

話 題

KEK-PS 初期の主リングビーム加速運転時の思い出 —主リング電磁石グループ若手の苦闘—

高崎 榮一*

**My Memories of an Early Accelerator Operation at the KEK-PS Main Ring
—struggles of young researchers, who belong to the main ring magnet group—**

Eiichi TAKASAKI*

1. はじめに

2006年3月31日をもって、PS加速器は運転停止となり、私自身も同日高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設を無事退職することが出来ました。振り返ると、PS加速器に対する印象は懐かしさばかりでなく、後悔の念を禁じえません。私はPS加速器から色々学びましたが、私がPS加速器の為に何をしたのか列挙するものが見つかりません。このような後悔と反省の時期に、加速器学会から何かを書いてくれと原稿の依頼を受けました。そこで仕方なく、私は、1970年代の主リング電磁石グループに属した時代の思い出を書いてみることにしました。

私が高エネ研加速器、主リング電磁石グループへ入ったのは1972年8月で、同時期には多くの若い方々も入所しました。入所時のグループメンバーは、木原元央、遠藤有聲、荒木章、五十嵐勉、春日俊夫の各氏であり、引き続き、安東愛之輔氏、落合進一氏が参加しました。1970年後半には、熊谷教孝氏もグループに入ってきました。同時期に我々の居室に屯していたメンバーは、神谷幸秀氏と高山健（当時、大学院生）氏であり、周辺に居て色々加速器理論を指導して下さったのは、鈴木敏郎氏と鎌田進氏でした。しかし、1970年代、このメンバーがずっと固定されていたわけではありません。私は1976年3月から1977年5月までフランスへ遊学（超伝導電磁石の勉強）し、1980年4月にPS入射器へ移動しました。春日氏は、1978年2月から一年間CERNとFNALへ留学し、帰国後RFグループへ移動しました。落合氏は在職1年で転職しました。木原先生は放射光施設の建設に参

加し、非常に多忙な日々を過していました。遠藤さんはPS-取り出し系の建設を精力的に行っていました。

本稿では、さて私を含めた主リング電磁石グループ若手の仕事はどうだったか、特に、加速器の性能改善と加速器の運転（Study）への赤裸々な失敗例・苦闘を、思い出して書きたいと思います。どのような加速器Studyを行ったかを中心に書き、“余談”と言う形でもやま話を書きます。具体的な氏名が出て、私の間違い・勘違い等々でご迷惑をかける方々も多いと思いますが、広い心で“一老人のボケ”として許して下さい。

本文中の図・写真等々の参考資料は、私の手元にある資料（ほとんど手書きの資料で、予備資料かも）、運転LOG-NOTE、PS-加速器報告書です。また、我々のグループは、不真面目そうで真面目な集団でしたので、“基本的なビームダイナミクスが分からなければ、製作している装置の機能が理解出来ないし、性能を発揮出来ない。”と言う責任者の影の声を感じていましたので、E. D. Courant and H. S. Snyderの論文が必読であり、他に、R. Hagedorn CERN 57-1, 14, G. Guignard CERN 76-6等々の論文が読まれていた。

表1にこの思い出の期間中のPS加速器及び周辺での主な出来事をまとめました。

余談①；私を含めて多くの若い人が入所しましたが、最初の仕事ははっきりと把握出来る例がありません。当時、亀井亨先生のカメラマンとして日立製作所で電磁石製造工程を撮影する話がありました。入所して直ぐの安東氏もその出張に参加し、“名誉ある”撮影の照明係に選ばれました（実情は新人に行動の自由な役を押し付けたのですが）。故に、KEK入所後

* 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization
(E-mail: eiichi@post.kek.jp)

表 1 1970年代のPS 加速器運転状況

PS-加速器の主な出来事 (1975/11/21~1980/5/末)	
1975/11/21	主リングでビーム-Altturn確認。
1976/3/4	8GeV加速成功。約 2×10^{10} ppp。
1976/7/末	internal target テスト開始。
1976/12/27	12GeV加速成功。約 3×10^{10} ppp。
1977/2/22	泡箱写真撮影成功。
1977/7/19	K1-lineでDC Separator実験開始。
1977/11/19	遅い取り出しライン上のスクリーンモニター光る。
1978/8/	約 2×10^{12} pppで8GeV加速に成功。
1980/4/	偏極陽子加速用前段加速器建設開始
1980/5/14	約 4.1×10^{12} pppで12GeV加速に成功。
1983/2/	リアック増強の為に建設始まる。

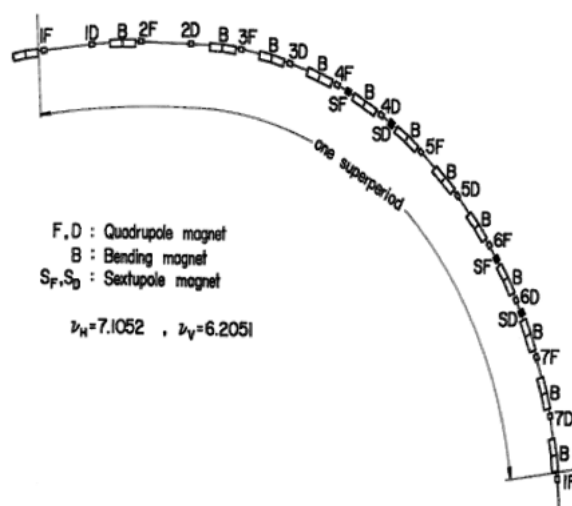


図 1 PS-主リングの磁石配列

の彼の初仕事は、照明係と言う重要な任となりました。

2. 電磁石の磁場測定

PS-主リングの主電磁石は、48 台の偏向電磁石と 56 台の四極電磁石であり、図 1 のような磁石配列で 4 周期の構成となっています。写真 1 は、主リングトンネル内に設置された偏向電磁石と四極電磁石の一組です。

偏向電磁石は、写真 1 に見られるように、サジッタを小さくし、真空ダクトの作業性を確保する為に、2 台の C 型コアを、角度を付けて並べ、1 個のコイルで 2 コアを励磁出来る構造になっています。また、高エネルギー（12 GeV まで）ビームを加速する為に高い磁場が要求され、主電磁石のコアには方向性鋼板が採用され、形状が決められています。

磁場測定は、このような構造を持った偏向電磁石がビームダイナミクス上有効な磁場分布を持っているかどうか判定するデータを得る為に行われた。そこで、48 台の偏向電磁石の磁場測定をどのように実施することが有効であるかグループ内で議論された。磁場測定の担当は、春日氏、五十嵐氏と私でした。

磁場測定法として、励磁電流をパルス運転し、サーチコイル出力を VFC (Voltage Frequency Converter) で積分して磁場強度・磁場勾配を測定し、残留磁場をホール素子で測定することに決めました。特に、2 個のコアの合わせ部（楔部）の影響及び磁場積分の測定法が議論になりました。

