

JLC 計画について*

浦川順治、陳 栄浩、峠 暢一、肥後寿泰、横谷 馨
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設

新竹 積
理化学研究所・播磨研究所

電子・陽電子リニア・コライダー(LC)は、二つの線形加速器を対向させて運転することによって非常に高いエネルギーの電子・陽電子衝突を可能にする加速器である。現在、素粒子物理学の実験的研究の新領域を開拓して行くことを目的として、LC の開発は世界各地で進められている。ここでは、日本のLC、すなわちJLC 計画の実現を目指してKEK を中心として行われているLC 関係の加速器技術の開発状況について概説する。

1. はじめに

JLC 計画とは重心系エネルギー 250 GeV 程度から最終的には 1 TeV 程度までの電子陽電子衝突実験を行うためのリニアコライダー (LC) の建設を目指すものである[1, 2]。この報文では、加速器開発研究に関係されている、あるいは興味をお持ちの読者の方々に、JLC に向けたLC開発の状況をお伝えるすることを試みる。まず、最近の素粒子物理学の進展を踏まえ、何故重心系エネルギー 500 GeV 程度以上の電子・陽電子衝突加速器が必要とされるのかを述べ、その技術解として何故LCを考えなければならないのか、その技術的課題は何かを説明する。ついで、JLC の設計思想について簡単に触れ、現在 KEK を中心とする日本の研究機関・大学・企業で行われている R&D の状況を概説する。最後に、様々の国際・国内協力の概況と今後の展望について述べる。

2. 素粒子(高エネルギー)物理学の進展

最近の素粒子(高エネルギー)物理学の進展と近未来の研究課題、そしてJLC 計画の提案された経緯については文献 [3] に解説されている。物質を構成する基本粒子はスピン1/2 をもつ6種類のレプトンと6種類のクォークからなり(表1)、その間の相互作用はいくつかのゲージボゾンと呼ばれるスピン1を持つ粒子が媒介すると考えられている。レプトンやクォークの

表1: 現在までに存在が実験的に検証されている基本粒子

Spin 1/2 Particles	
Lepton	$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$
Quark	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$
Spin 1 Particles (Also called Gauge Bosons)	
Photon	γ
Z/W Particles	Z^0, W^+, W^-
Gluon	g

相互作用のうち、「電磁相互作用」と「弱い相互作用」については、ワインバーグ・サラム 模型と呼ばれる理論でこれまでの様々な実験結果を非常によく説明できることが知られている。また、これに「強い相互作用」を加えた「大統一理論」もなんらかの形で成り立つはずであろう、ということも学界の全世界的なコンセンサスである。

現時点での素粒子(高エネルギー)物理学の中心課題には、最近話題になった中性B中間子の崩壊におけるCP 対称性の破れとその由来、および、ニュートリノ(中性微子)に有限の質量があるらしいことなどがあるが、それに加えて特に大きい問題として以下の二つを挙げることができる:

* 本報告は、「わが国におけるLC開発研究の状況」と題して加速器同好会通信第8号(2001年10月)に発表した報文に加筆訂正を加えたものである。

1. クォーク、レプトン、ゲージボソンなどほとんどの粒子が有限の質量をもつ事実を、「繰り込み可能なゲージ理論の枠組み」のなかで破綻なく記述するために、ワインバーグ・サラム模型では「ヒッグス機構」と呼ばれる操作を導入した。その帰結として「ヒッグス粒子」(シンボルHで通常表記される)と呼ばれるスピン0(ゼロ)の粒子の存在が予言される。しかし、ヒッグス粒子はまだ実験的に検出されていない。
2. 「力の大統一」については、いくつかのシナリオが想定されてきたが、いずれの予測に従っても現在検出されている以外の様々の粒子が存在するであろうことが予言されている。しかし、そのどれも実験的に検出されたものは、まだない。今までのところ実験的に確定しているのは「云々の質量領域にはしかじかの性質を持つような粒子は存在しない」というネガティブな知見の集積のみである。したがって、どの「大統一」シナリオが自然界を真に支配しているのか、実験的に確定できている訳ではない。

こうして、ヒッグス粒子の存否あるいは質量、大統一理論の帰趨については 1970 ~ 80 年代には文字通り手探りの状態がしばらく続いてきた。これを打開し始めたのが、1980 年代後半から 1990 年代にかけての欧州 CERN での LEP (重心系エネルギー 100 ~ 200GeV の周長約27km の電子・陽電子衝突用貯蔵リング型加速器 [7])での精密測定実験、そして並行して行われた超対称性模型の理論的進展である。それによると、「電弱相互作用」や「強い相互作用」の「結合定数」(相互作用の強さの指標)のエネルギー依存性の振る舞いから、力の大統一に関しては超対称性模型によるシナリオが非常に有望であることが示唆されている。「弱い相互作用」を媒介する Z 粒子、W 粒子の質量は同じく LEP で非常に精密に測定されているが、これらから推論する(推論の中身の詳細は省略する)とヒッグス粒子の質量は 150 GeV 程度であろう、という強い状況証拠が得られている。超対称性模型とは、スピンの 0、1 など整数と 1/2 など半整数の粒子群の間の対称性を考えるモデルである。もしこれが正しいとすると、現在はまだ検出されていない粒子が数 100 GeV 程度の質量領域に多数存在することが予言される。

もとよりこれらは証明された事実ではなく、「これまでの実験と理論研究の総合として非常に強く示唆

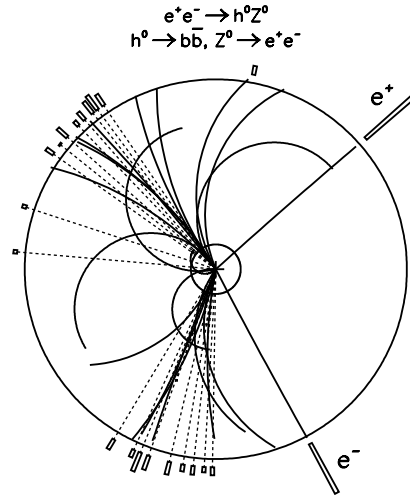


図 1 : 重心系 300 GeV の電子・陽電子衝突において、Z 粒子とH(ヒッグス)粒子が対生成ののち崩壊する様子のシミュレーション図。文献 [6] より引用。

される予測」(の一つ)と位置づけるべき事柄である。しかし、今後の研究の方向について重要な指針の一つを与えるものであると言うことはできる。たとえば、このような展開を電子・陽電子衝突反応で実験的に研究するとすれば、ヒッグス(H)粒子の検出については

$$e^+e^- \rightarrow ZH,$$

の生成過程を追求すべきであり(図 1) そのために必要な重心系エネルギーは Z 粒子とヒッグス粒子の質量の和、すなわち 250 GeV 程度以上であることが分かる。超対称性模型で予言される新粒子群、あるいは別の各種模型で予言される新粒子についても、数 100 GeV 以上の重心系エネルギーでの電子・陽電子衝突反応でその一部が検出される公算が高いと考えられている。

以上のような議論に基づき、仮に電子・陽電子衝突反応で今後の素粒子(高エネルギー)物理の研究を進めるとすれば、まず重心系エネルギー 250 GeV ないし 500 GeV 程度で出発し、将来的には 1 TeV 程度まで運転領域を広めることができるような加速器を開発することが非常に望ましいとされているのである。なお、素粒子物理学におけるこの辺りの研究指針の系統的検討は、東大、KEK を中心とする日本グループが世界に先駆けて行ったものであることを指摘しておきたい[1]。

3. LC(リニアコライダー)の必要性

大型の電子・陽電子衝突型の加速器を TRISTAN や LEP のような貯蔵リング (図 2(A)に模式図) で建設する場合、最大の問題となるのはシンクロトロン放射によるビームエネルギーの損失を加速空洞を用いて高周波 (RF) 電力によって補填しなければならない点である。ここで、ビームエネルギーを E (重心系エネルギーのちょうど半分である) リングの曲率半径を R とすると、周回当たりのビームエネルギー損失 (従って、必要なエネルギー補填量) は

$$\text{エネルギー補填量} \sim E^4/R,$$

のように振る舞う。一方、加速器の全長は R に比例するから、その総建設または運転コストは、

$$\text{コスト} \sim AR + BE^4/R,$$

のように振る舞うであろう。ここで、 A や B はある定数である。 A 、 B の具体的な数値は個別の加速器設計に依存するが、最適化を行った場合のコストは簡単な微分方程式を解いて

$$\text{コスト} \sim E^2,$$

のようになるであろうことが想像できる。したがって前節で論じたように次期電子・陽電子加速器の初期エネルギーでまず LEP の 2 倍強まで到達できることを目指すなら、リングの周長ないしコストは 4 倍であり、エネルギー 4 倍ならば周長・コストは 16 倍! が必要になる。

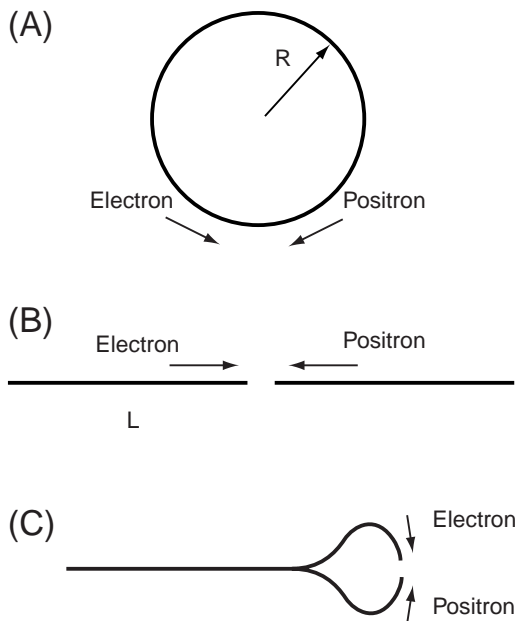


図 2 : (A) 貯蔵リングと (B) リニアコライダーの概念比較図。(C) は SLC の概念図。

そこで貯蔵リング形式を止めて、二つの対向する線形加速器を使って電子・陽電子を衝突させるのがリニアコライダー (LC) である (図 2(B))。ビームの加速勾配を一定にした場合には必要な加速器総延長 L は最終ビームエネルギー E に比例し、コストもまた、

$$\text{コスト} \sim E$$

のように振る舞うと考えられる [4]。従って数値的評価は厳密に行う必要はあるものの、あるエネルギー以上ではリニアコライダーの方がコスト効率において貯蔵リングに勝ると考えられる。実際、電子・陽電子衝突で LEP を大幅に上回るエネルギーの加速器を建設する際には LC に移行すべきである、というのが世界の研究者の一致した見解といつてよい。

LC の概念に基づく最初の加速器としては米国 SLAC で 1980 年代後半から 1990 年代半ば過ぎまで稼働した SLC (重心系エネルギー約 100 GeV) がある [5]。これは一本のみの線形加速器で電子と陽電子を加速し、線形加速器の出口で電子・陽電子を左右に分離してから大回りにビーム輸送したのち衝突させたものである (図 2(C) 参照)。ただし、曲線ラインでビーム輸送する際の放射光によるエネルギー損失の問題があり、50 GeV を大幅に上回るエネルギーのビーム運転には適さない。現在、次世代 LC の開発はすべて図 2(B) のようなトポロジーを前提として日本、米国、欧州の複数の研究機関で進められており、いずれも初期重心系エネルギー E_{CM} にして 500 GeV 以上を目指し、加速器トンネル総延長として 30 km 程度以下に収まるものが考えられている。

