

## 7. 研究成果

# 7・1 陽子シンクロトロンによる 実験とその成果

久寿米木 朝雄  
(物理研究系教授)

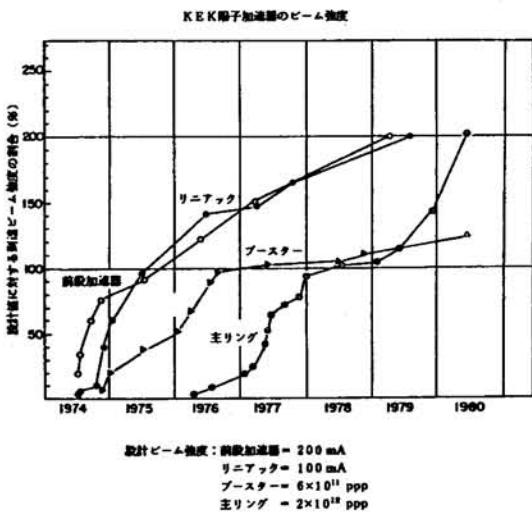
## § 1. はじめに

### 1.1 陽子シンクロトロンによる実験

高エ研陽子シンクロトロンは昭和51年(1976)3月、設計値である8GeVに到達し、同年12月、設計値を上回る11.8GeVの運転に成功した。その後、ビーム強度、安定性の改善、ビームチャネル、主要測定器、関連設備の整備等を行って、昭和52年(1977)5月からスケジュールされた共同利用実験を開始した。

12GeV運転のためには加速器主リング電源系、冷却系等の増強が必要だったので、当初の運転は8GeVで行われ、12GeVの定常運転は昭和53年(1978)10月から行われた。加速器の陽子強度は共同利用実験の開始時には平均 $3 \times 10^{11}$ pppであったが、運転を重ねるごとに上昇し、第1図に示すように昭和53年(1978)10月には平均 $2 \times 10^{12}$ pppに達した。

陽子シンクロトロンによる実験に関しては、昭和50年(1975)から実験の公募が行われ、運営協議委員会の下部機構として共同利用実験審査委員会( Programme Advisory Committee; PACと略称)が発足し、応募実験の審査を行い、その審査に基づいて研究所が採択するという手続きをとっている。共同利用実験が開始された昭和52年(1977)5月の時点で49件の実験提案があり、内8件が採択されていた。



第1図 KEK陽子加速器のビーム強度

採択された実験にはE、条件を付けられて留保Aになった実験にはCを付している。現在昭和56年(1981)迄に95件の応募があり、その中採択された実験は35件、留保Aが2件となっている。採択された実験は資料編(共同利用実験一覧)に示される。

### 1.2 ビームチャネルおよび主要実験装置

加速器の完成から、高エネルギー物理学実験への移行する間の時間的遅れを最少にするために、実験に必要なビームチャネル、実験用主要機器、設備、液体水素泡箱、電子計算機等の整備、検討は研究所の前身である素研準備室の頃から開始されていた。その要点は各研究系の項で述べられる筈であるから、ここでは実験に直接関係する部分についてのみ

ふれることにする。

昭和52年(1977)5月、共同利用実験開始の時点で使用できたビームチャネルは、内部ターゲットビームライン、 $\pi$ 2、T1、および水素泡箱実験用として、速い取出し陽子ビームチャネルEP1に接続された二次ビームチャネルK1であった。

昭和52年(1977)度末にカウンター実験用遅い取出し陽子ビームチャネルEP2が完成した。EP2は2台のラムバートソン電磁石と静電セパレーターの組合せで、3本に分岐され、それぞれEP2-A, B, Cとなっている。

EP2の二次ビームとしては、高エネルギー物理学の趨勢、外国の研究所の動向等を考慮して、物理専門委員会、シンポジウム等で議論され (1)低運動量( $< 1 \text{ GeV/c}$ )  $K^\pm$  ( $\bar{p}$ ) ビーム; K3, (2)低運動量( $1 \sim 2 \text{ GeV/c}$ )  $K^\pm$

( $\bar{p}$ ) ビーム; K2, (3)高運動量( $8 \text{ GeV/c}$ ) 非分離 $\pi$ ビーム;  $\pi$ 1, (4)外部陽子ビーム等をおくことが大方のコンセンサスであり、その後のビームチャネルの整備もこの方針に沿って進められた。

この中、K2, K3ビームは外国の同種のビームと比較して遜色のない性能を有し、特に、ビームの純度(分離度)については独自の静電セパレーター(電源直結型)の使用により圧倒的に優れている。

K2, K3ビームチャネルは昭和53年(1978)夏のシャットダウン期間に据付を行い、10月からビームのチューニングを開始した。K2, K3ビーム建設直後の写真は物理研究系史の第1図に示される。

昭和53年(1978)12月から昭和54年(1979)3月にかけて、カウンター実験ホー

Beam	Momentum Range (GeV/c)	Momentum Bite ( $\pm \Delta p/p\%$ )	Production Angle (°)	Solid Angle (msr)	Particles	Typical Flux per Pulse
EP1	4-13		Fast Extracted Beam		p	$5 \times 10^{10}$
-A						
EP2-B [N]	4-13		Slow Extracted Beam		p	$3 \times 10^{12}$ at max
-C						
$\pi$ 1 [c]	4-8	2	1.5	0.33	$\pi^+/\pi^-$	$2 \times 10^6 / 6 \times 10^5$ at $8 \text{ GeV/c}$
$\pi$ 2 [i]	2-4.3	1	10	0.59	$\pi^+/\pi^-$	$2 \times 10^5 / 1 \times 10^5$ at $3 \text{ GeV/c}$
T1 [i]	0.5-2.3	2	23	0.16	$\pi^+/\pi^-$	$5 \times 10^4 / 4 \times 10^3$ at $1 \text{ GeV/c}$
K1 [b]	0.5-4.5	0.5	2.8	0.04	$K^+/\bar{p}$	$30/10$ at $3 \text{ GeV/c}$
					$K^+/\bar{K}^-$	$5 \times 10^5 / 1 \times 10^5$
K2	1-2	3	0	1.0	$p_+/\bar{p}_-$	$1.7 \times 10^7 / 1.5 \times 10^6$ at $2 \text{ GeV/c}$
					$\pi^+/\pi^-$	$2.2 \times 10^7 / 1.5 \times 10^7$
K3	0.5-1.0	2	0	7.3	$K^+/\bar{K}^-$	$4.2 \times 10^4 / 1.0 \times 10^4$ at
					$p_+/\bar{p}_-$	$7 \times 10^7 / 3.5 \times 10^2$
$\pi\mu$	0.1-1.0	6	87	20	$\pi^-$	$5 \times 10^7 / 5 \times 10^7$ GeV/c

N; Extended to the production target of neutral secondary particles  
c; Under Construction, i; Internal Target Beam Line, b; Bubble Chamber Beam Line

第1表 KEK陽子シンクロトロンのビームチャネル(1980)

ルEP 2-A ビームラインのK 2発生ターゲットの上流に薄いターゲットをおいて、低運動量( $\leq 500 \text{ MeV}/c$ )  $\pi\mu$ ビームが、このビームを用いるE 65 ( $\pi\mu$ ) 実験グループと所内ビームチャネルグループとの協力で建設された。このビームはK 2ビームの運転に支障ない程度の薄いターゲットを二次粒子発生ターゲットとし、K 2ビームと併列に使用できるパラサイトビームとして多くの実験に使用されている。

これらのビームのパラメーターは、その後に建設、あるいは建設予定のものを含めて第1表に示される。

カウンター実験ホールは第2図に示すように、当初  $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$  のエリアであったが、昭和53年(1978)末、K 2, K 3ビームの据付が完了した時点でEP 2-Bビームダンプが実験ホール外にはみ出す結果となった。このことは遅い取り出し一次、二次ビームの設計の段階から予想されていたことであり、カウンター実験ホールの拡張は可成り早い時期から望まれていた。

昭和54年(1979)10月から昭和55年(1980)3月にかけて、カウンター実験ホールをそれ迄の約2倍、即ち、 $50 \text{ m} \times 100 \text{ m}$  に拡張する工事が行われた。この期間の実験は、工事関係者に対する放射線レベルを安全基準レベル以下に抑えるため、加速器の強度を $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{4}$  に制限して運転を行った。その結果として実験の実施効率は多少低下したが、実施スケジュールの上でその損失を最少に留める努力を行い、昭和55年(1980)5月から現在の大きさの実験エリアの使用が可能になっている。昭和56年(1981)のカウンター実験ホールは第3図に示される。

昭和56年(1981)夏のシャットダウン期

間にカウンターホール拡張エリアに $\pi 1$ ビームが据えられ、10月から運転に入る予定である。 $\pi 1$ ビームは2台の超伝導偏向電磁石(SD 430)2台と超伝導セバタム電磁石1台を含む最大運動量  $8 \text{ GeV}/c$  の非分離ビームである。この超伝導偏向電磁石(SD 430)は昭和55年(1980)10月テスト運転を行い、4.2 Tの励磁に成功した。

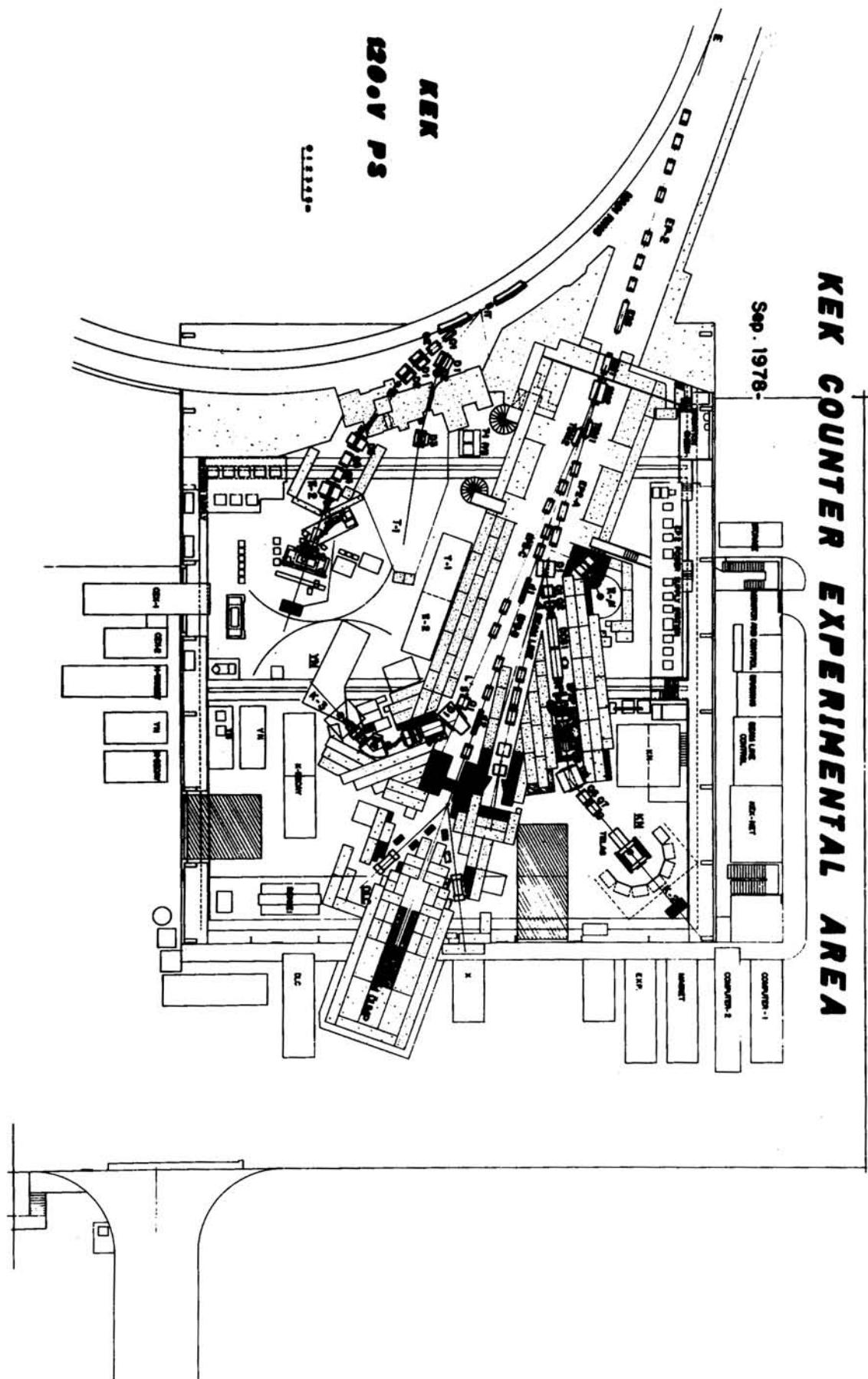
泡箱ビームラインK 1は最高運動量  $6 \text{ GeV}/c$  の二段分離ビームとして設計され、昭和52年(1977)から運転を開始したが、静電セバレーターの年次計画の関係から最初の運転はセバレーターの運転を必要としない $\pi^- (6 \text{ GeV}/c)$  として電磁石のみでビームのチューニングを行った。昭和53年(1978)10月から9m静電セバレーターの運転を開始し、一段分離ビーム  $p, \pi^\pm (2 \sim 4 \text{ GeV}/c)$  を用いて実験を行った。昭和54年(1979)5月から6m静電セバレータを加え二段分離により極めて純度(分離度)の高いビームで実験を行った。

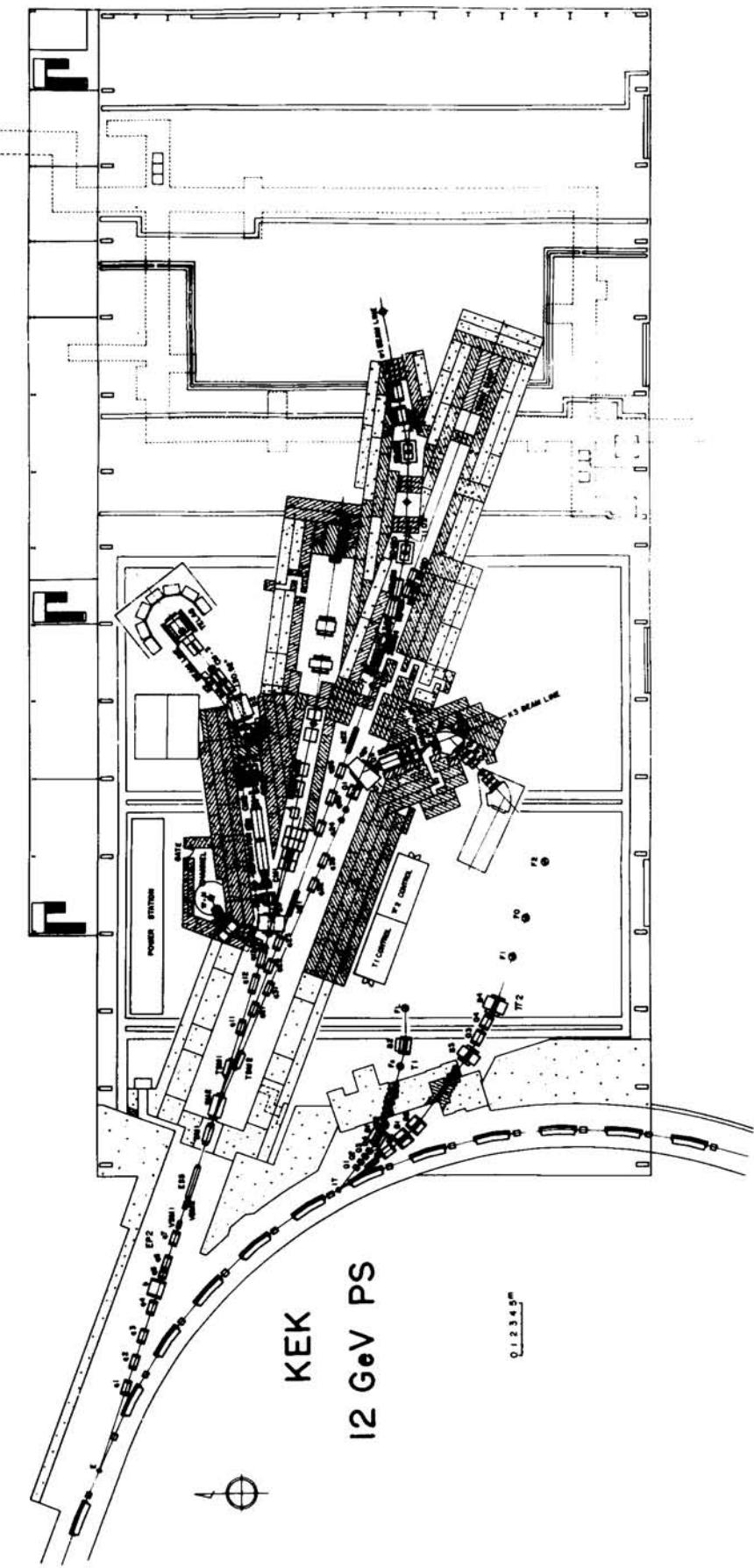
## § 2. 実験の目的、方法とその進展

研究所の活動が高まるとともに、陽子シンクロトロンによる実験に併行して、昭和54年(1979)から日米協力事業による国際協力が開始され、昭和56年(1981)から、待望の次期計画、トリスタン計画が発足した。このような急速な発展の中で、陽子シンクロトロンによる実験の進展を眺めると、その進展は、第Ⅰ期(昭和52年(1977)～昭和53年(1978))、第Ⅱ期(昭和54年(1979)～昭和55年(1980))、第Ⅲ(昭和56年(1981)以後)，の3期に分けて考えることができる。現在迄の実験の年次的進展状況は第2表に示される。以下、各期に行われた実験の実験目的、実

KEK COUNTER EXPERIMENTAL AREA

Sep. 1978.





