

# 特別講義BII「高エネルギー加速器科学」

大強度加速器を用いた  
素粒子原子核実験(の裏側)入門

田中 万博



**J-PARC** Center

素粒子原子核ディビジョン



**KEK:** 高エネルギー加速器研究機構

素粒子原子核研究所

E-mail: [kazuhiro.tanaka@kek.jp](mailto:kazuhiro.tanaka@kek.jp)

# 今回話すこと

- 大強度加速器J-PARCの概要とハドロン実験施設の建設
- **ビーム輸送とビーム光学**
- 電磁石の作り方、磁場の測り方
- ニュートリノビームを250km離れた的にあてる方法

# 大強度加速器を用いた 素粒子原子核実験(の裏側)入門

田中万博

KEK/J-PARC

素粒子原子核ディビジョン

## 内容と目標

- 高エネルギー加速器を用いて行う原子核、素粒子実験の基礎について講述する。
- できるだけ数式は使わず、直感的な理解を重視する。
- シンプルな加速器であったKEK-PSを例にとる。

# 目次

1. 裏側を知ろう！
2. ビーム光学
3. 電磁石
4. いくつかの具体例  
K5ビーム、単色ミュオンビーム、と  
ニュートリノ・ビームライン(K2K)





KEK

HIGH ENERGY ACCELERATOR RESEARCH ORGANIZATION

1-1 OHO, TSUKUBA-SHI  
IBARAKI-KEN, 305-0801 JAPAN  
<http://www.kek.jp/>

# 全体を見渡す？

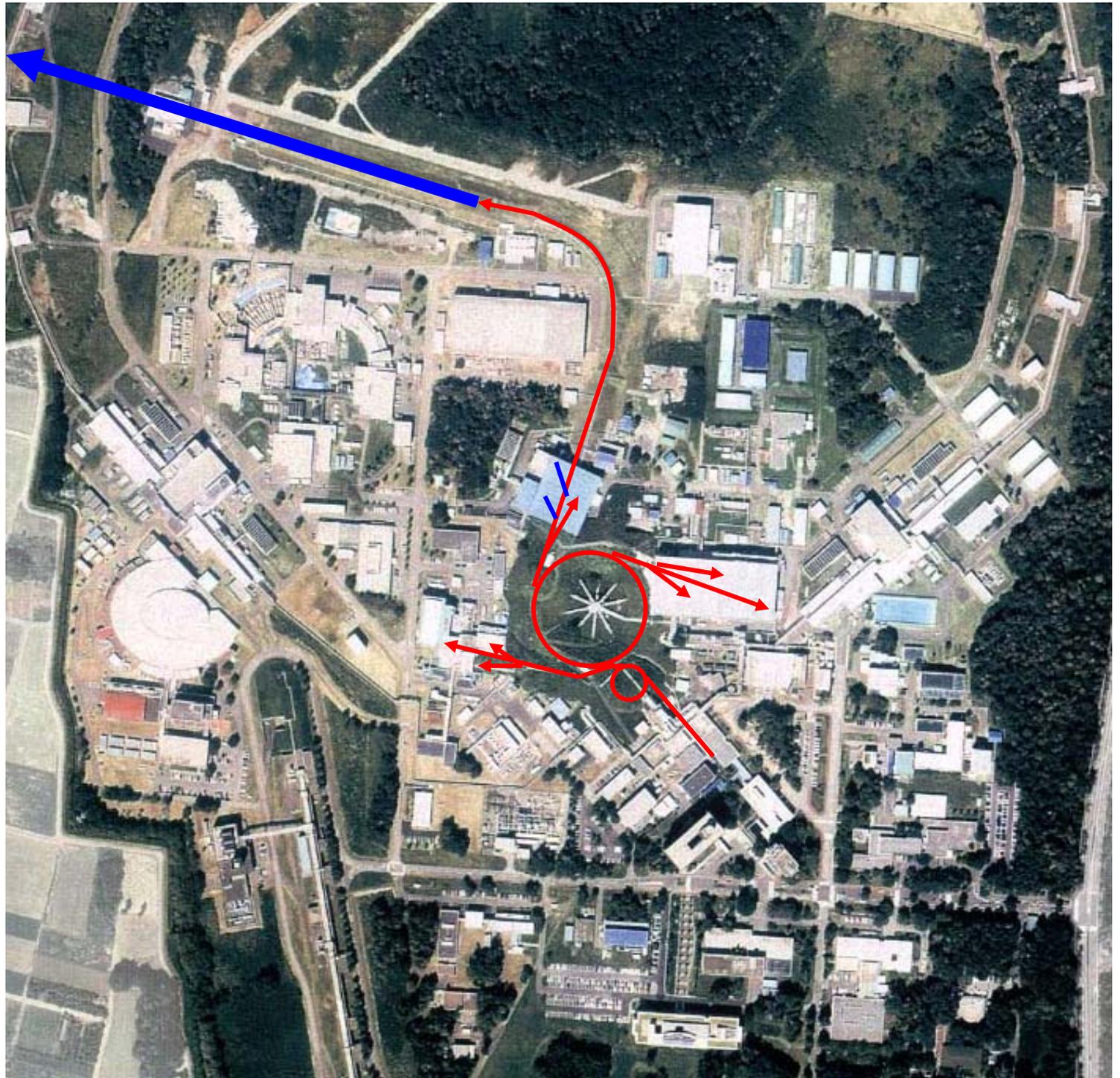
π、K中間子ビームを使う実験の裏側の様子は？？

1. 実験装置
2. 実験標的
3. 二次ビームライン
4. (ビームダンプ)
5. 標的
6. 最終収束系
7. 一次ビームラインとビーム輸送、振り分け
8. 取り出し
9. 加速器



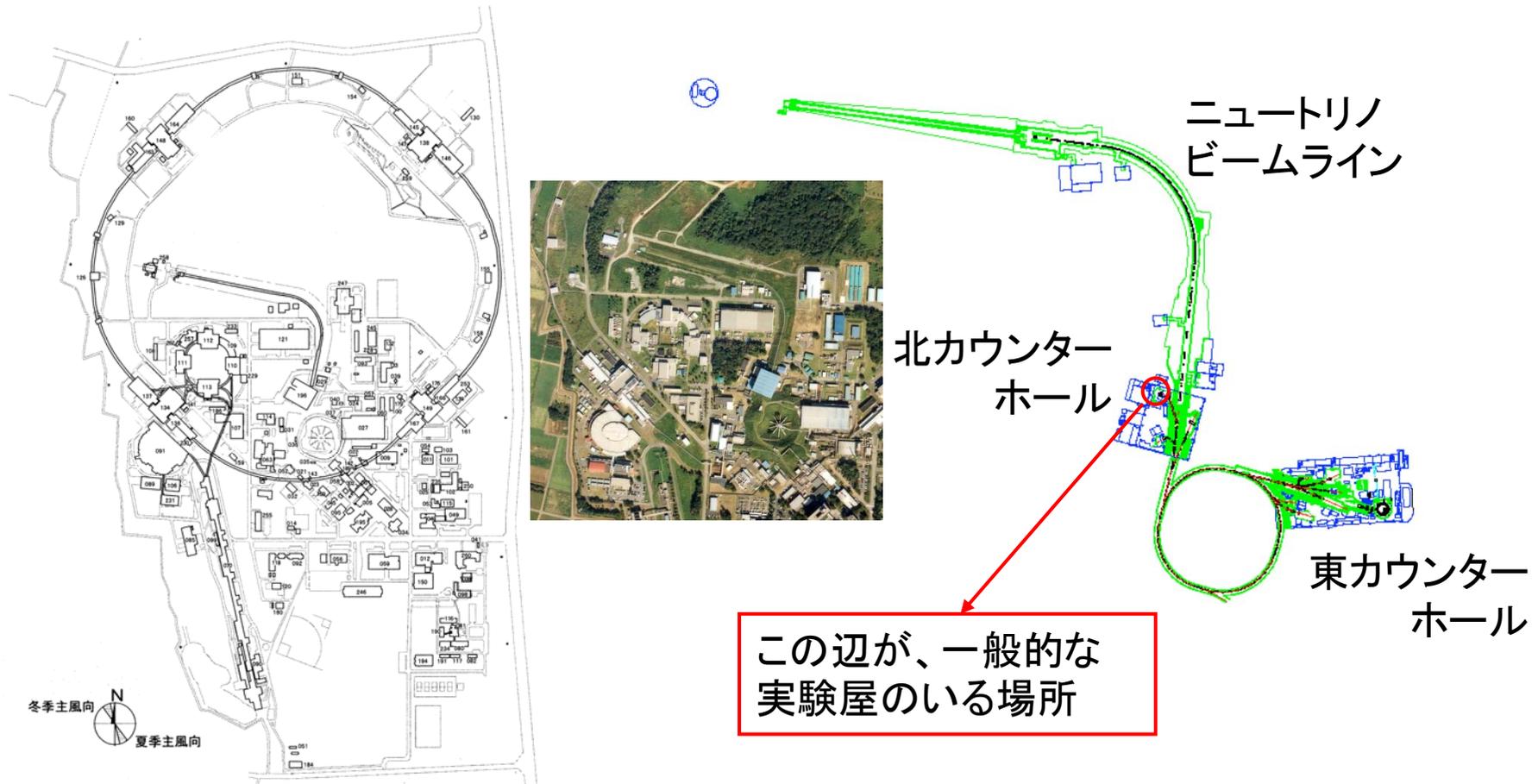
KEK

ハドロン  
加速器群  
(つくば)

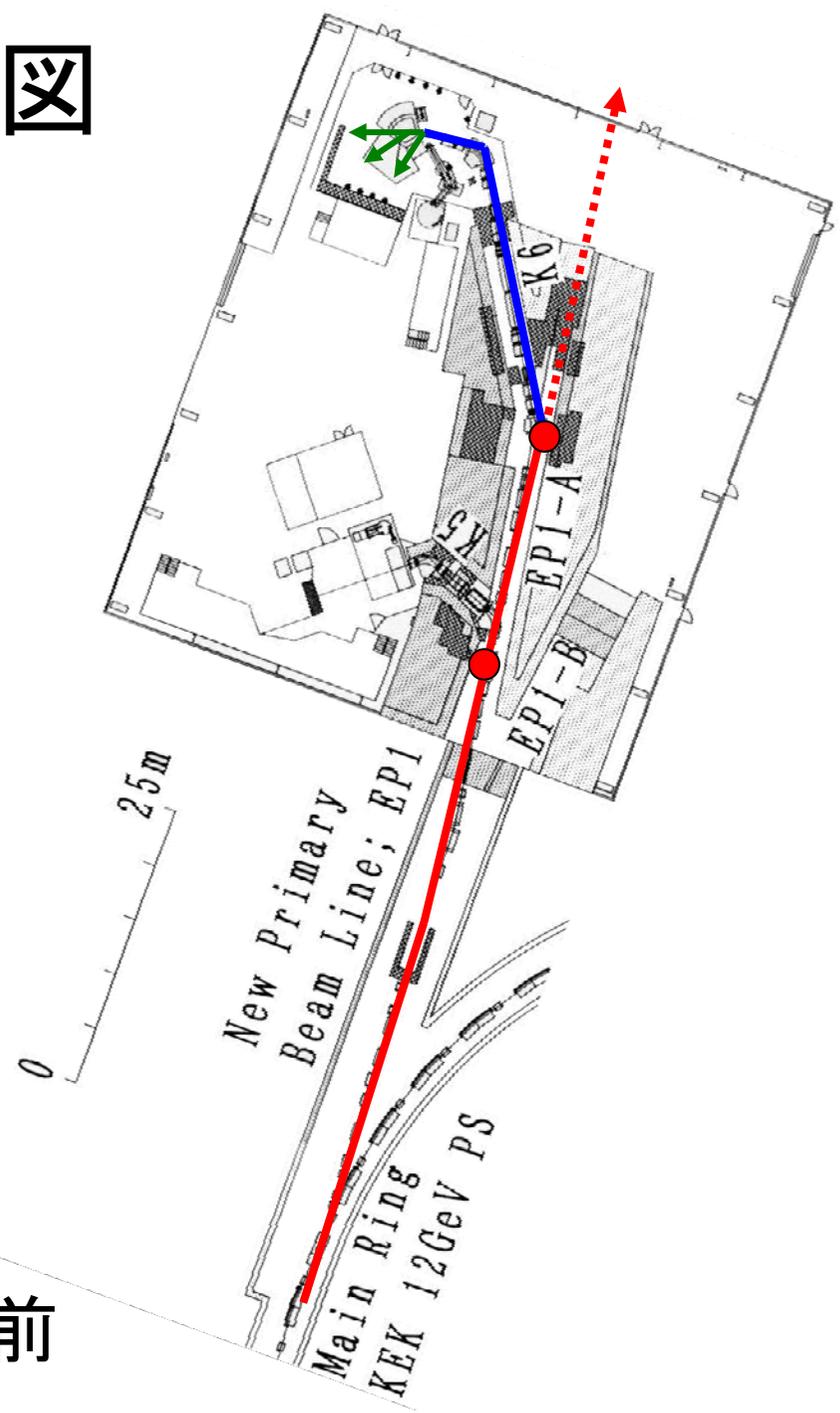
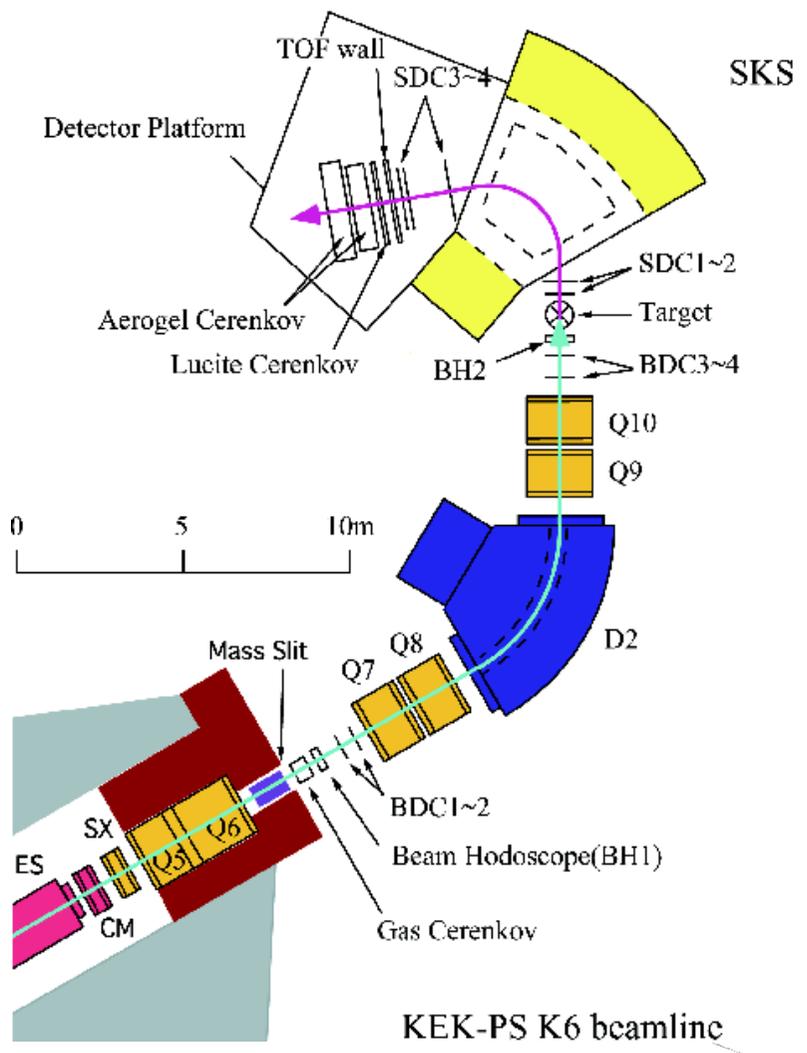


