

談話室

分子研 UVSOR 加速器建設時の失敗談

春日 俊夫 (高エネルギー物理学研究所放射光実験施設)

1. 序

1981年初夏、高エネルギー物理学研究所（以後 KEK）加速器研究系主幹の亀井亨先生に呼び出され、分子科学研究所（以後 IMS）から声がかかっているがどうするかと尋ねられました。当時、KEK では12 GeV の陽子シンクロトロン (PS) の建設が終了し、放射光実験施設 (PF) やトリスタン計画が提案されており、KEK 加速器研究系の助手として、次に何をしようかと迷っていた頃です。IMS の極端紫外光実験施設 (UVSOR) 計画のアドバイザーであった木原元央先生（現 KEKPF 施設長）が推薦されたのだと思います。根が単純で、軽率な私は自分の能力を考えることなく（ことの重大さを深く考えずに）受諾してしまいました。当時 KEKPS の高周波グループに属していましたが、何となく加速器の全体を扱っていないというフラストレーションが有ったのかも知れません。IMS には同年9月に移りました。当時 UVSOR の加速器コンプレックスの基本設計は渡辺誠先生（現東北大学）を中心とした多くの IMS スタッフ、外部のアドバイザーによりなされておりました。それ故、私になさねばならなかったことは、細部の設計、各コンポーネントの試験、個々の加速器のビームテストでした。私でも一応所期の性能を達成できたのは基本設計が妥当であったからだと思います。

2. UVSOR 加速器コンプレックス

最初に、UVSOR 加速器系の構成を述べておき

ます。前段加速器は15 MeV の電子線形加速器です。この部分は三菱電機製であり、所定のビームが出るまで製造者に保証して頂きました。線形加速器とブースターシンクロトロンとの間のビーム輸送系 (LEBT) は IMS 側で設計し、製造は三菱電機で行われました。ブースターは600 MeV、繰り返し周波数が約 3 Hz のスローサイクリング・シンクロトロンです。シンクロトロンの電磁石系及びその電源、真空系は三菱電機製であり、高周波加速空洞は日本真空製、高周波電力増幅器は日本電気製です。シンクロトロンからストレージリングまでのビーム輸送系 (HEBT) は IMS 側で設計し、製造は三菱電機です。光源の電子ストレージリングは入射エネルギー600 MeV で、750 MeV まで加速可能であり、最大蓄積電流は500 mA です。ストレージリングの電磁石系及びその電源は三菱電機製であり、真空系・加速空洞は日本真空製であり、高周波電力増幅器は日本高周波製です。各加速器間のタイミング系は私が設計し、今は無きある会社に製造を依頼しました。もちろん、その他入出射用のパルス電磁石やその電源、モニターヘッド等のために多くの会社のご協力を仰いでいます。各加速器のパラメーターを表1に示し、全体図を図1に示します。ここで一言、言い訳をさせていただきます。UVSOR 建設時には、制御装置の設計に人を割り当てる余裕が無く、古色蒼然とした制御システムを採用しました。この件は、後任者の磯山悟朗先生（現大阪大）と金谷範一先生（KEK）のご努力で立派

表1 UVSOR 加速器パラメータ

ブースターシンクロトロン	
前段入射器	15 MeV 線形加速器
入射エネルギー	15 MeV
エネルギー	600 MeV
ビーム電流	50 mA
周長	26.6 m
チューン	$\nu_x=2.25, \nu_z=1.25$
モメンタム・コンパクション ファクター	0.138
ハーモニック数	8
加速高周波	90 MHz
ストレージング	
エネルギー	600-750 MeV
ビーム電流	500 mA
臨界波長	57 Å
周長	53.2 m
チューン	$\nu_x=3.25, \nu_z=2.75$
モメンタム・コンパクション ファクター	0.026
ハーモニック数	16
RF 周波数	90 MHz
加速電圧	75 kV
放射減衰時間 (600 MeV)	$\tau_x=45.4$ ms $\tau_z=40.9$ ms $\tau_e=19.5$ ms
エミッタンス (600 MeV)	$\epsilon_x=8\pi \times 10^{-8}$ m.rad $\epsilon_z=8\pi \times 10^{-9}$ m.rad

