

[12C-03]

Design Study of the Facility for the e^+e^- Linear Collider Based on the Experiences at KEKB

M. Yoshioka^{*}), Shigeru Takeda, H. Matsumoto and Yasunori Takeuchi

KEK, High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801 JAPAN

Abstract

There are similarities between KEKB and Linear Collider in respect to high luminosity machine, collider consisting of two accelerators, power-dissipation density of about 10MW/km, and so on. Design study of the facility issue for the C-band e^+e^- Linear Collider is performed based on the experiences to construct and operate the KEKB. We will describe the studies on civil engineering, the electricity, cooling water and air conditioning systems.

リニアコライダー加速器施設の研究 (KEKBの経験を踏まえて)

1. はじめに

KEKBとリニアコライダー(LC)は共通するところがある:(1)ハイルミノシティーマシンである;(2)2台の独立した加速器から構成されるコライダーである;(3)衝突点の鉛直方向ビームサイズはKEKBは数 μm 、LCは数nmと3桁の差はあるが、両者とも精密衝突制御が重要な課題である;(4)周長3kmのKEKBリングの消費電力は35MWである。マシンが消費するエネルギー密度(単位加速器長当りのエネルギー)としてはLCと同等であり、空調、冷却水、電力等施設の単位規模は同等である。

LCの土木、建築、電力、機械等、加速器施設に関する研究を、KEKBの建設や運転を通して蓄積した経験をもとに行っている。加速器機器のシステム設計は物理が必要とするエネルギーに到達し、かつ十分な稼働率で運転可能ならしめることを第一の条件としてなされている[1]。本研究の課題も同様である。

2. 土木、建築

2.1 KEKBのビームの変動

KEKBでは様々な要因によるビーム軌道の変動がみられる(図1)。図の13Hzの成分の衝突点での鉛直方向の振動振幅は0.2 μm である。今は $\sigma_y^* = 2 \sim 5\mu\text{m}$ であり、ルミノシティに深刻な影響はないが、いずれ解決すべきである。また衝突維持の

ため各種の軌道制御のフィードバックは不可欠である。例えばContinuous Closed orbit Correctionを外すと軌道は大きくドリフトしてしまう[2,3]。変動の主要因として、室温変化が考えられる。その他にも真空ダクトの加熱、液体ヘリウムや窒素の流れ、機械振動、道路の振動などが考えられる。同様のことがLCで起これば、ビーム衝突の維持は難しいと考えられる。

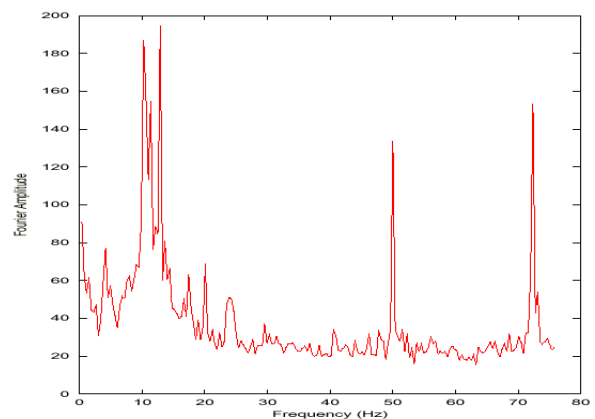


図1 KEKBビーム振動のスペクトラム[3]

2.2 地盤の安定性とサイト

地盤変動と主リニアックのアラインメントの関係は[4]に詳しい。代表的データを図2、3に示す。図2は広帯域地震計で測定したKEK敷地内と愛媛県佐々連の銅鉦山跡トンネル(地質はグリーンシスト;堆積岩)における地盤変動のパワースペクトラム $P(f)$ である。周波数が0.01~100Hzまで示しており、全ての帯域でKEKは変動が大きいことが

M. Yoshioka^{*}, 0298-64-5307, masakazu.yoshioka@kek.jp

わかる。図3は佐々連で水管傾斜計により計測した $10^{-7} \sim 10^{-4}$ Hz帯域のデータも合わせた広帯域にわたる $P(f)$ である。地球潮汐や波浪の影響がきれいに出ているがこれらを除けば、 $P(f) \sim kf^{-n}$ で表わされる。地震帯域以下($<10^{-4}$ Hz)では、地盤の変動はインコヒーレントなブラウン運動的なものと言われているが、ここでは $k \sim 10^{-6} \mu\text{m}^2/\text{Hz}$ 、 $n \sim 2$ であることがわかる。別な形で表わすと、距離 L の二点間の相対2乗平均変位を σ とすると、 $\sigma^2 = ATL$ と書ける(ATL則[4])。Aはサイトおよび地盤により決まる定数、Tは時間である。KEKと佐々連におけるAはそれぞれ40、0.05 ($\text{nm}^2/\text{m/s}$)と3桁も差がある。