CERN では、磁場の mapping 測定で荷電粒子の運動が計算され、その経路と直線積分経路が比較され、

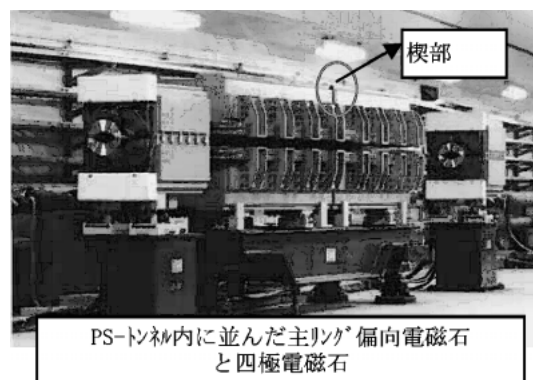


写真 1 主リングトンネル内に設置された主電磁石

直線積分経路で充分であると結論を出していた。我々も、磁場 mapping を測定し、軌道計算をし、磁場積分量を求め、2 種類の直線積分経路の測定データと比較した。図 2 に測定結果を示す。最終的に、図 3 に示すような直線積分経路で磁場測定を実施した。サーチコイル長を 100 mm とし、100 mm step で測定し、磁場積分とした。これは、偏向電磁石のビームダイナミクス再計算の際、100 mm step で計算出来る可能性を残す為でもあった。参考に、図 4 にコア中心での k 値分布の測定結果を示す。

主な差異は k-値の差であると判断した。

実際の偏向電磁石の磁場測定は、偏向電磁石がトンネル内に据え付けられた後、実施された。通称“ポータブル電源”と言われた車輪の付いた大きな電源をクレーンで引っ張りながら移動し、大蛇のようなケーブルを引き回し、精密な測定架台・測定系を移動しながら、磁場測定を行った。写真 2 は、自作回路がトンネ

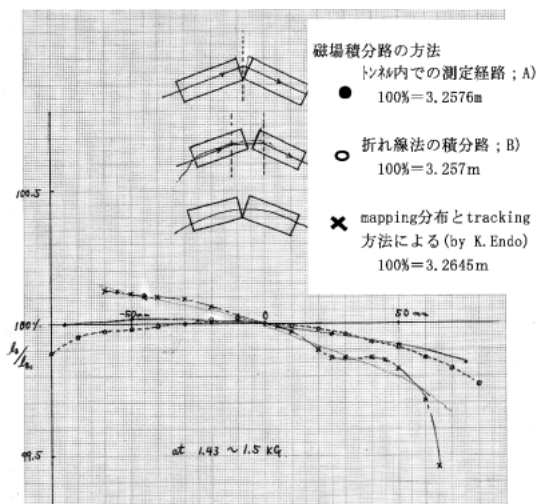
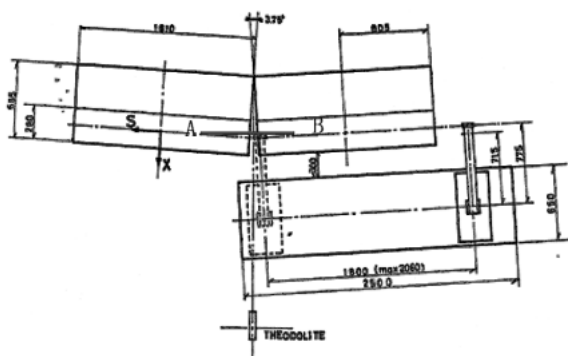


図2 偏向電磁石の測定法結締の為の磁場積分経路の例



機部の磁場測定をどうするか？
 A) 図のようなS-軸積分(100mm)
 B) 赤字のA-B間直線の積分
 C) mapping磁場測定。
 D) 円弧座標変換による影響
 等々が考慮・比較され、mass測定には、
 A)の測定ルートを採用した。

図3 偏向電磁石の多量磁場測定方法

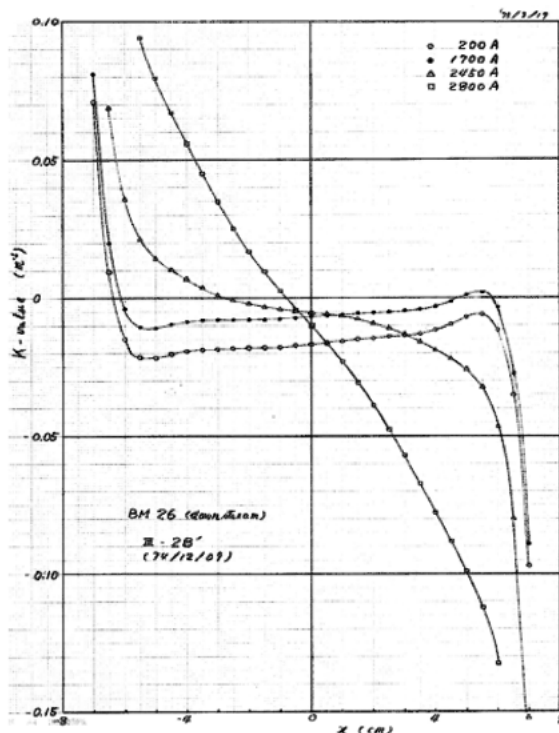


図4 コア中心のk-分布

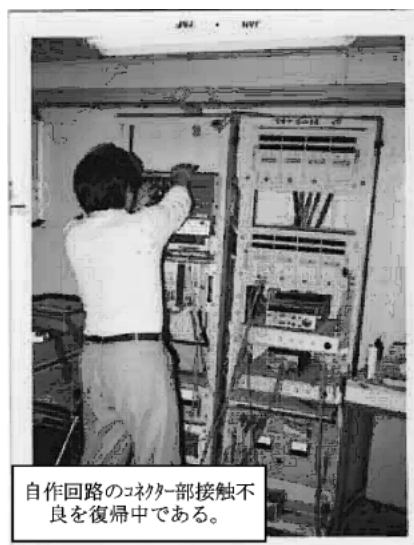


写真2 自作回路の接触不良の復帰作業中

ル内移動によりコネクターの接触不良を起こし、モジュールをガタガタさせ復帰中の私の後姿です。これには悩まされた。

我々は、PS-北実験室にて、四極電磁石の磁場測定を行った。励磁電源としては、素研時代のMG電源を隣の建屋（現在、PS-真空実験棟）に移設し、使用した。

これらの磁場測定結果から磁場の高次成分を求め、色々な型の補正電磁石系の設計を行った。

余談②；図4のk-値の変化は、若干予想されたものと異なっていた。その理由は、C型の加工時の姿勢と据付時の横置き姿勢の違いによるギャップの変化、

電磁力の変化によるギャップ（約0.1mm変化）の変位であると考えられた。

余談③；四極電磁石の上下分割後の再組立時のボルト固定の締め付け力による磁場勾配の変化，ビーム方向の位置出しによる磁場特性の再現性等々も調べられた。気にする量でなかった。