第3図 拡張後のカウシター実験ホール（1980）

Year	1977	1978	1979	1980	1981	1982
Month	4 7 10	4 7 10	4 7 10	4 7 10	4 7 10	4 7 10
Beam	E(π2BS)	E19(CEX), E21(πN)	E63(CEXH)		E71(πAC) E84(PDEC)	E83(πD)....
IT π2	E23(STOPπ)	E26(RADCH)	USED FOR EQUIPMENT TEST			
IT TI		E 45(DLC)	E 46(X)			
EP2-B	K2BS	E34(KN)	E75(ρN) E34(KN)	E81(KDEL) ....	E92(Σ)....	
(EP2-A)	K2	K3BS	E33(ρPR/YN)	E10(KDECAY)	E74(ρPR)	E89(Kμ)....
(EP2-C)	K3	πμ BS	E65(πμ)	E72(μSRJ)	E71(πAC)	E91(πNUCL)....
(EP2-A)	πμ				E49(Δ)....	
(EP2-A)	Λ				E64(πI)....	
(EP2-B)	π I	EO6(πRES) E12(πDD)	E50(DLBC) E53(πA)	E57(ppBC) E62(ρpBC)	E79(SHBC) E57(ppBC), E88(pDBC) E62(ρpBC)	BUBBLE CHAMBER TURN-OFF
B.C.Exp.	EPI	KI				

第2表 KEK陽子シンクロトロンによる実験の経過

験装置の概略について述べる。実験結果の大要は § 3 に紹介する。

## 2.1 第 I 期（昭和 52 年（1977）—昭和 53 年（1978）の実験

第 I 期は加速器の完成直後であり、カウンター実験に使用できるビームチャネルは  $\pi^2$ , T 1 の 2 本だけで、泡箱用二次ビームも静電セパレーターによる分離は行えないという状況で実験が開始された。

カウンター実験のための主要実験装置として、スペクトロメーター電磁石、偏極陽子ターゲット、通常水素ターゲット、NIM, CAMAC システムによる高速論理回路、オンライン電子計算機、各種のカウンター、チェンバー等は、個々の装置として整備が行われていた。しかし、特定の実験の目的のために測定系として、可成りの長期（0.5～1 年）に亘って安定に動作し、実験の推移によって充分に機動性を發揮するために、どのような手段、方法を必要とするかについては、とに角実験を行うことによって体得する以外に方法はない。その意味で第 I 期の実験は、実験を行うこと自体が実験であった。

我が国の高エネルギー実験研究者は、既に核研 1.3 GeV 電子シンクロトロンを用いて 10 年以上の経験を蓄積していた。而し乍ら、加速器のエネルギー、実験装置の規模、実験の準備、実施、解析を必要とするデータの量、等の何れをとっても、約 1 衍以上のスケールになり、加えて、始めての陽子シンクロトロンによる実験であるから、単にハードウェアの整備上の問題だけでなく、放射線、安全、等の管理上の問題、それぞれ異なる立場にある所内外の研究者、職員の間のソシオロジイを含むソフトウェア的な問題も解決して行く必要があった。

以上のような状況の下で、最初のカウンター実験として、最も基礎的な実験である  $\pi^- p$  荷電交換散乱、E 19 (CEX)，および、 $\pi^- p$  弹性散乱、E 21 ( $\pi N$ ) の実験が採択され、昭和 52 年（1977）5 月から昭和 53 年（1978）7 月迄、この 2 つの実験を主実験として実験を進めた。

E 19 (CEX), E 21 ( $\pi N$ ) の両グループは実験を計画した時点で、今迄発表された外国の研究所のデータについて広範囲なサーベイを行った。その結果  $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ ,  $\pi^- p \rightarrow \pi^- p$  は基本的な反応であるにも拘らず、部分波解析を行うためには、微分断面積、偏極のデータの何れも決定的なところで、ビーム運動量、測定角度領域で幾多の空白があることが判明した。例えば、 $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$  反応については、2.0 GeV/c—3.0 GeV/c に亘って、偏極パラメーターの測定は断片的にしか行われていなかった。 $\pi^- p \rightarrow \pi^- p$  散乱についても、2.0 GeV/c—3.0 GeV/c に亘って後方のデータが以外に少ないことが分っていた。加えて、幾つかの点で LBL, ANL, Rutherford, CERN のデータ間に若干の相違があり、これらを明らかにすることは重要であった。

$\pi^2$  ビームの分散焦点  $F_0$  の上流 4 m の  $F_1$  点を E 19 (CEX) のターゲット位置とし、下流 3.5 m の  $F_2$  点を E 21 ( $\pi N$ ) のターゲット位置とし、2 乃至 3 週間でビームタイムを交替する方式で実験を進めた。E 19 (CEX) は運動量 1.8～3.0 GeV/c に亘って、水素ターゲットを用いて  $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$  荷電交換散乱の微分断面積と偏極パラメーターの測定を行った。ターゲットとしては水素ターゲットと KEK 偏極ターゲットを使用した。又、E 21 ( $\pi N$ ) は運動量 2.0—4.0 GeV/c に亘り、水素ターゲ

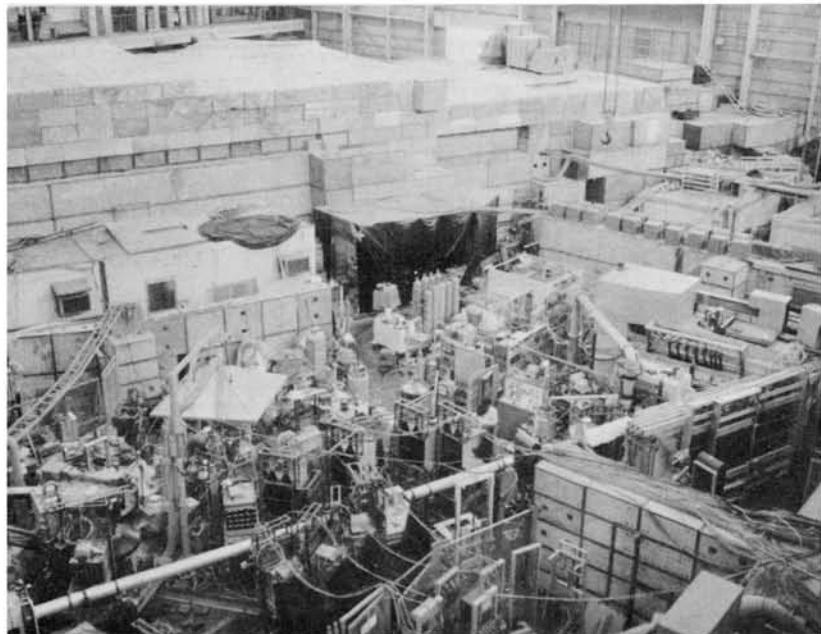
ットを用いて $\pi^- p \rightarrow \pi^- p$  弹性散乱の微分断面積、名大偏極ターゲットを用いて偏極非対称のそれを、特にデータの少ない後方に重点をおいて測定を行った。

E 19 (CEX) は散乱の終状態が n と  $\pi^0$  であるから、5台の鉛ガラスセレンコフカウンターアレイによる  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 、および5台のシンチレーションカウンターアレイによる中性子の同時測定を行った。この測定では、 $\pi^0$ 、n の角度、運動量の分解能を向上するために特別な努力が払われた。

E 21 ( $\pi N$ ) は散乱の終状態が  $\pi^-$  と p で何れも荷電粒子であるから、測定系はスペクトロメーター電磁石“ときわ”と合計32台のワイアスパークチェンバー (WSC) およびマルチワイヤプロポーションナルチェンバー (MWPC) を用いて構成され、高い角度、運動量精度のデータを得ることを目標とした。

E 19 (CEX)、E 21 ( $\pi N$ ) とも偏極陽子ターゲットの偏極度は 70~80% と高い値であった。更に実験の後半には中央計算機 HITAC 8800 オンラインシステム KEKNET が使用可能になり、データの処理も高い能率で進むようになった。

実験の開始直後は加速器の陽子強度は平均  $3 \times 10^{11}$  ppp であったが、実験の後半では平均して  $1 \times 10^{12}$  ppp に達し、又、ビームチャンネルを含めビームの安定性も急速に上昇し、E 19 (CEX)、E 21 ( $\pi N$ ) の両実験とも昭和53年(1978)夏のシャットダウン前に計画したデータテイキングを終了した。実験中にデータの解析が併行して行われ、その一部は昭和56年(1981)東京で開かれた第19回国際高エネルギー物理学会議に報告された。第4図に E 19 (CEX)、E 21 ( $\pi N$ ) の実験中の写真を示す。



第4図 E 19(CEX) (左) と E 21( $\pi N$ ) (右) の実験セットアップ ( $\pi 2$  ビーム)

E 19 (CEX), E 21 ( $\pi$  N) の両実験がスケジュールされた実験に入る前、昭和51年(1976)10月始から加速器のチェーンアップに併行して $\pi$  2ビームのビームサーベイが進められ、この $\pi$  2ビームサーベイの一環として、原子核ターゲットを用いて小規模の実験E( $\pi$  2 BS)が行われた。

この実験は $\pi$  2ビームを正電荷粒子にチューンした時に発生する非分離のp,  $\pi^+$ を原子核ターゲットC, Al, Cu, Wに入射し、pA  $\rightarrow \pi^+ X$ ,  $\pi^+ A \rightarrow \pi^+ X$ 反応で発生する $\pi^+$ の一体分布を実験室系30°(核子に対する重心系90°)で測定するものであった。

測定はビームチャネル偏向電磁石(8D320)を改造したスペクトロメーター電磁石と、6面のWSCおよび2台のガスセレンコフカウンターを用いて進められた。pA反応で発生する粒子の一体分布については、入射運動量300GeV/c, 28.5 GeV/cで断面積の質量依存性に異常性が観測されているので、その異常性が低い運動量でどのようにになっているかを調べることが実験の目的であった。この実験の結果も昭和53年(1978)東京国際会議に報告された。

T 1ビームは、本来テストビームチャネルとして、測定器のテスト等に使用する目的で設計されたビームチャネルである。その為ビームチャネルとしては、ビームの拡がり、運動量分散が比較的大きく、最大運動量も2 GeV/cどまりで、強度も $\pi$  2に比べれば1/100以下である。しかし、このビームの使用希望は意外と多く第I期の実験としてE 23 (STOP  $\pi^-$ )とE 26 (RADCH)の実験がこのビームを使用して行われた。

E 23 (STOP  $\pi^-$ )はT 1ビームで得られる0.75 GeV/c  $\pi^-$ を原子核ターゲット, Al.

Fe, Cd, Pbに入射して $\pi^+ A \rightarrow n X$ 反応で発生する中性子のエネルギー分布を実験室系50°, 90°, 130°で測定し、低エネルギー原子核反応で発生する中性子のエネルギー分布との相違を測定しようとするものであった。測定は中性子カウンターとGeディテクターを用い、中性子のエネルギーは飛行時間法(TOF)を用いて測定された。

E 26 (RADCH)の実験グループは全国の核化学研究者のグループで、放射化学の手法を用いて原子核反応の終状態を決定し、全断面積を測定した。この実験ではT 1ビームラインの $\pi^-$ ビームを用いてBe, C, F等の原子核を照射し、残存核の放射線の測定からA ( $\pi$ ,  $\pi$ N) A', A ( $\pi$ , X) A''等の反応の全断面積を決定し、入射エネルギーの函数として断面積の励起函数を求めた。

又、このグループはV等の重い原子核の核破砕の励起函数の測定あるいは固体飛跡検出器を用いて ${}^9\text{Be}$  ( $\pi^-$ ,  $\pi$ n)  ${}^8\text{Li}$ 反応の角分布の測定等多彩な活動を行った。

E 23 (STOP  $\pi^-$ ), E 26 (RADCH)の両グループはT 1ビームチャネルの建設の段階から準備を進め、強度、運動量幅の何れかを見ても第一級とはい難いビームを用いて、有意義な結果を上げたことは高く評価される。

昭和53年(1978)3月カウンター実験ホールに運び取出しビームが完成し、このビーム(EP 2-B)を用いてE 45 (DLC)の実験が5月から開始された。この実験は高エネルギー陽子を原子核に衝撃して、pA  $\rightarrow e^+ e^- X$ 反応で発生する電子を重心系90°で測定しようとする実験であった。実験はダブルアームスペクトロメーターを用いて $e^+ e^-$ 対の不变質量分布および、単一 $e^\pm$ の微分断面積を測定し,  $e^+, e^-$ の