# KEK 12GeV 陽子シンクロトロン

## 典型的な複合加速器施設

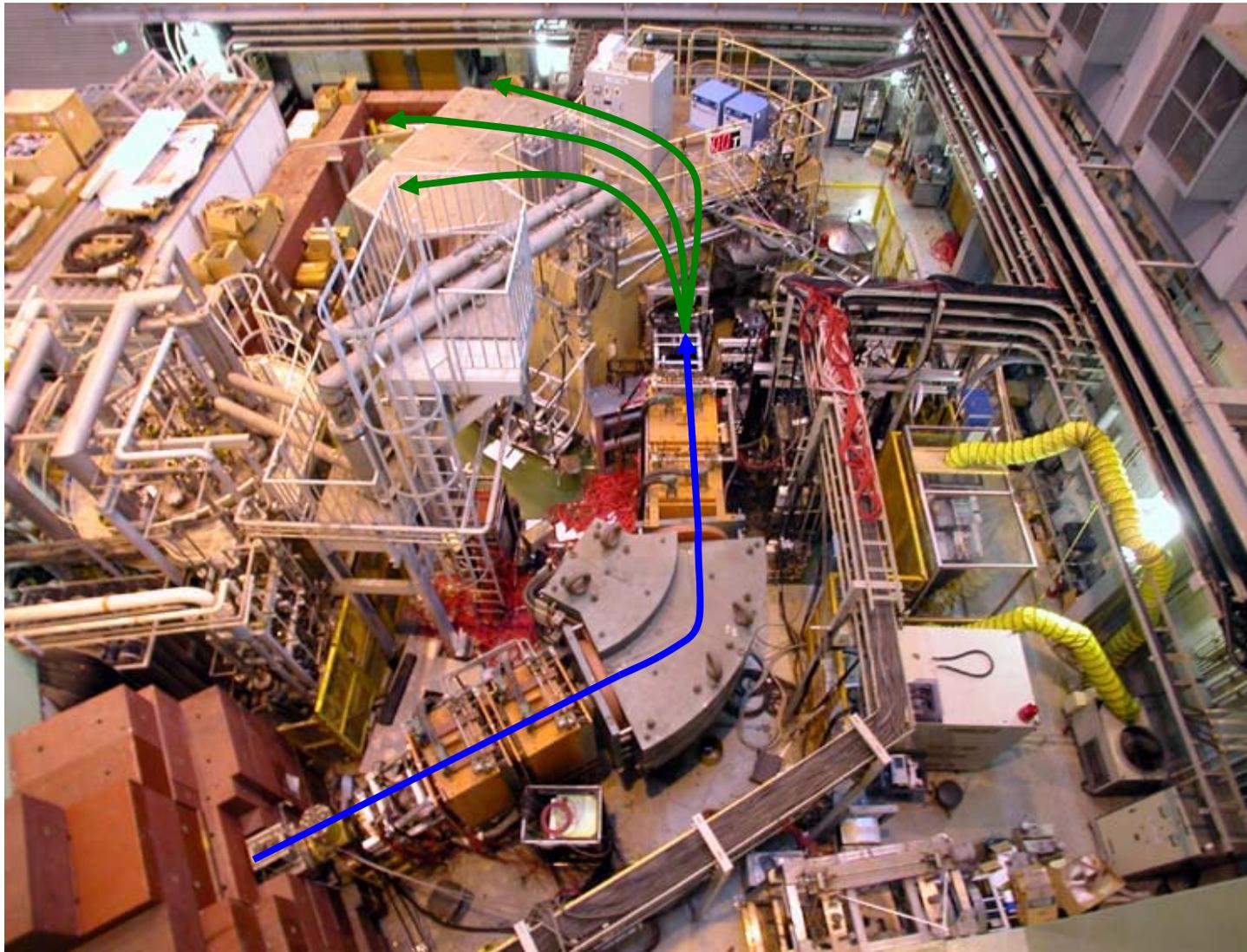


# 北カウンターホール之図



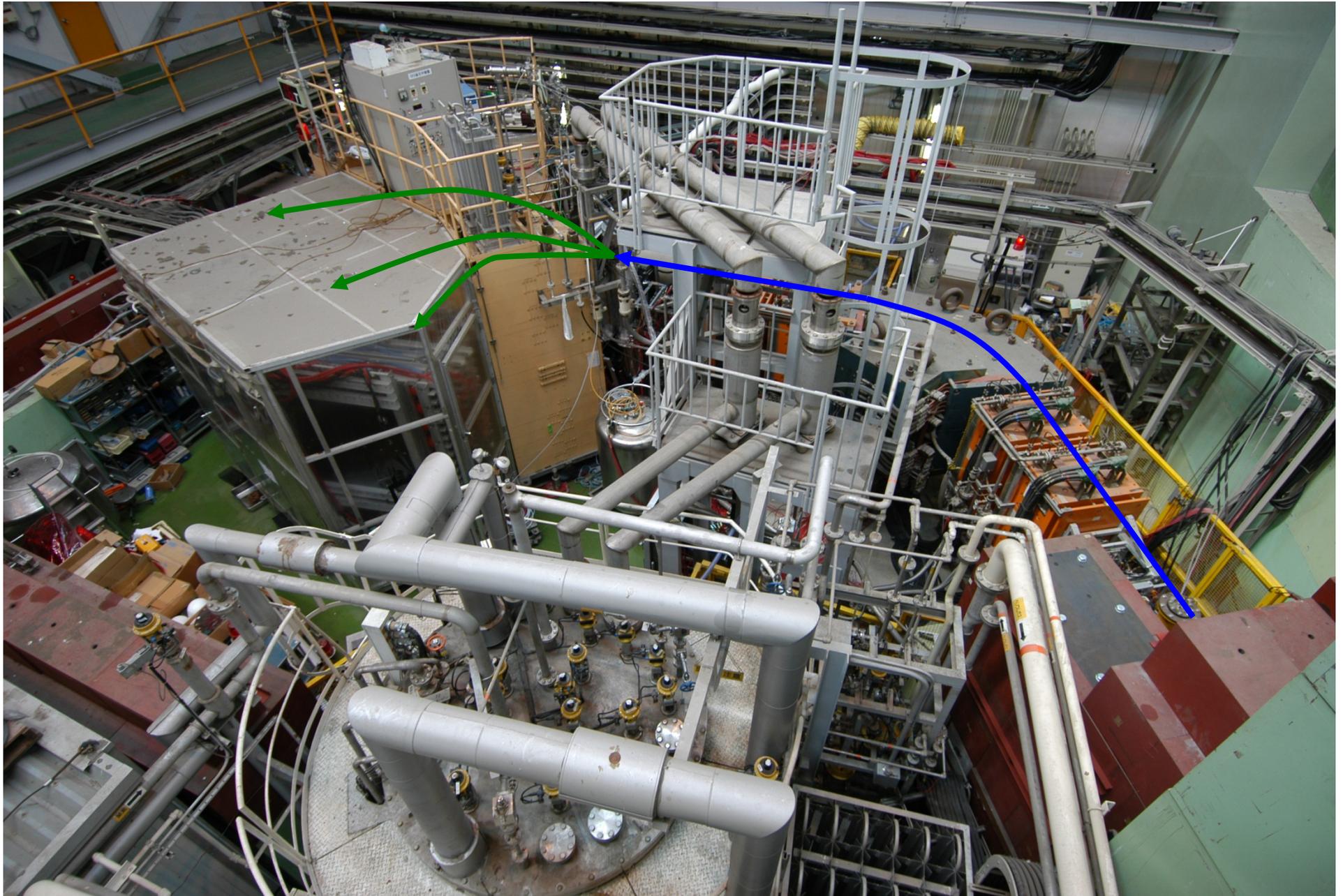
ニュートリノ・ビームライン延伸以前

# 典型的な高エネルギー核実験・I

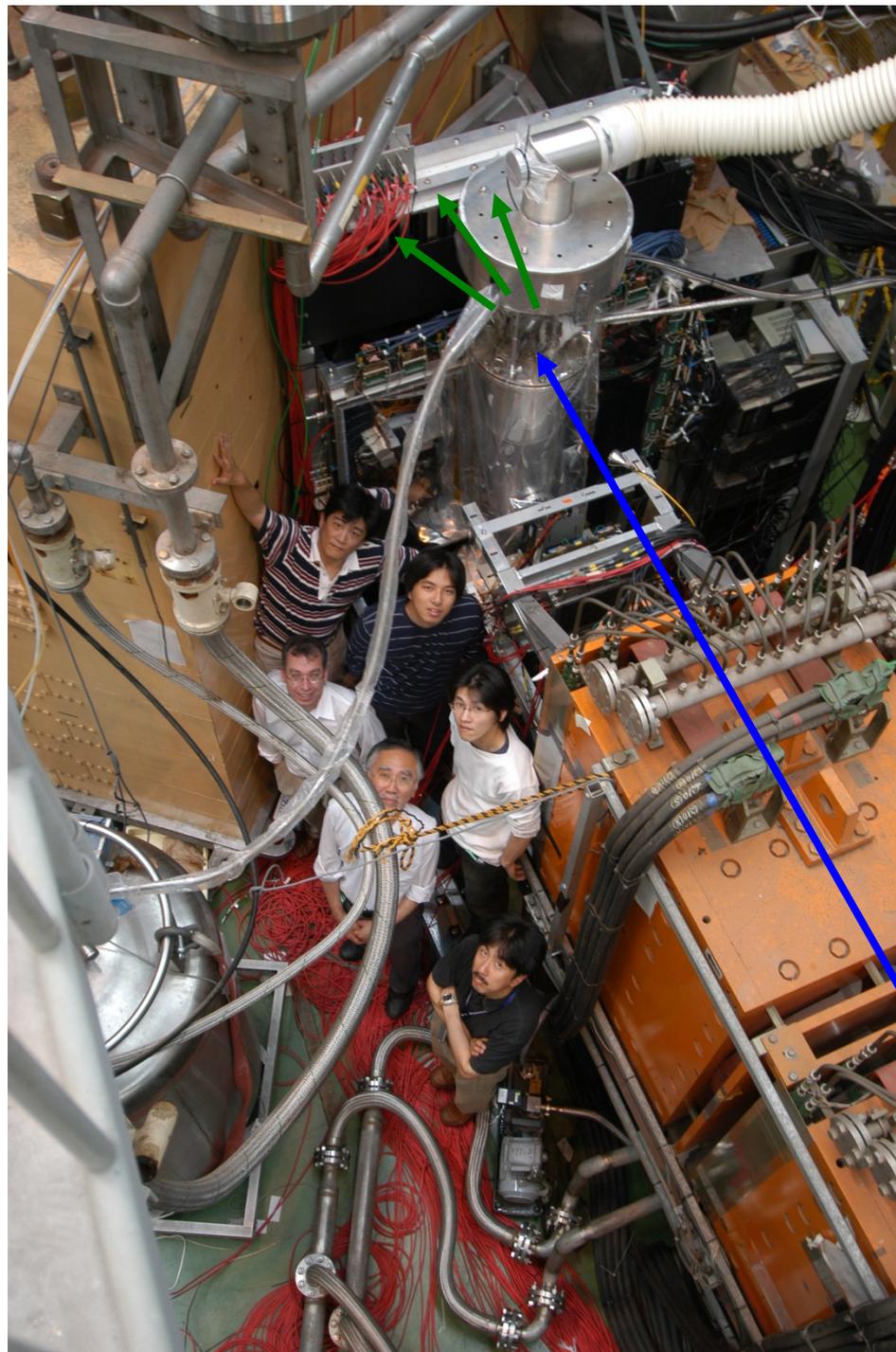


K6ビームライン:ビーム分析器とSKSスペクトロメータ

# 典型的な高エネルギー核実験



# 実験標的 と その周辺

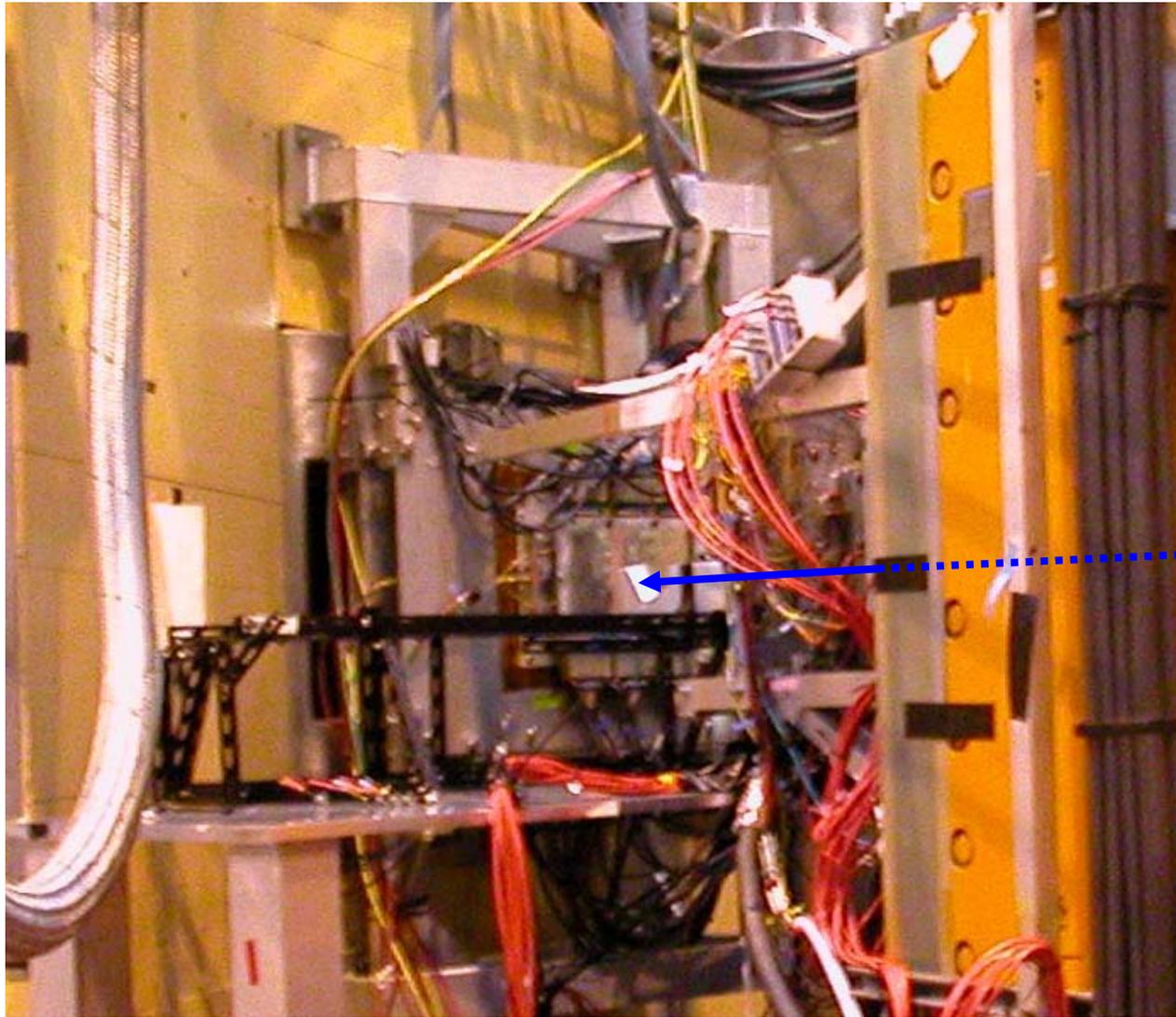


# 典型的な高エネルギー一核実験・II



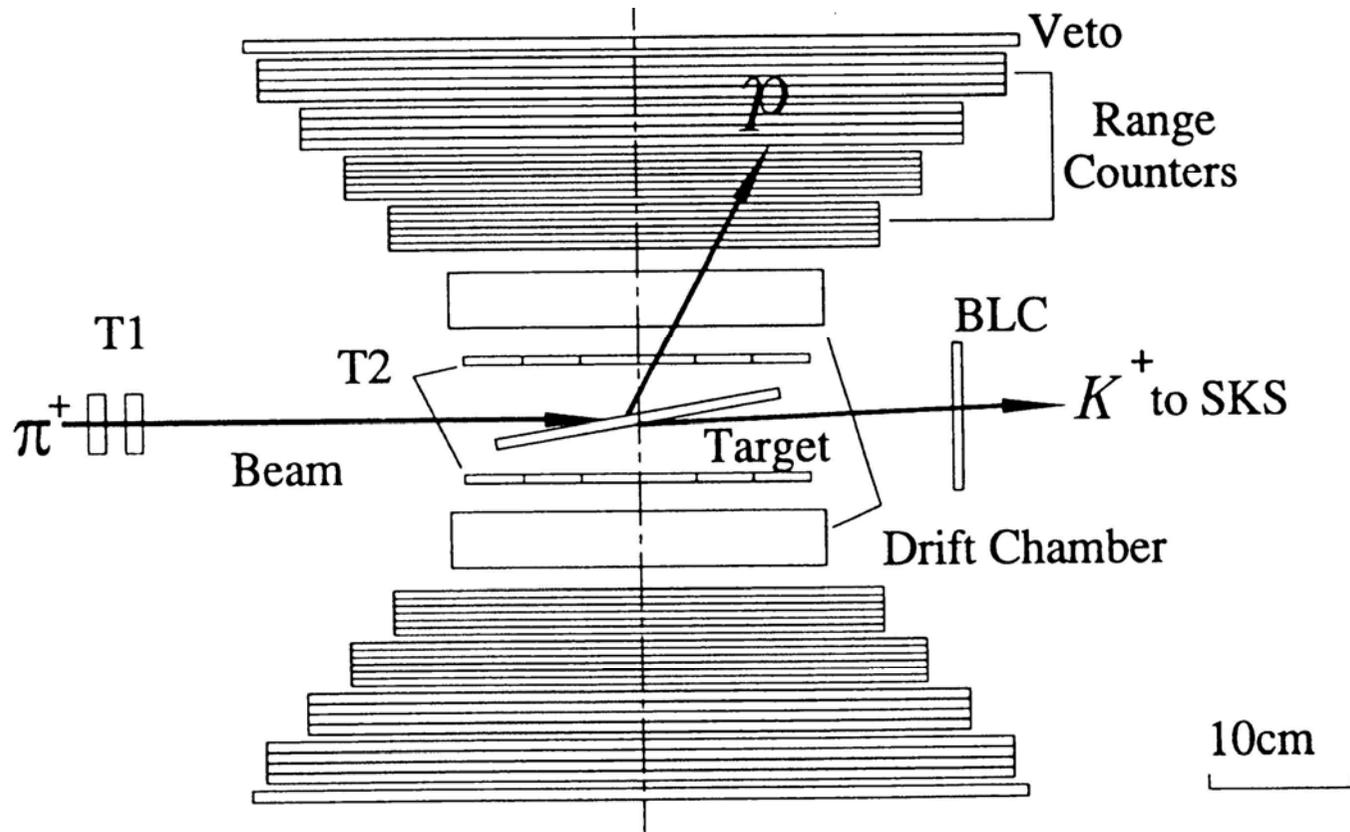
実験標的とその前後

# 典型的な高エネルギー一核実験・III

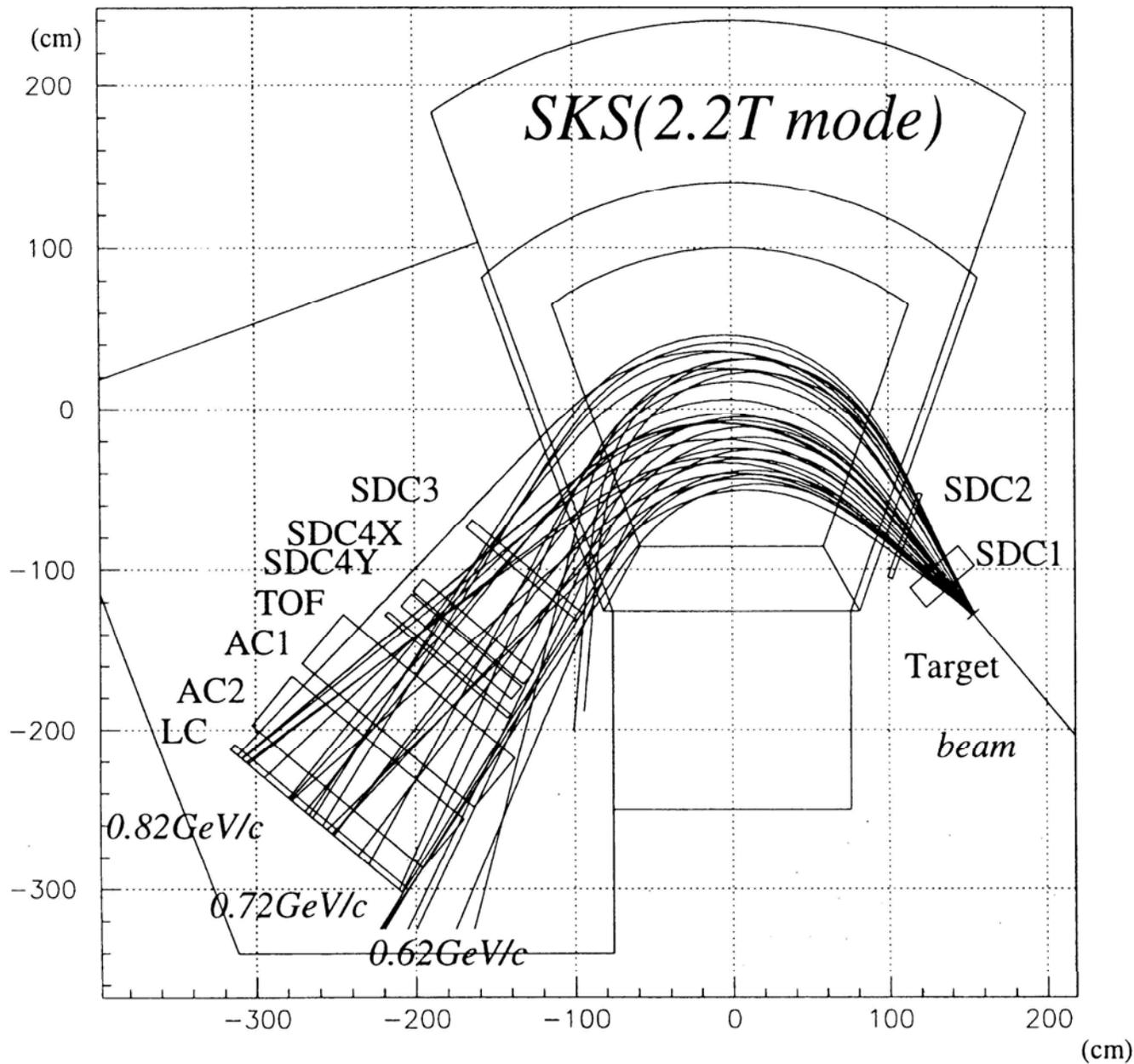


まさに標的付近のみ……、

# ( $\pi$ 、 $K$ ) 反応によるハイパー核生成と弱崩壊



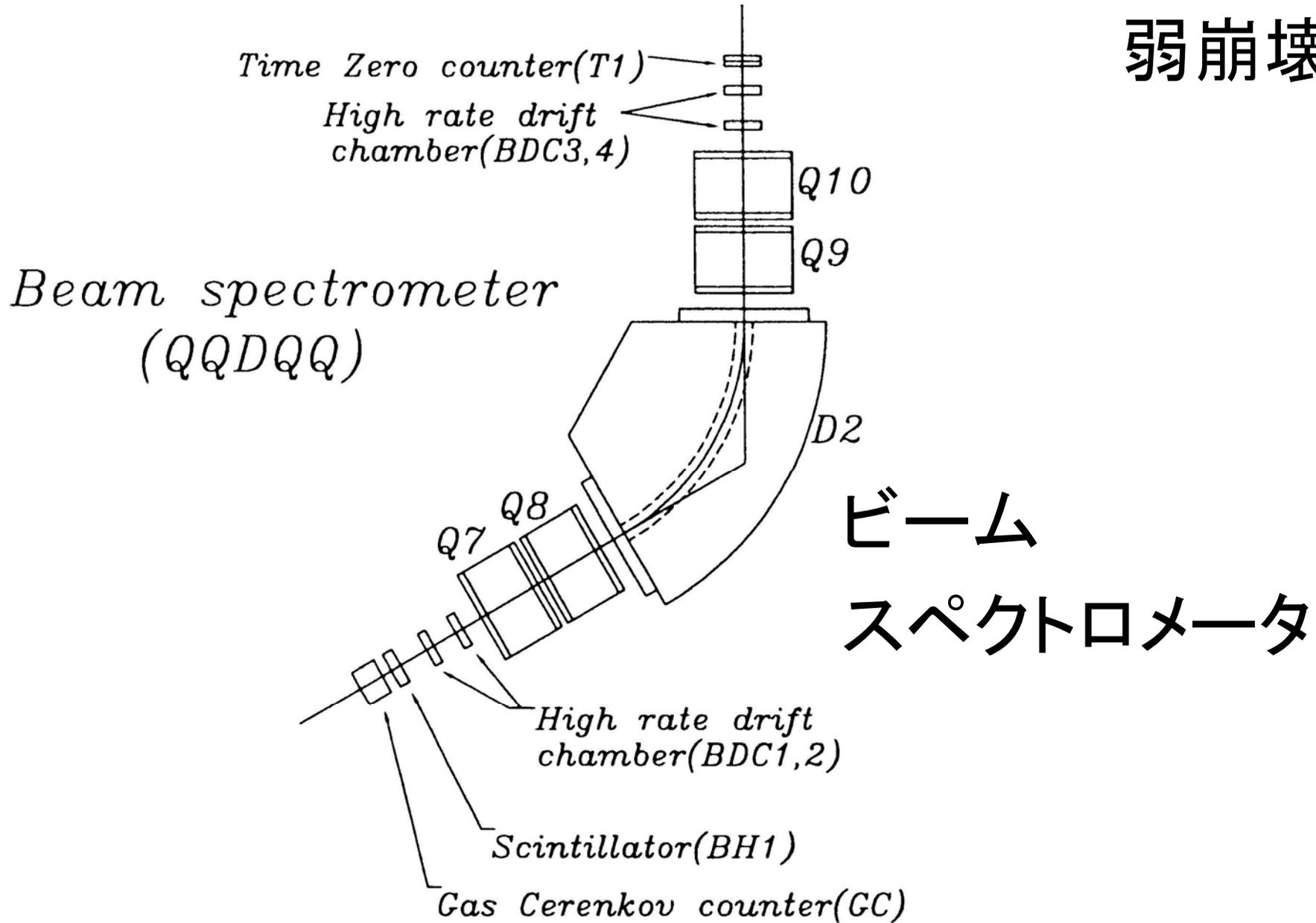
標的とその周辺の弱崩壊検出器群



SKS

( $\pi$ 、 $K$ ) 反応によるハイパー核生成と弱崩壊

# ( $\pi$ 、 $K$ ) 反応によるハイパー核生成と 弱崩壊

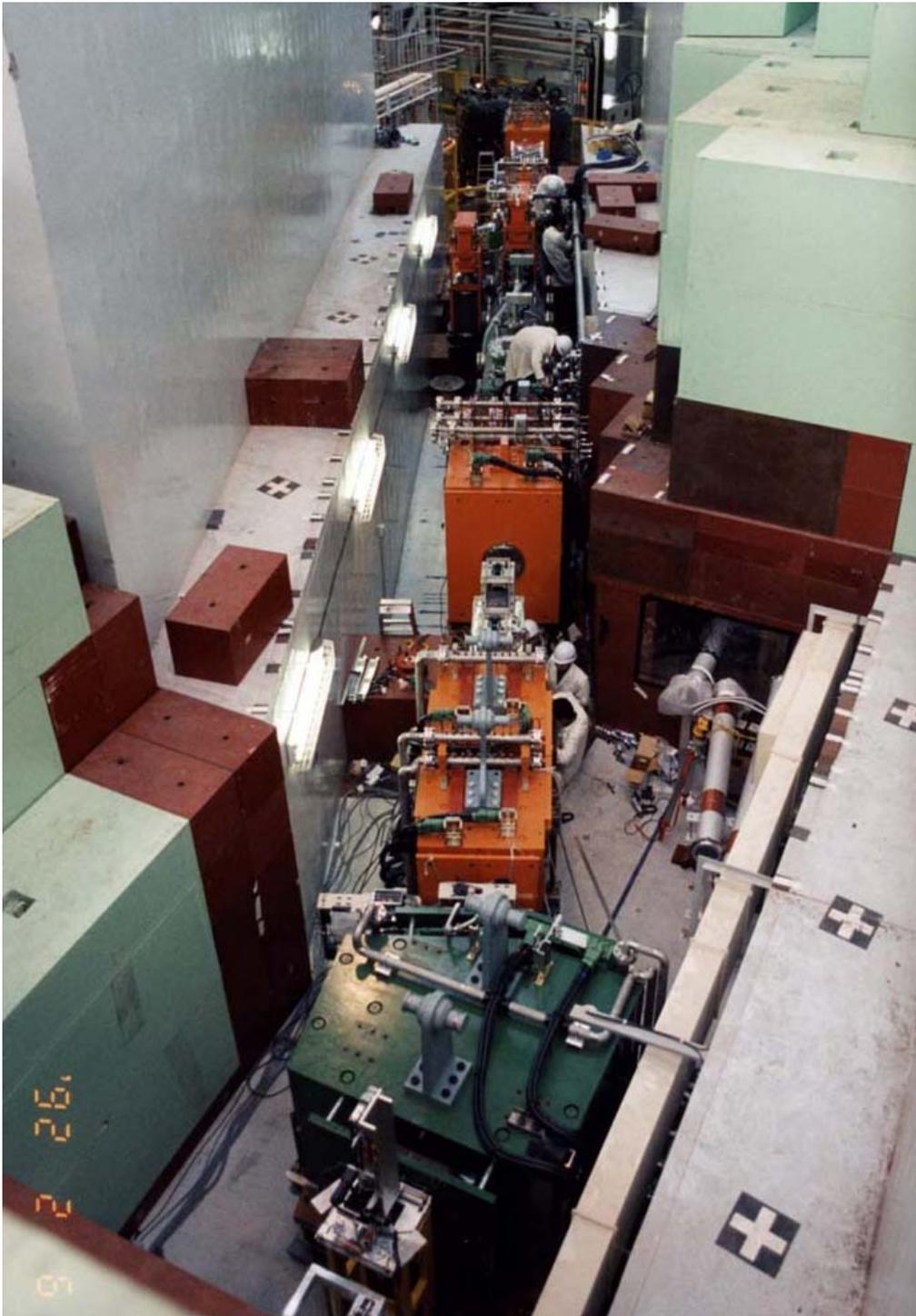


# 磁場による運動量分析

- ローレンツ方程式
- 電磁気学

# 遮蔽体の奥の出来事

- $\pi$ 中間子はどうやって作られているか？
- $\pi$ 中間子はどうやって実験標的まで導かれるか？



# K6 Beam Line

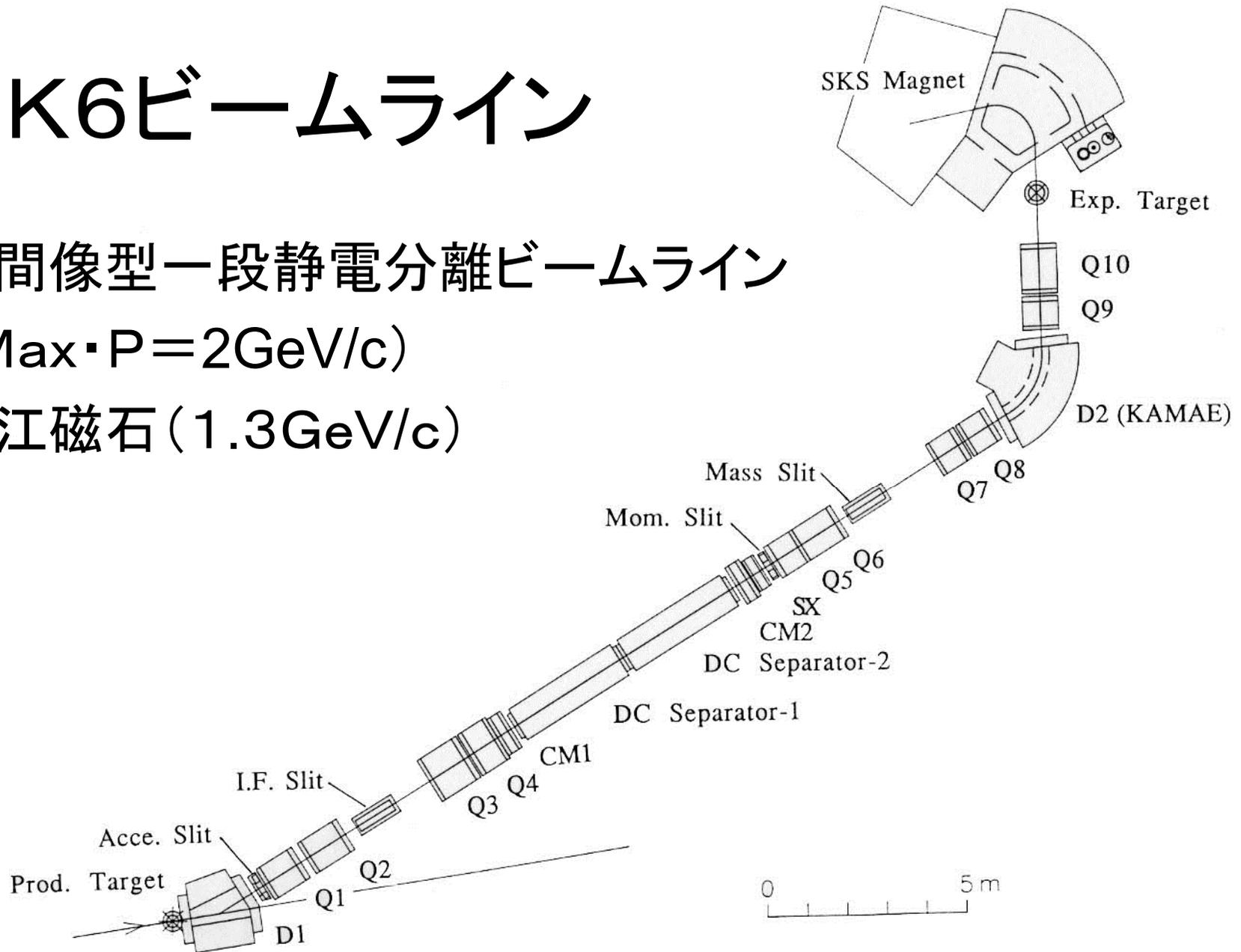
- 生成標的
- 分析電磁石
- 収束電磁石
- 静電分離器
- 質量スリット
- 真空システム
-

# K6ビームライン

中間像型一段静電分離ビームライン

(Max·P=2GeV/c)

釜江磁石(1.3GeV/c)



# K6のビーム形状

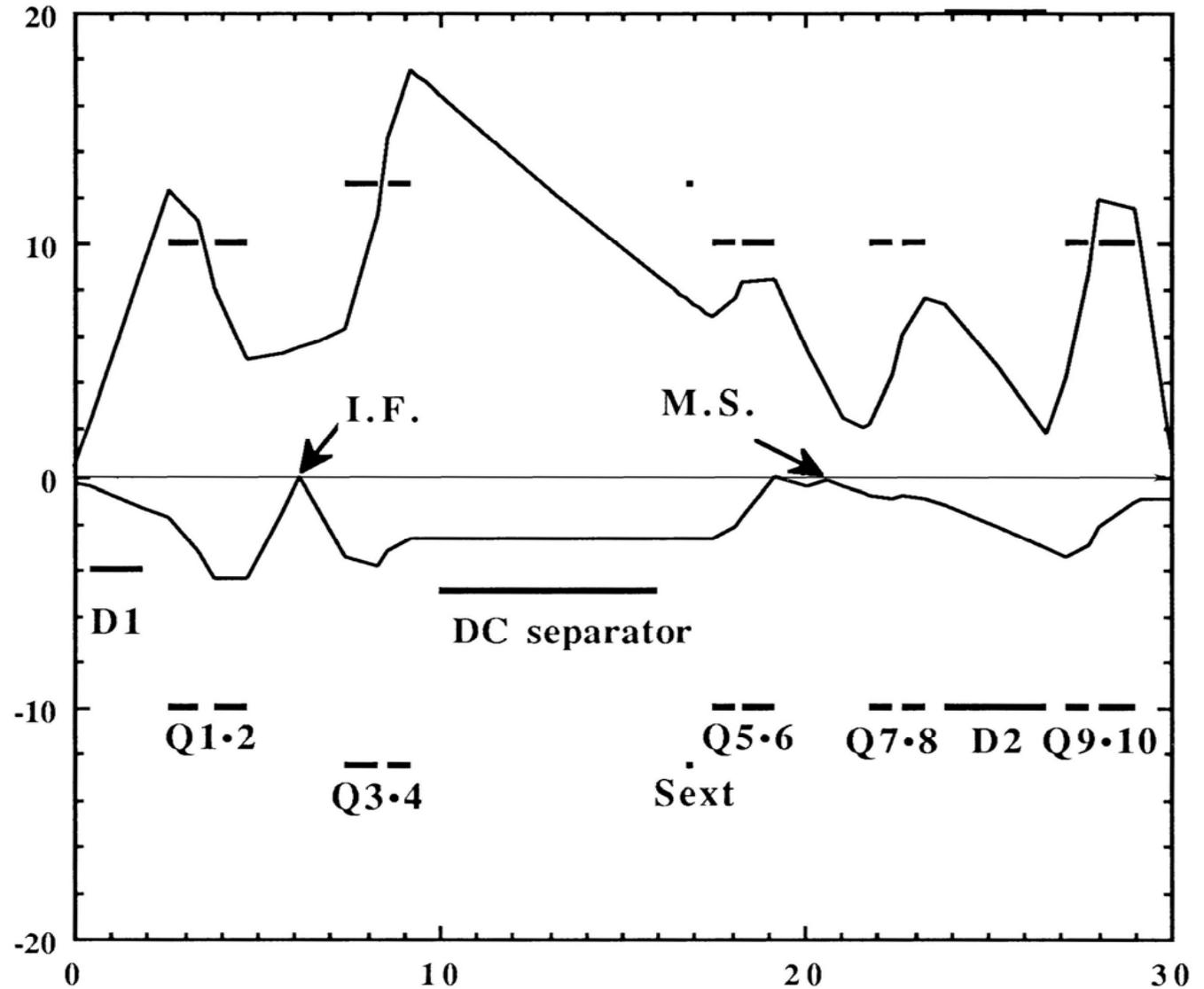
*K6:  $\pi$  mode*  
*(0.3, 50, 0.3, 7, 3%)*

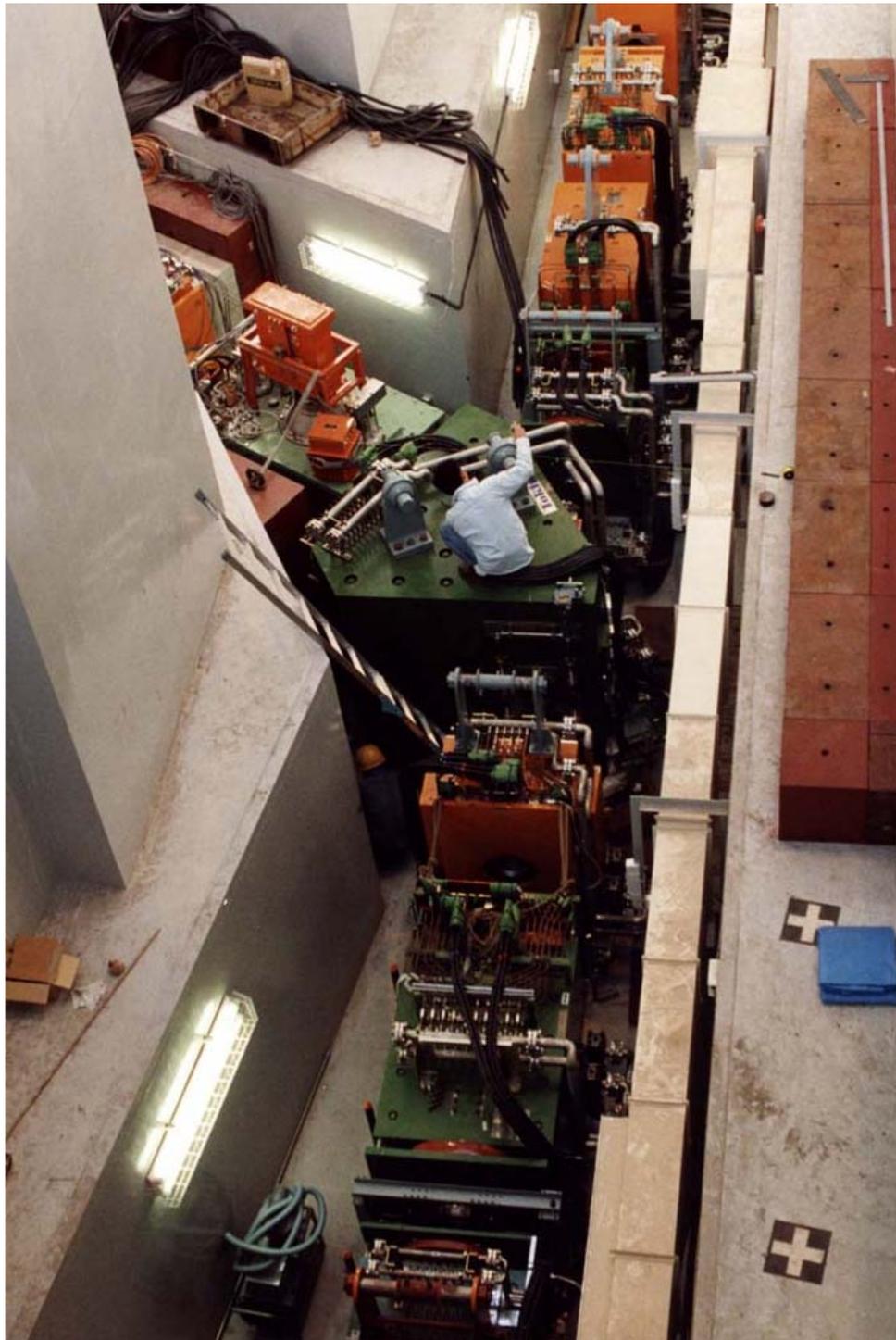
- TRANS-PORT
- TURTLE

Horizontal

(cm)

Vertical

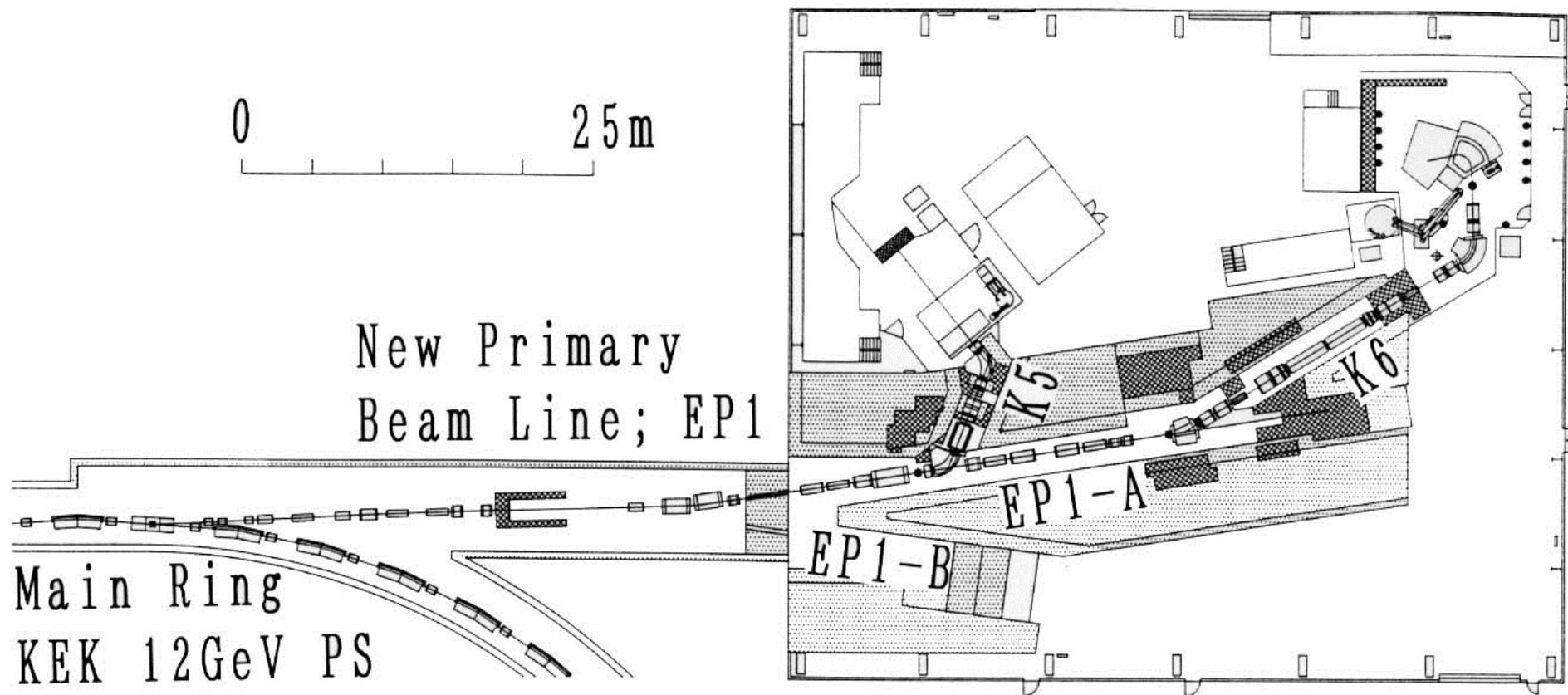




# 一次ビームライン

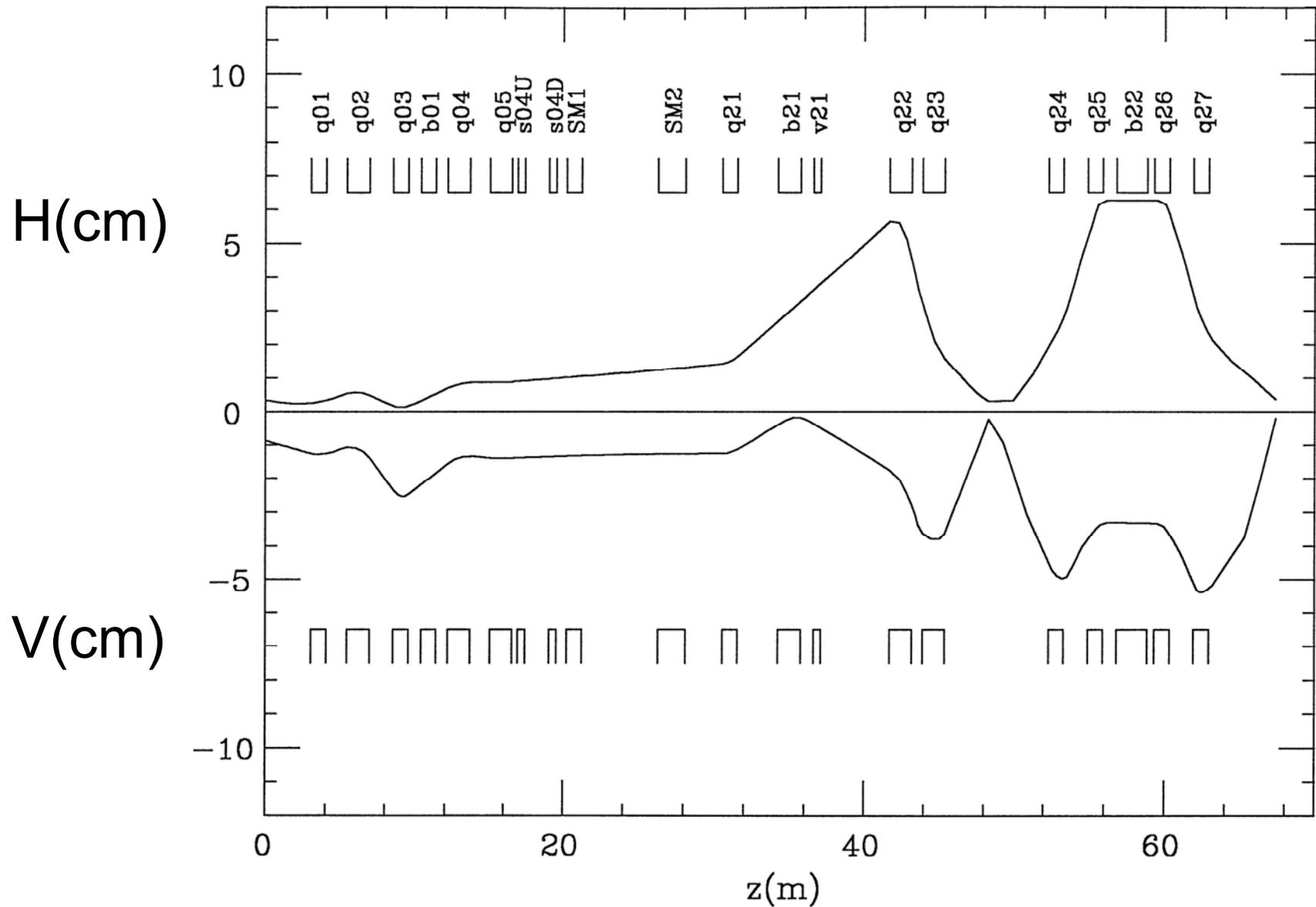
- 収束磁石
- 偏向磁石
- ビームモニター
- 別の生成標的
- 真空システム
- 
-