余談④；精密アライメント時には、大きなC型偏向電磁石があたかも“蒟蒻”のように柔であることも

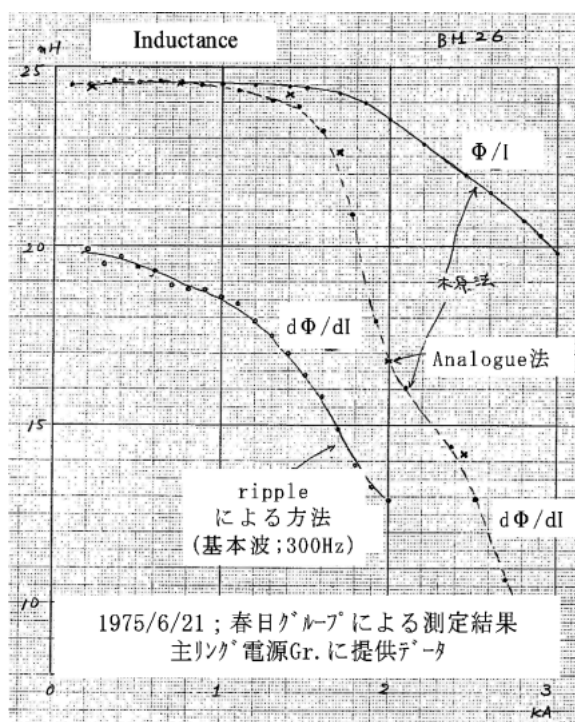


図5 偏向電磁石のインダクタンス測定

実感した。又、アライメント調整終了と一安心した後、ボルト等の“なじみ”でゆっくり据付位置が移動することも知った。

余談⑤；真空 chamber による磁場への影響も、予備データとして測定した。(多分，春日氏)

余談⑥；電源グループから要求されていたインダクタンスも，“ポータブル電源”のリップルを活用し，春日氏が旨い方法で測定した。図5に測定結果を示す。

その他色々な出来事があったが，ここでは割愛する。最終的には，1975年，主リング電磁石が精密アライメントされ，他グループも諸々の機器を設置し，真空排気も完了し，主リングへのビーム取り入れが可能な態勢になった。

3. 主リングへのビーム入射から加速まで

1975年11月21日，ビームの主リング入射への試みを実施され，22時52分，ビームが主リングを1ターンしたことが確認された。今でも，私は覚えているが，当時，“良かった。”とひしひしと感じると共に，“磁場測定もアライメントも概ね間違っていなかった。”と喜びも感じていた。

表2に，当時の記憶を蘇らす為に，当日のLOG-NOTE から引用した主な運転経過を書きだしました。

11月28日から主リング入射のStudyが実施され，各グループが主リングでのビーム加速の為に色々

表2 主リング最初の入射時の記録
(当時のLOG-NOTEより抜粋)

主リングへの最初にビームを入射した時の状況 (1975/11/21)	
12:00	リニアック調整開始
16:15	ブースター調整開始
18:00	ブースター取り出し調整開始
19:52	主リング入射セパム; ON 但し，主リング電源; OFF である。 I-1Dのプロファイルにて主リング内ビーム到着。
20:27	主リング電源; ON DC運転で入射磁場1452ガウスにする。
20:55	主リング入射調整開始 リング内の各sectionの代表BPM3ヶ所の信号を観察しながら，入射磁場を大きめのステップで下げていく。 1440ガウスで，BPM信号の移動確認。
21:55	入射磁場を上げていく。
22:26	入射磁場1400ガウスから小ステップで最適条件探す。
22:52	3ヶのBPMとも信号確認。又，ビーム強度モニターで1 turn確認する。 入射磁場1430ガウスであった。
22:55	この近傍の入射磁場で，BPM信号を見ながら，セパム磁場調整する。
23:32	入射磁場1445ガウスで，10 turns確認。
0:32	再度，入射磁場の上下で探索する。 ビーム強度は約 1×10^{11} pppである。
2:20	ブースターRFトラブル発生。ビーム; OFF
3:17	ビーム; ON
4:00	入射磁場1460ガウスでinteger共鳴に入るか。
6:40	ロスモニターに100Hzでのロス確認される。
7:00	ブースターRFトラブル発生。ビーム; OFF
7:29	ビーム; OFF 運転終了。 大体10 msec廻っていることを確認した。

と調整を行った。1975年年内の主なStudyは主リング入射時及び入射時間帯のStudyであり，1976年以降は概ねビーム加速の為にリングRFの調整でした。

1976年3月4日0時32分にビーム強度 2×10^{10} ppp程度で8 GeVまで加速に成功しました。不幸にも，私は，2月28日にフランスへ行き，この感動の場面に居合わせることが出来ませんでした。しかし，西川先生からのFAXを頂き，一人感激していたことを思い出します。

この期間のStudyは非常に精力的に行われた。1週

間は、“Study + 検討会 + 作業” の繰り返しで過ぎていった。私自身は、偉い人の後をついて廻っていただけで、私のノートには、B-とQ-mag のトラッキングとリップルのデータがいっぱい書き込んであるだけでした。

我々に関連ありそうなこの期間の Study 結果を以下に列挙しておきます。最初の加速器運転時、何に関心があり、何を実施したか分かります。

- 加速器立ち上げ時、最適入射磁場を調べる。ブースター取り出し時の Δr の変動で、入射エネルギーが変わる。
- coherent 振動が続かない。何故か？
6 極電磁石を励磁し、振動を続けさせる。
- Q-と B-mag. のトラッキングにリップルがある。損失モニターにリップルによる損失が見られる。
- ライン上のプロファイルから matching が計算通りに取れていないと判断できる。
- Vertical 測定 COD と精密アライメントのエラーからの推定 COD が合わない。
- COD の補正が必要である。Local バンプが閉じない。しかし、補正するとビーム損失が発生する。
- クロマテシテイ = -23(H) であるが、natural クロマテシテイ = -13 より大きい。
- 入射ラインのプロファイルから、エミッタンスは 50(H), 15(V) $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ ぐらいであろう。
- (7,7) 付近の tune survey の結果では、 $3\nu_x = 22$, $3\nu_y = 22$, $\nu_x + 2\nu_y = 22$, $2\nu_x + \nu_y = 22$ の resonances は意外に強い。 $\nu_x = \nu_y = 22/3$ でのビーム life は 20 msec 程度で短い。
- 入射時間帯での典型的ビーム life は、入射直後で約 50 msec であるが、後半では 0.7 sec と 2 段階になっている。
- 真空度による寿命は、 10^{-5} Torr で約 0.33 sec であった。これは測定値です。

等々であった。

我々の関心は、測定された COD とアライメントから推定される COD の不一致と磁場測定で観測されていなかった高次磁場成分の存在に集中した。その為、度々アライメントの測定が実施された。図 6 に、1974 年 9 月から 1977 年 9 月頃までの Vertical アライメントの変動を与える。このアライメント結果による COD 計算では、測定されたような COD をどうしても得ることが出来なかった。又、磁場測定結果の不備又は磁石の異常発生等々も考慮し、全ての磁極に巻かれた 1 turn コイルで各磁石間に異常な差がないかを調査した。調査結果、異常なしと判断した。私は、