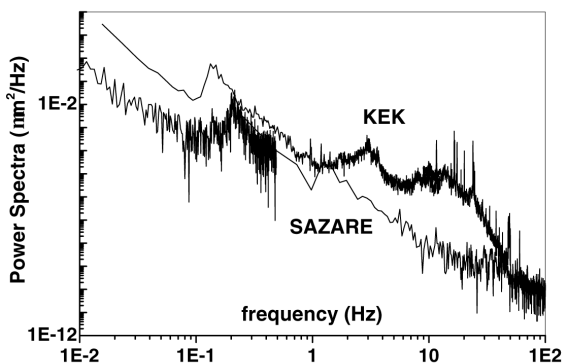


図2 KEKと佐々連におけるパワースペクトラム

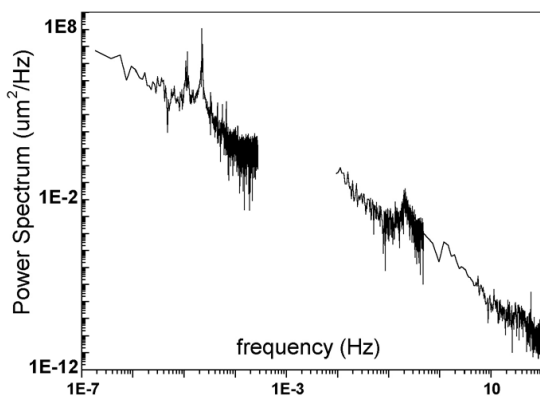


図3 佐々連における広帯域パワースペクトラム

主リニアックの軌道が Beam Based Alignment により完璧に直線にできたと仮定すると、エミッタンスは加速管の位置変動によってのみ損なわれる。[4]によれば、 $A=1\text{nm}^2/\text{m/s}$ のサイトでエミッタンスが10%損なわれるまでの時間は24時間である。すなわち、1日1回は加速管のアライメントをやり直す必要がある。KEKのようなAが大きいサイトや、加速管のアーチャーがより小さなシステムであれば、状況ははるかに厳しいものになる。

同様のことをトンネル工法においても考えねばならない。ATL則の由来は地球潮汐や地殻の変動、移動など様々な弾性変形がエネルギー源となり、地盤のランダムな変動を起こすと考えられる。つまり一枚岩に近いほどAは小さく、岩盤が砕けているほどAは大きくなる。トンネルを掘削する場合も、発破を多用する Smooth Blasting 方式より機械掘削がAに与える影響は明らかに少ない[4]。

2.3 トンネル設計

KEKBの建設では、機器の搬入、据え付け、アライメント、ケーブル敷設、接続、検査といった多種の作業を、互いの干渉を避けて円滑に進めることが課題であった。LCの設計に当たり、これらのことに加え運転中に行うクライストロンの交換作業や、その他保守作業のことも考慮に入れた。加速器の要素開発が進み、加速ユニットの設置計画はmm単位の精度でできるようになった[1]。そのパラメーターに基づき、設計したトンネルを図4に示す。トンネル掘削のコストは一次近似で断面積に比例すること、クライストロンギャラリーには常時立ち入り可にすることなどから、直径3mの加速管トンネルと直径4.2mの電源トンネル2本を4m間隔で並列につくる設計にした。1ユニットの長さは10mである。導波管やケーブルおよび冷却水用に10m毎に直径300mmの貫通孔を設ける。

現在、防災上の検討、次項で述べる電気、機械設備との詳細なとりあいを考慮し、設計を詰めているところである。

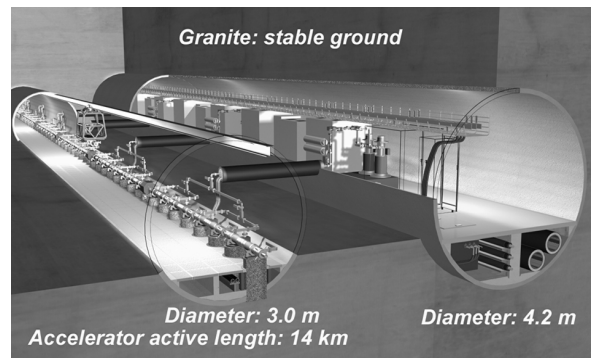


図4 加速器トンネル

3. 電気

LCの施設電力も含めた総電力は300MWである。KEKBでは中央変電所で145kVで受電し(受電能力150MW)、66kVに落として4ヶ所のサブ変電所(各最大32MW)に分配している。途中の配線は 200mm^2 のCVT地中埋設管路である。LC用にはこの2倍の規模なので、単純に考えれば衝突点に