このように 21 世紀の素粒子 (高エネルギー) 物理の実験的研究の非常に重要な一翼を担うリニアコライダーであるが、いくつかの大きな技術的課題を抱えている。その一部を挙げると:

1. 重心系エネルギー E_{CM} が増大するに従って電子・陽電子衝突の反応断面積は $1/E_{CM}^2$ のように急速に減少する。これを補うように対向する粒子衝突の頻度 (ルミノシティと呼ばれる) を E_{CM}^2 に比例して増やさなければならない。
2. そのような大きなルミノシティを、線形加速器の運転環境下で実現しなければならない。一般に貯蔵リングでのビーム衝突の繰り返しは 10 kHz から 100 kHz のオーダーであるが、線形加速器に基づくリニアコライダーでは高々 100 Hz

JLC Schematic Diagram

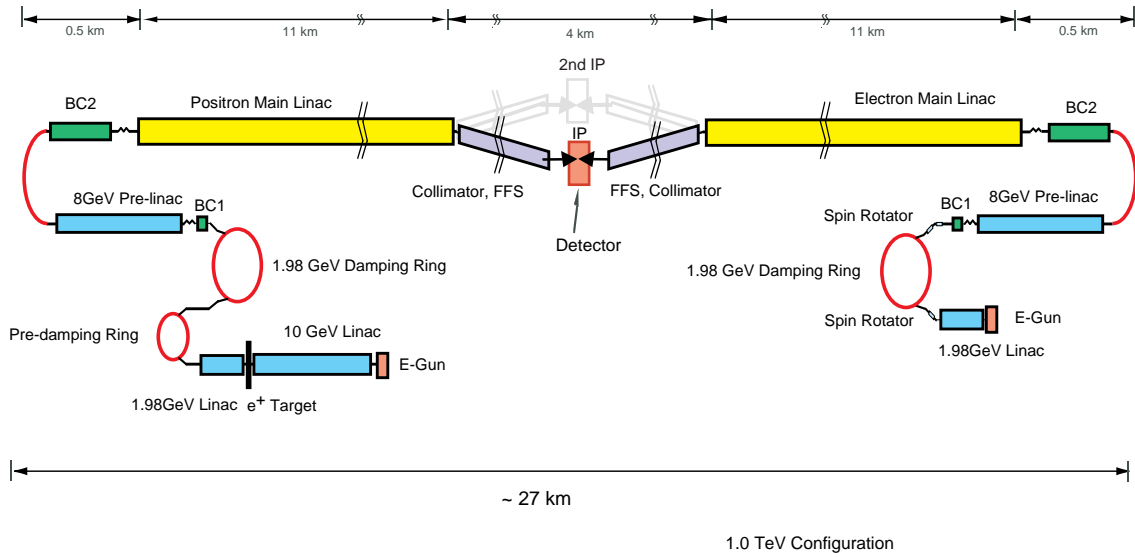


図 3 : JLC 加速器系の概略図 .

In case of ECM = 500 GeV

# of klystrons / linac	1872
# of modulators / linac	1872 / N
# of acc. structures / linac	5616
# of 8-klys + 24-struc / linac	234

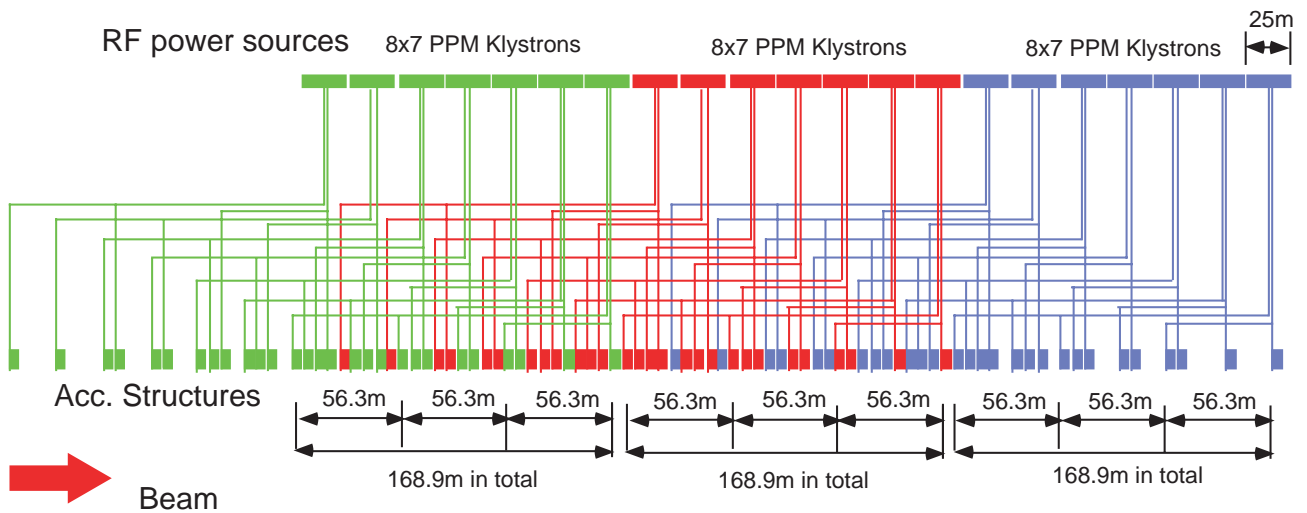


図 4 : JLC 加速器のための主線形加速器の構成概念図(Xバンドの場合)。クライストロン 8 本のパッケージが 7 個集まった RF クラスタによって、168 本の加速管 (敷設延長約 176 m) をドライブする。1 クラスタでの全加速電圧は平均約 7.2 GeV となる (含各種オーバーヘッド)。

で頭打ちとなるのにもかかわらずである。

- したがって、リニアコライダーで使用するビームは、大強度のものとならざるを得ない。かつ、ビーム衝突点で貯蔵リングの場合のそれに比べて数百ないし数千分の一程度まで小さく絞り込み、低い衝突繰り返しに打ち勝って高ルミノシティを実現しなければならない。
- 上記項目3を可能とするために、リニアコライダーで加速するビームには極めてエミッタンスの小さいもの(エミッタンスは、ビームを構成するバンチの大きさの指標である)を使い、加速途中でのビームエミッタンスの増大を回避する対策を講じなければならない。
- 現行の貯蔵リングと同程度の総電力消費(100 ~ 200 MW)で運転を賄うため、線形加速器の電力効率の向上には格別の努力が必要である。加速管内に蓄積しなければならないパワーの観点からは、波長の短い、より高い周波数の高周波を用いるのが有利である。しかしながらその場合、より厳しい工作精度や設置精度の実現が必要になってくる。

などである。

これらを含めた技術的諸課題と解決策の検討結果については、文献[2, 6]が詳述している。図3にJLCの概観図(重心系エネルギー最大1 TeV までの場合)を示す。敷地、予算などの理由で最終到達エネルギーをこれよりも低く設定する場合には、それに従って主線形加速器の総延長を短縮したもので対応する。

図3が示すように、電子および陽電子のビームはそれぞれ独立した入射器領域で生成される。ビームの横方向低エミッタンス化のために、ダンピングリングとよばれる小型の貯蔵リングが導入されている。JLC 実機では更に、ビームの縦方向エミッタンス(バンチ長とほぼ等価の概念である)の縮小のため、バンチ・コンプレッサと呼ばれるビームラインが挿入され、ビームはそれを経たのち主線形加速器に入射される。

JLC のための主線形加速器では加速高周波として11.424 GHz のX-バンド周波数(図4に模式図)と5.712 GHz のC-バンド周波数の場合の双方が検討されているが、X-バンドの場合の加速勾配はピーク 55 MV/m である。これは、KEK で現在運転中の 400m 入射器や SLAC の 2 マイル加速器での ~ 17MV/m の約 3 倍強である。

4. JLC の基本設計

LCで単位時間にある物理現象が発生する回数はその現象の衝突断面積とLCのルミノシティの積である。前者は人間にとってどうすることもできないものであるが、後者は最適化が可能であり、LCの性能を表す最も重要なパラメータである。ルミノシティLは基本的には

$$L = (\text{バンチ衝突頻度}) \times (\text{バンチ内粒子数})^2 / (\text{衝突中のビーム断面積})$$

と書ける。電子・陽電子はそれぞれ 10^{10} 個前後が一つの塊(バンチと呼ぶ)になり、このバンチが約100個つながったもの(トレインと呼ぶ)を1つのマイクロ波のパルスで加速する。これが100Hz程度の周波数で繰返される。ルミノシティを高くするには、繰返し数・バンチ数・バンチ内粒子数を多くすること、および衝突点でビームを小さくすることが必要になる。

前節に述べたように、円形加速器から線形加速器に移る理由は磁場中でのシンクロトロン放射を避けるためであるが、実はLCでもこれが問題になる。衝突点で相手のビームが作る磁場は非常に強く、これによって電子・陽電子がエネルギーを失うためである。この現象をビームシュトラールク(Beamstrahlung)と呼ぶ。このため、重心系エネルギー300GeV程度以上のLCでは無闇にバンチ内粒子数を多くしたり、衝突点でビームを小さくしたりできない。ビームシュトラールクの許容上限を決めると、ルミノシティは、

$$L \propto (\text{電力効率}) \times (\text{消費電力}) / \sqrt{(\text{鉛直方向エミッタンス})}$$

と書換えられる。電力効率とは、消費電力のうちビームのエネルギーになるものの割合である。鉛直方向エミッタンスとは、上下方向のビームの質であり、ダンピングリングで、できる限り小さなものを作る。消費電力には実際上の上限があるので、ルミノシティを高くするポイントは、次の二点に集約される。

- 電力効率のよい線形加速器を作る。これは2の要素に分けられる：
 - 電力効率を上げやすいビーム構造(バンチ内粒子数、バンチ間距離、バンチ数)を採用する。

- それに見合ったマイクロ波を効率よく発生する。
- ダンピングリングで作った小さなエミッタンスが線形加速器での各種の誤差で増加しないようにする。つまり、誤差の許容値の大きな加速器を設計する。

これらの点は基本的には加速マイクロ波周波数の選択にはほとんど依らないが、実際の観点からは

- 低周波の方が技術的に容易である。
- 高周波の方が加速勾配が高く、限られた敷地の長さで、より高いエネルギーに到達できる。

の差がある。JLCでは、X-band (11.424GHz)およびC-band (5.712GHz)の研究を並行して行なっている。技術的に可能であるなら前者が有利なので、後者は、前者が難しいと判断された場合の選択肢と考えている。上記の最適化条件と共に、当然のことながら、

- 建設費用を最小にする
- 故障の少ない設計にする

も考慮する。現在考えられている X-band の場合のシナリオは以下のようなものである[6]。(数値は重心系エネルギー 500GeV の場合、[] 内は 1TeV の場合。図 3 および図 4 を参照。)