なコンピュータ化された制御系に生まれ変わっています。

UVSOR の歴史年表を表2に示します。

3. プロローグ 火事

ある日、線形加速器からビームを出そうと電源を投入し、コントロール室でウォームアップをしていたところ、火災警報機が鳴り出しました。場所を調べるとシンクロトロン室です。どうせ誤報だろうと、松戸さんとノロノロとシンクロトロン室に行きました。ドアをあけるとどうでしょう。本当に火事です。線形加速器のモジュレーターのケーブルが燃えているではありませんか。シンクロトロン室に飛び込み消火器を持ち出し、粉末をかけたら一瞬にして消えました。それ以来、消火器をシンクロトロン室のドアの外に置くようにし

ました。

原因は、クライストロンの収束用ソレノイドのケーブルの端子が圧着不良で過熱したためです。端子板はアクリルでカバーしておりましたが、このカバーが燃えだし、上を通っていたケーブルに燃え移ったようです。実は、高エネルギー研の陽子シンクロトロンでもアクリルカバーが燃え出す事故に遭遇しています。私はアクリル製の端子カバーは嫌いです。

4. 失敗の始まり インフレクターに電圧がかからない

線形加速器、LEBT が完成し、シンクロトロンの電磁石の設置も終了した頃、これらの位置関係の測量を行っていました。シンクロトロンの入射用直線部とLEBTを設計どおりに設置するために、まずシンクロトロンの直線部に入射用静電セプタム（インフレクター）を精密にセットしました。その後静電セプタムのギャップにターゲットをはさみ、LEBTの上流側から望遠鏡でターゲットを覗き、LEBTをアラインメントしました。測量・精密設置後、インフレクターに電圧を印加しようとしたのですが、電圧がどうしてもかかりません。そうです。金属製のターゲットを取り外すのを忘れていたのです。

5. 失敗その2 シンクロトロンにビームが入らない

当時（今でも）線形加速器の知識が無く線形加速器の試運転は三菱電機にお任せしました。技術者の横で見ただけです。線形加速器・シンクロトロン間のビーム輸送路にも特に問題はなく、インフレクター直前のCT（矩形の開口部を持つフェライト製コアにコイルを巻いたCT。開口部とインフレクターのギャップを一致させておき、このCTをビームが通過すれば、自動的にインフレクターにビームが導かれる。）も無事ビームが通過しました。

