

PF での日立ビームライン建設の頃

平井 康晴

日立製作所基礎研究所*

Construction of Hitachi Beam Line at the Photon Factory

Yasuharu HIRAI

Advanced Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

We designed and constructed Hitachi Beam Line (BL-8) at the Photon Factory, the National Laboratory for High Energy Physics. The beam line was designed in 1983, and has been in full operation since 1987. It has three branch lines (8A, 8B, and 8C) with 40 eV–35 keV energy range. We perform a wide scope of researches: e.g., soft X-ray spectroscopy, XAFS, lithography, microscopy, and computed-tomography.

1. はじめに

先日、放射光関係の古い論文ファイルを整理中に「John P. Blewett, “Radiation Losses in the Induction Electron Accelerator”, Phys. Rev. **69** (1946) 87」と題する論文のコピーが出てきました。100 MeV ベータトロン内での放射損失による電子軌道のずれを論じたもので、良く知られているように、間接的にせよ初めて放射光の存在を確認した論文です¹⁾。コピーの表紙右肩に RES. LAB. 1313のナンバーが打ってあり、いつ頃誰から入手したのかしばらく考えてしまいました(近ごろこの手の現象が多発する)、14年前に筆者の Blewett さんに頂いたことを思い出したのです。私は1982年から1年間社費で自由電子レーザの共同研究のため、Brookhaven 国立研究

所の National Synchrotron Light Source (NSLS) に居たのです。その NSLS の研究室で、ある日 Blewett さんと雑談中に(その頃 Blewett さんは定年退官したばかりでした)、私が入社後一年間アルカリ土類金属の酸化物カソードの材料評価を行っていたことを話したところ、驚いたことに Blewett さんも General Electric Co. (G.E.) の RES.LAB. 時代に同系統のカソードを研究されていたらしく、それに関する論文別刷りを頂いたのです。冒頭に述べた RES.LAB.1313の放射損失の論文もその時に貰ったものですが、その時はカソードの話に興味が集まってそのままになってしまい、恥ずかしながら忘れ去ってしまっていたのです。後にビームラインを建設し、また放射光利用を続けて来ましたが、Blewett さんから

* (株)日立製作所基礎研究所 〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町赤沼2520
TEL 0492-96-6111(内212) FAX 0492-96-6006 e-mail hirai@har1.hitachi.co.jp

頂いた論文を再発見(?)して身のすくむ思いをするとともに、先駆的な仕事の意義を再認識させられたのでした。

最初から脱線しましたが、脱線ついでに Blewett さんの話をもう一つ。同じく Brookhaven にいた頃、クリスマス休暇を利用して Washington の スミソニアン博物館群 (the Smithsonian Institution) に行きました。そこで、パリティ非保存の着想を得た日の Lee と Yang の研究ノートの展示を覗き込んでいると、加速器関係の展示を見ていた家内が私を呼びました。「この方、あの Blewett さん?!」。そこには、Brookhaven で1952年に発明され現在の粒子加速器の動作原理となっている強収束の原理²⁻⁴⁾ (交互に正負の磁場勾配を持つ磁石を軌道上に並べると強い収束作用が得られる) の説明と4人の発明者の写真が展示してあり、その名前には、E. D. Courant, M. S. Livingston, H. S. Snyder, J. P. Blewett とありました。その写真の一人は確かに Blewett さんでした。実は、私は Brookhaven で Blewett さんと同室だったのです。家内は私のびっくりした顔を見て啞然としたままでした。

と言う訳で(?), 私が米国で無駄な(本当は有意義な)時間を費やしている間に、会社では高エネルギー物理学研究所の放射光実験施設 (PF)⁵⁾ にビームライン (VUV~X線領域) を建設する話が進み、私がビームライン設計・建設担当者になっていたのです。私は、電子加速器を作って将来は X 線レーザで DNA の二重らせんが絡み合っている様子をホログラフィックに時分割観察してみたい等と思っていた(都内の画廊でくるくる踊るバレリーナのホログラフィ像を見てそんな夢想をした)のですが、直ぐにと言う訳にも行かず、結局1983年秋、帰国早々ビームラインの設計と建設を担当することになりました。