1. バンチ内粒子数 0.75×10^{10} 、トレイン内バンチ数

- 192、バンチ間隔 1.4 ns (42cm) 繰返し周波数 150 [100] Hz
2. このビーム構造の電子を(途中の損失をいくらか考慮して)電子銃で作り、2GeVまで加速してダンピングリングに入れ、エミッタンス $3 \times 10^{-6} \text{ rad m}$ (水平)・ $2 \times 10^{-8} \text{ rad m}$ (鉛直)のビームにする。
3. 陽電子は、10GeV線形加速器で加速した別の電子を標的に当てて発生させ、別のダンピングリングで同じエミッタンスのビームにする。
4. どちらのバンチもダンピングリング出口では長さ 5mm程度である。これを、第1バンチ圧縮器(BC1)により 0.5mmに圧縮し、Pre-linacで10GeVまで加速する。
5. 第2バンチ圧縮器(BC2)でバンチ長を 0.11mm (110 μm) に縮小する。
6. 主線形加速器で 250 [500] GeVまで加速する。加速勾配は 50 ~ 60 MeV/m。線形加速器一本の長さは 6.3 [12.9] km前後。加速中のビームサイズは水平方向 10 ~ 20 μm 、鉛直方向 1 ~ 2 μm 。
7. コリメータ・最終収束系 (FFS) を通して小さく絞り、電子・陽電子を衝突させる。衝突点でのビームの大きさは、水平方向 0.24 [0.22] μm 、鉛直方向 0.003 [0.002] μm 、長さ 100 μm 程度(いずれも標準偏差)、ビームシュトラールンクによって失うエネルギーは約 4%。
8. ルミノシティは約 $2.5 [2.5] \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。

主線形加速器はJLC全施設の中でもっとも巨大な

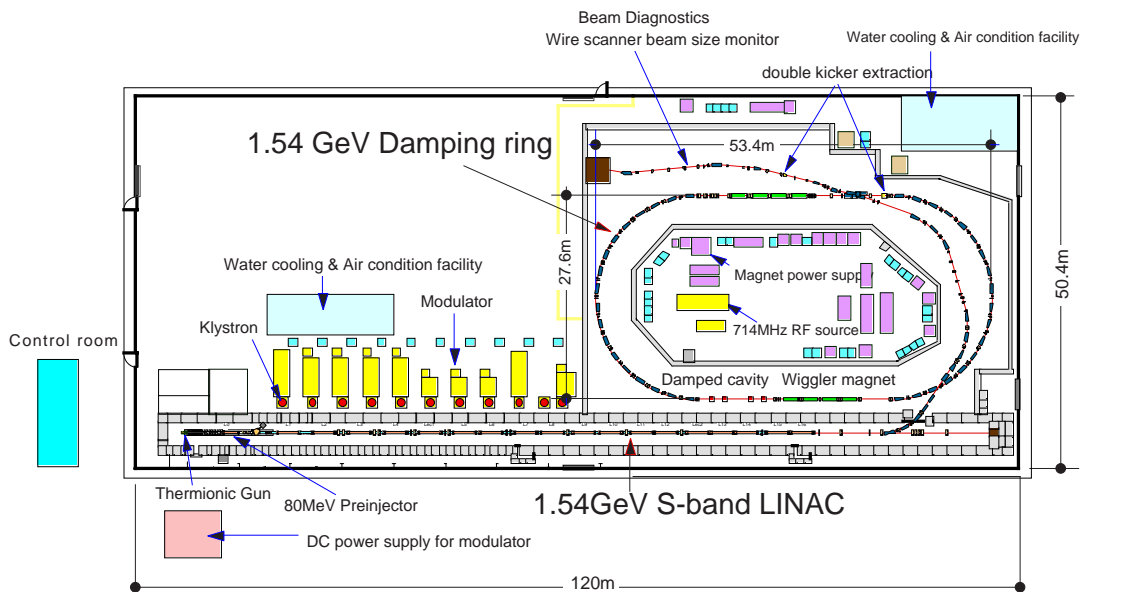


図 5 : KEK の試験加速器 ATF の配置図。

ものである。これは次のような装置から構成されている。まず、通常の商用電力(重心系 500 GeV 用には約 120MW が必要)をモジュレータで電圧 500kV のパルスにし、クライストロンによってピーク電力 75MW、長さ 1.59 μ s のマイクロ波パルスに変換する。8 本のクライストロンの出力を合成し、後に述べる DLDS システムにより、ピーク電力 600MW、長さ 0.4 μ s のマイクロ波に加工する。これを長さ 0.9m の加速管 24 本に分配する。これによって 75MeV/m の加速勾配が実現する。ビームを通すとビームの持ち去る電力のために、この勾配は 50 ~ 60 MV/m まで下がる。

衝突点での鉛直方向のサイズが水平方向より圧倒的に小さいのは、ビームシュトラールクを緩和するためであり、このため、線形加速器の鉛直方向設置許容誤差は非常に小さい。加速管の設置許容誤差は約 15 μ m、その間に置かれる収束用の 4 極磁石の許容誤差は約 2 μ m である。これらは技術的限界に近いが、可能と考えられている。

5. ATF (試験加速器): ビーム源、入射器、ダンピングリングに関する研究

KEK では ATF (Accelerator Test Facility - 試験加速器、図 5) を 1993 年から建設し[7]、そこを主な拠点としてリニアコライダーで必要になる電子源、入射加速器 (S-バンド線形加速器)、ダンピングリングなどについて精力的に研究を続けてきた。ATF は当初 KEK を中心とする日本国内の研究機関主体の計画として出発したが、米国 SLAC、LBNL、ロシア BINP Protvino、韓国 Postech、中国 IHEP、欧州 CERN などの国際協力体勢も整備して今日に至っている。加速器システムとしての ATF は、マルチバンチビームを生成可能な電子源、1.54 GeV の S-バンド線形加速器、1.54 GeV ダンピングリングなどで構成されている。

5.1. ビーム源

マルチバンチ・ビームを生成できる電子源の比較的標準的なものとして、熱陰極電子銃とサブハーモニックバンチャーの開発が進められてきた。ATF では 1994 年にその試運転と 80 MeV 加速後のビーム診断に成功している。このシステムで必要とされることは、電子銃のグリッドを制御するためのパルサーである。ここでは、立ち上がり、および立ち下がりが 0.5 ns 以下で、かつピーク電圧が数 100V のマルチパルサーが要求される。また各パルスの電圧安定度が

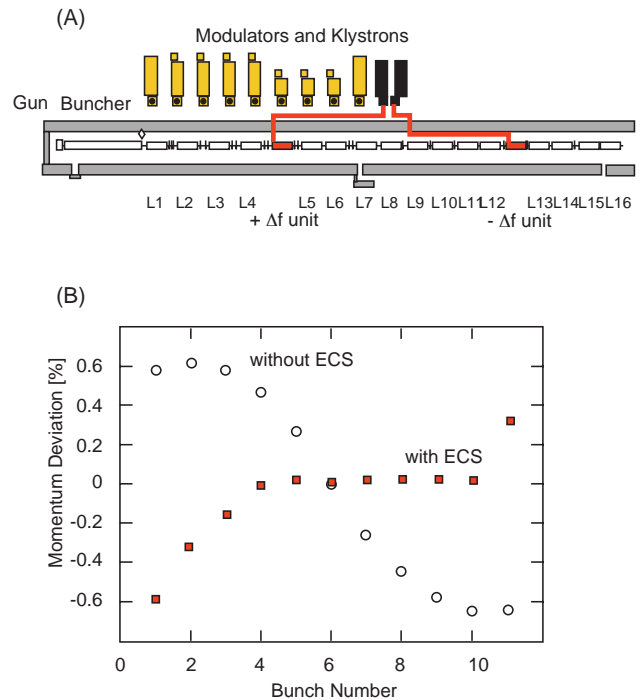


図6: ATF でのマルチバンチ・ビームローディング (ECS) 補償実験。(A): 二つの加速管に +/- 4MHz だけ周波数の異なる高周波電力を導入する。(B): ECS 運転を行った方がバンチ 4 から 11 にかけて間のエネルギー差異が小さくなっている。

0.5% 以下でなければならないし、各パルス間の間隔は 2.8ns であるのでかなり技術的に難しいが、これまでにこのマルチパルサーはほぼ実現したと言える。

バンチャー系を使用しない方式として、光陰極を用いた RF 電子銃がある。まず、RF 空洞の一方に光陰極を用いて、2.856GHz、7MW 以上の RF を入力すると、空洞内に 100MV/m 程度の交番電場が作られる。次に、電子が加速できる位相に合わせて、モードロックレーザーからの光パルス(数ピコ秒幅でパルス間隔は 2.8ns) を光陰極に照射すると、電子のマルチバンチが得られる。1992 年には RF 電子銃単体の試験で 175 バンチからなる電子ビームの生成観測に成功している。ATF ではまた、この夏(2001 年)に RF 電子銃を線形加速器に接続して単バンチビームの生成試験を行ない、リングへのビーム輸送効率がほぼ 100%であることを確認した。現在、RF 電子銃の主な課題は、光陰極の寿命をいかにして伸ばすかにある。

5.2. 入射加速器系

この方面の各種研究も ATF で行われている。一般にマルチバンチビームを加速する線形加速器において

は、ビームローディング効果によって後続バンチになるに従って加速電界が減少する。そのためこのままでは20バンチのうちに最大1.5%のエネルギーの拡がりが発生する。その解決策を一般にビームローディング補償と呼んでいるが、ATFではその基礎実証試験を1994年に行い、多バンチ運転時のビームエネルギー広がりを0.3%以内に収めることに成功している。その原理図と結果を図6に示す。

5.3. ダンピングリング

ダンピングリングに入射された電子ビームは放射減衰により水平方向及び垂直方向の規格化エミッタンスが 3.0×10^{-6} rad.m、および 3.0×10^{-8} rad.m以下になるまでリング内を回ったのち取り出される。垂直方向のエミッタンスは $\sim 10^{-11}$ rad.mで、このような超低エミッタンスは種々の補正を行なわない限り得ることができない。たとえすべての電磁石など個別部品を精度よく製作設置することができても、システムとして性能を十分にさせるかはリング全体の調整に依存している。ダンピングリングの最終性能を発揮させるには最先端のビーム診断技術と自動制御技術を駆使することになる。そのために必要な各種技術をATFで開発している。

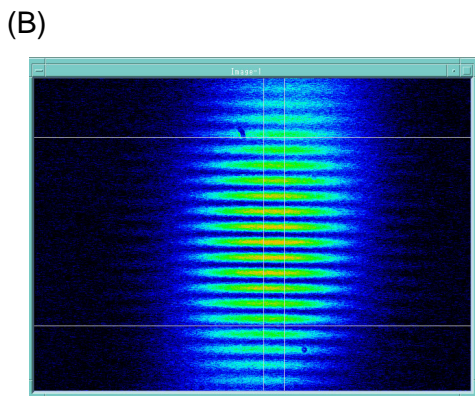
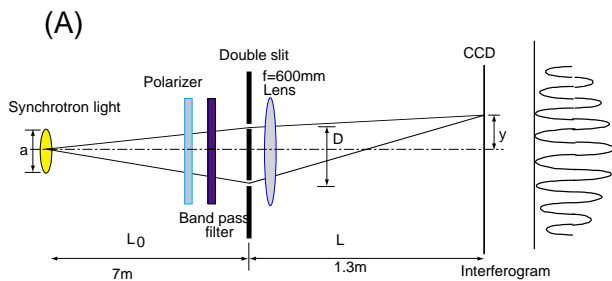


