うたかたの記 (6)

小 林 正 典^{*1}

Reminiscence of My Research Works (6)

Masanori KOBAYASHI^{*1}^{*1}High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-0801, Japan

(Received October 1, 2013, Accepted December 3, 2013)

4. 電子ストレージリング (PF リング) 真空系

今回は大型真空装置を建設する際の経験談を、高エネルギー物理学研究所 放射光実験施設 (PF, 現: 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 放射光研究施設) の電子ストレージリング (PF リング) を例に挙げて書いてみよう。真空系の特長とその設計・建設に当たっての人間関係にも触れながら紹介する。

4.1 電子ストレージリングの例 (性能競争)

PF 2.5 GeV リングの建設は1978年から開始された。それとほぼ同時期に米国ニューヨークのロングアイランドにあるブルックヘブン国立研究所 (BNL) でも放射光専用施設 (NSLS) を創設し2.5 GeV の電子ストレージリング (X-ray Ring) を建設していた。いずれが先に放射光発生専用加速器 (電子ストレージリング) から放射光を取り出し、ユーザー運転を開始するかという海を越えての競争となったのは自然の成り行きであった。結論を言えば PF が勝利した。理由はいろいろあるが、NSLS の X-ray Ring ではよりシャープな放射光を取り出すために電子ビームの角度と位置の広がりを取り込んで (エミッタンスの小さな) 電子ビームを周回させることを目標の高い位置に置いたことが大きな理由として挙げられる。放射光源の性能としては、輝度が高いこと、ビーム軌道が安定している (光源点がふらつかない) ことに加え、ビーム寿命が長く且つ故障しないことがある。NSLS では輝度を高くすることを優先順位の高位に置くという戦略目標を採っていた。そのため電子ビームを絞り込むため4極電磁石と6極電磁石の磁極をビームへ近づけた結果、ビームダクト断面は小さくコンダクタンスが制限された。また電磁石の数密度も高くなったためポンプを適切に配する場所が少なくなった。その結果ビームダクト内部の圧力分布は高くなってしまいうことは避けられないというリング設計であった。

加速器立ち上げの調整運転の重要なポイントは、電子ビームをいかに短時間の調整運転で周回させ、問題点を洗いだしながら運転を持続できるよう調整できるかである。電子ビームを周回させることができればビームモニターを見ながら適切な運転条件を見出すことが可能となるのだが、エミッタンスの小さな電子ビームの場合、再現性よく周回させるに困難

が多く、安定な運転条件を確立するには時間がかかる。これは当時の計算機の性能と制御プログラムの状況での話であり、約30年後の現在のビーム制御技術は各段に進歩している。PF は NSLS よりエミッタンスが大きい反面、ビームを安定に短時間で周回させることを最優先とし、それに適した磁石配列設計とした。その結果 NSLS より短い時間で電子ビームをストレージできた。一旦電子ビームを周回させる運転条件を確定できれば、発生した放射光がダクト壁面を照射しその積分照射量に反比例して光脱離が減少し (ビームクリーニング効果とも云う) リング内圧力が下がり、ストレージビーム電流の寿命も長くなる。その結果より大きな電流値で電子をストレージできるようになる。このようなポジティブフィードバックが PF リングの運転では働いた。ほぼ同時に電子ストレージリングの建設をスタートした NSLS の X-ray Ring と KEK の PF リング二つの電子ストレージリングの立ち上げ運転成功の違いは、原因には他にいろいろあるが、後で説明する電磁石配列とその結果の真空ポンプ配置に因るところが大きいと云ってよい。

4.2 電子ストレージリング真空系の設計に際して (有益であった設計思想)

PF の電子ストレージリングの目標とする性能は、最先端加速器 (例えてみれば Formula car; F1) のそれではなく共同利用の加速器 (あたかも高速道路を150 km/hr で定時運行する高速バス) にふさわしい性能とすることと私は理解した。設計に当たっての考え方や態度について参考になった本が二つある。一つは、正しい書名を忘れてしまったのだが、佐貫亦男氏による飛行機や武器についての著書が参考になった。それによれば、民族の特徴が最も端的に現れるのは武器であり特に戦闘機の設計には民族の哲学がある、という内容であったと記憶している。敵機の銃撃から守るべき最優先の箇所は戦闘機のどこか。エンジンか操縦席か燃料タンクか。最優先の性能は飛行速度か、上昇速度か、高高度飛行か、旋回性能か、積載量かなどなど。各国の戦闘機製造技術だけでなく燃料の供給状況も含めて設計が決まっていることなど、興味深かった。もう一冊は辻泰先生に教えて頂いた「マンハッタン計画」という早川書房からの本であった。マンハッタン計画の目的そのものを評価するわけではないが、いかにウランの分離を速やかに実現するか、質量分析法、ガス拡散法、遠心分離法、化学処理法という異なる方法を並行して進め、原理的に優れているのか、効率まで含めて工学的に優れ