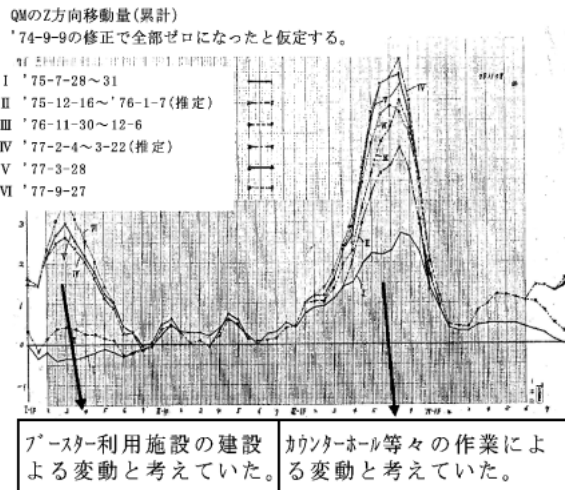


図 6 主リング四極電磁石の Vertical アライメントの変化

表 3 真空チャンバーの磁場への影響まとめ

BM における真空チャンバーの影響	
Exp.	1976. 2. 9 ~ 1976. 2. 13
①	ビームの影響は sextupole と decapole 成分の増大と認められる。中に強場も含まれる。
②	チャンバーの影響は field level とともに減少する。
③	チャンバー自体の remanence も観測されるが、透磁率の結果が大きい。
④	チャンバーの溶接部(右側)の影響は特に認められる。
⑤	effective length に対する chamber effect は magnet 中央部、transverse distribution に対するものとほぼ同じである。sextupole, decapole 成分の増大は強磁性と同程度である。
⑥	Chamber による sextupole, decapole 成分は B_0 に対して $\frac{B_6}{B_0} \sim -2 \text{ m}^{-2}$ 、 $\frac{B_{10}}{B_0} \sim 6500 \text{ m}^{-4}$ である。
この報告後、1976/2/23の打ち合わせで、この磁場に関して補正の見通しが立ったと結論されている。因みに、flat topでの B_6/B_0 は約 -1.6 m^{-2} である。	

測定 COD とアライメントからの COD の差異の問題に、その後ずっと悩まされることとなった。

前述した Study の結果は、磁場の高次成分が含まれていることを示唆していた。グループとして真空 chamber による磁場分布への影響を測定した。測定結果は、真空 chamber により 6 極成分と 10 極成分が非常に大きくなることを示した(再確認かも)。振動に関する多くの現象は、この大きな 6 極成分の存在で説明可能と判断した。磁場測定結果は、1976 年 2 月に表 3 のまとめで報告された。図 7 に真空 chamber による磁場への影響を示す。但し、図 7 には後年

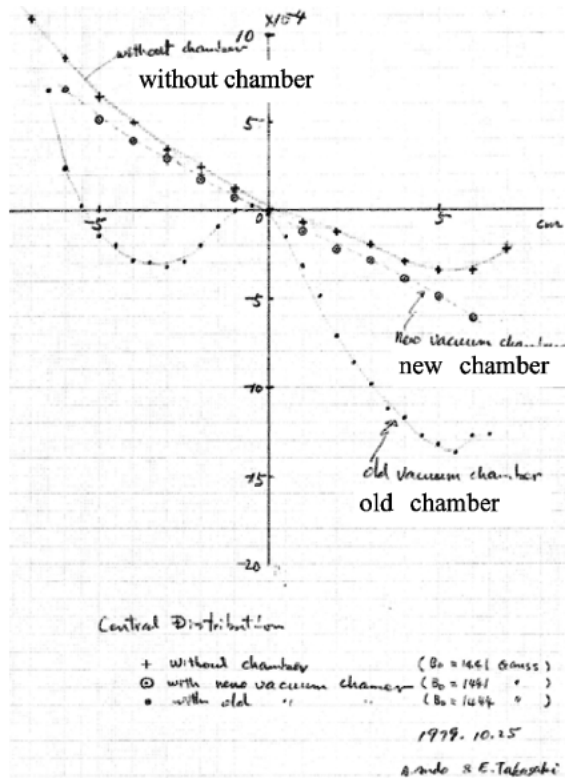


図7 真空 chamber による磁場分布の変化
1979年夏交換された真空 chamber との差に興味がある。

使用される新 chamber の効果も示されている。当時の私は、勉強不足で、この大きな6極成分（図4に見られるように、この値は Flat-top 時の6極成分 = -1.6 m^{-2} とほぼ同じであり、補正6極電磁石で補正可能と思った)のビームへの影響を過小評価していた。

余談⑦；アライメント点検時のトランシット担当は荒木氏であったが、私も含めて数人が荒木氏の代わりが出来ないか競ったことがある。即ち、四極電磁石のレベル測定をトンネル1周に渡り行い、元の値(zero)に戻るかどうかを競うことになる。荒木氏が0.数mm以内であり、他のメンバーは数mm以上となり、我々は測量に全く不向きであることが確定した。その後、全てのアライメント作業時のトランシット担当は荒木氏と決定し、我々はターゲット運搬と電磁石移動担当の任に決定した。

余談⑧；1ターンコイルによる測定の結果、偏向電磁石のトンネル内接地ルートの電磁石と電源内接地ルートの電磁石でリップルが異なること、即ち、300 Hz と 100 Hz であることが分かった。熊谷氏等は、1981年(SR-133) Δr に含まれている300 Hzを取り除く為、トンネル内接地に500 Ω 抵抗を取り付けた。これにより、この現象は解消されたと思われる。

余談⑨；我々は図6に示すようなアライメントのデータを使いCODを計算するが、リング内に設置される入射機器及び取り出し機器の担当者がこのデータに関心を示したことはあまり記憶がない。何故だろう。“多分、別の方法で別途、機器のアライメントの変位を測定し、善処しているだろう。”と考えていた。

4. 8 GeV 加速後の Study

私自身は、1976年3月からフランスへ遊学に行き、1年強の間、主リング入射時のStudyに参加出来なかった。しかし、主リング電磁石グループは、精力的にStudyを継続し、新たな測定系が導入され、ビーム改善の方策が試行されていた。1976年度の主なStudy・出来事を下記に列挙する。

- ビーム life の改善を求めて、tune survey の範囲を広げていった。7付近で、6.75~7.5まで、更に(7,7)~(6,6)までへと拡張し、(6.2, 6.2)付近にも良い operating point があることが分かった。
- $v_x - v_y = 0$ の resonance の影響で skew Q-成分の効果が著しい。H-V のカップリングを示唆する現象が見つかり、悩みを増やすことになった。
- local バンプの蹴り残しが問題となっていたが、正常な local バンプの生成に成功している。更にビーム軌道補正を実施したが、ビーム損失が発生し、ビームが廻らなくなった。
- coherent 振動は、6極電磁石の励磁である程度継続可能となったが、更に8極電磁石の励磁で Horizontal の振動の延長が確認された。
- 奇妙なことに、III-2B' の軌道を -23~-43 に移動すると、Horizontal の振動が異常に継続した。
- 入射ビームの特性も、BT グループの佐藤康太郎氏が測定を始めた(多分、500 MeV ダンプライン上)。Vertical エミッタンスが 12.5 (規格化) $\pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ である等の情報が提供された。しかし、我々のStudy時に直ちに知る状況に至っていない。因みに、主リング500 MeV時のアクセプタンスの設計値は、Horizontal に対してCODの13.1 mmと $\Delta p/p$ による11.5 mmを考慮して $81.6 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ であり、Vertical に対しては、CODの6.2 mmを考え $19.6 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ である。
- クロマテシテイが -24.4 (for H), 12.2 (for V) である。
- 1976年12月には tune 測定の為に、pinger 系が設置され、武藤健一氏による“Auto Q-meter”のソフトと共に、以降のStudyで大いに活用された。逆に言えば、それ以前の tune 測定とは、BPM 信

