

KEK – PS

1971 - 1980

2006年1月13日

木村嘉孝

KEK-PS 建設の主な経緯

- 1967 : 大穂建設候補地の地質調査
- 1970 : 加速器システムの基本設計、前段加速器室建設開始
- 1971. 4 : 高エネルギー物理学研究所設立
- 1974. 7 : 前段加速器 750 keV ビーム加速
- 1974. 8 : リニアック 20 MeV ビーム加速
- 12 : ブースター 500 MeV ビーム加速
- 1976. 3 : 主リング 8 GeV ビーム加速
- 8 : 内部標的ビームの取り出し
- 12 : 主リング 12 GeV ビーム加速
- 12 : 速いビーム取り出し
- 1977 5 : 共同利用実験開始
- 11 : 遅いビーム取り出し
- 1978 : ブースター利用施設新設(中性子実験施設、東大・中間子利用実験施設)
- 1980 : ブースター利用施設共同利用開始
- 1983 : H⁻ビームによるブースターへの荷電変換入射
- 1985 : リニアック・エネルギー 40 MeV へ
- 1986 : 偏極陽子ビームの加速

KEK – PSの主要パラメーター

● 主リング（セパレーテッド・ファンクション型）

最高ビームエネルギー	8 (12) GeV
繰り返し	0.5 Hz
ビーム強度	2×10^{12} (8×10^{12}) ppp
平均軌道半径	54 m
スーパー周期数	4
セル数	20ノーマルセル、8 長直線部セル
電磁石配列(セル)	FODO
チューン	7.25
最高磁場(中心軌道)	1.26 (1.75) T
入射磁場(中心軌道)	0.148 T
RF加速周波数	6.03 ~ 7.92 MHz
ハーモニック数	9
RF加速電圧(ピーク)	60 (120) kV

● ブースター（コンバインド・ファンクション型）

最高ビームエネルギー	500 MeV
繰り返し	20 Hz
ビーム強度	6×10^{11} (2×10^{12}) ppp
平均軌道半径	6
電磁石配列	FDDFO x 8 セル
n値	12.09
チューン	2.25
最高磁場(中心軌道)	1.09 T
入射磁場(中心軌道)	0.197 T (0.280 T)
RF加速周波数	1.62(2.30) ~ 6.03 MHz
ハーモニック数	1
RF加速電圧(ピーク)	16 (30) kV

● 入射リニアック（ドリフトチューブ型）

ビームエネルギー	20 (40) MeV
ビーム電流(ピーク)	100 (200) mA (Hに変更後 18 mA)
ビームパルス幅	20 (5) μ sec (Hに変更後 40 μ sec)

● 前段加速器（コッククロフト-ワルトン型）

イオン源	50 kV デュオプラズマトロン
ビームエネルギー	750 keV
ビーム電流(ピーク)	300 mA
H ⁺ イオン源	マルチカスプ型 20 mA

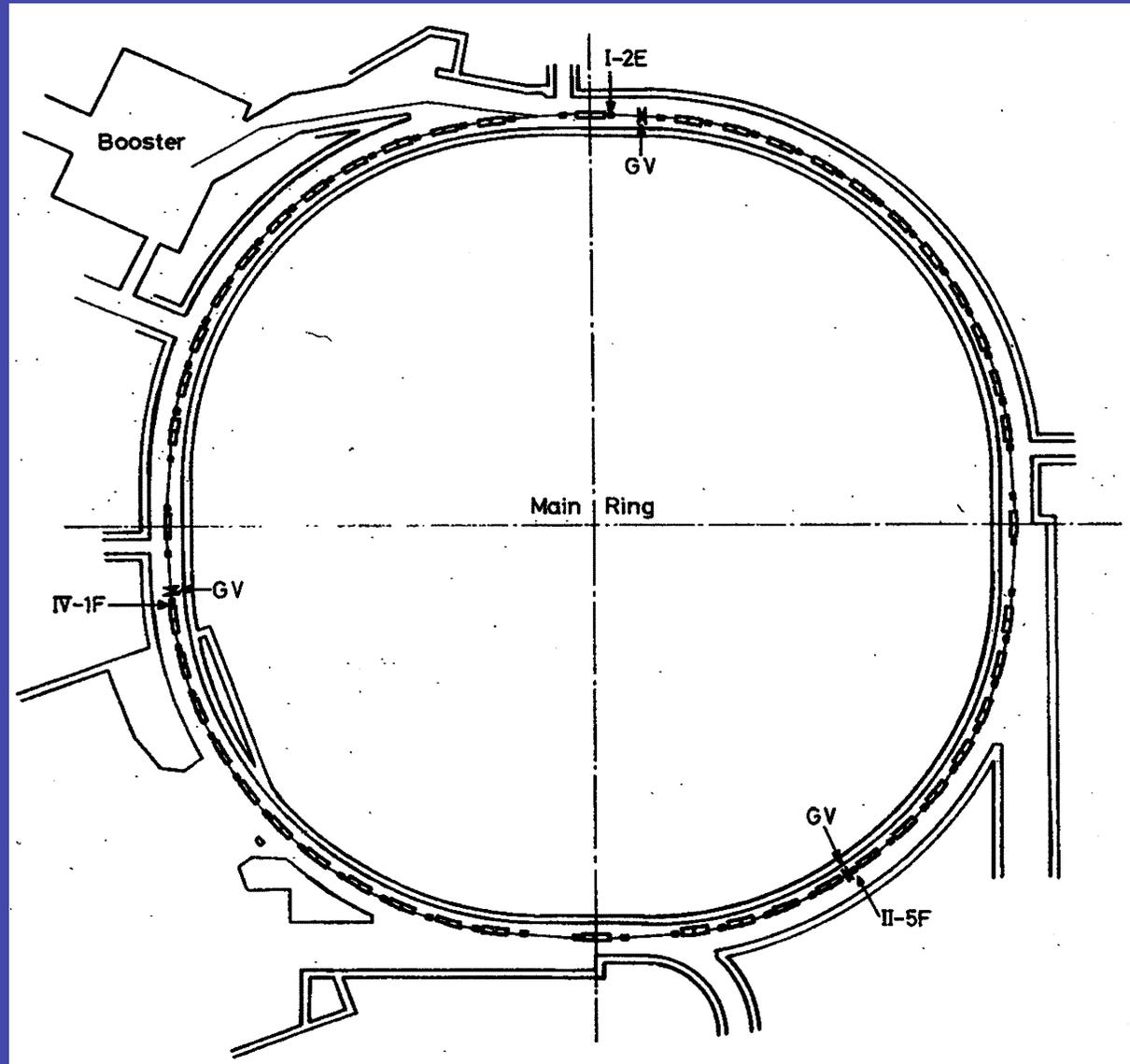
世界の陽子シンクロトロン(1970年当時)