図7:(A) ダンピングリング中のシンクロトロン(SR)放射を用いた干渉計タイプのビームサイズモニターの模式図。干渉縞の濃淡差が大きいほど、もとのビームサイズは小さい。(B)観測された干渉縞の例。

加速空洞周波数ではバンチ間隔およびバンチ長を考慮し、Sバンド周波数の1/4の714MHzを採用した。JLCでの多バンチ運転は、この高周波加速系にも制約を加える。バンチ間の相互作用により、バンチが不安定になり集団振動やビームブレイクアップなどの現象が起こる恐れがあるからである。それを防ぐために、空洞の共鳴高調波に関して外部Q値を100程度に落とす必要がある。そのために高周波単空洞はHOM減衰ポートを4本取り付けられたものになっている。またビームローディングが大きいので一連のバンチ列の取り出しや入射の過程において空洞が電流変化を感じないように、ビーム取り出しと入射点を決めている。

当然ながら、極小エミッタンスのビームを実現する際には、そうしたビームを診断することが出来なければならない。リング中のビームの横方向のサイズを測るには通常シンクロトロン放射をスクリーンに投射する。しかし、ATFのダンピングリングではダンプしたビームは非常に小さく、光学系の回折限界を下回っている。そこで、放射光に平行する二つのスリットを通過させ、その結果作られる干渉縞の濃淡を見ることによって光源(ビーム)の大きさを割り出す新しいタイプのビームモニターを採用した(図7)。こうした新しいアイデアに基づく検出器を使い、また、リングから引き出したビームについてはワイヤスキャン方式(図8)の測定器を使って、ビームサイズを測り、エミッタンスを算出している。この結果、単バンチ運転において、横方向エミッタンスで目標値を達成したことを2000年度末に確認した。ビームの横方向規格化エミッタンスについて、ATFで達成された値を世界中の各グループで現在開発中のLCでの要求仕様と共に、図9に示す。

ダンピングリングのもう一つの課題は、達成されたエミッタンスを損なわないように安定したバンチ取

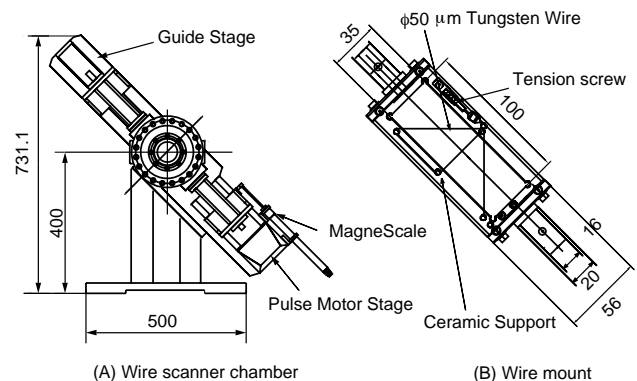


図8: ワイヤスキャン方式によるビームサイズモニタ。ダンピングリングから引き出したビームに適用する。

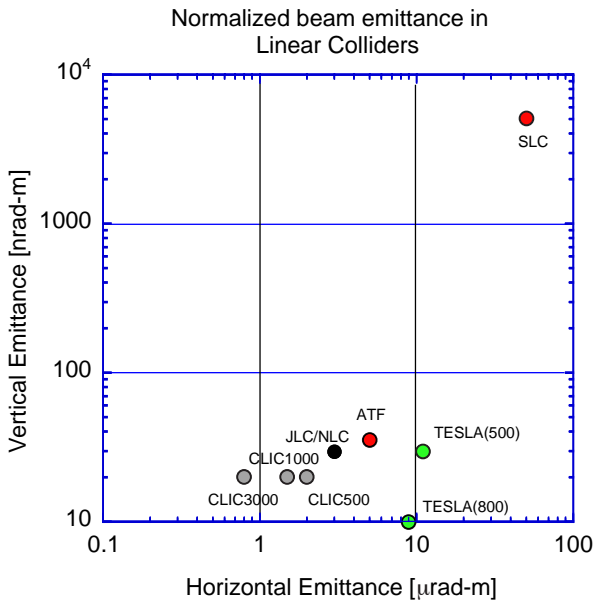


図9: ATF で達成された横方向規格化エミッタンスの値(X-方向とY-方向の値を2次元プロットの示した) 現在世界の各グループで開発中の LC での要求値も同時に示す。

り出しを行うことである。ビーム軌道の不安定性の主要原因である取り出しキッカーのパルス波形におけるジッターを十分に抑えることは大変難しい。そこで、水平方向のベータatron振動の半波長を隔てて同時に励磁する2台のキッカー磁石を使い、ジッター分を相殺する方式が考案された。この研究開発のために、取り出し装置としてキッカー磁石を2台と電源1台を製

作した。このキッカー磁石の発生磁場は、立ち上がりおよび立ち下がり時間60 ns 以下、フラットトップ時間約60 ns で、5 mrad 程度の偏向力をビームに与えることができる。

ATF からの電子ビームが設計仕様を十分満たすものになると水平方向に10 μ m、鉛直方向1 μ m 以下にビームを絞ることが可能になる。この電子ビームを利用してレーザーコンプトン散乱による準単色ガンマ線生成の実験が可能となるので、その開発が大学などとの共同実験として進められている。

5.4 その他

ATF では様々なビーム診断装置の開発が進められている。最近ではダンピングリングにレーザーワイヤビームサイズ測定装置を設置した。レーザー逆コンプトン散乱で発生するガンマ線強度をレーザーワイヤの位置をミクロンステップで動かして測定することにより、10ミクロン程度の垂直ビームサイズ測定に成功した。これにより、リング内ビームの垂直エミッタンスが10⁻¹¹ rad m 程度であることを確認している。

2.8 ns 間隔でのバンチトレイン内の各バンチの位置やビームサイズ測定技術開発は、今年度の最も重要な課題になっている。ここで述べられたすべての研究開発は、十数名以上の大学院生の教育を兼ねながら国際協力で進められている。研究成果、活動状況、運転記

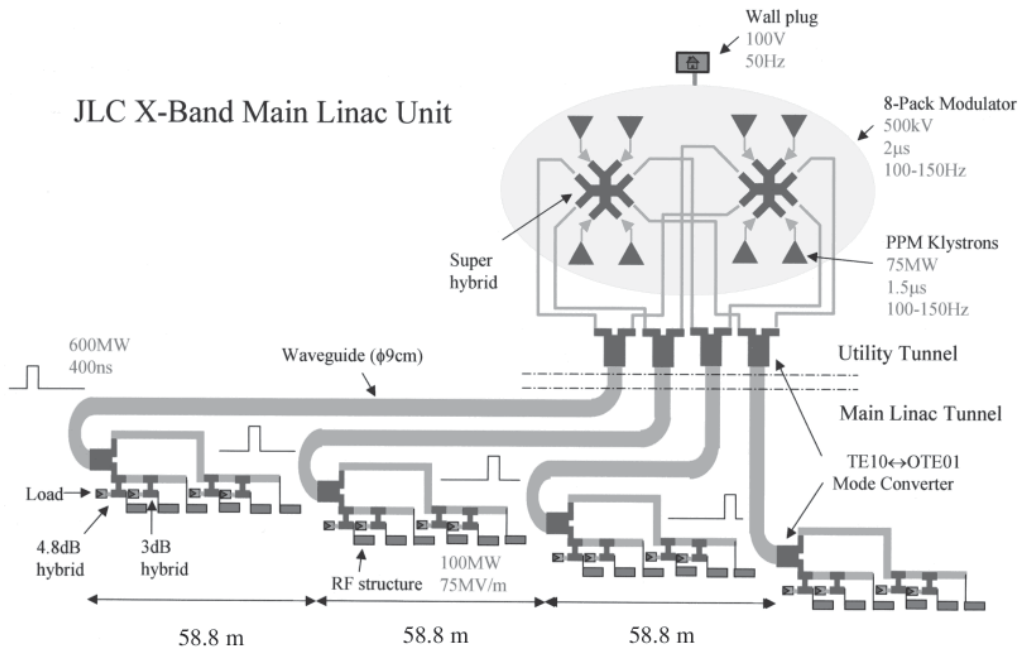


図10: XバンドRF系の基本構成図。図中、ビームは左から右に向かって進行する。このビームの到着タイミングに合わせて該当する加速管内に加速電界を生成するよう、クライストロンからのRF電力を導波管を通して供給するのである。

録などは web サイト[8]にて一般公開している。

6. X-バンド技術開発

現在考えているXバンドRF電力発生源の基本概念は図4で紹介したが、さらに図10に個別部品の実装状況を示す[9]。

6.1. PPMクライストロン

重心系エネルギーで1TeVをJLC計画で実現するには出力電力75MW、パルス長1.5 μ s、繰り返し100Hzのクライストロンが線形加速器当たり約3300本必要である。広く一般に使用されているソレノイド収束型のクライストロンでは電磁石に消費される電力がクライストロンからの平均出力電力とほぼ同程度になってしまうためにエネルギー交換効率が損なわれる。そこで、KEKでは東芝と共同で平成11年度から2年間計画で永久磁石を収束系に使用したPPM (Periodic Permanent Magnet)クライストロンの開発を行ってきた[10, 11]。

計画ではまず1号機で50MWの出力と50%以上の



図11: PPM 収束方式による X-バンドクライストロン1号機(右側)と2号機(左側)

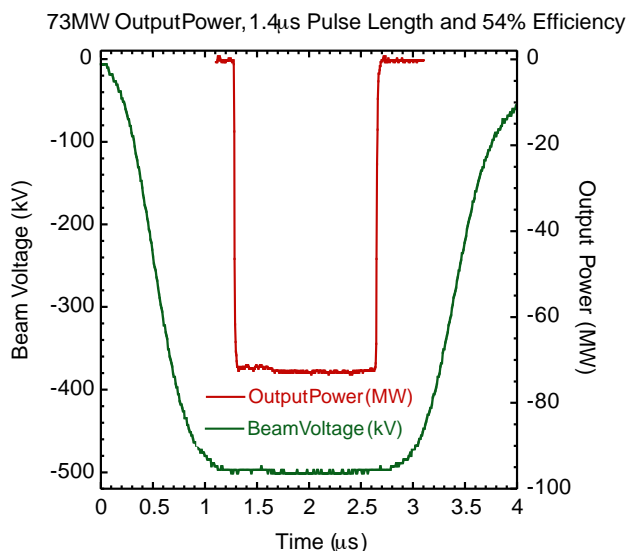


図12: PPM 収束方式による X-バンドクライストロンの試験波形。コレクタ電流と出力電力を示す。

効率をパルス長1.5 μ sで実現し、その後2号機で出力75MW、効率55%のJLC仕様を達成することを目標とした。これらは日本では初めて製作された大電力PPMクライストロンだったので、特に磁気回路の設計や製作技術の習得が開発の最重要課題であった。それらは住友特殊金属と磁気回路の試作品をいくつか製作したり、神津精機で磁場測定装置を製作するなどの過程で少しずつ解決されていった。また、高調波モードの発振を抑えるために、管のチューブや空洞のほとんどはステンレスなどの表面抵抗の大きい材料を使用している。これら異種金属間のろう付け技術も東芝といくつかの実験を行うことでマスターされてきた。永久磁石収束は初めての試みだったので、東芝では初めてコレクターをクライストロンの主胴体から分離し、コレクターに到達するビーム量を測定できるようにした。