号の写真 or オシロ上で振動数を測定していたことになる。大変な作業であった。

余談⑩；主リングの III-2B' での内側への軌道変更によるビームの透過効率上昇は、1980 年以降にも私は 2~3 回経験している。何故か確証出来ないが、疑わしき物はある。

私は 1977 年 5 月に帰国し、浦島太郎的状态で主リング Study に参加する。上記の状況は、安東氏からも聞き、PS 報告書も読んでいた。しかし、前述したように測定されていた COD に非常に疑義を持ち、1 年間で改良されたかを知りたかった。モニターのその後の進捗を期待しながら、COD 補正 (COD を zero に追い込む) を試みた。ビームは廻らなかった。

- 8 極電磁石の励磁が H-coherent 振動の継続に有効であること及び skew Q 成分の効果から類推し、 $v_x - v_y = 0, 2v_x - 2v_y = 0$ のラインを避ける operating point を探すべく、(7, 6) 近辺の tune survey を実施した。主リングとしては、(7.12, 6.18) 付近が best tune であると判断した。同時に 100 μ sec の早いビーム損失には、tune survey 中変化が観測されず、損失の起因はビームサイズとアパーチャーの不一致であると判断した。
- 1977 年 8 月には、補正 2 極電磁石の調整で、ビーム強度 1.3×10^{12} ppp の加速に成功した。

余談⑪；主リンググループとしては operating point を (7.12, 6.18) にしたので、入射の調整 (matching の調整) は BT グループの問題であると考えていた。この態度はまさに縦割りビーム調整の欠点であり、深く反省させられる点であった。事実、熊谷氏がトリスタンの仕事を終え、PS 加速器に戻り、入射調整まで実施するまで、このラインのパラメータが十分に調整されていなかった。彼の報告を聞くまで、私自身が入射調整でやり残していたこと忘れていた。当時誰かが調整し、その後不用意に変えたのかもしれない。記憶がない。

1977 年 9 月には、1978 年 3 月までに 2×10^{12} ppp を得る為に、今後の Accelerator Study をどのように実施するか多めに議論があった。KEKPS internal レポート ASN 100, 102 に詳細な報告がある。この原稿を書くに際し読み直したが、昨今の PS-運転でも問題になることが多く指摘されている。

当時、私自身、測定されていた COD とアライメントデータからの COD 間の不一致、更に疑わしい COD の情報を使い、磁場の高次成分の影響を如何に調整すればよいか悩んでいた。故に、1977 年 11 月以降の我々の Study は、主リングのアパーチャー変動

を監視する為のアパーチャー survey とビーム加速改善の為に COD 補正を行うことが中心となると考え、実施した。当然、加速立ち上げ時 (p2 以降) のクロマテシテイの測定及びその補正 (パルス 6 極電磁石の励磁) 等々も実施した。他方、BPM に対しては一筋の期待を抱いており、即ち、“COD の変化量の測定ならば再現性があるのでないか?” という期待で、 β -function, 分散函数等の測定を行い、計算値とまあまあの一致を得た。更に COD による Vertical dispersion の発生の有無も測定したが、発生の有無が判断出来るデータは取れなかった。

- 1978 年 6 月、transition-loss を克服するチームが RF グループを中心に結成され、1979 年末に導入される γ_c -jump 系も議論されるようになった。
- 佐藤康太郎氏は、500 MeV ライン上でエミッタンスを測定し、プースター入射条件及び加速条件により、エミッタンスが変動することを測定した。
- 1978 年夏には、Damp-系が設置され、以降動作テスト並びに効果が調査された。
- 10 月には主リング内に scraper も設置された。もっと早く設置の予定であったが、私のミスで遅くなり、十分な活用時期を失った。
- 我々のグループでは、相変わらずアパーチャー survey を行っていた。安東氏は、CPU によるアパーチャー survey 並びに COD 補正の為にソフトを制作し、テストした。

余談⑫；我々は 500 MeV ライン上のどのプロファイルモニターがエミッタンスの変動を反映するか教えて頂いた。しかし、入射エミッタンスが加速器立ち上げ毎に変化するという情報をもたらし、我々を更に悩ませることになった。即ち、主リング入射までのビーム特性の安定性確保も、主リングでのビーム加速に重要であることを教えてくれた。まさに主リング Study の難しさを思い知らされた。

このような手詰まりな (私だけかも) 状況下でも、主リング電磁石グループのメンバーは色々と模索をしていた。当時の模索の例を上げておく。

- ① $nv_x - nv_y = p$ 型の resonance の存在が明白になり、 $n=1$ の skew 4 極成分の効果及び $n=2$ の 8 極成分の影響も観測された。鈴木敏郎を中心に、特に 8 極成分の影響を計算し、磁場測定の結果想定される 8 極成分でなく、空間電荷による 8 極成分が主リング入射時のビーム強度を制限している可能性を示唆した。
- ② 主リンググループ内でも、新規の BPM を開発すべく、Wall Current 型のモニター、磁石型

BPM (ビームで誘起される2極成分による位置情報, 4極成分の意味?) を試作し, テストした. 同じ時期に, BT グループの佐藤康太郎氏が, Wall Current 型の BPM を製作し, 性能を調査していた. その後, 彼は, BT-ライン及び主リングにそのモニターを設置し, 良い結果を出した. 平松成範氏が新モニターの回路系を担当した. 彼らの BPM 系が出来るだけ早く主リングに設置され, アライメントから推定される COD と一致することを期待した.

- ③ 既存の補正2極電磁石の残留磁場の効果が議論され, この残留磁場の影響が無視出来るような補正2極電磁石 (珪素鋼板でパルス励磁可能な) への更新を提案した.
- ④ 一方, 我々は, 当時 PS 加速器で偏極陽子ビーム加速の可能性を追求しており, その為の simulation ソフトを制作した. ブースターではスピンプリップによる加速の可能性を計算し, 主リングでは, 大きな6極成分及び COD の影響で偏極陽子ビーム加速がかなり難しいことを指摘した.
- ⑤ 安東氏は, 磁場高次成分 (特に6極成分) のビームへの影響を調査すべく, 精力的に解析と simulation を行っていた. その結果, クロマテシテイの非線形成分は, 表3及び図7に示した真空 chamber に起因する6極成分によることを明らかにした. その解析結果を図8に示す. また, tune survey で観測された色々な resonance も大きな10極成分による可能性も計算していた.
- ⑥ 更に, 高山氏の学位テーマと関係し, 主リング

における空間電荷効果の影響を調査する為, simulation (F-, D-部のみに空間電荷効果を導入する簡単な方法であるが) も行っていた.