名称(研究所)	エネルギー (GeV)	ビーム強度 (10^{12} ppp)	繰り返し (Hz)	完成年
■ 400GeV-PS (FNAL) 定)	400	7	0.16	1972(予
■ 76GeV-PS (IHEP)	76	2	0.12	1967
■ AGS (BNL)	33	6	0.5	1960
■ CPS (CERN)	28	2	0.5	1959
■ ZGS (ANL)	12	3	0.3	1963
■ 10GeV-PS (Dubna)	10	1	0.1	1957
■ NIMROD (RL)	8	3	0.3	1963
■ Bevatron (LBL)	6	4	0.2	1954
■ Saturne (Saclay)	3	2	0.2	1958

KEK-PSの設計について

- カスケード方式の採用
50 MeV リニアック → 20 MeV リニアック + 500 MeV ブースター
(空間電荷制限 = $1 \sim 2 \times 10^{13}$ ppp)
- セパレーテッド・ファンクション方式の採用(主リング)
素研準備室では一貫してコンバインド・ファンクション方式を開発
- ACラインからの直接取り込み・整流方式電源の採用(主リング電源)
素研準備室での発電機方式から変更 → 維持が容易、電気雑音の発生
- 長直線部構造の変更(主リング)
FQ-LSS-DQ-LSS-FQ-BM-DQ → FQ-LSS-DQ-BM-FQ-LSS-DQ
- ベータトロン振動数の変更(ブースター)
 $\nu = 1.75$ (陽子の異常磁気回転比: 1.79) → $\nu = 2.25$

KEK-PS 主リングの磁石配列



KEK-PSの設計について

- カスケード方式の採用
50 MeV リニアック → 20 MeV リニアック + 500 MeV ブースター
(空間電荷制限 = $1 \sim 2 \times 10^{13}$ ppp)
- セパレーテッド・ファンクション方式の採用(主リング)
素研準備室では一貫してコンバインド・ファンクション方式を開発
- ACラインからの直接取り込み・整流方式電源の採用(主リング電源)
素研準備室での発電機方式から変更 → 維持が容易、電気雑音の発生
- 長直線部構造の変更(主リング)
FQ-LSS-DQ-LSS-FQ-BM-DQ → FQ-LSS-DQ-BM-FQ-LSS-DQ
- ベータトロン振動数の変更(ブースター)
 $\nu = 1.75$ (陽子の異常磁気回転比: 1.79) → $\nu = 2.25$

KEK-PS 建設の主な経緯

- 1967 : 大穂建設候補地の地質調査
- 1970 : 加速器システムの基本設計、前段加速器室建設開始
- 1971. 4 : **高エネルギー物理学研究所設立**
- 1974. 7 : 前段加速器 750 keV ビーム加速
- 1974. 8 : リニアック 20 MeV ビーム加速
- 12 : ブースター 500 MeV ビーム加速
- 1976. 3 : 主リング 8 GeV ビーム加速
- 8 : 内部標的ビームの取り出し
- 12 : 主リング 12 GeV ビーム加速
- 12 : 速いビーム取り出し
- 1977 5 : 共同利用実験開始
- 11 : 遅いビーム取り出し
- 1978 : ブースター利用施設新設(中性子実験施設、東大・中間子利用実験施設)
- 1980 : ブースター利用施設共同利用開始
- 1983 : H⁻ビームによるブースターへの荷電変換入射
- 1985 : リニアック・エネルギー 40 MeV へ
- 1986 : 偏極陽子ビームの加速

KEK-PSの初期建設体制と予算

XG.1

第1回加速器部会メモ

日時 昭和46年7月5日(月)
場所 高エネルギー物理学研究所(筑波)

スケジュール要録

- 10時36分土着。出迎のマイクロバスで、花室地区公務員宿舍工事現場を見学。11時30分復、研究所着。
- 所長、予定者紹介、人事手続等について話し合い。
- 今後の作業の方法、運営の方法について。
- 計画の説明。
- 現場の見学。
- 部屋割り。
- 雑務分組。
- 事務との交流、懇親会。
- 17時研究所発、帰途につく。

議事メモ

1. 所長、予定者紹介および加速器部グループ編成(46年度)資料 HA-7107051

- | | | | |
|-------------|---------|------|------|
| 0. 全体管理 | 西川啓治 | 菊池 健 | 鈴木敏郎 |
| 1. 前段加速 | 橋本貞義 | 小林正明 | |
| 2. リニアック空洞 | 田中治郎 | 稻垣英昭 | |
| 3. リニアック高周波 | 馬場 育 | 奥村彰二 | |
| 4. プースター電磁石 | 佐々木慶 | 滝川誠治 | 熊田雅之 |
| 5. 主リング電磁石 | 木瀬元央 | 遠藤有孝 | |
| 6. 主リング電源 | 増田正美 | | |
| 7. 高周波加速 | 近藤素夫 | 絵面栄二 | |
| 8. 真空 | 責任者を再公算 | | |
| 9. 制御 | 亀井 亨 | 石井和啓 | |
| 10. ビーム | 木村嘉吾 | | |

