計・施工を行うこと。
- 自治体の協力：建設前の環境影響評価の実施、建設期の地域住民との接点、建設後の研究者の受け入れ等、建設の全ての段階において地元自治体の協力は不可欠である。緊密な協力関係が得られれば、JLC建設を地域振興に活かすこともできるであろう。
- 研究基盤：研究を円滑に進めることができるような社会基盤が整備されていることが望ましい。

- 生活基盤：多数の研究者とその家族が生活するための最低限の社会基盤が整備されていることが望ましい。
- 文化基盤：多数の外国人を含む研究者とその家族が文化的な生活を送ることができるような社会基盤が整備されていることが望ましい。

項目	判定基準	重要度
[ 地盤・地質 ]		
地盤振動・変動	主リニアック ( pulse-to-pulse FB ): 10Hz 以上の積分振幅が 10nm 以下 主リニアック ( simple correction ): 約 10 秒でランダムな振幅が 250nm 以下 最終収束システム ( dispersion-free-orbit-correction ): AT が約 $10^{-12}$ m 以下 相対距離 30m の 2 点間の 3ヶ月間変動が約 300 $\mu$ m 以下	
地質	均質な硬岩が望ましい	
地形	アクセストンネル・連絡孔の配置	
地震	極端に多くないこと	
活断層	できるだけ少ないこと	
[ 施設・設備 ]		
トンネル	全長約 30km	
地上施設・設備	機械棟・研究棟 などの用地確保	
電力供給	高圧送電線 ( 275 kV ) 約 300MW	
冷却システム	十分な冷却水の確保	
気温	夏の平均気温が高くないこと	
[ 自然・社会環境 ]		
環境保護	希少動植物、文化財	
生活環境保護	水脈・景観・残土処理	
地元の受け入れ体制	地方自治体の協力	
研究基盤	近隣の研究施設・交通・通信網・支援業者	
生活基盤	住居・健康・教育・救急施設等	
文化基盤	外国人受入・文化施設等	

表 7: サイト条件、ここで は必須、 は満たすべき条件、 は望ましい条件を示す。

## 10 提言

- サイト条件を確定しなければ、JLCシステム全体の予備設計（コスト評価を含む）を行うことはできない。
- 環境評価作業（通常3年程度）や自治体と協力関係を構築するには時間がかかる。
- 調査費を使って本調査を効率的に行うためには、予備調査の段階でサイト候補地を数ヶ所に絞り込んでおく必要がある。

これらのことを踏まえると、「LC計画推進委員会」の元に作業グループを結成し、サイト候補地（複数）の選定をただちに始めるべきである。

最終建設地決定に至るプロセスについて「LC計画推進委員会」で早急に検討し、基本方針を出すべきである。

## 謝辞

本検討会を遂行する上で御協力をいただいたすべての方に感謝します。特に、久保浄氏、山本昇氏にはそれぞれ主リニアックと最終収束システムのシミュレーションを新たに行うことを快諾・実行してもらいました。生出勝宣氏にはナノメータのビーム収束に成功したFFTB、そして、早野仁司氏、新竹積氏には安定な加速器運転に不可欠なフィードバックの重要なハードウェアである Beam Position Monitor に関する報告をしてもらいました。KEKBでのBPMやフィードバックの性能と経験は増澤美佳氏、平松成範氏よりお聞きすることができました。吉岡正和氏から、CバンドJLCのトンネル、受電施設、冷却施設など施設関連の報告を受けました。SPring8設立やその地盤・地質の貴重なお話を松井佐久夫氏、原雅弘氏より拝聴しました。また、放射線科学センター長の柴田徳思氏をはじめとして、伴秀一氏、佐波俊哉氏、俵裕子氏、波戸芳仁氏には、トンネル構造やサイトが未定の中でJLCの放射線の安全性について暫定的な検討を急遽お願いすることができました。改めて以上の方々に感謝します。

