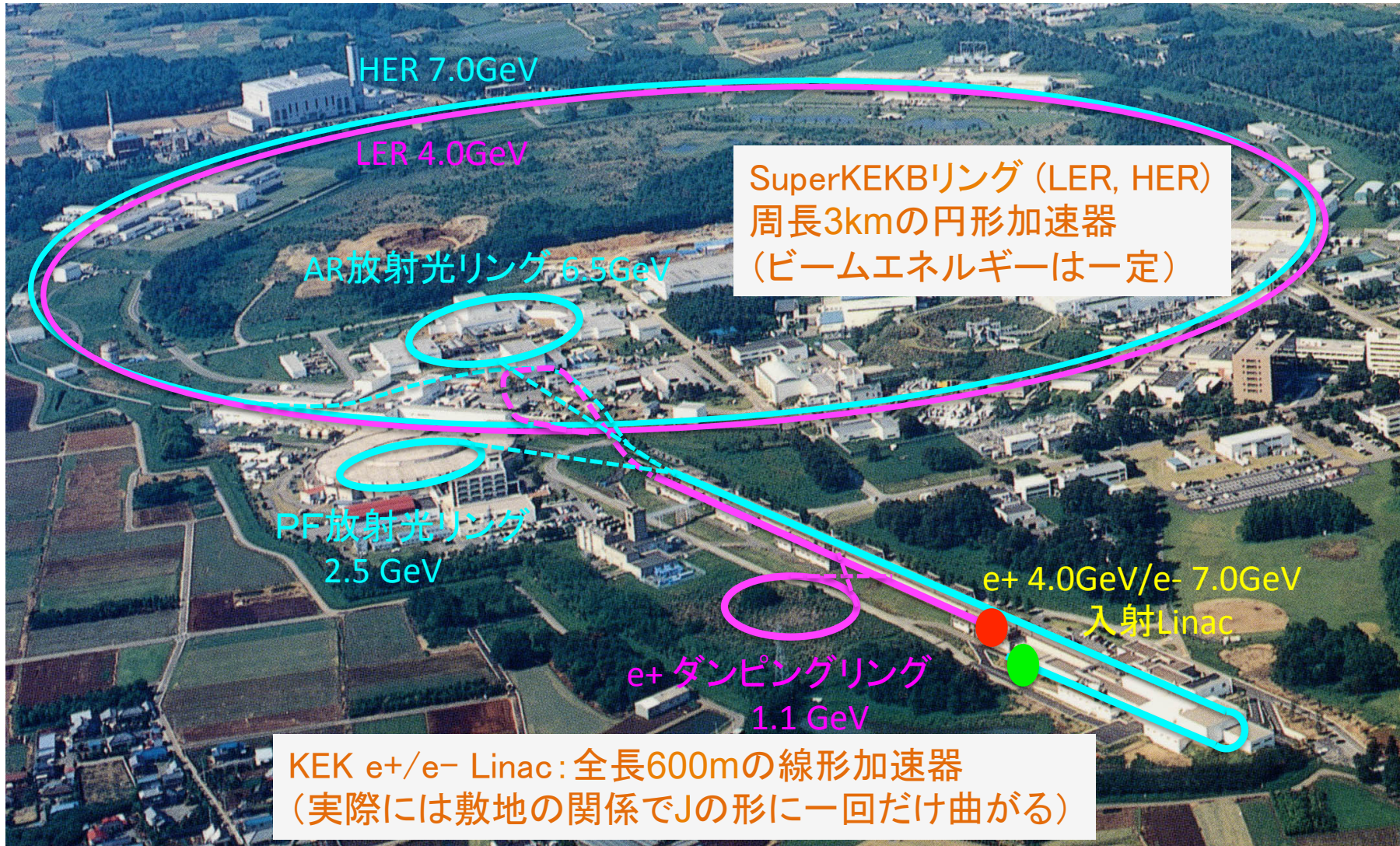


# Linacビーム調整のための基礎知識

2018. 11. 07

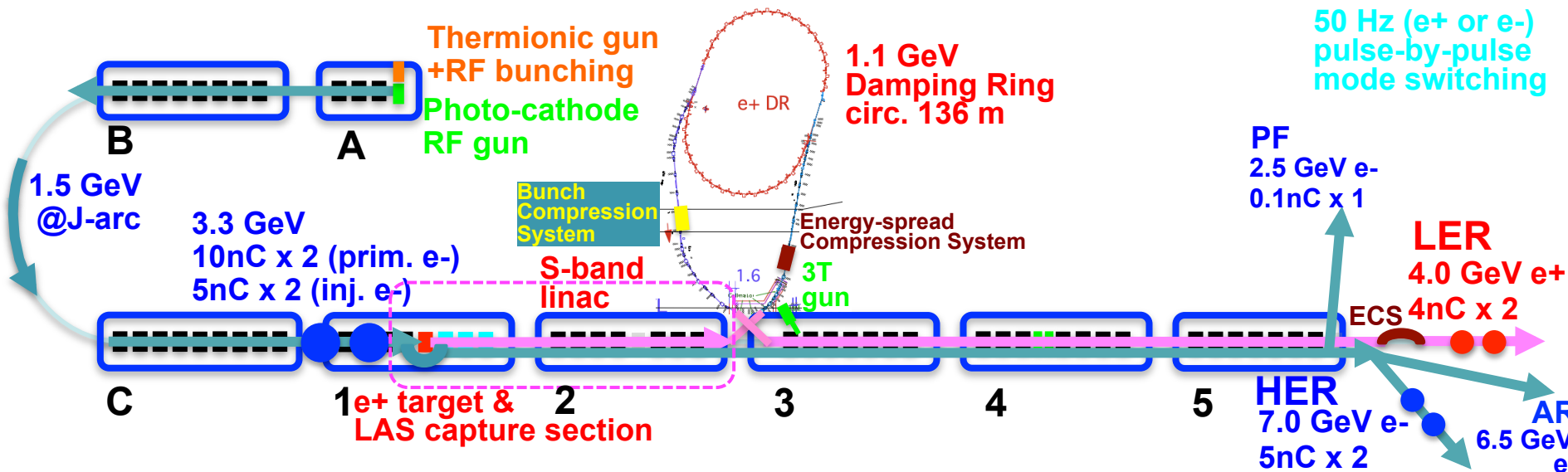
紙谷 琢哉

# KEK 電子陽電子 加速器



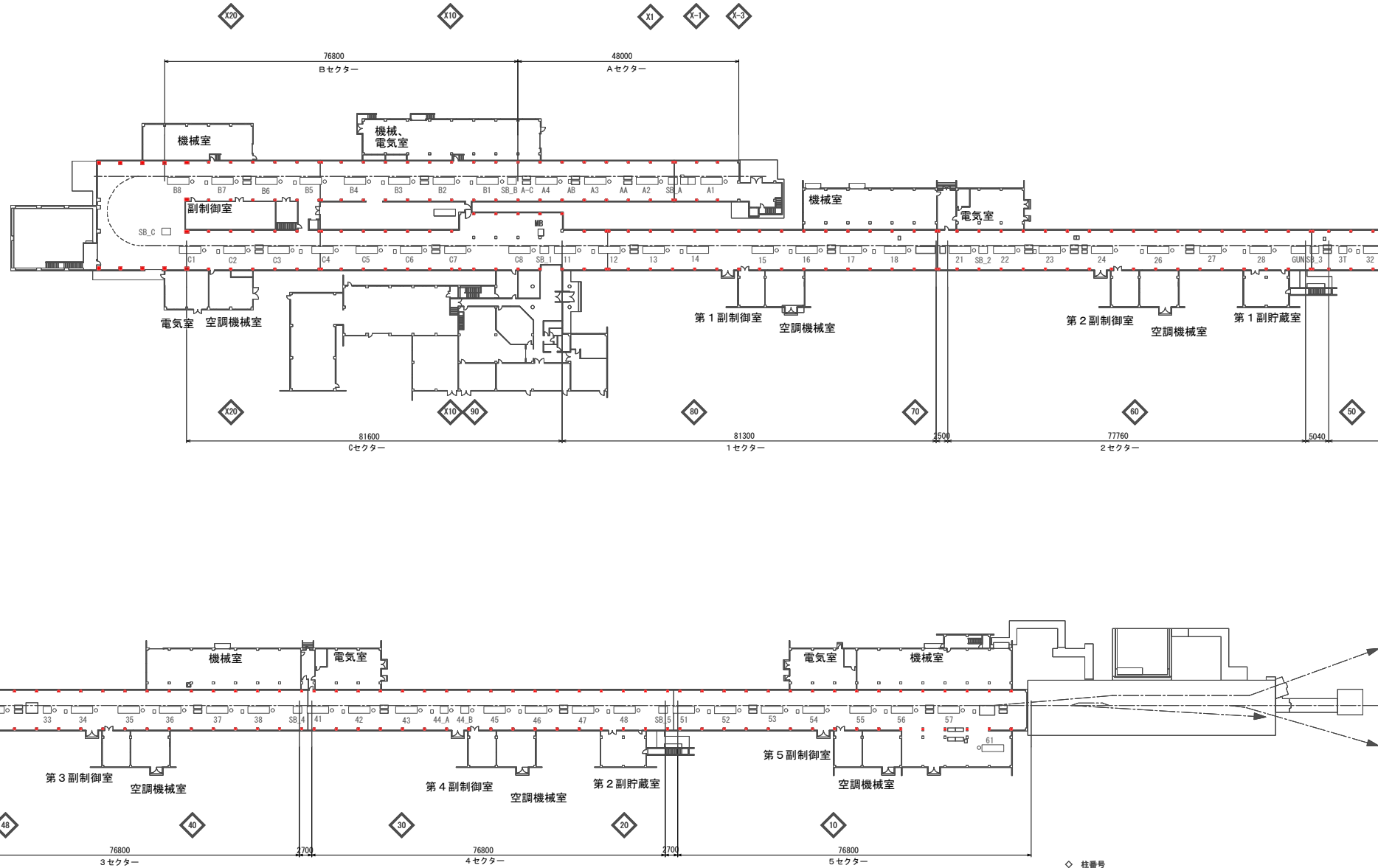
# KEK 電子陽電子 線形加速器 (Linac)