71-07-05

建設年次計画

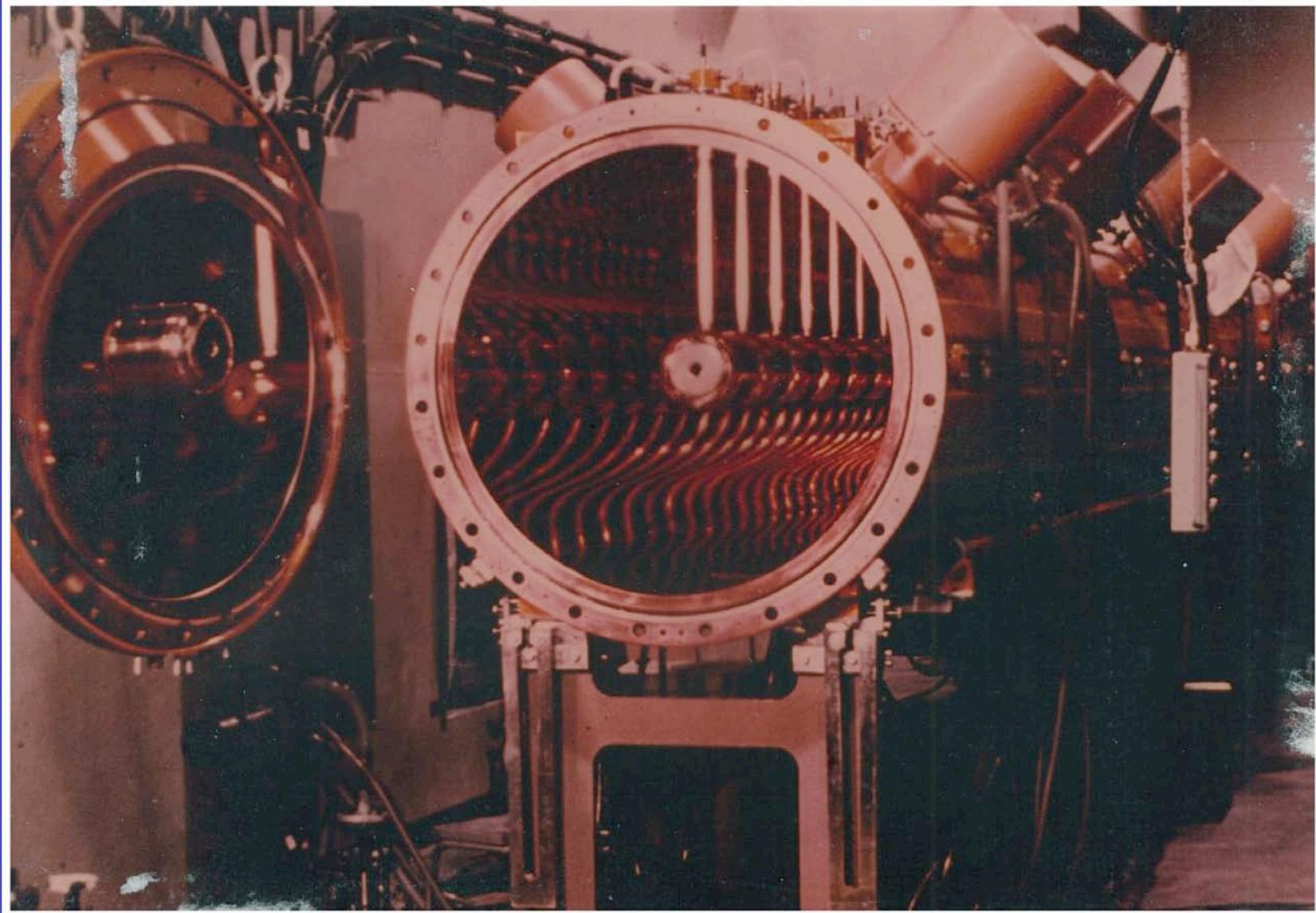
	46年度	47年度	48年度	49年度	50年度	スタート 入数
0. 全体管理						5
1. 前段加速	設計製作	部分の運転	組合調整			6
2. リニアック空洞	製作	組立調整				6
3. リニアック高周波	設計製作	組立調整				4
4. プースター電磁石	設計	製作	設置調整			6
5. 主リング電磁石	設計	製作	操作調整			6
6. 主リング電源	設計	製作	調整			4
7. 高周波	設計	製作	設置調整	調整調整		6
8. 真空	プースター 設計	製作	操作	調整		5
9. 制御		各部の建設のための製作	組合調整			6
10. ビームトランスポート	設計	設計製作	調整			5

総合運転

建設予算 (概略)

入射器	10 ⁶ 円		
プースター	900	主リング電磁石	1120
	560	主リング電源	
電磁石及電源		高周波	190
高周波		真空	160
真空		制御	200
制御		ビームトランスポート	223