## 11 付録

### 11.1 世界の A 値 (ATL 則)

サイト	深さ	測定時間・距離・方向			A 値 ( $10^{-18}$ m/s)
		時間	距離	振動方向	
UNK Protvino	0 m	2 年	50-100 m	鉛直方向	100
UNK Protvino	0 m	1-10 時間	5-10 m	鉛直・水平両方向	100±50
SLAC LINAC	0-5 m	17 年	50-1000 m	鉛直方向	200±100*
SLAC PEP	~10 m	20 カ月	20-200 m	鉛直方向	100±50
CERN PS pillar	0 m	2 年 6 カ月	10 m	水平方向	2~4
CERN SPS	~20 m	3-12 年	60 m - 2 km	垂直方向	10~14
CERN LEP	>30 m	9 カ月	40 m - 1 km	垂直方向	7~9
Pinon Flat	0 m	1 年	24 m	水平方向	0.1
KEK TRISTAN	12 m	4 日	42.5m	垂直方向	500
KEK TRISTAN	12 m	4 日	12.5 m	垂直方向	40
Orbit of TRISTAN	12 m	2 日	~20 m	垂直方向	43±30
佐々連鉱山	60 m	1 週間	48 m	垂直方向	0.01~0.15
江差	300 m	0-4 年	50 m	垂直方向	0.0033±0.0005
Orbit of HERA-p	~25 m	1 秒-5 日	~50 m	垂直方向	15±10
Orbit of HERA-e	~25 m	1 秒-1 カ月	~24 m	垂直方向	4±1

表 8: ATL 則 : A の値の測定値 [5]。引用文献の KEK TRISTAN の値はこの表では正しく直してある。SLAC LINAC での値は測定の系統誤差を除くと表中の値の約 1/10、 $A \sim 10 \times 10^{-18}$  m/s となる。

### 11.2 Beam Position Monitor

地盤の変動および振動に対して条件を付けるために、RF 加速空洞および 4 極電磁石の位置、またはビ - ム位置を、フィードバックシステムによってどの程度制御できればよいかを仮定している (4.2 および 4.3 節)。フィードバックシステムの応答の早さと分解能 (精度) は、ビ - ム位置検出器とム - バ - (機器の位置を制御する場合) またはステアリング 2 極電磁石 (ビ - ム位置を制御する場合) の、応答の早さと分解能 (精度) に因る。

ここでは、フィードバックシステムに期待される応答速度および分解能 (精度) が、現存するまたは開発中のビ - ム位置検出器の性能で満たせそうか、レビュー - を行う。

ビ - ム位置検出器に期待する分解能 (精度) は、加速空洞用のもの (structure-BPM と呼ぶ) で精度  $10\mu\text{m}$  である。4 極電磁石用のもの (Q-BPM と呼ぶ) の分解能は、主リニアックで  $1\mu\text{m}$ 、最終収束システムで  $100\text{nm}$  である。Q-BPM は設置後ビ - ムを使って較正を行う。その精度は  $2 \times$  (分解能) 程度が期待される。応答速度は、1 パルス (繰り返し  $150\text{Hz}$ ) の重心のビ - ム位置が分かれば良いので、 $150\text{Hz}$  以上である。 $1.4 \sim 2.8\text{nsec}$  間隔のバンチのジッタ - などを観測するためには、それ専用のモニタ - を別に用意することにする。

#### Button BPM

電極の面積が小さく、誘起される電気信号が小さいので、一般に蓄積リングでのビ - ム位置を、多数バンチの信号から求めるのに使われる。ちなみに KEKB では [18, 19, 20]、 $30\text{msec}$  かけて pick-up 信号を FFT (高速フーリエ変換) にかけて、4 回程度の FFT の結果の平均からビ - ム位置を求めている。位置分解能は、ビ - ム振動込みで  $2 \sim 4\mu\text{m}$  である。ビームを使用した BPM 調整では、BPM 中心位置の設定精度が  $30 \sim 40\mu\text{m}$ 、一部の BPM について 2 回の BPM 調整を行い、その間での再現性は RMS で  $70\mu\text{m}$  であり、分解能に較べてかなり悪い。原因は究明中であるが、一つには BPM 調整が 1 回しか行われていないので、その iteration を行えば改善されると思わ



れる。応答時間および BPM 調整の精度から JLC でのこの型の採用は難しい。

## Stripline BPM

SLAC-FFTB でのテスト結果が報告されている [21, 22]。FFTB ではビ - ムが pulse-to-pulse で  $40\mu\text{m}$  程度のジッタ - を持っているので、六極電磁石の上下流に設置した BPM からの出力のスカッター - プロットを採り、この相関から、BPM の分解能は  $1.13\mu\text{m}$  であった。但しこのときの 1 バンチの電子数は  $0.7 \times 10^{10}$  なので、 $1 \times 10^{10}$  に焼き直すと位置分解能は  $0.79\mu\text{m}$  である。但しストリップラインの長さが  $457\text{mm}$  であり、ケ - ブル長さが RG223 で  $60\text{m}$  であった。JLC で bunch-by-bunch の観測するためには、ストリップライン長は  $20\text{cm}$  程度にしケ - ブル長を  $33\text{m}$  と短くしなければならない。このとき、期待される分解能は  $1\mu\text{m} / 1 \times 10^{10} e^-$  である。最終的な beam-based alignment は、1995 年 3 月と 1997 年 5 月の 2 回行われたのみで、求められたオフセットの差の RMS が  $25\mu\text{m}$  としか分からず、beam-based alignment の誤差は  $25\mu\text{m}$  以下としか分からない。