- KEK e<sup>+</sup>/e<sup>-</sup> Linac は4つのリング(HER 7.0GeV, LER 4.0GeV, PF 2.5GeV, PFAR 6.5GeV)にビームを供給する。
- HER用 e<sup>-</sup> ビームは Rf-gun 入射部(A1) [1階]で生成し、PF, PFAR用 e<sup>-</sup> 及び e<sup>+</sup> 生成用 primary e<sup>-</sup> ビームは 熱-gun 入射部(AT) [2階]で生成する。
- これらのビームは 1.5 GeV で J-arc を周り、180度進行方向を変える。
- 1-sectorの真ん中 1-5 部にある陽電子生成部で e<sup>+</sup> ビームが生成され 2-sector end までで 1.1 GeV に加速されて DR に入射され、DRで damping した約40ms後に、3-sector に再入射される。





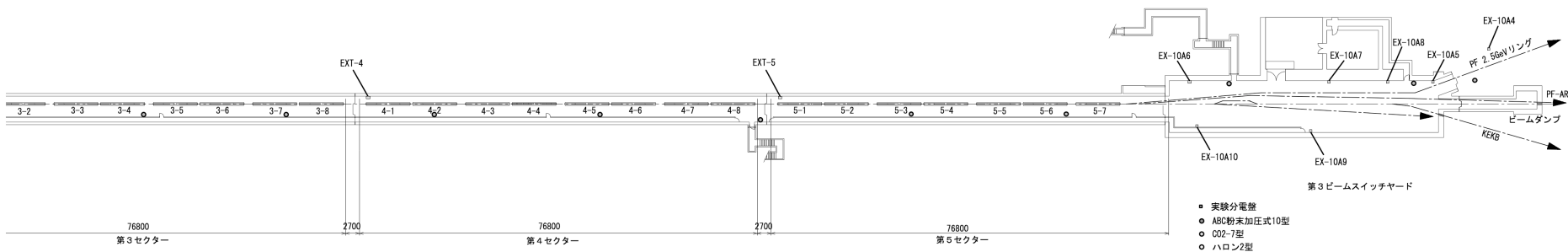
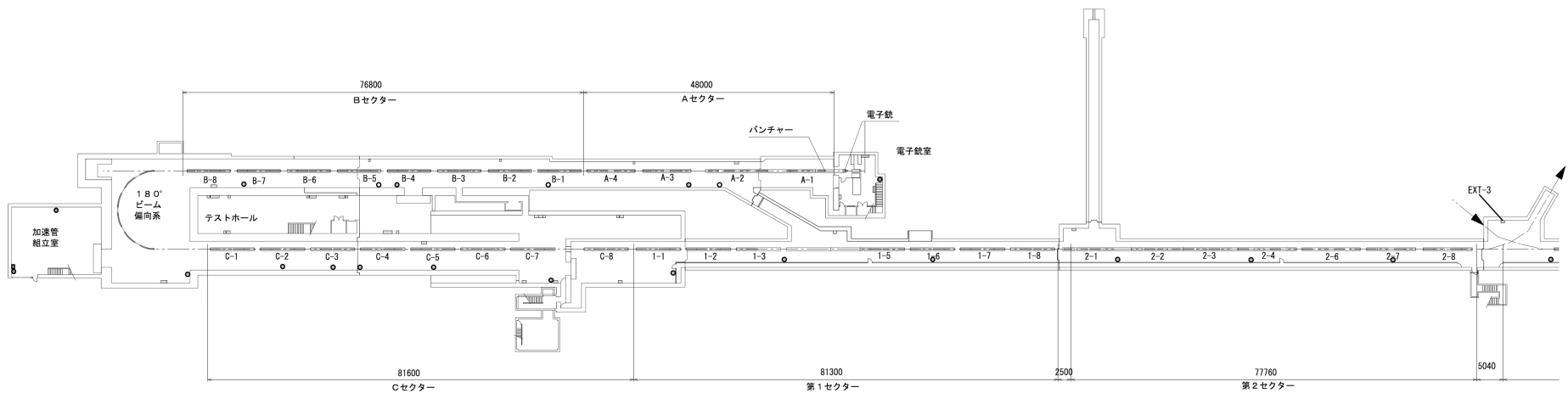
# Linac Klystron-Gallery全体図