# 北カウンターホール之図

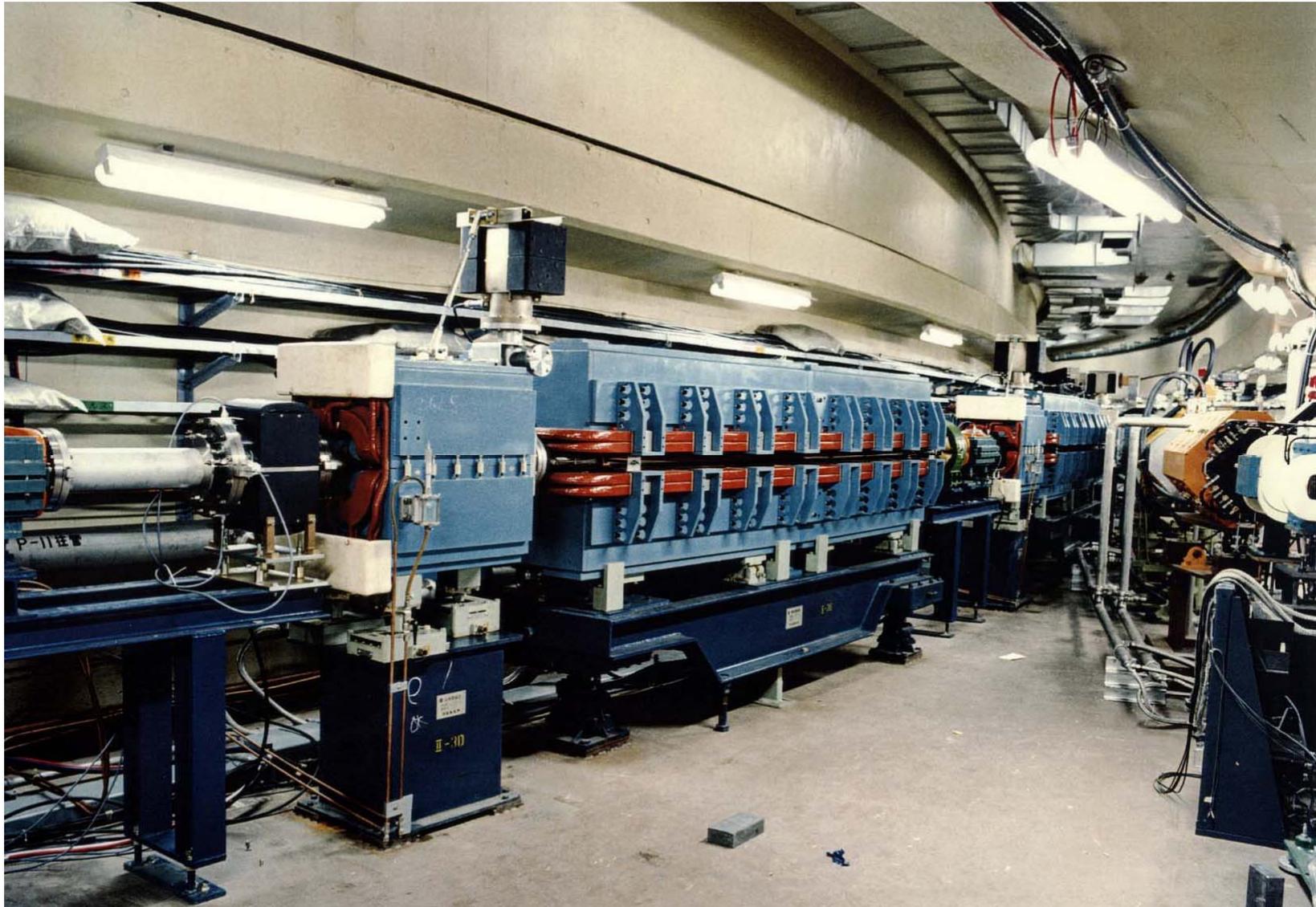


ニュートリノ・ビームラインの延伸以前

# EP1B Beam Transport

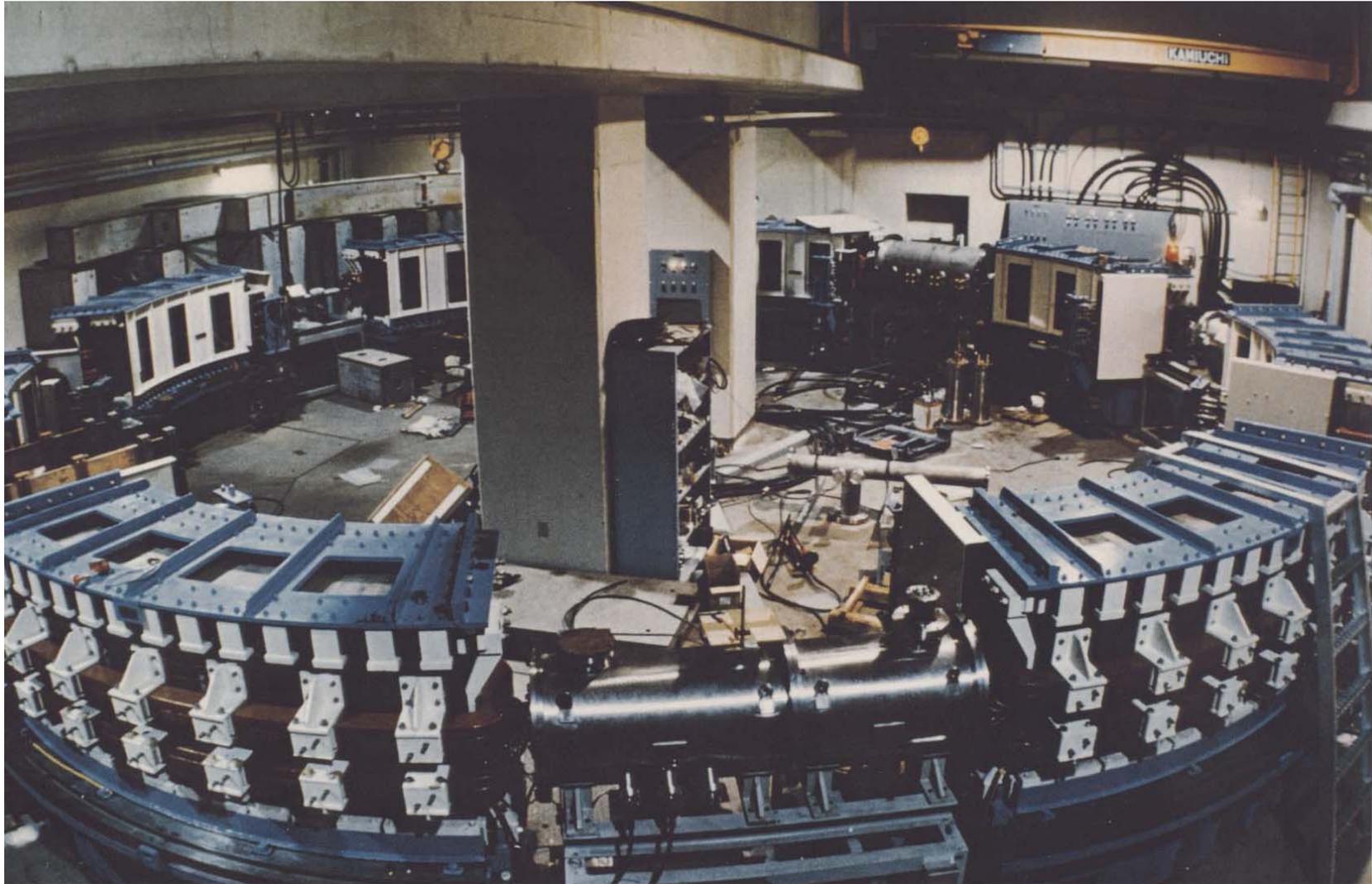


# 主加速器と取り出し部



12GeVまで加速

# ブースター加速器



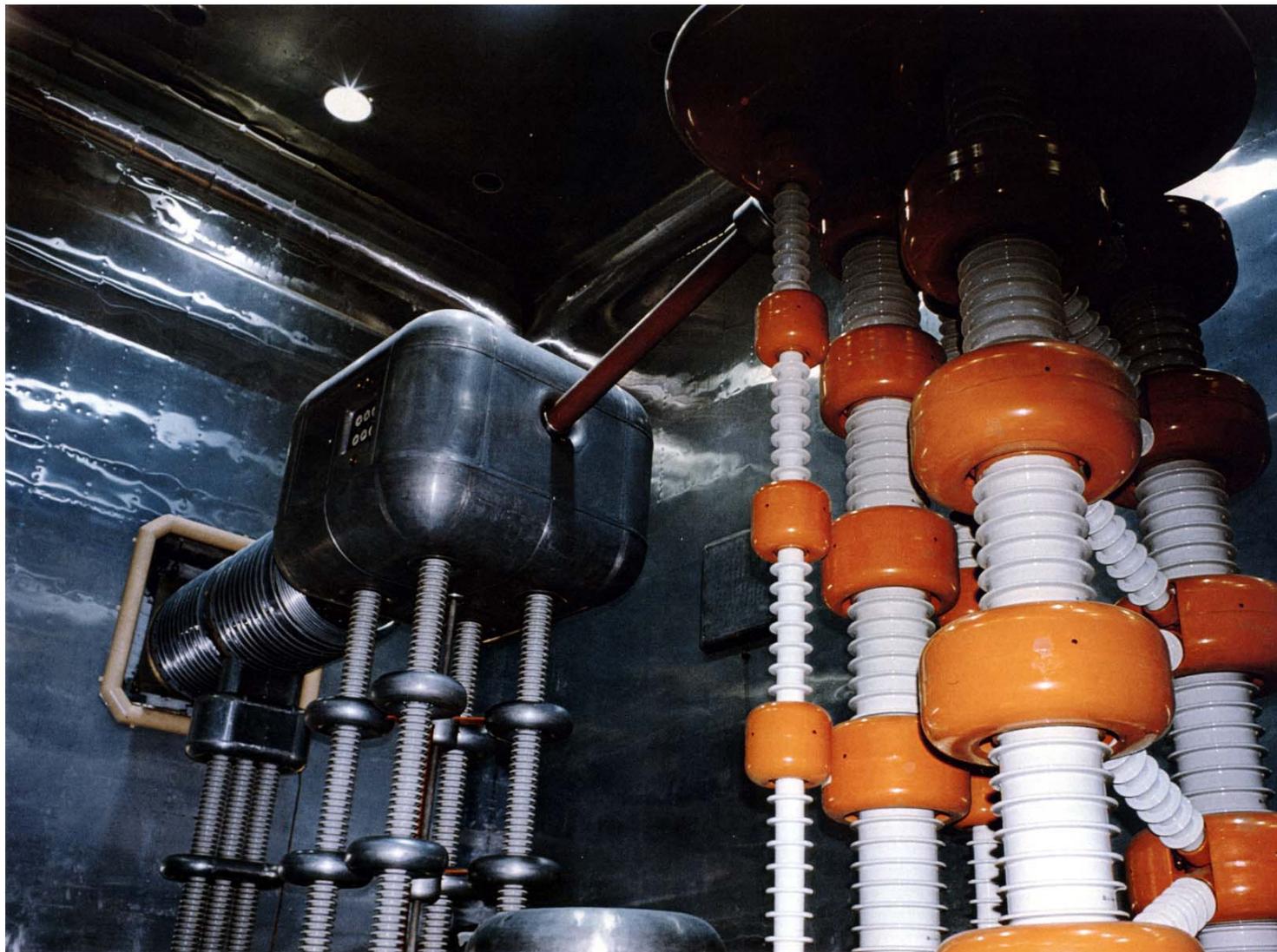
500MeVまで加速



# 線形加速器

40MeVまで加速

# コッククロフト・ウォルトンとイオン源



高電圧装置 + 高耐圧加速管 + 負水素源

# 前段加速器：コッククロフト・ウォルトン型

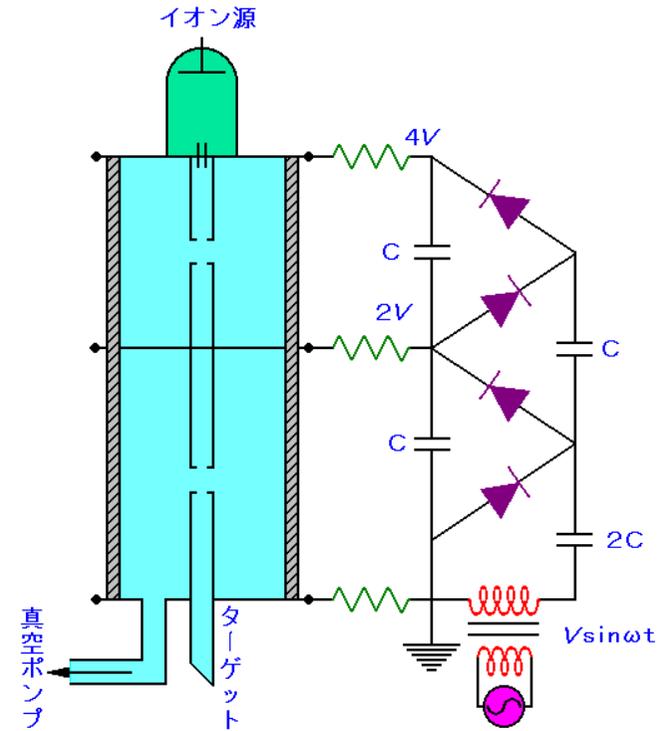
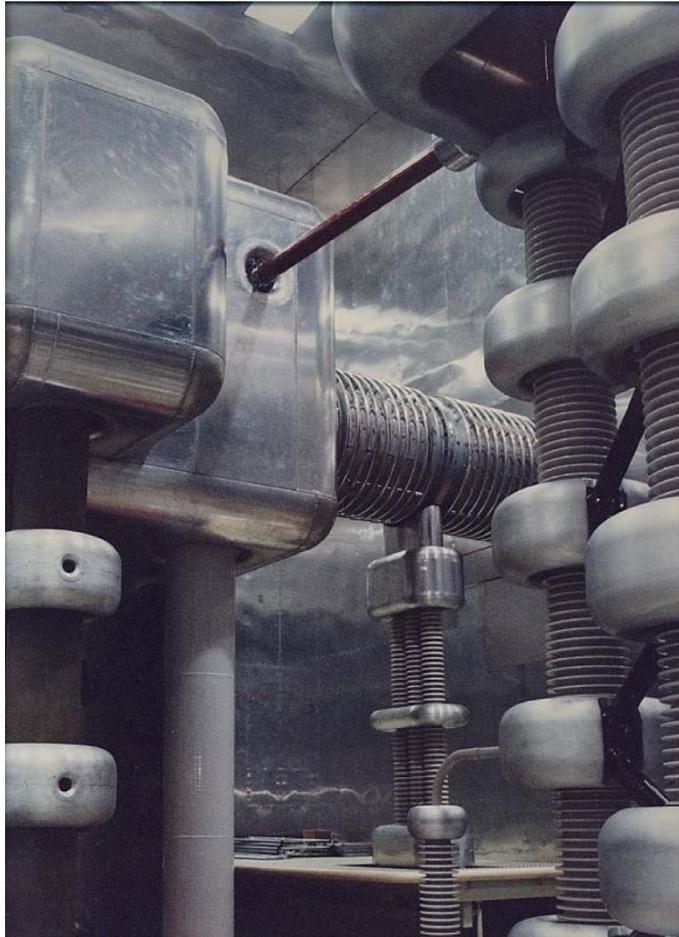
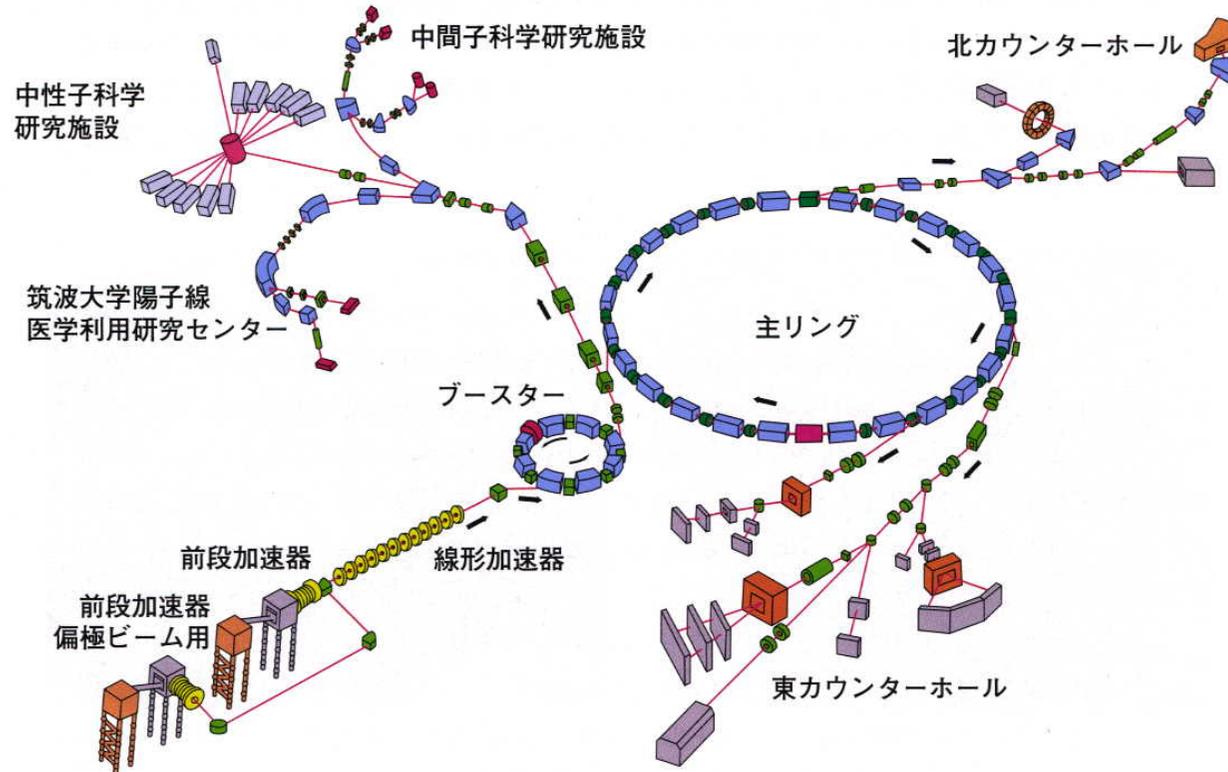


図1 コッククロフトーワルトン型加速器

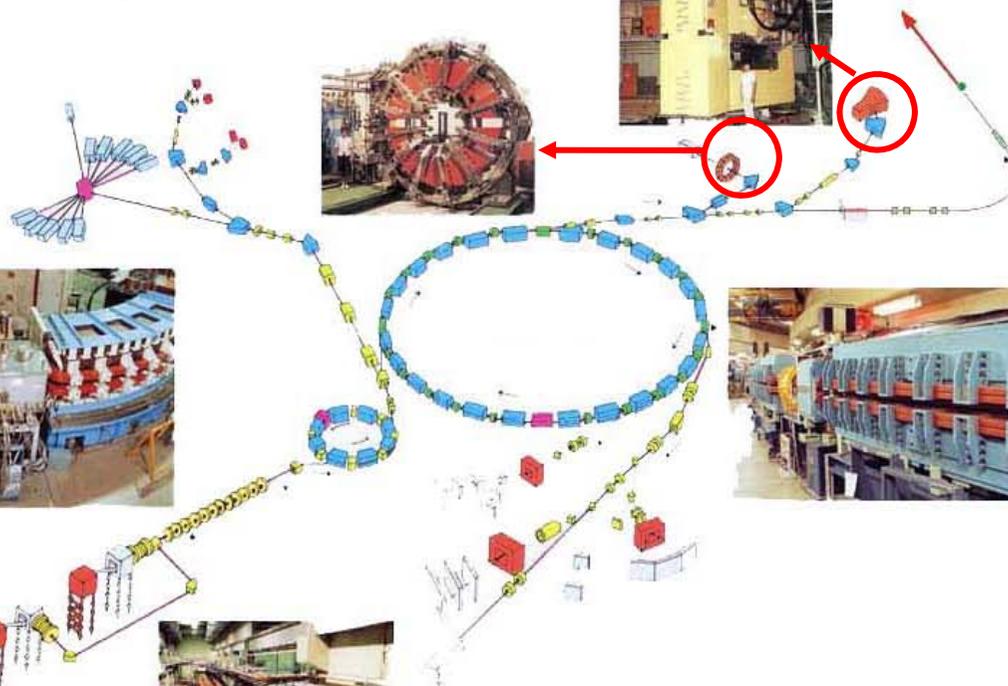
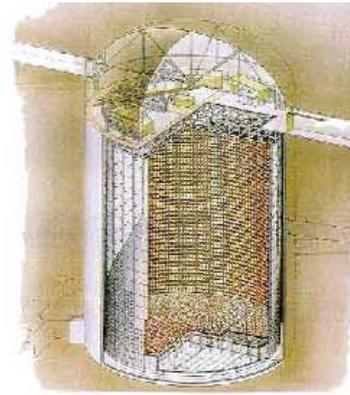
[出典] 石川 友清(編)：放射線概論、通商産業研究社(1991年4月)、p.59

# KEK 12GeV 陽子シンクロトロン

- 線型加速器、ブースター、主リングの加速器が段階的に配置されたシステム。主として「陽子」を加速する。



# KEK-12GeV PS Accelerator Complex

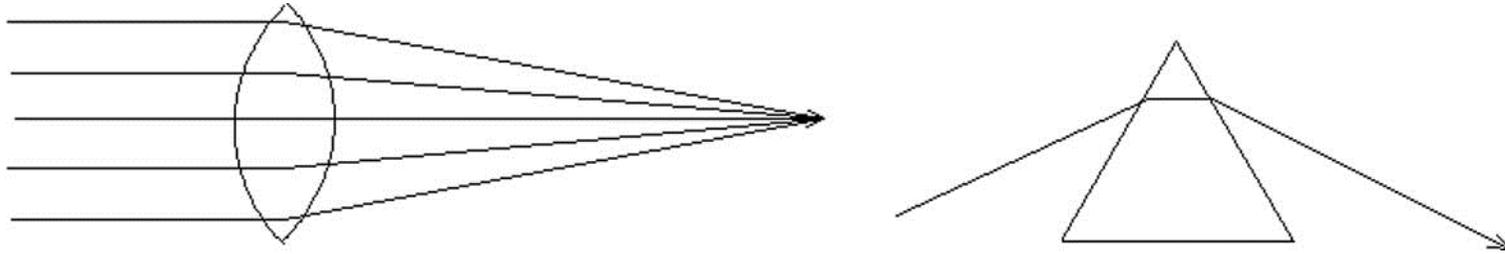


# 磁場による運動量分析

## 磁場による、荷電粒子の輸送、収束

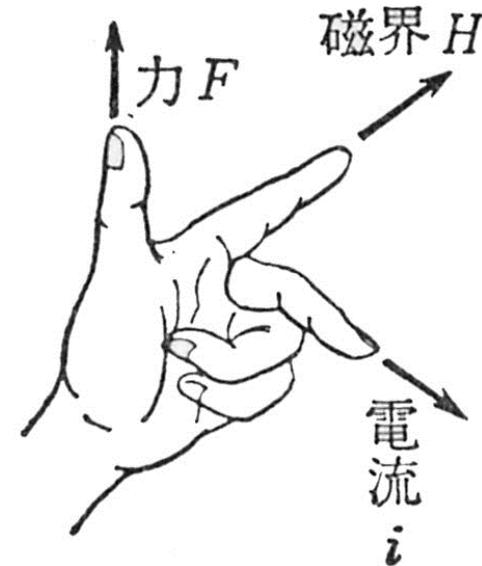
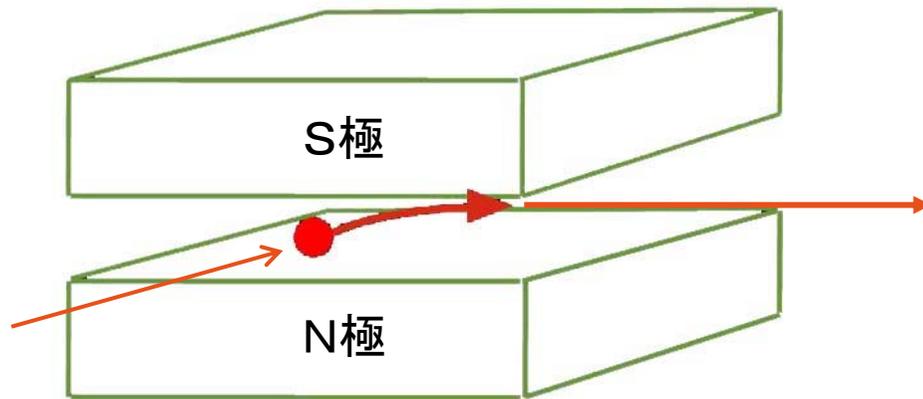
- ローレンツ方程式
- 電磁気学
- 
- ビーム光学

# ビーム光学という考え方



- 荷電粒子ビームの収集、輸送、利用
- 荷電粒子ビームの収束、偏向、
- 幾何光学との類似ー>ビーム光学  
    レンズ、プリズム、ファイバー？

# 荷電粒子の磁場中での運動



ローレンツ力による回転運動

その半径は:

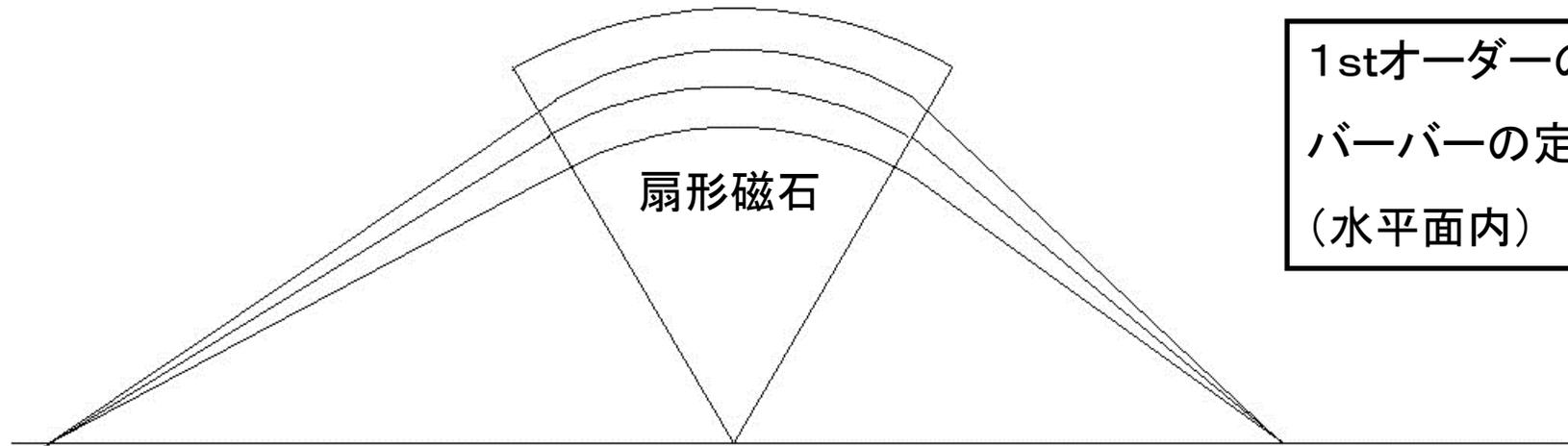
フレミングの左手の法則

運動量  $p$  を  $\text{GeV}/c$  で表すと  $p/0.3 \text{ Tesla}\cdot\text{m}$

$\text{MeV}/c$  で表すと  $p/0.3 \text{ kGauss}\cdot\text{cm}$

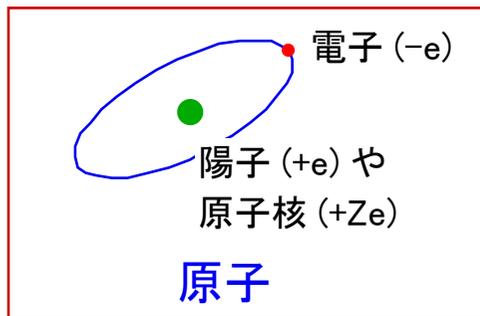
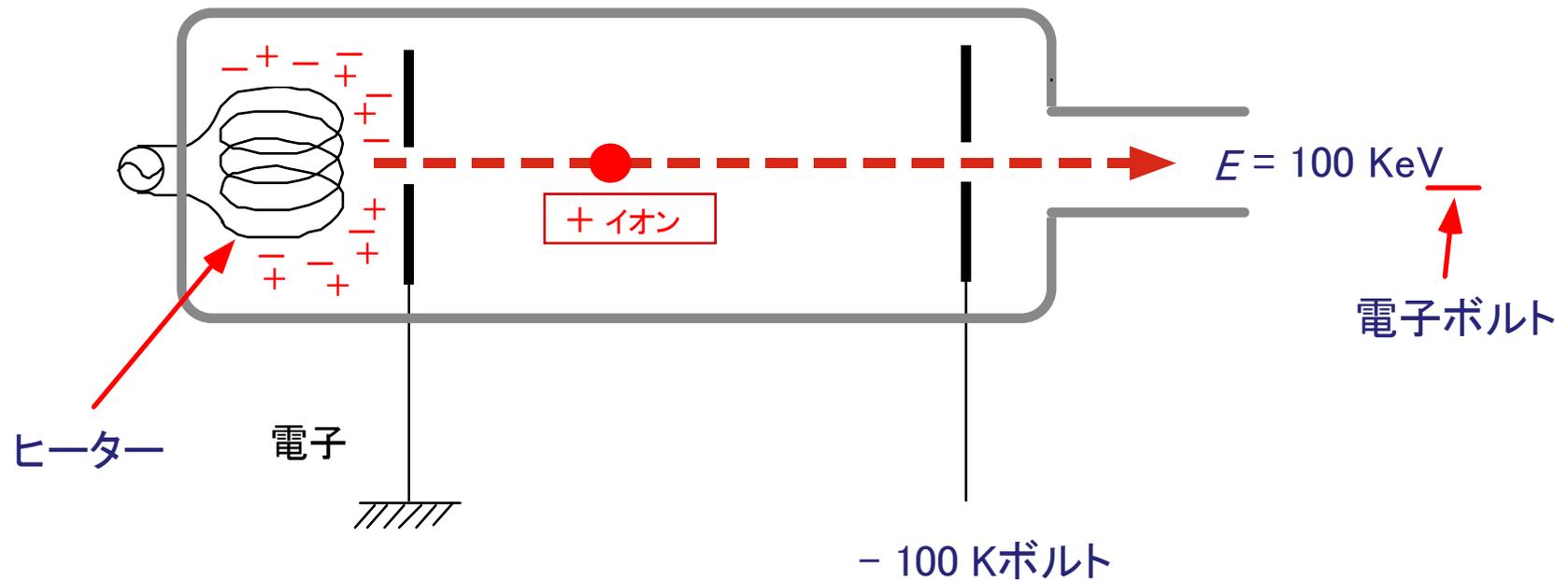
演習: これを導け

# 具体的な回転半径



- 1GeV/cのビーム、磁場は2T  
 $1 / 0.3 = 3.33\text{Tm}$ 、 $3.33 / 2 = 1.67\text{m}$
- 1000MeV/cのビーム、磁場は20kGauss  
 $1000 / 0.3 = 333\text{kGauss}\cdot\text{cm}$ 、 $333 / 20 = 167\text{cm}$

# 最も簡単な加速器

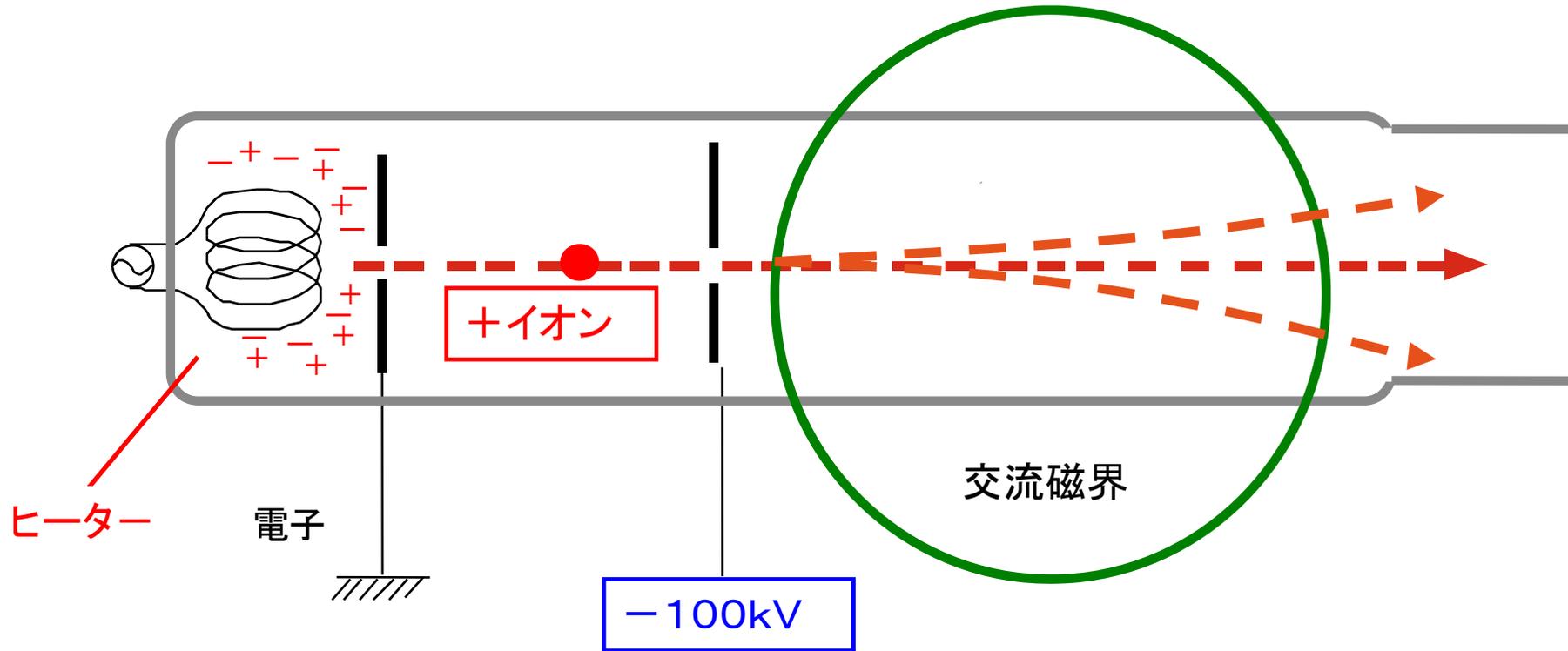


K キロ = 1,000  
M メガ = 1,000,000  
G ギガ = 1,000,000,000

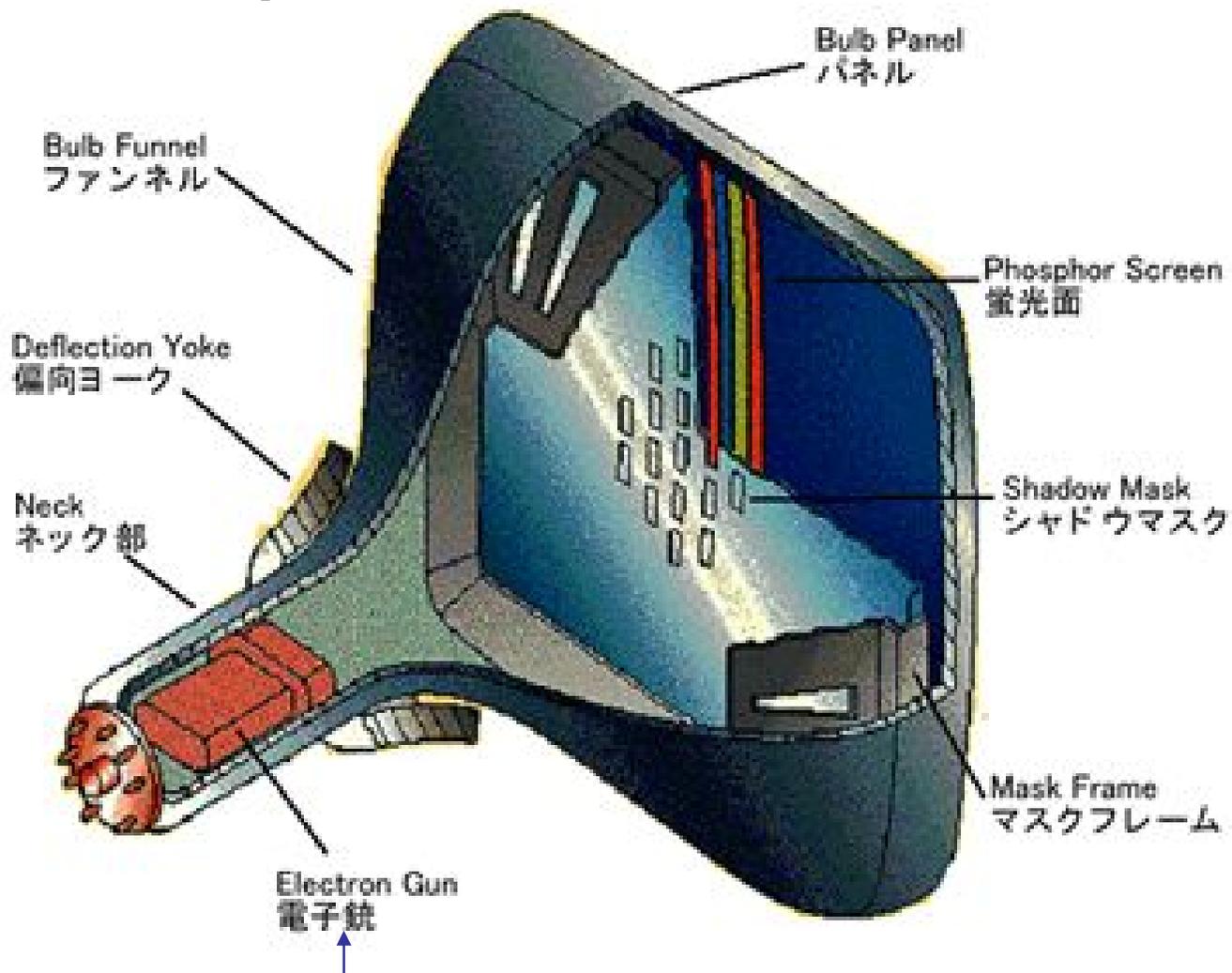
−ボルトでは陽子や原子核  
を加速

+ボルトでは電子を加速  
... 20世紀初頭の  
電子の発見

# 最も簡単な分析器



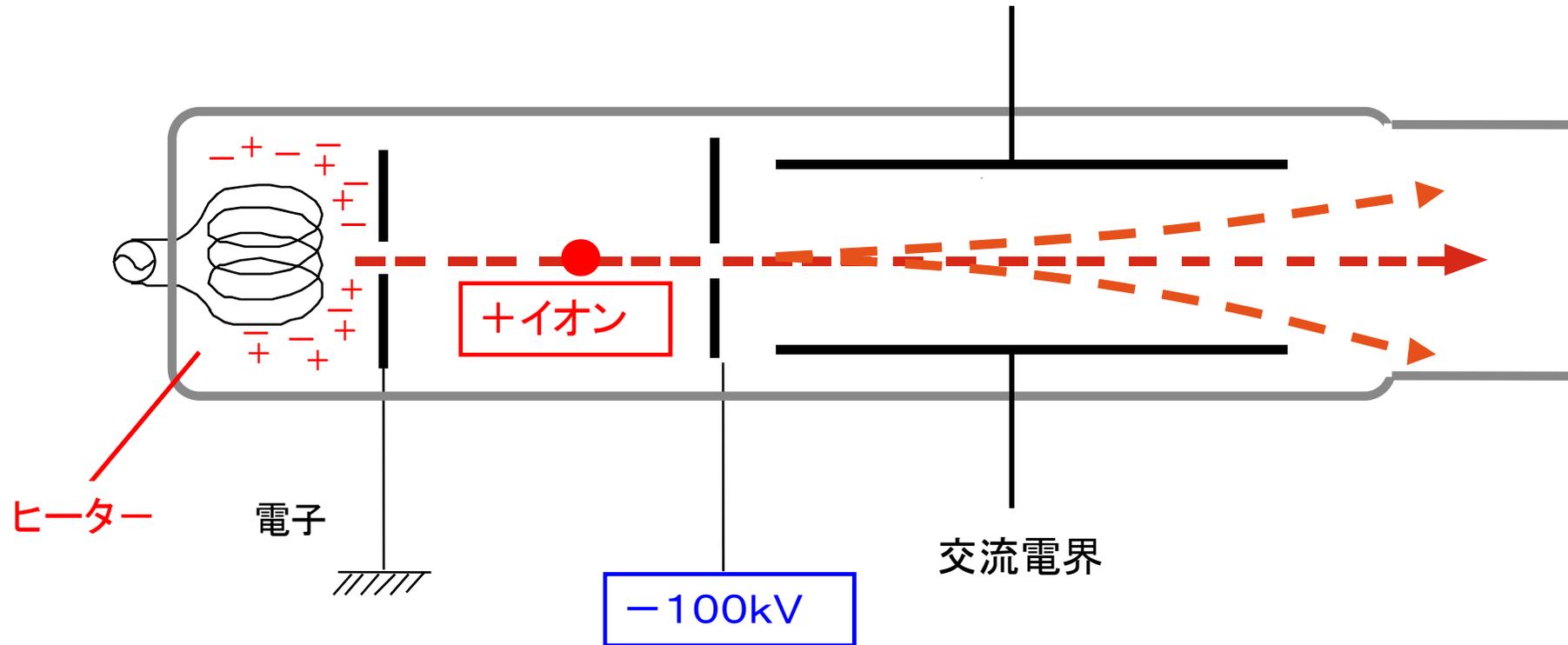
# 身近な加速器兼分析器 (ブラウン管)



電子加速器

東芝ホームページより転載

# 最も簡単な分析器・その2



アナログオシロスコープの原理はこれ。

しかし高エネルギーでは電場偏向はあんまり有効ではない。

とはいえー>DCセパレータ！

# 非相対論での計算

$$T = m_0 v^2 / 2 \quad p = m_0 v \quad \rightarrow \quad p = \sqrt{2m_0 T}$$

$$60 \text{ MeV の陽子は } \sqrt{2 \cdot 931 \cdot 60} = 334 \text{ MeV}/c$$

$$0.1 \text{ MeV の電子は } \sqrt{2 \cdot 0.511 \cdot 0.1} = 0.32 \text{ MeV}/c$$

# 相対論の計算

$$T = E - m_0 c^2 \quad E^2 = (pc)^2 + (m_0 c^2)^2$$

$$T^2 + 2 T m_0 c^2 = (pc)^2$$

$$pc = \sqrt{(T^2 + 2 T m_0 c^2)}$$

$$60 \text{ MeV 陽子は } \sqrt{(60 \cdot 60 + 2 \cdot 60 \cdot 931)} = 340 \text{ MeV/c}$$

5 GeV の陽子は

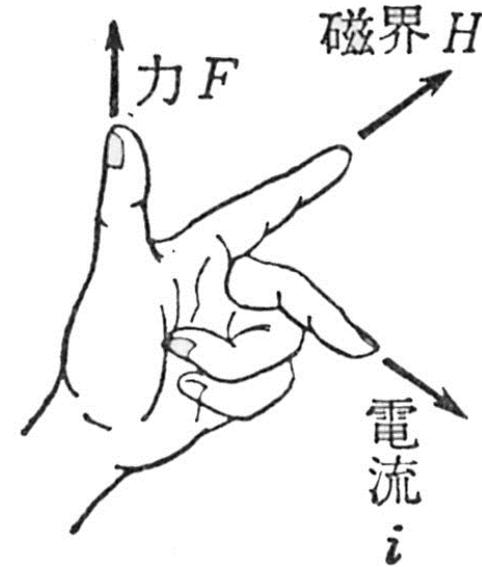
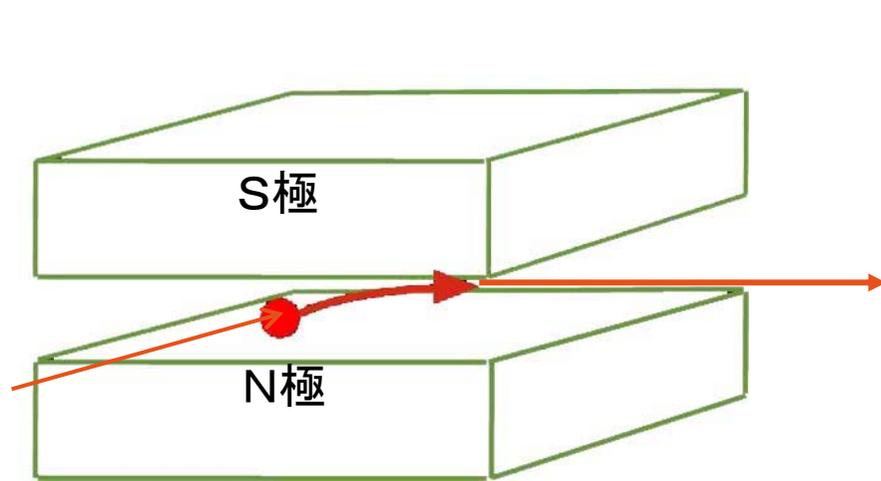
$$\sqrt{(5 \cdot 5 + 2 \cdot 5 \cdot 0.931)} = 5.8 \text{ GeV/c}$$

$$pc = \sqrt{(T^2 + 2 T m_0 c^2)} \rightarrow T + m_0 c^2$$

$$12 \text{ GeV の陽子 } \rightarrow 13 \text{ GeV/c}$$

$$100 \text{ GeV/u の重陽子 } \rightarrow 202 \text{ GeV/c}$$

# 荷電粒子の磁場中での運動



ローレンツ力による回転運動

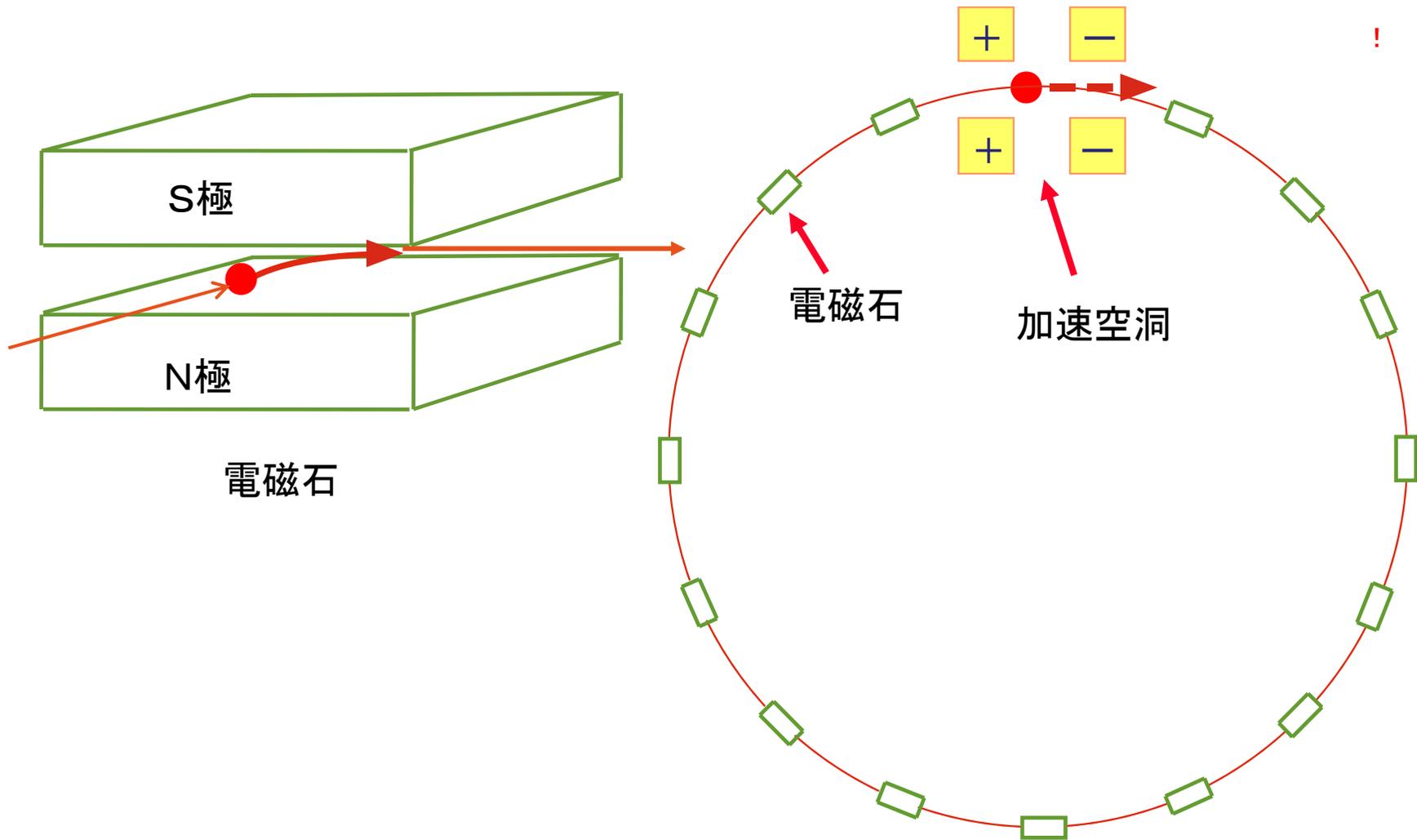
その半径は:

運動量  $p$  を  $\text{GeV}/c$  で表すと  $p/0.3 \text{ Tesla}\cdot\text{m}$

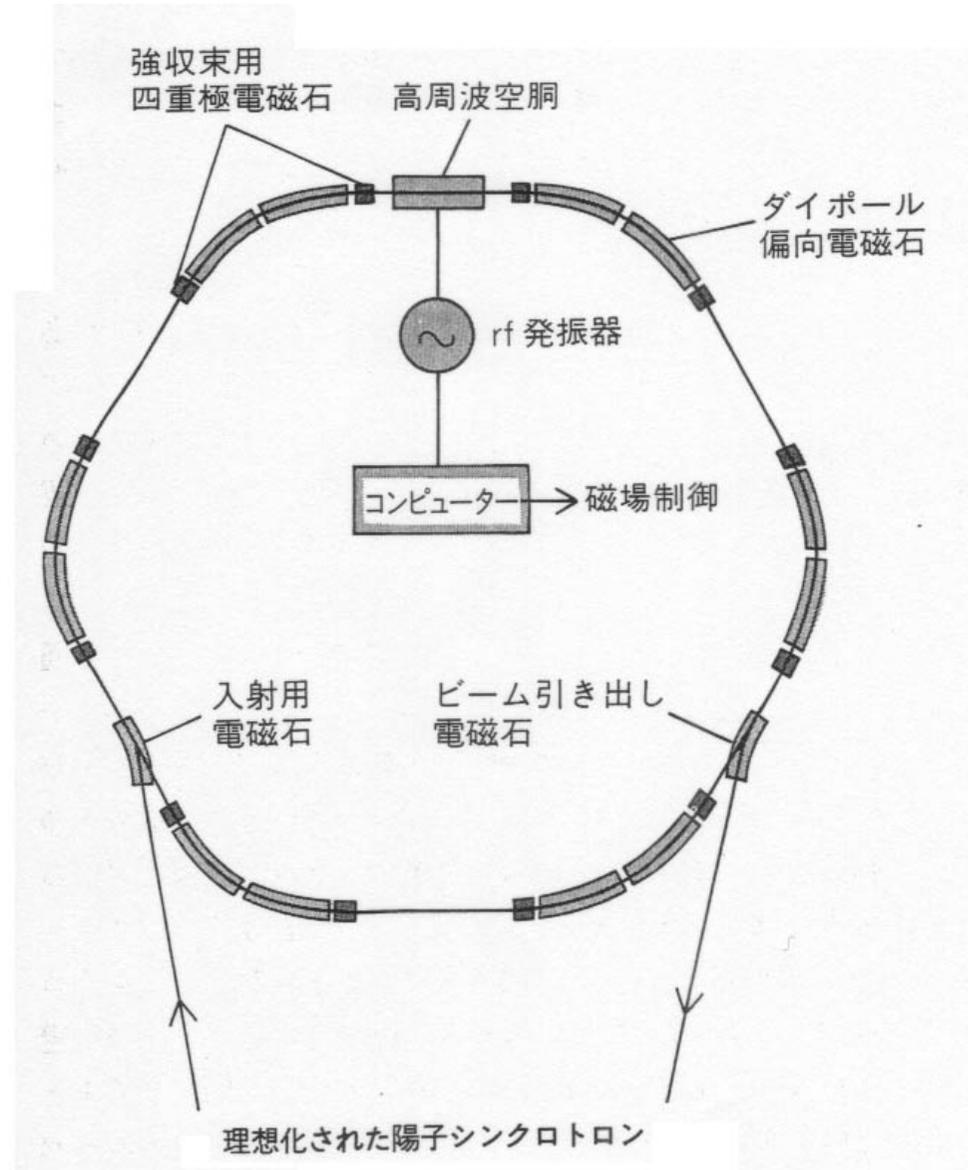
$\text{MeV}/c$  で表すと  $p/0.3 \text{ kGauss}\cdot\text{cm}$

フレミングの左手の法則

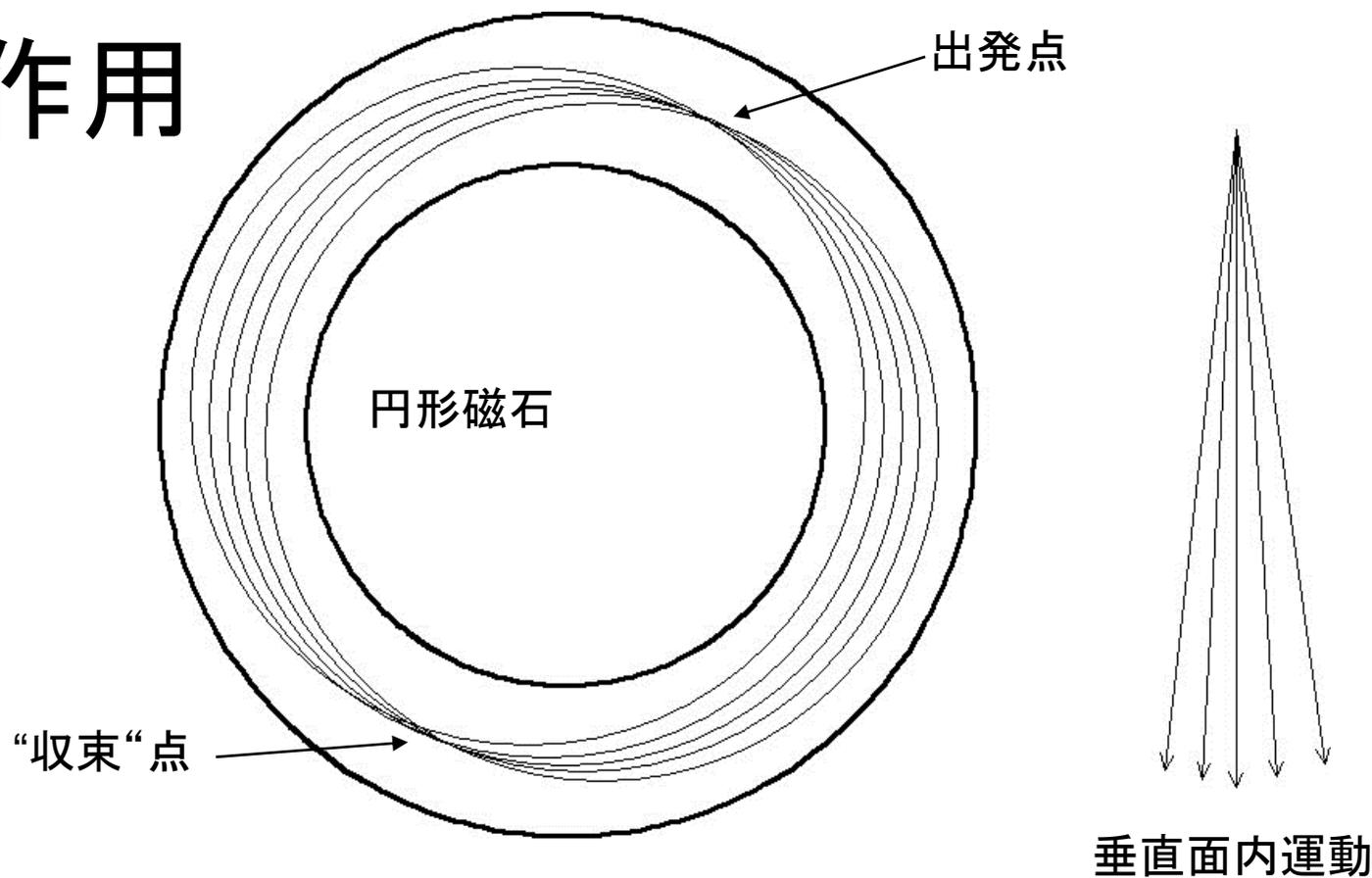
# ビームラインとシンクロトロン



# 実際のシンクロトロン

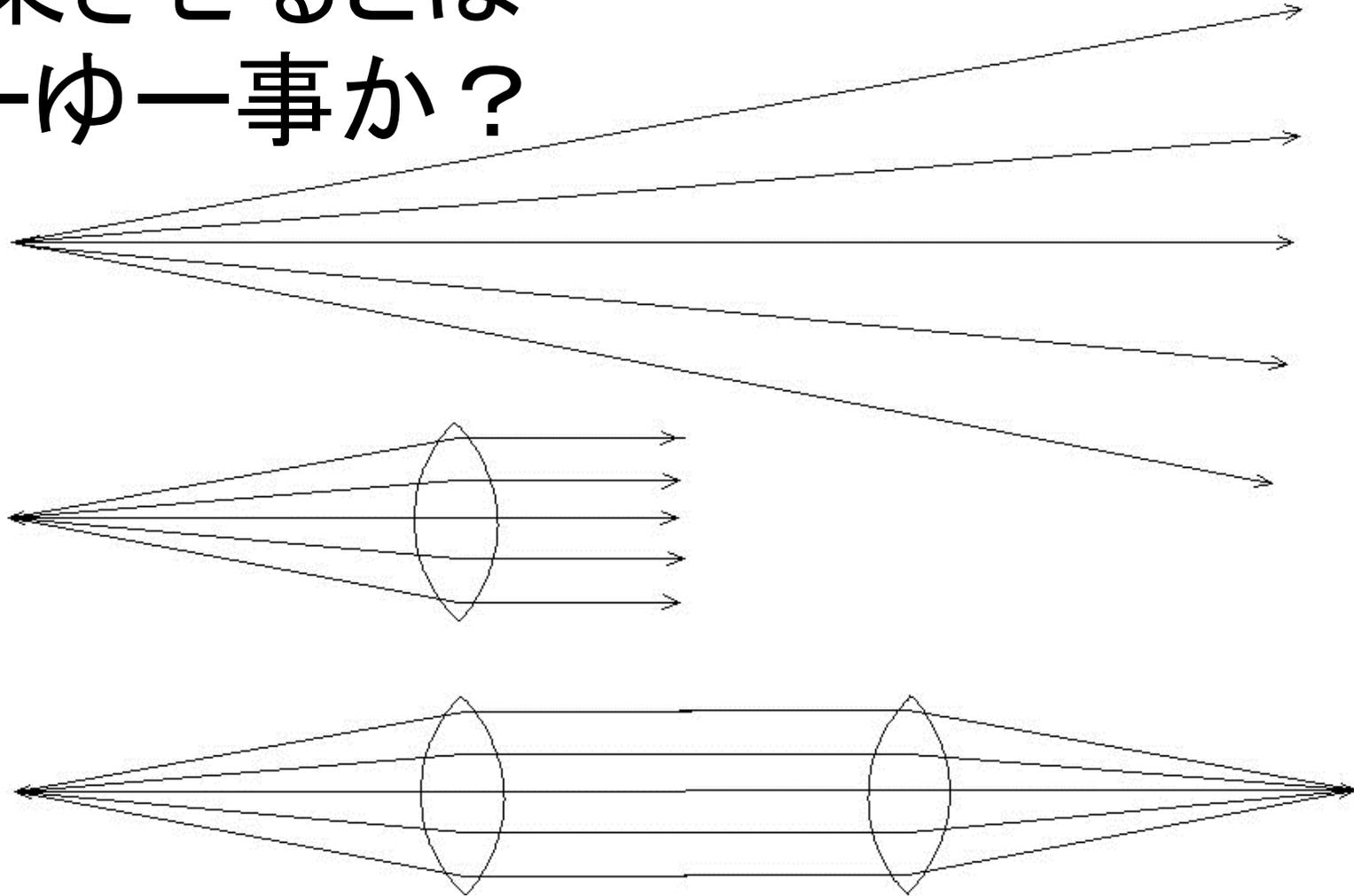


# 収束作用



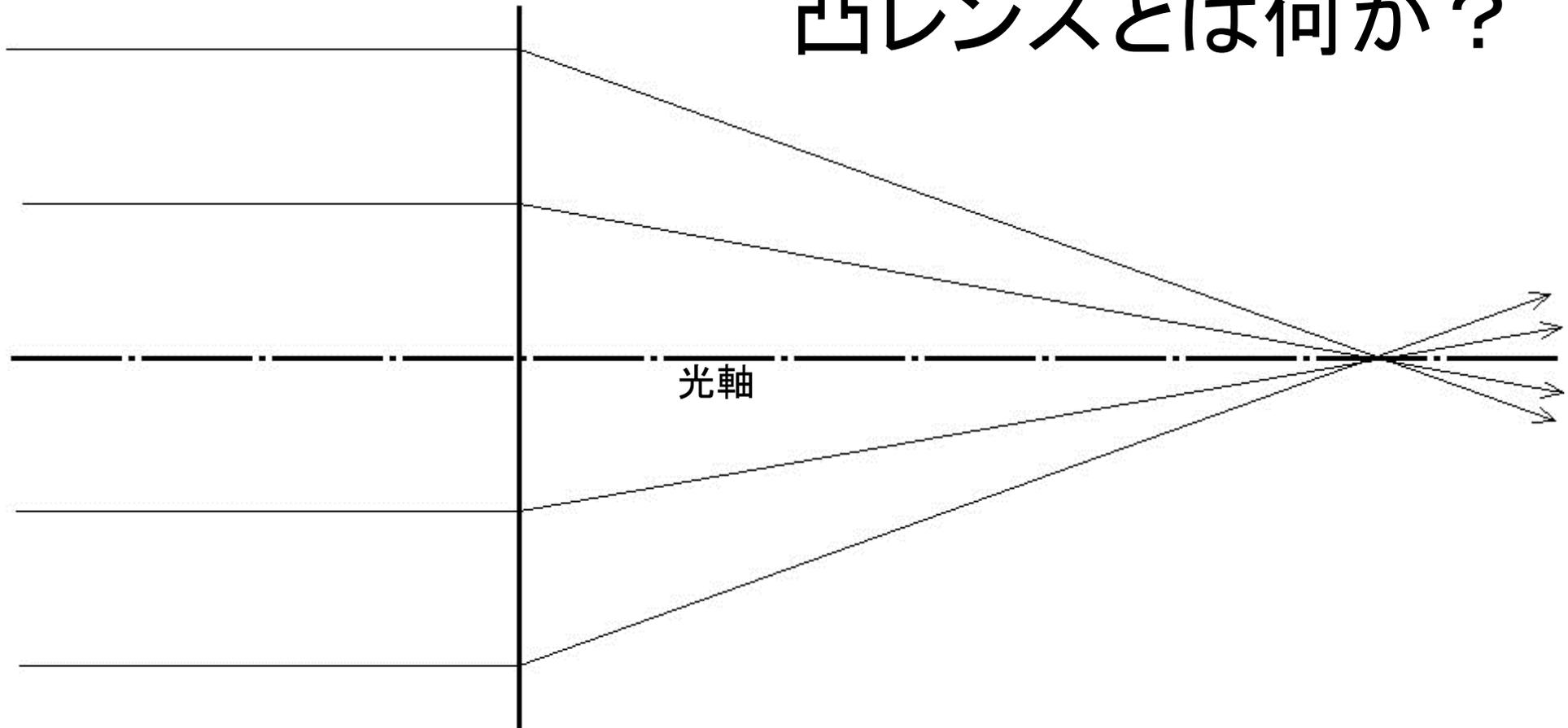
- 水平面内では簡単に収束するが……、
- 垂直面内では飛び散る！

収束させるとは  
どーゆー事か？



よーするに、凸レンズみたいな作用をする磁石が必要

# 凸レンズとは何か？

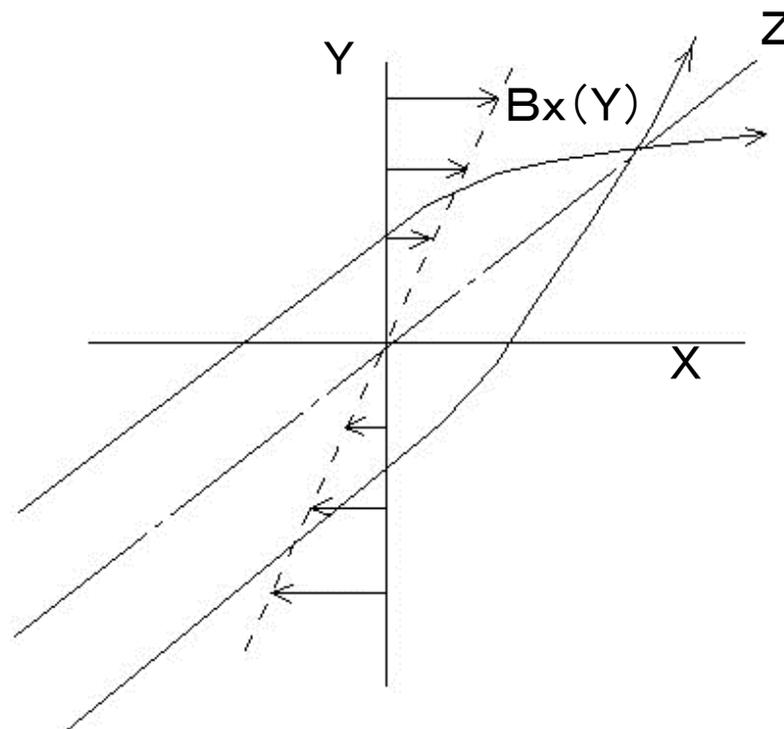
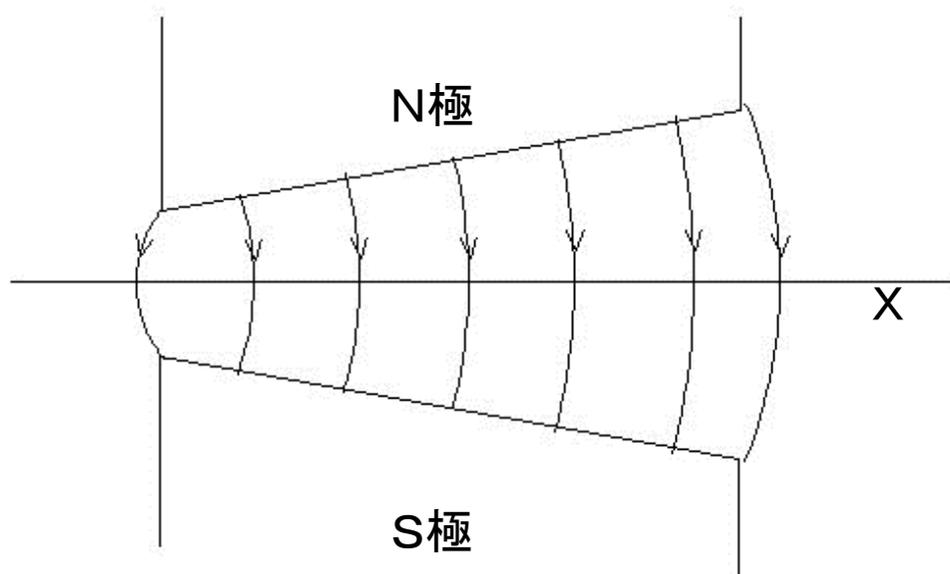


偏向能が光軸からの距離に比例して増大

$B_y(X) \propto X$  (水平面内)、  $B_x(Y) \propto Y$  (垂直面内)、

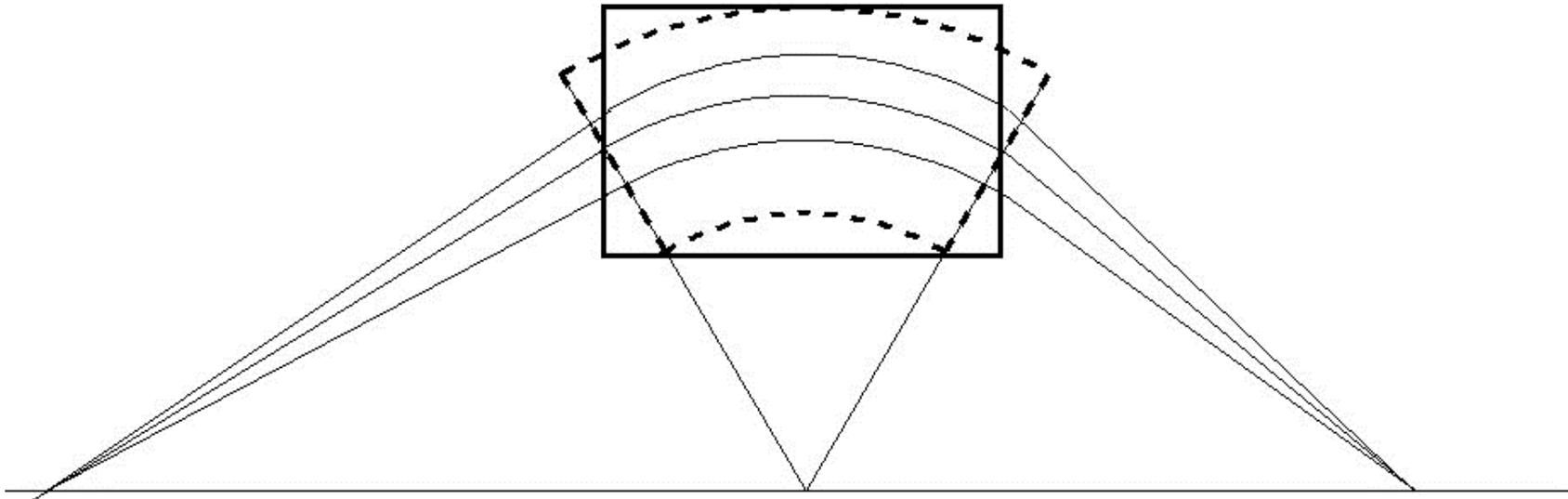
あるいは単に  $B_{r\perp}(r) \propto r$

# 弱収束

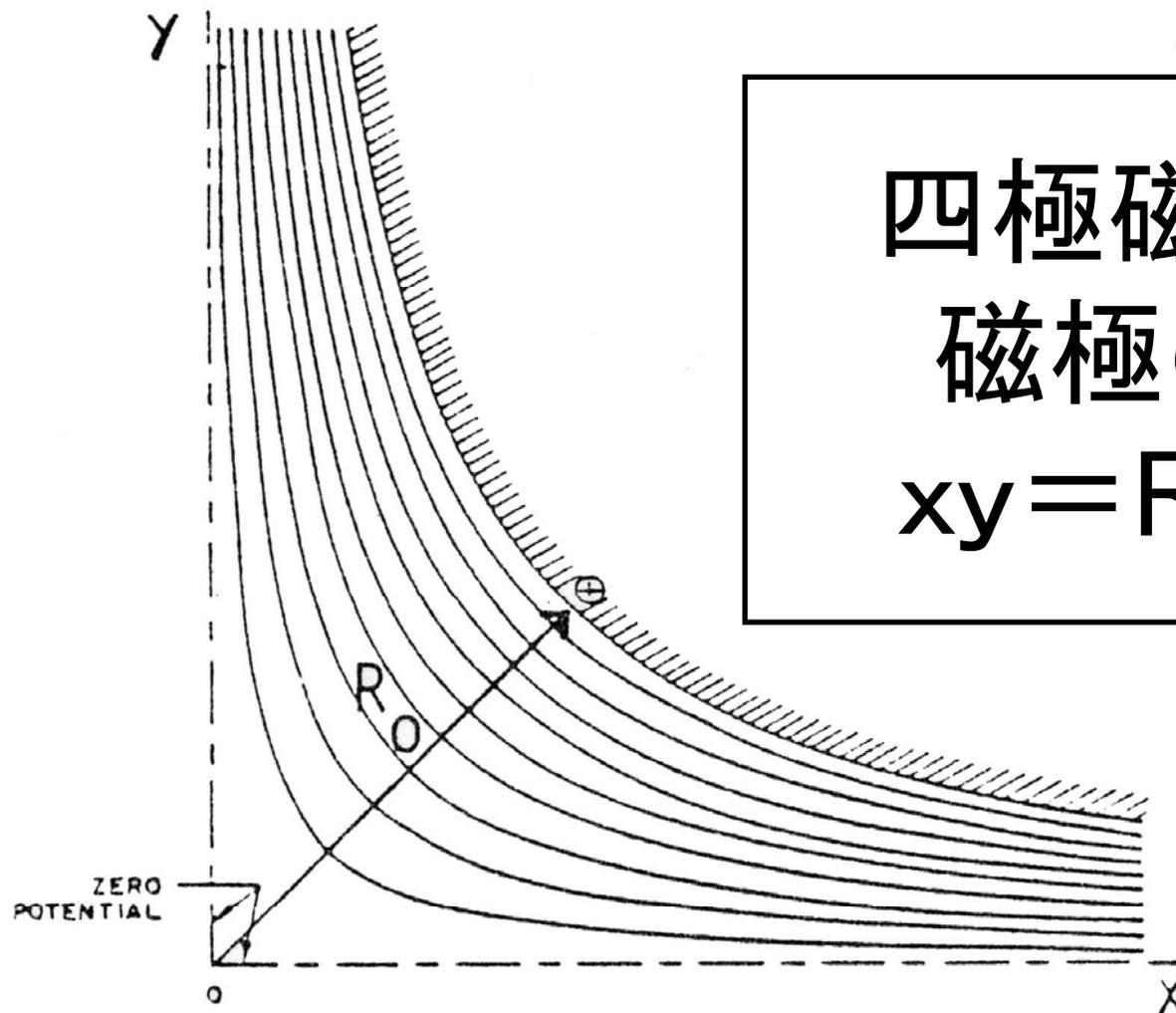


微妙に磁場をゆがませて  $B_x(Y) \propto Y$  な成分を作ると  
縦方向の収束作用が発生する。

# 斜め入射による縦収束



扇形磁石を箱形磁石に置き換えるような操作でも  
(光軸と磁極端が直交しない)、 $B_x(Y) \propto Y$ な成分  
を作ることが出来る。→作図して確かめよう！

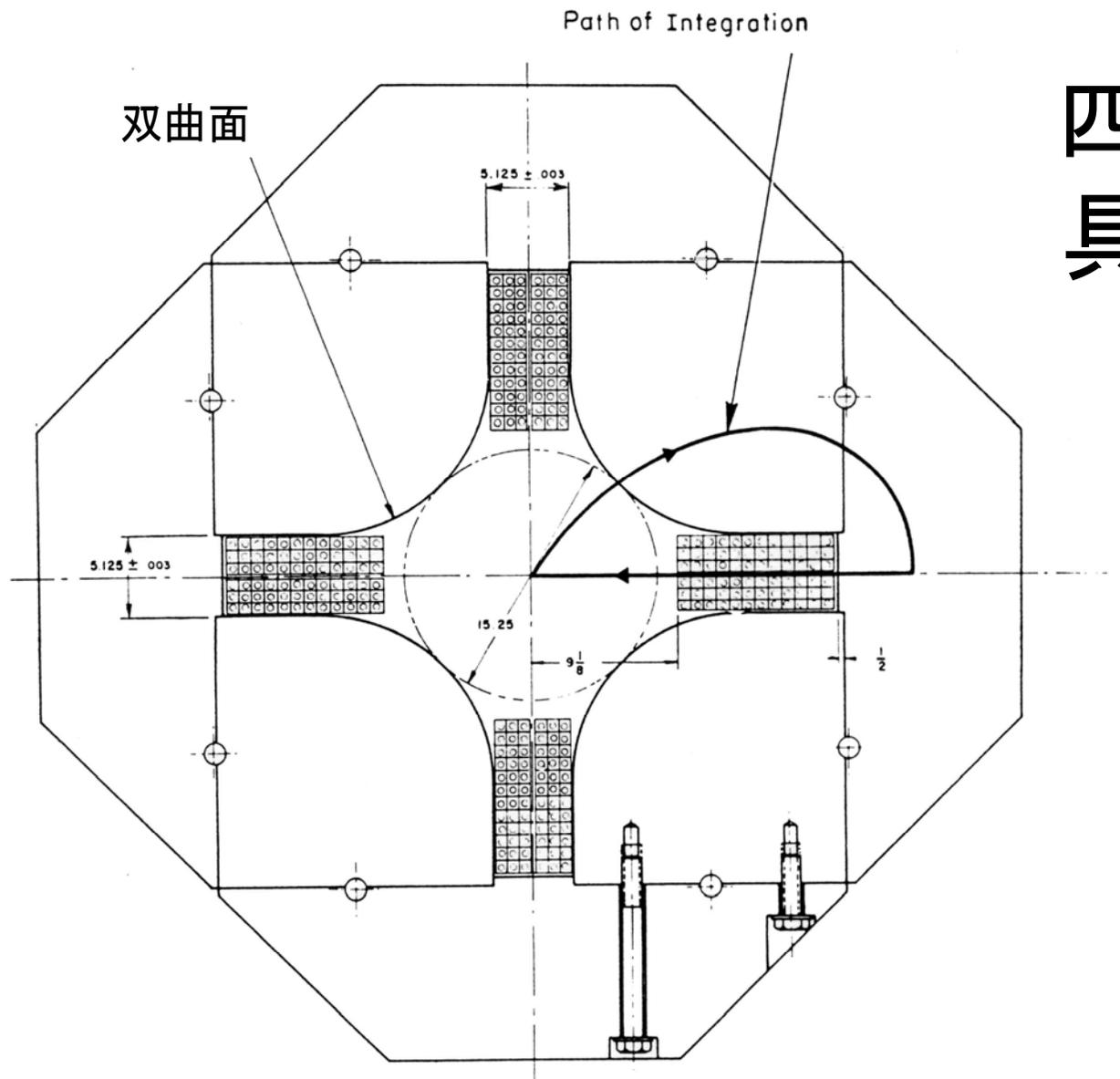


四極磁石の  
磁極の形  
 $xy = R_0^2/2$

等磁場ポテンシャル  $\phi(x, y) = kxy \Rightarrow$  双曲面磁極

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = B_x = ky$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = B_y = kx$$



# 四極磁石の 具体的な形

$$B_x = K_y$$

$$B_y = K_x$$

故に

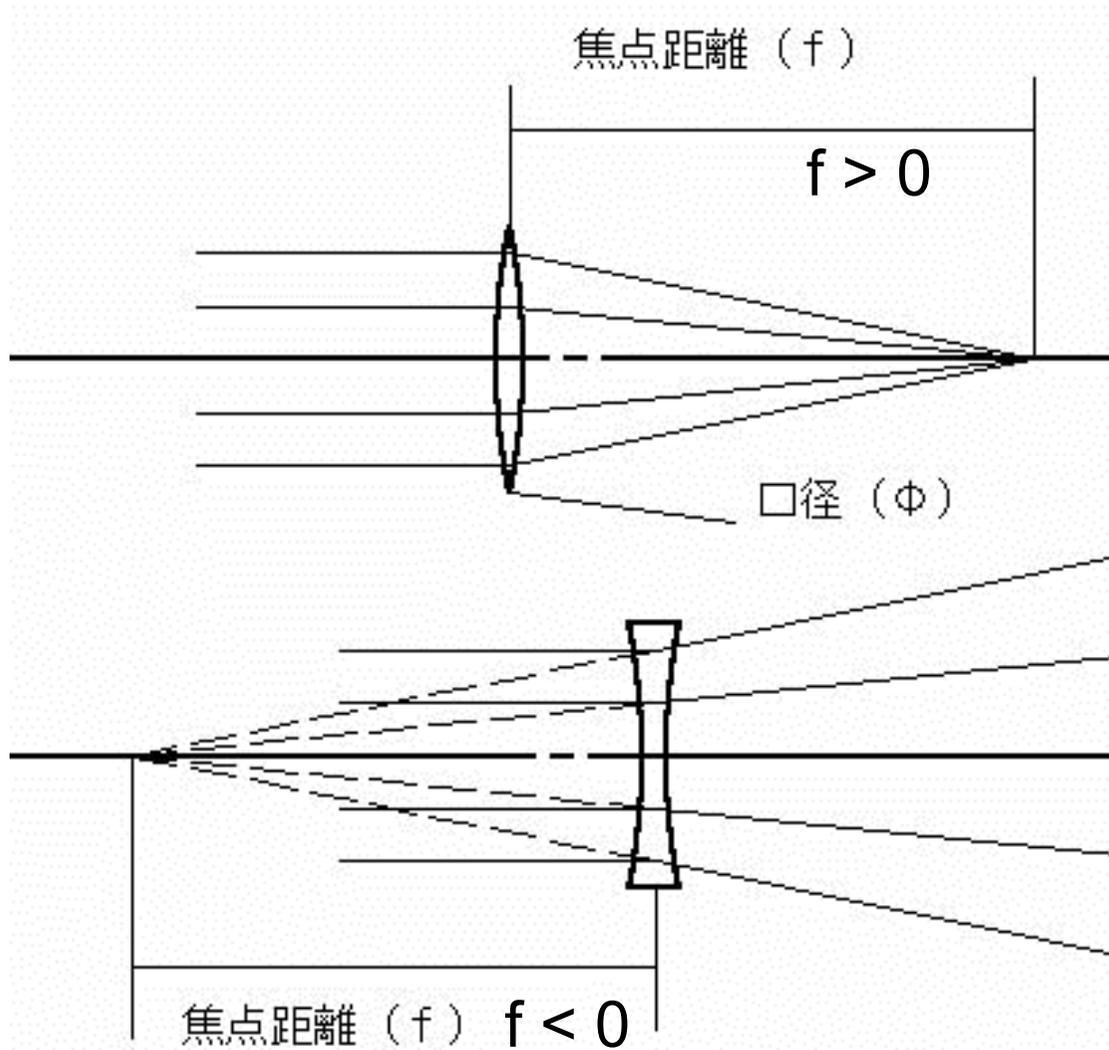
$$B_r = K_r$$

# 四極磁石の使い方

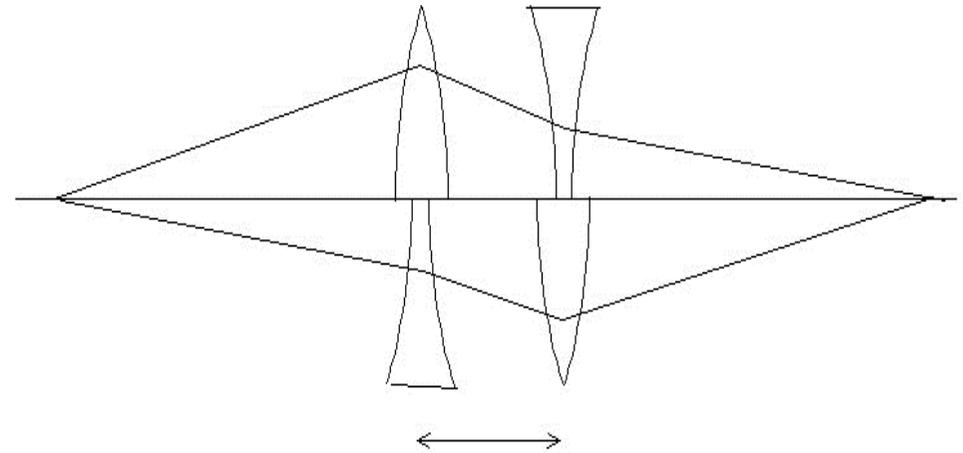
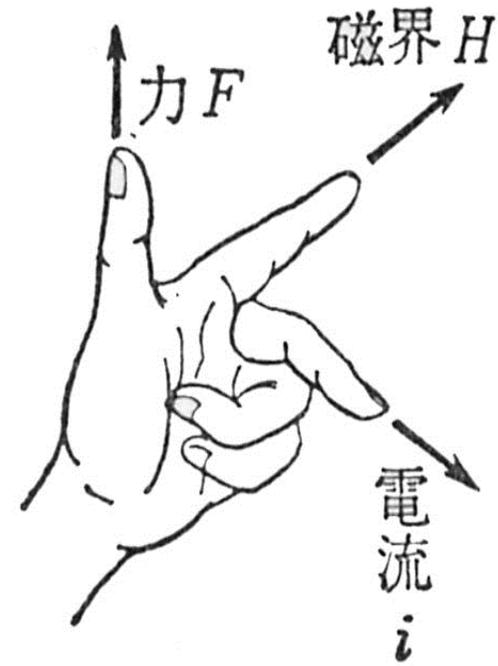
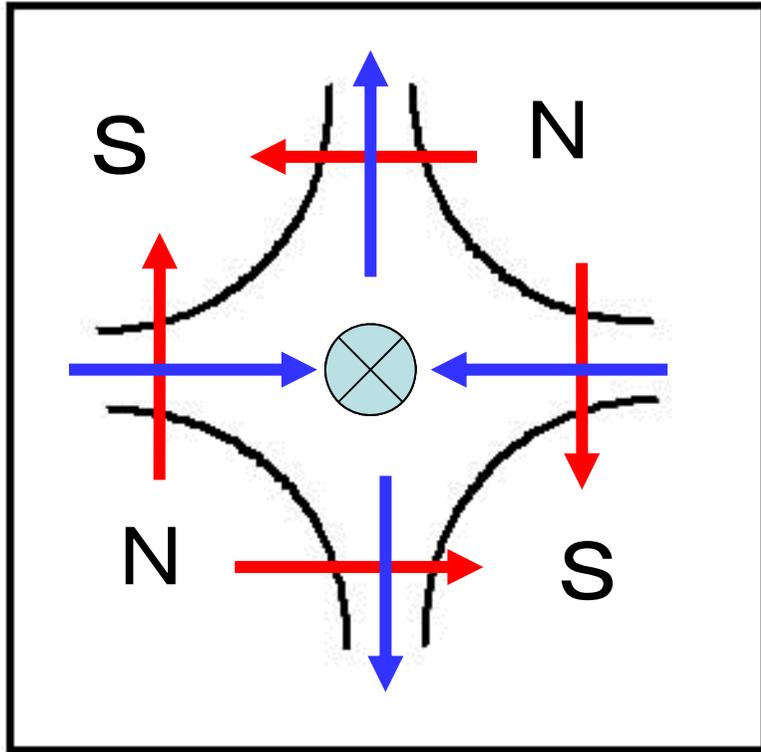
問題点：