また、システムの安定性は 1 週間 1 時間ごとに調べられている。この 1 週間の変動は、ペDESTAL が平均で 2.2 counts in RMS ( $0.5\mu\text{m}$  相当)、ゲインでは全体の 68% が RMS で  $3.5\mu\text{m}$  相当以下 (但し広い裾を持っていて、 $115\mu\text{m}$  相当まで広がっている) であった。また、drift space に設置した 3 台の BPM を使い、2 台で決めたビ - ム軌道予想からの 3 台目の狂いに相当する量を観測し、水平方向には途中  $150\mu\text{m}$  の”飛び”があり、標準偏差  $89\mu\text{m}$  の分布、垂直方向には RMS で  $23\mu\text{m}$  という結果であった。温度依存性、バンチ荷電依存性、スケ - ルファクタ - 依存性等を補正すると、垂直方向の RMS は  $8.9\mu\text{m}$ 、1 台当たりになると  $2.7\mu\text{m}$  の変動である、とのこと。これらの変動を報告ではドリフトと称しているが、プロットを見るかぎり 1 時間ごとの fluctuation も大きく、また長期の変動では 1 日周期が際立っているように見える。使用している回路が古いので、最新の回路を作れば、これらの変動はかなり改善されると思われる。

この型の BPM は、工作精度では中心位置が分からないので、事前の磁場中心位置と、BPM 信号出力との対応づけ (fiducialization) が必要である。また、ボタン型でもそうであるが、実際のビ - ム環境下で、BPM 調整の精度を  $2 \times$  (分解能) で実現するのは、なかなか難しく、予断を許さないように思える。実機に近いものを作り、実際のビ - ムを使って確認する必要があると思われる。

## Cavity BPM

この BPM は以外にも歴史は古く、SLAC 創設時に BPM としていろいろ検討された中で、選ばれたのがこの型の BPM である [23, 24]。精度  $1\mu\text{m}$  を切る BPM が作れるというので、近年、将来のリニアコライダ - (LC) 用として脚光を浴び、検討中の LC では、どこでもこの型の BPM の試作およびテストを始めた [25] ~ [31]。この辺の歴史的なことは文献 [30] を参照されたい。いずれも、キャビティ - 構造の中にビ - ムの off-center によって誘起される TM<sub>110</sub> モ - ドの大きさを測り、この信号の大きさからビ - ム位置を求めるという方法を採用している。問題は、非常に大きなコモンモ - ド (TM<sub>010</sub>) 信号があり、これが処理回路を飽和させたり、TM<sub>110</sub> モ - ド測定の分解能を劣化させたりする。コモンモ - ドをどうやって取り除くかに、それぞれの工夫があるようである。

新竹等 [29, 30] と Balakin 等 [27, 31] が、実際のビ - ムを使ったテスト (前者が SLAC-FFTB にて、後者が BNL-ATF にて) を行っており、ドリフトスペ - スに設置した 3 連のセンサ - からの出力から、分解能として、新竹等は  $25\text{nm} / 1\text{nC}$ 、Balakin 等は  $150\text{nm} / 0.25\text{nC}$  ( $38\text{nm} / 1\text{nC}$  相当) を得ており、いずれも  $200\text{nm}$  を切る高分解能を実現している (理論限界分解能は数 nm と評価されている)。

通常、この BPM では  $1.4 \sim 2.8\text{ns}$  間隔でくるバンチ信号は累積されるので、時間分解能に関してバンチ毎の情報を見ようとする、先頭の数十バンチ当たりで処理回路が飽和してしまう。従ってフィ - ドバックおよびアライメント用のものは、1 パルス (繰り返し  $150\text{Hz}$ ) の重心を求めることになる。BPM 空洞内のマイクロウェ - ブのクリ - ンアウトおよび信号処理速度は  $150\text{Hz}$  は大丈夫のようである。また、この cavity BPM は、実際のビ - ム環

境下でも、電極型のような難しい問題は比較的少なそうである。但し、ビームが空洞中心から外れると、急激に大きな信号が出てくる。BPMの中心があまりビームから離れていると、処理回路が飽和を起こしてしまう。飽和を起こさないためには、BPM中心はビーム軌道に対して、分解能  $1\mu\text{m}$  の場合は  $5\text{mm}$  程度、分解能  $0.1\mu\text{m}$  の場合は  $0.5\text{mm}$  程度の精度で合わせてあげれば良い。