^{*1} 高エネルギー加速器研究機構 (〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1)

ているか、目標とする時点まで如何にしてウラン濃縮を間に合わせるか、分離操作をする人材の知的レベルやそれまでの経験の種類、供給可能人数など、クールに検討評価する視点と決断、責任の負い方など大変興味深かった。私は大学の研究室で実験装置を設計し実験する立場から突然大型システムを設計する立場に替わったため、設計に当たっての基本的姿勢に不安があったが、プロジェクトとはどういうものかをこの本で垣間見た思いがした。大型真空装置を設計する基本的態度と姿勢が決まり、背中を支えてもらったと思っている。

ハードウェアで構成するシステムデザインについての教育を大学ではどのような内容で教えているのだろうかと興味をもったが、次に説明するように単年度予算を着任後の3年間で執行するという束縛条件の下で設計・製造・設置と続き、完成後はより高い性能を狙っての改善に明け暮れたため、システムデザインとはかくあるべしということを未だ学習できていない。

4.3 真空系設計当初（概算要求と予算執行）

1979年にそれまでの東大生産技術研究所から高エネルギー物理学研究所に席を移して電子ストレーリング真空系の設計を始めた。PFの創設は着任前年の1978年から1981年までの4年計画として予算措置がなされていた。予算は建物関係、加速器関係設備〔2.5 GeV, 400 mの電子リニアックおよび2.5 GeV, 500 mAの電子ストレーリング〕、放射光利用実験設備に分かれている。電子ストレーリングの真空に関する概算要求の内容についてまったく知らないという状況のまま私は着任したのである。概算要求書は東大核研の電子シンクロトロン（ES）およびIN-SORの経験や高エネ研のプロトンシンクロトロン（PS）の経験を基にして作られたのであろう。電子ストレーリング真空系の概算要求の部分はPSの真空担当であった故堀越源一先生も関係して作成されたと想像する。大学の研究室の年間予算のざっと2桁強ほど大きな予算を4年間で執行して、周長187 mの電子ストレーリング真空系を作らなければならないという状況に立ち至ったのであった。事態に対する私の理解がそこまで至っていなかったとはいえ、おっちょこちょいというか、思えばかなりの度胸であった。知らぬ者の強みかもしれない。電子ストレーリングの真空以外の他の部門では、真空系の発注作業に先行して電磁石の設計と発注、大電流高周波源と空洞の設計と発注が初年度から進められていた。それぞれを担当する責任者は高エネ研加速器研究系から異動してきた実経験のある方々であった。

予算書を見て二つの発見があった。入射器と呼ばれる（長さ400 m、エネルギー2.5 GeV）電子リニアックと電子ストレーリングとは140 mほど離れて配置されているのだが、それらの間を結びリニアックからの電子ビームをリングに導く“ビーム入射路”の真空に関する予算が抜け落ちている、これが第一の発見であった。二つ目は、周長187 mのリング真空系の規模に対して、予算計上の項目名と予定金額のバランスが良くない、ということであった。正直、どうしてこんな予算書を作ったのかと不満があったのを思い出す。当時の光源系研究主幹であった故富家と雄先生に申し入れたが、概算要求の申請項目は変更できないこと、予算の過不足は各項目

の間で調整するしかないが10%を超えるような変更は新たな変更申請となること、というのが回答であった。予算の抜けについては、さすがに放射光実験施設の執行部でも慌てたようである。光源研究系以外の系にも相談したようで、しばらくしてから「リング真空系予算の一割に相当する額だけを確保したから、それで入射路真空系を何とか作れ」ということになった。赴任時のこのような初期条件の下で電子ストレーリング真空系の設計はスタートしたのであった。

真空に関する概算要求の予算費目金額のバランスに難があることの発見については、次に多少詳しく書いてみよう。電子ストレーリング真空系の設計で最初に検討することは、当然のことながら達成すべき性能である。その性能とは電子ビームを(a)十分な強度で、且つ(b)十分なストレー寿命を確保し、(c)光源点（すなわち電子軌道）が時間的に安定していること、(d)故障が無く予定運転時間中に真空トラプルで真空を破ることがないこと、(e)圧力の履歴を記録し過去のデータを必要に応じて参照できること、(f)主要機器の動作を遠隔で操作ができること、などである。