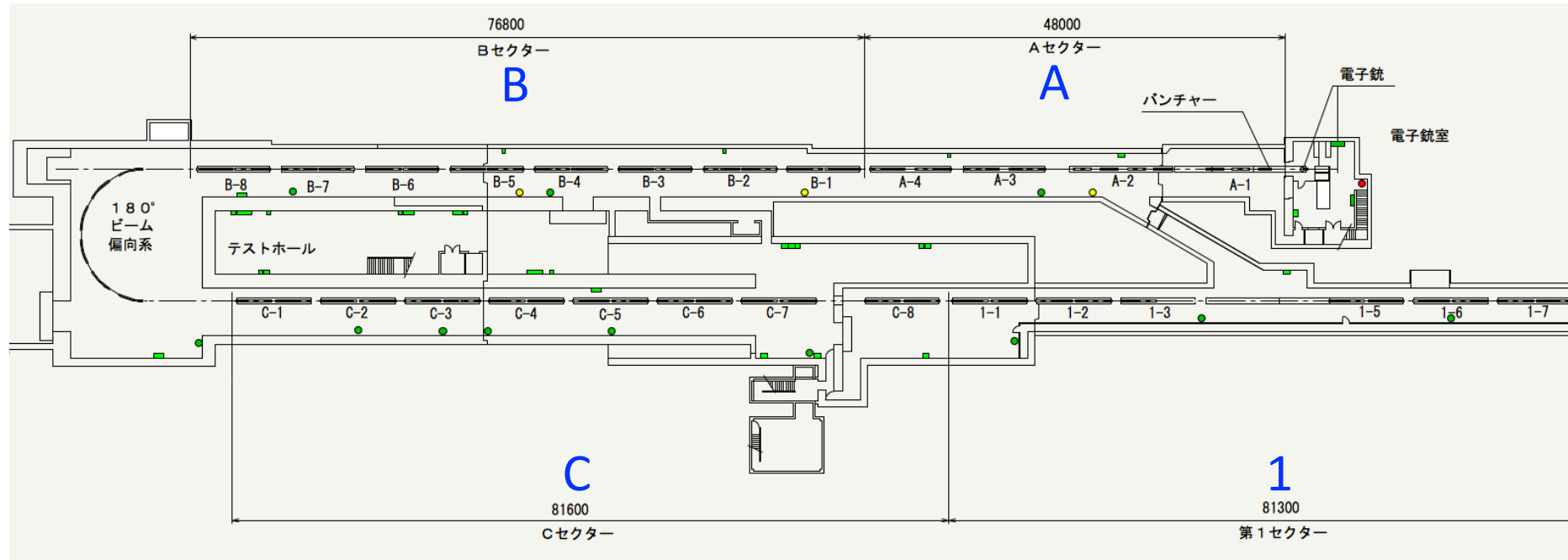
◇ 柱番号



# Linac Tunnel 全体図



# Linac Tunnel (A,B,R,C,1-sector拡大図)

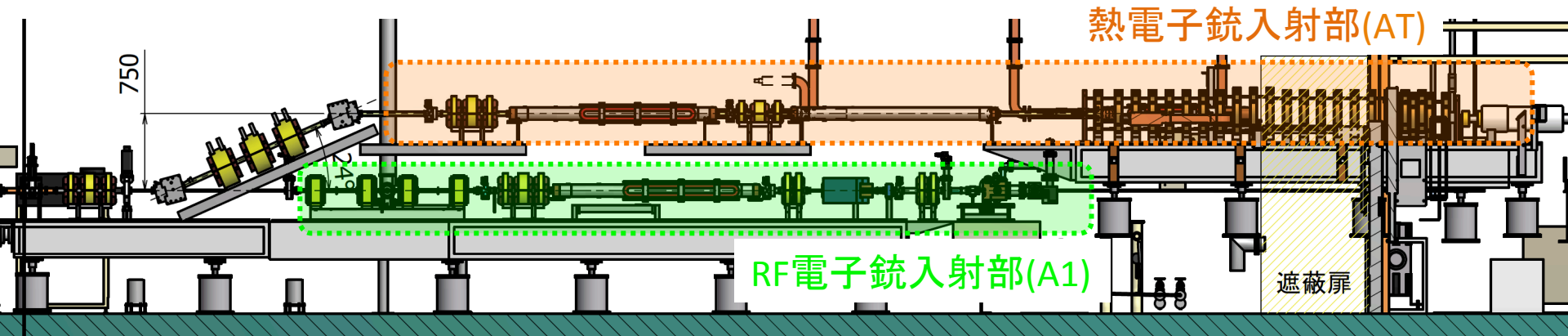


# KEK 電子陽電子 Linac の変遷

- 1980年より: PF 2.5 GeV e- Linac
  - ❖ 400m長の線形加速器を建設(1, 2, 3, 4, 5-sector)
- 1984年より: TRISTAN 2.5 GeV e+/e- Linac
  - ❖ 0.25 GeV primary e- Linac & 0.25 GeV e+ Linac の増設(P-sector)
- 1999年より: KEKB 8.0 GeV e- / 3.5 GeV e+ Linac
  - ❖ SLEDの導入
  - ❖ A, B, C-sectorの増設(これによりP-sectorは消滅)
  - ❖ J-arc部設置
  - ❖ e+ 生成部の移設(2-1へ)
- 2016年より: SuperKEKB 7.0 GeV e- / 4.0 GeV e+ Linac
  - ❖ RF-gun入射部の増設(熱電子銃入射部の2階建て化)
  - ❖ DR設置
  - ❖ e+ 生成部の移設(1-5へ、DR入射energy 1.1 GeV確保のため)



# AT入射部(熱-gun)



## ● 熱電子銃入射部の構成

- ❖ Thermionic gun
- ❖ SHB1 (114 MHz)
- ❖ SHB2 (571 MHz)
- ❖ Pre-buncher
- ❖ Buncher
- ❖ 2m長加速管 x2