X方向に収束  
(凸レンズ)なら

Y方向には発散  
(凹レンズ)。



# Q磁石の収束と発散



# 四極磁石の使い方II

- 同じ焦点距離の凸レンズと凹レンズの組み合わせ⇒必ず凸レンズ
- 幾何光学の定理

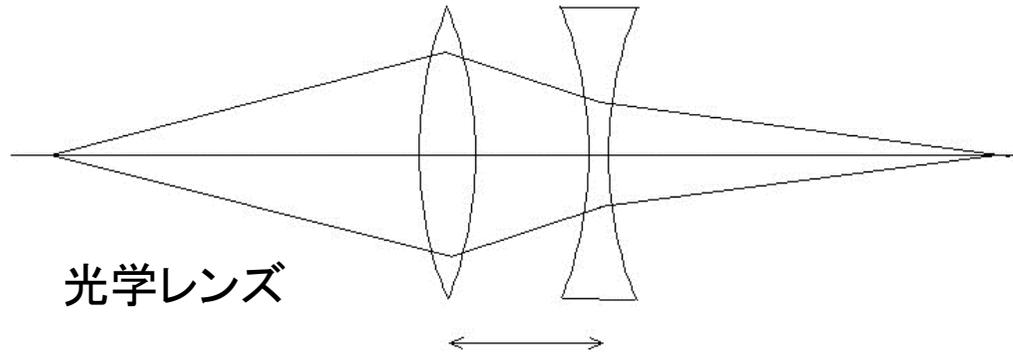
$$1/F = 1/f_1 + 1/f_2 - d/f_1 \cdot f_2$$

(d:二枚のレンズの間隔)

$f_1 = -f_2$ なら、合成焦点距離  $F = f_1^2/a > 0$

合成系は必ず凸レンズ！

# 幾何光学のいくつかの定理 I

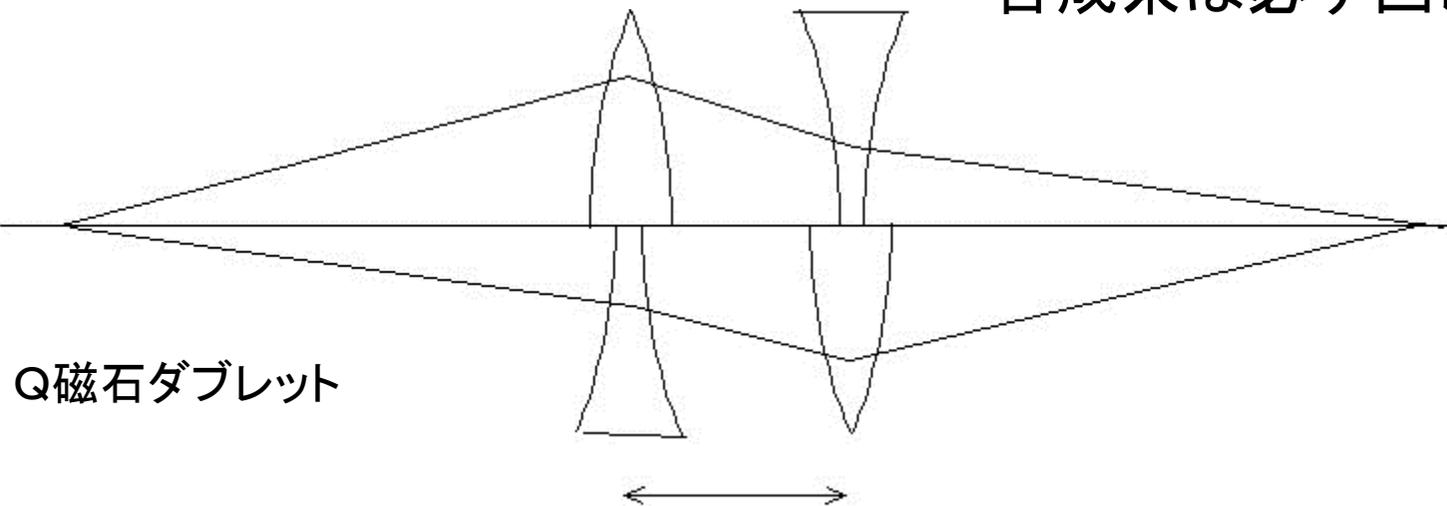


$$1/F = 1/f_1 + 1/f_2 - d/f_1 \cdot f_2$$

(d: 二枚のレンズの間隔)

$f_1 = -f_2$ なら、合成焦点距離  $F = f_1^2/d > 0$

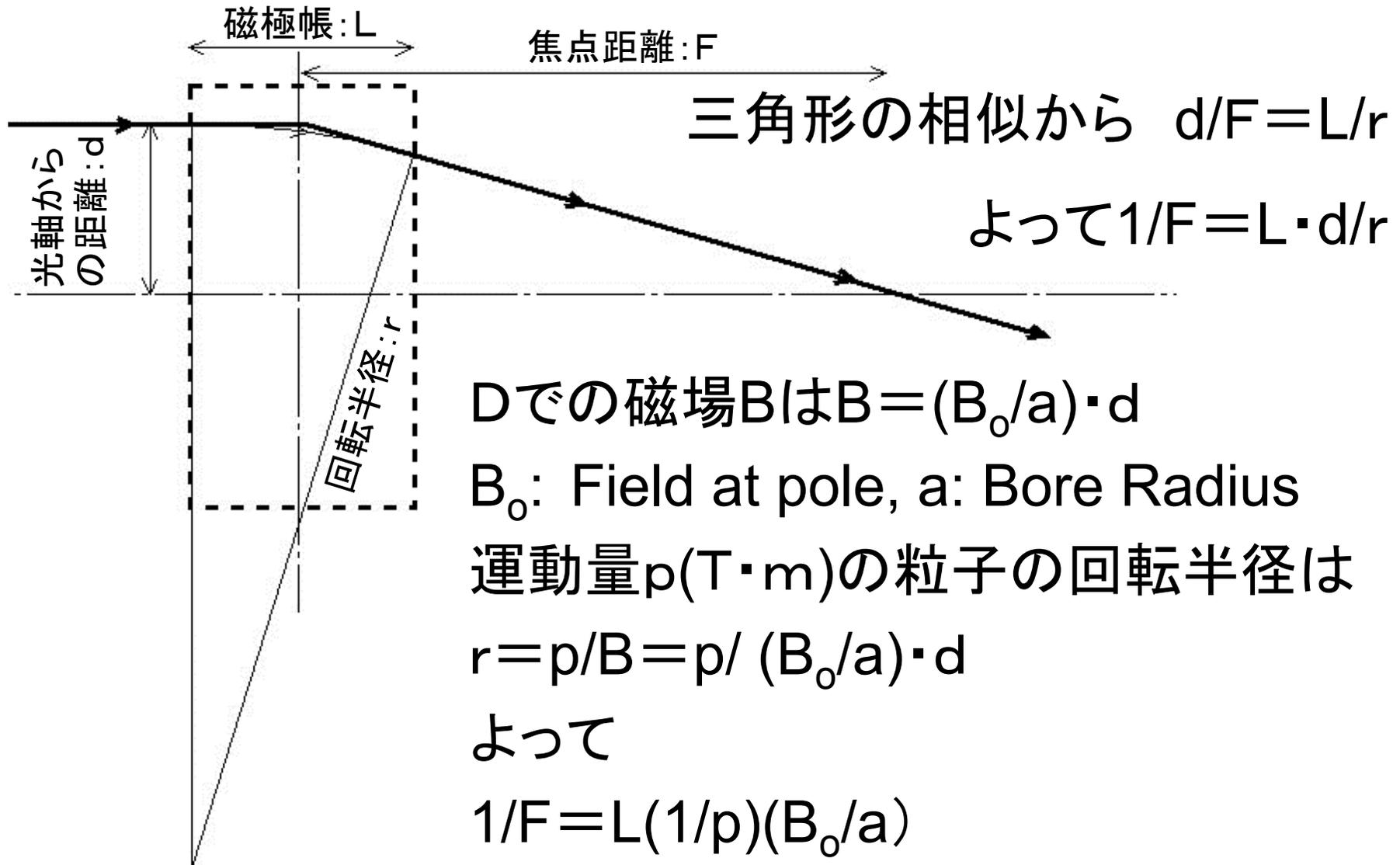
合成系は必ず凸レンズ！



1962 Courant, Livingston, Snyder

1950 Christofilos

# Q磁石の焦点距離



# Q磁石の焦点距離の具体的な値

$$1/F = L(1/p)(B_0/a)$$

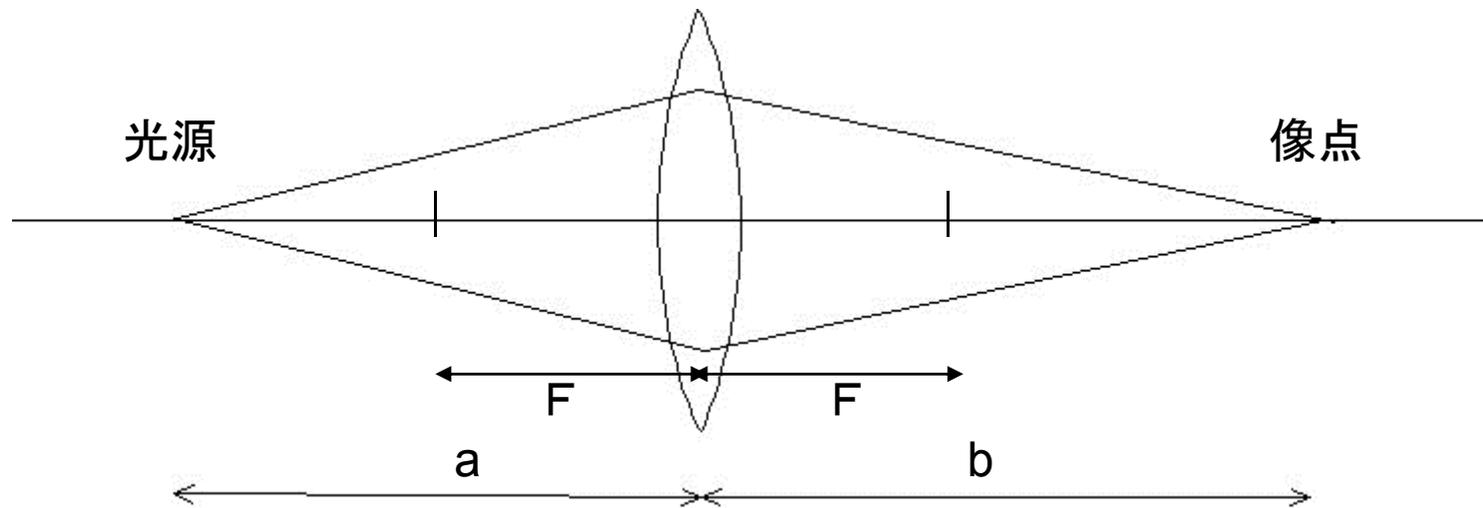
$$p = 13 \text{ GeV}/c = 43.3 \text{ T} \cdot \text{m}, \quad L = 1 \text{ m}, \quad B_0 = 1 \text{ T}, \quad a = 0.1 \text{ m}$$

$$F = 4.3 \text{ m}$$

$$p = 51 \text{ GeV}/c = 170 \text{ T} \cdot \text{m}, \quad L = 1 \text{ m}, \quad B_0 = 1 \text{ T}, \quad a = 0.1 \text{ m}$$

$$F = 17 \text{ m}$$

# 幾何光学のいくつかの定理 II、



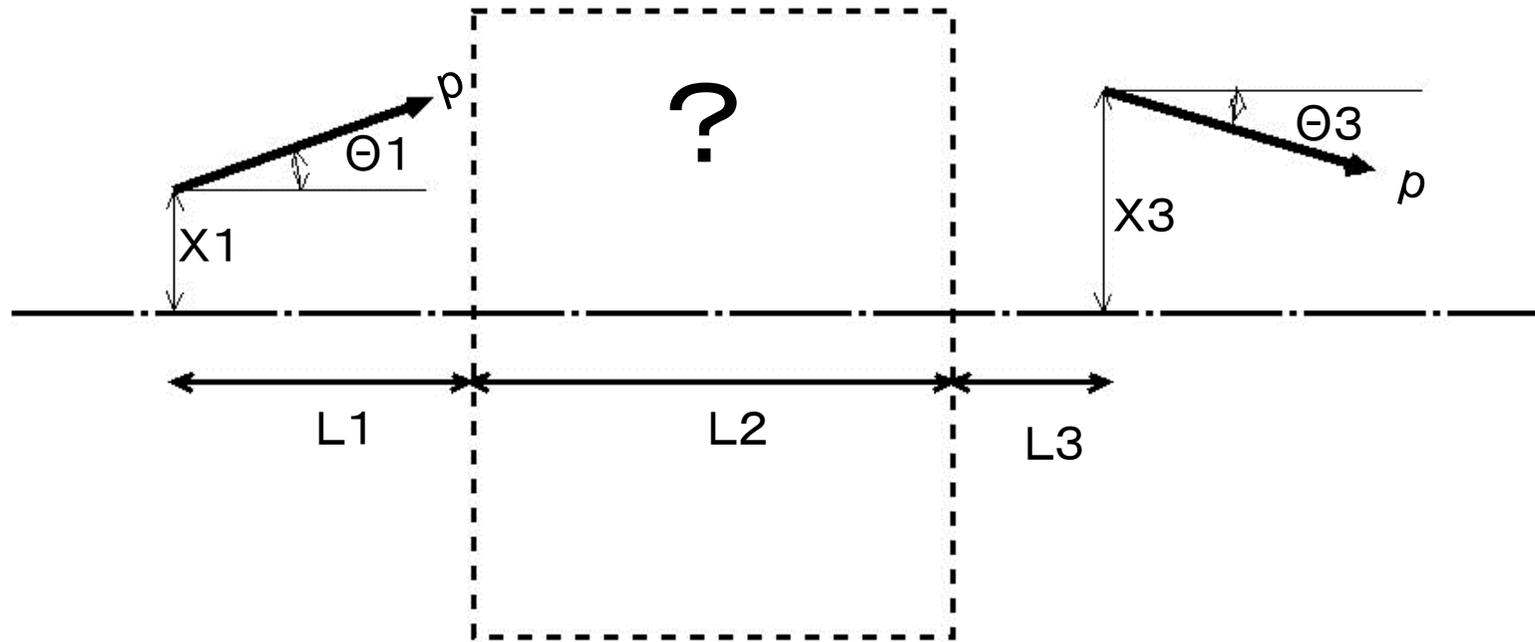
焦点距離 $F$ の外側の光源から来た光は、  
やはり焦点距離の外側の像点に結像する。このとき

$$1/F = 1/a + 1/b$$

$a=b$ の時、 $a=b=2F$



# イオン光学のマトリックス法



位置 $X_1$ 、角度 $\theta_1$ 、運動量 $p_1$ の粒子が  
自由空間(長さ $L_1$ )、?な光学要素(長さ $L_2$ )、  
自由空間(長さ $L_1$ )を通過すると  
位置 $X_3$ 、角度 $\theta_3$ 、運動量 $p_3$ となっていた。

# イオン光学のマトリックス法

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ \theta_3 \\ p_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1, L_3, 0 \\ 0, 1, 0 \\ 0, 0, 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ? \\ \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1, L_1, 0 \\ 0, 1, 0 \\ 0, 0, 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \theta_1 \\ p_1 \end{bmatrix}$$

光学要素:

ベクトル( $x, \theta, p$ )に対する変換マトリックス

加速要素が無ければ $p_1 = p_3 = p$

自由空間(ドリフトスペース)は  $\begin{bmatrix} 1, L, 0 \\ 0, 1, 0 \\ 0, 0, 1 \end{bmatrix}$

# イオン光学のマトリックス法 (四極磁石のマトリックス)

*First-order quadrupole matrix*

$$\begin{bmatrix}
 \cos k_q L & \frac{1}{k_q} \sin k_q L & 0 & 0 & 0 \\
 -k_q \sin k_q L & \cos k_q L & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \cosh k_q L & \frac{1}{k_q} \sinh k_q L & 0 \\
 0 & 0 & k_q \sinh k_q L & \cosh k_q L & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 X \\
 \Theta \\
 Y \\
 \Phi \\
 p
 \end{bmatrix}$$

$L$  = the effective length of the quadrupole

$a$  = the radius of the aperture

$B_0$  = the field at radius  $a$

$k_q^2 = (B_0/a)(1/B\rho_0)$ , where  $(B\rho_0)$  = the magnetic rigidity  
(momentum) of the central trajectory.

# 四極磁石のマトリックス

$$\begin{bmatrix} 1 & L & 0 \\ -1/F & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ \Theta \\ p \end{bmatrix}$$

光学レンズの  
場合はL=0

Qの両端にドリフトスペースがある時のマトリックス表示

$$\begin{bmatrix} X_3 \\ \Theta_3 \\ p_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 & 0 \\ -1/F & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ \Theta_1 \\ p_1 \end{bmatrix}$$

# イオン光学のマトリックス法 (双極磁石のマトリックス)

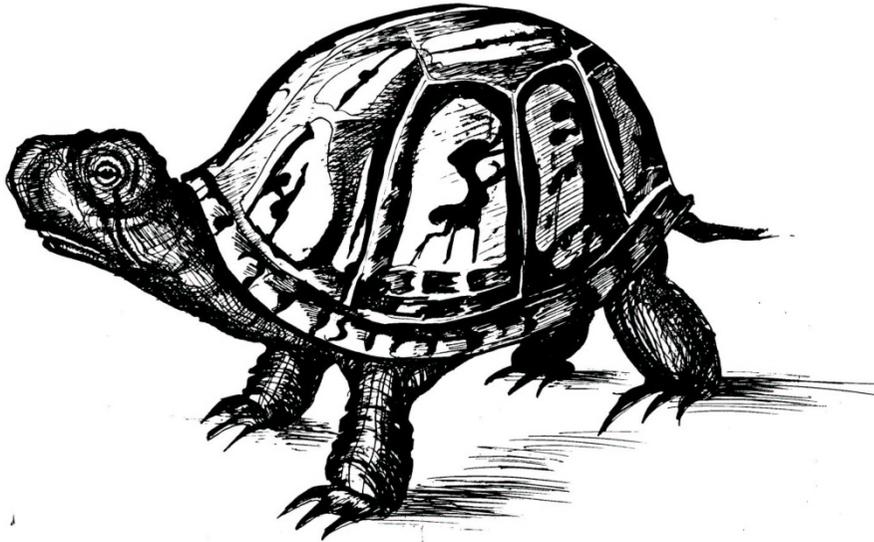
*First-order wedge bending magnet matrix*

$$\begin{array}{|c|} \hline \cos k_x L \\ \hline -k_x \sin k_x L \\ \hline 0 \\ \hline 0 \\ \hline 0 \\ \hline \end{array}
 \begin{array}{|c|} \hline \frac{1}{k_x} \sin k_x L \\ \hline \cos k_x L \\ \hline 0 \\ \hline 0 \\ \hline 0 \\ \hline \end{array}
 \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline 0 \\ \hline \cos k_y L \\ \hline -k_y \sin k_y L \\ \hline 0 \\ \hline \end{array}
 \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline 0 \\ \hline \frac{1}{k_y} \sin k_y L \\ \hline \cos k_y L \\ \hline 0 \\ \hline \end{array}
 \begin{array}{|c|} \hline \frac{h}{k_x^2} (1 - \cos k_x L) \\ \hline \frac{h}{k_x} \sin k_x L \\ \hline 0 \\ \hline 0 \\ \hline 1 \\ \hline \end{array}
 \begin{array}{|c|} \hline X \\ \hline \Theta \\ \hline Y \\ \hline \Phi \\ \hline p \\ \hline \end{array}$$

$$h = 1/\rho_0, \quad k_x^2 = (1 - n)h^2, \quad k_y^2 = nh^2$$

$\alpha = hL =$  the angle of bend

$L =$  path length of the central trajectory.



# TRANSPORT とTURTLE

( $x$ 、 $\theta$ 、 $y$ 、 $\varphi$ 、 $z$ 、 $p$ )  
ベクトルに対する  
フィッティングと  
レイトレース

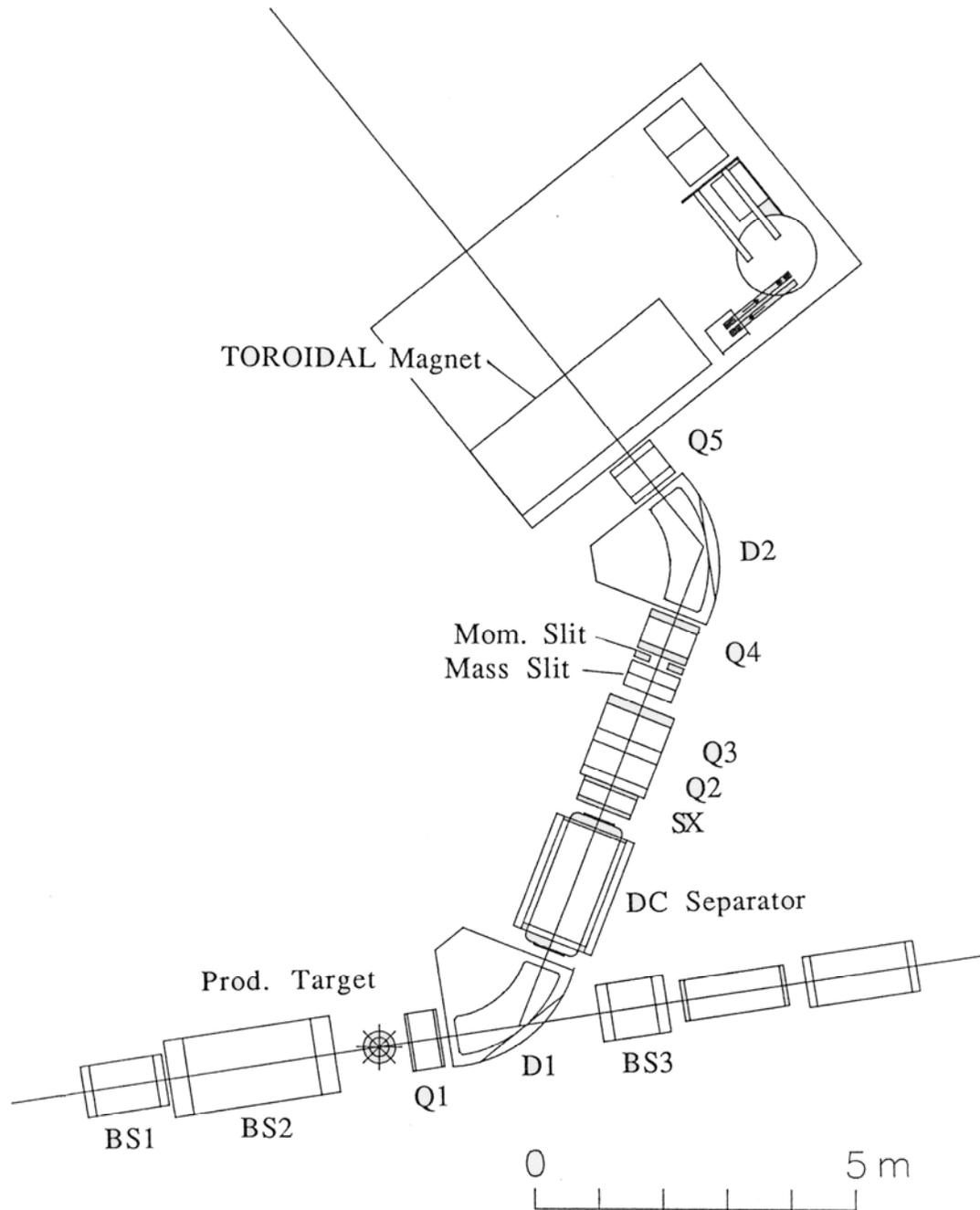
Graphic Transport と TURTLE は……、

[http://people.web.psi.ch/rohrer\\_u/trans.htm](http://people.web.psi.ch/rohrer_u/trans.htm)

あるいは <http://pc532.psi.ch/ftp/>

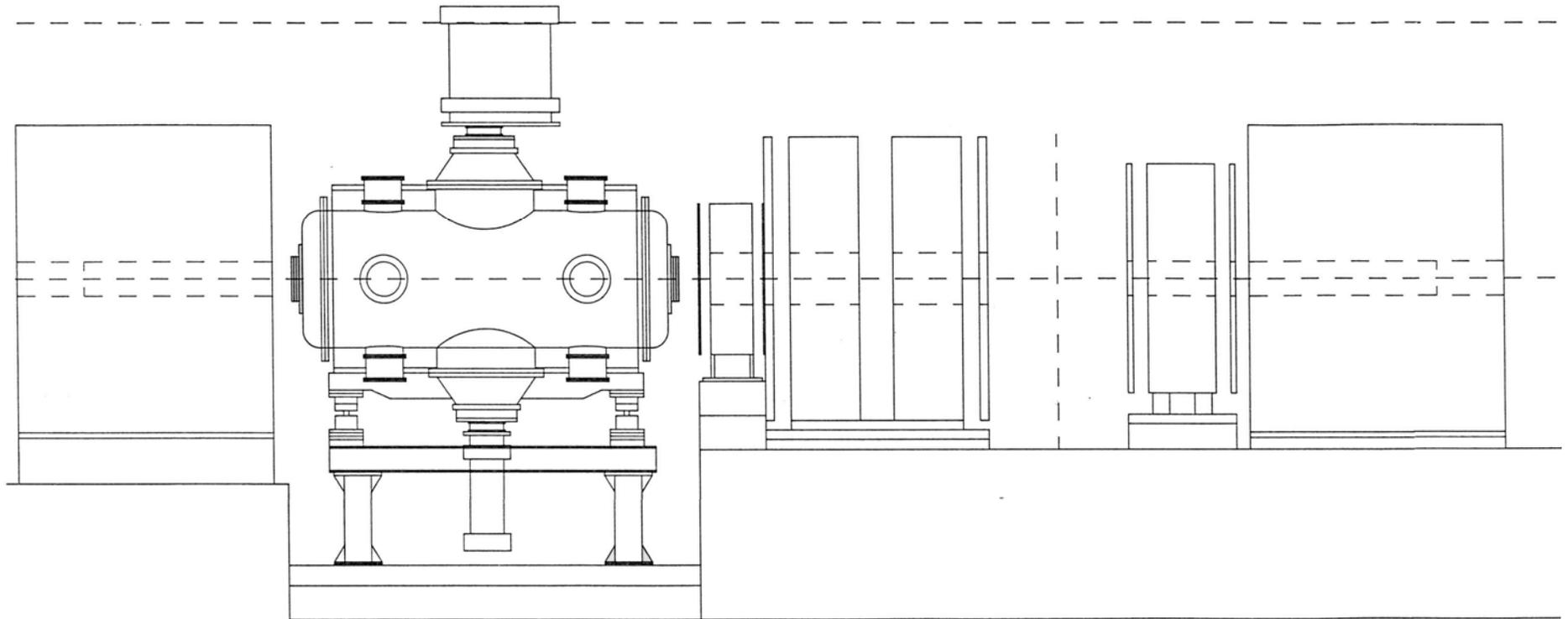
にあります。マニュアルCERN-80-04、SLAC-246

# K5の設計



- 650MeV/cのK
  - 大立体角高収量
  - 短いライン
- 複合磁場D  
六極による補正
- K6と串刺し
- BSO
- 2mセパレータ
- K3と共通

# K5の設計(横から・・・)



- 2mセパレータ

長く狭いドリフトスペースにいかにビームを高エネルギーで導入するか？



'KEK5 DESIGN DECEMBER 90, VERSION 4-2'

0

1.0 0.5 150.0 0.3 15.0 3.0 3.0 0.55 'BEAM' ;

13. 3.0 ;

16. 7. 0.40 'K1' ;

16. 8. 2.8 'K2' ;

-17.0 'SEC' ;

3.0 0.28 'INPU' ;

5.0 0.06 9.600 103.8 'K5Q1' ;

5.0 0.04 9.600 54.5 'K5Q1' ;

5.0 0.04 9.600 28.3 'K5Q1' ;

5.0 0.04 9.600 17.2 'K5Q1' ;

5.0 0.04 9.600 12.4 'K5Q1' ;

5.0 0.06 9.600 10.6 'K5Q1' ;

5.0 0.16 9.600 10.0 'K5Q1' ;

5.0 0.06 9.600 10.6 'K5Q1' ;

5.0 0.04 9.600 12.4 'K5Q1' ;

5.0 0.04 9.600 17.2 'K5Q1' ;

5.0 0.04 9.600 28.3 'K5Q1' ;

5.0 0.04 9.600 54.5 'K5Q1' ;

5.0 0.06 9.600 103.8 'K5Q1' ;

3.0 0.067 'MOVE' ;

3.0 0.020 'DRFT' ;

3.0 0.122 'B1IN' ;

16.0 5.0 8.0 'G/2' ;

16.0 12.0 0.0355255 'RIN' ;

16.0 13.0 0.0355255 'ROUT' ;

2.0 -1.145 'ROTI' ;

4.000 1.797 10.691 1.15374 'K5B1' ;

2.0 -1.145 'ROTO' ;

3.0 0.122 'B1UT' ;

3.0 0.16 'BELW' ;

3.0 0.13 'DCS1' ;

3.0 0.97 'DCS1' ;

3.0 0.97 'DCS2' ;

-10.0 3.0 3.0 7.5 0.1 'FITV' ;

3.0 0.13 'DCSO' ;

3.0 0.16 'BELW' ;

3.0 0.07 'DSXT' ;

18.0 0.25 -0.50000 15.0 'SEXT' ;

3.0 0.07 'DSXT' ;

-10.0 1.0 1.0 12.0 0.5 'FIT1' ;

3.0 -0.06

'QINP' ;

5.0A 0.04 -7.57290 1090.4 'QNP2' ;

5.0A 0.04 -7.57290 354.40 'QNP2' ;

5.0A 0.04 -7.57290 141.80 'QNP2' ;

5.0A 0.04 -7.57290 63.00 'QNP2' ;

5.0A 0.04 -7.57290 35.40 'QNP2' ;

5.0A 0.04 -7.57290 23.60 'QNP2' ;

5.0A 0.04 -7.57290 18.50 'QNP2' ;

5.0A 0.04 -7.57290 16.20 'QNP2' ;

5.0A 0.04 -7.57290 15.40 'QNP2' ;

5.0A 0.04 -7.57290 15.10 'QNP2' ;

5.0A 0.04 -7.57290 15.00 'QNP2' ;

5.0A 0.04 -7.57290 15.10 'QNP2' ;

5.0A 0.04 -7.57290 15.50 'QNP2' ;

5.0A 0.04 -7.57290 16.80 'QNP2' ;

5.0A 0.04 -7.57290 19.80 'QNP2' ;

5.0A 0.04 -7.57290 27.40 'QNP2' ;

5.0A 0.04 -7.57290 45.00 'QNP2' ;

5.0A 0.04 -7.57290 157.50 'QNP2' ;

5.0 0.04 9.4 157.50 'QNP3' ;

5.0 0.04 9.4 45.00 'QNP3' ;

5.0 0.04 9.4 27.40 'QNP3' ;

5.0 0.04 9.4 19.40 'QNP3' ;

5.0 0.04 9.4 16.80 'QNP3' ;

5.0 0.04 9.4 15.50 'QNP3' ;

5.0 0.04 9.4 15.10 'QNP3' ;

5.0 0.04 9.4 15.00 'QNP3' ;

5.0 0.04 9.4 15.10 'QNP3' ;

5.0 0.04 9.4 15.40 'QNP3' ;

5.0 0.04 9.4 16.20 'QNP3' ;

5.0 0.04 9.4 18.50 'QNP3' ;

5.0 0.04 9.4 23.60 'QNP3' ;

5.0 0.04 9.4 35.40 'QNP3' ;

5.0 0.04 9.4 63.00 'QNP3' ;

5.0 0.04 9.4 141.80 'QNP3' ;

5.0 0.04 9.4 354.40 'QNP3' ;

5.0 0.04 9.4 1090.40 'QNP3' ;

3.0 -0.06 ;

# K5 Beam Transport

```

3.0 0.400 'MSLT' ;
10.0 3.0 3.0 0.1 0.001 'FITO' ;
-10.0 3.0 3.0 0. 0.001 'ABVO' ;
13. 4. 'PRNT' ;
3.0 0.14 'XFOC' ;
10.0 -1.0 2.0 0.0 0.1 'FIT2' ;
3. 0.28674 'DRFT' ;
3.0 -0.04 'NEGD' ;
5.0 0.09 -5.0 69.4444 'QNP4' ;
5.0 0.04 -5.0 22.2222 'QNP4' ;
5.0 0.06 -5.0 13.3333 'QNP4' ;
5.0 0.34 -5.0 10.0000 'QNP4' ;
5.0 0.06 -5.0 13.3333 'QNP4' ;
5.0 0.04 -5.0 22.2222 'QNP4' ;
5.0 0.09 -5.0 69.4444 'QNP4' ;
3.0 -0.04 'NEGD' ;
3.0 0.08 'DRFT' ;
3.0 0.122 'B2IN' ;
16.0 5.0 8.0 'G/2' ;
16.0 12.0 0.0355255 'RIN' ;
16.0 13.0 0.0355255 'ROUT' ;
2.0 -1.145 'ROTI' ;
4.000 1.797 10.691 1.15374 'K5B2' ;
2.0 -1.145 'ROTO' ;
3.0 0.122 'B2UT' ;
3.0 0.08 'DRFT' ;
3.0 -0.04 'NEGD' ;
5.0 0.09 4.732 69.4444 'QNP5' ;
5.0 0.04 4.732 22.2222 'QNP5' ;
5.0 0.06 4.732 13.3333 'QNP5' ;
5.0 0.34 4.732 10.0000 'QNP5' ;
5.0 0.06 4.732 13.3333 'QNP5' ;
5.0 0.04 4.732 22.2222 'QNP5' ;
5.0 0.09 4.732 69.4444 'QNP5' ;
3.0 -0.04 'NEGD' ;
3. 0.90 'DEND' ;
-10.0 1.0 1.0 2.0 0.1 'FIT5' ;
-10.0 3.0 3.0 2.0 0.1 'FIT6' ;
13. 4. 'PRNT' ;