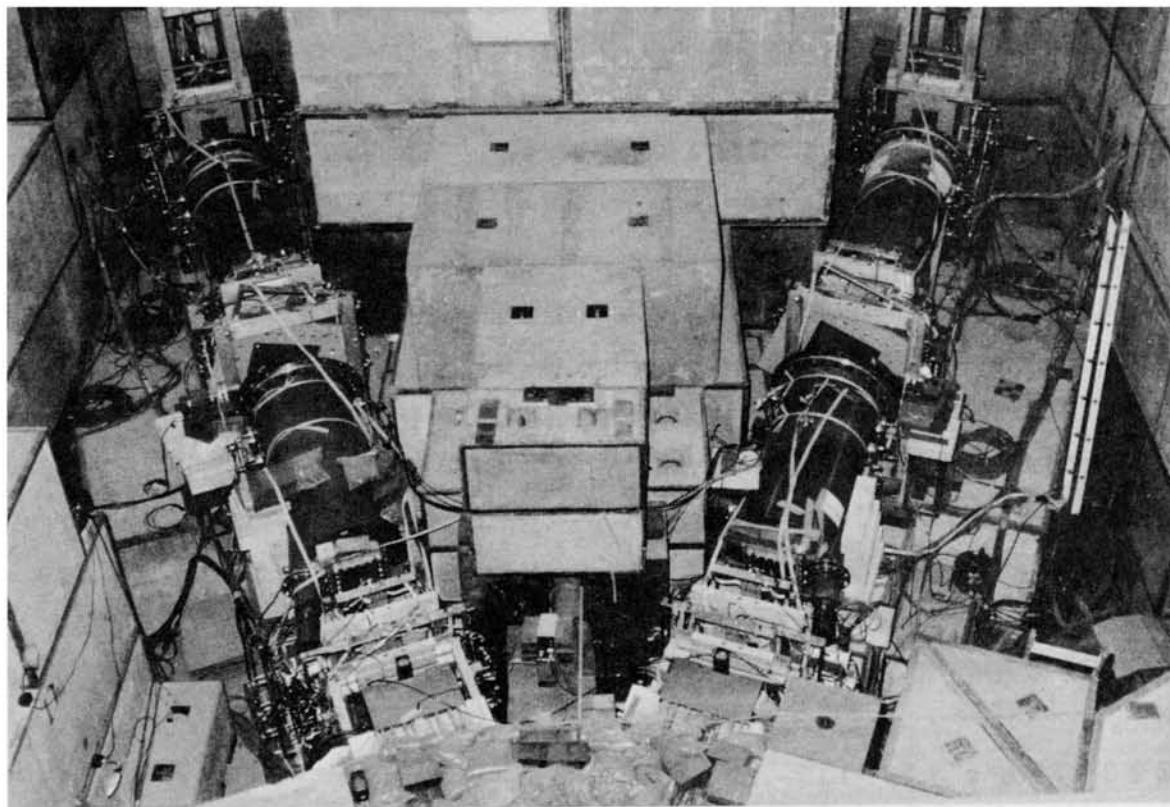
発生の機構を明らかにすることを目的とした。これ迄の実験で陽子核子衝突で発生するレプトン ( $e$ ,  $\mu$ ) の生成は  $\pi$  の生成に対して  $R = e/\pi \approx 10^{-4}$  程度あることが 300 GeV, 10 - 30 GeV のエネルギー領域で見出されており、この発生の機構については色々な解釈が出されていたが何れも決定的でなかった。加えて ANL (12 GeV), LAMPF (800 MeV) の実験は  $R \approx 0$  という結果を与えたので、この実験は著しくトピカルな様相を呈してきた。低いエネルギーでは  $R = 0$  で、高いエネルギーで  $R \geq 10^{-4}$  になるならば、これは入射エネルギー 10 GeV 近傍に閾値があり、例えば重いレプトンが生成されている可能性があるのではないかと考えられた。

以上のことから E 45 (DLC) と後で述べる泡箱実験 E 50 (DLBC) は昭和 53 年 (1978) 東京国際会議迄に、予備的なデータにせよ、何

等かの結果を出すことを目標にして実験がスケジュールされた。

E 45 (DLC) は、以上の状況から、入射エネルギー 8 GeV/c で予備的なランを行い、シングルアームの測定結果から  $R = e/\pi \geq 10^{-4}$  であることを確認した。本番の測定は 2 アームスペクトロメーターを用いて、入射陽子エネルギー 12 GeV で昭和 53 年 (1978) 11 月から測定を開始し昭和 54 年 (1979) 6 月にデータ収集を終了した。E 45 (DLC) の実験セットアップの写真は第 5 図に示す。

E P 2-B ビームは E 45 (DLC) に引継いで、E 66 (X) の実験に使用された。E 66 (X) は 12 GeV 陽子を Be ターゲットに入射して発生する  $\pi$  線を、ビームの軸に対して円周状に配置された鉛ガラスセレンコフカウンターレイで測定することにより、親の中性中間子を測定しようとする実験であった。この実験は



第 5 図 E 45 (DLC) の実験セットアップ

昭和54年(1979)6月から7月にかけてランを行った。

12GeVの定常運転が始まった直後、 $\pi^-$ ビームを用いてE63(CEXH)の実験を行った。この実験はE19(CEX)の延長であって、ビーム運動量3.49GeV/c, 4.22GeV/cで $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ 荷電交換反応の偏極パラメーターを前方向で測定するものであった。実験はE19(CEX)の検出系の幾何学的配置だけを変更して行われた。 $\pi^-$ ビームとしてはビーム運動量の高い点の測定だったので、陽子ビームエネルギーが8GeVから12GeVに上ったことはビーム強度の上で3~4倍の強度となり、8GeV運転の時に比べてデータテイキングの能率は高く、約1ヶ月のマシーンタイムで測定を終了した。

水素泡箱による第I期の実験は6GeV/c  $\pi^-$ を水素泡箱に入射して200kPixの撮影によりE06( $\pi$ RES), E12( $\pi$ DD)の実験を行った。

E06( $\pi$ RES)は水素泡箱に6GeV/c  $\pi^-$ を入射して発生する $\pi^- p \rightarrow (\pi^+, \pi^-, \pi^0)$ ,  $(K^0, \pi^\pm)$ ,  $(\Lambda, \pi^\pm)$ の測定を行い,  $K^*(892)$ ,  $\rho^0$ ,  $\omega^0$ ,  $\mu$ ,  $\Sigma^\pm$ 等の包含発生断面積を $x$ ,  $p_T^2$ 等のパラメーターの函数として求めた。

又, E12( $\pi$ DD)はE06と同一のフィルムを使用して,  $\pi^- p$ 反応で発生する $(\pi^0 p)$ ,  $(\pi^+ n)$ のdiffraction peakの測定を行った。

E06( $\pi$ RES), E12( $\pi$ DD)のための水素泡箱の運転は昭和52年(1977)12月から、冬のシャットダウンをはさんで、昭和53年(1978)1月にかけて行われ合計230kの撮影を行った。この中、解析に使用できたフィルムは約210kである。実験中に、撮影

されたフィルムを精査した結果、映像のクオリティーはCERN, SLAC, BNL等のフィルムと比較して遜色のないものであり粒子の飛跡から求めたビームの運動量、泡箱電磁石磁場強度分布についても、実験を行う前に行った測定結果と一致し、関係者に自信を与えた。

水素泡箱は昭和53年(1978)4月から6月迄E50(DLBC)のために連続運転を行った。この実験は、カウンター実験のE45(DLC)と同じく、8GeV/c陽子を水素泡箱に入射して $p p \rightarrow e^+ e^- X$ 反応で発生する $e^+ e^-$ 対を測定し,  $e^+ e^-$ 不变質量分布,  $R = e/\pi$ 比を測定しようとするものであった。ハドロン発生に対する $e^+ e^-$ 対発生はあるとしても $10^{-4}$ のオーダーであるから、実験に必要な撮影枚数は1,000kPixとされ、かつ圧倒的に多いハドロン発生の中で $e^+, e^-$ を確認するために、水素泡箱内に厚さ5mmのTa板4枚を設置した。電子はTaのような原子番号の高い物質に入射するとカスケードシャワーを発生するから、この性質を用いて電子とハドロンの区別を行うことができる。

限られた時間内に1,000kPixという可成り多量な撮影を行うために、水素泡箱の運転は、加速器の1パルス当たり2回の膨張を行い、可成りハードなスケジュールで実験を進めた。更に、Ta板の出し入れのため、泡箱窓ガラスの垂直位置脱着、ビームラインにキッカー電磁石を設置してパルス当たりの泡箱ビーム本数のコントロールを行う等、幾多の技術的な問題を克服して6月末、予定の1,000kPixを上廻る1,050kPixの撮影を完了した。加えて、Ta板による $e/\pi$ 分離効率の確認の為2GeV/c  $\pi^-$ 入射100kPixを撮影した。泡箱実験開始以来、半年間の間に、技術的に可成り難かしい問題を

一挙に克服し、成功裡に撮影を終了したことは、E 06, E 12 の成功にもまして関係者に大きな自信を与えた。E 50 (DLBC) の解析結果の一部は昭和 53 年 (1978) 東京国際会議で報告された。

昭和 53 年 (1978) 11 月、水素泡箱は E 53 ( $\pi$  A) の実験のための運転を行い、合計 245 k Pix の影響を行った。E 53 ( $\pi$  A) の実験は運動量  $2 \sim 4 \text{ GeV}/c$  の  $\pi^\pm$ , p を泡箱内に入射し、水素泡箱内に 3 種の原子核ターゲット、Be, Cu, Ta を挿入することにより、ハドロン原子核反応を測定する実験であった。

実験は 9 m 静電圧セパレーターを運転して一段分離により  $\pi^+$ , p の分離を行い、 $\pi^+$  ( $4 \text{ GeV}/c$ ,  $2 \text{ GeV}/c$ ),  $\pi^-$  ( $4 \text{ GeV}/c$ ,  $2.3 \text{ GeV}/c$ ), p ( $4 \text{ GeV}/c$ ) 入射で撮影を行った。一段分離では運動量  $4 \text{ GeV}/c$  に対して  $\pi^+$ , p の分離は必ずしも充分でない。E 53 ( $\pi$  A) グループは MWPC, ガスセレンコフカウンター等のカウンター測定系を用いて入射粒子の測定を行い、入射粒子の弁別に関しては、カウンターデータと泡箱写真上の入射トラックを対比させることにより  $\pi^+$ , p の分離を行った。このようにカウンター実験の手法と泡箱実験の手法を併用する方式ハイブリッド実験に成功したことは、本研究所泡箱実験で新しい機軸を用いたことになる。E 53 ( $\pi$  A) が得た泡箱写真の一例は物理研究系史の第 9 図に示される。

昭和 53 年 (1978) 10 月には、加速器のエネルギーも  $12 \text{ GeV}$  定常運転になり、又、強度も設計値である  $2 \times 10^{12} \text{ ppp}$  に到達した。加速器の運転のモードは、既に昭和 53 年 (1978) 4 月から、2 週間をユニットとしたサイクルモードに入り、1 サイクル中、共同利用実験に使用されるビームタイムは定常的に 170 - 190

時間 (21 - 24 シフト) となっている。実験に対する加速器の運転効率は平均して 95 % 以上に到達し、第 II 期昭和 54 年 (1979) - 昭和 55 年 (1980) の実験に入った。

## 2.2 第 II 期 (昭和 54 (1979) - 昭和 55 年 (1980)) の実験

第 I 期の実験が、加速器、実験実施のための主要機器装置、実験の実施等について、限られた時間の中で、既に 10 年以上の経験を有する海外の研究所のレベルに“追いつく”ことを主眼とする時期であるとしたら、第 II 期は、限られた部分であるにせよ、成る面では明白に“追い越す”ことを意識して実験を行った時期であると考えてよい。

第 I 期の終り頃、昭和 53 年 (1978) 10 月にはカウンター実験用外部陽子二次ビームライン K 2, K 3 の両ビームがそれぞれ運転を開始し、入念なビームのチューニングを行った。引き続き、K 2 ビームを用いて E 34 (KN) 実験が昭和 54 年 (1979) 1 月からチェックアウトを開始した。

E 34 (KN) の実験は K 2 ビームチャネルで分離された  $K^+$  ( $1 - 2 \text{ GeV}/c$ ) と偏極重陽子ターゲットを用いて、 $K^+ n (\uparrow) \rightarrow K^+ n$ ,  $K^0 p$  散乱の偏極非対称を測定するものであった。 $K^+ n$  散乱は E 19, E 21 で行った  $\pi N$  散乱と同じように基本的な実験であるが、 $K^+ p$ ,  $K^- p$  のデータに比べて信頼度の高いデータが少く、微分断面積のデータは幾つかあったが偏極のデータはなかった。僅かに、ラザフォード研究所 NIMROD がシャットダウン前に相当のマシーンタイムを使用して実験を行ったことは伝えられていたが、そのデータはなかなか公表されなかった。クォーク模型によれば、 $K^+ n$

系は  $K^+$  が ( $us^-$ ) であり  $n$  が ( $udd$ ) であるから、S チャネル共鳴は 5 ケのクォーク ( $u\bar{s}u\bar{d}d$ ) の結合状態として解釈することができる。更に、Regge pole 理論によれば  $K^+ n$  弹性散乱は  $K^+ p$  弹性散乱と較べて偏極度は符号が逆で大きさは等しい筈である。又、交換縮退の仮定が正しいならば、 $K^+ n \rightarrow K^0 p$  の偏極度は小さいことが予想される。以上のことから、E 34 (KN) の実験は基本的な実験であると同時にトピカルな要素を多分に含んでいた。

E 34 (KN) の実験装置の中心は TELAS スペクトロメーターと偏極重陽子ターゲットである。TELAS スペクトロメーター電磁石は C 型電磁石で、ビームは垂直ヨーク部に設けられた入射孔から入射する。その結果、磁極間にターゲットをおくことにより広い角度領域と大きな立体角の測定が可能である。更に、電磁石磁極に偏極ターゲット用補助磁極を取り付けることにより、反応分析用磁場と偏極用磁場とを同一の電磁石で形成することができる。

偏極重陽子ターゲットはデュートロプロベンダイオールを  $He^3 - He^4$  稀釈冷凍法で冷却することにより、実験中、平均 40% に達する偏極度を得ることができた。この値は世界的に見て記録的な値である。更に、 $K^+$  ビームの純度は直結型 6 m セパレーターの使用により  $R = \pi^+ / K^+ \approx 2/1$  程度であり、外国の研究所の同種のビームに比べて数倍から 1 衝近くクリーンである。

E 34 (KN) 実験は昭和 54 年 (1979) 1 月チェックアウトランに入ったが、昭和 54 年 (1979) 10 月から昭和 55 年 (1980) 5 月迄、カウンターホール工事のための制限強度運転期間中のビーム強度の低下により実施効率が低下した。従がって、昭和 54 年 (1979) 1

月から昭和 55 年 (1980) 5 月の間、K 2 ビームを  $K^+$  から  $p$  にきりかえ、入射ビームとして充分な強度を有する E 75 (pN) に実験をきりかえた。

E 75 (pN) は E 34 (KN) のセットアップを用いて  $p n (\uparrow) \rightarrow p n$  散乱の測定を行なった。E 75 (pN) は入射運動量  $1 \sim 2 \text{ GeV}/c$  の  $p$  ビームを用いて  $p n (\uparrow) \rightarrow p n$  散乱の偏極非対称の測定を行なうことを目的とした。