もう一つの問題は、この BPM は外形が大きく、RF 空洞用としては問題ないが、4 極電磁石用としては、電磁石ボアの中には入らない。従って 4 極電磁石の近傍に設置することになるので、アライメントフィードバックも、電磁石のピッチを考慮せねばならなくなる。

以上見てきたように、structure-BPM としては cavity BPM、また最終収束システムでの  $100\text{nm}$  の分解能が必要な Q-BPM としても cavity BPM であろう。但し 4 極電磁石内にこの BPM を組み込むことはできないので、設置の仕方、およびオプティクスのシミュレーションについて、この点を考慮する必要がある。また、ビーム軌道の傾きからの誤差のため、衝突点近傍で  $\beta$  が小さい ( $\beta < 5\text{cm}$ ) 所では cavity BPM の最高の分解能は得られない。ここをどうするかはこれからの検討事項である。主リニアックでの 4 極電磁石用としては stripline BPM も cavity BPM も使えそうであるが、それぞれに一長一短があり、これからの R&D の進捗状況と価格と検討の結果で決められるであろう。特に stripline BPM は、ビームを使った較正で  $2\mu\text{m}$  を切るような精度が出せるか、実機のビームを使ったテスト結果を見守る必要がある。まとめとして、早野氏が示した stripline BPM と cavity BPM の比較を表 9 に掲げる。

	Stripline BPM	Cavity BPM
機械的な点	複雑かつ低精度 fiducialization 必要 Q-mag 内部に組み込み可	比較的単純 / 高精度 fiducialization 不要 加速空洞用および最終収束システムでの Q-mag 用 ( IR 近傍では不可 )
電氣的な点	base-band の測定可 比較的簡単で安い回路 low-Q 測定 base-band 領域で S/N 比はまあまあ 短 strip line にて bunch-by-bunch 測定可	RF 測定のみ 複雑で高価な回路 high-Q 測定 共鳴領域で S/N 比は非常に良い bunch-by-bunch 測定は困難
安定性	low-Q なので BPM 周りの温度変化には鈍感	high-Q なので BPM 周りの温度変化には敏感
エミッタンス	高いカップリングインピーダンス ( 要検討 )	低いカップリングインピーダンス ( 要検討 )

表 9: stripline BPM と cavity BPM の比較

### 11.3 Q-BPM のビームを使った較正に要する時間の推定

仮定した方法は：

- 補正コイルを使って 4 極電磁石 ( Q ) の K 値を 3 通り変える (  $K_0 - \Delta K, K_0, K_0 + \Delta K$  ) 。 K 値を変えるのに要する時間は 1 秒 ( 電流変更 ) + 4 秒 ( 磁場が落ち着くまでの待ち時間 ) の合計 5 秒かかる。
- 各 K 値で、Q の  $\mu$ -パ - を使って、Q+BPM の位置を 4 ステップ変える (  $X_0 - 1.5\Delta X, X_0 - 0.5\Delta X, X_0 +$

$0.5\Delta X, X_0 + 1.5\Delta X$ ) 1 ステップの移動時間は 5 秒とする。但し、始めの位置設定は励磁を変えている間に行うことができる、

- 1 点での BPM 出力のデ - タ収集には 1 秒かかるとする。
- $X$  値をパラメ - タにして、縦軸に近接 BPM 出力を、縦軸に  $K$  値をとって、 $\Delta(\text{近接 BPM 出力}) / \Delta K$  を求める。次に縦軸に  $\Delta(\text{近接 BPM 出力}) / \Delta K$  を、横軸に  $X$  をとって、 $\Delta(\text{近接 BPM 出力}) / \Delta K = 0$  の位置を求める。かかる時間は 1 秒とする。
- 最後に補正コイルを零にし、 $Q$  の位置を修正し、このときの BPM 値を記録する。 ( $K$  値を変えるのに 5 秒 ; この間に  $\mu$  - バ - 移動は済ませる) + (デ - タ - 収集に 1 秒)

以上を合計すると、表 10 のようになる。

作業項目	所要時間
$\mu$ - バ - 移動時間	$(3 \times 3) \times 5 \text{ 秒} = 45 \text{ 秒}$
補正コイル電流変更時間	$(3 + 1) \times 5 \text{ 秒} = 20 \text{ 秒}$
デ - タ - 収集時間	$(4 \times 3 + 1) \times 1 \text{ 秒} = 13 \text{ 秒}$
$X$ の修正値を求める	1 秒
合計	79 秒
2 方向 ( $X / Y$ ) 合計	158 秒