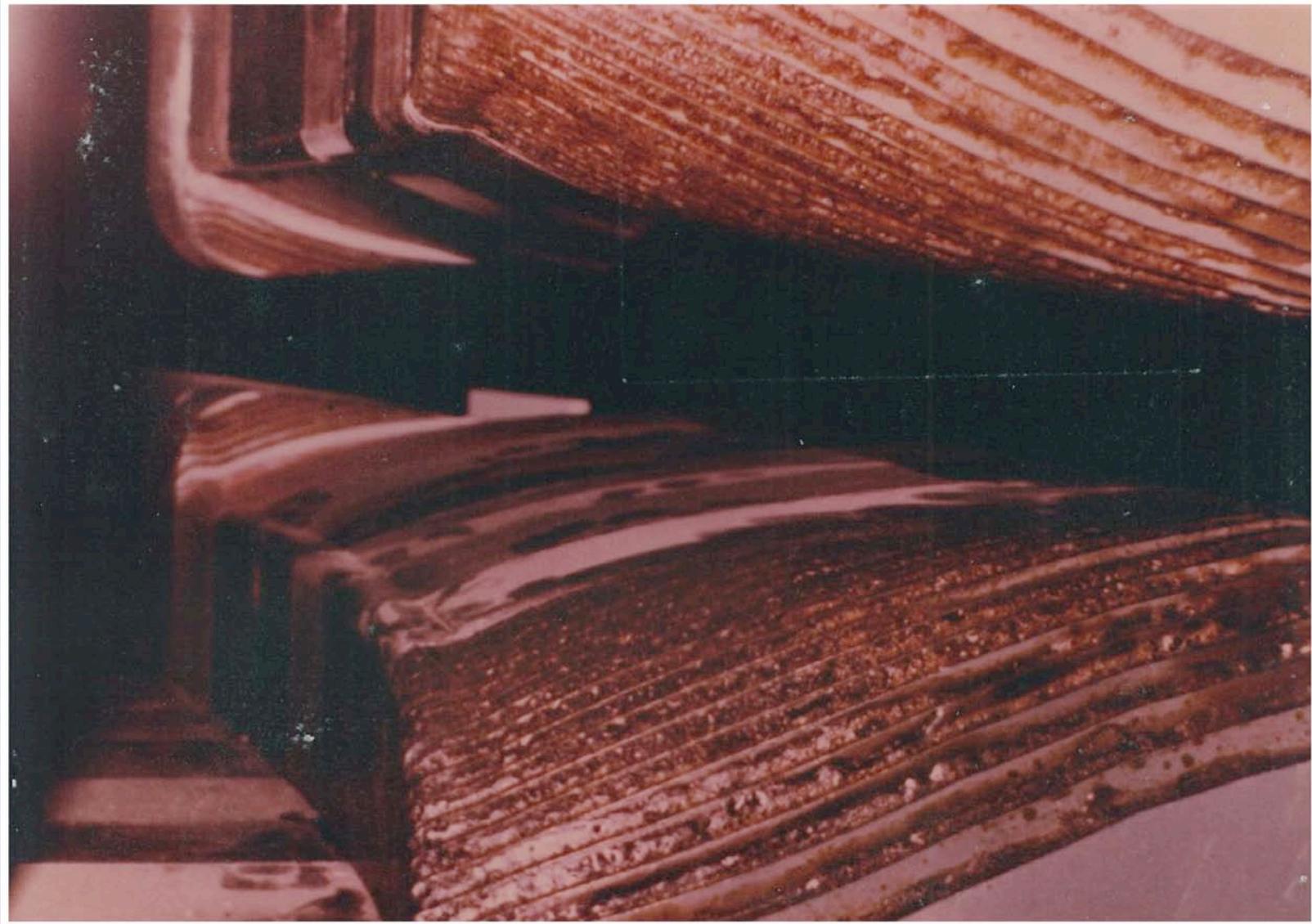
銅鍍金法で製作されたドリフトチューブ型リニアック



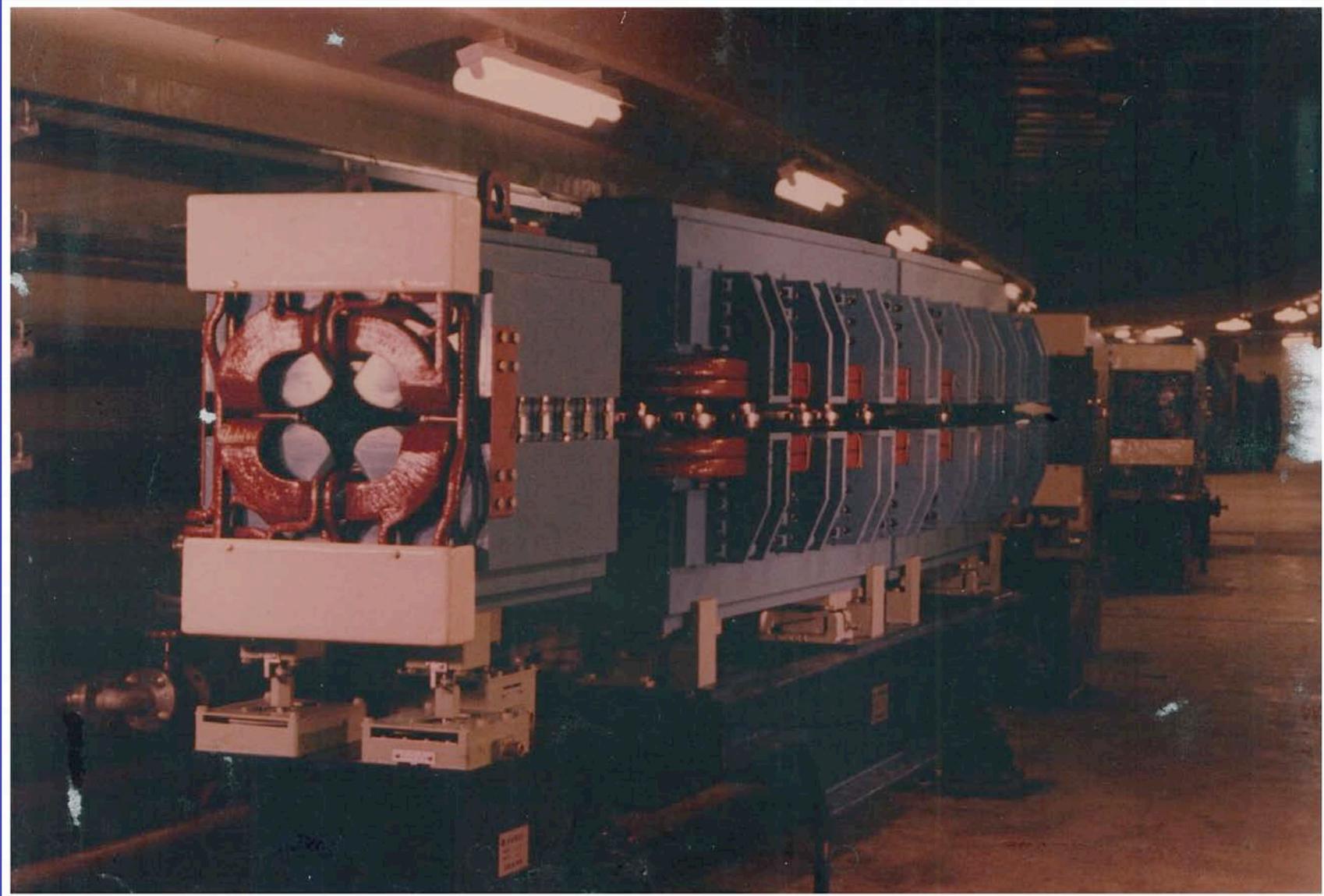
ブースターリング



ブースター強集束型電磁石のギャップ構造

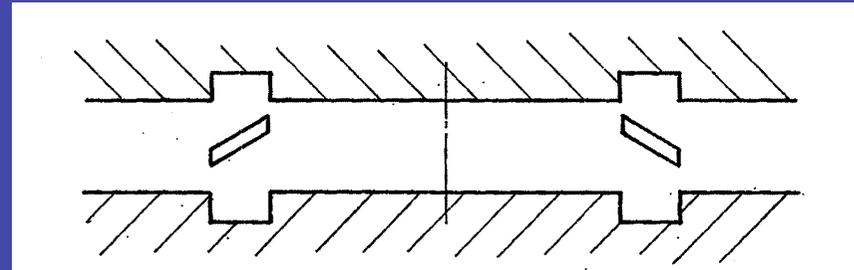


高透磁率方向性鋼板を用いた主リング電磁石



KEK-PSの真空システム

- 主排気系にイオンポンプを採用
- ブースターにベローズダクトを採用
- 金属ガスケットの採用
- H型ガスケットの開発
 - 締め付け圧が小さい
 - フランジ溝に雌雄がない
 - 繰り返し使用可能



KEK-PS 建設の主な経緯

- 1967 : 大穂建設候補地の地質調査
- 1970 : 加速器システムの基本設計、前段加速器室建設開始
- 1971. 4 : 高エネルギー物理学研究所設立
- 1974. 7 : 前段加速器 750 keV ビーム加速
- 1974. 8 : リニアック 20 MeV ビーム加速
- 12 : ブースター 500 MeV ビーム加速
- 1976. 3 : 主リング 8 GeV ビーム加速
- 8 : 内部標的ビームの取り出し
- 12 : 主リング 12 GeV ビーム加速
- 12 : 速いビーム取り出し
- 1977 5 : 共同利用実験開始
- 11 : 遅いビーム取り出し
- 1978 : ブースター利用施設新設(中性子実験施設、東大・中間子利用実験施設)
- 1980 : ブースター利用施設共同利用開始
- 1983 : H⁻ビームによるブースターへの荷電変換入射
- 1985 : リニアック・エネルギー 40 MeV へ
- 1986 : 偏極陽子ビームの加速

主リングのビーム・コミッショニング(1)

53

November 20, 1975 (Friday)

— We will try to inject the beam into the M.R. —

12:00

✓ Still can't operate — due to the Trouble of LINAC RF (G₂ circuit caused oscillation)

24.60

13:15 Linac Beam ON 4pps $\begin{matrix} 1 \\ 3 \end{matrix}$ to Analyzer F.C.

0.45

Energy Analysis

13:49 ✓ Linac Beam 790V "4616", "RF SWITCH"

52

" ON

12:00
13:15 ~ 16:15
Linac Tuning

14:17

LI₁, LI₂ ~ 40mA 33 mA
LI₃, LI₄ ~ 20-25mA 20.0 mA