その頃、PF リングと共同利用ビームラインは稼働を始めており、また電々公社(現 NTT) 通研のビームラインも建設されていました。日立製

作所のビームライン⁶⁾建設は民間で初めてのケースでしたので、PFの方々に多めに心配をおかけし、またソフト、ハード両面で大変お世話になりましたが、当時 NSLS の X 線リングが未稼働の状態であったため、Bell Lab., IBM, あるいは EXXON などの米国企業の X 線専用ビームラインより一足先に稼働を始めることになりました。また、日本電気、富士通も高工研に専有ビームラインを建設し、企業の放射光利用は主に半導体プロセス技術への貢献の期待を担って盛んとなりました。そして、遂には第3世代光源の SPring-8 の利用に向かう形勢となって来ています。

この様に企業の放射光利用も膨張の(バブルの?)一途を辿って来たのですが、今後の一層の発展のために、我々のビームライン建設のあれこれを記録に止めるのも何らかの意味があるかと思ひ、編集委員会の依頼に従って1983年秋から1985年夏頃までの PF での日立ビームライン建設について述べることにします。なお、ビームラインの光学・真空・制御系等の技術的な要諦は本誌の解説や幾つかの成書に述べられていますので、ここでは、ビームライン設計・建設で大変だったこと、失敗したこと等を技術的内容に限らず書くことにします。

2. 建設まで

1983年の下期に高工研 PF でのビームライン計画が正式に社内認可され、基幹チャンネルと2本の分岐ライン(XPS と XAFS)の建設が決まり、半期遅れで3本目の分岐ライン(リソグラフィ、X線 CT)の建設が決まりました。3本の分岐ラインの利用方針は社内の研究所で煮詰め、予算提案時には細かいことは別にして全体像はある程度固めていました。また、日立は製造業ですからビームラインの建設も可能な限り社内で行い、技術の蓄積を計ることもなっていたのです。私は、利用と製造の両ミッションの間で働いた(死にそうになった)と言う訳です。

一方、高工研との契約は、ビームライン計画の担当責任者であった早川和延さん（現北大）が中心となり折衝を重ね締結に至りました。高工研管理部や放射光実験施設の先生方に尽力頂いたお陰で1984年4月に『協定研究』（第一次）が締結され、現在第四次に至っています。

さて、建設に先立ち、高工研の協力を得て色々な検討を行いました。光源性能、床振動、磁場、放射線レベル、クレーン稼働範囲、ユーティリティ等々。その結果、現在の偏向磁石（BM8）にビームラインを建設する許可を頂きました。

床の振動レベルは、将来、精密な実験をする可能性を考えて測定しました。結果を表1にまとめます。当時は稼働ビームラインの数も僅かで振動レベルも低かったのです。現在の振動レベルは不明ですが、サブミクロンレベルのX線微小ビームや干渉計を制御、利用することを考えると、今や強力な防振設備を備えたビームラインを考慮する価値は大いにあると思います。磁場はほぼ地磁気レベル、放射線レベルも通常時は自然放射線レベル以下でした。環境に関しては、今のコンテナハウス用地近くの農業用水路で、カモ撃ちの散弾銃の弾が高工研内に飛んでくると言う話を誰かに聞いたのですが幸いそんなことはありませんでした。

3. 予算オーバーで苦労

予算が付いて喜んだのも束の間、建設費用に関して発注と受注側の見解が乖離し（よくある話ですが）、その齟齬が設計担当の私の所に押し寄せて来たのです。既に利用研究装置の設計もスタートしており、分岐ラインは2本に減りましたと言う訳にも行かず、結局成るようにはかならない、と腹をくくって設計を続行したのです。案の定、あとでそのつけが待ち構えていました。

ビームラインには、高工研指定の機器をそのまま購入可能な部分と、我々の利用実験の必要上設計を要する部分があります。コストを下げるため

Table 1. Amplitude of vibration measured at the floor of PF on 10 November, '83. Measured positions were about 30 m from each source point for all the beam lines. Resonant frequencies were 10 Hz and 25 Hz.

Beamline No.	amplitude (μm) (peak to peak)	Beamline No.	amplitude (μm) (peak to peak)
4	0.1-0.3	10	0.1-0.2
5	0.1-0.3	11	0.1-0.2
6	0.1-0.3	12	0.2
7	0.1-0.2	16	0.1-0.2
8 (Hitachi)	0.2-0.3	17	0.1
9	0.2	18	0.1