図11にPPMクライストロン1号機(右側)と2号機(左側)の写真を示す。PPMクライストロン1号機は平成12年初夏から試験が始まり、56MWの出力電力を50%の効率と1.5 μ sのパルス長で実現し、目標を達成した。ビーム透過率もほぼ100%であり、磁気回路設計の正しさが証明された。高調波モードの発振もまったく観測されなかった。2号機は平成12年春から現在まで試験中であり、最大で75.1MWの出力電力と56%の効率をマークしている。長パルス試験では73.2MWの出力電力と54%の効率を1.4 μ sのパルス長で達成した。図12にその時のパルス波形を示す。現在はもっと高い電力と長いパルス長に向けて試験を行

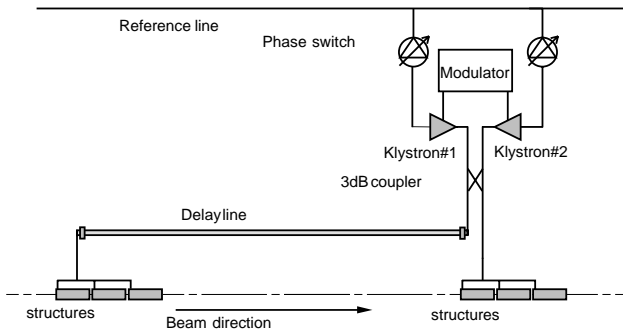


図 13 : DLDS による RF 電力分配の原理図。

いつつある。この2年計画の成功をもとに、さらに改良を加えた3号機を現在試験中である。

6.2. DLDS パルス分配システム

クライストロンから発生するRF電力のパルス長は加速管に電力を満たしビームを加速に必要な量より数倍長いのが一般的である。したがってパルスの全部の部分を有効に利用するためには、なんらかの時間的「圧縮」を行い、パルスは必要な長さに縮められるが電力は数倍に増大する工夫をする必要がある。その代表的なパルス圧縮装置がSLEDと呼ばれるものであるが、これはパルスの前半部分を遅延回路に入れ、それをパルスの後半部分と掛け合わせことでパルス圧縮を行う。しかし、この方法では圧縮効率が70%に止まり、JLCで必要とされる85%の効率は実現できない。

そこで、8本のPPMクライストロンからの出力を合成してできた600MWのパルス電力を4つのRF加速管群に分配する装置として、KEKではDLDS (Delay Line Distribution System) パルス分配システムを開発している[11]。このシステムを理解するために最も簡単な2本のクライストロンの出力を3dB方向性結合器で掛け合わせて2つのRF加速管に電力を供給する場合を考えることにする(図13参照)。

3dB方向性結合器からの一方の出力ポートは遅延回路となる口径の大きい円形導波管を通して線形加速器の遙か上流(パルス長の半分に光速を掛けた距離)にある加速管に繋がっている。別の出力ポートはそのまま3dB方向性結合器のすぐ近くにある加速管と繋がっている。さて3dB方向性結合器で合成されたRFパルスの時系列で最初の半分は長い円形導波管を通して上流の加速管に送ってやる。そのタイミングはこのRFパルスがちょうど加速管を満たしたところでビームが加速管を通過するように調整しておく。3dB方向性



図 14 : DLDS の低電力試験装置と、実験に参加した内外研究者。

結合器で合成されたRFパルスの残りの半分はすぐ近くの加速管に電力を供給する。すると、それが加速管をいっぱい満たしたところで先程加速されたビームがこの加速管を通過することになり、再び加速される。こうすることでクライストロンから出力されたパルス電力のすべての部分を有効にビームの加速に使用することができる。RFパルスが遅延回路である円形導波管に滞在する時間はSLEDの半分なので、遅延回路での電力損失も半分に減ることになる。

実際に導管内でどの伝搬モードを採択するかを決める実験は、SLACとロシアのBINP研究所と共同で平成11-12年にATFの線形加速器用トンネルを利用して行なった。円形導波管の製作は日立電線が、フランジの加工と装着は石川島播磨が行なった。図14はその時の様子を示した写真である。伝送損失、システム構築の容易さなどを総合的に判断のうえ、現在は

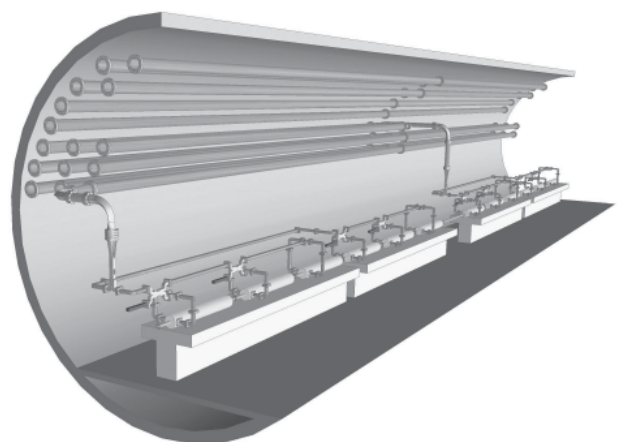


図 15 : 主線形加速器内の、X-バンド DLDS 導波管群(天井付近)と加速管群(床上の架台に設置)の実装状況予測図。

1 DLDS あたり 4 本の導波管を使用するシングルモード DLDS と呼ぶ方法を主に開発している。図 15 に、主線形加速器トンネル内での実装状況予測図を示す。DLDS 導波管は天井近く、加速管群は床上の架台に設置されている。

6.3. IGBT 半導体モジュレーター

JLC 計画で使用されるクライストロン電源には高信頼化、高効率化、低価格化が要求されている。スイッチングデバイスとして一般に使用されているサイラトロンは約 1 万時間の寿命しかなく、これでは約 1 年半ですべてのモジュレーターのサイラトロンは交換しなければならず、実際的ではない。そこで、KEK では以上の要求を満たす半導体スイッチングモジュールを使用した新方式のモジュレーターを、企業と共同開発している[11]。この電源はモジュール化した小電力のパルス電源(半導体スイッチングモジュール)を多数接続し、各モジュール電源のスイッチを直接オン、オフしてパルスを作り、それらを電圧加算合成することによって大電力パルスを発生する方式を取っている。

この方式は従来のラインタイプの電源に比べて小型化、高信頼性が得られるだけでなく、半導体スイッチングモジュールの位相を任意に制御することで好きな波形を作ることができるなどの利点がある。また、モジュール化の採用により、量産化が容易で将来の低価格化が可能である。

現在開発中の JLC 用モジュレーターの概観図を図 16 に示す。ここでは線形誘導タイプ (Linear Induction Type) と呼ばれる回路形式を採用している。IGBT

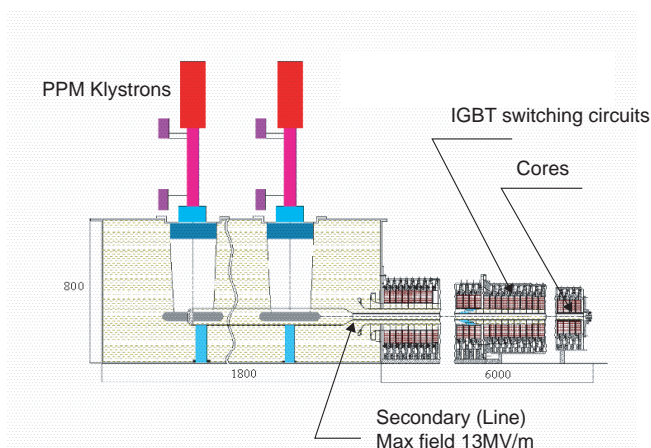


図16:IGBT スイッチ素子によるクライストロンモジュレーター回路の概観図。

スイッチで開閉される一次回路を多数並列に設置し、これらが共同でドライブする二次回路(1-ターン回路である)に発生する高電圧パルスで、4本ないし最大8本のクライストロンを駆動する。IGBT 保護など回路設計の詳細検討、絶縁能力の確認などを経て2002年度中にプロトタイプ試験を行っていく予定である。

6.4. 加速管

リニアコライダーの主線型加速器に用いる X バンド加速管開発の重要なポイントには、

1. ビームが発生させる高次モードにより後続ビームの性質を悪化させないこと、
2. 高い加速電界を実現すること、

の二つが挙げられる[2, 6]。

第一の要件、「ビームが誘起する高次モード(HOM)による電磁場(ウェーク場とも呼んでいる)の発生を低減する」については、単一バンチ中で問題になる短距離ウェーク場と多バンチ間に働く長距離ウェーク場の両方を考慮しなければならない。KEK では米国 SLAC との共同研究のもとに、高調波を離調しかつ積極的に減衰もさせる、Damped-Detuned 型(減衰-離調型) X-バンド加速管の開発を進めてきた。図 17 に Damped-Detuned 型加速管の一部 cut-away 図を示す。このように加速管を構成するセル(一つ一つの加速空洞)において、まず加速モードに対応する共鳴周波数をすべて X-バンドの標準周波数 11.424 GHz に合わせる一方、第一高調波(約 15 GHz である)の共鳴周波数はセル番号に従って変化するようにアレンジする(離調)。こうすることで、高調波が加速管全体において強い共鳴状態を持たないようにする。同時に、高調波エネルギーを加速セル部分から「スロット」を介して積極的に吸い出し、吸収体に捨てるようにする(減衰)。

これらを実現するためには、各セルで基本波、高調波とも 1 MHz のオーダーで制御する必要がある。これに対応して過去数年にわたり SLAC で高精度な3次元計算コードが、KEK 周りではダイヤモンド工具を用いた超精密加工による銅ディスクの製作(切削精度は 1 μm のオーダー、表面粗度は約 50 nm)と拡散接合を用いた加速管の組立技術が開発された(図 18 を参照)。これまでのところ、何回かのビーム試験を経てウェーク場の減衰については十分 JLC の要求仕様