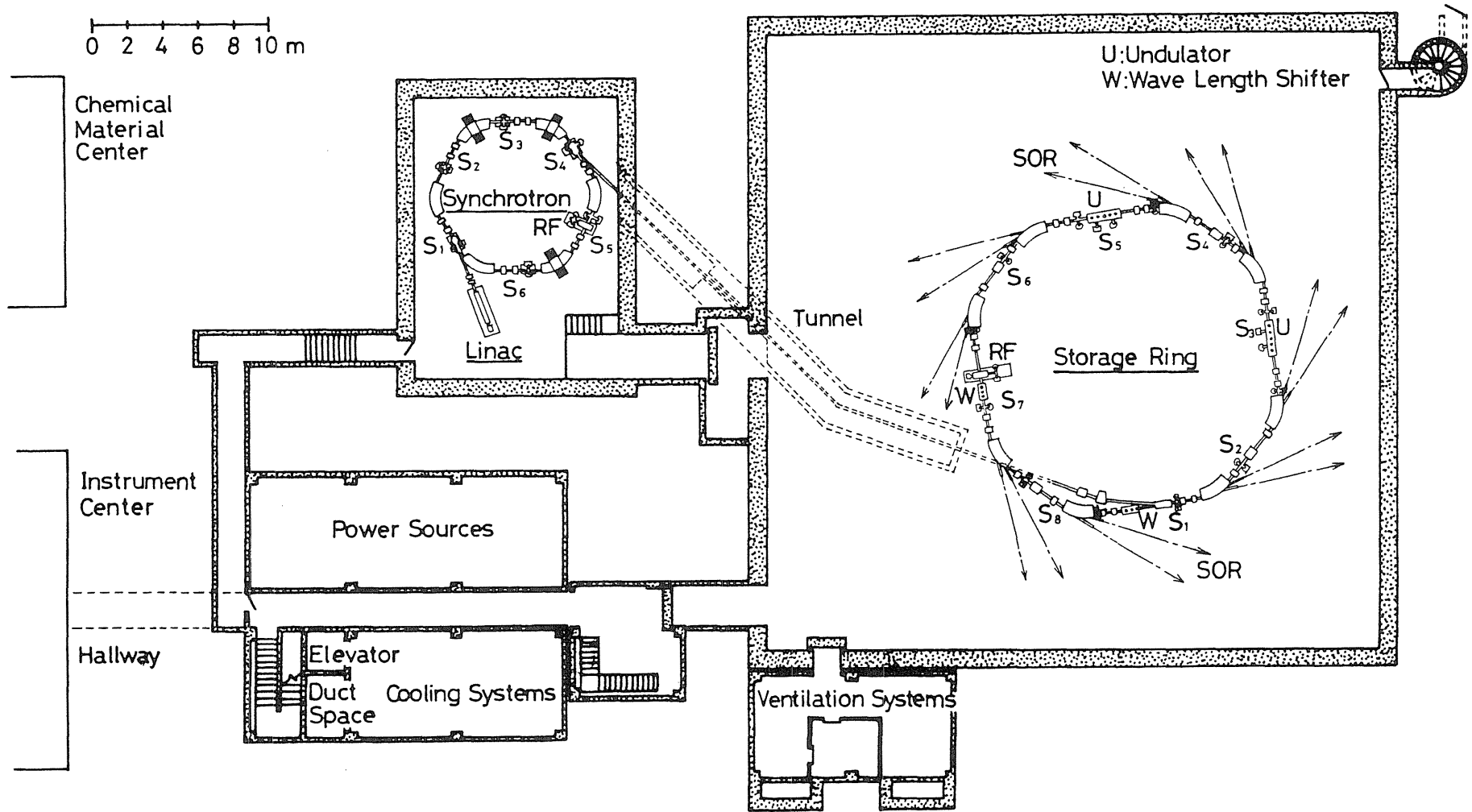


図1 UVSOR 施設平面図

表2 UVSOR 歴史年表 (創生期より中世まで)

年 月	各機器 据付・調整	ビーム調整	利 用
81	線形加速器据付 シンクロトロン据付 線形加速器調整		
82		線形加速器ビーム試験	
83			
1			
2		シンクロトロン入射試験	
3		(DC 磁場, 加速なし)	
4	シンクロトロン電磁石電源調整	線形加速器ビーム試験	
5		パラメータ測定	
6			
7		シンクロトロン入射試験	
8		シンクロトロン加速試験	
9	ビーム取り出し用パルス磁石設置		
10		ビーム取り出し試験	
11	ビームライン一部組立	ストレージング入射試験	
12			
84		ストレージング ビーム蓄積試験	
1			
2			
3		ストレージング	
4	ウィグラー, アンデューレータ設置	マシン・パラメータ測定開始	
5	ビームライン組立		
6			
7		COD 補正, ベタートロン関数測定	
8			
9		イオン・トラッピング現象観測・対策	
10			
11		動作点の最適化	
12			
85			
1			
2	ビームライン整備		
3	真空系一部改良		
4		枯らし運転 ウィグラー試験	
5			
6		新動作点最適化	
7			
8			
9		縦方向不安定現象観察	
10			
11			
12			
86			
1			
2		イオン除去法改良	
3	縦方向キッカー設置 真空系改良	枯らし運転	
4	アンデューレーターⅡ設置		
5		イオン除去法改良	
6			
7		挿入光源のビームへの影響	
8		ビーム減速試験	
9			
10			
11		自由電子レーザー研究開始	
12			
87			
1			