出来るだけ購入可能な部品で済ませる様にしました。しかし、我々のビームラインは当時の高工研の既設ビームラインと異なり、図1に示すようにVUV, X線、それに白色X線を利用する欲張ったビームライン設計にしたため、機器構成に工夫が必要でした。また、利用実験の都合上、白色X線利用の分岐ラインのパイプ径を太くしたので、真空破壊時の対策を強化するために速断バルブの性能向上を計る必要がありました。それやこれやで設計が進むにつれて仕様が膨らみ、ついにある日私の上司宛に大幅な追加費用の請求書が来たのです。結局仕様のぎりぎり大幅削減（パイプに付いたポートをほとんど削除、ミラー駆動装置、ポンプ類を削除、等々）を提案、ようやく合意に達しました。以後、落ち着いて仕事に専念出来るようになりました。最初の見落としを含めて仕様は常に膨張し、また、かなり無駄な仕様部分もあったと言うことです。

4. 基幹チャンネル真空立ち上げ時のトラブル

図2(a)に示す基幹チャンネル（BEAM CHANNEL）の圧力は蓄積リングの超高真空と直接つながるので、PF（現東北大）の佐藤繁さんから 2×10^{-10} Torr以下とするよう指示を受けていました。私が1980年頃に使っていた Vacuum

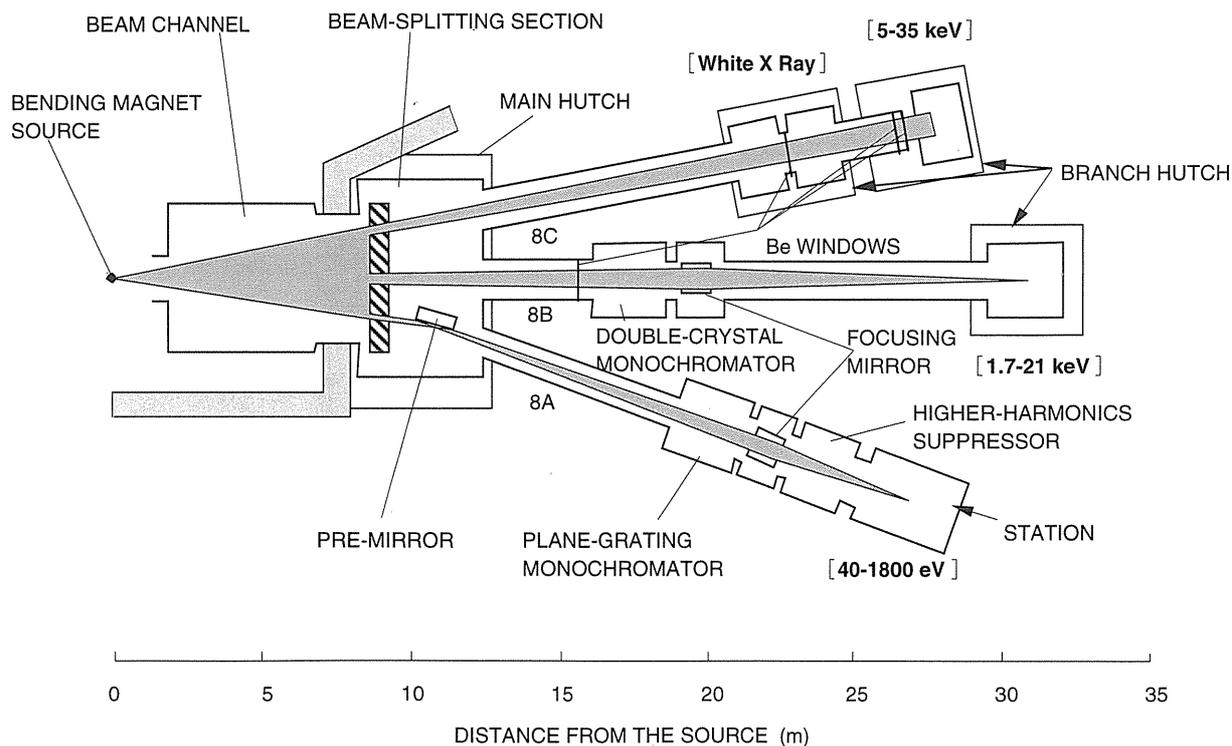


Figure 1. Layout of Hitachi Beam Line.