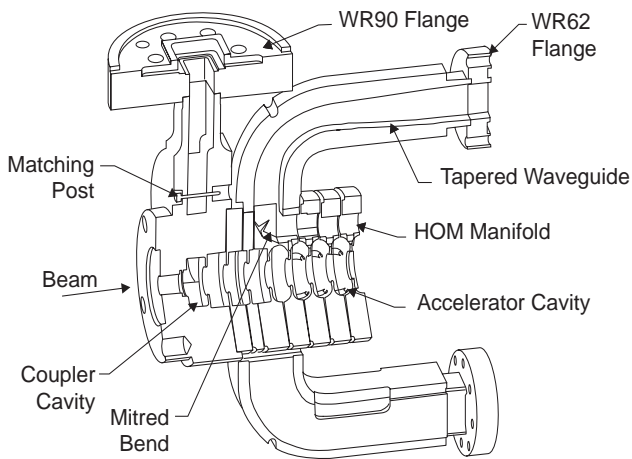


図17: KEK / SLAC で共同開発した加速管の上流部分の模式図(一部断面を見せている)。入力コプラー、HOM 出力ポートなどが見える。

を満たす加速管を作ることができることを実証している(図190参照)

加速電界に関しては、ビームローディングなしの状態では75 MV/m程度の軸上加速電界を発生することが目標である。この場合多バンチ加速運転時には、実効加速勾配55 MV/mとなり、これは従来の典型的なS-バンド線形加速器での加速勾配の約3倍に対応する。こうした設計概念の根拠には、1990年代初めから半ばにかけての短尺加速管(20 - 30 cm程度)の試験において100 MV/mの加速勾配を実現できたことが挙げられる。

しかしながら、2000年初めになって大加速勾配運転時の放電による加速管内壁面の損傷が無視できないことが明らかになってきた[12]。これはX-バンドの大

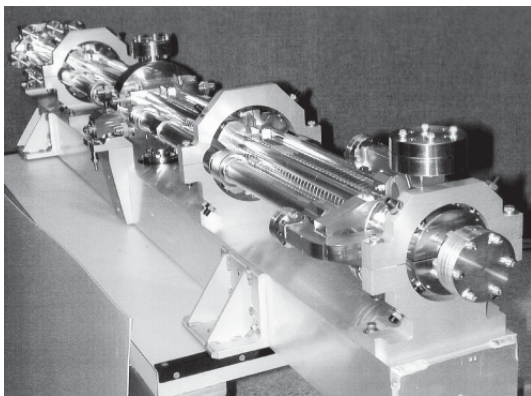


図18: 1999-2000年にかけてKEK-SLAC共同開発で製作したXバンド加速管試作機。長さ1.8m。

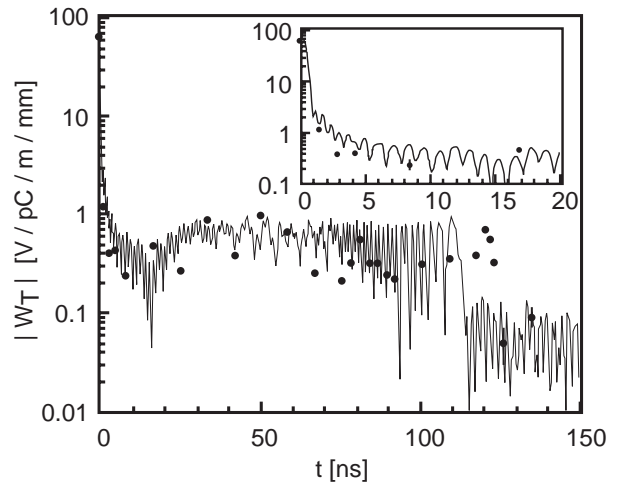


図19: KEK / SLAC で共同開発した加速管のビーム試験結果。SLAC ASSET 装置での実験による。横方向ウェーク場強度の実測値を、先行バンチ通過後の時間の関数として示している。黒丸: 測定値, 実線: 計算。ウェーク場減衰の目標は、「1 V/pC/m/mm 以下」である。

電力 RF 源がほぼ安定に動作するようになり、加速管長期運転の自動化が進んで始めて体系的な研究が行われるようになったことの一つの帰結でもある(最近の試験はSLACのNLCTA施設で繰り返し60 Hz、パルス長100 ~ 240nsの条件で行われている)。問題の兆候は、軸上勾配50 - 70 MV/mで1000時間程度の試験運転を行ううちに、放電によって加速管内表面に無視できない程度損傷が発生する、というものである。その結果、加速セルの共鳴周波数が徐々にずれていき、長期間での安定運転を保証することはこのままでは難しいと思われる。

そこで、KEK JLC 加速器チームとしてはKEK内外の研究者との共同研究の輪を広めると同時に、国際ワークショップ[13]をSLACと共催するなどして情報収集と研究戦略の構築に努めてきた。検討項目には以下のような諸点が挙げられる[14]:

- 放電を起こし難い、もしくは放電箇所へのエネルギー集中投下の度合いの小さい加速管電気設計、
- 銅表面の洗浄技術の改善、
- 大電力エージングのアルゴリズムの改善。

とくに放電箇所でのエネルギー投下率の問題は早い時点で指摘され、管内群速度 V_g への依存性が注目された。これは、放電エネルギーの投下率は V_g の二乗に比例する、という等価回路分析に依る。この結果、従

7. C-band 技術開発

7.1. Cバンド技術開発：第1期から第2期へ

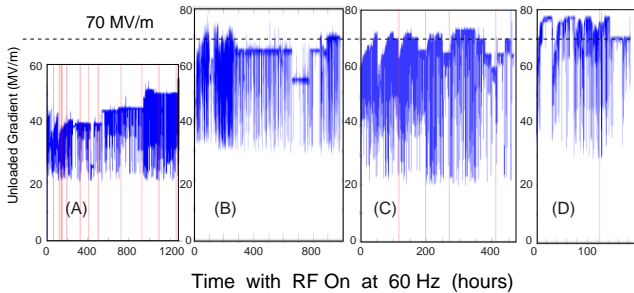


図20: KEK / SLAC で共同開発した加速管の高電界試験結果の例。SLAC NLCTA 施設での実験による。横軸は60 Hz 繰り返し相当で測った運転時間。縦軸は達成された軸上加速電界。4通りの試作加速管のデータを示す：(A) $Vg/c = 12\%$ 、1.8 m 管、1200 時間、(B) $Vg/c = 5\%$ 、0.5 m 管、1000 時間、(C) $Vg/c = 5\%$ 、1 m 管、450 時間、(D) $Vg/c = 3\%$ 、0.5 m 管、200 時間。

来の $\langle Vg/c \rangle \sim 0.12$ ではなく、 $\langle Vg/c \rangle \sim 0.05$ ないし 0.03 の加速管が日米で複数個試作され、2000 - 2001 年の間に精力的に試験されている。図20 に試験加速管の高電界運転履歴の一部を示す。とくに最近の $\langle Vg/c \rangle \sim 0.03$ 管は優れた試験成績をあげている (図20 (D))。

なお、図20(D) の例では、放電箇所はカプラー付近に集中していることが知られている。カプラー近傍の電気設計にまだ改善の余地があるものと推測される。さらに、加速勾配の許容最大値を上げるためには、銅表面の浄化処理が重要な役割を果たすと考えられており、埼玉大電気電子システム工学科グループ、KEK 超電導グループなどとの共同研究も進められている。総じて、Xバンド加速管の高電界問題は原理的には十分解決可能なもの、というのが担当グループの認識であるが、完全な技術解の確立とその実験的検証には少なくとも2年程度の時間が必要と考えられている。Cバンド加速管についても類似の問題が発生しうる。Cバンドの場合には目標とする加速勾配が 40 MV/m とやや低いので、問題の程度が軽い可能性は高いが、後述のSCSS に向けた開発の途上で実証的なデータの蓄積が進むことが強く期待される。

Cバンドグループは1996年春よりR&Dを開始し、一昨年(2000年春)までにシステムに必要な構成要素のうち、パルスコンプレッサーの大電力モデルを除くすべての部分の開発を終了した[15]。これらを表2にまとめた。表の中で、第1期と第2期とに分けて書いているが、その位置づけは以下の通りである。

- 第1期：1996～1999年度、各コンポーネントの開発、基本性能の確認、クライストロンの寿命試験。
- 第2期：2000年～ 低コスト化、量産化に関わるR&D、および1 GeV 程度の試験加速器による総合試験。

今後とりわけ重要なのは、SPring-8 敷地に建設するSASE-FEL のための線形加速器にCバンド技術を適用する計画と、その活動を通してCバンドの実装技術の成熟を目指すことである。これらについては後に詳述する。

7.2. 第1期技術開発のまとめ


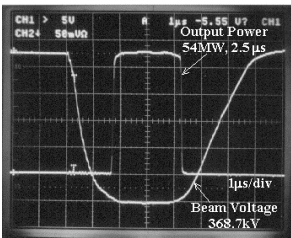

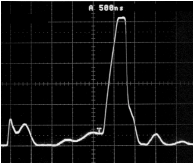
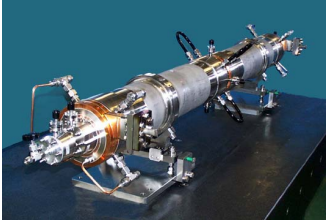

1996 から 1999 年度にかけて、Cバンド加速器を構成する構成要素の開発を行った。以下にその概要を解説する。web サイト[16] にさらに詳しい解説および過去の公刊論文が掲載されているので、そちらも参照していただきたい。

クライストロン

1996 年よりCバンド・クライストロンの開発を継続的に開発している。東芝(株)との協力を中軸に据えている点はXバンドと同様である。これまでにソレノイド収束の50MW出力クラス・Cバンドクライストロンは3本製造し、いずれも所定の性能を満足し完成の域にある。これはカタログ品として購入可能である。

現在は、システムの簡素化とコストの低減のために、周期永久磁石収束のクライストロン (PPM Klystron) の開発も行っている。2000 年度に開発製造した C-band PPM-Klystron は RF 出力 37 MW を達成した。若干の寄生発振が見られたが、電子銃から出たビームを 99% 以上の透過率でコレクターに輸送でき

表 2 : C バンド R&D 第 1 期の成果と第 2 期の課題

項 目 (500-GeV 向け開発)	第 1 期 R&D の成果 (1996~1999)	第 2 期 R&D の課題 (SCSS 計画と併用)
クライストロン 	No.1,2,3 号機 すべて 50 MW 出力達成、 パルス幅 2.5 μ sec 、 50 pps。 3 号機、効率 47% を達成 収束磁石電力 4.6 kW 寿命試験 2 号機 5000 時間超。 現在 3 号機、寿命試験中。 PPM Klystron1 号機は出力 37 MW。寄生発振を伴って いるため対策中。	量産化、低価格化  50 MW 出力波形 (E3746 No.3) PPM Klystron No.2、2002 年開発予定。
クライストロン電源 	Smart Modulator 1 号機クライストロンの 寿命試験に連続使用中、 電力効率 52.4%、350 kV、 2.5 μ sec 幅の高電圧パルス を安定に供給。	Smart Modulator 2 号機 <ul style="list-style-type: none"> ・インバータ電源の国産化 ・密閉型設計 (全油中絶縁、冷却) ・コストの低減 ・電力効率を 60% 以上に ・固体スイッチ開発は人員、資金不足 により当面、見送り
RF パルス・コンプレッサ 	コールドモデル試験結果 ゲイン 3.25、効率 65% High Power 試験は 2001 年に実施予定。	安定化技術、運転技術開発 <ul style="list-style-type: none"> ・クライストロン位相変調による、 立ち上がり部の利用方式を確立 ・低熱膨張材 (インバー) による 空洞周波数の安定化技術開発中
加 速 管 	チョークモード型加速管 特性試験を SLAC にて 行い、所定の減衰特性を 確認。 大電力試験は 2002 年に 実施予定。	量産化に向けて設計詳細の見直し <ul style="list-style-type: none"> ・Wake-field の最適化 ・セル加工工程の見直し (低価格化) ・製造のスピードアップ
アラインメント技術  RF-BPM	HOM-Free 型 RF-BPM 分解能 < 1 μ m 原点精度 < 10 μ m を達成。	Q-BPM, Structure BPM, Undulator BPM, と して SCSS に実装 <ul style="list-style-type: none"> ・量産化、信号処理回路の低価格化 ・マルチバンチ化