## ● RF-gunと2階建て

- ❖ emittance保持のため  
RF-gunからのビームは直進し、  
熱-gunからのビームは24度ライン  
を通して合流する。

## ● Beam Performance

### ❖ HER入射用ビーム

- 電荷量 ~ 1 nC@Gun
- エミッタンス ~ 160/300 um(H/V)@Linac  
終端

### ❖ 陽電子生成用一次電子ビーム

- 電荷量 ~ 10 nC@Gun → 7 nC@target

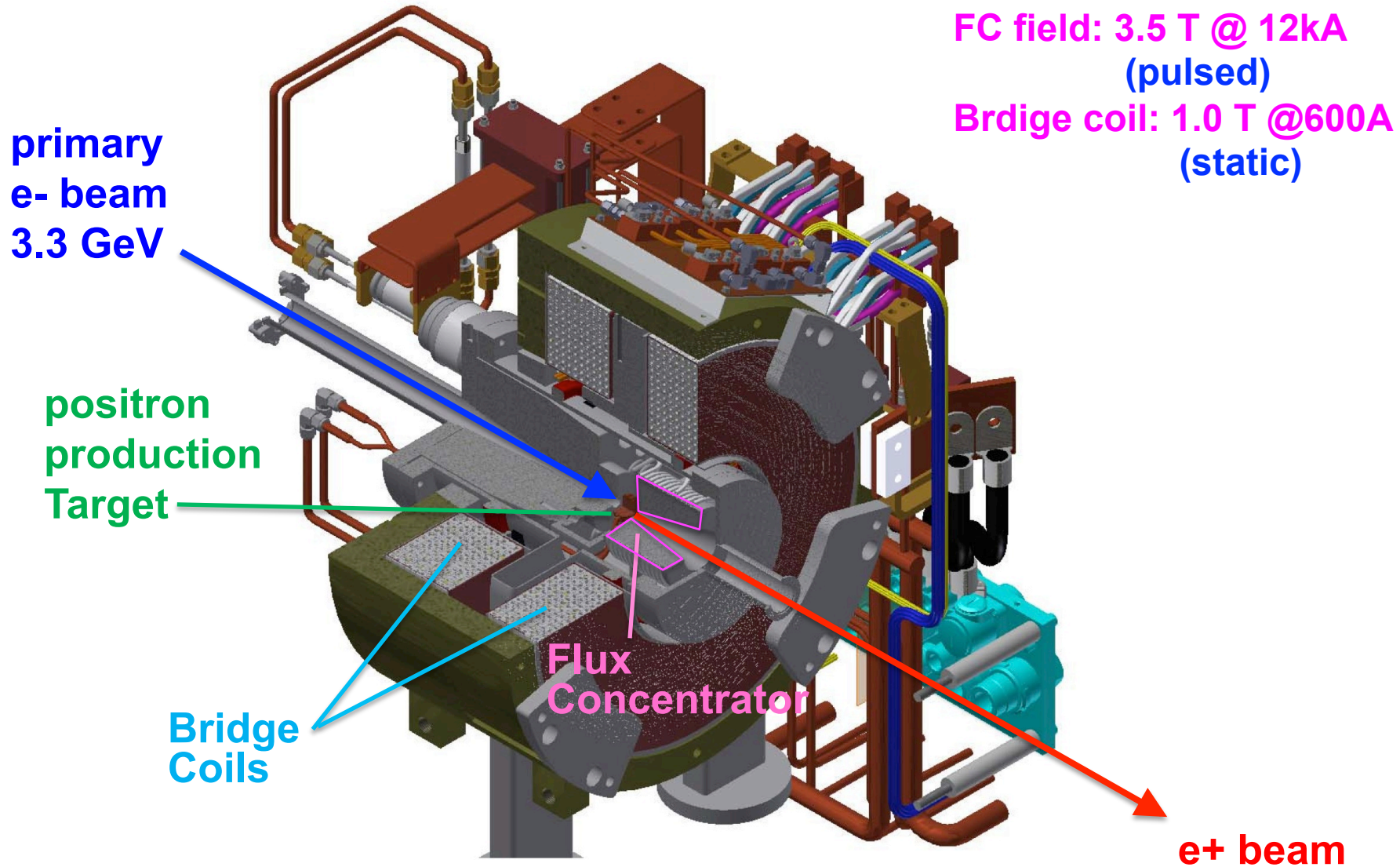
### ❖ PF, PFAR入射用ビーム

- 電荷量 ~ 0.3 nC@Gun

AT = A-sector Temporary unitの意味

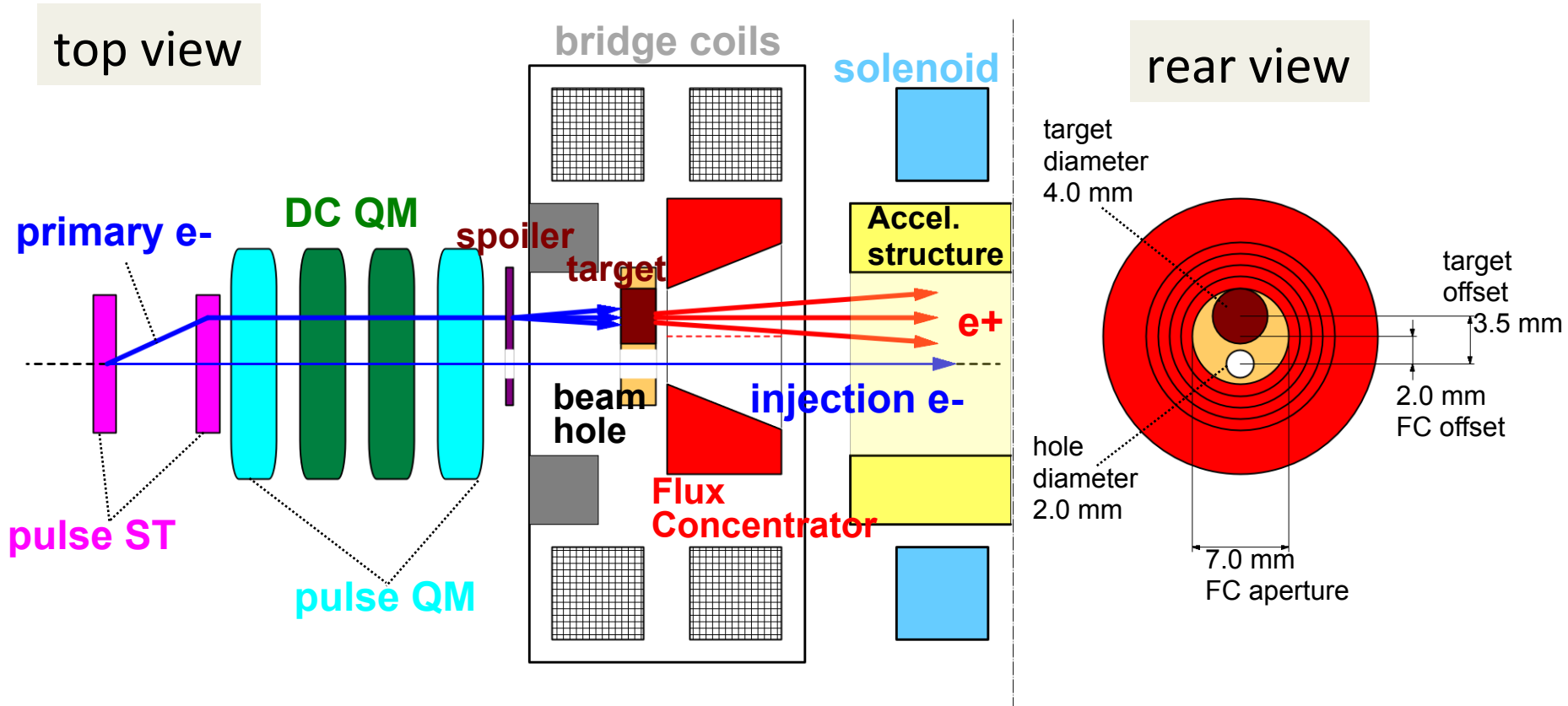


# 陽電子生成部





# target offset & beam hole

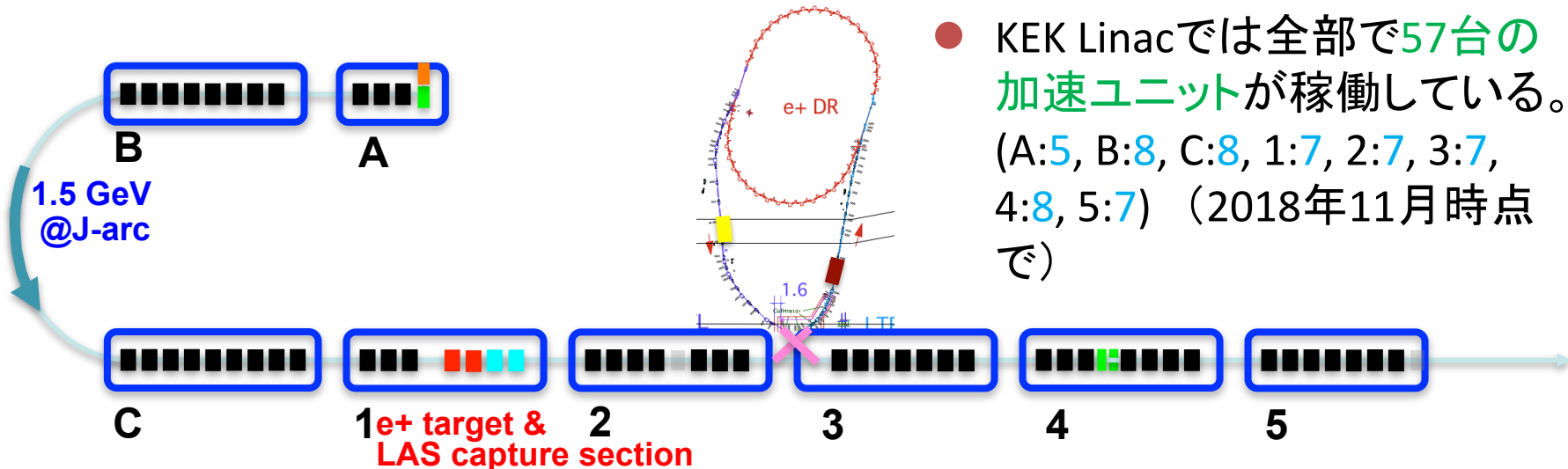
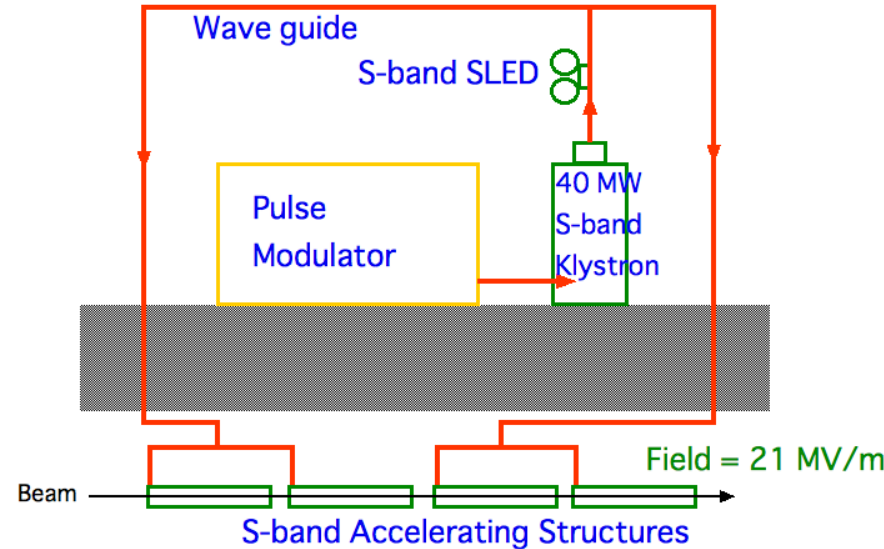


- injection e- beam : on axis to preserve low emittance
- primary e- beam : 2.5 mm off axis to minimize e+ yield degradation (target offset 3.5 mm, FC offset 2.0mm)

# 加速ユニットとは？

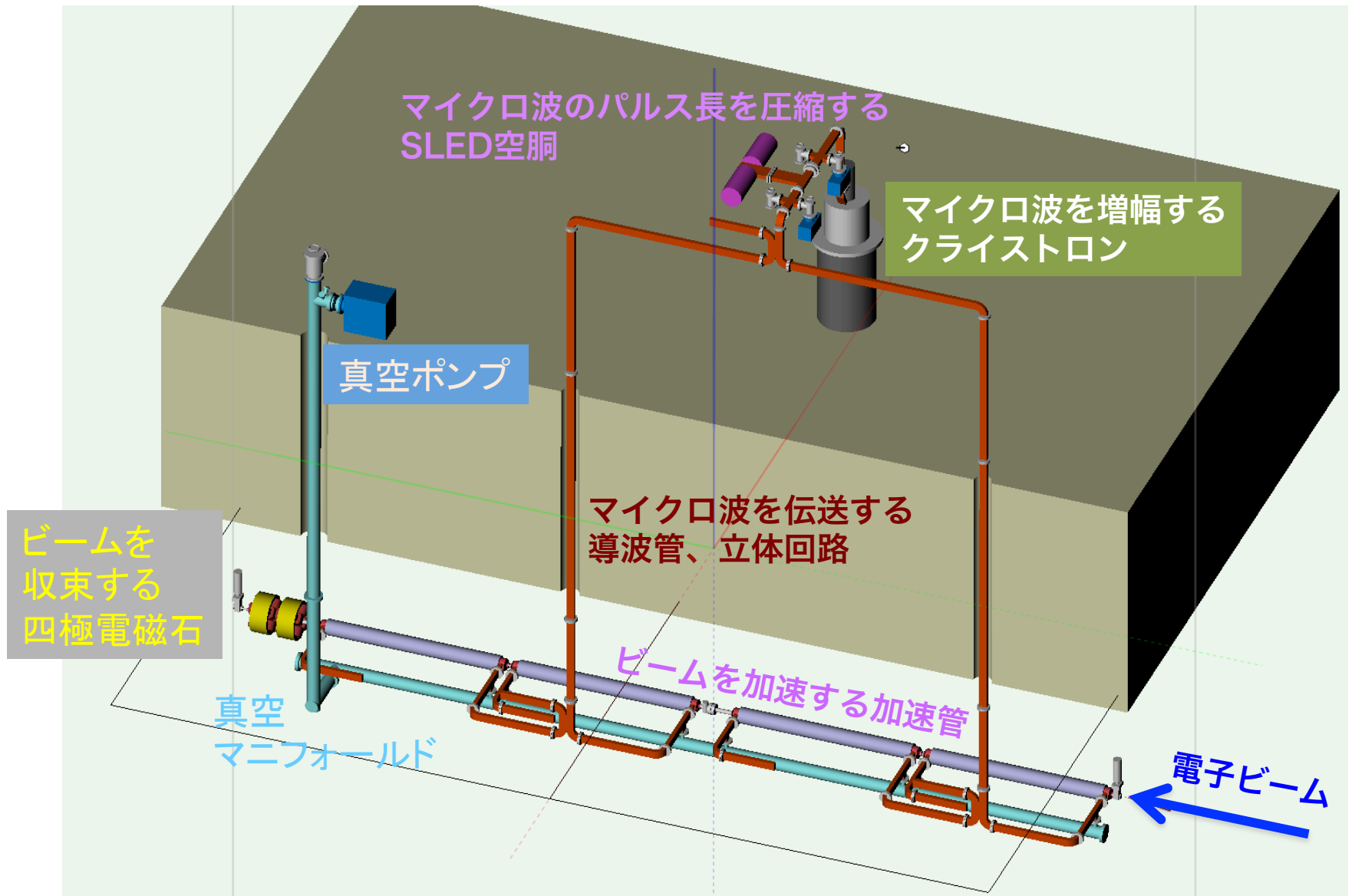
- Linacは"加速ユニット"と呼ばれる構成単位の繰り返しでできており、1つのユニットは1台のクライストロン(KL)に属している。1つのクライストロンからのRFパワーは標準的には4本の加速管(各2m長)に等分割して送り込まれビームを加速する。
- ユニットの約8台ごとに、セクターと呼ばれる領域に分割されている。