中央変電所を設け、電源トンネル内に設けた 66kV 送電線により、両側のリニアックに分配すればよい。しかし実際には、遮断器の最大容量とトリプレックスにできる電線の最大サイズを考慮しなければならない。送電線の漏洩磁場を考慮すると、AC ラインをトリプレックスにすることは必須である。直流送電の可能性も検討に値する。現在これらを考慮し、サブ変電所の配置、特高ケーブルの配置および敷設方法の検討を進めている。

4. 機械

4.1 空調

KEKB では TRISTAN と異なり O_3 や NOX の発生は無視できるので換気を停止し、外気の侵入を減らした。また Full Energy Injection なので、熱負荷は一定であり、温度安定化のためには好条件となった。それでもケーブル貫通孔からの対流や 4ヶ所の実験ホールでの外界との熱交換により温度は完全に一定となっていない。

LC の熱負荷はやはり一定である。また大深度であればトンネル地山の温度変化は小さく、ある温度で一定となる (KEKB の場合は 16)。また自然換気による外界の影響ははるかに少ない。機器の熱負荷の 95% 以上は冷却水で除去することができるので積極的空調の必要はなく、酸欠対策のため、緩やかな換気で十分であると試算している。前項とあわせて防災上の検討は必要である。

4.2 冷却水

消費電力の ~95% を冷却水で除去し、冷却塔で空中に放出する。KEKB では冷却水 (純水または未処理水) 流量が 1600 ~ 7000 リットル/分の大規模システムを 20 ユニット使用している。冷却塔は密閉空冷式が主で、一部に密閉水冷式を使用している。TRISTAN 以来既に 18 年の運転実績がある。LC の場合、加速ユニット総数が 2000 ユニットと多い。KEKB の経験では大規模システムは慣性が大きく操作性に難点がある。そこで以下の分散システムを提案する。

機械棟

- ・ 100 ユニット分 (1km) を 1 セクターとし、2 セクター当り一ヶ所の機械棟を地上に設ける。
- ・ 1ヶ所あたり 30MW の熱負荷を処理することになり、全体で 10ヶ所 (約 2km 間隔) 必要となる。
- ・ 冷却塔は密閉水冷式とする。入り口温度 60 、出口温度 30 、外気湿球温度 20 とすると、循環

水量は毎分 14400 リットル、塔体設置面積は $7.6 \times 13.3m^2$ となる。温度制御は ± 1 で行う。

冷却水ユニット

- ・ 2000 台の加速ユニットに対応する 2000 台の冷却水ユニットを設ける。1 ユニットの規模は、熱負荷が 150kW、流量が 200 リットル/分である。
- ・ 各ユニットはプレート式熱交換器を持ち、主管冷却水と熱交換する。
- ・ 温度制御は、負荷で加熱された水と熱交換器で冷却された水の混合比を制御して行う。加速管冷却水は ± 0.1 の精度で温度制御する。

この原理で製作した冷却水ユニットを KECB で 2 台製作し、既に 2 年以上運転している。今後の課題は、冷却塔における蒸発水の補給、循環水の水質管理 (特にエア抜きおよび溶存酸素の除去)、流量計、フロースイッチ、温度計などの信頼性の向上などである。

5. おわりに

地盤の変動調査やトンネル設計、工法の検討、電気、機械設備の検討にあたっては、多くの企業の協力を得た。清水建設、竹中工務店、鹿島建設、熊谷組、空研工業、大洋バルブ、日立電線、電源開発、住友金属鉱山の方々に感謝致します。なお、KEK 施設部の宮原、横田、小森谷、村上の各氏には助言をいただきました。

参考文献

- [1] 新竹積他、「C バンド・リニアコライダーの技術開発、Phase-I のまとめと Phase-II の提案」、本研究会
- [2] T. Mimashi et al., "Coherent Beam Oscillation in the Frequency Region from 0.1Hz to 50 Hz at KECB Ring", 7th European Particle Accelerator Conference, Wien, Austria, June 26-30, 2000
- [3] 山本昇、「KEKB LER ビームの 13Hz 振動の TBT モニタによる長時間観測」、私信
- [4] 地盤変動と LC の関係については以下の Shigeru Takeda et al. の 3 編の論文に詳しい ; "Ground Motion at KEK", Workshop on Physics and Experiments with Linear Colliders, Morioka-Appi, Iwate, Japan, September 8-12, 1995, "Slow Ground Motion and Large Accelerator", 5th European Particle Accelerator Conference, Sitges, Spain, June 10-14, 1996, "Ground Motion Studies for Large Future Linear Colliders", 1997 Particle Accelerator Conference, May 12-16, Vancouver, BC, Canada
- [5] V. Shiltsev, "Space-Time Ground Diffusion: The ATL Model for Accelerators", IWAA95, KEK, Japan, Nov. 14-17, 1995