```

```

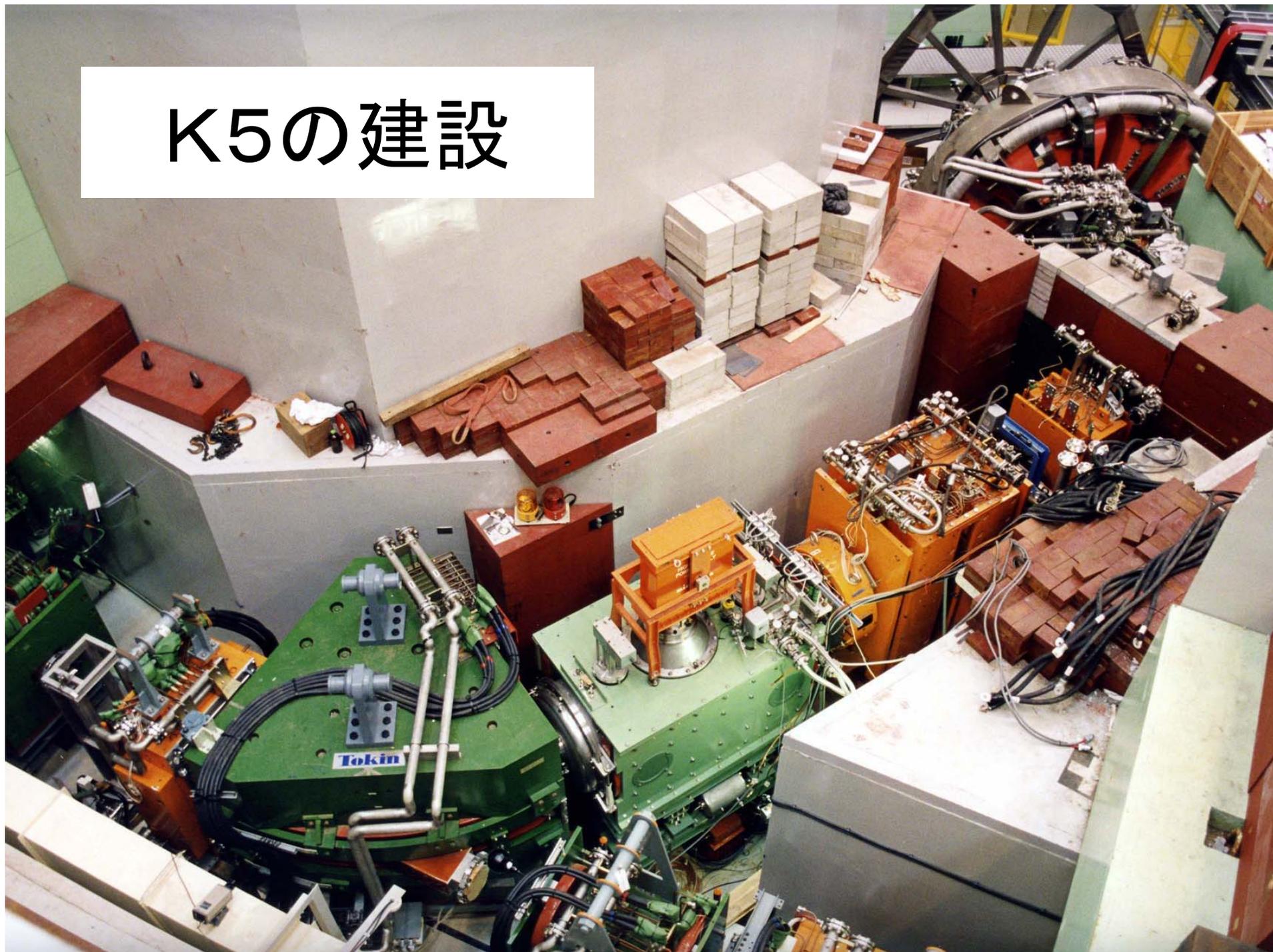
3.0 0.10 'DRFT' ;
SENTINEL
'SECOND ORDER RUN'
-1
17. 'SEC' ;
18.01 0.25 -0.50000 15.0 'SEXT' ;
5.0 'QNP2' ;
-10.0 'FITO' ;
10.0 'ABVO' ;
-10.0 'FIT2' ;
SENTINEL
'*PLOT*'
-2
SENTINEL
SENTINEL

```

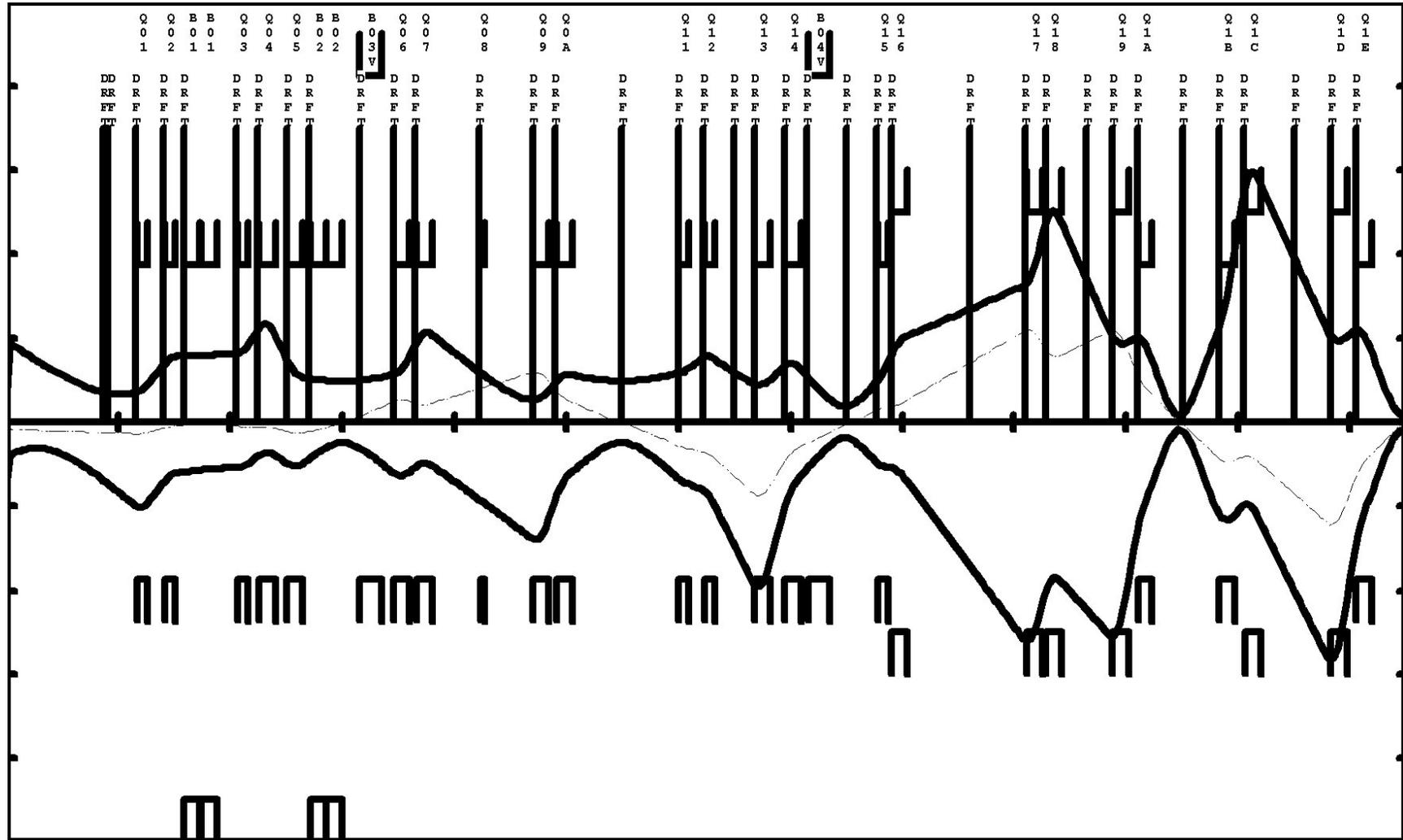
# K5 Beam Transport

## (続き)

# K5の建設



# 50GeV-PSの一次ビームライン Visual TRANSPORTの出力



# 二次粒子生成

- さて、実験に百万個のK中間子が欲しいのだが??
- ビームラインのカタログを見ると、毎秒1000個出てくると書かれている!!
- では1000秒で実験が終わるなあ。

# 実験標的まで到着する二次粒子の数

- 一次陽子の数、サイズ、エネルギー……、
- 標的の大きさ、材質……、
- 生成断面積が判っていると生成率が計算できる。
- 実は核内、物質内での吸収断面積も判っていないと……、
- それやこれやで $d^2N/d\Omega dp$  が計算できる(?)
- ビームライン中での崩壊
- ビームライン中での多重散乱などの影響

# Sanford-Wang Parametrisation

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dp} = \sigma_{abs, p_i}^A \frac{d^2N}{d\Omega dp}$$

$$\frac{d^2N}{d\Omega dp} = Ap^B \left(1 - \frac{p}{p_i}\right) \exp \left[ -\frac{Cp^D}{P_i^E} - F\theta(p - Gp_i \cos^H \theta) \right] \quad \text{PRL 25(1970)1068}$$

	$\pi^+$	$K^+$	$\pi^-$	$K^-$	p_bar
A	1.092	0.05597	0.821	0.02210	0.001426
B	0.6458	0.6916	0.5271	1.323	1.994
C	4.046	3.744	3.956	9.671	9.320
D	1.625	4.520	1.731	1.712	1.672
E	1.656	4.190	1.617	1.643	1.480
F	5.029	4.928	4.735	4.673	4.461
G	0.1722	0.1922	0.1984	0.1686	0.2026
H	82.65	50.28	88.75	77.27	78.00

# Sanford-Wang Parametrisation

$$\frac{d^2 \sigma}{d\Omega dp} = \sigma_{abs, p_i}^A \frac{d^2 N}{d\Omega dp} \quad \sigma_{abs, p_i}^A = 227 \text{mb for Be at 30GeV}$$

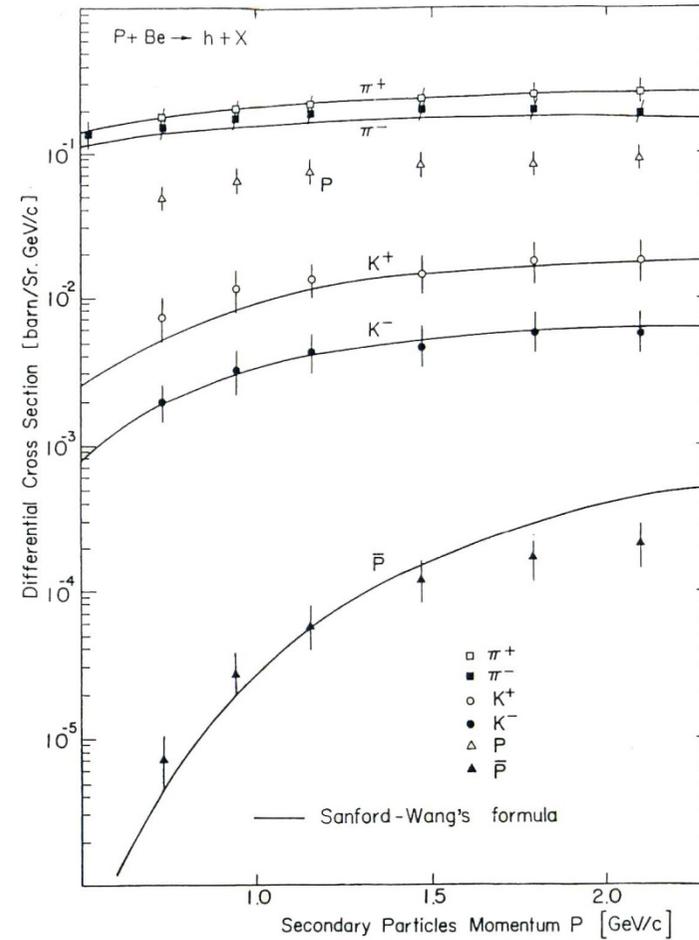
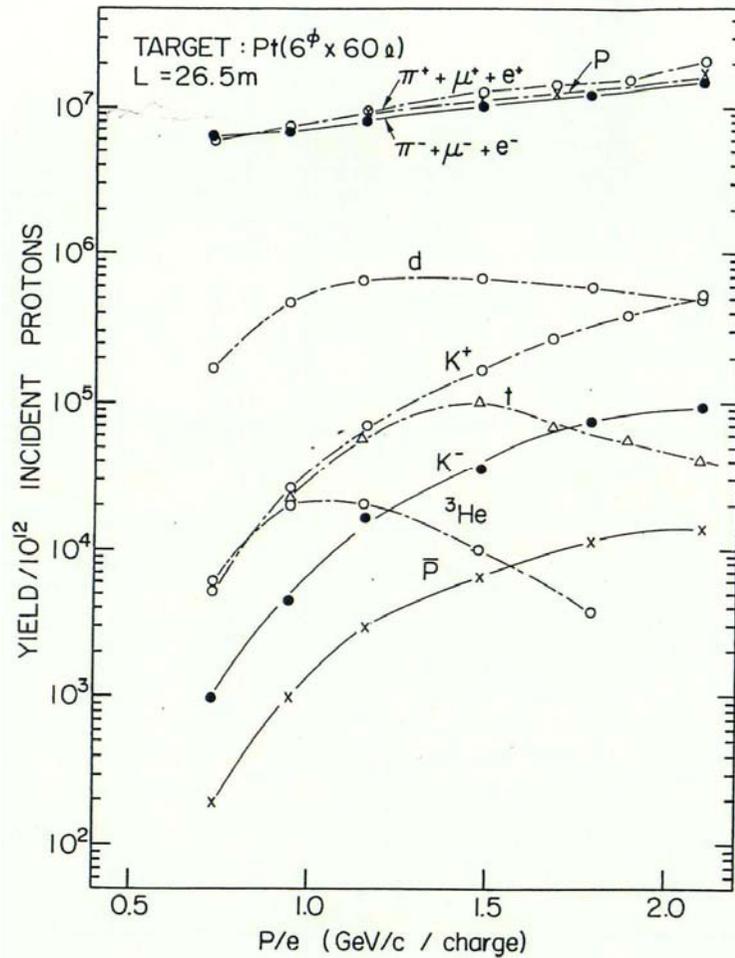
$$\frac{d^2 N}{d\Omega dp} = A p^B \left(1 - \frac{p}{p_i}\right) \exp \left[ -\frac{C p^D}{P_i^E} - F \theta (p - G p_i \cos^H \theta) \right] \quad \text{PRL 25(1970)1068}$$

$T_i=30\text{GeV}$  ( $p_i=30.92\text{GeV}/c$ ),  $p=1.8\text{GeV}/c$ ,  $\theta=6\text{degree}$

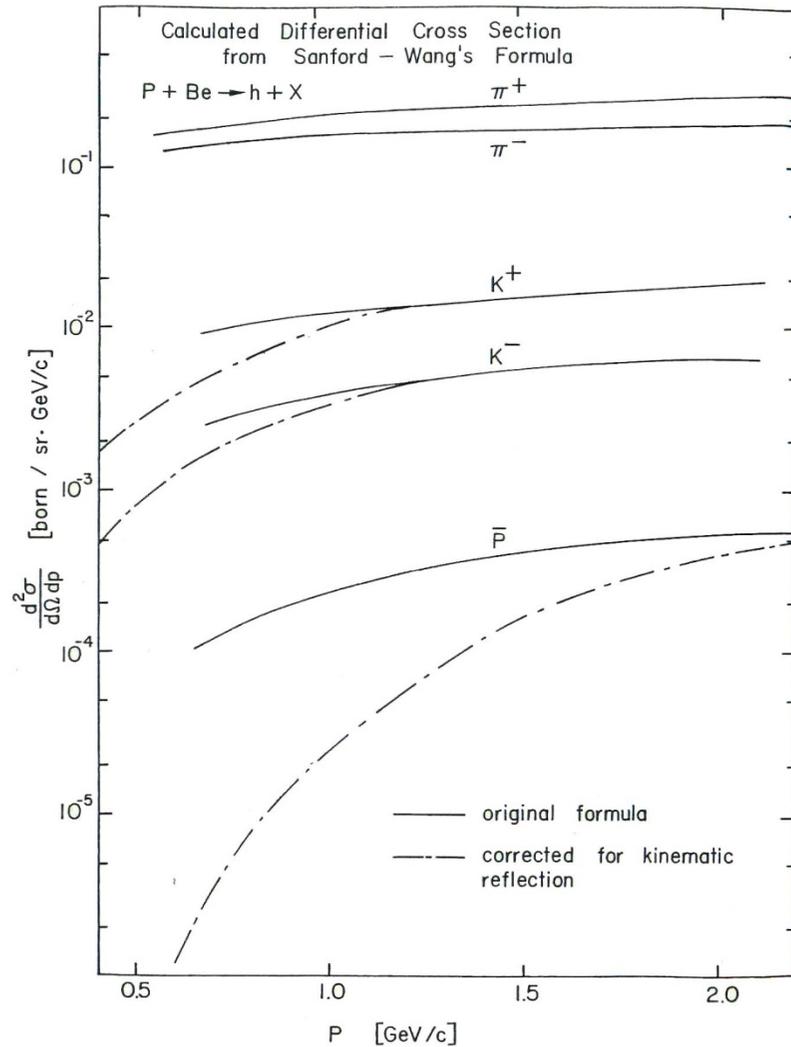
	$\pi^+$	$K^+$	$\pi^-$	$K^-$	$p\_bar$
$\frac{d^2 N}{d\Omega dp}$	3.336	0.3204	2.680	0.0907	0.0108
S.R.(46m)	0.6331	0.0344	0.6331	0.0344	1.0000
Yield	2.113	0.0107	1.697	0.00303	0.01078
	100	0.506	80.3	0.143	0.510

$$\sigma_{abs, p_i}^A = 206 \text{mb for Be at 19GeV}$$

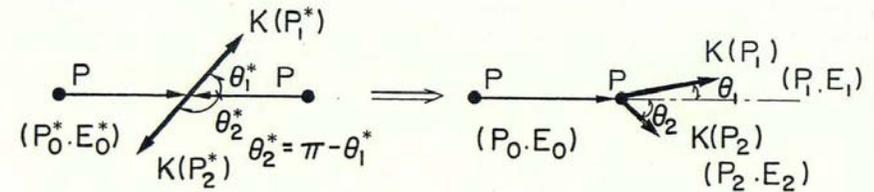
# 12.9 GeV/c proton on Be (KEK-K2 Data By A. Yamamoto)



# Introduction of Kinematic Reflection



## KINEMATIC REFLECTION



C. M. SYSTEM

LAB. SYSTEM

$$E \frac{d^3\sigma}{dp^3} = (E \frac{d^3\sigma}{dp^3})_1 = \frac{E_1}{p_1^2} \cdot (\frac{d^2\sigma}{d\Omega \cdot dp})_1$$

$$= (E \frac{d^3\sigma}{dp^3})_2 = \frac{E_2}{p_2^2} \cdot (\frac{d^2\sigma}{d\Omega \cdot dp})_2$$

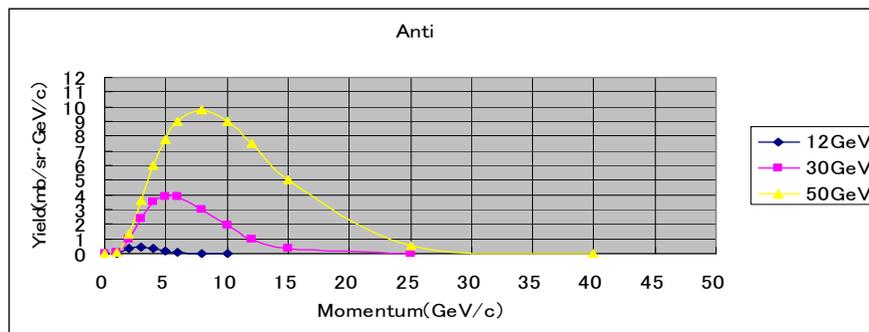
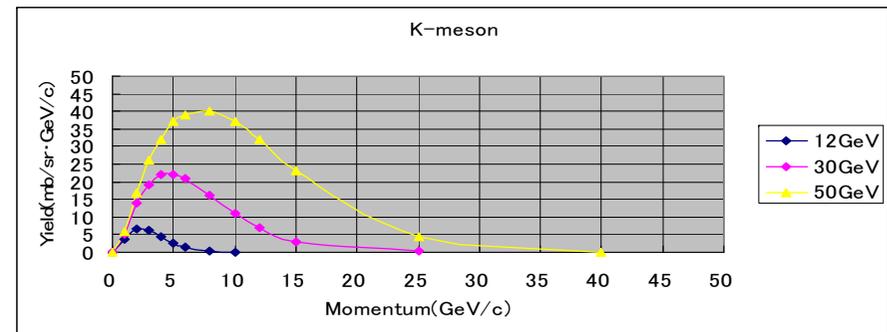
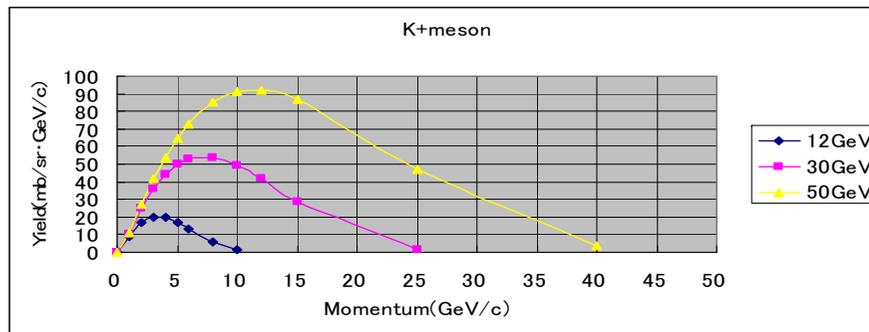
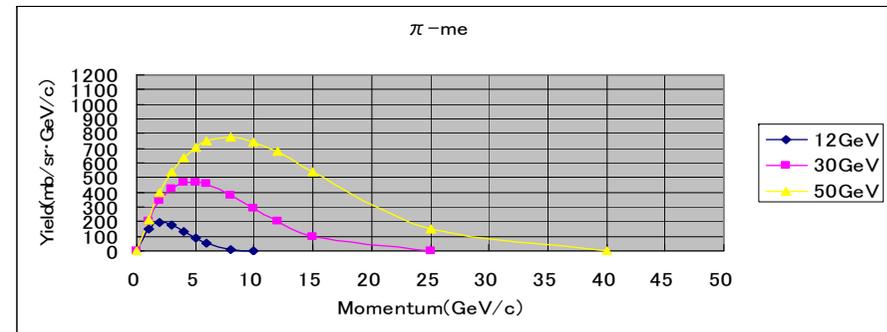
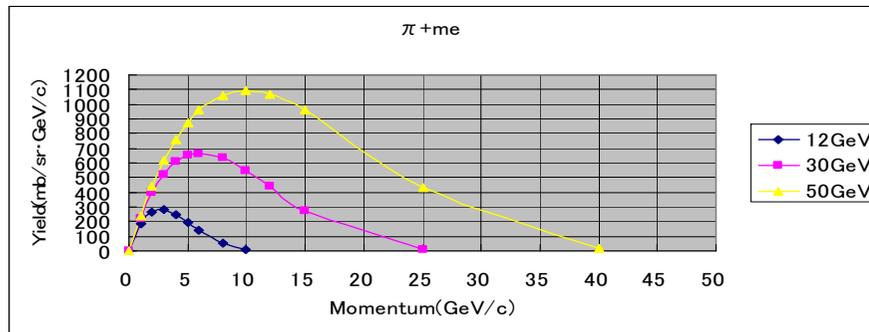
$$(\frac{d^2\sigma}{d\Omega \cdot dp})_1 = \frac{p_1^2}{E_1} \cdot \frac{E_2}{p_2^2} \cdot (\frac{d^2\sigma}{d\Omega \cdot dp})_2$$

$$P_2 = \beta_0 \cdot \gamma_0 \cdot E_1 - \gamma_0 \cdot P_1 \quad (\text{at } p_t = 0)$$

$$\gamma_0 = (1 - \beta_0^2)^{-\frac{1}{2}}$$

$$\beta_0 = (1 + \frac{m_p^2}{p_0^2})^{-\frac{1}{2}}$$

# Particle Yield at 50, 30, and 12 GeV Primaries on Be

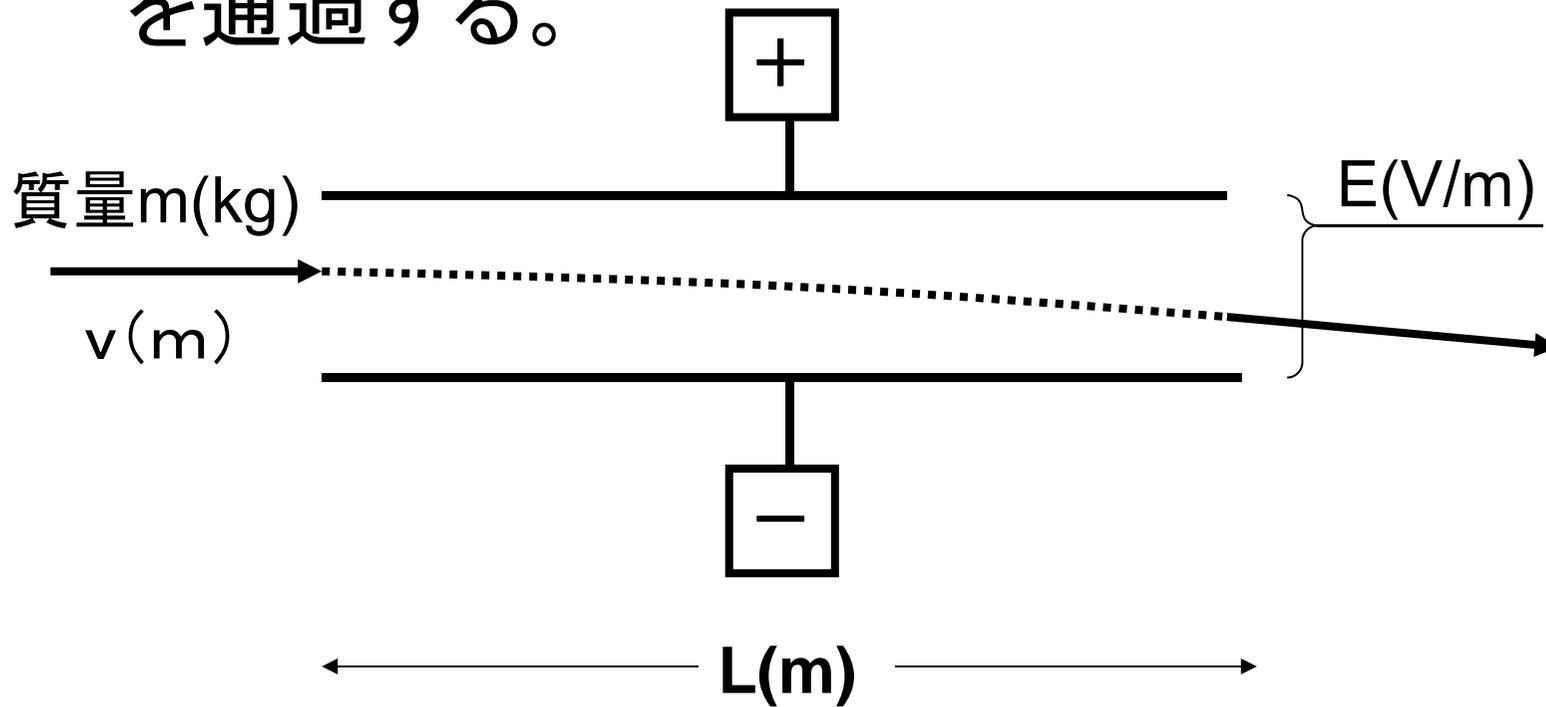


by Yamamoto formulae.  
(Effective at  $0^\circ$ )  
KEK Report 81-13

# 電場の中での荷電粒子の運動と ESS

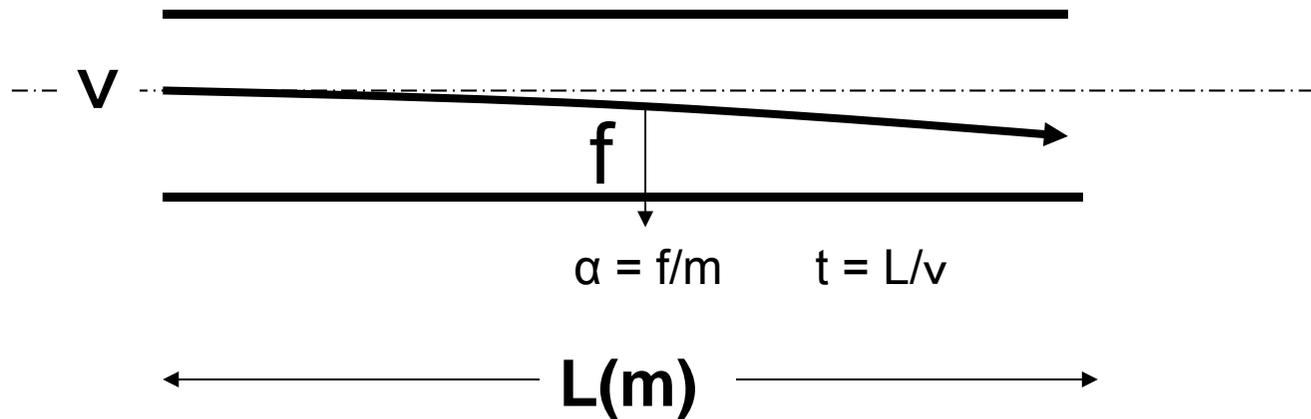
# 電場の中での荷電粒子の運動

質量 $m$ (kg)、電荷 $e$ (C)の粒子が、速度 $v$ (m)で電場勾配 $E$ (V/m)の長さ $L$ (m)の平行電極間を通過する。



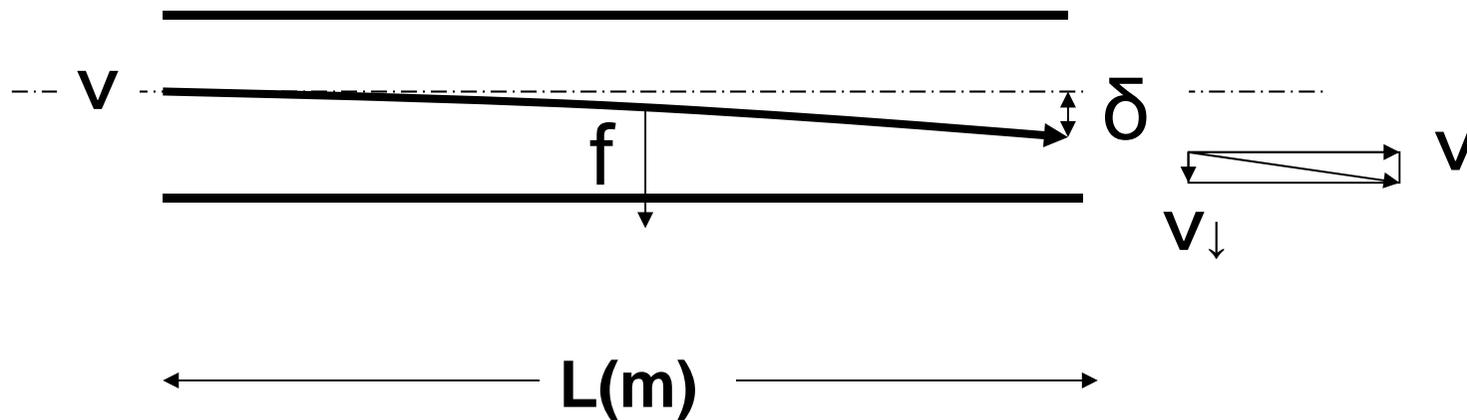
# 平行電極間での運動

- 平行電極間で受ける力  $f = eE$  (N)
- 生ずる加速度は  $\alpha = f/m = eE/m$  (m/s<sup>2</sup>)
- 平行電極間で力を受ける時間  $t = L/v$  (s)



# 平行電極間での運動

- 平行電極を出るときの電場勾配方向の速度  
 $v_{\downarrow} = at = eE/m \cdot L/v = eEL/mv$
- 平行電極を出るときの電場勾配方向の変位  
 $\delta = at^2/2 = eE/m \cdot L^2/2v^2 = eEL^2/2mv^2$



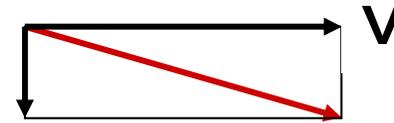
# 速度の変化は……、

- 平行電極を出るときの電場勾配方向の速度

$$v_{\downarrow} = at = eE/m \cdot L/v = eEL/mv$$

これを下向きにとると、傾斜の変化は

$$\Delta\theta = v_{\downarrow}/v = eEL/mv^2$$



- 出口での全速度  $\sqrt{(v^2 + v_{\downarrow}^2)} \sim v(1 + v_{\downarrow}^2/2v^2)$   
 $= v(1 + (\Delta\theta)^2/2) \sim v$

速度の増分は二次の微少量→無視する！

→速度の増分～エネルギーの増分

# さて計算してみよう(1)

運動量1GeV/cのK<sup>+</sup>中間子

静止質量  $m_0c^2 = m_{K^+}c^2 = 493.677\text{MeV}$

$$p = mv, m = m_0/\sqrt{1-\beta^2}$$

pをGeV/cで書くとpcはGeV、よって

$$\begin{aligned} pc &= mvc = m_0vc/\sqrt{1-\beta^2} \\ &= m_0c^2\beta/\sqrt{1-\beta^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta &= 1/\sqrt{1+(m_0c^2/pc)^2} \\ &= 1/\sqrt{1+(493.667/1000)^2} = 0.897 \end{aligned}$$

$$\rightarrow v = 2.69 \times 10^8 \text{m/s}$$

## さて計算してみよう(2)

- 運動量1GeV/cのK<sup>+</sup>中間子

静止質量  $m_0c^2 = m_{K^+}c^2 = 493.677\text{MeV}$

$\beta = 0.897$       $v = 2.69 \times 10^8 \text{m/s}$

- 平行電極の電圧が600kVで間隙が10cm

$600\text{kV}/10\text{cm} \rightarrow 6 \times 10^6 \text{V/m} = E、$

長さ6mとする。

- 平行電極を出るときの電場勾配方向の変位

$$\delta = at^2/2 = eE/m \cdot L^2/2v^2 = eEL^2/2mv^2$$

$= eEL^2/2mcv\beta = eEL^2/2pc\beta$ であることを利用すると、計算が簡単になる。

## さて計算してみよう(3)

- 平行電極を出るときの電場勾配方向の変位

$$\delta = eEL^2/2pc\beta$$

$$= 1.6 \times 10^{-19} \cdot 6 \times 10^6 \cdot 6^2$$

$$\div 2 \cdot 1000 \times 1.6 \times 10^{-13} \cdot (0.897)^2$$

$$= 0.120(\text{m}), \quad \pi: 0.108, \quad \rho: 0.147$$

- 平行電極を出るときの傾斜の変化

$$\Delta\theta = v_{\downarrow}/v = eEL/mv^2 = eEL/mcv\beta$$

$$= eEL/pc\beta = 2\delta/L = 0.040$$

$$\pi: 0.036, \quad \rho: 0.049$$

## さて計算してみよう(4)

- 平行電極を出るときの電場勾配方向の変位

$$\delta = eEL^2/2pc\beta$$

- 平行電極を出るときの傾斜の変化

$$\Delta\theta = v_{\downarrow}/v = eEL/mv^2 = eEL/pc\beta = 2\delta/L$$

とこれらの値は、 $\beta$ と運動量 $p$ の関数。で、

$$\beta = 1/\sqrt{1+(m_0c^2/pc)^2}$$

であるので、結局 $pc$ 一定の荷電粒子については、電場を用いることにより、その静止質量 $m_0c^2$ を分離することが出来る。ただし運動量が大きくなって、全ての粒子が $\beta \sim 1$ となると分離出来なくなる。