表 10: KEKB での経験に基づく Q-BPM の  $\mu$  - バを使った較正の所要時間

電子と陽電子の 2 つのビームラインは同時にできるので、全体に要する時間は全数の半分の 1,000 台の Q-BPM の較正に要する時間であり、これは、 $158 \text{ 秒} \times 1,000 = 44 \text{ 時間}$ 、つまり、Q-BPM 全数の  $\mu$  - バを使った較正に要する時間は、約 2 日と推定される。

#### 11.4 Simple Correction に要する時間の推定 (KEKB の $\mu$ - バ - からの推定)

KEKB の 6 極電磁石 (Sx-mag) は全て遠隔制御の  $\mu$  - バ - に載っており、この縦方向の移動はカム方式で行われている。KEKB の Sx-mag は重量 1.2t から 2.0t まで 3 種類の Sx-mag がある。移動レンジ  $\pm 2\text{mm}$ 、精度  $10\mu\text{m}$  である。以下、2.0t の HER-SxD の  $\mu$  - バ - について記す。

$\mu$  - バ - 稼働の Pulsモ - タ - の速度は 200 パルス / 秒である。縦方向移動量を  $Y$  とすると、 $Y = d \times \sin(\theta)$  と表せる。 $d$  はカム軸の回転軸からのオフセット量で  $d = 3\text{mm}$ 、 $\theta$  はカム軸の水平位置からの回転角である。Pulsモ - タ - の 1 パルス分の回転角度は、減速ギヤ - (1/500) で、 $\Delta\theta = 0.00955 \text{ 度} (1.7 \times 10^{-4} \text{ radian})$  である。これが最小移動距離を決め、垂直移動量にすると  $dY = 0.5\mu\text{m}$  である。また、移動速度は  $V_y = 0.1 \text{ mm/sec}$  で、 $0.3\text{mm}$  移動するのに 3 秒かかる。この  $\mu$  - バ - の移動精度は  $4\mu\text{m}$  であったが、これは主にバックラッシュによるものであった。これは縦方向を LM ガイドを使ってガイドしたために、上下動で歪みがでたためと思われる。これを水平方向も含んだ全カム方式にすれば、バックラッシュもなくなり、これだけで  $1 \mu\text{m}$  の精度は出るとと思われる。

JLC のためには、Pulsモ - タ - の速度を 10 倍の 2000 パルス / 秒にし、減速比を 1/10 の 1/5000 にすれば、移動速度を  $0.3\text{mm}/3 \text{ 秒}$  のままに移動分解能は  $dY = 0.05\mu\text{m}$  となる。このとき、Puls速度を上げた分、減速比を減らしているため、駆動トルクは変わらない。また、KEKB では荷重が 2t であり、JLC の Q は 200 から 300Kg 程度と思われるので、モ - タ - は KEKB のものより小型のものでよい。BPM から信号を収集して移動量になおすのに 1 秒もかからない。したがって、Pulsモ - タ - に指令を送って移動を開始する時間は 1 秒程度とすると、移動時間と合計 5 秒以内で simple correction はできると期待される。

ピエゾ素子を使ったム - バ - や、Balakin 等が開発した電磁力によるム - バ - は、ここに述べたモ - タ - 駆動によるム - バ - よりも速度が速いので、こういったム - バ - を使用できれば、simple correction にかかる時間は更に短縮化される。

## 11.5 放射線の安全性

一般に、放射線の影響はトンネルの外壁コンクリート厚さなどの構造、その深度そして地質等に強く依存するため、サイトが特定されてない現段階での評価は暫定的なものである。ここでは、(1) トンネルは地下 10m (トンネル中心) に埋設され、(2) 内径 3m のトンネルの中央部にビームダクトが設置され、(3) トンネルの外壁のコンクリートの厚さが 30cm であり、(4) ビームパワーは 8MW とし、(5) ビーム損失はその 0.25% で主リニアック 8900m に渡り一様に分布するものと仮定して評価を行った。地下 10m はトリスタントンネルのような最も浅い場合である。また、このビーム損失量は上限値であり実際にはこれよりかなり少ないものと予想される。したがって、以下で示される数値は上限値であり、サイト候補値が絞られる中で再検討が必要となる。