Generator社の光電子分光装置は液体窒素トラップ付きの油拡散ポンプで実用的に 5×10^{-11} Torrで稼働していましたので(チタンゲッタポンプ併用)、イオンポンプとチタンゲッタポンプ併用で 10^{-10} Torr 台前半に入れることは比較的容易であろうと判断していました。一方、工場はそこまで到達させた経験が無く、結局さまざまなノウハウ(配管材料の材質選択, プリベーキング処理方法等)を得て目的を達成しました。図2(b)に脱ガス量を仮定して計算した基幹チャンネルの圧力分布と測定値を示します。測定結果から仮定がほぼ妥当であることが分かります。この図は、工場で電気回路計算シミュレータにより真空回路を模擬して計算したものです。

実際には、高工研搬入の10日程前にとんでもないトラブルが発生しました。イオンポンプ4台のうち2台もストライキを起こした(ポンプメーカーが溶接時の酸化被膜を除去するためワイヤブラシを使用し、残ったブラシの破片がグリッド電極をショートさせた)のです。修理を終え

たのは搬入予定の3日前でしたので、基幹チャンネルの最上流部分のみ搬入することに変更しました。真空立ち上げ作業を徹夜で行い、搬入日の前日(1984年10月26日)早朝にようやく 1.6×10^{-10} Torrまで下がり、バンザイをしました。

図3に'84年11月6日に初めて基幹チャンネルに放射光を通した時の圧力変化を示します。リング地下室にXTレコーダを持ち込み、基幹チャンネルの電離真空計の出力をモニタした結果です。11時6分に蓄積リングへの入射が開始されました。2分後に127 mAに達し入射を終了。入射直後は急激に圧力が上昇し、その後減少していきます。急激な立ち上がりは光刺激脱離(Knotek-Feibelman過程がメイン)で吸着分子がイオン脱離した結果と考えられます。入射を繰り返すうちに圧力はなだらかな立ち上がりを示すようになり、昇温脱離(この時アブソーバ銅ブロックが受けた放射光パワーは約300ワット)による圧力増加が主となります。その後、圧力は放射光照射下で 10^{-9} Torr台に下がり、PFの小林正典さんか