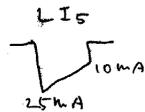
16:15 ~ 18:00
Booster Tuning

15:27 linac stop
(monitor vacuum. BT 37.17.)

16:11 " on

Booster = 261V.

16:23



16:55 ~ 16:59 Beam off.

17:09 ~ 17:13 "

17:15 PPP ~ 1x10¹¹ at Bmax

56

22:52

1 turned! (by Intensity Monitor).

Main Ring Injection Field 1430

22:55

1430

22:58 1425

23:20 1430

} adjusting Septum Field, Monitoring the Position Monitors

23:27 1435

23:29 1440

23:32 "1445"

10 turns

23:37 1448

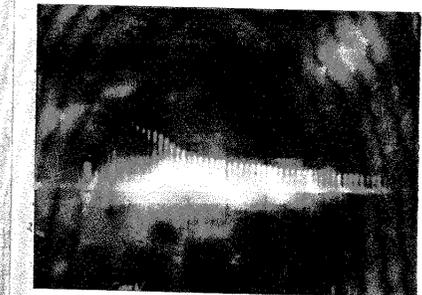
→ 計算

23:43 1445

23:52 1448

Intensity Monitor at I-2D

23:46 100mV
10μs

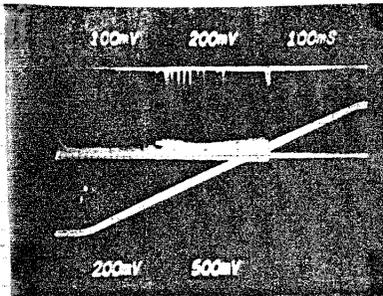


主リングのビーム・コミッショニング(2)

23

Feb 28 '76 (cont'd)

First Beam up to the Transition Energy (01:20)
5.4 GeV, 580 msec
8.4 K_{eff}



05:40 ~ 05:58
M.R. RF was down (#2)

~05:50
f-program 打ち替り & 乱音, check 中.

06:05
B clock span 1.53 → 1.51
06:40 ~ 07:00 [Beam off]
Lime Tank Level was decreased.
516 #2 anode cooling water trouble
(anode was overheated)



07:00 ~
Beam on again
07:58 ~ 08:00
B. RF was down. program 打ち替り

~08:00
ΔV feed back system worked!

08:13
Beam off

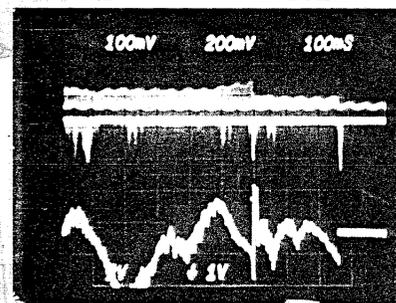
34

23:00 Beam off.
M.R. RF の ΔV feed back system 打ち替り. beam 3 分
時の noise を 抑える。
23:10 Beam on.