トンネルのコンクリート外壁の外側での放射線量は中性子で 4m Sv/時、X線で 19 mSv/時である。よく知られている KEK の土成分を仮定すると、これらの放射化による土中の放射能濃度は高々 3.7 Bq/g と見積もることができる。ここでは、管理区域を想定した計算で半減期 1 日以下の短寿命核は考慮されていない。この値は法律上の放射能濃度の定義である 74 Bq/g の 1/20 である。

特に、地下水の放射化には注意を払わなければならない。主リニアックを含めてすべての施設がその地上部分も含めいわゆる事業所の指定を受ければ、事業所境界での地下水中の放射線量を年間  $10\mu\text{Sv}$  以下<sup>1</sup>にしなければならない。このとき、稀釈等の状況が地下水の流れの方向や速度に依存するため、サイト候補地での実地調査が必須である。また、主リニアックの部分が事業所の指定を受けない場合、トンネル埋設場所として地下水脈の近くを避けなければならない。

主リニアック直上の地上部における漏洩放射線の線量は、地上までの土の厚さが 8.2m であるので X線はほとんど吸収され無視できるが、 $\gamma$ 線と中性子による寄与があり、合算して年間  $6\mu\text{Sv}$  である。この線量値は KEK の事業所境界における管理目標の年間  $50\mu\text{Sv}$  よりも小さく、自然放射能のレベルの  $\sim 1\text{mSv/年}$  の 0.6% である。したがって、少なくとも地下 10m の深さを確保できれば漏洩放射線による地表環境に与える影響は問題ないと言える<sup>2</sup>。

トンネル内の空気は X線などの光子によって放射化される。ビーム損失の内 1% が光子として漏えいしトンネル内を 2m 浮遊すると、半減期 10 分の  $^{13}\text{N}$  の空气中放射能濃度は  $0.003\text{ Bq/cm}^3$  となり、半減期 2 分の  $^{15}\text{O}$  は  $0.0004\text{ Bq/cm}^3$  となる。これらの法律上許される排気中濃度限度はともに  $0.0007\text{ Bq/cm}^3$  である。したがって、トンネル内は気密構造とし、排気の必要がある場合には運転停止後所定の時間経過してから行わなければならない。(運転停止後 3 時間で半減期 10 分の  $^{13}\text{N}$  の空气中放射能濃度は  $1.2 \times 10^{-8}\text{ Bq/cm}^3$  となり、半減期 2 分の  $^{15}\text{O}$  は  $1.3 \times 10^{-30}\text{ Bq/cm}^3$  と基準値に比べて十分低くなる。) または、事業所敷地内に排気口を設置しそこから運転中の排気を行う。この場合には拡散を考慮し、事業所境界で法の基準を満足するように排気スタックを設けなければならない。

8MW のビームパワーをすべて吸収する主ダンプでの最も遮蔽しにくい放射線はミューオンである。この主ダンプの下流の地上部でのミューオンによる放射線量は、 $E_{beam} = 250\text{ GeV}$  の場合、下流 200m まで 10m の深さがあれば、 $0.0036\ \mu\text{cm}^2/\text{秒}$ 、すなわち  $0.005\ \mu\text{Sv/時}$  で年間  $26\mu\text{Sv}$  である。この値は自然放射線量の 2.6% ほどであり、また、主ダンプの設置される場所は中央研究施設サイト内であるため、特に問題となる量ではない。

地震、クライストロンの故障、そして停電など突然の原因によるビーム損失の影響及びそれを最小限にとどめる対策は、加速器自身の保護を含めて今後慎重に検討しなければならない。

<sup>1</sup>六ヶ所村の使用済み核燃料の貯蔵施設を地下に作る議論が行われた際に基準になった値である。何年後かにコンクリートの地下の建物が壊れ、核燃料の貯蔵容器の健全性も失われるといった極端な場合を想定しても、なおかつ管理区域境界では、地下水を飲料にしても年に  $10\mu\text{Sv}$  は越えないという基準である。

<sup>2</sup>地表面における漏洩放射線の線量は地下深度 (d(m)) の指数関数で  $e^{-1.44 \cdot d}$  に比例するため、d=20m にすれば  $10^{-5}\mu\text{Sv/年}$  以下となり全く問題ない。ここで、土の密度は  $1.6\text{ g/cm}^3$  とした。