シンクロトロン用の電磁石電源は完成が遅れていたため、1983年2月に小型の直流電源を用いてシンクロトロンへの入射の試験を開始しました。入射がうまくいくかどうかを調べるために、シンクロトロン内にセラミック製の蛍光板および3カ所に電流トランス (CT) を入れておきました。インフレクター前のCTをビームが通過したので、電磁石を励磁し、インフレクターに電圧をかけると蛍光板が光るようです。そこで蛍光板を引き抜きバンプ電磁石 (パーターベーター) を励磁し、CTの出力を観測しました。どうやら1ターンはするようです。しかしながら、入射のパラメーターをどのように調整しても4ターン以上回ったという確認はとれませんでした。約1ヶ月間悪戦苦闘させられました。シンクロトロンはマルチターン入射方式を採用しているので、CTでビームを観測していても入射ビームなのか、シンクロトロン内を周回しているビームなのかよくわかりません。そこで強引に線形加速器の電子銃グリッドパルサー回路を改造してパルス幅を100 ns程度と短くして、入射後の周回の様子が明解にわかるようにしました。その結果、1個の偏向電磁石のトリムコイルに電流を流し、(水平方向?)の閉軌道を大きく変形させてやるとビームが千ターン以上持続する事がわかりました(図2)。そうこうするうち、電磁石電源が完成し、電磁石系を負荷とする試験が必要となったため、ビーム入射テストを中断し、この間にビーム入射困難の対策を立てることとしました。この困難の原因として、

- ① インフレクターと閉軌道との間の位置関係が悪い、
- ② 水平方向の閉軌道が大きくずれている、
- ③ 鉛直方向の閉軌道と入射路が不整合を考えました。①の対策としてインフレクターの位置の再測量と真空容器外からインフレクターの位置・角度とも自由に変更できる機構をつくりました。②の対策として偏向電磁石がパルス励磁さ

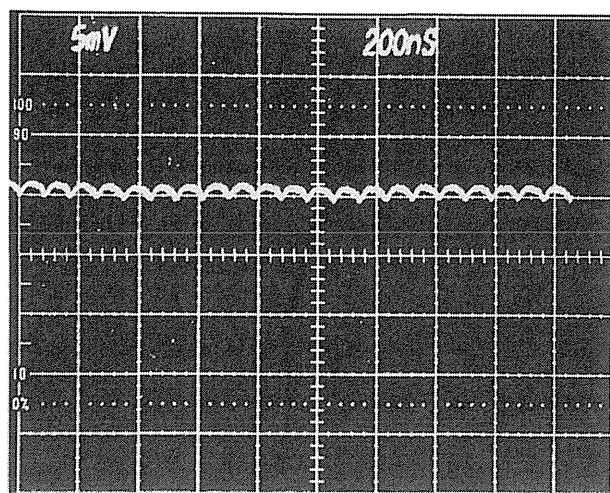
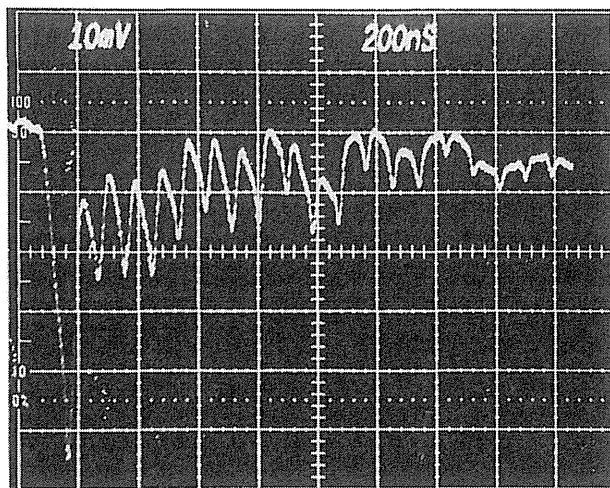