~23:20
Acc start 打ち替り ~ 560 msec 位置で Loss Monitor を 戻す。
23:40
Acc start 打ち替り 620 msec 位置で Loss Monitor,
Transition Marker を 戻す。
(Fast Intensity は 正に Transition の 打ち替り)

March 4 '76
00:32 待望の 8 GeV を 記録 40 (ΔV feed back 打ち替り Phase Lock 打ち替り)

loss.
intensity } 増減 12.30
position } 増減 5.11



← intensity
← loss.

strange scope
store & push!

← ΔV position.

打ち替り音 { 木野の
小島
中西の
photo, 中西の

↑ acc. start ↑ phase transition ↑ 8 GeV

主リングのビーム・コミッショニング(3)

35

March 4 '76 (cont'd)

01:10 ~ ^{about} 1hr

We celebrated ~~the~~ wine!

3月3日(水)	朝	夜	夜中
Shift Leader	中西	石丸	8400 2nd
前 段	福藤	香野	久保田
Linac	穴見	新垣	
Booster	宮原		
Booster RF	all member		
B.T.	川又保	速平	
M.R.	海軍	本原	
Vacuum	水野	久保	
Control	二原	内倉	
Monitor	4th		
Power	新富		

machine は完全に稼働。 H.g.m injector & Booster } の Trouble 5 to 6 time

02:50.



2.5 sec beam off ~ 1.4 sec (RFは Ratchet から 1.4 sec かけられる)

02:55

ΔV が reasonable 1.4 sec だけ上げ。 Acc. 終了 附近の bunch shape の異常を比較し始める。

Muto's Monitor は 20MHz (Noise) 20MHz Filter
40μsec 2" 中を 2.5" まで 5.5" まで (at transition) 36
RF feedback gain を下げた。

03:10 ~ 200mA

~ 200mA の Intensity (by Muto's Monitor) が 2.5" まである。

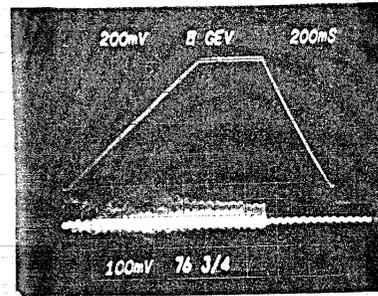
1.7" まで position Monitor の 精度を 1.12" まで → until 04:00

03:25

1.7" まで transition 時の Intensity → 300~400mA at I 2 D
50ms IP

03:40

transition era loss が 非常に多くなる。



← 02:58

Muto's Estimation
Booster 2×10^{11} ~ 30ns
M.R. Acc. End 5×10^{10}
~ 1/60 7.5×10^9 No.
M4 2" 7.2×10^{10}
の 精度 あり 1.5×10^{10} PPP
 2×10^{10} PPP

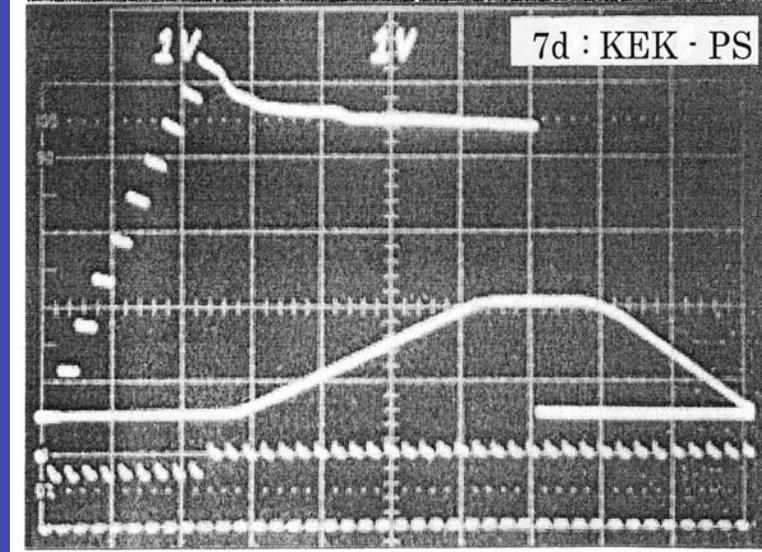
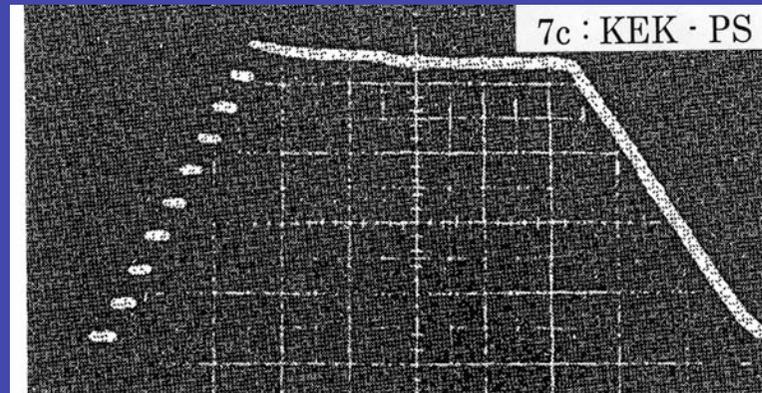
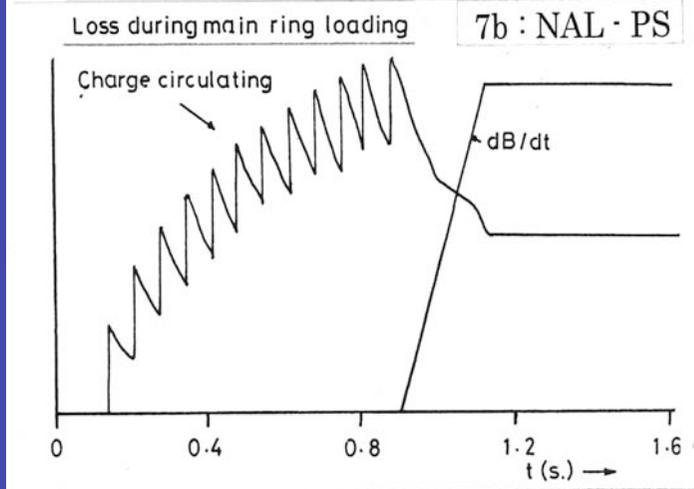
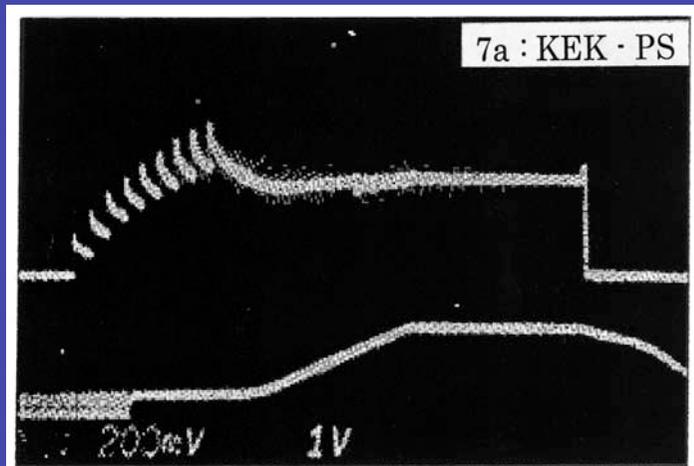
04:30