☆ 地質に合わせた長大トンネルの構築方法の一覧表 ☆

トンネル タイプ		古典的方式と	NATM	シールド	TBM	ライニングの種類		
地質状況		支保	支保	支保	支保	支保		
I	亀裂の少ない新鮮な岩	無支保、一部ロックボルト	スロットドリルとスローブラスト	ロックボルト	-----	開放型ボーリング	無し	吹き付けコンクリート 又は無筋コンクリート
II	亀裂のあるやや風化した岩、又は非常に良くしまった硬土	部分的な鋼アーチ支保工側壁矢板	同上	鋼アーチ支保工 ロックボルト	-----	開放型ボーリング	無し 一部 ロックライナー	無筋コンクリート
III	風化岩、破碎帯、硬土	鋼アーチ支保工側壁掛矢板	同上+切羽保護	鋼アーチ支保工 ロックボルト	セミシールド ボーリング セグメント の設置	部分シールド型 ボーリング	ロックライナー	無筋コンクリート又は 鉄筋コンクリート
IV	軟質土砂、著しい風化岩、断層破碎帯	鋼アーチ支保工アーチ: 縫地 矢板側壁: 掛矢板と 縫地矢板	全断面保護後 スロットドリルと スローブラスト	地盤改良と注入	切羽保護 付 円 筒シールド ボーリング	同上	-----	鉄筋コンクリート による巻きつけ支保
V	扇状地、沖積層シルト、粘土、土砂等	鉄筋コンクリートの枠	同上	同上	同上	-----	-----	地圧に対応した 肉厚鉄筋コンクリート セグメント 巻きつけ支保

古典方式: NATM、シールド、TBMといった近代的な工法以外  
 支保: 作業の安全性確保、岩塊の崩落、地山の緩み拡大防止策  
 ロックボルト: 掘削地山の打ち込み支保として使用する鋼棒  
 スロットドリル: トンネル外周や掘削面に連続した溝を掘り、  
 破壊を拘束しない自由面を作る機械  
 スローブラスト: スロットドリル等を使った多数の孔を少量の火薬で  
 計画的に破壊する方式

セグメント: 鉄筋コンクリート製の地山の緩み拡大崩壊防止用の  
 工場生産方式の支保材  
 NATM: ロックボルトを主たる支保とするトンネル工法で、硬岩では  
 スローブラスト方式と良く組み合わせて施工される  
 TBM: 巨大なドリル機械を使って岩盤を削り取りながら掘進する工法  
 シールド: 軟弱地盤をドリル方式で掘削する為に、各種の崩壊防止策を  
 施した掘削方式で、完成トンネルのセグメント壁を掘進機器の  
 足場として利用する。日本独自の分類

## 参考文献

- [1] JLC group, JLC-I(the green book),*KEK Report* 92-16, 1992.
- [2] JLC Design Study Group: *JLC Design Study*, KEK Report 97-1, April 1997, see also <ftp://lcdev.kek.jp/pub/DesignStudy/>.
- [3] International Study Group ISG Progress Report. KEK Report 2000-7, SLAC-R-559.
- [4] S. Takeda, A. Akiyama, K. Kudo, H. Nakanishi and N. Yamamoto, "Slow drift and frequency spectra on ground motion", KEK-PREPRINT-93-61, Jul 1993; 3rd International Workshop on Accelerator Alignment (IWAA93), Annecy, France, Sep 28- Oct 1, 1993.
- [5] V. Shiltsev, "Space-time ground diffusion: the ATL law for accelerators", 4th International Workshop on Accelerator Alignment (IWAA95), Tsukuba, Japan, 14-17 Nov 1995.
- [6] W.B. Herrmannsfeldt, M.J.Lee, J.J.Spranza and K.R. Trigger, "Precision alignment using a system of large rectangular Fresnel lenses", *Applied Optics* 7(1968) 995.
- [7] V.E. Bressler, G.E. Fisher, R.E. Ruland and T. Wang, "High resolution Fresnel zone plate laser alignment system", EPAC 92, Berlin, Mar. 24-28, 1992; SLAC-PUB-5765 (Mar. 1992).
- [8] R.E. Ruland, V.E. Bressler, G.E. Fisher and D. Plouffe, "A dynamic alignment system for the Final Focus Test Beam", IWAA 93, Annecy, France, Sep. 28 -Oct. 1, 1993; SLAC-PUB-6152 (May 1993) and SLAC-PUB-6194 (May 1993).
- [9] KEKB 電磁石グループ, "主リング電磁石", *高エネルギー - ニュース* Vol.17 (No.6) P163 (1999).
- [10] P. Chen, G. Horton-Smith, T. Ohgaki, A.W. Weidemenn, K. Yokoya, *Nucl. Instr. and Meth.* **A355** (1995) 107. The latest version can be obtained from a web site of <http://www-acctheory.kek.jp/members/cain/default.html>.
- [11] T.Tauchi and K.Yokoya, *Phys. Rev. E* **51**, 6119 (1995).
- [12] N. Yamamoto and K. Oide, Beam Size Stabilization in the JLC Final Focus System with Dispersion Free Orbit Correction, Proceedings of the XVth International Conference on High Energy Accelerators, Hamburg, Germany, July 20-24, 1992, KEK Preprint 92-60, July 1992.
- [13] 山地憲治、藤井康正、「グロ - パルエネルギー - 戦略」、電力新報社 1995 年 4 月発行
- [14] 山本重雄、「ソ - ラ - 電池のはなし」、日刊工業新聞 1997 年 3 月第 2 版発行
- [15] REPP 編、「誰でもできるベランダ太陽光発電」、合同出版 1999 年 10 月発行
- [16] 清水幸丸、「風力発電技術(改訂版)」、パワ - 社 1999 年 2 月改定 1 版発行
- [17] 松宮、「ここまできた風力発電」、工業調査会 1998 年 10 月発行
- [18] N. Akasaka, M. Arinaga, S. Hiramatsu, T. Ieiri, H. Ishii, K. Mori, T. Obina, T. Shintake and M. Tejima, "Design of beam position monitor system for KEKB", EPAC '96, 10-14 June 1996, Sitges, Spain; KEK-PREPRINT-96-48 (Jun. 1996).
- [19] M. Tejima, M. Arinaga, H. Ishii, K. Mori and S. Hiramatsu, "Beam position monitor system for KEKB", EPAC 2000, 26-30 June 2000, Vienna, Austria; KEK-PREPRINT-2000-52 (Jul. 2000).