(a)についてはビームダクトを照射する放射光のパワー（ダクトに沿って35 W/cm@500 mA ビーム電流）を受け止めることが可能となるようダクトの外周側に冷却水水路を用意すること、放射光取出し部（二股の枝状に分かれる；クロッチ）ではダクト壁より約一桁強い放射光パワー密度の入射となるのでそのパワーを受け止める機能・構造を用意すること、(b)については所定のストレー電流に対応する光脱離があっても 10^{-7} Paの真空を確保できる排気速度をもつポンプを選定し適切に配置すること、(c)については排気、ベーキング、放射パワー入射などを原因とする設置ダクトの位置ずれが運転中に起こっても、固定点であるべきビーム位置モニターにストレスをかけないようにダクトを正規位置に固定する構造を用意すること、(d)についてはダクトや採用した構成部品の信頼性が十分に高いこと、ハイブリッドな材料を使いこなすデザインとすること、市販品の中から高信頼性のものを選択することで保守部品点数を少なくして維持費負担を小さくすることなどがある。これら要求項目の(c)と(d)は云いかえれば、電子ストレーリングの真空性能を熟慮するのと同様にリングダクト類の機械的性能についても重要視して設計するということである。(e)(f)については、およそ90台のイオンポンプ（分布型＋通常型）それぞれの動作状況のチェックとON/OFFなどリモート操作、約50台のBA型電離真空計の読み出し、6台の粗排気系ポンプのリモート操作、異常圧力発生時に備えインターロックによるゲートバルブの開閉作動とそれをリモートで監視するシステムを作ることを意味している。

共同利用実験のために放射光を供給する役目を担う電子ストレーリングが以上の(a)～(e)までの機能を十分に発揮するようにイメージを明確に持ち、すなわち(a)～(c)についてはビームダクトの設計、(d)については適切な選択、(e)(f)については将来ユーザー運転が始まったときのビームライン側からの大気洩れ事故も想定するなど、電子ストレーリング真空系を設計する段階でも個人的嗜好を持ち込まないよう

に、クールな態度（or 配慮）を心がけた。

着任初年度の設計に没頭していた頃、光源研究系の故富家雄雄主幹から早く予算を執行するよう作業を急げ、とたびたび注意を受けた。当時の主幹の心を想像するに、加速器にまったく関係のない研究室で真空の研究をしてきた若い助教授は机の前で何を考えているのか、ポンプとかバルブとか市販されている物品の中から適切且つ必要な数を割り出し発注すればよいのに、ということではなかったか。研究室では扱わない大きな予算の執行は競争入札が原則であり、入札の告知、仕様説明会、入札、発注という手続きとその後の製造を考えると遅くとも9月初旬には入札までを終えておかねばならない。にもかかわらず処理が“遅い”と見られていたと思う。しかし私は、システムは物品の集合体では断じてない、そこには思想がなければならぬと強く思っていた。なにせ全ての事柄が初めての経験なので、システムについての自分の考えの正しさを声高に主張も出来なかったが、先に述べた2冊の本に書かれていたシステム設計者の“姿勢”は自分の考え・方針を支えてくれるものであった。完成は3年後であり、着任年度に発注する物品と次年度、第三年度に順次設計・発注する物品とのマッチングが良くなければ、無駄な物品とまでは云わないにしても並みの製品を集め並べた真空系となってしまう、とても本来あるべきシステムというものにはならない。いろいろな声が周りから聞こえてはきたが、自分の考えを若さにまかせ通させてもらった。3年後に完成させる真空システムの構想が決まれば（決めれば）必要なコンポーネントの開発や物品の調達に大きな本質的な困難はない。大わらわでビームダクト等の図面を画き、開発・製造を受けたメーカーと交渉を進め、年度途中で設計変更するなどの行きつ戻りつをすることも無く、結果として単年度予算の執行に遅れをとるという失態もなく処理していった。

その年の夏ごろ（私にとっての初年度）に、発注作業の遅れの原因は真空グループの人手が足りないためでは、と心配された高良和武施設長から「必要ならアルバイトを雇ってはどうか」と言葉をかけていただいた。「孫悟空の話にある“抜いた毛にフーッと息を吹きかけると自分と同じコピー猿が生まれる”というのは“設計への思いが自分と同じだから役立つ”のであって、アルバイトの人にゼロから設計方針や注意事項を縷々説明し理解してもらっただけの時間がもったいない。自分でやります。ご心配はありがたいんですけど」と答えた。頑固な奴だ、という顔をされた。ツーカーで相手と自分の考えの相違がわかり、今何をしたいのか明日何が必要なのかを理解できる、そのような人材を確保するには仕事の規模も考慮に入れた採用タイミングがある、ということを実感した。このような人に関することもマンハッタン計画の本には書かれていた。大型計画での人の採用は予算書の中に書き込まれるためか、概念設計や技術上の設計段階では新規の採用は無い。国際的な規模の加速器、例えば International Linear Collider ILC では、Central Design Group が概念設計・技術設計を検討し作り上げていて、計画が本格的にスタートしてから人の（新規採用を含め）異動が起こるようである。