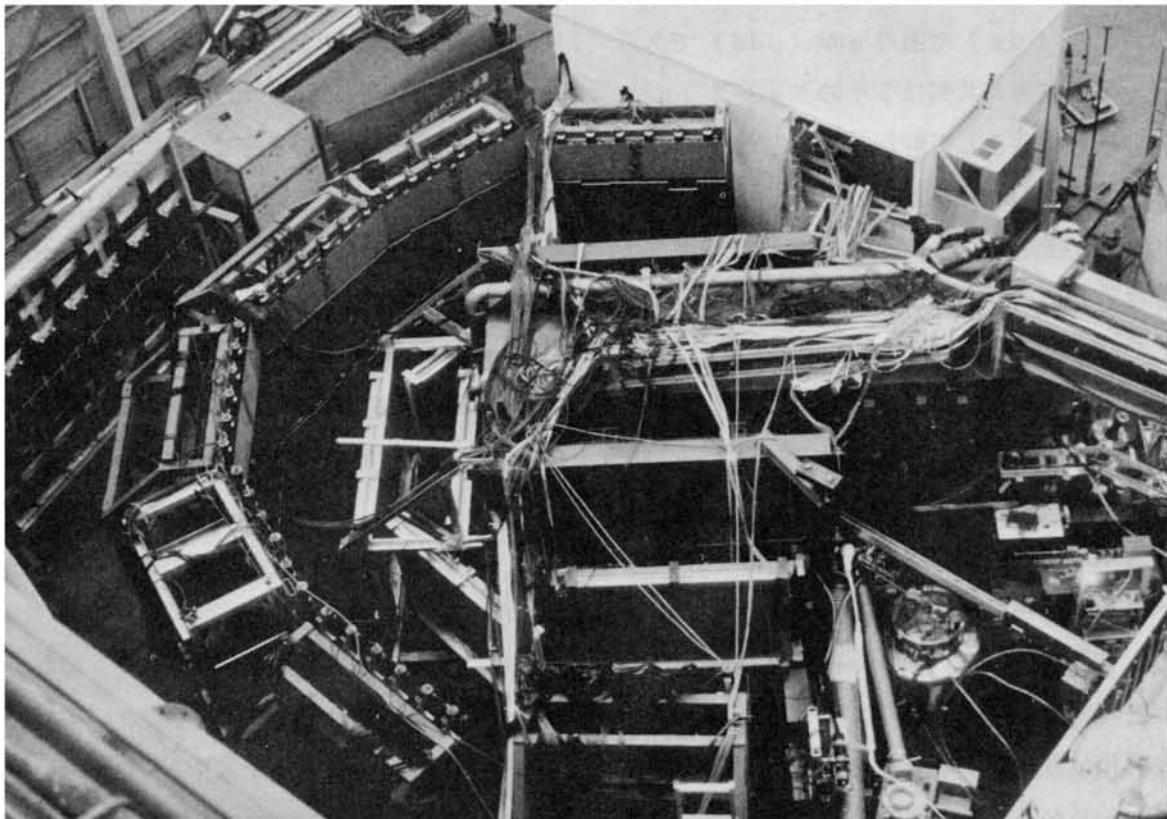
E 75 (pN) は  $p n$  二核子系による二核子共鳴 (ダイバリオン) の影響を  $p n (\uparrow) \rightarrow p n$  散乱の偏極非対称によって測定しようとするものである。従来、この運動量領域の  $p p$  散乱、および重陽子の光分解  $\gamma d \rightarrow p n$  のデータから二核子共鳴の存在を示唆するデータが幾つか出され、特に  $\gamma d \rightarrow p n$  反応は生成陽子の偏極が強いエネルギー依存性を有するとされており、その依存性から二核子共鳴を示唆するとされていた。従がって、同じ運動量領域で  $p n (\uparrow) \rightarrow p n$  散乱の偏極非対称を測定することは興味のあることであった。

E 75 (pN) は昭和 55 年 (1980) 5 月にデータテイキングを終了し、強度制限が解除されてから K 2 ビームは再び  $K^+$  にチューンされ E 34 (KN) を再開し、昭和 55 年 (1980) 7 月予定したデータテイキングを終了した。

第 6 図に E 34 (KN), E 75 (pN) の実験のセットアップの写真を示す。

K 3 ビームは K 2 ビームと同じように昭和 53 年 (1978) 10 月からチューニングを開始し、昭和 54 年 (1979) 1 月から実験に使用された。この時点では K 3 ビームの実験として採択されていた実験は E 10 (KDECAY) と E 33 ( $\bar{p} p R/Y N$ ) の 2 つがあった。

E 10 (KDECAY) は K 3 ビームの  $K^+$  ビー



第6図 E 34(KN), E 75(pN) の実験セットアップ (TELAS スペクトロメーター)

ムを用いて稀崩壊  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\bar{\nu}$  の存否を測定する実験であり、他方 E 33 ( $\bar{p}p$  R/YN) は  $\bar{p}$  ピームと陽子ターゲットを用いて  $\bar{p}p$  全吸収断面積を測定し、この数年問題になっている幅のせまい共鳴状態 S (1935) の存否を確かめようとする実験である。当初の予定では、E 10, E 34 の実験は第 I 期に行った E 19, E 21 の実験のように 2~3 サイクルおきに交替で実験を進める予定であったが、両実験の K 3 ピームに対する要求が異なること、K 3 ピーム生成ターゲット近傍の放射線レベルが非常に高くなり、ピームの切り替えに伴う真空ダクトとの脱着を行なうことは困難であると等の理由から、予定したスケジュールを変更し、E 33 ( $\bar{p}p$  R/YN) 実験を先発させ、E 10 (KDECAY) は E 33 の次に進めることにした。

E 33 ( $\bar{p}p$  R/YN) の実験は、K 3 ピームを  $\bar{p}$  にチューンし、 $\bar{p}$  が水素ターゲットを通過

する際の  $\bar{p}$  の吸収から  $\bar{p}p$  全断面積を測定するものである。若し  $\bar{p}p$  系に共鳴状態があれば、その質量に対応する入射  $\bar{p}$  運動量の点で吸収が大きくなる筈であるから共鳴の有無が確かめられることになる。 $\bar{p}$  は 3 ケの反クォーク、 $p$  は 3 ケのクォークから形成されていると考えられるから、 $\bar{p}p$  共鳴はクォーク 1 ケと反クォーク 1 ケから成り立つ中間子と異なり 2 ケ以上のクォークと反クォークから成り立つことになる。このような共鳴状態 (バリオニウム) が存在するか否かは、現在の素粒子物理学の最も大きなトピックの一つである。

実験は前述のように  $\bar{p}p$  全断面積の測定になるが、この実験を高い信頼度をもって行うためには幾多の問題がある。 $\bar{p}p$  共鳴として最も代表的な共鳴は S (1935) であるが、その共鳴の幅は 10 MeV 程度、全断面積は 5~10 mb の程度とされているから、入射  $\bar{p}$  のピーム運動

量幅は共鳴の幅以下であることが要求される。 $\bar{p}$ ビームの運動量幅を小さくすることは $\bar{p}$ ビームの強度を下げる事になるから、当然測定の統計精度が悪くなる。更に、測定した吸収係数から全断面積を求めるためには前方微分断面積についての情報が必要であり、加えて、入射 $\bar{p}$ ビームはターゲット以外の物質を通過するから、それらの物質による吸収を高い信頼度で補正しなくてはならない。

E 3 3 ( $\bar{p}p$  R/YN) 実験より前に行われた実験のあるものはS(1935)の存在を肯定し、あるものは否定しているが、以上のような補正に必要なデータ迄同一のセットアップを用いて測定した実験は行われていなかった。

E 3 3 ( $\bar{p}p$  R/YN) グループは、ハイパー核の実験を行うために分解能の高いスペクトロメーターを整備していた。しかし、S(1935)共鳴の重要性と緊急性から、昭和54年(1979)E 3 3 グループはP A Cにハイパー核の研究からこの課題にテーマを変更することを提案し、それがP A Cによって認められた。幸に、実験のセットアップについては水素ターゲットを除いて大きな変更を必要とせず、昭和54年(1979)3月からチェックアウトに入り、7月に予定のデータティキングを終了、§ 3で述べるように、トピカルなテーマに相応して迅速にその結果を報告した。E 3 3 ( $\bar{p}p$  R/YN) の実験のセットアップの写真は物理研系史の第6図に示される。

昭和54年(1979)夏のシャットダウン中にK 3 エリアはE 3 3 ( $\bar{p}p$  R/YN) からE 10 (KDECAY)へのセットアップ変更が行われ、10月からE 10 (KDECAY)のチェックアウト(測定器のチューニング)に入った。

$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊は崩壊の前後ストレンジネ

スは変化するが荷電は変わらないのでストレンジネスを変える中性電流によっておこると考えられる。ところが、弱い相互作用、電磁相互作用を統一的に記述すると考えられているワインバーグ、サラムの理論では、弱い相互作用の一次効果ではこの電流は存在しない。二次の効果迄考えれば  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  は分岐比  $BR \approx 10^{-10}$  となり、若し  $t$  クォークが効くとするとこの値は  $10^{-9}$  程度あってもよいことになる。

一方、実験の方はE 1 0 (KDECAY)が開始される迄の世界中の全データを使用した上限は  $BR \leq 5.7 \times 10^{-7}$  であり、E 1 0 (KDECAY)はこの上限を数倍改善することを目標として計画された。更に、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  崩壊だけでなく、最近ビームダンプ等の実験でその存在が問題になっているアキシオン  $a$  の存在について、 $K^+ \rightarrow \pi^+ a$  崩壊の分岐比は今迄のデータからは  $BR \leq 2.7 \times 10^{-7}$  であり、この上限を改善することも、併せて目的とされた。

E 1 0 (KDECAY) の実験はK 3 ビームを 530 MeV/c で運転し、それ自身がカウンターである標的内で静止崩壊させる。 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  崩壊を測定するためには数の上で圧倒的に多い  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ ,  $\pi^+ \pi^0 \pi^0$ ,  $\mu^+ \nu$ ,  $\mu^+ \nu \gamma$  等のバックグラウンドの中で同定することが必要である。その同定のために、6面のMWPC、鉛ガラスセレンコフカウンターアレイ、水セレンコフカウンター等を可成複雑に配置し、 $K^+$  崩壊の信号波形をトランジントディジタイザーで測定した。

E 1 0 (KDECAY) の実験は入射する  $K^+$  の数自身が測定結果の上限を決定することになるので昭和54年(1979)10月から昭和55年(1980)5月迄の強度制限運転は可成り厳しく、この間は主に測定系のチューニングに使

用され、本格的なデータテイキング昭和55年（1980）10月から12月にかけて行われた。幸にこの間の加速器の強度、安定性は非常によく、強度は平均して  $(2.6 - 2.8) \times 10^{12}$  ppp であり E P 2 A-C に分岐しても平均して  $(1 - 1.5) \times 10^{12}$  ppp の強度があった。加えて10月から12月の間は E P 2 ビームの大部分を E 10 (KDECAY) に分岐したのでデータテイキングは順調に進行し、総数で  $1.49 \times 10^{10}$  K<sup>+</sup> を崩壊させることができた。更に K<sup>+</sup> ビームの純度は  $R = \pi^+ / K^+ \approx 3/1$  と外国の研究所の同種のビームに比べて格段に良好であり信頼性の高いデータが得られた。E 10 (KDECAY) の実験結果については § 3 で述べる。

昭和55年（1980）E 10 (KDECAY) の最後のサイクルは、E 10 の実験セットアップを用いて E 89 (Kμ) の実験の予備ランを行った。E 89 (Kμ) 実験は現在最もトピカルな問題の一つであるニュートリノの質量に関する実験である。ニュートリノの質量の有無については、これが極めて重要な問題であるにも拘らず、そのことを意識的に追究した実験は以外と少ない。

E 89 (Kμ) の実験では  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu, e^+ \nu$  崩壊で若しニュートリノに質量があるならば μ<sup>+</sup>, e<sup>+</sup> の運動分布にその影響が観測される筈であるから μ<sup>+</sup>, e<sup>+</sup> の運動量分布をブロードレンジ電磁石を用いて測定し、 $50 \text{ MeV} < m_\nu (c^2) < 350 \text{ MeV}$  のニュートリノの存否を決定しようとするものであり、第Ⅲ期の実験として主要な実験の一つである。

E 10 (KDECAY) の実験は  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$  崩壊の μ<sup>+</sup> のエネルギーをレンジ法で測定するから、限られた質量範囲のニュートリノの存否に対して解答を与えることができる。E 10 グル

ープと E 89 グループ協力チームは昭和55年（1980）12月1サイクルのマシーンタイムを使用して既に有意義な結果を出した。その結果は § 3 に述べるが、この実験もトピカルな問題に相応しく、予備的な結果であるにせよ迅速に結果を出したことは評価さるべきことである。

以上の K 2, K 3 の実験に併行して、昭和54年（1979）3月から πμ ビームチャネルで、薄いターゲットから発生する低運動量 ( $\leq 500 \text{ MeV}/c$ ) の π, μ ビームを用いて幾つかの実験が行われた。

E 65 (πμ) の実験は πμ ビームチャネルで発生した π<sup>±</sup> ビームを使用して Al, Cu, Au 原子核ターゲットに対する π<sup>±</sup> 吸収および吸収に際して発生する γ 線の多重度の測定を行なった。

実験は運動量  $30 - 300 \text{ MeV}/c$  の π<sup>±</sup> を用い、5台の NaI 検出器とシンチレーションカウンターを原子核ターゲットの周辺に配置して、吸収および γ 線の多重度の測定を同時法で測定した。

E 65 (πμ) の実験は昭和54年（1979）5月から昭和55年（1980）3月迄 K 2 ビームの実験のパラサイトとして進められ、幾つかの興味のある結果を報告している。その結果については § 3 に紹介する。

昭和55年（1980）3月から5月にかけて πμ ビームは E 72 (μSR) の実験に使用されミュオンスピン偏極の測定が行われた。ミュオンスピン現象は物性物理学を含め広い範囲の応用が可能であり、ブースタービーム利用の大きな柱である。

E 72 (μSR) グループはミュオンスピン偏極について予備的な実験を行った段階で E 89 (Kμ) の実験提案を行なった。PAC は提案の

緊急性を考慮し、採択に当って、E 72 ( $\mu$ SR)を取り下げるなどを条件にしてE 89 (K $\mu$ )を採択したのでE 72 ( $\mu$ SR)はこの段階で終了したことになった。

$\pi\mu$ ビームはE 72 ( $\mu$ SR), E 73 (MED), 或いは、測定器のテスト等に広範囲に使用された。この中、E 73 (MED)は $\pi$ 中間子の医学利用のための基礎的なデータを得ることを目的とした実験である。このように $\pi\mu$ ビームは素粒子物理学の領域以外の研究にも有効に使用されている。

第Ⅱ期に入ってから、主要なカウンター実験は外部陽子ビームを用いて行われるようになつたことから内部ターゲットへの陽子強度は $1 \times 10^{11}$  ppp以下にすることになった。これは内部ターゲット近傍の放射線汚染を少くするために必要止むを得ない措置であり、第Ⅱ期の前半 $\pi^2$ ビームは殆ど実験に使用されることがなかつた。しかし、陽子強度を $1 \times 10^{11}$  pppに抑制しても $\pi^2$ ビームは強力なビームラインであつて、実験によっては充分なビーム強度を期待できる。

E 65 ( $\pi\mu$ ) グループは $\pi\mu$ ビームによる実験の終了後、 $\pi^2$ および $\pi\mu$ ビームを用いるE 71 ( $\pi$ AC) の提案を行い採択された。

E 71 ( $\pi$ AC) の実験は幾つかの実験目的があるがその第1は $\pi\mu$ ビームチャネル自身をスペクトロメーターとして使用することにより、 $1.2 \text{ GeV}$ 陽子を原子核ターゲットに入射した時に発生する軽核粒子、p, d,  $\text{He}^3$ ,  $\text{He}^4$ …, 等を実験室角度 $90^\circ$ (重心系で $\sim 135^\circ$ )で測定することであり、第2は $\pi^2$ ビームの $2 \sim 4 \text{ GeV}/c$ の $\pi^\pm$ を原子核ターゲットに照射して、ターゲットから発生する荷電粒子の多重度を円筒型MWPCを用いて測定することであった。

第1の実験は昭和55年(1980)5月～6月にかけて行われ、第2の実験は昭和55年(1980)12月から昭和56年(1981)3月にかけて進行した。

第Ⅱ期の水素泡箱実験は9 mおよび6 mの2台のセパレーターを用いたダブルステージビームK 1を用いて進められた。独自の電源直結方式により、KEK 9 mセパレーターは800 kVの運転が可能であり、6 mセパレーターは最高到達電圧 1,050 kVを記録し、900 kVの定常運転が可能である。

昭和54年(1979)1月からダブルステージビームのチューニングを開始し、5月からE 57 (ppBC), 6月からE 62 ( $\bar{p}p$ BC) の実験を進めた。

E 57 (ppBC) は運動量 $1 \sim 2 \text{ GeV}/c$ のpp反応を調べる実験であつて、pp弹性散乱し、非弹性散乱、ダイバリオン等を解明することを目的としている。低い運動量であるから、ビームを正電荷にチューンした時の $\pi^+$ , pの分離は比較的容易で、pの純度は99.95%に達し、220 k Pix の撮影を行なつた。