- [20] M. Masuzawa, N. Akasaka, S. Hiramatsu, H. Koiso, K. Satoh and M. Tejima, "Beam-based calibration of beam position monitors and measurements of the sextupole magnet offsets at KEKB", EPAC 2000, 26-30 June 2000, Vienna, Austria.
- [21] H. Hayano, J.-L. Pellegrin, S. Smith and S. Williams, "High resolution BPM for FFTB", Nucl. Instr. and Meth. A320 (1992), 47; SLAC-PUB-5691 (Nov. 1991).
- [22] "Performance of the BPM Position Monitor System of the Final Focus Test Beam", S. Smith et al., Nucl. Instr. and Meth. A431 (1999) 9; SLAC-PUB-7993 (Nov. 1998).
- [23] P.F. Brunet, J. Dobson, Martin J. Lee and C.Brian Williams, "Microwave beam position monitors", SLAC-TN-64-045 (Jul. 1964).
- [24] Z.D. Farkas, H.A. Hoag, H.L. Martin and Alan R. Wilmunder, "Recent developments in microwave beam-position monitors at SLAC", Proton Linear Accelerator Conf., Sep. 14-17, 1976, Chalk River, Ontario, Canada; SLAC-PUB-1823 (Oct. 1976).
- [25] W. Schnell, J. P. H. Sladen, I. Wilson and W. Wuensch, "CLIC beam position monitor developments", CLIC-Note 170, 1992.
- [26] R. Lorez and K. Yezza, "Test results on a beam position monitor prototype for the TTF", EPAC 94, 27 Jun.-1 Jul. 1994, London.
- [27] V. Balakin, A. Bazhan, P. Lunev, N. Solyak, V. Vogel, P. Zhogolev, "Beam position monitor with nanometer resolution for linear collider", EPAC94, 27 Jun. - 1 Jul., 1994, London.
- [28] T. Kamps and R. Lorenz, "New microwave beam position monitors for the TESLA test facility - FEL", 8th Beam Instrument Workshop (BIW98), May 4-7, 1998, Stanford, U.S.A. .
- [29] T. Slaton, G. Mazaheri and T. Shintake, "Development of nanometer resolution C-band radio frequency beam position monitors in the final focus test beam", LINAC 98, August 23-28, 1998, Chicago, U.S.A.; KEK Preprint 98-145 (Sep. 1998).
- [30] T. Shintake, "Development of nanometer resolution RF-BPMs", HEACC 98, Sep. 7-12, 1998, Dubna, Russia; KEK Preprint 98-188 (Nov. 1998).
- [31] V. Balakin, A. Bazhan, P. Lunev, N. Solyak, V. Vogel, P. Zhogolev, A. Lisitsyn and V. Yakimenko, "Experimental results from a microwave cavity beam position monitor", IEEE Particle Accelerator Conference (PAC 99), 29 Mar. - 2 Apr. 1999, New York; Other related references can be found in this paper.