ある。

概算予算に抜け落ちていた入射路真空系についても、当時の主幹団の努力と工夫によって十分ではないが翌年の1980年に措置された。それを受けて入射路真空系を全面的に設計し施工したのは同年に着任した当時助手の北村英男君であった。少ない予算の中で IN-SOR での経験を活かして入射路真空系を設計し、業者と交渉し、リングの真空ダクトの設置接合の時期と相前後して完成させた。さらに入射グループと交渉しながら入射用パルスマグネット（キッカー電磁石×4とセプタム電磁石×2）用真空槽も直前に完成させた。検討している内容と経過について時々話し合いをしながらの作業であったが、入射路真空系の仕事を全面的に任せ、リングダクトの製造設置と同時進行で完成出来たのは、幸運な人的組み合わせの結果であったと思う。

4.4 設計の工夫・特徴

設計上の大きな一歩に、挿入型クロッチアブソーバーの考えがある。放射光パワーを受け止めるために、英国の Daresbury 研究所の Synchrotron Radiation Source (SRS) リング (2.0 GeV) では水冷した銅の板をステンレス鋼製ダクト内の外周に配置している。ビームエネルギーがより高いドイツの Deutsches Electron-Synchrotron (DESY)、米国 Stanford 大学の Stanford Synchrotron Radiation Lightsource (SSRL)、NSLS、Cornell 大学の Cornell Electron Storage Ring (CESR) ではアルミ合金製の水冷管内蔵型断面のビームダクトを採用している。放射光は偏向電磁石部ダクトに斜め入射するが、偏向電磁石下流部でビームダクトから放射光が分岐する箇所（クロッチ部）では分岐部壁に放射光が垂直入射することが避けられず、パワー密度がダクト側面のパワー密度に較べ桁ほど大きくなる。CESR ではビームエネルギーが高いため高エネルギー成分の多い放射光が発生されることもあって、クロッチ表面でパワーを受け止めきれない。対策として吸収係数の小さなベリリウムやカーボンの層で低エネルギー放射光のパワーを受け止める。一方高エネルギー放射光はその層を透過し、その後ろ側に用意した水冷銅ブロックでパワーを受け止めるという sophisticated design を検討し発表していた。しかしながら偏向電磁石の磁極に挟まれた空間のクロッチに割り当てられる狭い空間にこの構造を持ち込むのは非常に困難であるだけでなく、異種材料の接合と接合面を通しての熱伝達の確保、長期信頼性の確保、さらにアルミ合金製ダクトに複合材料製のクロッチを溶接しなければならないという深刻な問題があった。

いろいろと考えた末に、放射光を受け止めるための放射光アブソーバー（クロッチアブソーバー）をアルミ合金ダクトとは別体として製作し、フランジを使ってリング外周側からダクト内に挿入するという demountable 構造とすることに思い至った。このデザインにすれば偏向電磁石部ダクトの製造とクロッチアブソーバーの製造年度が異なっても問題とはならないし、将来性能向上としてエネルギーアップがあってもダクトを修正改造する必要は無く、単にクロッチアブソーバーの材質と構造を変えれば済む。このデザインはハワイで開催された日米放射光加速器施設の国際セミナーにおいて富

家主幹から PF の案として発表された。NSLS の当時の責任者であった Dr. Steenbergen から PF のアイディアを使いたいと会合の後に申し入れがあったと帰国した主幹から聞かされた (Ref: M. Kobayashi, G. Horikoshi and H. Mizuno: *Proc. Japanese/USA Seminars on synchrotron radiation facility*, Honolulu, USA, 1979, 177 (1980) 111). その後、クロッチアブスーパーを demountable 構造として偏向電磁石下流部に外側横から挿入する方式は、KEK のアドバンスリング PF-AR の高性能化改良においても採用され、台湾の National Synchrotron Radiation Research Center (NSRRC) で建設が進められ2013年中に立ち上げ運転に入る予定の TPS でも採用している。