- ⑦ 1976年以來気になっていた真空 chamber による磁場分布への影響も計算され, chamber の形状に由来する溶接部及び加工変形部の局所的透磁率の上昇に起因することを解明し, 主リング真空 chamber の交換の必要性を訴えた.
- 1979年3月末には, 主リング偏向電磁石の楔部 (直線コアの合わせ目, 写真1参照) に, 磁場改善の為に, 楔型鉄芯が追加された. この作業に対する我々の立場は明白だった. 当時の主リング入射時間帯でのビーム損失の起因は, 楔部からの高次成分でないこと, 又, この鉄芯の追加は, 大きな繰返し電磁力により破損を生じ, 維持作業の増加をもたらすことを主張した. 事実, 4月には固定ボルトが破断した.
- 3月末には, 四極電磁石のアライメント測定を簡便にする為, 連通管式レベル系が四極電磁石に取り付けられた. 約30分~45分で一周のレベル変動が測定出来るようになった.
- 同じく3月末に, 主電磁石の冷却水路に定流量弁 (B-mag.; 約62 l/min. Q-mag.; 約10 l/min.) が取り付けられた. 主リング電源運転開始後, コイルの温度上昇を確認するいつもの点検作業を軽減する点では歓迎すべき処置であった.

余談⑬; 1986年, 楔部鉄芯の破損により真空 chamber の破損も生じた. 1986年4月には, 22ヶ所の溶接部に亀裂が見つかり, 2ヶ所は脱落寸前だった. 故に, 楔部の鉄芯は撤去された. 熊谷氏は, 楔部の撤去前後における resonance の変化を把握する為, 細かな tune survey を実施した. 撤去後の resonance も補正可能範囲であると考えられた.

余談⑭; 定流量弁設置後, ある時期呼び出し (多分, 小島先生だと記憶しているが) を受けた. 主リングの配管が唸っていると, 数箇所の配管が激しく振動し, SUS材のL-管に亀裂が出来ていた. 急遽, M社に依頼し, 振動を止める為, 固定処置をした. 後年, 冷却水圧の変動で, 振動を起こす事例が報告されている. ついでに冷却水関連のトラブル・作業を書き加える. ストレーナの清掃, 流量スイッチの交換・復帰, 銅管水路のピンホール発生 (銀ロー付け部) と交換, ゴムホースの詰り (一回のみ) と交換, 当時既に母管側バルブが完全に閉まらない状況の発生等々であった.

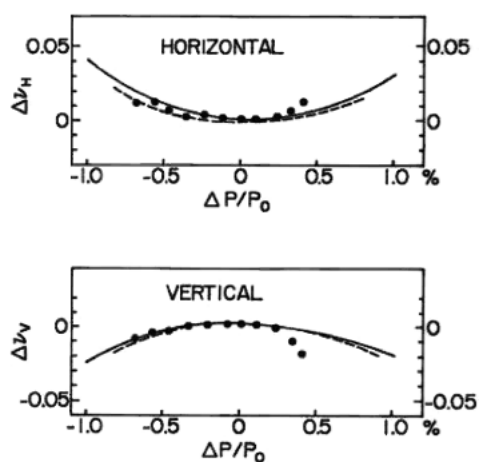


図8 6極成分 (-2.0 m^{-2}) によるクロマテシテイの非線形成分への影響
黒丸; 測定値, ライン; 解析結果と tracking 結果

5. 1979年主リング改造前後

1979年夏の主リングの大改造の方針が打ち出された。その内容は、

- 補正2極電磁石の交換（残留磁場を減じることとパルス運転の可能性の為）、
 - B-, Q-mag. の再精密アライメント、
 - BPM の交換（佐藤康太郎製 BPM モニター）と新補正2極電磁石への精密据付、
 - 偏向電磁石及び四極電磁石用真空 chamber（SUS316LS 製）の交換及びイオンポンプ設置位置の変更、
 - 補正2極電磁石用電源制御系の更新、
 - backleg ワインディングコイルの取り付け
- 等々多岐に渡るものであった。

この改造で我々として問題になった点は、イオンポンプの位置変更であった。即ち、今後、電磁石の基準面を使用する全体の精密アライメントが、ビームダクトを大気圧にしなければ出来なくなる点であった。一応、再アライメントが要求された時点で、対処可能と判断した。他方、当分は精密アライメントをしなくて済むという安易な気持ちもあったことは事実である。

1979年4月以降の Study は、この大改造前後のビーム特性の変化を知る為に、実施された。

- tune survey, アパーチャー survey, クロマテシテイ等通常の Study が行われた。Study の結果、3月末に実施された楔部の鉄芯追加によるビーム特性の改善は見受けられなかった。
 - Damp 系を利用し、RF-knockout 方式による tune spread が測定された。0.017 であり、クロマテシテイと $\Delta p/p$ で求められる量と一致した。
 - 春日氏が CERN, FNAL の留学から帰国し、 $\Delta p/p$ (momentum spread) の測定を行った。図9にその結果と方法を示す。結果は、RF-ON 時、 $\Delta p/p = 0.3\%$ で一定であるが、RF-OFF 時、入射時点から $\Delta p/p$ が 0.3% から 0.14% へ変化していくことである。実験時のクロマテシテイでこの変化が異なる傾向を示した。
 - 平松氏を中心にしたモニターグループの Study は、既存の BPM に載るノイズにより COD の値に最大 20 mm の誤差を有することがあり、そのノイズの削減は非常に難しく、BPM の交換の重要性を指摘した。
- 夏の大改造作業は、主リング電磁石グループ、真空グループ、BT グループ（佐藤康太郎氏）、モニターグループと言った従来の縦割りグループの仕事でな

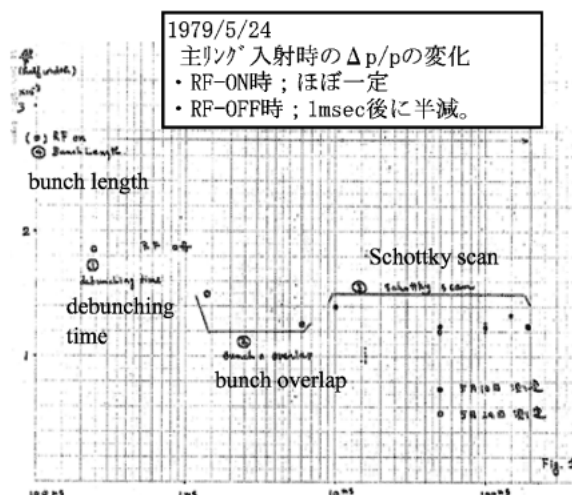


図9 $\Delta p/p$ の測定
 $\Delta p/p$ の大きい方からビーム損失が起こる。

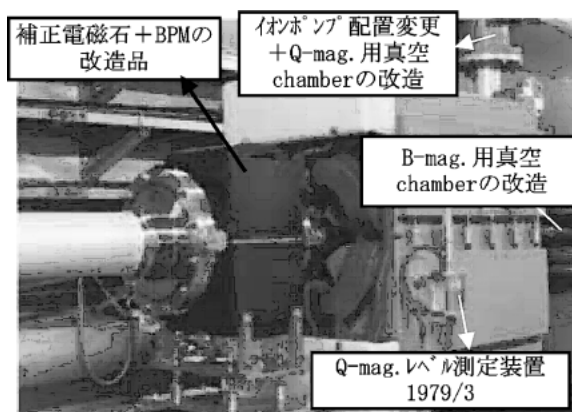


写真3 四極電磁石付近の改造状況

く、お互いに“ああだ。こうだ。”と議論しながら実施された。故に、この作業は短期間の大改造で忙しかったが充実したものであった。今回の改造は、1972年以降に入所した若者が熟慮し、提案した改造が多く採用され、責任者の心強い後押しで実現するに至った。その点でも若い人皆が納得出来る改造であり、楽しかった。