図2 シンクロトロンを周回するビーム (電流トランスで観測)
(写真上) 入射直後
(写真下) 入射後50 μ s

れても、トリムコイルに電流を流せるようなチョークコイルを考えることになりました (実行はしなかった)。③の対策としては入射路のステアリングコイルを使えば鉛直方向の閉軌道に合わせる事ができるはずなので、インフレクター直前のCTの鉛直方向の開口が小さくビームを邪魔をしているのだらうと思い、CTをやめて大きな開口部を持った二次電子放出型モニター (SEM) と取り替えました。結局のところ原因は③であつたらしく、ビームテスト再開時にすぐに、水平方向の閉軌道を大きく変形させなくてもビームの入射が可能となりました。

多分、入射用直線部のところで鉛直方向の閉軌道が大きく乱れていたものと思われます。残念ながら、この問題を解明するための暇はなく、次の加速試験へと移っていきました。後日、入射効率を上げるため、入射直線部付近の鉛直方向の軌道を変えるためのステアリングコイルを設置したところ効果的でしたのでこの予想は当たっているものと思います。各タイミングでチューンを測定しながら、偏向電磁石と四極電磁石の間のトラッキング調整を行ったところ、600 MeV までの加速は順調に進みました。

この例のように、シンクロトロンは実用的な調整のみを行いました。加速器科学の観点から研究を行えばおもしろいことが残っているかも知れません。

6. 失敗その3 再びシンクロトロンにビームが入らない

シンクロトロンの加速試験が進行している間に、他のグループではビーム取り出し用のパルス電磁石及びそれらの電源の製作・試験が進行しており、1983年9月にシンクロトロン内への組み込みが行われました。ビームの取り出しは、エネルギーが450 MeV（実は最初はシンクロトロン電源の関係で450 MeVで行われました）になった瞬間に60 ns 程度の時間内に立ち上がるキッカー電磁石でビームを内側に蹴り、ベータートロン波長で $3\pi/4$ 進んだところのセプタム電磁石（ディフレクターと呼んでいた）の開口部に飛び込ませることにより行います。ディフレクターの開口部には、開口部と同じ寸法の穴のあいた蛍光板を取り付けておき、ビームが開口部に入るようキッカーの励磁電流を調整します。

450 MeV（あるいは600 MeV）で鉛直方向にビームをステアする装置はないので、上下方向の位置あわせは、キッカー及びディフレクターを上下させることで行っています。

ビームが加速できたので、取り出し用キッカー

を1回励磁しました。次の瞬間、シンクロトロンにビームが入射できなくなりました!! 当時、ダラスベリ研究所のG.サクソン氏が加速器のアドバイザーとして来所しておられ、二人で原因及びその解決法を議論したことを思い出します。半日ほど悩んだ末、キッカーの残留磁場ではないかと思い当たりました。キッカーから高圧パルス電源を取り外し、直流電源を接続し、逆電流を流したところビームは復帰しました。結局、パルス電流に直流電流を重畳させることで問題を解決しました。キッカー磁石用のフェライトを探してきて、その上にカプトンを巻き、ネオンケーブルを数10ターン巻きチョークコイルをつくり、それを介して直流電源をキッカーに並列に接続しました（図3）。再びビームを入射・加速できるようになりました。ディフレクターの前の蛍光板を見ながらキッカーの励磁電流をかえ、ディフレクターを上下させて、ビームを開口部に導くことに成功しました。

なお、キッカーの図面と、フェライトのデータシートから残留磁場を計算してみると入射エネルギーにおいては大きな閉軌道の歪みを生じることがわかりました。ところで、本番用のキッカーは励磁試験をしていなかったのでしょうか？