設計上重要なもう一つの一步に、ビームダクトの電磁石に対する位置決めがある。この件については別稿で具体的に説明しよう。リング全周にわたるビームダクトの位置決めについて、設計当初から検討した。ベーキングをしないリングとは異なり、in-situ ベーキングを(場合によっては多数回)行っても全てのビームダクトが正規の位置に微調整などなしに留まるように設計した。すなわち、ベーキングによってアルミ合金製ダクトが延び方向と範囲を規定しておくという設計方針によってダクト同士を接続するフランジ近傍に必要なベローの数を減らすことが出来ただけでなく、放射光を取り出し放射線シールド壁外側の実験ホールへ導く基幹チャネルの位置決めと再現性も確実なものとなった。

仮想実験として、長いベロー配管をつないでリング状にして平らな台上に置く。このベローリングを排気するとリングはどのようなになるか? ベローは大気圧に押されて縮みリングの直径は小さくなることは想像できるであろう。一周187 m のリングであってもリングには複数のベローが入っているのでリングダクトは周の内径方向に移動することが起きると予想した。リング半径方向への移動が最も大きく現れるのは電子軌道曲率半径8.66 m の偏向電磁石部ダクト (B ダクト) である。B ダクト設計にあたっては、リング半径方向への移動を抑制するとともにリング周方向へのベーキング時の移動方向を制限するために基準(孔と長溝)を設け、ビームダクトの位置決めを明確にした設計とした。

4.5 設計に続く建設までの日々

自分が設計している電子ストレージリング真空系が加速器の実情や経験から妥当なものか否かを判断することは、加速器の運転が未経験の私には出来なかった。

加速器の現物を目の当たりにしたのは真空に関する国際会議 IVC-7 (Vienna, 1977) の帰路、辻泰先生と共に訪問したジュネーブの CERN での Intersecting Storage Ring (ISR) が初めてだった。それは直径約300 m のリングで巨大な延々と続くコンクリート製トンネル内に設置された数多くの電磁石の列であり、大学や工場などにある装置とは異質そのものであった。互いに逆周りに周回するビームが交差する箇所は他の箇所と較べトンネルの天井も幅も大きく、周回部に較べれば電磁石配置がまばらなため斜めに交差しているビームダクトを間近に見ることができた。その印象を一言で言えば「こんな巨大な真空装置が 10^{-9} Pa になっているとは信じら

れない」であった。また設計だけでなく多数のビームダクトを製造し設置するという人々の情熱とエネルギーの持続に感銘を受けた。また自分には CERN の人々のようなエネルギーが足りないな、と感じたことを思い出す。

その後1977年頃に故堀越源一先生の案内で高エネ研の12 GeV シンクロトロンを見学する機会があった。薄暗いコンクリートのトンネル内に多数の青色に塗られた大きな電磁石が列をなして並んでいて、その隙間にわずかにステンレス鋼製のビームダクトが見えていた。大学には無い大型のイオンポンプで強引に排気している真空装置という印象であった。

シンクロトロン加速器を実際に設計し運転しての経験をもっている堀越先生に、PF 電子ストレージリング真空系の基本設計と技術と予算を考慮した実情を説明して、たびたび評価していただいた。堀越先生の物理屋特有の楽天的発想(上手くいかなければ、変えればいい)に全面的には付いていけないこともあったが、設置組み立てにどれほどの人力が必要か、その時間的対策など、多くのことを教えていただいた。もちろん、楽天的とも思えるいくつかの発言は真空科学だけでなく構造力学に基づいた解析的手法で得た数字に裏付けられてのものであった。堀越先生と故水野 元助手は、私の着任前の1978年の初年度にアルミ合金製真空ダクトを試作していた。レーストラック断面のアルミ合金ダクトの大気圧による変形量の確認、ベーキングの影響と課題、溶接および異種金属接合の信頼性などをチェックしていた。ベーキング温度を200°C近くまで高めたところ、ワイドスパンのアルミ合金ダクトは大気圧に抗しきれずレーストラック直線部が相互に接するまで潰れた。所内では「堀源先生のダクトが潰れた」と話題になっていた。3年後に各種電磁石に挿入設置されたアルミ合金ダクトに対するベーキング温度の管理と制御はこの経験に基づいてなされ、全てのアルミ合金ダクト実機での変形トラブルは皆無にできた。

また、堀越先生の率いる PS 真空グループの技官の方々(敬称略、山口博司、久保富夫、久松広美)には大いに助けていただいた。山口氏には現場組み立てで起こった数々のトラブルとその対策や注意点、久保氏には CF フランジの信頼性向上など機械構造の視点からの予備テスト、久松氏には多数の遠隔操作可能な小型イオンポンプ電源の開発と状態監視について、大型加速器を現実に運転維持している数々の経験に基づいた提案や助言があり、電子ストレージリング真空系設計の具体化で大きな助けとなった。