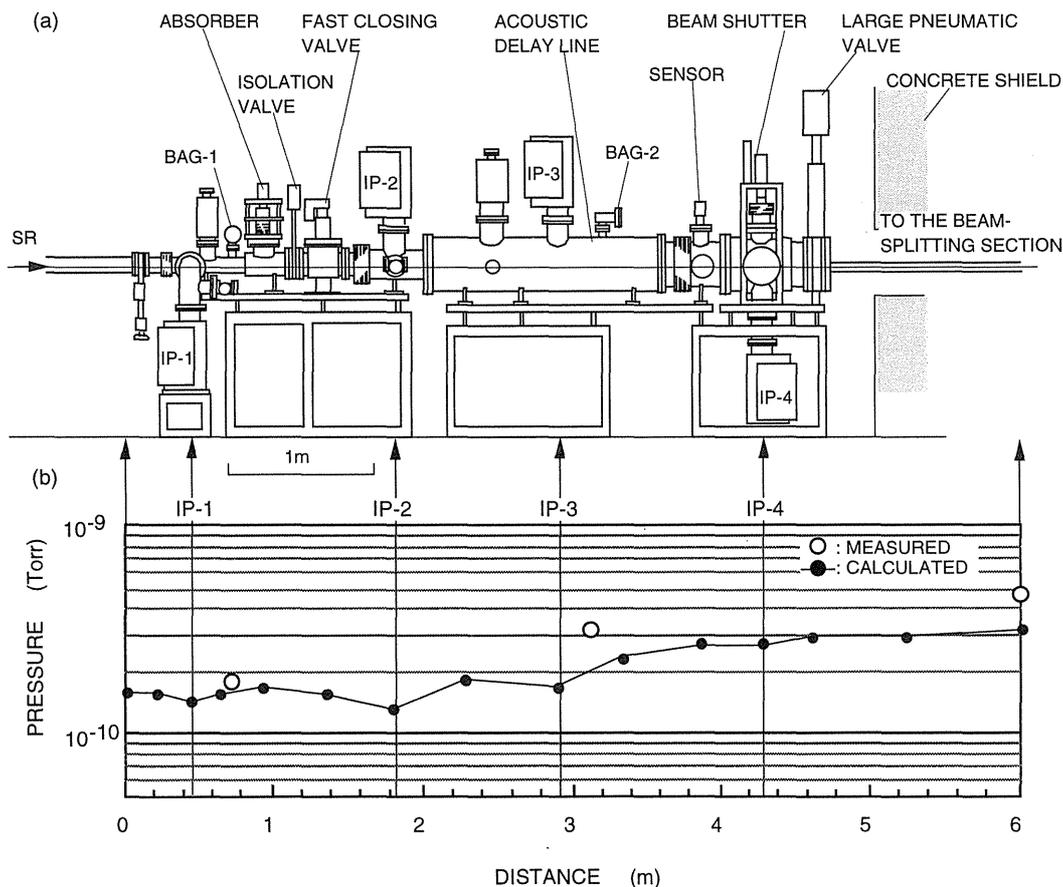


Figure 2. (a) Side view of the beam channel of Hitachi Beam Line. IP: triode ion pump; BAG: Bayard-Alpert gauge. (b) Calculated and measured vacuum pressures of the beam channel. Assumed leak rate at both ends of the beam channel are 1×10^{-9} Torr·l/s. Assumed desorption rate of materials, such as SUS304 (pipe), SUS304 (beam shutter), Cu (absorber), and VITON (seal), are 4×10^{-13} , 2×10^{-12} , 3×10^{-12} , and 3×10^{-11} Torr·l/s/cm², respectively.

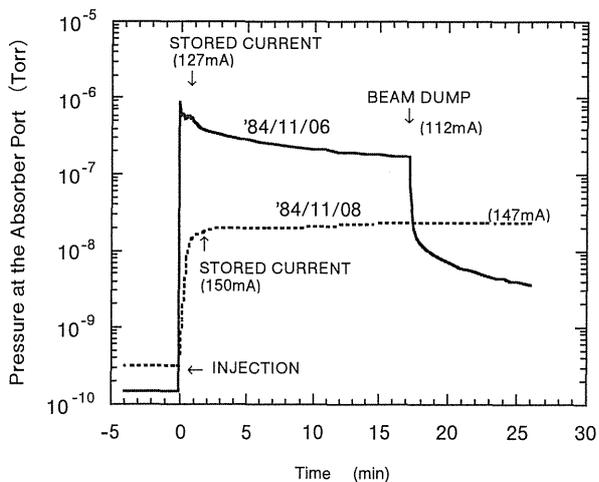


Figure 3. Time dependence of the vacuum pressure upstream of the beam channel measured at the first irradiation on 6 November. The result is compared with the data on 8 November.

ら蓄積リング側にも問題はないとのお墨付も頂き、安堵の胸をなでおろしたことでした。

5. 速断バルブの開発

X線リソグラフィ装置用に分岐ラインの下流パイプ径を太くしたため、真空破壊時の対策を強化することにしました。そのために、基幹チャンネルの速断バルブ (Fast Closing Valve, 略してFCV) で短時間に衝撃波の突入を阻止し、かつ封止コンダクタンス (FCV 閉状態でのもれ速度。FCV は弁の閉時間が短いかわりに閉状態でも若干のリークがある) を可能な限り小さくし、衝撃波遅延管 (Acoustic Delay Line, 略してADL) の遅延時間を大きくしました。また、遅延管の下

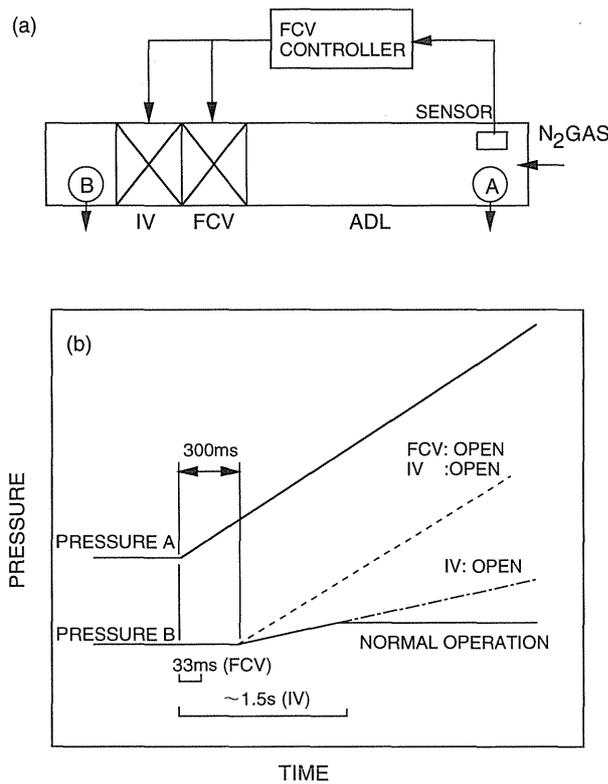


Figure 4. (a) Vacuum protection system consisting of IV (Isolation Valve), FCV (Fast Closing Valve), ADL (Acoustic Delay Line), sensor, vacuum gauges A and B, etc. Shock wave of N_2 gas was propagated through the ADL. (b) Time dependence of the vacuum pressures measured by the vacuum gauges A and B. Delay time of the system is measured as 300 ms. Closing times of the FCV and IV are measured as 33 ms and 1.5 s, respectively.