写真3に四極電磁石周辺の改造後の状況を示す。

- 改造後最初の運転で、主リング入射時間帯でのビーム損失が激減した。
- クロマテシテイも約-8となり、naturalクロマテシテイとほぼ同じ値となり、問題の非線形は誤差内で見られなかった。
- Localバンブによるアパーチャー survey でも Verticalには特に狭い領域もなく、Horizontalにおい

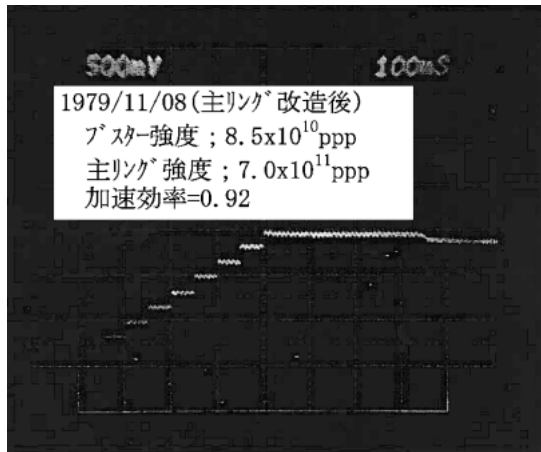


図10 改造直後の主リング運転状況
ビーム強度は弱いですが、加速効率92%であり、入射時間帯のビーム損失は少ない。

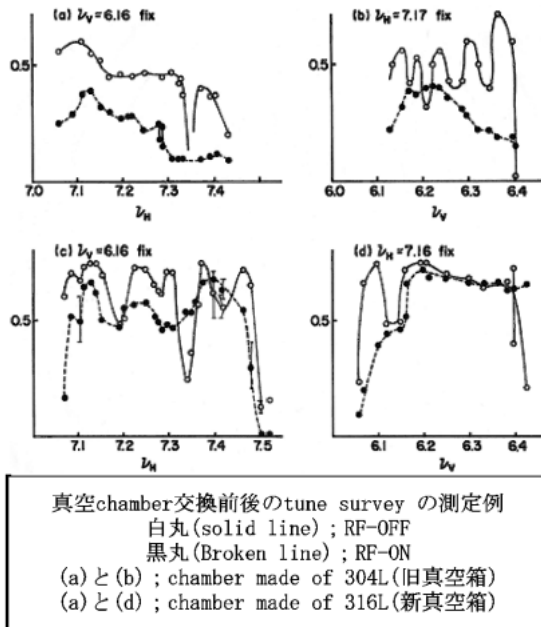


図11 tune survey の測定

でも取り出し機器と入射機器設置の場所のみが狭かった。

- Tune survey も実施され、夏前の測定結果と比較された。明らかに、改造後のビームトランスミッションに改善が見えた (図11参照：縦軸ビーム生き残り率)。
- Horizontal の coherent 振動も従来以上 (500 msec) に継続した。
- 測定された Vertical COD も、明らかにノイズ及び Wall current の不都合な場所を除いて、四極電磁石のアライメント誤差から想定される値とほぼ一致し

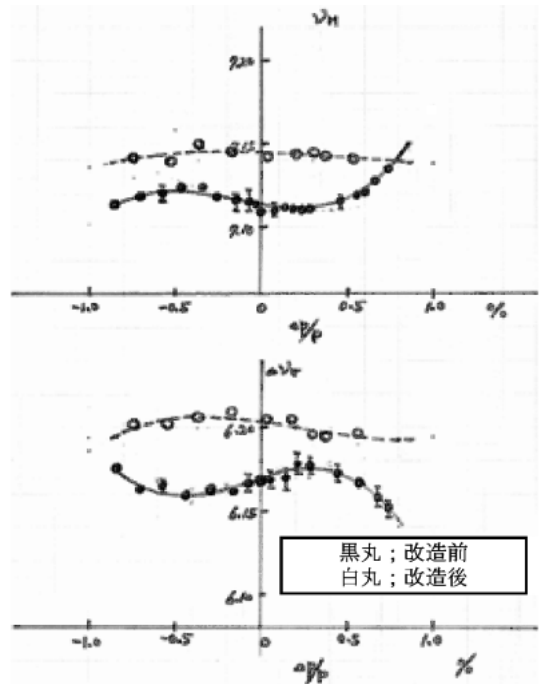


図12 クロマテシテイの測定結果

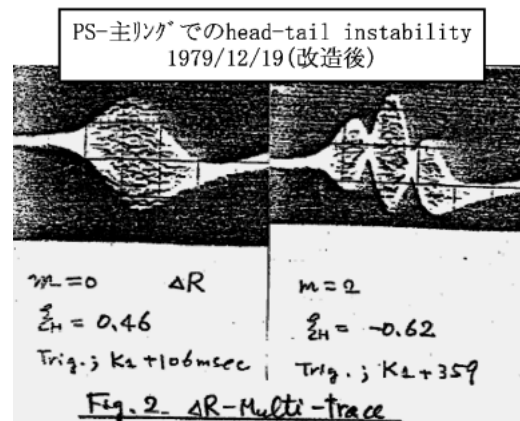


図13 主リングで観測された head-tail instability (今後の課題)

た。

今回の改造前後におけるビーム特性の変化を、図10, 11, 12等で示す。図7には既に真空 chamber 交換による磁場分布の差異を示してある。

安東氏は、クロマテシテイの非線形性及び各 resonance の stop band を精力的に解析し、クロマテシテイの非線形性は磁場測定の系統的な高次成分で説明が可能であり、stop band の幅が高次成分の分散量に起因することを示した。

図11からも明らかのように、強い resonances は $\nu_H - \nu_V = 1$ (or $2\nu_H - 2\nu_V = 2$), $\nu_H + 2\nu_V = 20$, $3\nu_H = 22$ で

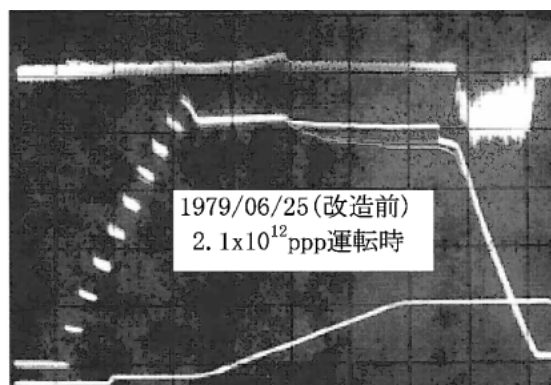


図14 改造前後の主リングビーム強度
入射時間帯のビームの積み上げが改善されている。
Transition時のビーム損失が目立つ。

あり、弱い resonances が $2\nu_H + \nu_V = 21$, $3\nu_H + \nu_V = 28$, $\nu_H - 2\nu_V = -5$ であった。