4.6 電子ストレージリングの性能実現のために

一旦電子ビームの安定軌道を見出し周回させることができた時の放射光源としての性能の優劣は、単に明るだけでなくその明るさが時間とともに減少する割合が少ないことが優れた光源の条件であることは先に述べた。すなわちビーム電流 I_B とビーム寿命 τ との積 $I_B \tau$ の大小で評価できる。具体的には PF リングの $I_B \tau$ の値は運転開始から数年たって830 A min を達成し、最大値は~1200 A min を記録するまでになったが、この値は世界の電子ストレージリングのなかでも最も大きな値である。 $I_B \tau$ の高い値を達成するためには大電流をストレージしてもリングの平均真空が良いことを意味している。加えて適切な運転条件を見出した軌道・高周波・

モニターグループを含む運転チームの貢献がある。

ここで、 $I_B \tau$ の中身を書き直し、より具体的な検討項目を真空の視点から書き出してみよう。 G を加速器に固有の条件である偏向半径 ρ とビームエネルギー E_B から定まる定数として積 $I_B \tau$ を書き直すと

$$I_B \tau = G(\rho/E_B) \times S_e/\eta$$

となる。 $I_B \tau$ を大きな値にするには、系の実効排気速度 S_e を大きくするようにリングの排気ポンプの種類、台数、配置を最適化すること、且つ光脱離イールド η を小さくするような表面処理やダクトへの放射光照射条件に工夫をこらすことが必要とわかる。前者は真空工学の課題であり、後者は表面科学の課題である。

ポンプ配置のより適切な位置を検討するにはリング内の圧力分布がどのようになるかを知らなければならない。リング内部で光脱離量 Q_{ph} によるガス放出量が大きな箇所（せめて近傍）へポンプを配置することは実効排気速度 S_e を大きく確保することと等しく、 Q_{ph} と S_e を双方の検討が電子ストレーリング真空系設計の最初の作業である。

ポンプの配置位置と排気速度、ビームダクトに沿った各位置（ x ）でのコンダクタンスとを考慮したダクトの各位置での実効排気速度 $S_e(x)$ を求めた。ここで云うコンダクタンスはダクト断面を楕円近似した十分に長いダクトのコンダクタンスから求めた単位長さ当たりのコンダクタンスのことである。ダクトには複数の排気ポートが配置され、位置 X では排気ポート(A)と排気ポート(B)へという2方向へ気体分子はコンダクタンスに比例して排気される。したがって、位置 X でのコンダクタンス $C(X)$ は X での(A)へ向けてのコンダクタンス $C_A(X)$ と(B)へ向けてのそれ $C_B(X)$ の和となる。このような考えで求めたコンダクタンス $C(X)$ と排気ポートの構造を考慮した実効排気速度 S_e とからダクト内の各位置 x における実効排気速度 $S_e(x)$ を求めた。

一方、ガス放出負荷原因となるダクト壁面への入射光子数 $N_p(y)$ もビームダクトの幾何学的数値と配置から求めることができる。

これら $N_p(y)$ と $S_e(x)$ が分かれば、 x, y それぞれについて $N_p(y)/S_e(x)$ を重ね合わせることでリングダクトに沿った圧力分布を求めることができる。しかし、cm単位でダクトを要素に分け、10mほどにわたって x, y について $N_p(y)/S_e(x)$ 求めて重ね合わせるのは手計算ではできず、PCのメモリの上で重ね合わせるしかない。PFの真空系を設計していた当時は手近で使えるPCは世の中に無く、計算機室のカードとテープを使って計算する時代だったので、計算機の使用予約時間をとることが出来なかった。止むを得ず“イメージ”をグラフ用紙と頭の中に画いて最適なポンプ位置を決定した。

イメージの基になっているのは「気体分子はどこに居たいと感じているか、何処に移動したいと思っているか」というような文学的ともいえる想像であった。このようなイメージを持てる？ようになったのは2.2に書いたように、1960年代後半に行っていた油分子の非定常流実験においてバーナーを

用いて余計な油分子を焙り出していた日々の経験に基づいているように思う。細くて長い配管（20 mm 直径のガラス配管でも電子ストレーリングの130 mm×70 mmの変形八角形のビームダクトでも）の中を動き回る分子の挙動は（平均吸着時間 τ に違いはあるが）似ていることが起こっている、と感じていたからと思う。