流に設けたセンサー (Sensor) で動作する速断バルブの動作時間は遅延時間より小さいことが必要です。これによって、自動ゲートバルブ (図 2 (a) の Isolation Valve, 略して IV) で完全に真空を封じ切るまでのリングへのリークを最小限に押さえる訳です。

これらの機器を図 4(a) に、 N_2 ガスをリークした時の真空計 A と B の圧力変化を図 4(b) に模式的に示します。リークにより真空計 A の圧力は増加し、同時にセンサーで FCV と IV に閉信号を送ります。予定通り FCV と IV がセンサー信号で閉動作を行った場合は図 4(b) の実線に示す圧力変化をします。もし FCV と IV が開のままなら真空計 B の圧力は ADL の遅延効果を含めて

図 4(b) の点線の様に増加します。もし、FCV は動作し IV が開いたままなら一点鎖線のように FCV の封止コンダクタンスで決まる圧力上昇を示します。以上の結果から、FCV の封止コンダクタンスを小さくすることが重要なことが分かります。動作試験の結果、速断バルブの封止コンダクタンス 0.1 l/s (当時既設のものは 1 l/s)、動作時間 33 ms (既設のものは 45 ms)、衝撃波遅延管の遅延時間 $\sim 300 \text{ ms}$ を得ました (正確には FCV と IV も含む)。FCV と ADL 装置一式は新たに開発したのですが、PF の金谷範一さんからリング内の誘導ノイズ等による速断バルブの誤動作を無くするための設計上の注意を頂き、無事 (本当は一通りのトラブルを経験して) 完成させることが出来ました。

このシステムの性能をごく大雑把に見積もると、基幹チャンネルの最下流 (分岐ラインの最上流部) で 1 mm 角の穴から大気リークが発生した場合、システムの作動によりリングの圧力は 10^{-5} Torr 台、衝撃波遅延管が無い場合は 10^{-4} Torr 台、衝撃波遅延管も速断バルブも無い場合は 10^{-1} Torr 台になると予測しました。もっと下流の実験装置からリークした場合は途中のゲートバルブが閉じるので圧力の上昇はさらに抑えられることとなります。現在まで、幸いなことに速断バルブのお世話になったことは有りません。

6. インターロック・制御系は大変だ

ビームライン設計に関する技術で、最も苦労したのはインターロック・制御系のロジック設計でした。信号点数はリング、ビームライン、およびユーザーからの信号を合わせて 100 点前後でした。VUV と X 線用のロジックが混じったビームラインは初めてであること、ロジックは 1 人の人間がまとめないと完結しにくい等のため、大変な目に合ったのです (結果として仕様変更を垂れ流し状態で行い、多くの関係者に迷惑をかけました。仕事を能率良く進めるには、一人がロジック

の骨格と約束事を作り、それに従って細部を分担してもらうべきでした)。ロジックを間違えばユーザーがビームライン使用中に晴天の霹靂の如くトラブルに直面する訳です。幸い PF (現東大) の佐藤能雅さんと PF の伊藤健二さんに懇切に教えて頂きビームラインは何とか稼働するようになりました。佐藤さんが工場に来られて動作試験を行った時はロジックミスによる誤動作続出でもちろん不合格。高工研と工場のある常磐線をパチンコ玉の如く行き来して、国分寺にある研究所にも自宅にも帰れず……。ビームラインの定常運転が始まってからも、ハッチ開閉に関するバグが出たりして、今でも安心している訳ではないのです。

インターロックロジックは誰もが簡単に変更できないように、ユーザーから離しておく必要があると思いますが、制御装置は、後の機器増設に対応可能な柔軟性を持たせるのが便利です。近頃はネットワーク技術の発展で遠隔操作が可能ですから、将来は会社の実験室からビームライン操作が出来れば便利だと思います。そんな話を、何かの会合で話したら、そのあとの発表で PF の安藤正海さんが「私は自宅から遠隔操作したい。」と発言され、そのあとの懇親会で高良和武先生が「私はそのころはベッドから遠隔操作するかも？」とおっしゃられて大爆笑となりました。