る PPM 収束系が設計できていることや、PPM スタックの製造方法としてHIP (Hot Isotatic Pressing)を使用して熱膨張率の異なる磁性 SUS の磁極と無酸素銅との積層構造を製造する技術を確立できたことが重要である[17]

寄生発振の原因は、ビームコレクターからの反射電子がドリフトチューブを逆走して信号を帰還させているためであることが分かっており[18]、逆送電子を押さえる磁場の最適化を行い2号機を設計中である。

クライストロン用モジュレータ電源

1997年にインバータ充電方式を国内でいち早く取り入れたクライストロン・モジュレータ電源(Smart Modulator 1号機)の開発に成功した。これによりモジュレータが小型化、簡素化された。

現在、さらに小型化した密閉型モジュレータを開発中である。これはPFN、サイラトロン、保護回路を一つの油タンクに収めた設計となっている(図21)[19]。

RFパルスコンプレッサー

Cバンドでは3連結空洞をエネルギー貯蔵に用いた独自のパルスコンプレッサーを提案しており、1996年にコールドモデル試験により、マルチバンチ運転に必要な平坦な圧縮出力パルスの生成に成功した。その後、予算不足のため大電力試験が先送りとなってきた。現在、低熱膨張率を有するスーパーインバー材料を用いたRF空洞を開発中であり、これを用いて2002年に大電力試験を行う予定である[20]。

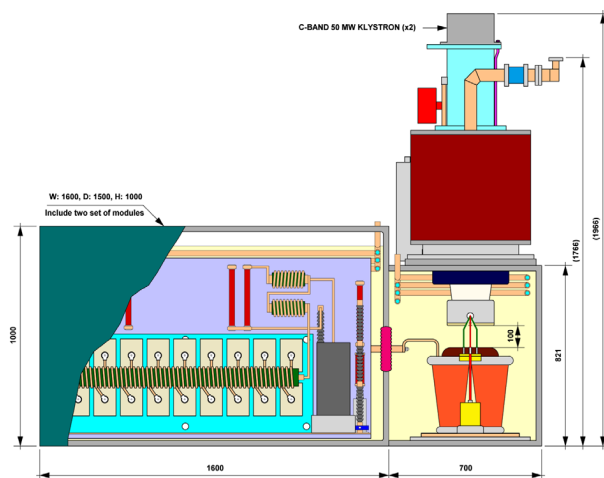


図21：密閉型クライストロンモジュレータ。

加速管

我々はCバンド加速管1号機を1998年に開発し、SLAC-ASSET施設にてビームを用いwake-fieldの測定を行い、choke-mode cavityがHOMを設計概念どおりに減衰させていることを確認した。Cバンド加速管の大電力試験は、SCSS計画の一環として2002年にSPring-8内にて行う予定である。

7.3. 第2期技術開発とSCSS計画

実機のリニアコライダーは全長が30kmにも及ぶために、その事前準備に必要なマシンの実証試験には、その規模で1/10スケール程度の試験加速器を建設して総合運転をするのが妥当と考えられる。しかし、その場合には500 GeVの実機に対して、試験加速器でも50 GeVという規模となり試験器建設のための予算獲得は容易ではない。そこで最低でも1 GeV程度の試験加速器を建設してビーム試験を行いながら、平行してコンポーネントの信頼性向上とコスト低減のためのR&Dを強力に推進するという方針が現実的と思われる。

2000年の春にこうした1 GeVのC-バンド試験加速器を提案した同時期に、理化学研究所、播磨研究所(SPring-8)よりCバンド加速器をSASE-FELに適用することへの打診があった[21]。検討の結果、

1. Cバンド加速器がSASE-FELに必要な低エミッタンスのビームを安定に加速可能であること、
2. アンジュレータを含めた装置全体を70m程度の建屋に収めることが可能であること、
3. Soft X-rayまでの波長をカバーできること(周期長15mmの真空封止型アンジュレータ、ビームエネルギー1 GeVにより、波長3.6 nmのSoft-X-rayが得られる)

ということが分かり、この方向での計画立案を早速開始した。これはKEKのCバンドグループが開発した高電界のCバンド加速器と、理化学研究所グループが開発した短周期の真空封止型アンジュレータとを組み合わせ、真空紫外から軟X線に及ぶ領域のFELを比較的小規模の加速器で実現するものである。最終的にビームエネルギー1 GeV、発振波長3.6 nmを目指す。

2001年4月には、このSCSS計画の予算が全5ヵ年計画でSPring-8の既存建屋に建設するものとして正式

SPring-8 Compact SASE Source

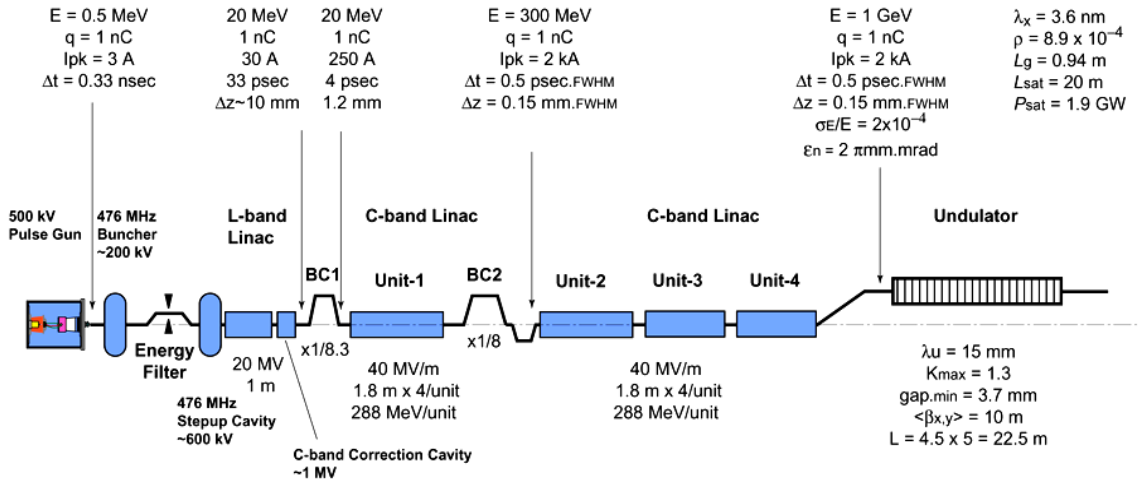


図 22 : SCSS 計画のビームライン模式図。

に承認された(プロジェクト名称「SCSS」はSPring-8 Compact SASE Source の略である)。これまでに KEK と SPring-8 との間でこれを含む研究協力の覚え書きが取り交わされ、これに基づいて KEK から Cバンド開発担当者[22]が併任職として理研播磨研究所および SPring-8 に出向き本格的な開発設計を開始している。この加速器によって、真空紫外から軟 X 線までの広い範囲の強力なレーザー光を発生可能であり、ユーザー利用のために開放される予定である。図 22 に SCSS のビームラインを示す [23]。C バンド加速器では、単バンチに対して 40MV/m という非常に高い加速電場が得られるため、Cバンド加速ユニット4台(全長30m)で、ビームエネルギー 1 GeV を得ることができる、というメリットがある。

このビームを周期長 15 mm の真空封止型アンジュレータに通すことにより、波長 3.6 nm の単色の放射光がえられ、これが全長 22.5m という非常に長いアンジュレータの中で増幅されて、強力なレーザー光となって下流側へ放射される。SCSS にて予測されるピーク輝度は、図 23 に示すように従来の第 3 世代放射光源にて長尺のアンジュレータから得られる現在最も高い輝度の放射光よりさらに 6 桁以上も高い輝度が得られる。なお、TELA プロジェクトの TTF 試験加速器でも類似の SASE-FEL の試験が行われている。そこでは 2000 年春に 80 nm での発振に成功しており、現在、さらに短波長での発振に必要な改造を行っている。波長が短くなるにつれて、高い電子密度と低エミッタンスが必要とされるため、その実現には高い技

Spectral Peak Brilliance of X-ray Free Electron Lasers

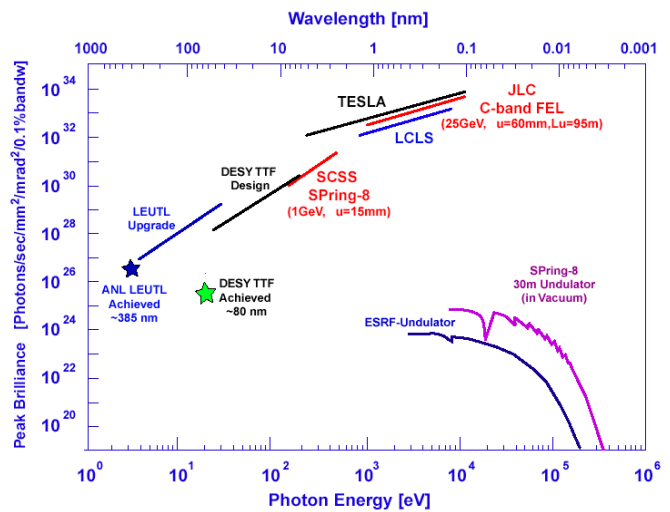


図 23 : SCSS スペクトル輝度。

術レベルが要求される。とくに図 23 の 0.1 ~ 1 nm 領域の LCLS、TESLA そして JLC と示した X 線 FEL の実現に必要な電子ビームを発生する技術はまだ確立していない。ANL の LEUTL、DESY の TTF、そして当方の SCSS は、将来 X 線 FEL を実現するための技術を習得する試験加速器という意味合いが強いが、SCSS では軟 X 線利用も行う予定である。

今回の SASE-FEL に必要となる低エミッタンスビームは 500 kV のパルス高電圧を使用する熱電子銃と、これを短いバンチに集群させるサブハーモニックバンチャー、Lバンド加速管によって発生させる予定である。通常よく使用される光電陰極を用いた RF 電

子銃はこれに用いるレーザー光源の安定性に課題が残るために今回は採用を見送った。将来、極短パルスの安定な固体レーザーが市場で安定に供給されるようになった時点で、光電陰極の採用を再検討する必要がある。