Present S-band accelerator unit



- KEK Linacでは全部で57台の加速ユニットが稼働している。(A:5, B:8, C:8, 1:7, 2:7, 3:7, 4:8, 5:7) (2018年11月時点で)

# 加速ユニットのレイアウト



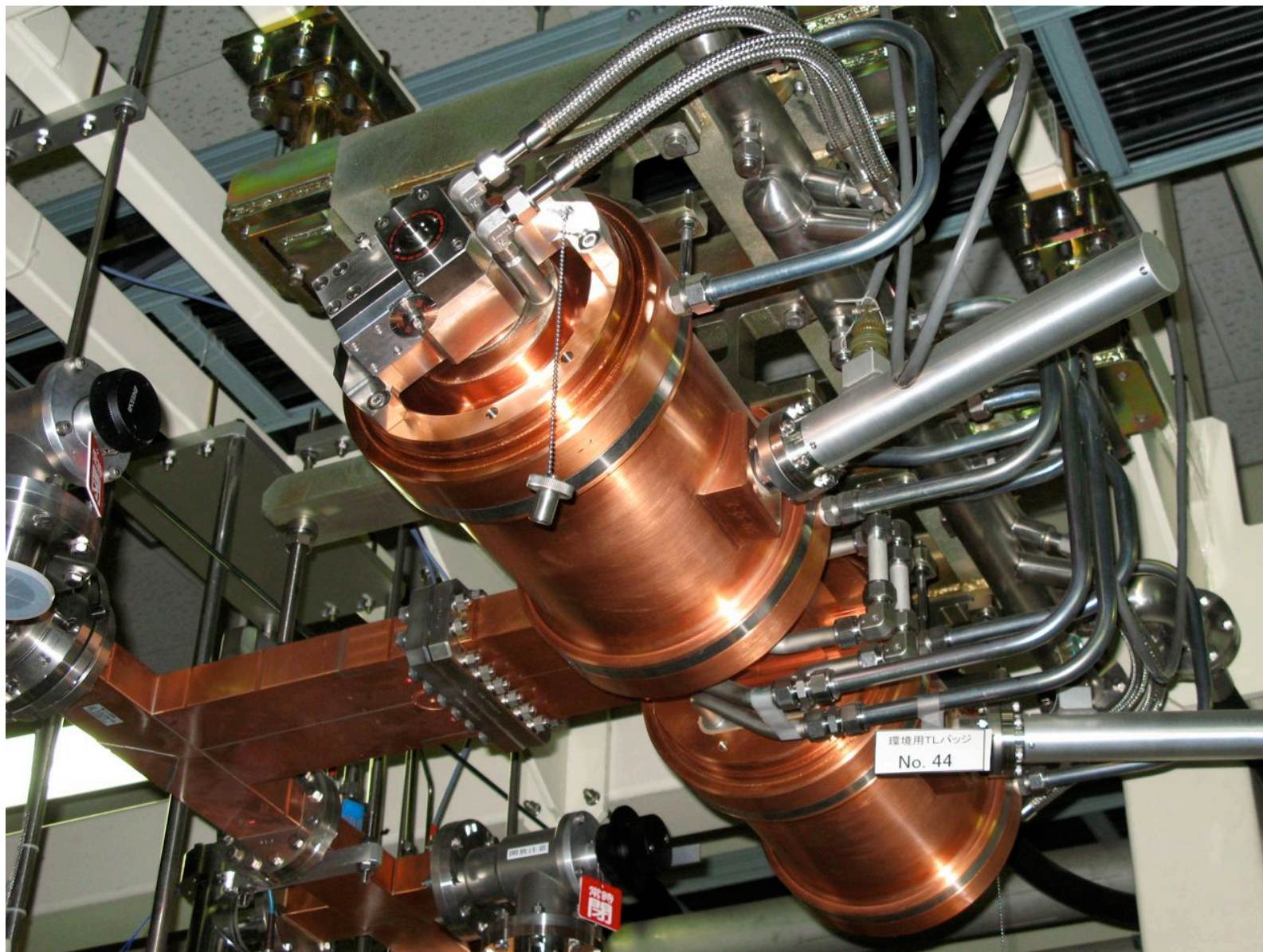


# マイクロ波源（地上階クライストロンギャラリー）



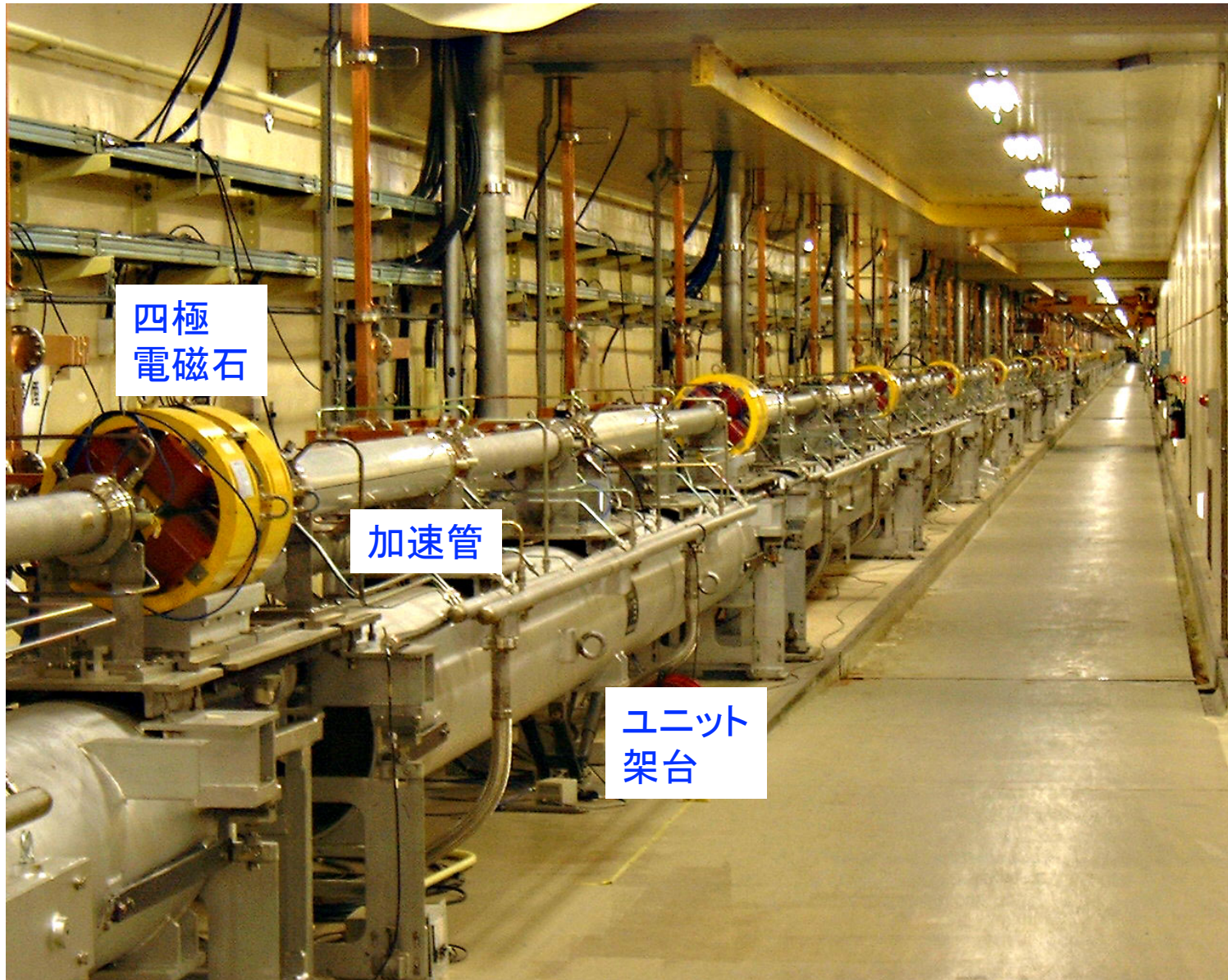


# RFパルス圧縮空洞 (SLED)





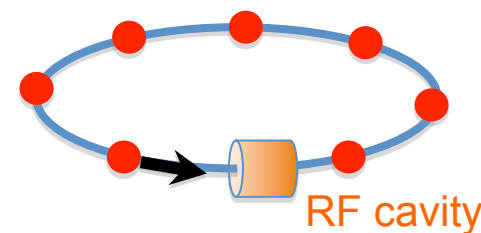
# ライナック ビームライン(地下トンネル内)