1980年代の前半によくEPSON, Tandy, 少し遅れてApple (Macintosh), Hewlett-PackardのPCが世の中に出回るようになり、BASICをプログラム言語として手元で圧力分布を計算することが可能となった。私も科研費で手に入れたHewlett-Packard社のPCとHP-BASIC言語を用いての計算プログラムを作成した。放射光による真空系負荷の分布 $N_p(y)$ と局所に配置したポンプおよび分布排気ポンプDIPさらには断面の異なるビームダクトのコンダクタンス $C(X)$ も取り込んだ次元の有限要素法を用いたプログラムである。典型的な例は、偏向電磁石1台とその下流の4極および6極電磁石、ビーム位置モニター、次の偏向電磁石までを1セクションとする計算プログラムで、このプログラムを用いて圧力分布を求めた。この例の場合でも、当時のPCの処理能力では計算には昼夜ぶっ通しで5日ほどの時間がかかった。計算機の演算速度が遅かっただけでなく、当初組み込まれていた小さなメモリ容量では場所毎の計算結果を記録するには不十分なため加算途中で計算が止ってしまうことも起こった。メモリ容量に見合う程度に差の小さな計算結果を省くあるいは無視という処理を加えての計算であったのだが。演算速度もメモリ容量も桁違いに進歩している現在では想像しがたいことと思う。幸いなことに、アナログ的に頭の中でイメージした圧力分布はPCによるシミュレーションでの最適化の結果に近いものであることが判明し、ほっとしたのを思い出す。

図1に次元有限要素法による計算結果を示す。電子ビー

図1 (上段): PFリングのノーマルセルの負荷（ビーム電流1 mA, ダクト単位長さ当たりの光子入射強度）分布, (中段): コンダクタンスも考慮した実効排気速度の分布, (下段): 圧力分布（光脱離イールド η とビーム電流 I_B で規格化）。

ムは図の右から左へ進んでいる。また偏向電磁石の下流端を横軸のゼロとして表している。圧力は負荷原因となるビーム電流 I_B および光脱離係数 η で規格化して表してある。したがって、実際のリング内の圧力を推定するには、ストレージ電流 I_B と到達していると思われる光脱離イールド η をグラフの値に乗ずればよい。 η と I_B で規格化した PF のノーマルセルと呼ばれる範囲の平均圧力 $p[\text{Pa}]/\eta[\text{molc/ph}]/I_B[\text{mA}]$ は 7.2×10^{-4} という値である。NSLS の X-ray Ring の設計値をパラメータに選び、彼らの設計した真空系について図 1 と同じシミュレーションを行ってみた。低エミッタンスを狙って電磁石を配列したラティスからなる彼らのリングのノーマルセル部の狭いダクト内の規格化平均圧力値は 3×10^{-3} となり、PF のそれより明らかに 5 倍弱高いという結果を得た。すなわち、同じ条件ならビーム寿命が PF の 1/5 になることを意味している。実際、X-ray Ring のビームダクト内圧力は PF より高く、その結果ビーム電流が直ぐに減少するためリング運転に伴う放射光照射によるクリーニング（光焼きだし、あるいはビームスクラブと呼ばれる）もなかなか進まない状況となっていた。性能競争となっていた二つのリング運転の実情は、圧力分布のシミュレーションの計算からも裏付けられた。

図 2 の排気速度の図では、偏向電磁石直下流に配置したチタンゲッターを内蔵するポンプポート部の排気速度が大きく、偏向電磁石内に配置した DIP の効果が小さいように見える。しかし圧力曲線を見ると DIP off によって系内の圧力が高まり DIP の効果が大きいのが見て取れる。

4.7 リングの圧力計測と表示

リングダクトに沿っての圧力分布をシミュレーションで画くことはできたが、電子ストレージリングを運転し放射光が発生しているときの実際の圧力分布はどのようになっているかを測定する必要がある。リング周長 187 m に B-A 真空計を 48 個取り付けた。ここで云う電離真空計は後に稿をあら

図 2 一酸化炭素および水素に対するダクトに沿った系内の実効排気速度分布（上）と規格化した圧力分布（下）。排気ポート部にはチタンゲッターとイオンポンプ（図では 2 箇所）、偏向電磁石部に分布型イオンポンプ DIP（図横軸の 0～1.8 m の間に）が配置されている。パラメータはチタンゲッターの吸着確率 s (CO および H_2 に対して $s = 0.3$ の場合と $s = 0$ の場合)。下図の一点鎖線は (η と I_B で規格した) 圧力 p への DIP off の影響を示す。

ためて説明するが、特別に注意を払ったものである。真空計相互間の距離は平均で 3.6 m ほどになる。リングトンネル内は運転中には放射線レベルが高くなるので、B-A 真空計回路はリングトンネル内には設置できず、リング地下の機械室にリングに沿って配置した。