3% 毎 pulse の 1" だけ 1.2 sec だけ。

05:12

Beam off

主リングへのビーム入射と加速



a : KEK-PS 完成当初
b : FNAL-PS 完成当初

c : KEK-PS 4×10^{12} ppp
d : KEK-PS 8×10^{12} ppp

KEK-PSで観測されたビーム不安定性の例

ブラスター のビーム不安定性 (Head-tail instability)

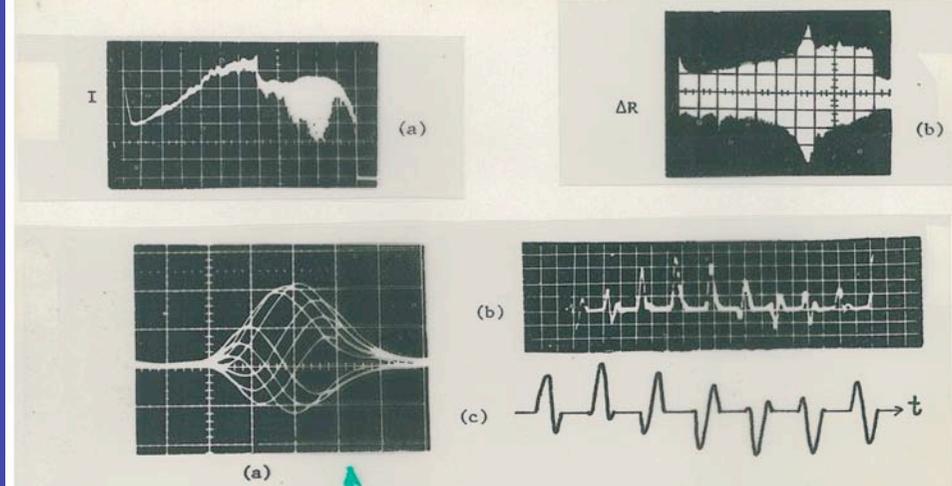


Fig.2. a) ΔR signal of a single bunch consecutively traced every 15 μsec .
 b) ΔR signal of a bunch successively traced.
 c) ΔR signal calculated with equation (1). ($\chi = -5.1$ rad and $Q = 2.1$)

TRANSVERSE BUNCHED BEAM INSTABILITIES - THEORY F.J. Sachser, CERN, Geneva, Switzerland

(HEAC 1994)

Classification of modes

If all particles have the same betatron frequency $\omega_{\beta} = Q\omega_s$ and synchrotron frequency ω_s , and we ignore the transit time of the bunch past a fixed observer, the first few head-tail modes appear as in Fig. 1a. The difference signal from a position monitor has the form

$$\Delta\text{-signal} = p_m(t) e^{j2\pi nkQ}, \quad (1)$$

for the k^{th} revolution.

Usually both Q and the revolution frequency ω_s depend on momentum, so ω_{β} varies as a particle moves

Note that for the example shown in Fig. 1c, mode 2 has appreciable centre-of-mass motion and would leave a long-range resistive-wall wake whereas mode 0 would not.

For a parabolic bunch, the modes $p_m(t)$ are approximately sines and cosines as shown in Fig. 1, while for a hollow bunch they appear as in Fig. 3 with

$$p_m(t) = \frac{T_m(t/\tau_L)}{\sqrt{1 - (t/\tau_L)^2}}, \quad (5)$$

where T_m is a Chebychev polynomial.