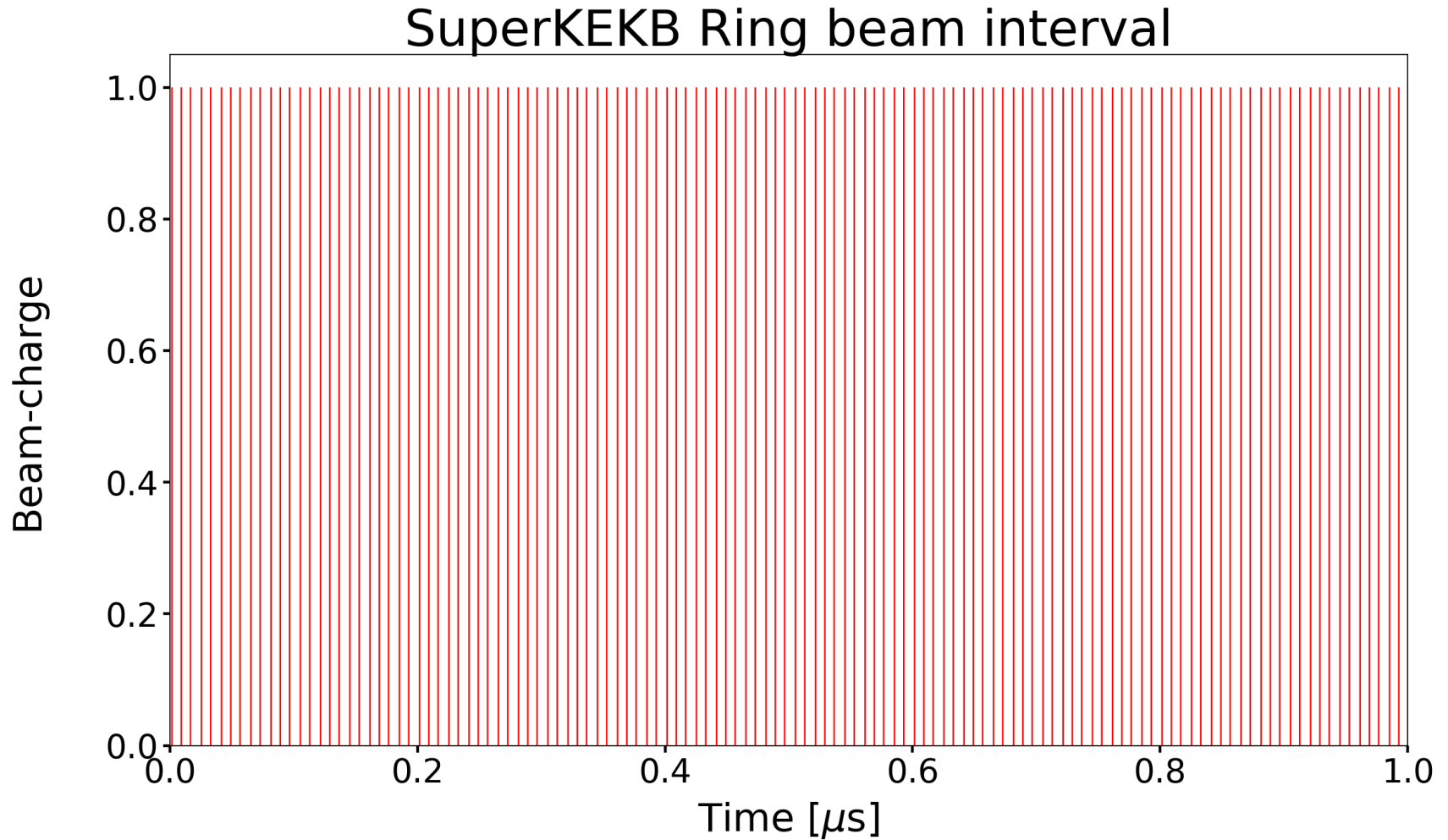
# 円形加速器の特徴

## ● 円形加速器 [例. SuperKEKB] のRFシステムでは



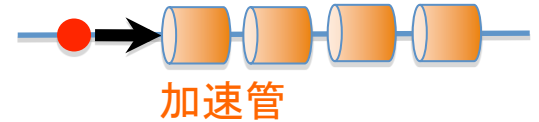
- ❖ cavityにはビームが繰り返しやって来る。
  - ❖ しかも多数のバンチを蓄積するので、最短では 2ns 間隔で次のバンチが来る可能性がある。
  - ❖ RF は**連続波 (continuous wave)** として生成される必要がある。
  - ❖ cavity内の**定在波 (standing wave)** で加速する
- ## ● 円形加速器のビームラインレイアウトは (単なる紙谷の個人的な感想です。)
- ❖ **Bending magnet** が大きな部分を占め
  - ❖ RF cavity, Q magnet 他の占める領域は小さい

# Beam間隔 (Ringの場合)



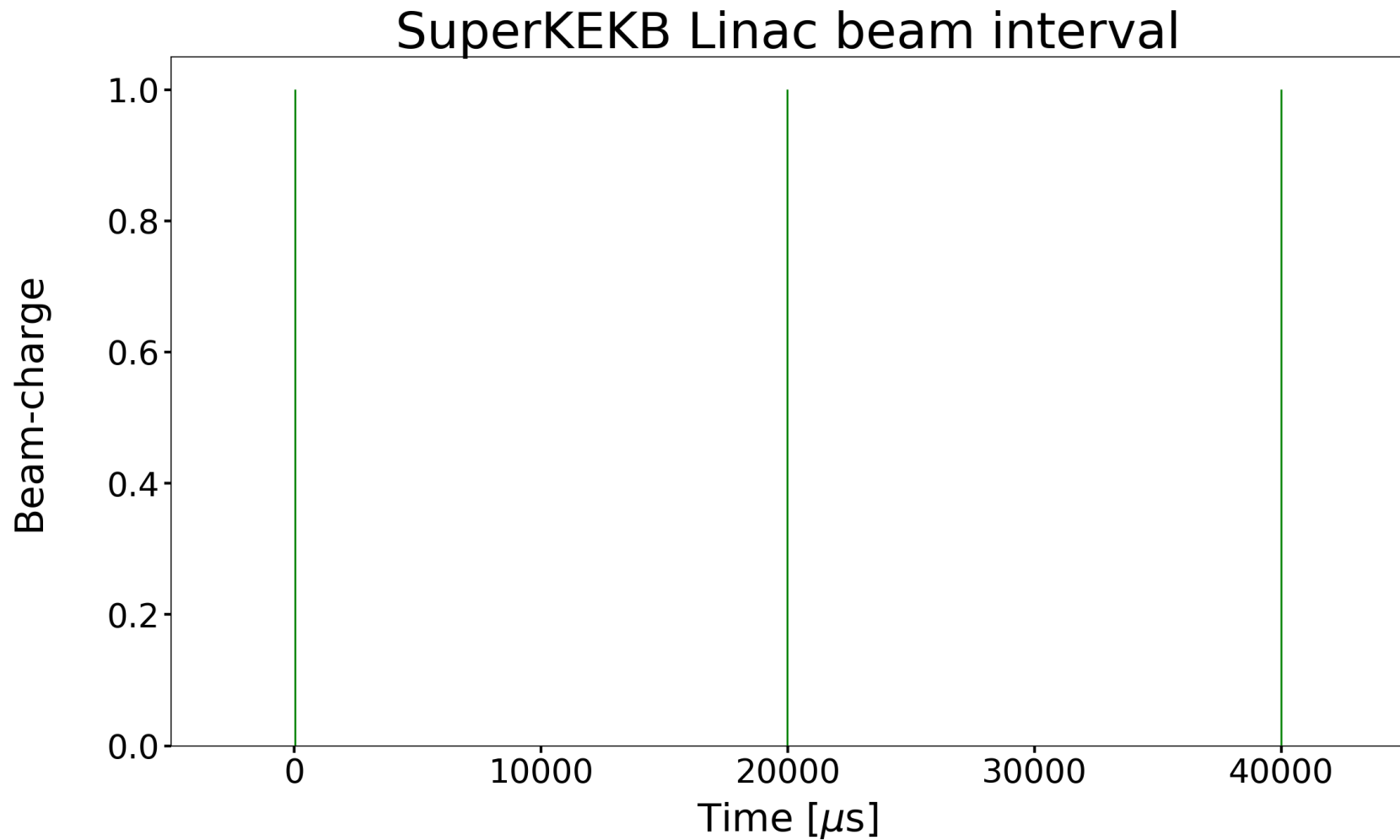
# 線形加速器の特徴

- 線形加速器 [例. KEK e<sup>-</sup>/e<sup>+</sup> Linac] のRFシステムでは



- ❖ ビームは間欠的にやって来る **50 Hz (20 ms interval)**
  - ❖ RF はパルス波(**pulsed wave**)として生成される必要がある。
  - ❖ 加速管内の進行波(**travelling wave**) で加速する
- 円形加速器のビームラインレイアウトは
    - ❖ **加速管**が大きな部分を占め
    - ❖ Q magnet 他の占める領域は小さい、Bending magnet は少ししかない
    - ❖ 例えば、加速ユニットの長さ 9.6mのうち、8.0mを加速管が占める(**83% !**)