7. 冷却水の吐出事故、そして出射テスト

2本の分岐ライン(8A, 8B)が完成し、放射光の出射試験を目前にして、とんでもない事故が発生してしまいました。基幹チャンネル最上流部のアブソーバ(Absorber)用冷却水の配管が外れて直径10 mmのチューブから水圧10 kg/cm²の水が約30分間吐出したため、蓄積リングのマグネット等に噴水がかかり、さらに流水で制御機器の並ぶ階下の地下室の一部が水浸しになったのです(漏水センサーは作動したが気が付かなかった)。我々は真っ青になって PF の先生方と水を掻き出しました。PF の計測機器にも被害を与え

てしまいましたが、幸い迅速に復旧し、我々も元気を取り戻して1985年6月12日の夕方、放射光出射試験にこぎつけました。佐々木泰三、富家英雄、佐藤繁、の諸先生の見守る中、ドキドキしながらバルブ類の開操作。

8A (VUV~軟 X 線ライン)⁷⁾では原田達夫さん(現都立大)達が開発した不等間格子溝平面回折格子とそれを搭載した単色器(この単色器は十数年間活躍しましたが、現在は Karl-Zeiss 社の SX-700 と交換しました)に放射光を導き出射ゼロ次光を観察してバンザイ。後日、ガスセルを単色器に接続して放射光を通し、希ガスのスペクトルから X 線エネルギーの校正と分解能の見積りが行われました。この単色器からの出射光は、後置鏡(集光鏡)と高次光除去鏡を経由して試料に達する設計とし、以後、私自身も計測法の開発や材料解析に活用して来ました。

8B (XAFS ライン)⁷⁾は放射光出射テスト時は白色ビームを通しました。アルミ板を透過した放射光の硬エネルギー成分を写真にとり、垂直方向の据え付け精度が~1 mm 以内、水平方向も予定の幅になっていることを確認してこれもバンザイ。その後、Si ウエハ上に形成した LSI パターンのラウエトポグラフィを行いその分解能から発光点サイズを 3~4 mm と見積り(当時の電子のビームサイズ σ : 水平1.94 mm, 垂直0.64 mm)、出射試験を終えました。その後、XAFS 用の二結晶単色器と XAFS 装置が設置されました。以後、デバイス用薄膜を中心とした構造評価を行っています。

8C ライン⁷⁾は半年遅れで出射テストを行い、以後、白色 X 線を使ったリソグラフィ実験やさまざまな単色 X 線利用(計測法の開発と材料解析、イメージング、医療診断技術の開発等)を行っています。

8. ビームラインの構成について

ところで、日立ビームラインは VUV(軟 X 線)

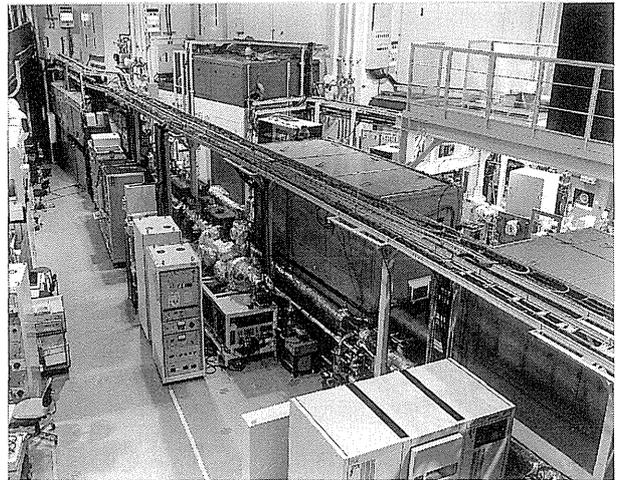
から X 線領域の利用を目指した構成になっていますが (写真 1 は完成直後の全景), 高工研ビームラインは VUV (軟 X 線) か X 線のどちらか専用です。どちらの構成を選択するかは施設の利用体制とユーザーのニーズで決まりますが, 混用ビームラインの得失は以下のように考えられます。

- (1) 同一試料を VUV と X 線を用いた両手法で測定する計画を立てやすい。
- (2) VUV と X 線を一人の研究者が扱えるようになる。
- (3) 機器およびインターロック/制御ロジックが複雑になる。
- (4) VUV 専用ラインに比べて前置鏡による光路偏向の効果が小さく, 下流領域でも実験スペースが狭い。

SPring-8 の様に偏向磁石の放射光水平取り出し角が 2 mrad 程度と小さい場合には, VUV と X 線を同時に利用することは不可能ではないにせよ難しそうです。一方, 挿入光源の場合は VUV と X 線に対応した 2 組のアンジュレータを直列に設置すれば混用可能でしょうが, ビームライン構成の工夫が必要であるように思われます。