SASE-FEL を十分に飽和モードで運転するためには、アンジュレータの中で非常に高い電子密度を必要とするために、バンチ長を全幅0.15 mmにまで圧縮する。このために2段階の磁場シーケインによるバンチコンプレッサー(BC1、BC2)を使用する。ここで困った問題として、シーケイン磁石の中で電子の軌道が曲がる際に発生する放射光のうち、バンチ長程度の長波長の成分がコヒーレントな干渉効果によって強力な電界を発生し、これが電子軌道を歪めてしまう効果(CSR: Coherent Synchrotron Radiation)がある。そこで、この対策としてBS2ではダブルシーケイン構造を採用している。現在、CSRの正確なシミュレーションを行い、磁石配置の詳細設計を行っている。なおこの種の問題は、当然リニアコライダーにても重要な問題であり、SASE-FELの研究成果が生かされるであろう。マシンの詳細については、論文[23]を参照していただきたい。

前述のように、このSCSS計画を実行することが、リニアコライダー向けに開発してきたCバンド加速器としての重要な実証試験となることが期待される。しかし一方、リニアコライダーの建設で最も大きな問題となることが予想されるハードウェアのコストと信頼性の問題を解決するためには、積極的な要素開発も継続して行わなくてはならない。ここではKEKが引き続き中心的な役割を担うと考えられる。

8. 今後のLC 開発推進と展望

8.1. JLC の開発と推進体制

JLCのための個別の開発要目については、すでに触れた通りである。大きな課題としては、X-バンド開発の観点からはLC実現に向けて技術を確立するためにクライストロン、DLDS、加速管群の一セットを建設し実証運転することが必要と考えられている。同様のシステム検証がC-バンド開発の分野でも行われる必要があり、SCSS建設を通しての成果が期待される。これらを数年間で完成するための総合的な予算、人的資源の調達については、現在KEK部内で方針構築と計画推進体制の再整備が進められているところであ

る。

最近の組織上の進展としては、2001年度から大学からのメンバーを含む「LC推進委員会」が定期的にKEKで開催されていることが挙げられる。ここでは、ATFや主線形加速器の開発に加えて、敷地およびトンネルなど一般設備への要求仕様の検討と整理、体系的なコスト評価、アジア・太平洋領域[24]あるいは世界規模での国際協力のあり方などについての検討が進められている。基本的な目標は、日本の科学技術基本計画[25]、過去の高エネルギー委員会将来計画小委員会の答申、高エネルギー委員会アクションプラン[3]などの精神を踏まえて関係各方面のご理解を得たうえで、2000年代終わりまでに国際協力に基づく素粒子研究センターとしてのJLC施設の建設に着手することである。

中でも、今後2-3年の内にJLCの詳細設計作業を行うための基礎調査費拠出を受けるべくそれに向けた努力を行っていくことは、KEKでのLC推進のなかでも重要な優先事項になっている。このため、JLC建設候補地が満たすべき要件の検討、計算総予算額の見積りなどと並行して、国際協力の在り方に関する検討グループなどの作業が急ピッチで進められている。

開発に参加していただいている企業各社との関わりにおいては、大量生産に向けた生産技術の工業化が非常に重要な研究分野となって行くであろう。生産コストの低減が近未来に最重要の課題となることは疑いの余地がない。ここでは

1. 研究所・大学・企業間のタスクフォースを形成し、
2. コストモデルを関係者で共有する、
3. 諸々の技術情報も共有する、と共に
4. なんらかの競争原理の導入も考える、

などをも視野に入れるべきと思われる。

8.2. LC をめぐる国際情勢

国外の状況と展望についても少し触れておく。 $E_{CM} = 500 \text{ GeV} \sim 1 \text{ TeV}$ の電子・陽電子LCの必要性については世界的なコンセンサスが存在し、LC開発が世界各地で進められていることは第3章で触れたとおりである。これを受けて具体的には、

NLC:SLAC、LBNL、LLNL、FNALを中心とする米国研究所。JLCと同様、常温の銅加速管による主線形加速器[26]。

TESLA: ドイツ DESY を中心とする欧州。超電導空洞による主線形加速器[27]。

CLIC: CERN を中心とする欧州。2- ビーム加速方式 [28]。

の開発が進行中である。技術的難度、膨大な所要予算の両方の観点から、次期 LC は建設するとすればそれは世界に一つだけのものになり、かつその建設・運転については大規模な国際協力が必要不可欠と考えられている。これに照応して、開発のレベルでは米欧グループと日本の JLC グループの間に様々な形の共同研究が進められている。たとえば、ATF に米欧の研究者が頻繁に来訪して実験に参加したり、X-バンド技術の開発に関しては KEK と SLAC の間に基礎技術開発に関する覚え書きが取り交わされて定期的なワークショップが開かれている[6]。X-バンド加速管の開発における KEK-SLAC の協力関係は特に緊密である。C-バンドのモジュレータ開発については韓国 PosTech のメンバーが寄与した。また、この報文では紹介しなかったが、TESLA で開発している超電導空洞の高電界運転開発において、KEK 超電導グループの先端的ノウハウが活かされつつある。更に、LC の開発に携わる加速器関係者が集まる世界規模のワークショップは 1980 年代から 2 年に一回程度の頻度で開かれており、世界の LC 関係の加速器研究者間には長年の研究交流を通してある種の同胞意識ないしファミリー意識が持たれている。

しかしながら、「プロジェクト」(の卵)として見た場合、あるいは実際にどこに LC を建設できることになるか、などの観点から見ると、現時点では世界規模の政治的競争、緊張関係といったものが明らかに存在する。煎じ詰めれば、いま流行の「グローバル化と地域社会の繁栄をどのように釣り合わせるか」の問題を地でいくような状況である。そうした状況を多くの関係者が踏まえてのことと思われるが、最近、米国、ヨーロッパ、アジアのそれぞれの領域で LC 推進のための地域委員会が設置されはじめると同時に、ICFA (International Committee for Future Accelerators) ほかの場で、グローバルな協力体制に関する意見交換の動きが活発になってきている。

こうした中、われわれに求められているのは産業界の方々とともに国際競争に勝ち抜く技術を手中に収める努力を鋭意続けることと同時に、健全な国際バランス感覚も持ち続けることである、とあってよかる

う。特に、各国企業の間での競争原理の導入、知的財産の所有権の尊重や、情報の共有といった課題は、いずれはすぐれて国際的な舞台で解いていかなければならないことになると考えられる。

参考文献

- [1] JLC Group, “JLC-I”, KEK-report-92-16, December, 1992. http://www-jlc.kek.jp/teigen_nado-j.html のリンクから閲覧可能 .
- [2] JLC Study Group, “JLC Design Study”, KEK-report-97-1, April, 1997. <ftp://lcdev.kek.jp/pub/DesignStudy/> より閲覧可能 .
- [3] <http://lcdev.kek.jp/JLC/overview/01.cover.html>, <ftp://ftp.kek.jp/kek/HEPSC/>, http://www-jlc.kek.jp/teigen_nado-j.html で JLC 計のパンフレット, 諸委員会の答申などが閲覧可能 .
- [4] M. Tigner, Nuovo Cimento 37, 1228 (1965) ÅAU. Amaldi, Phys. Lett. 61B, 313 (1976).
- [5] P. Raimondi, *et al.*, invited talk (THZF101) at EPAC 2000, Vienna (2000). N. Phinney, invited talk (MO102) at Linac 2000, Monterey (2000).
- [6] N. Toge, *et al.*, ed, “International Study Group Progress Report”. <http://lcdev.kek.jp/ISG/> より閲覧可能 .
- [7] “ATF Design and Study Report”, KEK-Internal 95-4. <http://lcdev.kek.jp/ATF/Pub/KEK-I-95-4.pdf> で閲覧可能 . 最近の動向については J. Urakawa, “Present Status of KEK-ATF”, 第 13 回加速器科学研究会(2001), <http://atfweb.kek.jp/atf/Reports/ATF99new.pdf> と [8] を参照 .
- [8] <http://atfweb.kek.jp>
- [9] X-バンド開発の一般情報については <http://lcdev.kek.jp> を参照 . 最近の報文は <http://lcdev.kek.jp/Conf/> で閲覧可能 . K. Takata, “R&D for X-band Linacs for JLC: Present Status”, 第 13 回加速器科学研究会 (2001).
- [10] S. Matsumoto, “Development of PPM-Focused X-band Pulse Klystron”, 第 13 回加速器科学研究会 (2001).
- [11] Y.H. Chin, “Status of X-band Power Source Development for JLC”, 第 18 回 International Conf. on High Energy Accelerators (2001), “X-band RF Power Source Development for JLC”, 第 13 回加速器科学研究会(2001).
- [12] C. Adolphsen, *et al.*, “RF Processing of X-band Accelerator Structures at the NLCTA”, Linac 2000 (2000).
- [13] http://www-project.slac.stanford.edu/lc/wkshp/RFBreakdwn/struct_breakdown_wrkshp.htm
- [14] C. Adolphsen, *et al.*, “Processing Studies of X-band Accelerator Structures at the NLCTA”, PAC2001(2001). T. Higo, “Development of X-band Accelerator Structure towards Stable, High-Gradient Operation”, 第 13 回加速器科学研究会 (2001).
- [15] T. Shintake, “Phase-I R&D Summary and Phase-II Proposal on C-band Linac for 500 GeV e+e- Linear Collider”, Proc.

25th Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, July 12-14, 200.

- [16] <http://c-band.kek.jp>
- [17] H. Matsumoto, ÅgHigh Power Test of the First C-band (5712 MHz) 50 MW PPM KlystronÅh, PAC2001.
- [18] Z. Fang *et al.*, “Simulation of returning electrons from a klystron collector”, Proc. 20th Int. Linac Conference (LINAC200), Monterey, CA, USA, Aug. 2000.
- [19] H. Baba, “Closed-Type Modulator for 50 MW C-band Klystron”, 2001 Lineac Meeting in Japan [Japanese].
- [20] M. Yoshida, “RF Pulse Compressor using Low Thermal Expansion Invar Material”, 2001 Linac Meeting in Japan [Japanese].
- [21] 北村秀男主任研究員および上坪 SPring-8 所長（当時）による .
- [22] 松本浩が担当している . また、2002 年 4 月より新竹積が KEK から理研に移り、計画推進にあっている .
- [23] T. Shintake, “The SPring-8 Compact SASE Source (SCSS)”, SPIE2001.
- [24] Asian Committee for Future Accelerators (ACFA) 傘下の LC に向けた物理・測定器ワークグループの活動については <http://acfahep.kek.jp/> を参照 .
- [25] 科学技術基本計画の資料は文部科学省のサイトより閲覧可能 . http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/kagaku/kihonkei/kihonkei.htm
- [26] N. Phinney, *ed.*, “2001 Report on the Next Linear Collider”, SLAC-R-571 (2001), T. Raubenheimer, *ed.*, “Zeroth-Order Design Report for the Next Linear Collider”, SLAC-Report 474 (1996), <http://www-project.slac.stanford.edu/lc/nlc.html> および — [6].
- [27] R. Brinkman *et al.*, *ed.*, “TESLA Technical Design Report” (2001), http://tesla.desy.de/new_pages/TDR_CD/start.html および <http://tesla.desy.de/>
- [28] <http://cern.web.cern.ch/CERN/Divisions/PS/CLIC/> を、参照 .