# Beam間隔 (Linacの場合)



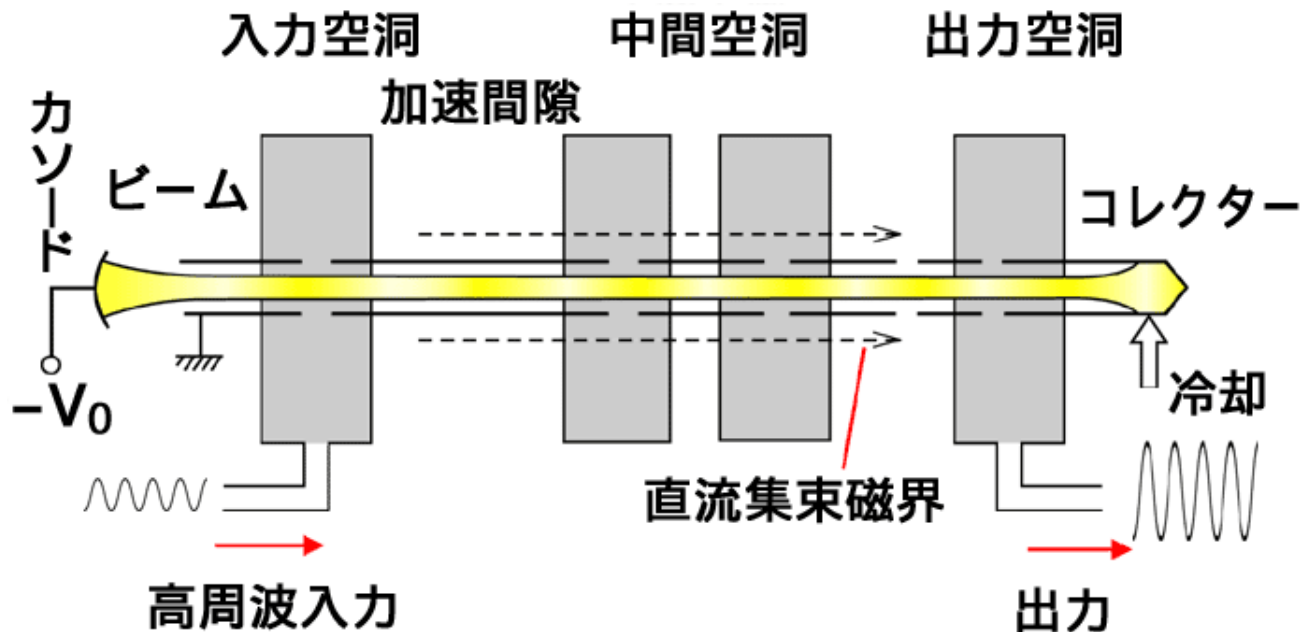
# LinacのRFの特徴

- Linacの加速管では、あるビームは1回しか通らない  
→ **一発勝負**で目一杯加速するしかない。
  - ❖ 2m長の加速管をビームが通り抜けるのに要する時間は  $2.0(\text{m})/3.0 \times 10^8(\text{m/s}) = 6.7 \text{ (ns)}$  であるから、この時間内だけ加速できれば良いはず。
  - ❖ しかし、実際には加速管にRFを充填するには **600 ns** かかる(**filling time**)ので、それだけの持続時間は必要。
- つまり、次のビームが来るまでの 20 ms の間、**power を貯めて**、600 ns の短い時間内に加速管に送り出せば、**非常に高いpeak power**が得られる。
- 短いパルス幅のマイクロ波の限られたパワーでなるべく加速効率を高くするにはどうすれば良いか(=>**進行波型加速管**)  
**パワー** → **加速電界 変換効率**(shunt impedance)が高い。



# パルスモジュレータとクライストロン

- パルスモジュレータで東京電力からのAC電力を約20msの間 Pulse Forming Network という回路にため込んで、サイラトロンというスイッチで約5 $\mu$ sのパルス(電圧約300kV)として取り出してクライストロンに印可する。PFNに充電する際の設定電圧を  $E_s$  と呼んでいる(通常42kV程度)。
- クライストロンではこの高電圧で電子ビームを加速して、小電力のマイクロ波を入力してビームに速度変調をかけて大電力のマイクロ波(ピークパワー40MW、パルス幅 4 $\mu$ s)として取り出す(増幅器として動作)。



# SLED

- SLEDは SLAC Energy Doubler の略で、RFパルス幅を圧縮してピークパワーを高くするためのRF cavityである。  
40 MW x 4  $\mu$ s -> 137 MW x 0.6  $\mu$ s
- クライストロンからのマイクロ波は SLED cavity に蓄えられていくが、途中のその位相を反転させると、cavityからマイクロ波が放出されてピークパワーが高くなるが flat-top が無い波形になる。
- このため、SLED を使っているユニットでは **ビームとRFパルスのタイミングにより energy gain が変化する**のでタイミングを良く合わせることが重要。
- また 2-bunch 加速では、単純にはそれぞれの bunch の energy gain が異なることになるので、beam loading の影響も含めての gain が等しくなるようにタイミングを調整する。(痛み分け)

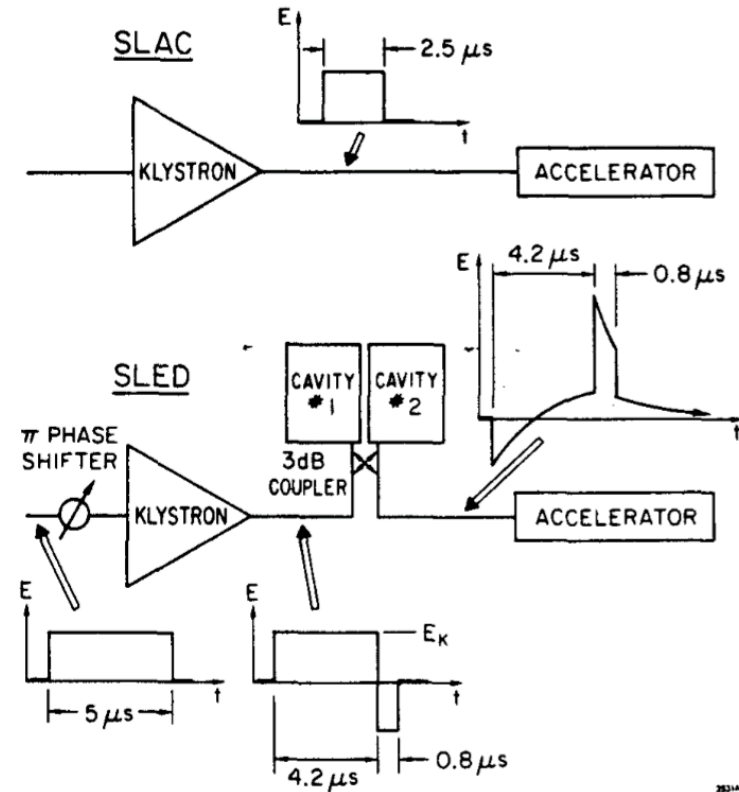
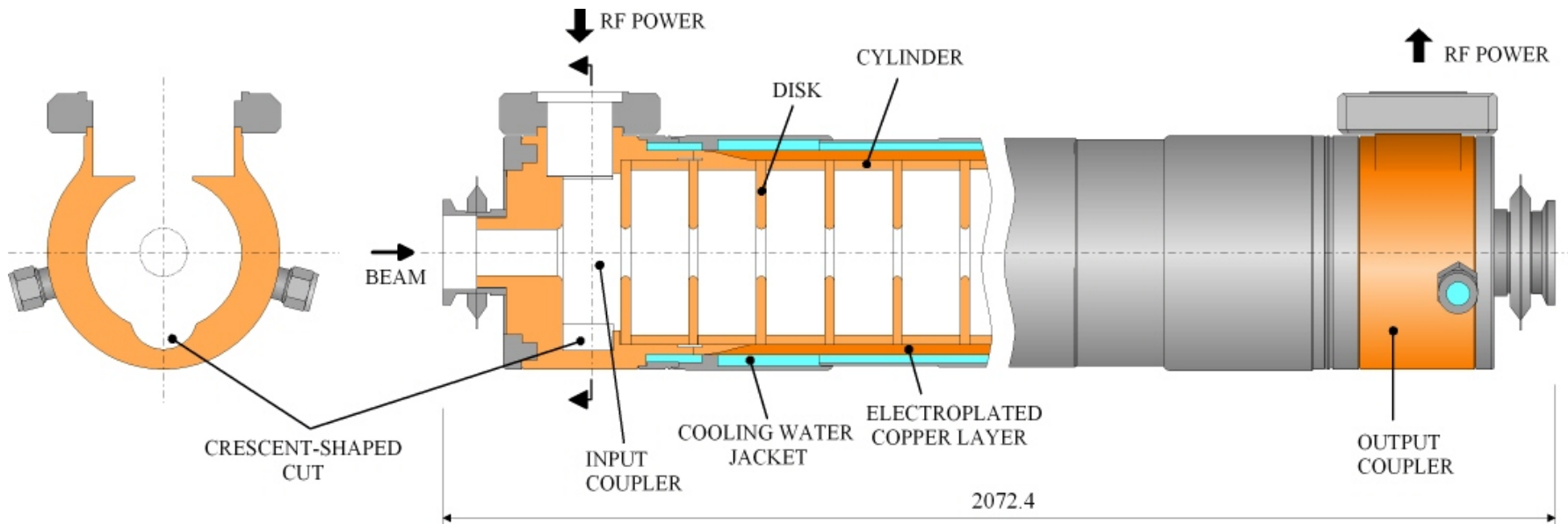
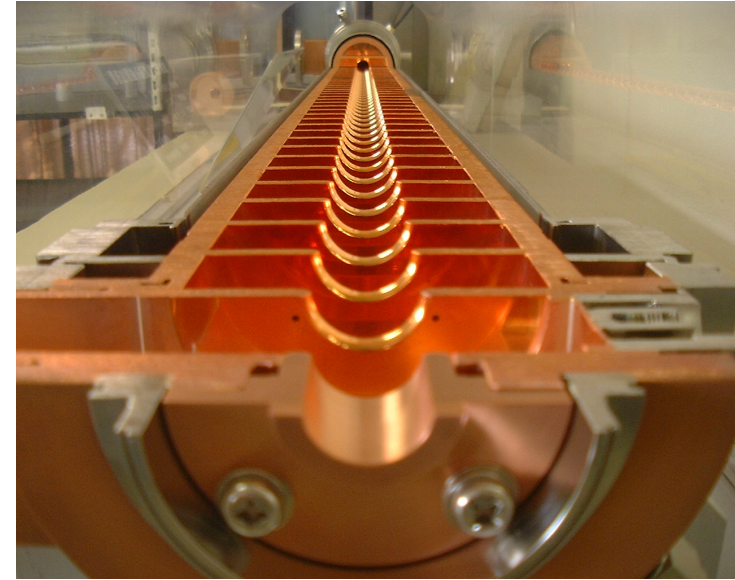