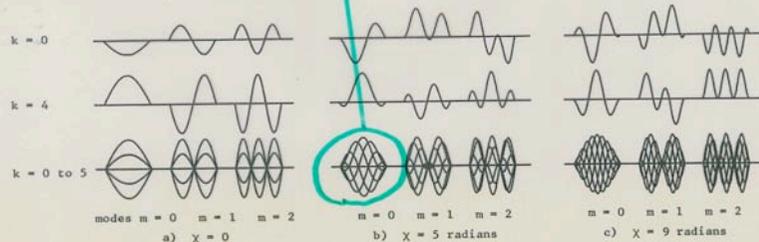
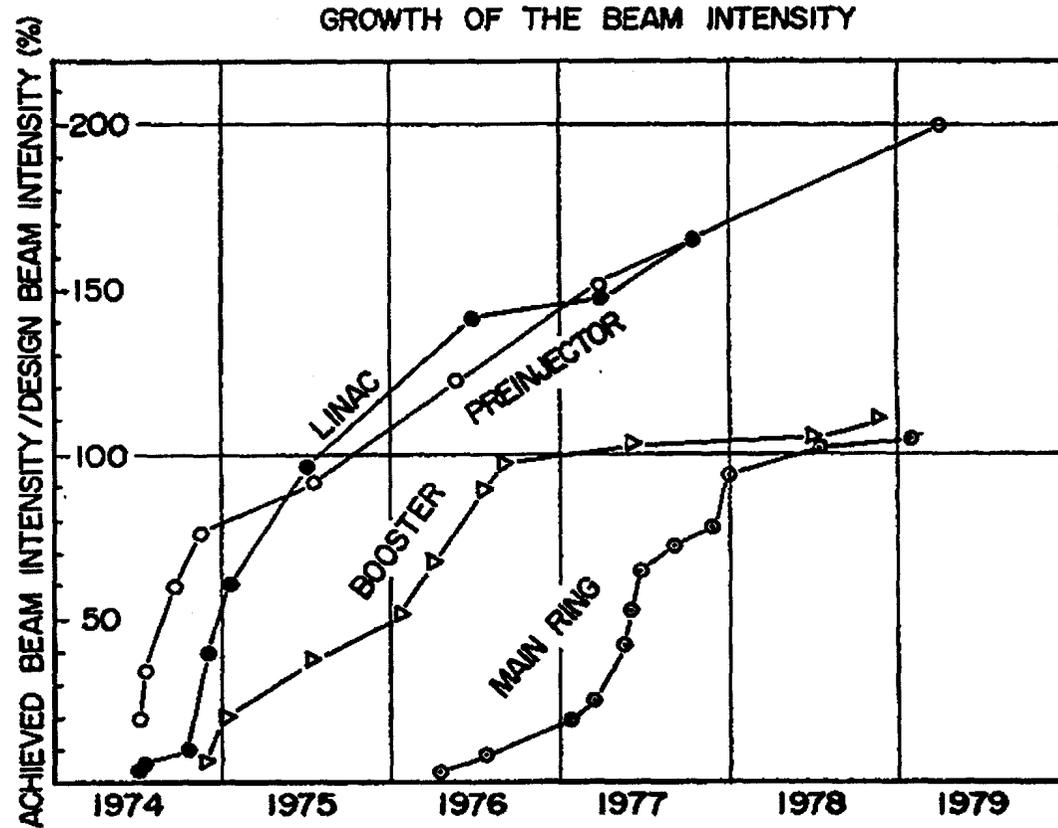


Fig. 1 Contortions of a single bunch on separate revolutions, and with six revolutions superimposed.

KEK-PSのビーム強度改善(1974 - 1979)



前段加速器: 200mA

リニアック: 100mA

→ 100%

ブースター: 6×10^{11} ppp

主リング: 2×10^{12} ppp

KEK – PSの主要パラメーター

● 主リング（セパレーテッド・ファンクション型）

最高ビームエネルギー	8 (12) GeV
繰り返し	0.5 Hz
ビーム強度	2×10^{12} (8×10^{12}) ppp
平均軌道半径	54 m
スーパー周期数	4
セル数	20ノーマルセル、8 長直線部セル
電磁石配列(セル)	FODO
チューン	7.25
最高磁場(中心軌道)	1.26 (1.75) T
入射磁場(中心軌道)	0.148 T
RF加速周波数	6.03 ~ 7.92 MHz
ハーモニック数	9
RF加速電圧(ピーク)	60 (120) kV

● ブースター（コンバインド・ファンクション型）

最高ビームエネルギー	500 MeV
繰り返し	20 Hz
ビーム強度	6×10^{11} (2×10^{12}) ppp
平均軌道半径	6
電磁石配列	FDDFO x 8 セル
n値	12.09
チューン	2.25
最高磁場(中心軌道)	1.09 T
入射磁場(中心軌道)	0.197 T (0.280 T)
RF加速周波数	1.62 (2.30) ~ 6.03 MHz
ハーモニック数	1
RF加速電圧(ピーク)	16 (30) kV

● 入射リニアック（ドリフトチューブ型）

ビームエネルギー	20 (40) MeV
ビーム電流(ピーク)	100 (200) mA (Hに変更後 18 mA)
ビームパルス幅	20 (5) μ sec (Hに変更後 40 μ sec)

● 前段加速器（コッククロフト-ワルトン型）

イオン源	50 kV デュオプラズマトロン
ビームエネルギー	750 keV
ビーム電流(ピーク)	300 mA
H: イオン源	マルチカスプ型 20 mA

KEK-PS 建設の主な経緯

- 1967 : 大穂建設候補地の地質調査
- 1970 : 加速器システムの基本設計、前段加速器室建設開始
- 1971. 4 : 高エネルギー物理学研究所設立
- 1974. 7 : 前段加速器 750 keV ビーム加速
- 1974. 8 : リニアック 20 MeV ビーム加速
- 12 : ブースター 500 MeV ビーム加速
- 1976. 3 : 主リング 8 GeV ビーム加速
- 8 : 内部標的ビームの取り出し
- 12 : 主リング 12 GeV ビーム加速
- 12 : 速いビーム取り出し
- 1977 5 : 共同利用実験開始
- 11 : 遅いビーム取り出し
- 1978 : ブースター利用施設新設(中性子実験施設、東大・中間子利用実験施設)
- 1980 : ブースター利用施設共同利用開始
- 1983 : H⁻ビームによるブースターへの荷電変換入射
- 1985 : リニアック・エネルギー 40 MeV へ
- 1986 : 偏極陽子ビームの加速

加速器建設に協力した主な来日外国人研究者

1971 : Th. Sluyters (BNL), L.C. Teng (ANL)

1972 : T. Khoe (ANL), W. Praeg (ANL), C.S. Taylor (CERN)

1973 : D. Swenson (LAMPF)

1974 : J.D. McCarthy (FNAL), P. Reardon (FNAL)

1975 : L.N. Blumberg (BNL)

1976 : C.P. Steinbach (CERN)

1977 : N.K. Cung (Saclay), J.E. Griffin (FNAL), A. Mathewson (CERN)

1978 : R.L. Witkover (BNL)

1979 : P.B. Wilson (SLAC)

1980 : A. Ruggiero (FNAL), P. Grand (BNL)

1981 : J-L. Pellegrini (SLAC), A. Chao (SLAC)