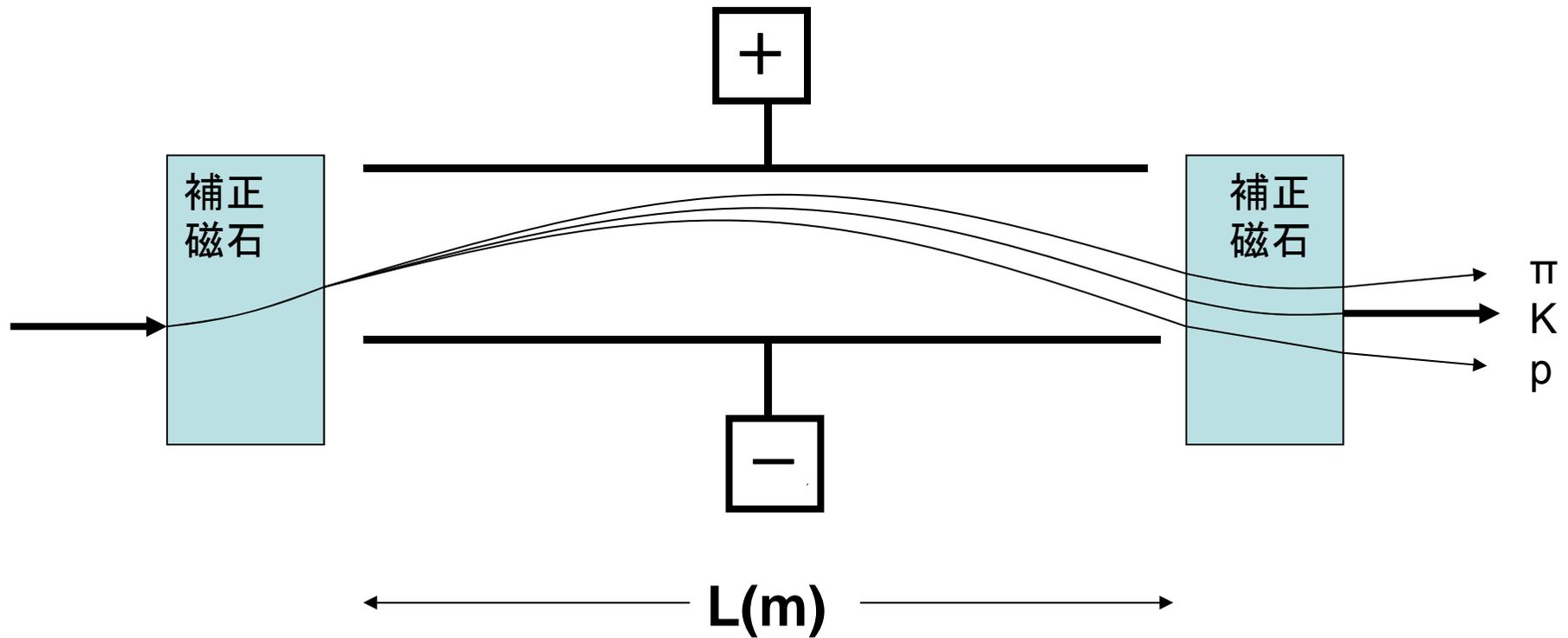
# 閑話休題

- 長さ6mの磁石で、1GeV/cの荷電粒子に0.12mの変位を与えるのに必要な磁場はだいたい0.022T~220Gauss。
- このとき、磁場の出口でのビームの傾きは0.04くらいで、電場の場合とほぼ同じ。これくらいだと放物線運動~円運動の近似が有効。

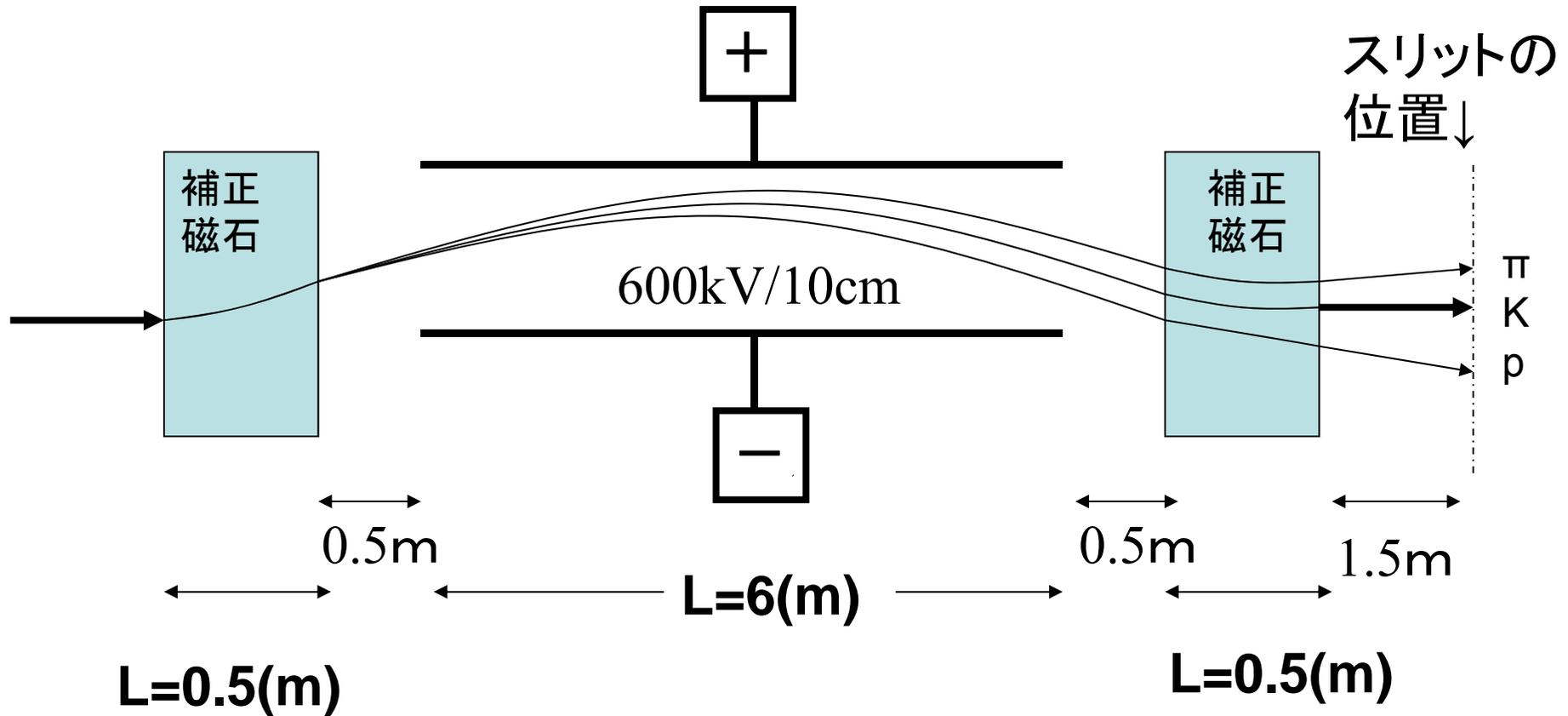
## 演習

- 上を求めよ。
- 600kVというような電圧はどうやって発生させるのか？

# 静電分離装置ESSの原理

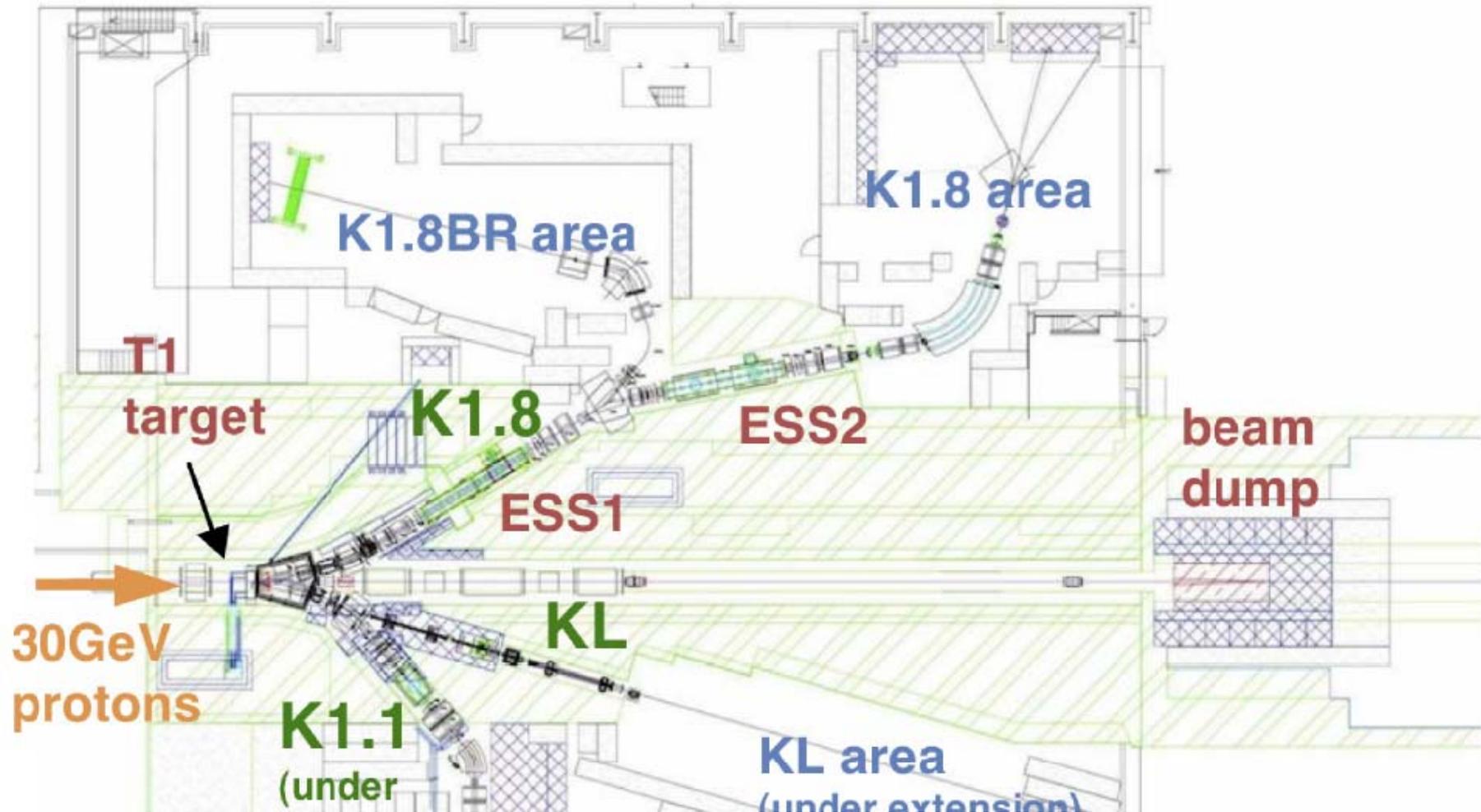


# 課題：静電分離装置ESSの設計



- $2\text{GeV}/c$ のK中間子用のESSを作りたい。補正磁石の強さはどれくらいか？スリット位置でのK、 $\pi$ 、陽子の分離距離も求めよ。

# 実機としてのESS

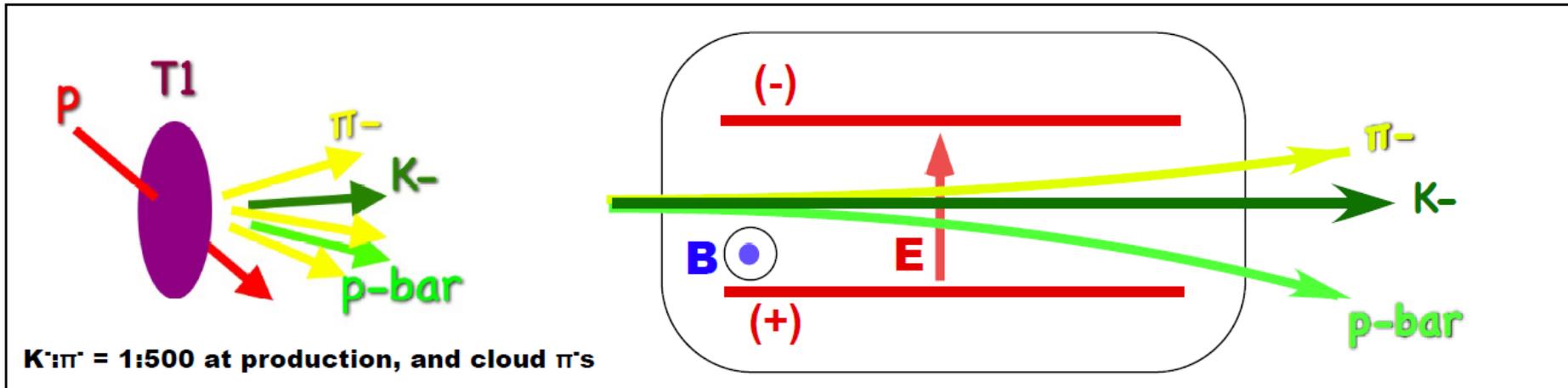


- K1.8/K1.8BR用6mESS



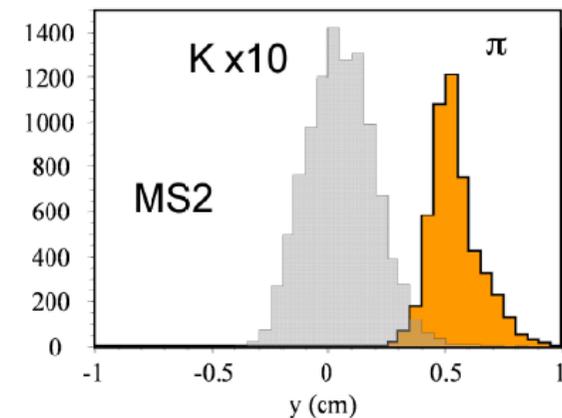
# K1.8 6mES Separator

## Separator



$$y = \frac{eEl^2}{2pc\beta} \quad y' = \frac{eEl}{pc\beta} \quad \Delta y' = \frac{eEl}{pc} \left( \frac{1}{\beta_W} - \frac{1}{\beta_U} \right) \approx \frac{1}{2} \frac{eEl}{p^3 c^3} (m_W^2 - m_U^2)$$

<b>E = 75 [kV/cm]</b>	→	<b>y' : π 25.08 [mr]</b>
<b>l = 6 [m]</b>		<b>K 25.92 [mr]</b>
<b>p = 1.8 [GeV/c]</b>		<b>p 28.19 [mr]</b>



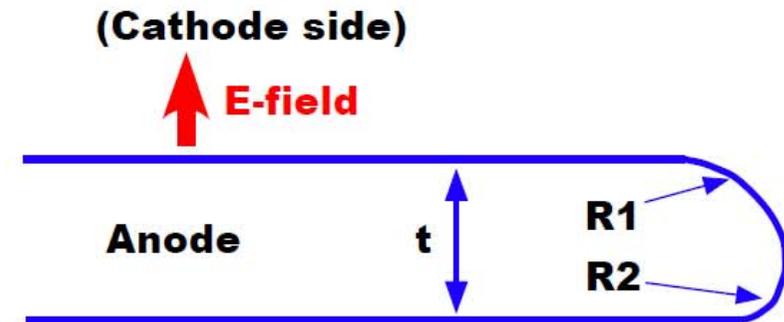
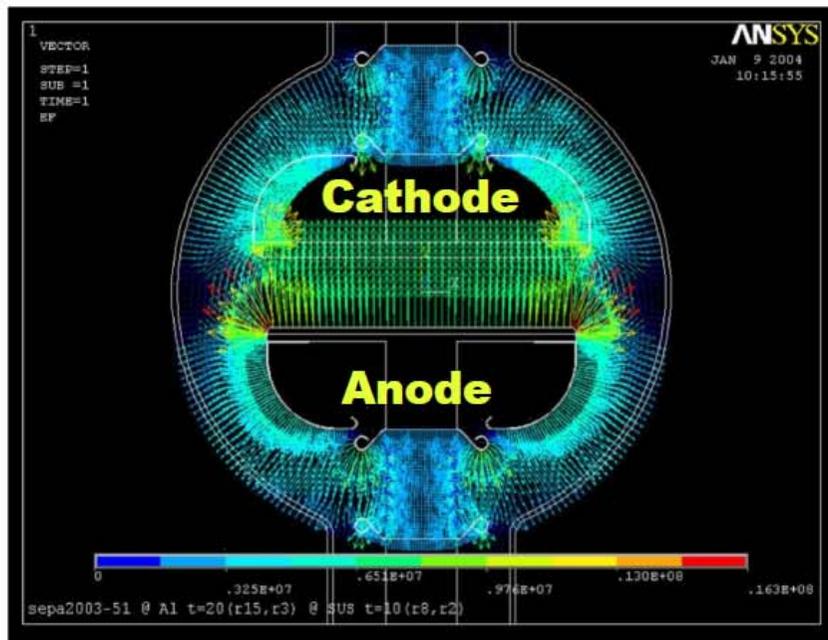
# K1.8 6m ES-Separator

- Long Run test at  $\pm 400\text{kV}$  has successfully completed.
- ESS is now waiting for the installation at K1.8BR.



# K1.8 6mES Separator

## Mitigate High Electric Field



- KEK-PS separator  
( $t=5$ ,  $R1=3$ ,  $R2=2$  [mm])  
Max. E  $2.11 \times 10^7$  [V/m]

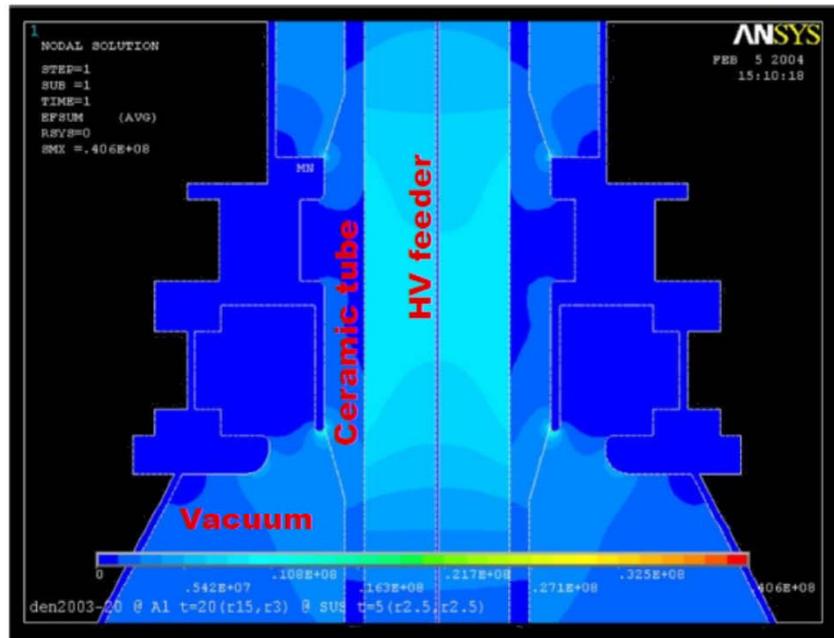
↓ reduce by 23%

- J-PARC separator  
( $t=10$ ,  $R1=8$ ,  $R2=2$  [mm])  
Max. E  $1.63 \times 10^7$  [V/m]

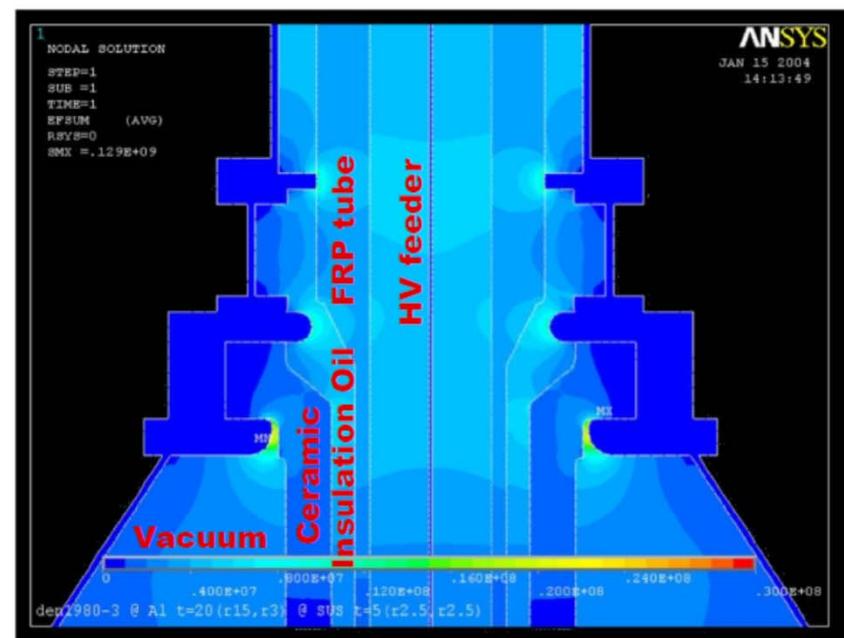
# K1.8 6mES Separator

## Cockcroft-Walton HV generator

### J-PARC



### KEK-PS



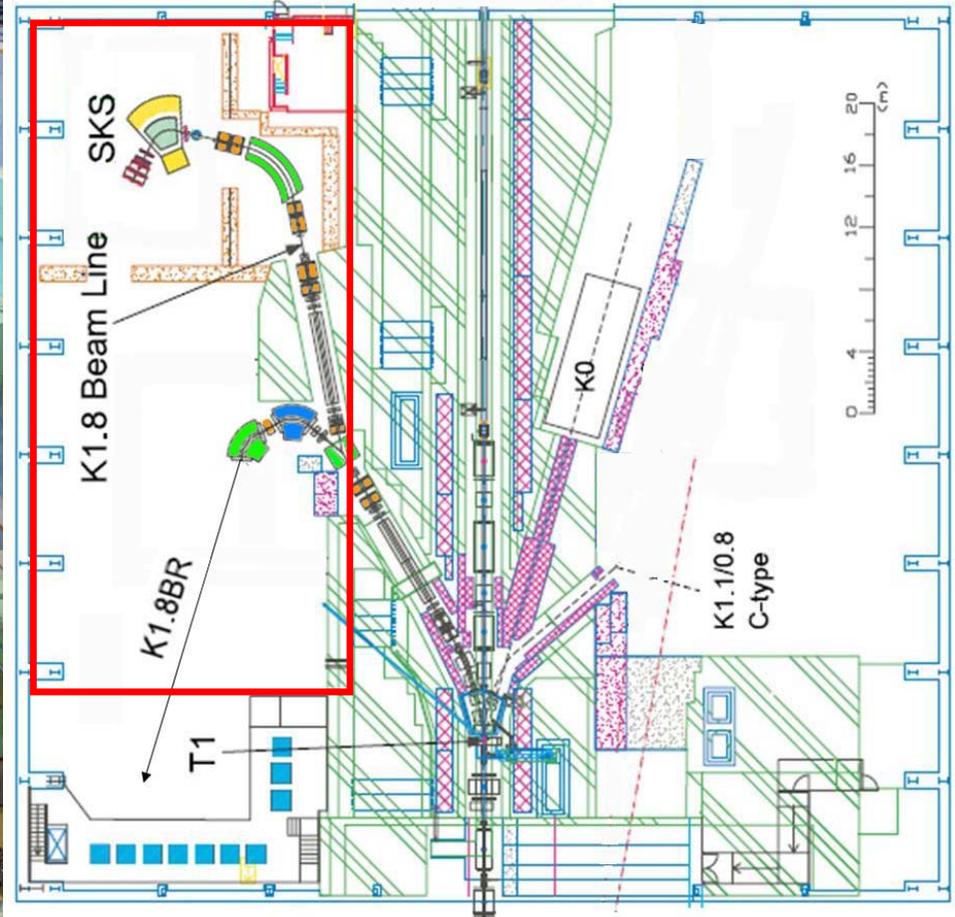
- **Remove organic insulation oil**
- **Replace FRP tube with Ceramic tube**
- **Simple structure**

# K1.8 6m ES-Separator





## 上流から見て左側



K1.8ビームラインでのSKSスペクトロメータ組み立て完了とともに、それと対になるビームスペクトロメータ(上図: 緑の弓形磁石)の設置が始まった。

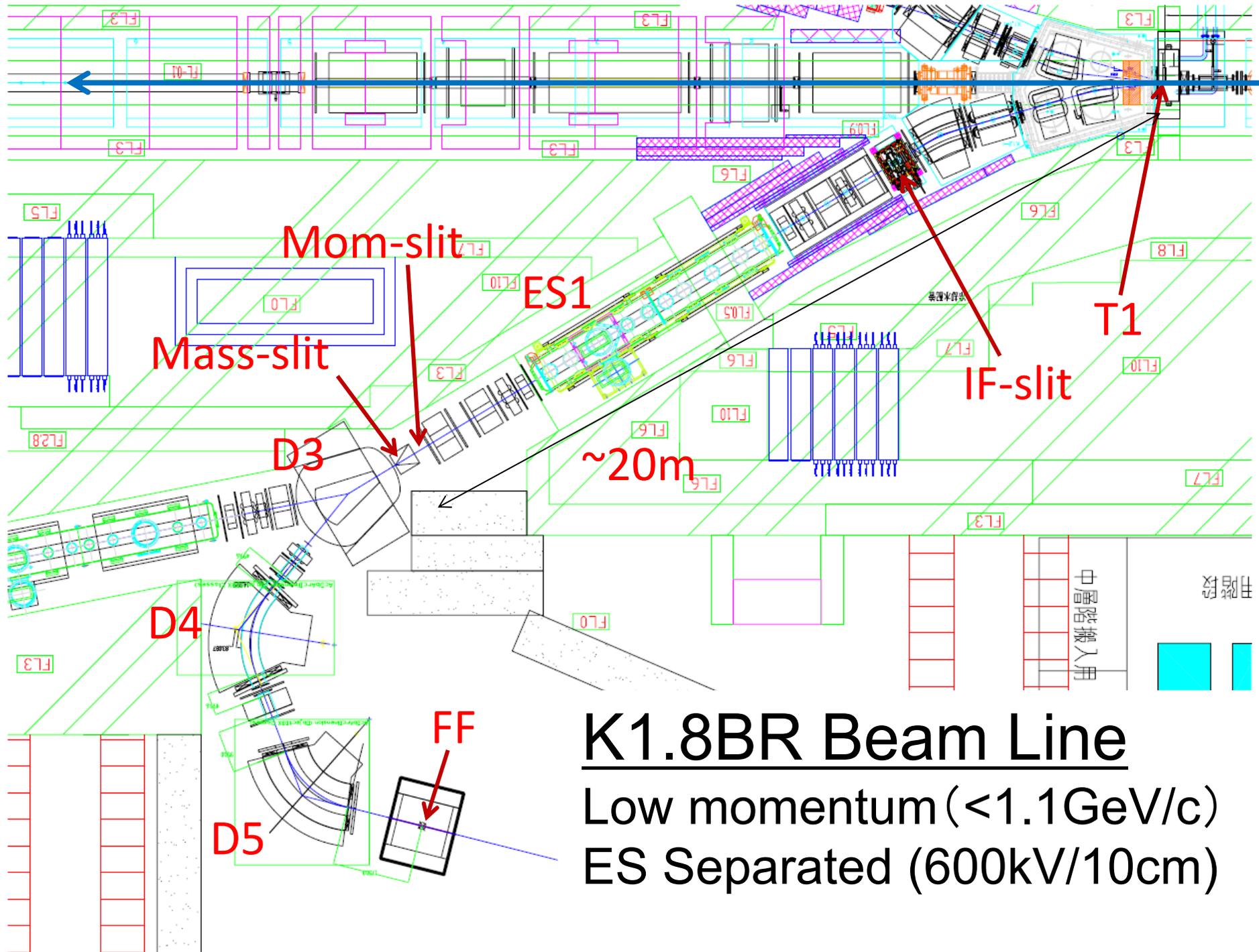
**ESS1: brand-new article  
photo from upstream**



**K1.8の  
ESS1,2**

**ESS2: remodeled of KEK-PS  
photo from upstream**

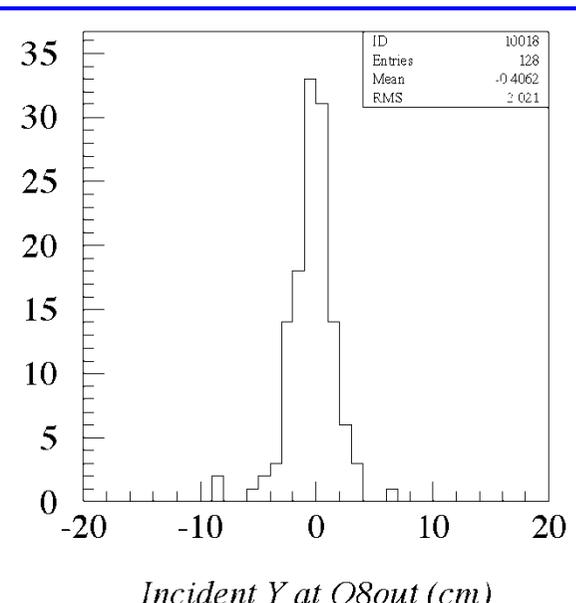
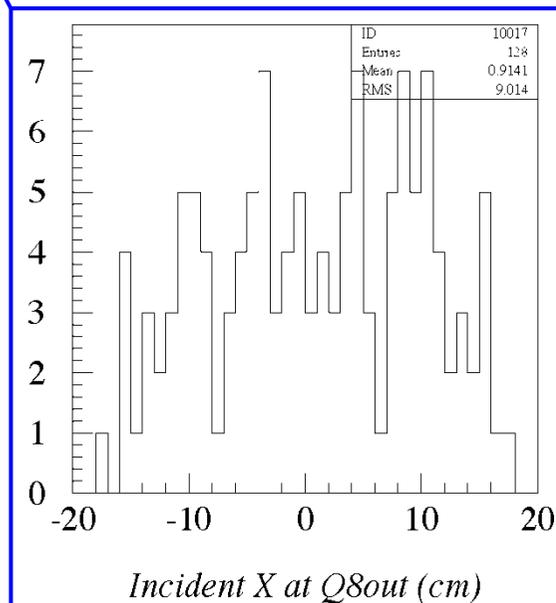
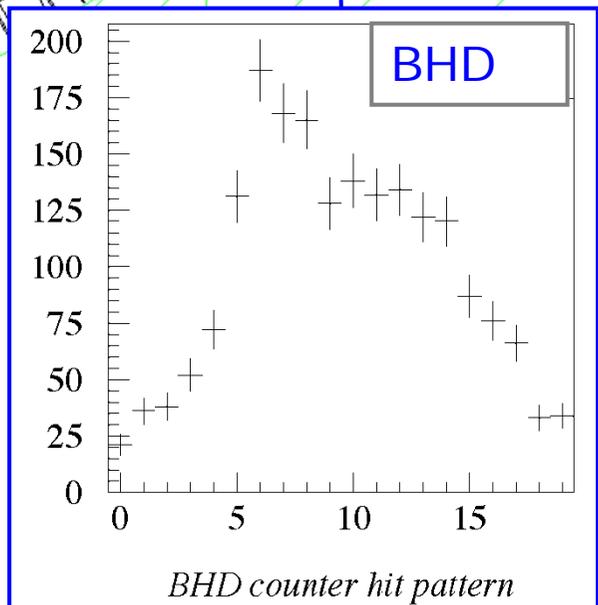
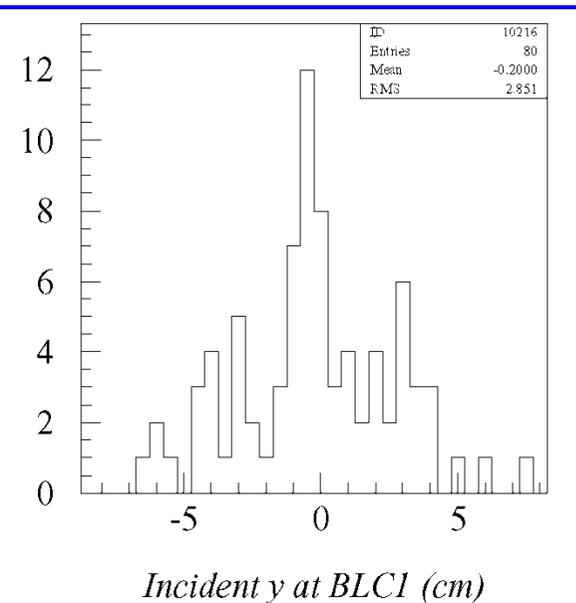
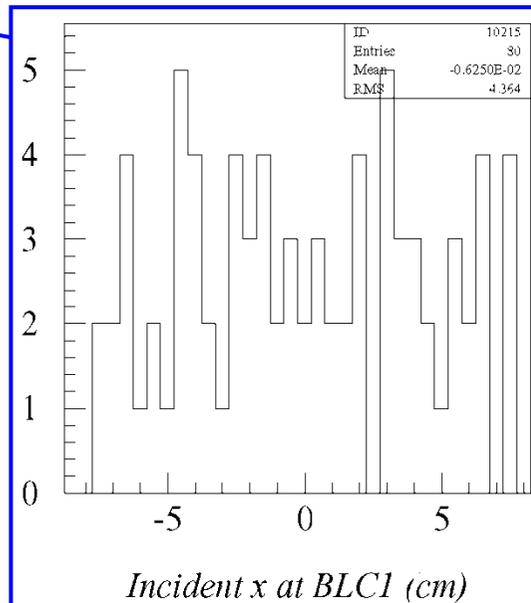
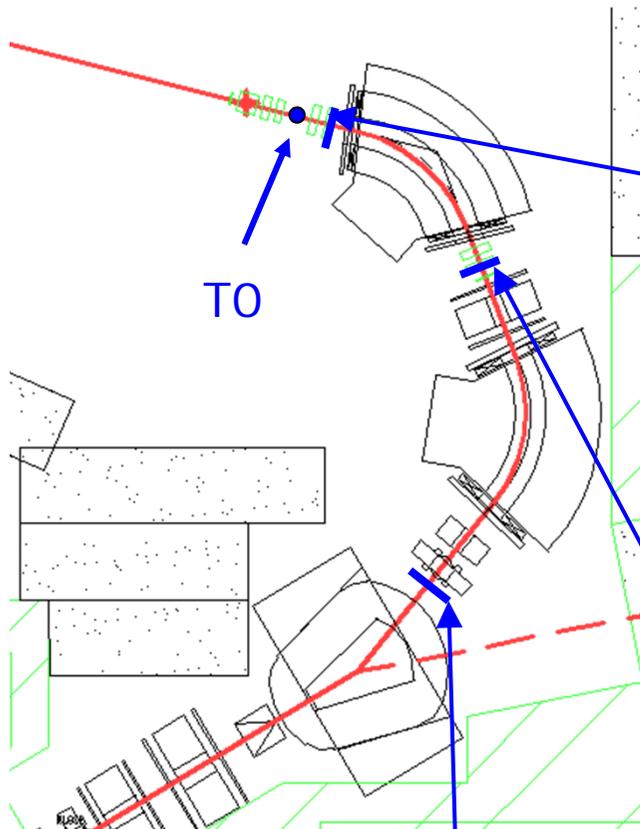




# K1.8BR Beam Line

Low momentum ( $<1.1\text{GeV}/c$ )  
 ES Separated (600kV/10cm)