9. コンテナハウスのこと

ビームラインの建設と平行して, 光源棟に隣接した高工研敷地内にコンテナハウス(実験準備室)を建設しました。遠隔地で長期間研究を続けるためには必要であり, まさに拠点なのです。平屋建ての半分を備品室, 残りを居室としましたが, 六畳ほどの居室に十数名が膝を立てて打ち合わせをしたりしました。会社の会議室とえらい違いでしたが, それだけ熱気がこもり意気盛んでした。もっとも予算の認可と引き替えに当然いろんな成果を約束しており, ただでは帰れない訳です。利用研究が始まってからは社内の利用者も増え, 成果の約束も増えてコンテナハウスは手狭となり, 二階建てになりました。今度立て替える時は, 出来



Photograph 1. An overall view of Hitachi Beam Line (Beam Line 8).

れば一階は予備実験室と備品室, 二階は浴室と仮眠室, 三階, 四階は快適なオフィス等を等と思えますが, 厳しい世の中ですから当分現状維持になりそうです。

10. 利用実験について

私がビームラインの建設に携わったのは, 放射光利用の計測技術を開発することが目的であり, もちろんビームラインもその技術の一部であると認識して来ました。ただ, 計測技術を開発するためにビームライン本体に及ぶ変更・追加が必要な場合, お金も時間もかかります。その所が実は大きな制限となります。中途半端な開発計画は挫折します。長期にわたり利用実験の実をあげるためにはビームライン(と光源性能)の継続的な改良が必要であり, それは利用実験(例えば, 偏光利用, 微小ビーム形成, 等々)と常に一体のものです。ビームラインが大がかりになるほど改造は難しくなるので, 計測技術の開発は十分な計画を練って進める必要があります。そういう意味で, 第3世代に属するもっとコンパクトな放射光源やビームライン装置が欲しいものです。

11. おわりに

ビームライン建設で我々が苦勞した事柄を以下

に経時的に記します。

- (1) 予算調達と予算内発注
- (2) 機能的な建設・利用組織の構築
- (3) ビームポート（光取り出し口）の選択と決定
- (4) 施設側との利用契約交渉
- (5) 基本設計の施設側の承認
- (6) 予期せぬ仕様の追加・変更（予算の手当の問題，変更の連鎖反応）
- (7) 細かい部分の仕様の確定（時間との競争）
- (8) 多量の設計図の検図・承認（見落としが計画遅延をもたらす）
- (9) 出来上がった部品や組み立て品の構造，機能に関する不具合対策，作り直し
- (10) 各種取り合い箇所の不整合の調整
- (11) インターロック・制御システムの入出力信号確定とロジック構築
- (12) インターロック・制御システムロジックのバグ修正
- (13) 圧空もれ，真空もれ，電気短絡，信号システムへのノイズ混入，予期せぬ容量不足等の対策
- (14) 放射線遮蔽の追加
- (15) 実験ハッチと実験装置の干渉
- (16) 実験者の実験スペースの確保
- (17) 安全対策

(18) 共通備品の抜け，消耗品の調達

上記の項目は全て私を含めて現場にいた先輩や仲間が対応を求められたものですが，当時は初めての事で右往左往しました。また，本来の研究と直接関係なさそうでしかも技術開発の必要な部分もあり焦燥感に駆られました。しかし，多くの先人の苦勞に比べれば大したことではなかった（その時は大変だった）のだと思います。

最後に，建設以来十数年にわたりお世話になってきた高エネルギー物理学研究所放射光実験施設の先生方，管理部の方々にこの場をお借りして感謝致します。

文献

- 1) 放射光の可視光成分目視による最初の直接観察は「F. R. Elder, 他, "Radiation from Electrons in a Synchrotron", Phys. Rev. **71**, 829 (1947)」に述べられている。ポラロイド板で電子軌道面内の直線偏光も確認されている。
- 2) E. D. Courant, M. S. Livingston and H. S. Snyder: Phys. Rev. **88**, 1190 (1952).
- 3) J. P. Blewett: Phys. Rev. **88**, 1197 (1952).
- 4) 強収束の原理は，良く知られているように1950年に N. Christofilos が E. D. Courant 等より先に見出し，米国特許の形で提出されている。
- 5) Photon Factory Activity Report (annual report) 参照
- 6) Y. Hirai, I. Waki, K. Hayakawa, K. Kuroishi, Y. Yasaka, N. Kanaya, Y. Satow and S. Sato: Nucl. Instrum. and Meth. **A327**, 256 (1993).
- 7) 利用研究に関しては文献 5), 6) を参照。