E 62 ( $\bar{p}p$ BC) は運動量 $3 \sim 4.5 \text{ GeV}/c$ の $\bar{p}$ を水素泡箱に入射し 1,000 k Pix の撮影を行うものである。この実験の目的は(1) $\bar{p}p$ 反応におけるバリオニウムの探索(2) $\bar{p}p$ 反応におけるストレンジ粒子発生、等である。両実験とも写真の追加撮影がPACで認められ、E 57 (ppBC) は 200 k Pix, E 62 ( $\bar{p}p$ BC) は 1,000 k Pix それぞれ追加されることになった。

E 7.9 (SHBC) はE 50 およびこのグループがSLACで行なつてあるBC-65実験( $20 \text{ GeV}/\gamma$ によるチャーム粒子の生成)に関連した較正実験である。水素泡箱でe/ $\pi$ の分

離を高い精度で測定するためには、 $T_a$  のような板を泡箱内に設置し、電子により発生するカスケードシャワーを測定することにより電子であることを同定する。このことを高い精度で行うためには、分離の相手である $\pi^\pm$ が、泡箱中でカスケードシャワーに似た飛跡をつくる現象について充分な理解が必要である。この目的のために、E 79 (SHBC) は水素泡箱内に $T_a$  板を設置し、静電セパレーターで $e^\pm$  の含有の少ない( $< 10^{-5}$ ) 純化された $\pi^\pm$  ビーム(1 GeV/c) を入射して 250 k Pix の撮影を行った。E 79 (SHBC) のための泡箱運転は、昭和 55 年(1980) 6 月に行われ、その後泡箱は再び E 62 ( $\bar{p}pBC$ ) のための運転を行った。

### 2.3 第Ⅲ期(昭和 56 年(1981) 以降) の実験

昭和 56 年(1981) は陽子シンクロトロンの実験が本格的な段階に入る時期であるとともに、トライスタン計画の発足、日米協力を軸にする国際協力活動、更に放射光実験施設、ブースター利用施設の完成等、研究所の活動が多様化してきた時期である。このような段階で、陽子シンクロトロンによる実験研究を効果的に進めるためには、吾国の高エネルギー物理等の進展について、相当長期的な見地から、その方策が策定されることが必要である。

昭和 55 年(1980) 度中に E 80 から E 92 迄、13 件の実験の提案があり、その中で採択された実験は資料編 8.7 に示されるように 8 件である。これらの実験および現在(9 月)迄に認められた実験の中、E 81 (KDEL), E 83 ( $\pi D$ ), E 84 (EMUL), E 88 (DDEC), E 89 ( $K\mu$ ), E 91 ( $\pi$  NUCL) は昭和 56 年(1981) 中にマシーンタイムに入るようスケジュールされている。

E 81 (KDEL) は K 2 ビームを用いて運動量 1 ~ 2 GeV/c に亘って  $K^+(d)(\uparrow) \rightarrow K^+$  d 弹性散乱の微分断面積、偏極非対称の測定を行う実験で、既に、昭和 56 年(1981) 5 月からチェックアウトランに入っている。

E 89 ( $K\mu$ ) は前に述べたように E 10 (KDECAY) のセットアップで予備的なランを終了し昭和 56 年(1981) 10 月から本番の実験に入る予定である。

水素泡箱実験としては E 80 ( $p\bar{p}BC$ ) の実験が昭和 56 年(1981) 5 月に行なわれ、220 k Pix の撮影を完了した。この実験は入射粒子として運動量 2 ~ 4 GeV/c の分離された重陽子 d を、0.2 GeV/c ステップで泡箱に入射して、 $d p$ ,  $n p$  散乱、反応を調べることを目的としている。二段分離により純度の高い重陽子ビームを用いて撮影は順調に進行し、目下フィルムの解析を行っている。

E 84 (EMUL) は原子核ターゲットと原子核乾板から構成されるエマルジョンチェンバーに、陽子シンクロトロンから得られる二次ビームを照射することにより、ハドロン原子核反応の研究を行うものであって、既に昭和 56 年(1981) 7 月、泡箱ビームライン K 1 を  $\bar{p}$  にチューンして  $3 \text{ GeV}/c 1.5 \times 10^5 \bar{p}$  の照射を行った。原子核乾板に純度の高い( $\geq 99\%$ )  $\bar{p}$  を組織的に入射した例は、今迄世界的に殆ど行われていないので、今後のユニークな成果が期待される。

E 88 (PDEC) は陽子崩壊の観測のためのネオングラッシュチェンバーのテストを  $\pi 2$  ビームで行うものであり、既に昭和 56 年(1981) 3 月ランを終了した。E 83 ( $\pi D$ ) は  $\pi 2$  ビームを運動量  $0.5 \sim 1.0 \text{ GeV}/c$  にチューンして

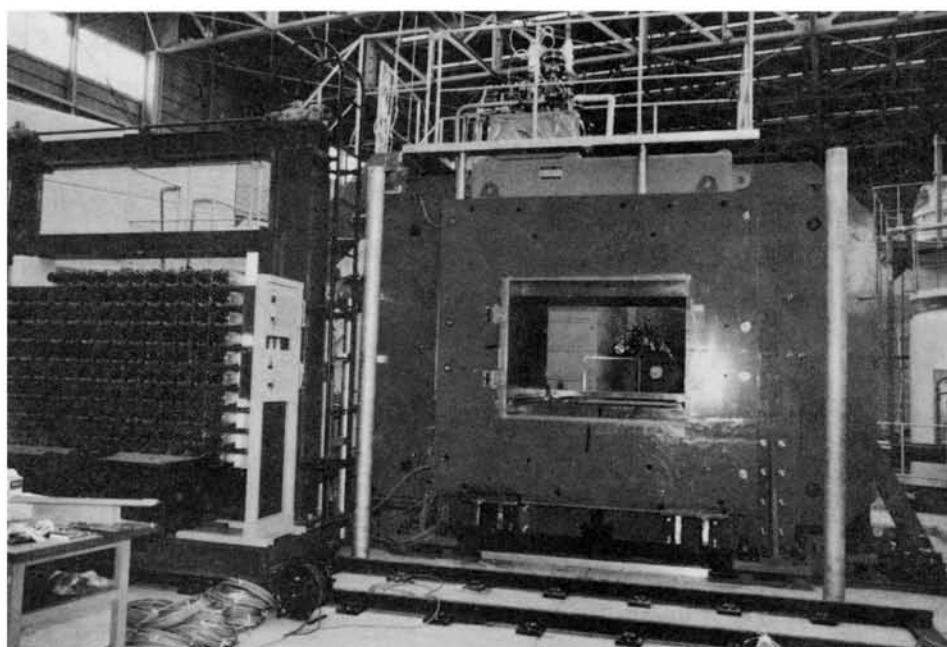
得られる $\pi^\pm$ を用いて、 $\pi^\pm d \rightarrow N + N$ 反応の微分断面積の測定からダイバリオンの研究を行うものである。E 83 ( $\pi D$ ) は昭和 56 年 (1981) 10 月からチェックアウトランに入る予定である。E 91 ( $\pi$  NUCL) は $\pi\mu$ ビームを用いて、低運動量 $\pi$ による原子核反応で発生する粒子の相関を測定しようとする実験で昭和 56 年 (1981) 10 月からチェックアウトランに入る予定である。

昭和 55 年 (1980) 以前に採択され、昭和 56 年 (1981) からチェックアウトに入る実験は E 49 ( $\Lambda$ )、E 64 ( $\pi I$ ) の両実験である。E 49 ( $\Lambda$ ) 実験は 12 GeV 陽子を原子核ターゲットに衝撃して発生する偏極した $\Lambda$ の $\Lambda \rightarrow p\mu\nu$ 、 $p e \nu$ 崩壊の非対称度を測定することを目的としている。

$\Lambda \rightarrow p\mu\nu$ 、 $p e \nu$ 崩壊については、従来の実験値と Cabibbo 理論からの値との間に大きな

相違があり、E 49 ( $\Lambda$ ) はこの点を明らかにしようとするものである。E 49 ( $\Lambda$ ) 実験は $\Lambda$ の崩壊で発生する陽子とレプトン ( $\mu$ ,  $e$ ) のそれぞれを陽子用電磁石、電子用電磁石を用いて運動量分析を行い、電磁石の前後方に配置された MWPC, DC を用いて、崩壊粒子軌道の再構成を行うものである。E 49 実験は昭和 56 年 (1981) 5 月からチェックアウトランに入っている。

E 64 ( $\pi I$ ) は昭和 56 年 (1981) 10 月から運転を開始する予定になっている $\pi^- p \rightarrow$ (中性粒子)  $X$ 、(中性粒子)  $\rightarrow \pi^+ \pi^-$ ,  $\pi^+ \pi^- \pi^0$ ; ……等の反応を前方向で測定しようとする実験である。E 64 ( $\pi I$ ) グループはこの実験に使用するスペクトロメーター電磁石として“べんけい”スペクトロメータを超伝導電磁石に改造し、昭和 56 年 (1981) 3 月その運転に成



第 7 図 E 64 ( $\pi I$ ) の実験セットアップ (超伝導べんけいスペクトロメーター)

功した。その後 140 ケの鉛ガラスを用いた鉛ガラスセレンコフカウンターアレイ、MWPC 等の検出系の整備を行い、昭和 56 年（1981）7 月チェックアウトランを開始、10 月から、超伝導偏向電磁石（SD 430）2 台を用いた  $\pi^+$  ビームを用いて実験に入る予定である。準備中の E 64 ( $\pi$  I) のセットアップを第 7 図に示す。

現在、昭和 56 年（1981），準備中の実験は E 68 ( $\bar{p}pC$ )，E 92 ( $\Sigma$ )，E 82 (SPAL) 等の実験である。E 68 ( $\bar{p}pC$ ) は昭和 57 年（1982）建設される予定の K 4 ビーム（K 3 から分岐される  $\bar{p}$  ビーム）を用いて  $\bar{p}p \rightarrow \pi^0$ ,  $\gamma$ , X 反応によりバリオニウムの測定を行う予定である。又、E 92 ( $\Sigma$ ) は  $\pi^+ p \rightarrow K^+ \Sigma^+$  で発生する偏極した  $\Sigma^+$  の  $\Sigma^+ \rightarrow pr$  の非対称パラメータ  $\alpha$  の測定を、K 2 ビームと TELAS スペクトロメーターを用いて行う実験である。 $\alpha$  の値について、今迄の実験値は標準的な理論の値と大きく異っているので、その点を解明することが E 92 ( $\Sigma$ ) 実験の目的である。E 68 ( $\bar{p}pC$ ), E 92 ( $\Sigma$ ) の実験は昭和 57 年（1982）に開始される予定である。E 82 (SPAL) は一次陽子ビームを重い原子核に入射して発生する核破碎現象を研究する実験であり、昭和 56 年（1981）10 月から、陽子ビームラインを用いて進められる予定である。

水素泡箱は昭和 56 年（1981）5 月から 7 月にかけて、E 57 ( $p p BC$ ) の追加撮影 220 kPix, E 80 ( $p d BC$ ) の撮影 220 kPix および E 62 ( $\bar{p}p BC$ ) の追加撮影 240 kPix を行って 7 月 3 日その運転を完了した。本研究所水素泡箱は昭和 52 年 12 月以来、共同利用実験に使用開始以来約 3.5 年間、合計 500 万枚以上の撮影を行い、幾多の成果を無事故で以て挙げた

ことは高く評価されるべきことである。

### § 3. 陽子シンクロトロンによる実験の成果

#### 3.1 今迄に得られた実験の成果

陽子シンクロトロンによるカウンター実験は、その実験のサイズにもよるが、平均して、その準備に 1 年間、ビームを用いて行うチェックアウトおよびデータテイキングに 1 年間、そのデータの解析を行って論文にする迄に 1 年間、合計して 3 年間の期間を必要とする。この値は、平均の素粒子物理のカウンター実験の場合であって、勿論ファクター 2 程度の幅がある。

泡箱実験は、ハイブリッド実験、あるいは泡箱に特殊の細工（例えばターゲットの設置）等を行う場合を除いて、データテイキングに相当する撮影は、要求するフィルム枚数にもよるが、泡箱とビームの運転が順調に進めば、シングル運転で 1 サイクル 200 k Pix の撮影が可能である。従がって、多少のトラブルがあっても、撮影そのものは 1~2 ヶ月で終了する。勿論、水素泡箱の運転そのものは、実験を行う前から冷却を開始し、実験後、液体水素をリザーバーに戻す迄に必要な期間は撮影を行っている期間と同程度の期間を必要とする。しかし、ビームを入射して撮影を行っている期間は、カウンター実験に比べてはるかに短かい。

しかし、フィルムの測定と、データの処理は、目的とするイベント、測定器の性能と台数、測定のマンパワー、電子計算機の能力等によるが、年のオーダーの時間を必要とする実験が少くない。

一方、特にトピカルなテーマ、あるいは他の研究所と競合しているテーマの実験の場合には、データの質と同時に結果を 1 日でも早く公刊することが必要になってくる。

この意味で、第Ⅰ期の実験としてトピカルな要素より基礎的な反応の実験に重点をおいて採択が行われたのは、充分に当を得た判断であったと考えられる。第Ⅱ期、第Ⅲ期と回を重ねるにしたがって、測定器等のハードウェアの面でも、データ解析のソフトウェアの面でも蓄積が重ねられ、トピカルな実験を、それに相応しい迅速さと機動性によって行うことができるようになった。

しかし、平均的に考えると、高エネルギー実験は実験の準備から結果の公刊迄、かなりの時間がかかり、現時点での最終結果が公刊された実験は第Ⅰ期から第Ⅱ期の前半にかけて行なった実験がその殆んどであり、その後に行なった実験の成果は今後に待たなければならない。

各実験の成果は、(1)強い相互作用、(2)電磁相互作用および弱い相互作用、(3)原子核ターゲットの実験の3つに分けて述べる。実験の目的、実験装置の概略については§1の実験の経過のところで述べたので、ここでは結果の要点を示す。実験結果のグラフ、テーブル等の詳細、メンバー等については本章末のリストに掲げた原論文を参照されたい。

### 3.2 強い相互作用の実験

(a) E 19 (CEX), 2.0~3.0 GeV/cにおける $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$  荷電交換反応の微分断面積と偏極パラメーターの測定およびE 63 (CEX H), 3.5~4.0 GeV/cにおける $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$  反応の前方向の偏極パラメーターの測定

1. 微分断面積；E 19 の結果はLBL, Rutherford の結果と一部を除いて一致する。

偏極；E 19 の結果はRutherford の結果と一部を除いて一致する。E 63 の結果

はANLの測定と一致する。

2. Saclay 74, CMU-LBL 78, Karlsruhe-Helsinki の部分波解析の結果とは運動量が高くなるにつれて悪くなる。
3. この不一致は角運動量の高いG, H波による。
4. 現在行われているKarlsruhe-Helsinki 80, CMU-LBL 80 の部分波解析に大きな貢献をした。

以上のようにE 19 (CEX) の実験はこの実験以前に行なわれていたLBL, Rutherford, ANL の実験データに関し normalization を与える役割を果し、部分波解析の上で次に述べるE 21 ( $\pi N$ ) の実験結果とともに重要な寄与を行なった。

(b) E 21 ( $\pi N$ ), 1.8~3.0 GeV/c 領域における $\pi^+ p$  弹性散乱の微分断面積と偏極の精密測定

1. 微分断面積；前方では従来のデータとよく一致するが後方ではかなりの相異がある。E 21 のデータは後方で豊かな dip-bump 構造を示し、4つの dip, 1つの bump の位置を精度よく与えた。尚、E 21 の 2.5 GeV/c のデータからEricson 携動は認められなかった。