# K1.8BRビームラインへの2次ビーム取り出し・輸送成功

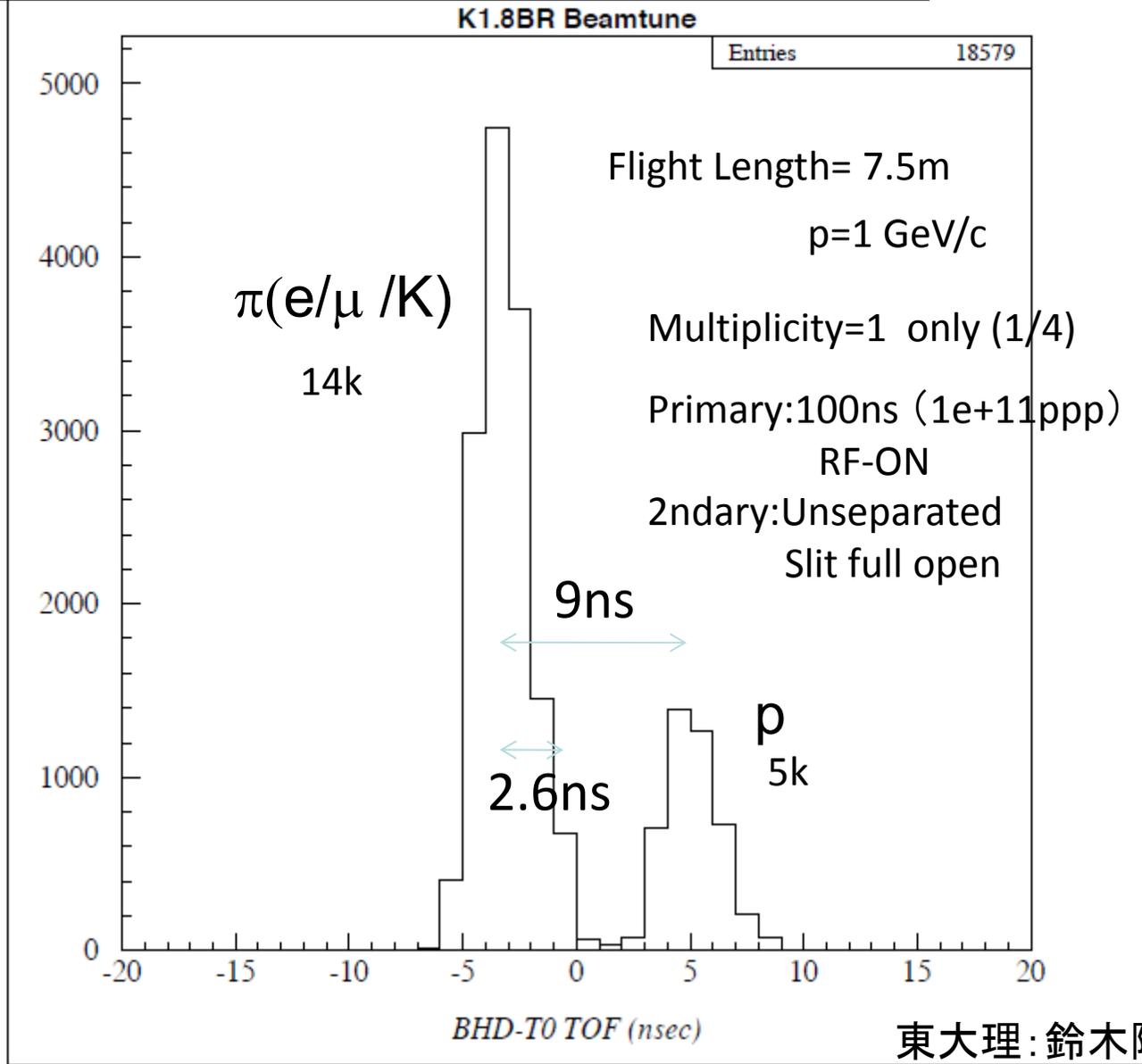


by E15/E17 Group

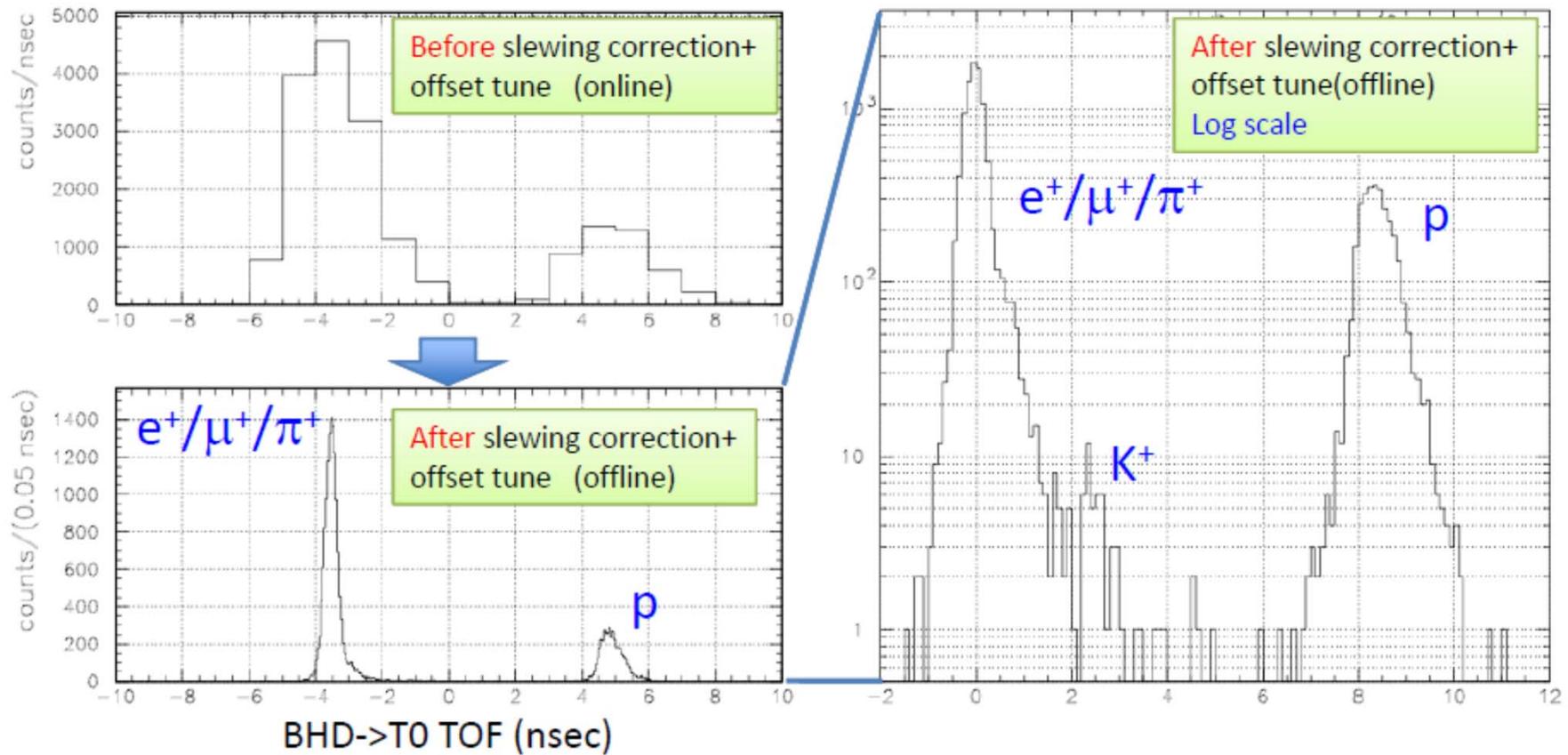
2009年2月12日12時56分

15日(日)のビームスタディで取得したデータより

**BHD-T0間の飛行時間(TOF)、補正無し生のデータ!** 2009/02/16 11.00



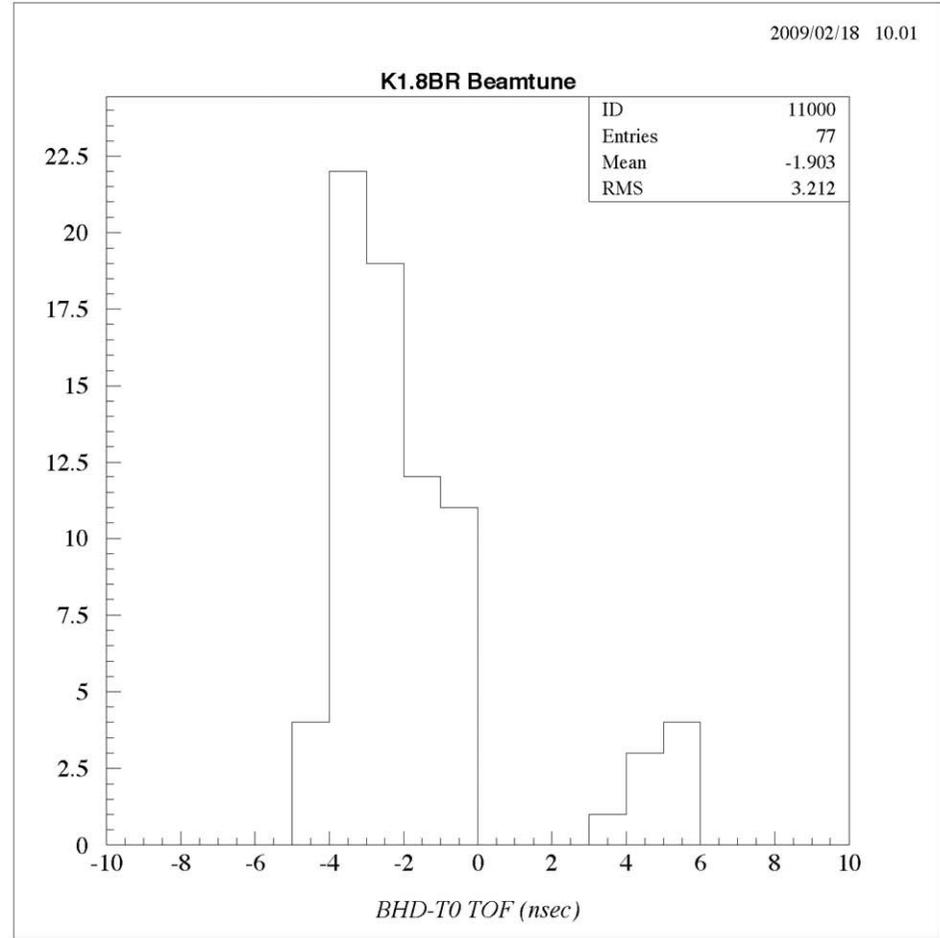
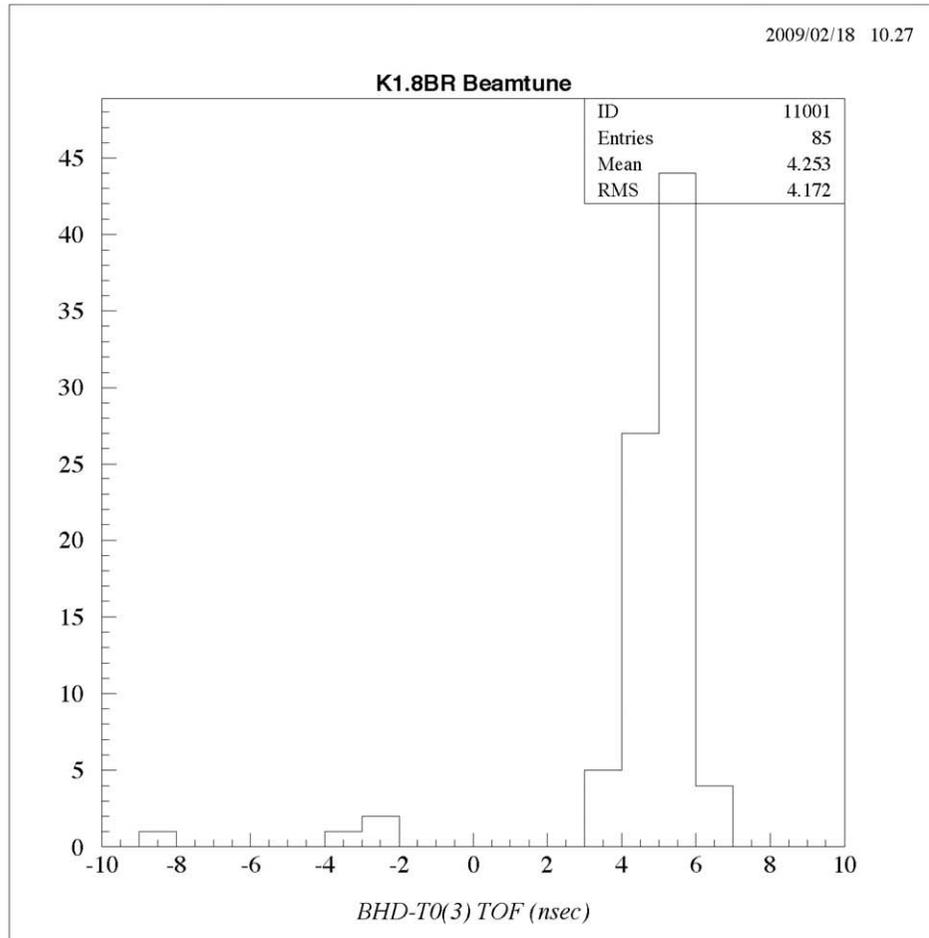
# K<sup>+</sup>の同定



$\pi$ -KのTOF差 $\sim 2.4$  nsec (計算値 2.3 nsec @1.1 GeV/c)  
 $e^+ + \mu^+ + \pi^+ : K^+ \sim 9000 : 40$  ( $\pi^+ : K^+$ の計算値 $\sim 540 : 1$  @1.0 GeV/c)  
 **$\Rightarrow$  BHD-T0のTOFスペクトル上にK<sup>+</sup>を同定**

BHD-T0間の飛行時間(TOF)を補正し、時間分解能を向上させた！

# ビームラインTOF+ESS

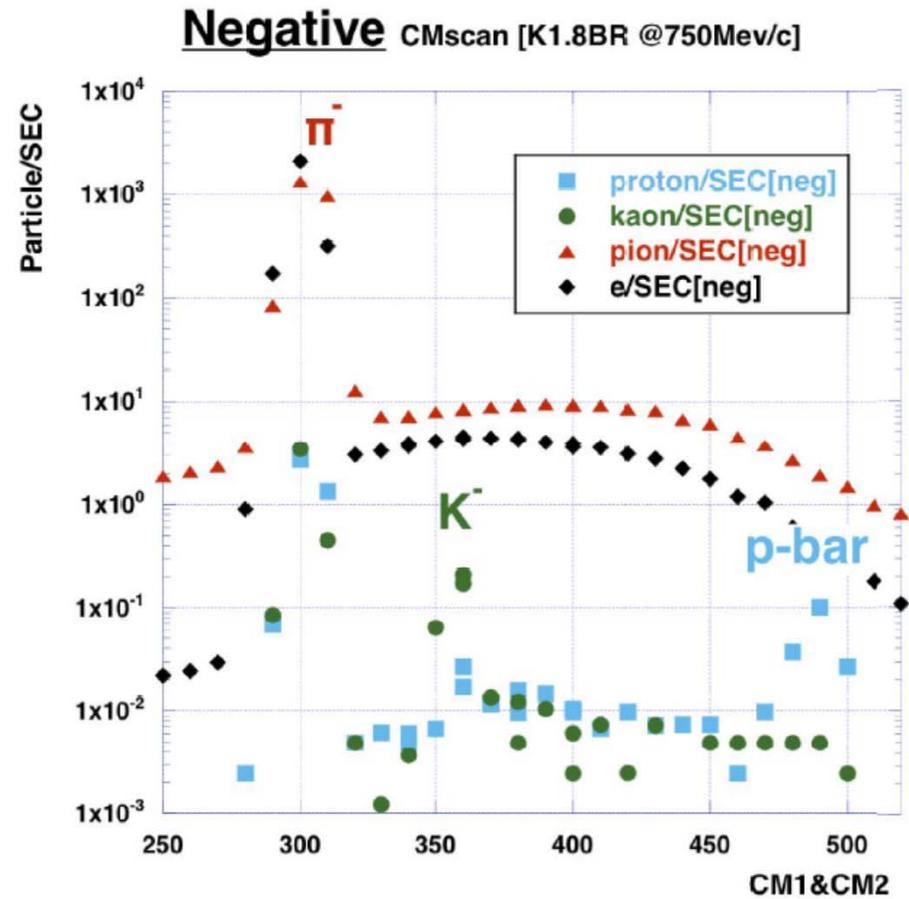
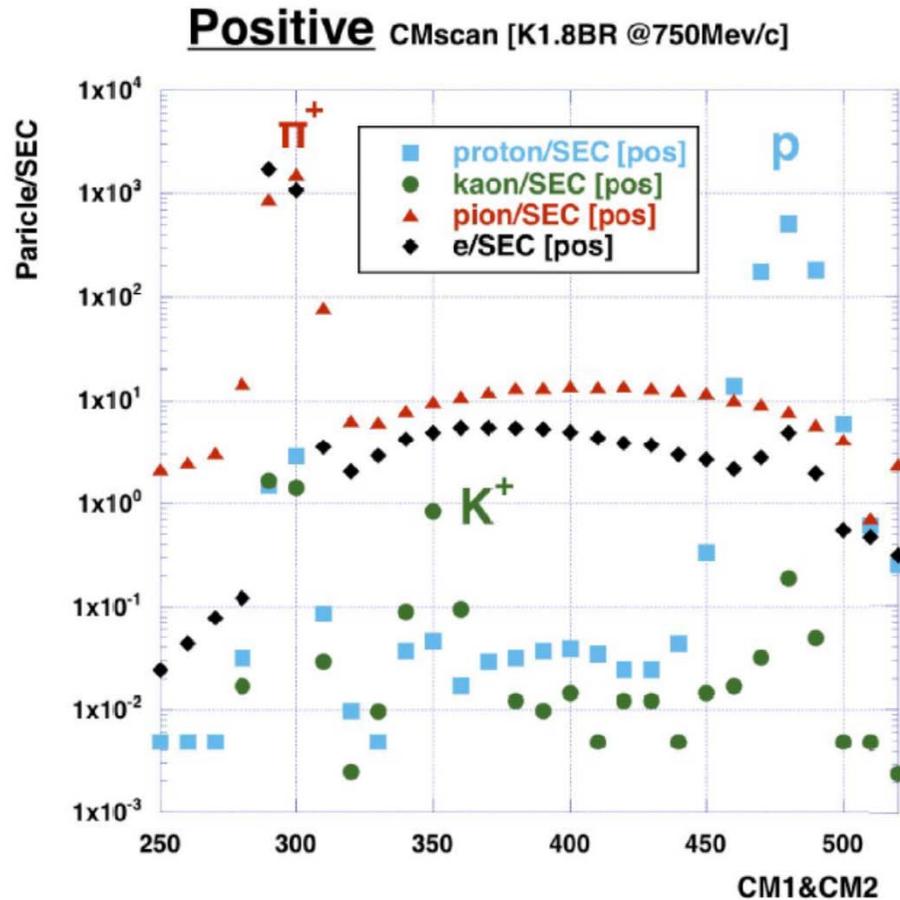


ほぼ陽子を選択したもの(左図)とほぼパイ中間子を選択したもの(右図)

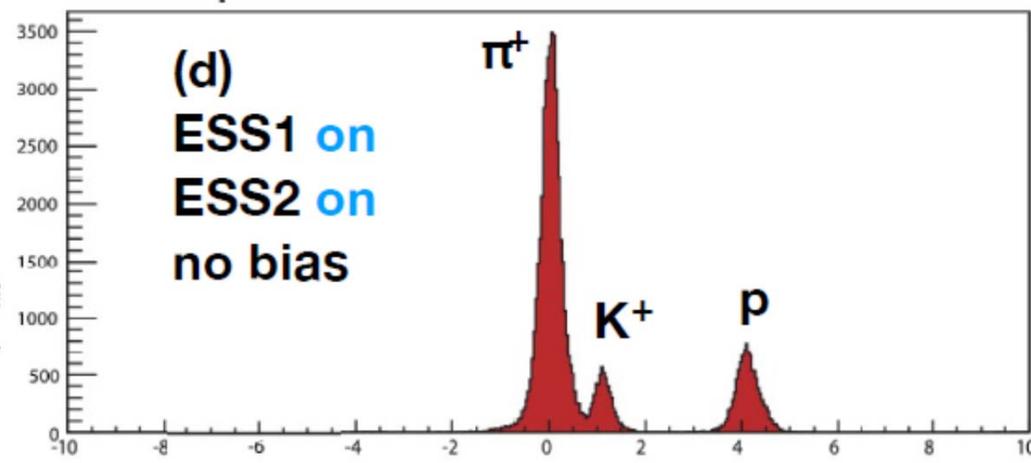
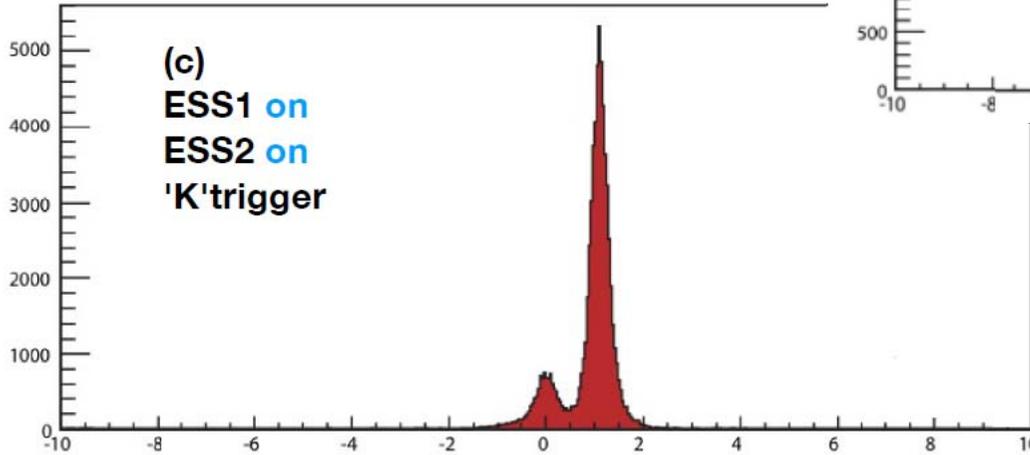
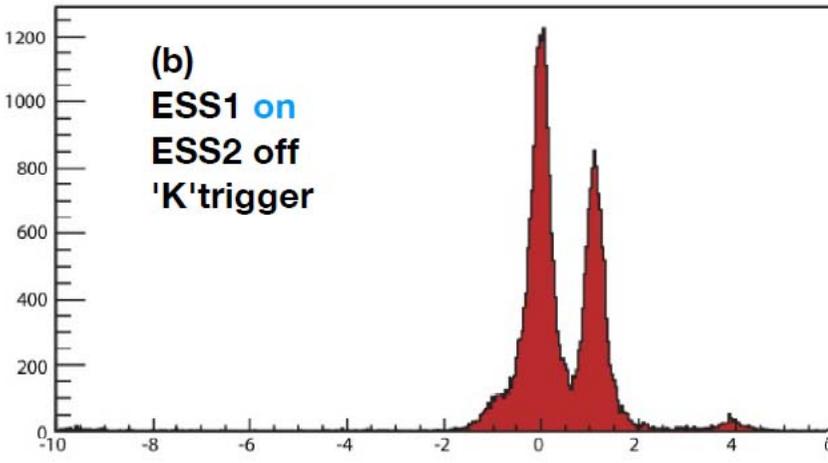
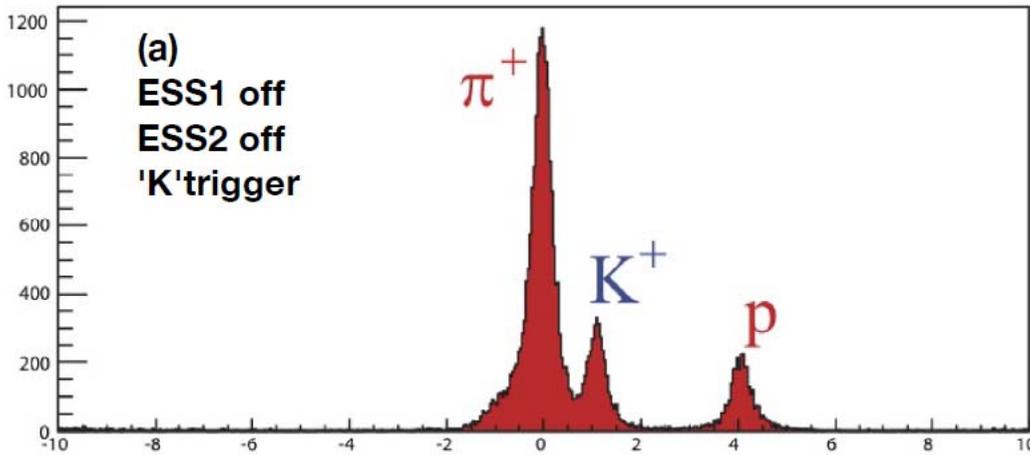
→ESSは正しく作動している!( $\pm 150\text{kV}/10\text{cm}$ 電極間隙)

# 一段での質量分離 (K1.8BR)

Particle separation curves for 0.75GeV/c secondary beams at K1.8BR experimental area



# 1.8 GeV/cビーム中のK中間子 ±200kV



# ちょっと無駄話

## 質量分析器の事

- 電場と磁場の組み合わせ→質量の分離
  - 磁場→運動量分析→ $mv$ の分離
  - 電場→エネルギー分析→ $mv^2/2$ の分離
- 分解能=質量分散／像の幅
  - イオン光学的工夫により、数万～百万
  - 高分子の質量分析が可能

# 電場と磁場の組み合わせ→質量の分離

- ・ 大阪大学超高分解能質量分析器→  
    実に最高分解能100万！
- ・ 分子量1,000,000と1,000,001を分離できる！

原子質量の高精度測定→  
高分子の質量分析

ペプチドの質量分析が可能になった！

– 原子核の装置→医学  
の装置

– 高分子のイオン源を  
どう造るか??

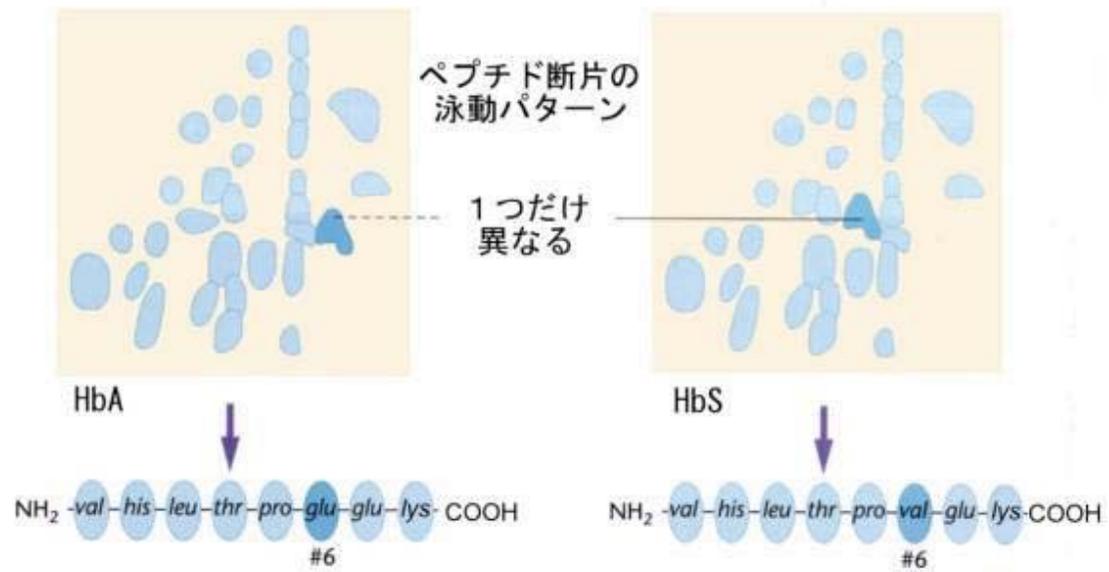


CQH型質量分析器

# 高分子の質量分析の進化

- 最初の高分子イオン源は、シリコンウイスキーによるフィールドディソープシオン型
- 鎌形赤血球症がヘモグロビンのペプチド鎖中の特定アミノ酸の置換であることを劇的にデモンストレーション
- 阪大理学部と阪大蛋白質研究所の共同研究が始まった。1979年頃
- 田中耕一のレーザーディソープシオンイオン源
- ジョン・B・フェンのエレクトロスプレーイオン源
- 2002年ノーベル化学賞

# 鎌形赤血球症



- 典型的分子病
  - あるペプチドのグルタミンがバリンに置換している。

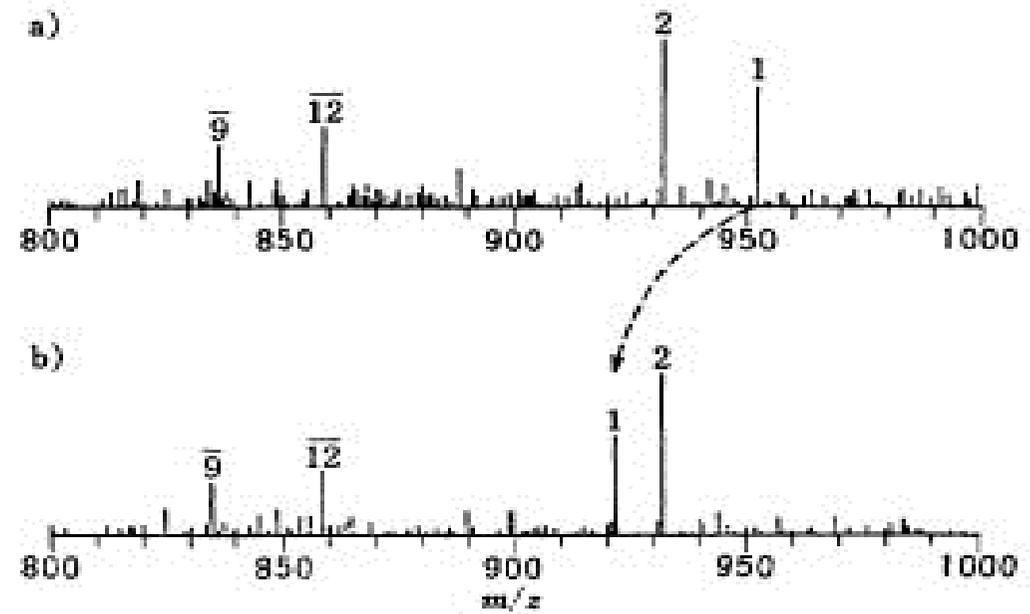
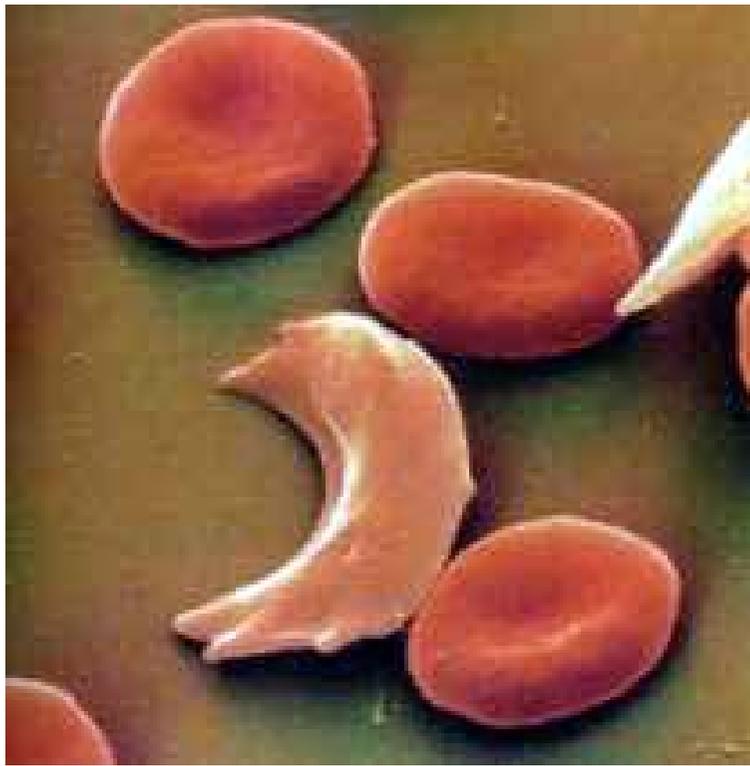


図 10 鎌形赤血球貧血症の異常ヘモグロビンSのマススペクトル

- a) 正常ヘモグロビンβ鎖
- b) 異常ヘモグロビンS

# 高分子の質量分析の始まり

社団法人 日本農芸化学会の雑誌「化学と生物」

**Vol.20** , No.4(1982)pp.242-250

マススペクトルによるペプチドの構造解析

松田 久 大阪大学教養部 [発行日: 1982/04/25]

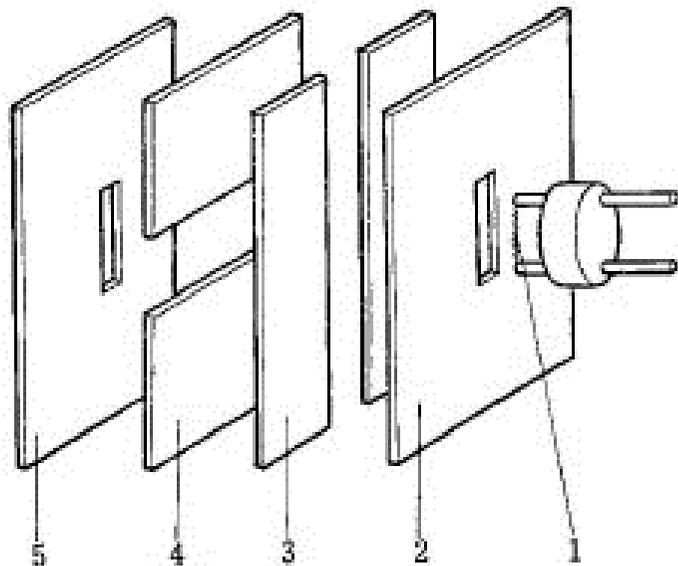


図 3 FD イオン源

1. エミッター, 2. 対向電極, 3, 4. フォーカス電極,
5. 主スリット

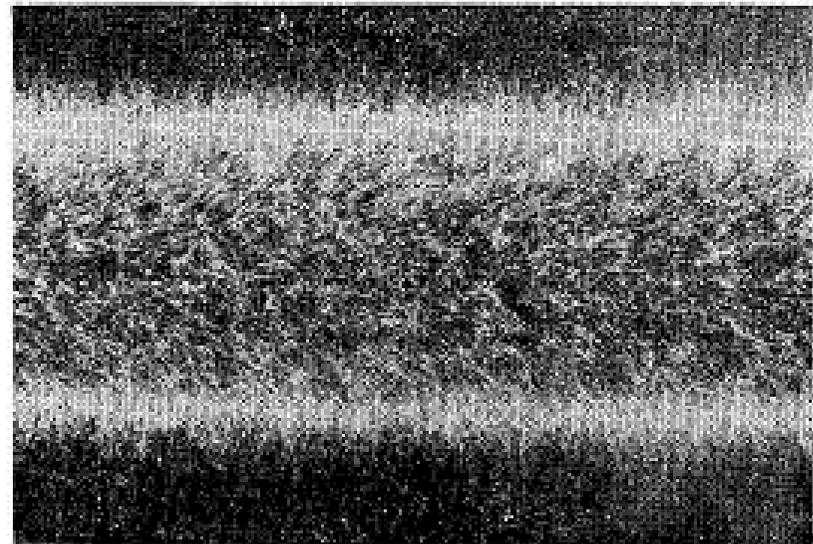


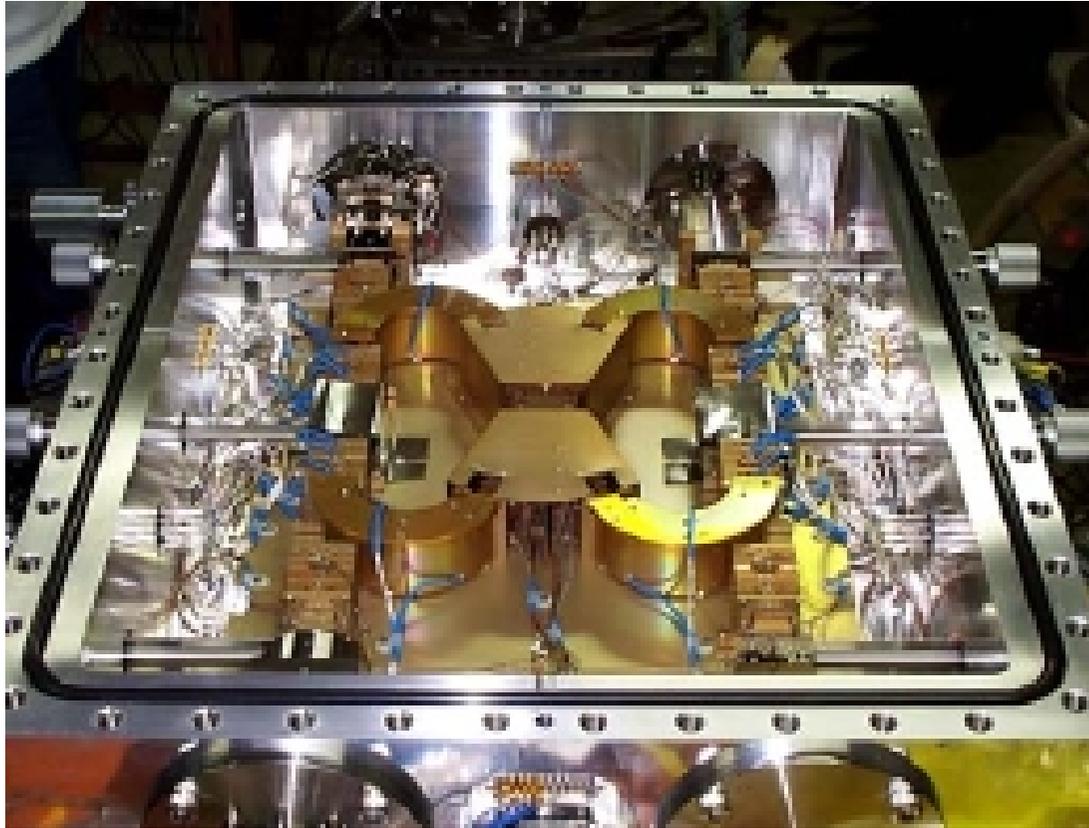
図 4 シリコンエミッターの電子顕微鏡写真

# ちよつと無駄話(続き)

## 質量分析器の事

- 電場と磁場の組み合わせ→質量の分離
  - 磁場→運動量分析→ $mv$ の分離
  - 電場→エネルギー分析→ $mv^2/2$ の分離
- 分解能=質量分散／像の幅
  - イオン光学的工夫により、数万～百万
  - 高分子の質量分析が可能
- 実はTOFで速度 $v$ を直接測るのも等価
  - 飛行長を長く取れば、容易に分解能もUP!
- 実はサイクロトロン共鳴を用いるのも等価

# マルチターンTOF型質量分析器



彗星探査ロゼッタミッションに搭載する質量分析計のラボラトリーモデル（阪大理：質量分析研究室）

- 4個の円筒電場と28個の四重極レンズで構成。
- 真空容器の大きさは60 × 70 × 20 cm, 分析部の大きさは40 cm × 40 cm (扇形電場の軌道半径が50 mm)。
- イオンを501.5周回 (飛行距離644 m) させることに成功。
- 電子イオン化イオン源でCO-Nのダブレットを測定し, 飛行時間型の世界最高となる分解能35万を達成。