7. 失敗その4 ビームが出ていかない

無事ビームはディフレクターの開口部まで導かれました。HEBTの途中には壁電流モニター

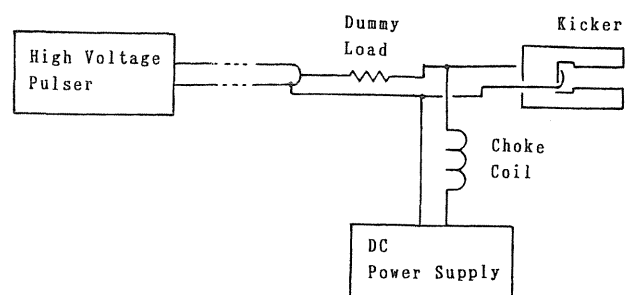


図3 キッカーの残留磁場を打ち消すための回路
チョークコイルを介して打ち消し電流を流している

(WCM) が設置してあり、通過ビームがあれば電流が読めるようになっていました。ところがディフレクターの励磁電流を調整しても、WCM の出力は現れませんでした。実はキッカーのコイルは最初、所定の極性と逆接続されており、極性の入れ替えてをしております。そこで担当者に尋ねたところ、どうやらこの電磁石も逆極性のようです。さらに悪いことに、ディフレクター（セプタム電磁石）のセプタムの一端で接地される構造となっており、極性を変えることができません。もちろんパルス電源の出力パルスの極性も変えることは容易ではありません。ディフレクターは真空容器に絶縁して固定しているという担当者の言葉に従い、強引にパルス電源を逆接続しましたが、励磁すると一瞬にして絶縁破壊を起こしてしまいました。仕方なしに、再びストックルームに行きフェライトを探し出してきました。パルス電圧は大したことがないので、AC用のコードをフェライトに巻き付け、反転トランスを設計・製作しました。これで無事シンクロトロンからビームを取り出せるようになりました。サクソン氏からは、磁石の極性を調べずに真空容器に入れるなんて非常識だとしかられました。

この手作りの反転トランスは、どうやら電流容量不足だったらしく（製作直後のパルス波形観測時にうすうす気がついていましたが）、ふと気がつくともビニールコードがどろどろに溶けかかっている、あわてて扇風機で吹きました。その後電流容量の大きなトランス（これも手作り）に変えました。

8. 失敗その5 昨日通ったビームが今日は通らない

シンクロトロンからビームが出たのでHEBTのビーム通過試験を行いました。ビームをストレージリングの直前のインフレクター（セプタム電磁石）まで導いたところでその日の試験を終了しました。次の日、ストレージリングへのビーム入射試

験をすべく、HEBTのビーム通過試験を再開しました。ところがどうしてもインフレクターまでビームが来ません。このときも、オロオロとシンクロトロン室、HEBT、ストレージリング室を駆け回りました。結局のところ、HEBTの途中にあるゲートバルブが半開きであることを発見しました。そのゲートバルブは開いていくと途中で回転が固くなり、全開と誤解されたのです。このバルブを全開するとビームはインフレクターまで簡単に導かれました。

しかし、昨日はどうしてビームが通ったのでしょうか。半開のバルブの隙間をくぐり抜けたのでしょうか？ それならなぜ今日は隙間を通り抜けられないのでしょうか。未だに疑問です。もし、その日もビームが通過したなら、長いこと半開のまま運転していたかも知れません。

9. 失敗その6 窓ガラスを割った

これまでの経験より、すべての電磁石の極性の確認は私と蓮本さんとでする事にしました。ビームの入射試験をするとストレージリングの場合はあっという間に蓄積に成功しました。リングには4カ所ほどビーム診断用の光取りだし窓がついています。最初の放射光を見るのは私だと決心をしていましたので、蓮本さんと二人で抜け駆けをして、リング内でビームが光っているのを確認した後、皆さんに報告しました。