偏極；ANL, CERN-TRIESTE, 等のデータと比較して一部一致しない。しかし高いエネルギーの偏極のデータと微分断面積との対応はE 21 のデータの方がよい。

2. 同一の実験セットアップで 3.5 GeV/c 迄の測定を行い、E 19 のデータとともに部分波解析に決定的なデータを与えた。
3. 部分波解析でD.F.G 波の共鳴状態の同定に大きな貢献を与えた。
4. 3.5 GeV/c の振幅解析から Dual Ab-

sorption Model で 6 GeV/c のデータとともに、このモデルがデータとよく一致することを確めた。

E 21 ( $\pi N$ ) は、特に後方に重点をおいて測定を行い、これ迄、精密に同定されていなかった高次の部分波解析に E 19 (CEX) とともに大きな貢献をした。

(c) E 06 ( $\pi$  RES) ; 中間エネルギー領域における  $\pi N$  非弾性散乱の研究

E 06 ( $\pi$  RES) 実験は 6 GeV/c  $\pi^- p \rightarrow (\pi^+, \pi^-)$ ,  $(\pi^+, \pi^-, \pi^0)$ ,  $(K_s^0, \pi^\pm)$  ( $A, \pi^\pm$ ) の不変質量分布の測定から

1. 6 GeV/c の  $K^*$  (892) と  $\Sigma$  (1385) の生成は 405 GeV/c のそれと比べて高エネルギー限界に達していない。
2. 6 GeV/c の  $\rho^0$ ,  $\omega$ ,  $f$  の  $x$  分布を 405 GeV/c のデータと比較して、これらのベクター中間子の一本分布も  $K^*$  (892),  $\Sigma$  (1385) のようなストレンジ粒子と同じように高エネルギー限界に達していない。

E 06 実験グループは、6 GeV/c の泡箱フィルムの測定に入る前に、SLAC および FNAL の 4.5 GeV/c  $\pi^- p$ , 405 GeV/c pp のフィルムを用いてその解析を行い、その結果と 6 GeV/c  $\pi^- p$  を比較することにより、入射運動量依存性、高エネルギー漸近性の研究を行った。これらについては物理研究系史を参照されたい。

(d) E 12 ( $\pi$  DD) Diffraction dissociation を中心とした 3 体反応の研究

E 12 ( $\pi$  DD) 実験は E 06 ( $\pi$  RES) と同じフィルムを用いて  $\pi^- p \rightarrow \pi (\pi N) dd$  の測定を行った。 $\pi (\pi N) dd$  イベントのバックグラウンドイベントからの分離は多次元解析の手法を用いて行い、 $\pi N$  系で 1.36, 1.48, 1.64 GeV/c<sup>2</sup> のシャープな質量のピークを見出した。

CERN 16 GeV/c  $\pi^+ p$  のデータでも同じピークが観測される。これらのピークはポメロンの交換により発生する 5 体クォーク状態と考えることができる。

(e) E 34 (KN) ;  $K^+ n (\uparrow) \rightarrow K^+ n, K^0 p$  反応の研究

E 34 (KN) の実験はビーム運動量 1.06, 1.28, および 1.49 GeV/c について  $K^+ n (\uparrow) \rightarrow K^+ n$  および  $K^0 p$  反応の偏極度を測定した。この測定結果から、

1. Rutherford group の実験の結果と大体一致する。
2.  $K^+ p$  弹性散乱と比べて  $K^+ n$  散乱の偏極度は符号が逆であり、大きさもそれほど違っていない。従がって Regge Pole 理論の予言と一致する。
3. 一方、 $K^+ n \rightarrow K^0 p$  反応の偏極度は正の非常に大きい値を示す。これは交換縮退の仮定が正しくないか、もしくは低いエネルギーで適用できないかの何れかである。
4.  $K^+ n \rightarrow K^+ n$  の偏極度は  $K^+ p \rightarrow K^+ p$  の場合に比べて大きなエネルギー依存性を示す。これは  $I = 0$  振幅に共鳴状態にあたるもののが存在することを示す。
5. これまでの部分波解析の予言値は今回の実験値を再現しない。従って新たな解析が必要である。

6. E 34 (KN) グループが行った部分波解析の結果は、 $Z_1^*$  ( $P_{13}$ , 1931),  $Z_0^*$  ( $P_{01}$ , 1778),  $Z_0^*$  ( $D_{03}$ , 1865) が存在することを示す。

(f) E 75 (pN), 0.8 ~ 2.0 GeV/c 領域における pn ( $\uparrow$ )  $\rightarrow pn$  反応の研究

E 75 (pN) の実験はビーム運動量 1.06, 1.30, 1.39, 1.49, 1.59 および 1.82 GeV

$/c$  について  $p_n (\uparrow) \rightarrow p_n$  反応の偏極度を測定した。その結果から、

1. 偏極度のエネルギー依存性は非常に少ない。
2. 従って、これまでいわれてきた 3F3 (2220) や重陽子光分解反応で見えたとする二核子共鳴状態の強い効果は今回の測定ではみられない。
3.  $\theta \sim 50^\circ$  における E 75 (pN) のデータは星崎等の解析と矛盾しない。

P 75 (pN) の部分波解析は現在続行中である。

(g) E 33 ( $\bar{p}p$  R/YN), 400-700 MeV  
 $/c$  における  $\bar{p}p$  反応全断面積の測定

E 34 ( $\bar{p}p$  R/YN) の測定は入射  $\bar{p}$  運動量 396-737 MeV/c にわたって行われた。その結果、

1. 90% 信頼限界上限として、幅 5 MeV の共鳴に対して上限 1.26 mb, 幅 10 MeV を仮定すれば上限 9.8 mb が得られ、これらの値は Carroll 等の報告した S 共鳴を排除する。
2. 前方微分断面積を測定し、クーロン振幅と  $\bar{p}p$  散乱振幅の干渉から  $\bar{p}p$  散乱振幅の実数部を求めた。このデータも共鳴の存在を示さない。
3. 485-597 MeV/c の運動量領域で原子核ターゲットを使用して  $\bar{p}A$  の吸収断面積の測定を行った。従来のデータは 1.3 GeV/c 以下にないので有用なデータを提供したことになる。吸収断面積の質量数 A 依存性は  $\sigma_{abs} = \sigma_0 \cdot A^n$  とおくと  $n = 0.62 \pm 0.06$  であり原子核は  $\bar{p}$  に対して完全吸収体であることを示している。

### 3.3 弱い相互作用の実験

(a) E 10 (KDECAY), 稀崩壊モード  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  の研究

E 10 (KDECAY) の実験はビーム運動量 530 MeV/c の  $K^+ 149 \times 10^{10}$  を用いて

1.  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  の分岐比; BR ( $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ )  $< 1.37 \times 10^{-7}$  を得た。今迄の全部のデータの世界平均をとると BR ( $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ )<sub>w.a.</sub>  $< 1.10 \times 10^{-8}$  となる。
2. アキシオン a に関しては, BR ( $K^+ \rightarrow \pi^+ a$ )  $< 4.31 \times 10^{-8}$  となる。これ迄の結果は,  $2.7 \times 10^{-7}$  であった。

(b) E 89 (K $\mu$ ),  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu, e^+ \nu$  崩壊における重ニュートリノを伴う単色  $\mu^+, e^+$  の測定

E 10 (KDECAY) の実験セットアップを使用し、ビーム運動量 530 MeV/c の  $K^+ 2.3 \times 10^9$  を崩壊させてデグレーダーの厚さを変えることにより崩壊  $\mu^+$  の測定を行った結果、

1.  $160 \text{ MeV}/c^2 < m_\nu < 230 \text{ MeV}/c^2$  の質量の  $\nu$  が存在する標準偏差 2 の上限値は、バックグラウンドスペクトラムの不確定さを系統誤差として含め ( $\sim 3.0 \times 10^{-6}$ ) である。

### 3.4 pN 反応におけるレプトンの直接発生

(a) E 45 (DLC), pA 衝撃における電子の直接発生

E 45 (DLC) は 1.2 GeV 陽子ビームで Be ターゲットを衝撃して発生するシングル電子および電子対をダブルアームスペクトロメーターを用いて重心系  $90^\circ$  ( $y = 0$ ) で測定した。その結果は、

1.  $e^+ e^-$  の不变質量分布;  $0.3 \text{ GeV}/c^2 < m_{e^+ e^-} < 1.3 \text{ GeV}/c^2$  にわたって  $e^+ e^-$

ペアの発生はかなり大きく、入射エネルギー300 GeVの領域で実験値とよく一致するハードパートンの消滅により電子対が発生するというモデルによるDrell-Yanの外挿値より10～20倍大きい。

2. シングルアームのデータは  $p_T \leq 1.3 \text{ GeV}/c$  以下の領域で、  $R = e/\pi \sim 2 \times 10^{-4}$  の剩余があることを示し、明白に ANL, LAMPF のデータと合わず、BNL 15  $\text{GeV}/c$  のデータと一致する。更にシングル  $e^\pm$  の  $p_T$  分布は  $e^+e^-$  ペアのデータから予想させる分布と一致する。
3. このエネルギー領域の  $e^+e^-$  分布および  $R = e/\pi$  の値は、 Bjorken-Weisberg によって提案されたソフトパートンの消滅によって電子対が発生するというモデルの計算と一致する。

#### (b) E 50 (DLBC), pp 反応における電子の直接発生

ビーム運動量 8  $\text{GeV}/c$  の陽子を Ta 板を配置した水素泡箱に入射して得られた 1.050 k Pix のフィルムの解析の結果から、

1. 8  $\text{GeV}/c$   $pp \rightarrow e^+e^- X$  反応で直接的に発生する電子対の不变質量分布を  $140 \text{ MeV} < m_{ee} c^2 < 500 \text{ MeV}$  にわたって測定した。不变質量分布は SLAC 18  $\text{GeV}/c$   $\pi^+$   $p$ ,  $\pi^- p$  データと矛盾しない。
2. シングル電子は  $p_T$  の函数として  $R = e/\pi$  をプロットすると  $p_T < 5 \text{ GeV}/c$  で SLAC 18  $\text{GeV}/c$   $\pi^- p$ , BNL 15  $\text{GeV}/c$   $pp$  のデータと一致し  $R = (2 \sim 3) \times 10^{-4}$  で剩余がある。

以上のように、KEK のデータは E 45 (DL C), E 50 (DLBC) の何れも  $p_T$  の低い領域で入射陽子運動量 8 ～ 13  $\text{GeV}/c$  にわたって

$p_T$  の低いところで  $R = e/\pi = (2 \sim 3) \times 10^{-4}$  程度の剩余があることを確認し、  $e^+e^-$  不变質量分布等から電子直接発生機構の解明の手掛りを与えた。

### 3.5 原子核ターゲットによる実験

原子核ターゲットを用いた実験は第 I 期、第 II 期、第 III 期を通じて、かなりの数の実験が行なわれた。これらの実験の規模は平均の素粒子反応の実験に比べて小さいにせよ、そのパライエティーは広範囲なものである。

#### (a) E ( $\pi$ 2 BS) 4.3 $\text{GeV}/c$ におけるハドロン原子核反応による $\pi$ 生成

この実験は  $\pi$  2 ビームサーベイの一環として行われ、  $\pi$  2 ビームの最高運動量 4.3  $\text{GeV}/c$  において  $pA \rightarrow \pi^+ X$ ,  $\pi^+ A \rightarrow \pi^+ X$  反応で発生する  $\pi^+$  の重心系 90° 近傍の一体分布の測定から、

1.  $pA \rightarrow \pi^+ X$  反応の  $\pi^+$  一体分布微分断面積を横方向運動量  $p_T$  の函数として求めると、微分断面積の質量数  $A$  依存性は 300  $\text{GeV}/c$ , 28.5  $\text{GeV}/c$  と同じような異常  $A$  依存性を示す。
2.  $pA \rightarrow \pi^+ X$  反応の一体微分断面積を  $p_T$  と動径パラメータ  $x_R$  の函数にてパラメトライズして  $x_R$  の函数として表わすと、2000  $\text{GeV}$  から 12  $\text{GeV}$  迄のデータが同じような分布をすることが Yen によって示されていた (Yen の初期スケーリング)。この実験で得られた微分断面積をプロットすると同じ分布を示す。このことは初期スケーリングが数  $\text{GeV}/c$  の低い運動量から始まっていることを示唆している。
3.  $pA \rightarrow \pi^+ X$ ,  $\pi^+ A \rightarrow \pi^+ X$  の一体微分断面積を横方向パラメーター  $x_1$  の函数として、両断面積の比をプロットすると、ク

オーカー模型から予想される値と大体一致する。

以上のこととは  $pA \rightarrow \pi^+ X$  反応に対し、 $4.3 \text{ GeV}/c$  という低いビーム運動量でも、既にクオーカーの影響が現れている可能性を示している。

(b) E 2 3 (STOP  $\pi^-$ ),  $\pi^-$  原子核反応における中性子の発生

$0.75 \text{ GeV}/c \pi^- A \rightarrow nX$  反応で発生する中性子  $n$  のエネルギー分布の測定結果から、

1.  $n$  のエネルギー分布について、核内カスケードモデルのモンテカルロ計算の結果と実験値を比較すると、ターゲットの種類によって多少の違いがあるが、エネルギーの低いところ ( $T_n < 5 \text{ MeV}$ ) と高いところ ( $T_n > 20 \text{ MeV}$ ) で実験値は計算値より大きくなる。この中、低エネルギー部分については蒸発過程を入れて説明がつくが高エネルギー部分は説明が難しい。

2.  $n$  のエネルギーをパラメーターとして質量数  $A$  依存性を求め、モンテカルロ計算と比較してみると  $A$  依存性も実験値の方が、計算値より大きい。

以上のことから  $0.75 \text{ GeV}/c \pi^-$  入射の実験結果は単純な核内カスケードモデルの計算と合わせて二核子相関等の別な過程を必要とする。

(c) E 2 6 (RADCH), 放射化学法による  $\pi^-$  原子核反応全断面積の研究

E 2 6 (RADCH) の実験は核化学の手法で  $\pi^-$  吸収の終状態の核放射能の測定から全断面積を求めた。

1. ビーム運動量  $0.4 - 1.9 \text{ GeV}/c$  にわたって  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{19}\text{F}$  に対する ( $\pi$ ,  $\pi n$ ) 反応断面積の励起函数の測定を行った。測定値は素過程と核内粒子のフェルミ運動による拡がりをとり入れて大体説明できる。

しかし、 ${}^{12}\text{C}$  と  ${}^{19}\text{F}$  については  $0.6 \text{ GeV}/c$  附近で ( $\pi$ ,  $\pi n$ ) 反応の増大が認められ  $T = \frac{1}{2}$  の影響と考えられる。又、 ${}^{12}\text{C} \xrightarrow{\pi^-} {}^6\text{He}$  については  $\pi^-$  荷電交換に続いて  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^6\text{Li}$  へのクラスター・ブレークが考えられる。

2.  $0.87$ ,  $3.36 \text{ GeV}/c \pi^-$  を  ${}^{51}\text{V}$  および  ${}^{209}\text{Bi}$  に照射し、破碎反応による核種の生成断面積を測定した。この生成断面積は  $3 \text{ GeV}$  陽子のデータと比較して余り大きな違いが認められなかった。このことは核破碎断面積が入射ビームエネルギー、種類によって変わらないという考えを支持するものである。
3.  $1.0 \text{ GeV}/c$  において  ${}^9\text{Be}$  ( $\pi^-$ ,  $\pi N$ )  ${}^3\text{Li}$  反応の角分布を固体飛跡検出器 (SSTD) を用いて測定した。測定された角分布は前方に強いピークを示す。この角分布は、入射  $\pi^-$  により核内の  ${}^6\text{Li}$  が叩き出されるとするモデルの計算と大体一致するが、それだけでは充分でない。