ベーキングを済ませリング運転をスタートした時、ビーム電流がゼロのバックグラウンドでは 10^{-8} Pa 台に達していても、ビームクリーニングの効果が未だ小さいリング運転の初期においては光脱離が大きく数ミリアンペアのビーム電流であっても圧力が 10^{-4} Pa 台まで上昇することが起こった。すなわち、測定すべき圧力領域は 10^{-9} Pa～ 10^{-4} Pa と 5 桁になる。その当時イオン電流計測用のアンプはダイナミックレンジが 4 桁のものはあったが 5 桁のものはなかった。当時市販されていた電離真空計の回路は自動レンジを取り入れることで 4 桁の広帯域対応としていた。自動レンジの真空計からの圧力データを取り込む場合に値と桁の両者（指数と仮数）を読み取る必要があり、当時の PC (NEC PC9800) の性能で圧力をグラフ表示するには難があった。

助手の北村英男君と相談しながら、真空計のアンプを 4 桁の固定レンジとして値だけを読み取ればグラフ表示の負担が少なくてすむことから、固定レンジのオペアンプを用いる方式とした。その代わり、立ち上げ時には一桁高い領域にプリセット、運転が進んでビームクリーニングの効果が現れてきたら一桁下の領域にプリセットすることを手動で行うことにした。各真空計からは常時垂れ流しでイオン電流値を吐き出させ、新規開発のデータ収集回路を用いて真空計からの出力をシリアルに読み回することでデータを集めることにした。ビーム入射路用真空計を含めると 50 数台になる B-A 真空計回路を上記のような考えに基づき特注した。

リングの 48 台に加えビーム入射路の電離真空計の出力を読み回す時間は切り替え器の性能で決まるが、切り替え器を含む読み取りの性能は当初は数分ほどかかったが、やがて数十秒さらには数秒というように年と共に向上していった。データの画面表示は縦軸が対数の圧力、横軸をリング一周に相当する真空計の配置とした。圧力のグラフ表示画面は中央制御室の中央に置かれ、Torr 表示で 10^{-11} ；濃青、 10^{-10} ；青、 10^{-9} ；緑、 10^{-8} ；黄、 10^{-7} ；赤というように（真空の専門家でない）運転当番でも棒グラフの色で常時監視できるように工夫された。実際、立ち上げ時に調整用ビームが入射されるとビームが進んだ範囲までの真空が（光脱離のため）悪化し残りの未通過の圧力はバックグラウンド圧力のままとこの画面が見え、ビームモニターが無くてもしリングの何処までビームが進んだかが一目瞭然となった。電離真空計回路やデータ読み取り装置、さらにその表示と記録プログラムの作成の殆どは北村英男君による開発である。

リングに接続している放射光ビームラインの先にはユーザーの実験装置が各種配置され、様々なユーザーが多彩な実験を行っている。中にはミスをして実験装置から放射光ビームラインへ、さらにはビームラインからリングへガスを流してしまう事故も起こる。中央制御室では該当ビームラインに最も近い箇所のリング真空が他に比べ一桁以上悪化（棒グラ

フの色が変わる)したのを発見し、実験ホールの担当者へ連絡をとるといふようなことも少なからずあった。入射路の真空計も含めると50台余の真空計の圧力値をいつも頭に記憶していることはできないが、棒グラフの色で表示されていればパターンとして頭に残りやすく、オペレータは事故などの異常な圧力上昇をすばやく発見することが格段に容易になる。このような刻々に取り込んだデータを常時コントロールルームに表示するシステムも北村英男君がIN-SORでの経験を活かして構築し、リング運転当番の負担軽減に大きな貢献をした。

運転とともに圧力データが溜まり、8インチのフロッピーディスクがすぐ満杯になりハードディスクが必須となった。真空系の圧力記録を引き出すことで電子ストレージリングの性能を(例えば)一年前のそれと比較することが容易になり、

性能向上の一助となった。

PF 加速器のように長期にわたって信頼性の高い安定な圧力測定を続けようとしているところは世界的に見ても少ない。CERN では長期的に安定な圧力測定を心がけているようであるが、他の施設や研究所ではこのような配慮はほとんど見られなかったと記憶している。

PF リング真空系の基本設計は1978年からスタートし、ビームダクトや排気系の製作・製造、設置に関するいろいろな工夫を盛り込んだ3年間プラス α にわたる仕事を紹介した。リング真空系を構成する各種ハードウェアおよび思わぬ故障、その後のPF リングの性能向上については稿を改めて書くことにする。

(つづく)