- 1979年12月には、主リングでも、ブースターで測定された head-tail effect が観察され、今後この instability を抑えることが1つの課題になることが想像された。図13に主リングで観測された head-tail 波形を示す。
- 1980年2月には再度アパーチャー survey が実施された。Vertical アパーチャーを広く確保するためには、入射軌道補正の為に作っているコブ軌道を減らすこと、即ち、入射キッカーの増強であり、取り出し関係機器による壁の存在を避ける為の機器の再アライメントの必要性を指摘している。最大 $19 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ のアパーチャーであることが分かった。この値は前述の設計値に近い(同じ)。

図14に、改造前後の効果を観る為に、通常運転時のビーム強度パターンを示す。



写真4 γ_t 用四極電磁石

- 他方、主リング改造と平行に、transition 時のビーム損失(図14)を改善する為、 γ_t -jump 系(木村先生、春日、家入、可部、高崎)の構築が検討されていた。そして1979年12月末に、 γ_t -jump 系の四極電磁石と電源が設置された。1980年1月末に、最初の γ_t -jump の Study が実施され、その効果も確認された。
- 別途、水町さんは、transition の改善の為に、“phase shake”(RF-gymnastics)の方法を試みていた。

余談⑮; 木村さんの方針“ γ_t 用四極電磁石はほとんど壊れない電磁石である必要性”を確保する為、空冷で且つ設計値よりかなり余裕を持った電流が流せるように、四極電磁石を製作した。層間の耐電圧も高くなっている。その方針により製作された四極電磁石は、20年後のK2K時でも大電流運転にも耐えられる四極電磁石であった。写真4にその姿を与える。

余談⑯; 私(我々かも)は、何回か γ_t -jump の調整で、transition 付近で生じるビームの色々な現象の再現性がないことを知った。リニアックのタンクレベルの変動でも変化することはよく知られていることの一つである。再現性のない原因は何か良く分からなかった。例えば、ノイズが多く、ノイズ対策上導入したフィルターの特性、更にそれによりビームがどのような影響を受けると考えたのか等々色々邪推は出来るが、判別出来なかった。

- 1980年5月14日には、ビーム強度 4.07×10^{12} ppp の加速に成功した。この加速の成功には当然 RF グループの RF 増強を含めた改善作業及び細かな調整の結果でもあった。
- 11月、新BPMで測定された Vertical COD とアライメント(連通管方式で測定)エラーから推定され

る COD は誤差内で完全な一致をした。

私は、私自身が 1975 年 11 月 21 日以来抱いていた疑義“COD の件、大きな 6 極、10 極成分の件”が 1979 年夏の大改造により解かれたと実感した。しかし、更なる PS-加速器の性能向上の為に、今後解決すべき課題が沢山浮かび上がってきた。その課題は、我々のグループ内で解決出来るものと他グループとの強い繋がりでは解決出来ないものに二分される。

私は、1980 年 4 月に、偏極陽子ビーム加速の為、即ち、第二前段建設の為、PS-入射器グループへ移動した。私の主な仕事は主リング電磁石から移行することになり、私の思い出話も 1980 年 4 月までで一段落とします。

6. あとがき

前述しましたように、私自身は、PS-入射器グループへ移動しましたが、1980 年まで一緒だった他のメンバーもビーム改善半ばで海外出張、トリスタン建設へと主リング電磁石グループから抜けていった。“主リング 3 悪人”または T. K. 氏を追加して“4 人組”と言われたメンバーは、主リング電磁石グループから居なくなった。故に、残された難しい多くの課題は、新しいメンバーに引き継がれることになった。

1985 年頃、トリスタン建設から PS-加速器に戻ってきた熊谷氏は、主リングビームの改善 (Study においても) には、プースターのビーム調整ばかりでなく、リニアックの調整も必須であるという認識で、すごい迫力で動き回り、PS-加速器全体の調整を行い、4~5 パルス (通常 9 パルスであるが) で、ビーム強度約 4×10^{12} ppp 以上の加速に成功した。更にビーム強度を上げる為には、当時のリング RF 系の充実が望まれた。数年後、RF 系の充実・安定性は、二宮氏により達成されたのであるが、熊谷氏の調整は、私が主リング時代に忘れていたことであったので、非常に強く印象に残っている。

本稿は、PS-加速器のような複合型加速器においては、縦割りグループ的運転調整が不向きでないかという思いで、書きました。故に、本文中には、他グループ云々という言い方が随所に出てきます。当時の私の能力では (今でもそうですが)、他のグループへ割り

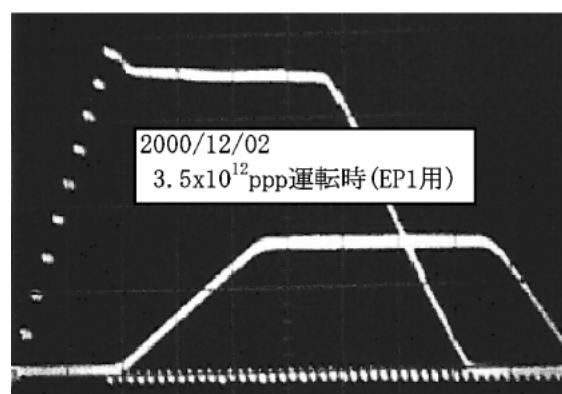
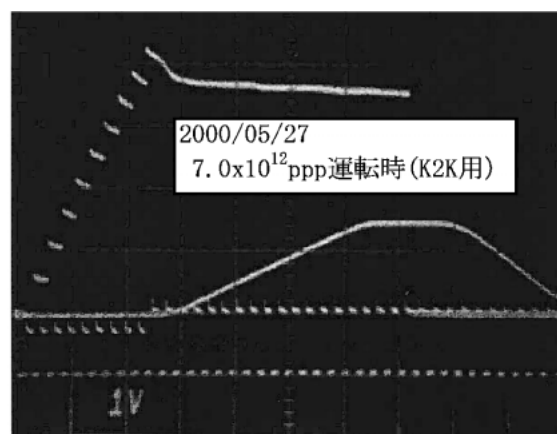


図15 2000年のPS-加速器運転状況

込む力の無さともどかしさを感じていました。これが、私が PS 加速器の為に何をしたらかを申し上げることが出来ない理由だと思っている。

将来の大型加速器の運転・改善の為には、自ら学ぼうと意欲のあるどのような人でも参加出来、改善に携われるグループが必要かと思えます。当然、装置の製作を含めた改良に対しても責任を持たなければいけません。しかし、私には、具体的にどのようなグループ構成が最適か分かりません。ただ、老翁心ながら、上記のようなグループが必要だと思っています。

最後に、2000 年時の PS-加速器の運転状況を図15に示します。図14の状況 (transition のビーム損失未改善ですが) と比較し、どのような解決すべき課題が残されているか思案するのも如何でしょうか。面白いと思います。