(d) E 5 3 ( $\pi A$ ) 水素泡箱によるハドロン原子核反応の研究

3 種類の原子核ターゲット、 ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{19}\text{F}$  を水素泡箱内に設置し、 $\pi^+$  ( $4 \text{ GeV}/c$ ,  $2 \text{ GeV}/c$ ),  $\pi^-$  ( $4 \text{ GeV}/c$ ,  $2.3 \text{ GeV}/c$ ),  $p$  ( $4 \text{ GeV}/c$ ) を入射して得られた  $245 \text{ kPix}$  のフィルムを解析した。

1. 荷電粒子発生の多密度、反応断面積の質量数  $A$  依存性、放出粒子のエネルギーと多密度の関係、運動量分布、角度分布等が求められた。
2. 以上の測定結果を核内カスケードモデルのモンテカルロ計算と比較した。単純なカスケード過程だけでは両者の一致はよくないが、二核子過程を入れると一致がよくなる。

る。

3.  $4 \text{ GeV}/c$  の  $\pi^+$  のデータから放出粒子の多重度分布は KNO スケーリングとよく一致することが確かめられた。

(e) E 65 ( $\pi\mu$ ) 原子核の  $\pi$  吸収に伴う中性子および  $\gamma$  線の測定

E 65 ( $\pi\mu$ ) 実験は  $20 \text{ MeV} < T_\pi < 280 \text{ MeV}$  の  $\pi^\pm$  を Al, Cu, Au の原子核に入射して全吸収断面積の測定を行うとともに、 $\pi$  吸収に伴って発生する  $\gamma$  線の多重度の測定を行った。

1.  $T_\pi < 100 \text{ MeV}$  では  $\pi^+$  の原子核吸収断面積はクーロン効果のため  $\pi^+, \pi^-$  の間に大きな差を生ずるが光学模型の計算と一致する。しかし、 $T_\pi > 200 \text{ MeV}$  では光学模型とは一致せず実験値の方が高くなる。

2.  $\gamma$  線の多重度から  $\gamma$  線が原子核から持出す角運動量の評価ができる。この値は入射  $\pi$  が持込むと考えられる角運動量より大であり、低エネルギー原子核反応の場合と逆の傾向である。このことは  $\pi^-$  の吸収が二核子によって行われ、一核子のみが核外に放出されるという模型でかなりよく説明できる。

(f) E 71 ( $\pi A C$ ) , 高エネルギー原子核反応における粒子の相関と原子核の時空構造

$\pi\mu$  ビームチャネルをスペクトロメーターとして使用することにより  $12 \text{ GeV}$  陽子を C, Al, Cu, Ag, Ta に入射して  $pA \rightarrow p, d, {}^3\text{He}, {}^4\text{He}, Be, \dots, X$  反応で発生する粒子の一体分布を実験室角度  $90^\circ$  で測定した。

1. 核子当りの運動量  $p/A$  の函数として微分断面積を求め、重イオン反応で実験結果をよく説明できるとされるコアレツセンスモデルの計算と比較した。実験値と計算値は極めてよく一致する。

2. このモデルは核反応で生成される複合粒子はその構成核子が位相空間内の或る領域内に入った場合に形成されるという簡単な模型である。従がってこのモデルの計算と実験値が一致することは核内核子の時空相関について有力な手掛りを与える。

#### § 4. あとがき

はじめにも述べたように、現在迄に公刊された実験結果は、大体第Ⅱ期前半迄に行われた実験の成果である。一般に、最初に公表される結果はプレリミナリーの形、あるいは、部分的なデータに基くことが多く、実験グループの努力が続くかぎり、時間の経過に伴って解析の精度も上り、検討も充分に行なわれて、信頼性の高い論文が公刊される。

しかし、問題がトピカルであり、外国の研究所で同じようなテーマの実験が行われている場合は、発表のタイミングが決定的な意義を持ってくる。迅速と正確とを両立させるためには経験と実力の裏付けが必要であると同時に周辺の理解が重要である。

第Ⅱ期後半から第Ⅲ期にかけて行った実験の成果は今後に待たなければならない。しかし、この稿を纏めている間にも “to be published” の通知が2件あった。今後の成果は充分に期待してよいと考える。

陽子シンクロトロンによる実験の成果を上げるために、直接実験を行っている実験グループの努力だけでなく、論文に著者として名前の出ることのない多くの人々の協力と支持が必要である。これらの人々の協力と支持の上で、成果として公刊されることを考えると、陽子シンクロトロンの実験の成果は、論文に著者として名前の出る人達だけのものではなく、研究所全体

の成果として理解されるべきものであることを 痛感する次第である。

**List of Publications of Physics Experiments with KEK PS  
(Periodicals, Conference Proceedings)**

September 1981

**E06( $\pi$ RES)**

- (1) Inclusive Strange Particle Production in  $\pi^- p$  Interactions at 6 GeV/c  
R. Sugahara, F. Ochiai, Y. Fukui, A. M. Cooper, M. Fukawa, S. Kabe, H. Kichimi, A. Ono, T. Sato, A. Suzuki, Y. Yoshimura and K. Takahashi (KEK), T. Okuda, K. Takahashi, S. Sasaki, M. Teranaka and O. Kusumoto (Osaka City Univ.) and T. Konishi (Kinki Univ.); Nuclear Physics **B156** (1979) 237.
- (2) Inclusive Non Strange Meson production and Particle Ratios in  $\pi^- p$  Interactions at 6 GeV/c  
F. Ochiai, R. Sugahara, Y. Fukui, M. Fukawa, H. Kichimi, A. Ono, T. Sato, A. Suzuki, Y. Yoshimura, and K. Takahashi (KEK); J. Phys. Soc. Japan **50** (1981) 1825.
- (3) Inclusive  $\rho^0$  and f production in  $\pi^- p$  Interactions at 6 GeV/c  
F. Ochiai (KEK); Proceedings of 1979 INS Symposium on Particle Physics in GeV Region, Tokyo 1979 p.339.

**E10(KDECAY)**

- (1) Search for Axion and a Rare Decay Mode  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$   
Y. Asano,<sup>1</sup> E. Kikutani,<sup>2</sup> S. Kurokawa,<sup>1</sup> T. Miyachi,<sup>3</sup>, M. Miyajima,<sup>1</sup> Y. Nagashima,<sup>4</sup> T. Shinkawa,<sup>2</sup> S. Sugimoto,<sup>1</sup> and Y. Yoshimura<sup>1</sup> (1, KEK; 2, Univ. Tokyo; 3, INS Univ. Tokyo; 4, Osaka Univ.); Proceedings of Neutrino 81, Maui, July 1981.

**E12( $\pi$ DD)**

- (1) Further Evidence of Narrow Mass Enhancements Observed in the Diffractive ( $\pi N$ ) and ( $\pi\pi N$ ) System  
H. Hirose (Tokyo Metro. Univ.); Proceedings of 1979 INS Symposium on Particle Physics in GeV Regions, Tokyo 1979 p.348.
- (2) Exotic Resonance and Quark-Parton Aspects in Diffraction Dissociation  
T. Hirose (Tokyo Metro. Univ.); Proceedings of the Hakone Japan-US Joint Seminar (III), Tokyo 1980 p.246.
- (3) Multidimensional Analysis of the Three-Body Reaction  $\pi^- p \rightarrow \pi^- \pi^+ n$  at 6 GeV/c  
T. Emura,<sup>1</sup> I. Kita,<sup>1</sup> K. Takahashi,<sup>1</sup> C. Fukunaga,<sup>2</sup> R. Hamatsu,<sup>2</sup> Y. Hattori,<sup>2</sup> T. Hirose,<sup>2</sup> S. Kitamura,<sup>2</sup> K. Shikata,<sup>2</sup> T. Yamagata<sup>2</sup> and Y. Chiba<sup>3</sup> (1, Tokyo Univ. of A and E; 2, Tokyo Metro. Univ.; 3, Hiroshima Univ.); to be published in Jour. of Phys. Soc. of Jpn.

- (4) Quark-Parton Aspect of Diffraction Dissociation from Feynman-Bjorken Variable Distributions

Y. Hattori, C. Fukunaga, R. Hamatsu, T. Hirose, S. Kitamura, T. Kobayashi, K. Shibata and T. Yamagata (Tokyo Metro. Univ.), T. Emura, I. Kita and K. Takahashi (Tokyo Univ. of A and E); to be published in Zeitschrift für Physik.

#### EBS( $\pi$ 2BS)

- (1) A Study of Nuclear Mass Number Dependence of Inclusive Particle Production in Hadron-Nucleus Collisions at 4.3 GeV/c

M. Ono, J. Kishiro, S. Mikamo and A. Kusumegi (KEK) and T. Ishizuka (Saitama Univ.); Physics Letters **84B**(1979) 515.

- (2) Invariant Cross Sections of Inclusive Pion Production by Pions and Protons at 4.3 GeV/c

A. Kusumegi, S. Mikamo, J. Kishiro and M. Ono (KEK) and T. Ishizuka (Saitama Univ.); Proceedings of the Hakone Japan-US Joint Seminar (II), Tokyo 1980, p.88.

#### E19(CEX)

- (1) Measurements of Differential Cross Sections and Polarization Parameters for the  $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$  Charge Exchange Reaction from 2.0 to 3.0 GeV/c

K. Miyake, T. Nakamura, R. Kikuchi, Y. Hemmi, M. Minowa, M. Daigo, Y. Suzuki, T. Adachi, S. Naito and M. Sakuda (Kyoto Univ.) and M. Kobayashi (KEK); to be published in Nuclear Physics B.

- (2) Measurement of Differential Cross Sections and Polarization Parameters for the  $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$  Charge Exchange Scattering from 2.0 GeV/c to 4.25 GeV/C

T. Adachi; Proceedings of 1979 INS Symposium on Particle Physics in GeV Region, Tokyo 1979, p.296.

- (3) Differential Cross Sections and Polarization Parameters for the  $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$  Charge Exchange Scattering from 2.0 GeV/c to 4.25 GeV/c

K. Miyake, T. Nakamura, R. Kikuchi, Y. Hemmi, N. Sasao, M. Minowa, M. Daigo, Y. Suzuki, T. Adachi, S. Naito, M. Sakuda (Kyoto Univ.) M. Kobayashi (KEK), I. Nakano (Tsukuba Univ.); Proceedings of the IVth International Conference on Baryon Resonances, Toronto 1980, p. 133.

#### E21( $\pi$ N)

- (1) Backward Polarization of  $\pi^- p$  Elastic Scattering from 2.22 to 3.50 GeV/c

M. Fukushima, S. Iwata, R. Kajikawa, H. Kobayakawa, T. Matsui, A. Miyamoto, K. Mori, T. Nakanishi, Y. Ohashi, C. O. Pack, T. Shimomura, S. Suzuki and T. Tauchi (Nagoya Univ.) K. Baba, I. Endo, S. Kadota, S. Sumi and S. Terada (Hiroshima Univ.), Y. Takeuchi and N. Tokuda (Osaka Univ.), K. Egawa and A. Tamura (Kyoto Univ.), K. Amako and T. Tsuru (KEK); Nuclear Physics **B167** (1980) 307.

- (2) High-Precision Measurement of the  $\pi^- p$  Elastic Scattering in a Wide Angular Range at the Incident Momenta between 2.06 and 3.48 GeV/c

S. Terada, K. Baba, I. Endo, S. Kadota and Y. Sumi (Hiroshima Univ.), M. Fukushima, S. Iwata, R. Kajikawa, H. Kobayakawa, T. Matsui, A. Miyamoto, K. Mori, T. Nakanishi, Y. Ohashi, C. O. Pak, T. Shimomura, S. Suzuki and T. Tauchi (Nagoya Univ.), Y. Takeuchi and N. Tokuda (Osaka Univ.), K. Egawa and A. Tamura (Kyoto Univ.), K. Amako and T. Tsuru (KEK); Nuclear Physics **B175** (1980) 1.

- (3) Measurements of Differential Cross Section and Backward Polarization in  $\pi^- p$  Elastic Scattering from 2.1 to 3.5 GeV/c

T. Shimomura; Proceedings of 1979 INS Symposium on Particle Physics in GeV Region, Tokyo 1979, p.277;

#### E23(STOP $\pi^-$ )

- (1) Energy Spectra of Neutrons Induced by 0.75 GeV/c Negative Pions on Complex Nuclei

S. Matsuki, T. Higo, Y. Iwashita, T. Sekioka and T. Yanabu (Kyoto Univ.), H. Itoh (Saga Univ.), T. Maki, A. Yoshimura, H. Yoshinaga, T. Cho and S. Uehara (kyushu Univ.); Physics Letters **84B** (1979) 67.

#### E26(RADCHEM)

- (1) Cross Sections of Negative Pion Induced Reactions in  $^9\text{Be}$ ,  $^{12}\text{C}$  and  $^{19}\text{F}$  Nuclei between 0.4 and 1.9 GeV/c

T. Nishi, I. Fujiwara, N. Imanishi, M. Moriyama, S. Iwata and S. Hayashi (Kyoto Univ.), K. Otozai, R. Arakawa, S. Saito, T. Tsuneyoshi and N. Takahashi (Osaka Univ.), S. Shibata and K. Yoshida (Univ. Tokyo) and H. Kudo (Tokyo Metro. Univ.); Nuclear Physics **A352** (1981) 461.

- (2) Angular Distribution of Recoil  $^8\text{Li}$  in the Reaction  $^9\text{Be} (\pi^-, \pi^- \text{N}) ^8\text{Li}$

S. Hayashi and S. Iwata; Physics Letters **95B** (1980) 39.

#### E33(ppR/YN)

- (1) Evidence against the Narrow S (1936) in a Measurement of  $\bar{p}p$  Total Cross-section

T. Kamae; Proceedings of 1979 INS Symposium on Particle Physics in GeV Region, Tokyo 1979, p.503; T. Kamae, H. Aihara, J. Chiba, H. Fujii, T. Fujii, H. Iwasaki, K. Nakamura, T. Sumiyoshi, Y. Takada, T. Takeda and M. Yamauchi (univ. Tokyo) and H. Fukuma and T. Takeshita (Hiroshima Univ.); Phys. Rev. Lett. **44** (1980) 1439.

- (2) Search for the Narrow S-Resonance in a Measurement of pp Total Cross Section using Wire Chamber

K. Nakamura; AIP Conf. Proc. No.67 on IV Int. Conf. on Experimental Meson Spectroscopy, BNL 1980, p.217.

- (3) Measurements of the Real to Imaginary Ratio of the  $\bar{p}p$  Forward Amplitude at Beam Momenta between 400 and 730 MeV/c

H. Iwasaki, H. Aihara, J. Chiba, H. Fujii, T. Fujii, T. Kamae, K. Nakamura, T. Sumiyoshi, Y. Takada, T. Takeda and M. Yamauchi (Univ. Tokyo) and H. Fukuma (Hiroshima Univ.); Physics Letters **103B** (1981) 247.

- (4) Absorption Cross Sections for Antiprotons on Carbon, Aluminium and Copper at 485 and 597 MeV/c

H. Aihara, J. Chiba, H. Fujii, T. Fujii, H. Iwasaki, T. Kamae, K. Nakamura, T. Sumiyoshi, Y. Takada and M. Yamauchi (Univ. of Tokyo) and H. Fukuma (Hiroshima Univ.); Nuclear Physics **A360** (1981) 291.

### **E34(KN)**

- (1) Measurement of the Polarization parameters for  $K^+n \rightarrow K^+n$  and  $K^0p$  at the momentum of 1.06, 1.28, 1.39 and 1.49 GeV/c  
F. Takasaki (KEK); Proceedings of the Workshop on Low and Intermediate Energy Kaon-Nucleon Physics, Rome 1980.