長期シャットダウン後のビームによる真空路のクリーニング時のことです。真空度が徐々によくなり、最大蓄積電流が大きくなっていきました。約350 mAに達したとき、いきなりコントロール室の真空警報盤の警告灯がつき警報音が鳴り出しました。ビーム診断用の光取り出し窓が割れているのが発見されました（誰がどのように発見したかは覚えていません）。もちろん光取り出し窓の熱負荷や温度上昇を計算し、OKと思ったからこのような無茶なことを行ったのです。この計算には光が一樣にガラスに当たるとしていました。放

射光はガラス窓に水平に幅 2~3 mm の範囲に集中する事を無視していたのです。

現在は、銅製の鏡を用いて短波長成分を吸収し、可視光のみをガラス窓を通過させています。

10. 失敗その7 ストレジリングにビームが入らなくなった

ある日突然ストレジリングにビームが入射できなくなりました。どうもリング内に邪魔者がいる様子です。そこで、各種電極を疑いフィードスルーの導通チェックをしました。するとチューン測定用の電極が地絡しているではありませんか。泣く泣く真空系を開けてみると、電極が一本はずれていました。電極のフィードスルーへの固定法が不完全でした。私の設計ミスです。現在のものは絶対に脱落しないと思います。

11. 失敗その8 アンデューレーターとウィグラー

アンデューレータにも泣かされました。これによるチューンシフトが予想していた値よりずっと大きかったからです。これは結局のところ、磁石片の機械的中心と着磁の中心がずれていることによって生じました⁷⁾。メーカーの方が現地で着磁をしているのを見て(磁気中心の管理に対する関心のなさを見て)、早く気がつくべきでした。

ウィグラーの励磁後、ビーム寿命が短くなる現象にも悩まされました。これはウィグラーの励磁をやめても、超伝導体が低温の間は磁場がトラップされる現象によるものと思われます。励磁終了後、電流の向きを反転し磁界の値を前回の値より減少させて励磁する事を繰り返し、消磁する事で解決しました。

これらの問題は、専門家にとっては当たり前のことだったのでしょう。勉強不足を恥じるばかりです。

12. 加速器グループ

私が加速器の責任者をしていた頃、加速器を担当していたのは私、米原さん(現原研)、木下さん、蓮本さんの4人でした。コミッショニングは私と蓮本さんが担当しました。それ故、上の失敗は主に蓮本さんと経験したものです。いつも蓮本さんが後ろから引っ張っていて、気の短い私の暴走をくい止めてくださっていました。上の失敗程度ですんだのは蓮本さんのおかげです。

木下さんは、電気回路の製作を担当してくださいました。おかげで、会社に頼めば長い時間かかる電子回路がすぐに手に入り、コミッショニング時に非常に助かりました。

米原さんは、私と蓮本さんがコミッショニングを担当している間、各機器の準備及び試験を担当していただきました。コミッショニングと準備を並行することで、建設期間を短縮することができました。

UVSOR の設計・建設には決定的にマンパワー不足だったように思われます。試験期間を短縮するために、設計が保守的となりました。私以後に加速器を担当した方々にご迷惑をかけているかも知れません。

加速器コンプレックス全体を一人で担当できる機会はそう多くないと思います。このチャンスを与えてくださった渡辺先生、井口先生など多くの方々に感謝いたします。

文献

- 1) 入射用シンクロトロン設計 UVSOR-7 (1981).
- 2) UVSOR ストレジリングの設計 UVSOR-9 (1982).
- 3) M. Watanabe et al.: IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-28 (1981) 3175.
- 4) I. Koyano et al.: Nucl. Instr. Meth. **195**, 273 (1982).
- 5) T. Kasuga et al.: IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-32 (1985).
- 6) Construction and Commissioning of Dedicated Synchrotron Radiation Facilities, BNL51959 83 (1985).
- 7) H. Yonehara et al.: The Effect of Field Error of an Undulator Magnet on the Tune, JJAP **26**, 1939 (1987).