### **E45(DLC)**

- (1) Direct Lepton Production in Hadron Collisions at Low  $p_T$  and Low Pair Mass  
S. Mikamo; Proceedings of 1979 INS Symposium on Particle Physics in GeV Regions, Tokyo 1979, p.362.
- (2) Production of Direct Single Electron in Proton-Nucleus Collisions at 13 GeV/c  
A. Maki, S. Mikamo, M. Ono, M. Takasaki, A. Yamamoto, H. Hirabayashi, S. Kurokawa and A. Kusumegi (KEK), S. Higashi, F. Kajino, Y. Kawashima, M. Nakashita, S. Ozaki, T. Takahashi, Y. Teramoto and S. Yamamoto (Osaka City Univ.), S. Naito and Y. Sakai (Kyoto Univ.) T. Ishizuka (Saitama Univ.), J. Kishiro (Tokyo Metro. Univ.) and M. Mishina (INS Univ. Tokyo); to be published in Physics Letters B.
- (3) Production of Direct  $e^+e^-$  Pairs in Proton-Nucleus Collisions at 13 GeV/c  
S. Mikamo, A. Maki, M. Takasaki, A. Yamamoto, H. Hirabayashi, S. Kurokawa and A. Kusumegi (KEK), S. Higashi, F. Kajino, Y. Kawashima, M. Nakashita, S. Ozaki, T. Takahashi, Y. Teramoto and S. Yamamoto (Osaka City Univ.), S. Naito and Y. Sakai (Kyoto Univ.) T. Ishizuka (Saitama Univ.), J. Kishiro (Tokyo Metro. Univ.) and M. Mishina (INS Univ. Tokyo); to be published in Physics Letters B.

### **E50(DLBC)**

- (1) Direct Electron Production in 10 GeV Region  
T. Kitagaki; Proceedings of the XIX Int. Conf. on High Energy Physics, Tokyo 1978, p.203.

### **E53( $\pi$ AC)**

- (1) Multiparticle Emission in the Interactions of Hadrons with Complex Nuclei at Incident Momenta from 2 to 4 GeV/c  
T. Nakamura, Y. Chiba, M. Aoki and S. Kaneko (Hiroshima Univ.); Nuclear Physics **A365** (1981) 457.

### **E65( $\pi\mu$ )**

- (1) Measurements of Cross Sections for Pion Absorption by Nuclei  
K. Nakai, T. Kobayashi, T. Numao, T. A. Shibata, J. Chiba and K. Matsutani (Univ. Tokyo); Phys. Rev. Lett. **44** (1980) 1446.
- (2) Pion Absorption by Nuclei  
K. Nakai, T. Kobayashi, T. A. Shibata, H. Enyo and O. Terasaki (Univ. Tokyo); Proceedings of Int. Conf. on Nuclear Physics, Berkeley 1980.

(3) Pion Absorption by Nuclei

K. Nakai, T. Kobayashi, T. Numao, T. A. Shibata, J. Chiba, H. Enyo, O. Terasaki and K. Matsutani (Univ. Tokyo); Proceedings the Hakone Japan-US Joint Seminar (II), Tokyo 1980, p.76.

**E74( $\bar{p}pR$ )**

(1) Search for Structures in the  $\bar{p}p$  Total Cross Section below 1 GeV/c

T. Sumiyoshi et al.; To be published in the Proceedings of 1981 INS Symposium on Quark and Lepton Physics, Tokyo 1981.

**E75(pN)**

(1) Measurement of the Polarization Parameters for the Reactions  $p\bar{n}(\uparrow) \rightarrow p\bar{n}$  and  $K^+n(\uparrow) \rightarrow K^+n$  at 1.06, 1.28 and 1.49 GeV/c

K. Ogawa (KEK); Proceedings of 1979 INS Symposium on Particle Physics in GeV Regions, Tokyo 1979, p.322.

(2)  $p\bar{n}(\uparrow) \rightarrow p\bar{n}$  Reaction and dibaryon Resonances

Y. Watase (KEK); to be published in the Proceedings of 1981 ins Symposium on Quark and Lepton Physics, Tokyo 1981.

**E89(K $\mu$ ) [with E10 (KDECAY) set-up]**

(1) Search for Heavy Neutrinos in  $K_{\ell 2}$  Decay

T. Yamazaki and R. S. Hayano (Univ. Tokyo); Proceedings of Neutrino 81, Maui, July 1981.

(2) Search for a Heavy Neutrino emitted in  $K^+ \rightarrow \mu^+\nu$  Decay

Y. Asano,<sup>1</sup> R. S. Hayano,<sup>2</sup> E. Kikutani,<sup>2</sup> S. Karokawa,<sup>1</sup> T. Miyachi,<sup>3</sup> M. Miyajima,<sup>1</sup> Y. Nagashima,<sup>4</sup> T. Shinkawa,<sup>2</sup> S. Sugimoto,<sup>1</sup> T. Yamazaki<sup>2</sup> and Y. Yoshimura<sup>1</sup> (1, KEK; 2, Univ. Tokyo; 3, INS Univ. Tokyo; 4, Osaka Univ.); Physics Letters **104B** 84 (1981).;

## 7・2 理論部の成果

菅原 寛孝

(物理研究系教授)

1971年に川口正昭氏が visiting scientist としてはじめて理論家として高エネルギー研究所に来た。理論部の最初の論文は同氏の 1972 年に出版された Simple relation between polarization and differential cross section, Lett. Nuovo Cimento, 3, (1972) 627~630 である。1974年に至って理論部の member は荒船, 福来, 川口, 小柳, 菅原の 5 名となり同年 11 月に発見された  $J/\psi$  粒子の解釈をめぐって活発な討論がなされた。

理論部としての主張はこれが第4の quark  $C$  と  $\bar{C}$  の bound state にあるということであり、これは他の多くの理論家の主張とも合致し、最終的には正しいことが示された。1976年になると理論部の活動は多岐にわたり福来は dual unitarization scheme に興味を抱き(例えば Interference terms in the unitarity equation in the multiperipheral resonance production model, Nucl. Phys., B 121, (1977) 93), 川口は二体反応を解析し (All angle model for two body reactions, Prog. theor. Phys. 57 (1977) 470) 菅原は小林-益川 model を評価している (CP-violation in the sixquark model, PhyRev; D14 (1976) 305), 又小柳は 2 体問題を解析した。(Lower bound on the impact parameter for two body system, Proc. of Japan-U.S. Seminar on geometric

models of the elementary particles, Tokyo 1976, 101) 又唯一の原子核理論家として湯川が加わり、原子核反応を調べている (A statistical theory of Complex collisions, Proc. Colloque Franco Japonais and INS symposium, Tokyo, 1976, 159),

1977 年には福来, 小柳, 荒船による共同研究で新粒子に関する論文が多数発表された。たとえば Radiative transitions of new particles and the puzzle of  $C\bar{C}$  pseudo scalar mesons, Phys. Rev. D16 (1977) 772 は  $J/\psi$  のすぐ下にある  $0^-$  粒子に関する重要な洞察を含む仕事である。なおこの年には福来等による unitarity equation に関する多数の論文が出版されている。たとえば Interference terms in the unitarity equation in the multiperipheral resonance production model, Nuclear Phys. 121B (1977) 93 などがあげられる。

1978 年には菅原等による discrete symmetry の導入も考えられ top quark の mass に関する speculation が成された(たとえば Mass of the t-quark in  $SU(2) \times U(1)$ , Phys. Lett. 82B (1979) 105). 1979 年にはスタッフが福来, 小林, 菅原, 湯川, 吉村とかわり研究内容も一段と変化に富むものとなった。福来による Spectroscopy of multiquark hadrons, Proc. 1979 INS Symposium on Particle Physics in Gev Region 490,

同じく Three gluon exchange Contribution to forward high energy scattering, Phys. Lett 83B (1979) 119. 又吉村等による Kinematical constraints imposed by cosmological baryon production, Prog. Theor. Phys. 62 (1979) 1704はこの年に書かれて いる。吉村による宇宙のバリオン数に関する論 文は 1979～1980 にかけて多数出版され非常 な関心を呼んだことを特筆したい。又古井, 湯 川による Short range nuclear correlation in proton backward scattering (Proc. Int. Conf. on High Energy Physics and Nuclear Structure, 1979) も書かれた。

1980～1981年にかけては総数にして30編

をこえる論文が出版され極めて活発な研究活動 が成されつつある。吉村等による主として grand unificationに関する研究, 湯川による nuclear fluid dynamics の研究, 小林, 松木による強 い相互作用をする Higgs 粒子の研究。金谷によ る neutrino mixingに関する研究, 山本, 松木 による renormalization groupに関する研究等 が成されている。又菅本は quark confinement の問題を中心に Q. C. D.に関する研究を続け, Rajasekaran, Bohrによる stringに関する仕事 もあげられる。尾高は二次元 Q. C. D.に関する 仕事を完成し福来は吉村等と共に Cosmological Baryon excess と neutrino mass の関係につ いて議論している。

## 7・3 超伝導電磁石の開発成果

平林洋美  
(物理研究系教授)

創設以来10年間、本所の研究は各研究系を中心進められて來た。加速器の建設や物理実験装置の組立などのビック・プロジェクトでは、むしろある期間、作業に専念することが要求されるから、特に建設の段階に、各系が可成独立して作業しても止むを得ないことがある。

それでは、本所では各系にまたがる研究は推進されなかったかと云えば、そうでもない。ここに各系にまたがる研究の例として、超伝導電磁石の開発研究の成果を紹介したい。

周知の通り、超伝導電磁石の技術は、高性能と省エネルギーをセールス・ポイントとする新技術であり、これからの中速器や物理実験装置を考える上で無視できないものである。

本所では、すでに創設後間もない昭和48年ごろから、超伝導電磁石の技術が、加速器の将来を支配することを見越して、主として共通系低温部門において、超伝導電磁石の基礎研究が進められて來た。本所が、12GeV PSを完成させ、その物理実験装置にも一応の目途がついた、昭和53年ごろから、トристン計画を具体化する機運が高まり、これに刺激されて、超伝導電磁石の技術を体験し、実用化を試みようとする動きが生まれた。

具体的には、高エネルギー・パイ中間子ビームラインの一部に超伝導電磁石を採用する計画が、昭和54年度から認められたことが、一つの

契機になった。以来、今日までにビームラインの各種超伝導電磁石、スペクトロメーター用超伝導コイルおよびトристン陽子リング用超伝導電磁石の試作品などが、各系からの有志の参加で開発されてきた。

先ずビームライン用超伝導電磁石として、2基の大型超伝導双極電磁石と超伝導セプタム電磁石およびパノフスキーモード超伝導四極電磁石が開発された。大型超伝導電磁石(SD 430型)は、昭和54年度と昭和55年度とに各々1基が製作された。昭和54年頭初から、この電磁石の具体的設計作業が始められたが、当時は各系から合計20名に近い人々が興味を示され積極的に作業に参加された。この電磁石は、いわゆるコールド・アイアン、ウォーム・ボアの構造で、有効径が大きく、磁場の精度が高いことが特徴である。理想的な双極磁場を発生するように軸の周りにブロック化して巻かれたコイルには、大容量のニオブチタン成形撲線が用いられている。完成した2基の大型超伝導電磁石は、高エネルギー・パイ中間子ビームラインに設置され、現在専用のヘリウム冷凍液化機の完成を待っている。

超伝導セプタム電磁石とパノフスキーモード超伝導四極電磁石は、始めは個人的な興味で開発されていたものが途中で、実用化の見通しが開け、数人の人々の助力によって実用機として成長したものである。

超伝導セプタム電磁石は、高エネルギー・ハイ中間子ビームラインの主要機器の一つとしてすでに設置を終っている。これは、セプタム電磁石としての完全な機能をもつ省エネルギー電磁石であり、世界的にもユニークなものである。心配された陽子ビームの直撃による超伝導破壊（クエンチ）に対しても、全く安定であることが認められている。

パノフスキイ型超伝導四極電磁石は電流シート型電磁石の一種で、鉄の高透磁率特性と超伝導コイルの高電流密度特性とを巧みに利用した特色のある電磁石である。大きな矩形断面の空間に、通常電磁石の2倍の強さの四極磁場を発生することができる。このほとんど電力を要しない強力な四極電磁石は、反陽子ビームラインで使用される予定である。

これらのビームライン用超伝導電磁石の開発に少し遅れて、スペクトロメーター（弁慶号）用コイルの超伝導化が行われた。この仕事は、高さ1m、幅1.53m、奥行き1mの空間に1.5テスラの磁場を超伝導コイルを用いて発生させ、これによって2MWに近い電力を節約すると共に、スペクトロメーターの性能を飛躍的に向上させることを目的としたもので、実験チームが各系からの参加者を得て完成した。超伝導コイルを備えたスーパー弁慶電磁石は、まもなく実験（π1）に使用される。

以上の各種超伝導電磁石やコイルは、基本設計を本所の職員が行い製作をメーカーに依頼して成功した。これと異なり、設計、製作、試験をすべて、所内で行い成功したものに、トリスタン陽子リング用超伝導電磁石の試作品がある。

トリスタン計画で最終的に電子-陽子衝突実験を行うことを想定して、超伝導陽子リングを検討して来た結果、皮肉にも、米国フェルミ研

究所やソ連邦IHEPの超伝導陽子シンクロトロンに必要な超伝導電磁石より強力なものが必要となることが判明した。低い入射エネルギーと限られた敷地のため、有効径が大きく、一層強い磁場の電磁石が要求される。

この点を考慮した上で、昭和54年度後期より、トリスタン陽子リングの超伝導双極電磁石の試作が行われた。この試作電磁石の断面形状は、フェルミ研究所の超伝導陽子シンクロトロンのものと、ほぼ同じものとし、これを直径で2倍、断面積で4倍にスケール・アップし、300GeV程度のトリスタン陽子リングに適するものとした。つまりコイル内径を140mmとし、長さを1100mmとした5テスラ級の電磁石が試作された。

昭和55年春に完成したこの電磁石は、折から新設されたヘリウム冷凍液化機によって冷却され試験された。試作第1号機は十数回のトレーニングを経て5テスラに達した。続いて、若干工法を変えた第2号機が作られ、より少ないトレーニングで5.3テスラの磁場を発生した。磁場測定の結果も設計値に近いものであった。

数少ない、試作電磁石の経験で第一級の成果が得られたことは、そのまま本所と日本産業界の技術レベルが高いことを示している。これらの成果は、1980年応用超伝導会議、1981年粒子加速器会議で報告されて、関係者の注目を集めた。

試作第2号機は、さらに昭和56年春、加圧超流動ヘリウム冷却法という先端技術で、1.8Kに冷却され、6.75テスラの磁場を発生した。これは、二重巻コイルのニオブチタン双極電磁石としては驚異的に高い磁場の高さである。

これら一連の試作電磁石の成功によって、300GeVまでのトリスタン陽子リングの技術的

問題には、幾分、見通しができたものと考えられる。なお、フルスケール電磁石の製作、量産する場合の品質管理、システム・エンジニヤリングなどに不明の点があるが、一両年のうちに目途がたつであろう。

トリスタン陽子リングの試作電磁石の開発は、加速器、物理、共通の各系から各々3～4名の、合計10名程度の人々が集まり、彼等が中心となって行ったものである。大部分の人が、ほかに

日常的な業務を持ちながら進めてきた。そのため、開発の仕事は、ムーンライト・ワークとなることが多く、働く人々は過労になりがちである。

超伝導電磁石の開発は、今後、より高精度、高性能のものをを目指し、トリスタン計画を含む、グローバルな加速器と物理実験の未来需要に備えることになると思われるが、この機会に、関係各位の一層の御理解と御支援をお願いしたい。