FIG. 2--A comparison of the present SLAC and SLED RF systems.

SLAC-PUB-1453より

# KEK S-band 進行波加速管

- RF周波数 2856 MHz, 波長 $\lambda = 105$  mm
- $2\pi/3$ -mode ( 1 cell の長さ  $\lambda/3 = 35$ mm)
- 54 標準加速 cell + 入力/出力-coupler
- 加速管全長  $\sim 2$  m
- 開口部直径  $\sim 20$  mm
- 平均電界強度  $\sim 21$  MV/m@34 MW



# セクターとは？

- クライストロンは低いパワーのマイクロ波を高いパワーに増幅する装置であるが、この入力となるマイクロ波にもある程度のパワーが必要となる。基準となるマイクロ波はマスターオシレータで生成するが、このパワーでは低すぎるのである程度増幅してKLの入力マイクロ波を作るのがサブブースター(SB)である。(実体は小型のクライストロン)
- SBからのマイクロ波は標準的には8分割されて、SBの下流にある8台のKLに分配される。1つのSBに属する8台のKLに対応する加速ユニットのグループをセクターと呼ぶ。
- あるSBのphase shifterを変化させると、それに属している8台のKLの入力位相が共通に影響を受ける。
- 現在はSBを経由せずユニット毎に半導体アンプでKLの入力を作っているユニットがいくつかある。(次のページ参照)

# 位相のパルスごと切り替えができる部分

- SHB1, SHB2 (右の表には含まれないが切替可能)
- Sub-booster (SB) は全て早い切替が可能
- A1A, A1B は AT & A1 入射部用
- A2, A3, A4
- B5 & B6 は J-arcへの energy knob
- 15 & 16 は 陽電子生成部
- 17, 18, 21
- 27 & 28 は DR or SY2 chicane への energy knob
- DN, DS は DR-ECS, DR-BCS 用
- 51 & 52 は HER, LER への energy knob
- 61 は LER-ECS 用

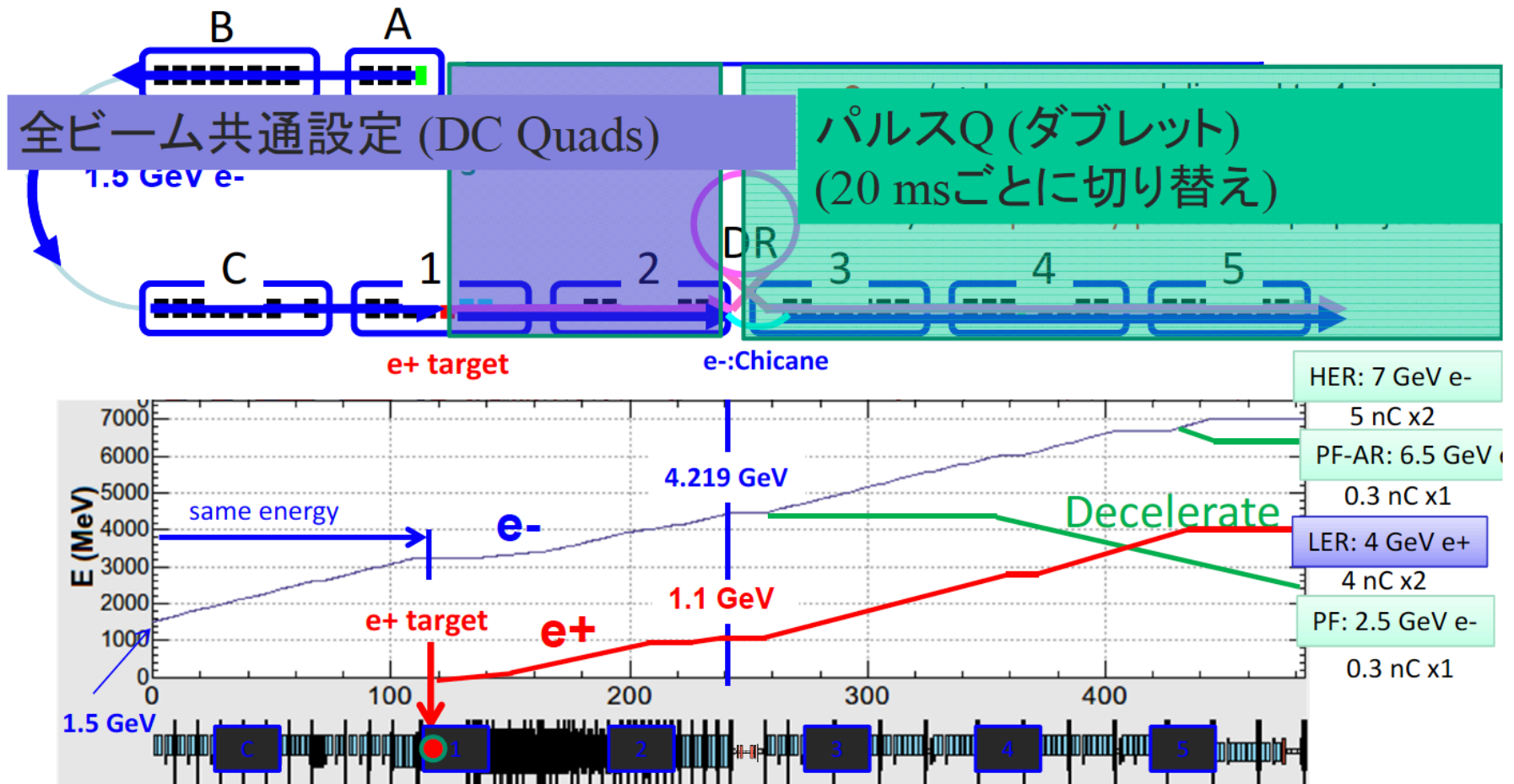
これら以外のユニットは mechanical phase shifter なので  
ゆっくりしか位相を変えられないが、同じ親のSBに属している  
グループ全体の位相はSBで切り替えられる。

励振器
Sバンド移相器
KL A1A
KL A1B
KL A2
KL A3
KL A4
SB B
KL B5
KL B6
SB C
SB_1
KL_15
KL_16
KL_17
KL_18
SB_2
KL_21
KL_27
KL_28
KL DN
KL DS
SB_3
SB_4
SB_5
KL 51
KL 52
KL 61

表: 三浦さん提供

# mode ごと の beam energy profile

- modeごと(入射先のringごと)にbeam energy を変えるには、入射部、陽電子生成部、energy knob などの重要なユニット及び複数のユニットを束ねるSBの位相が早く切り替わる必要がある。



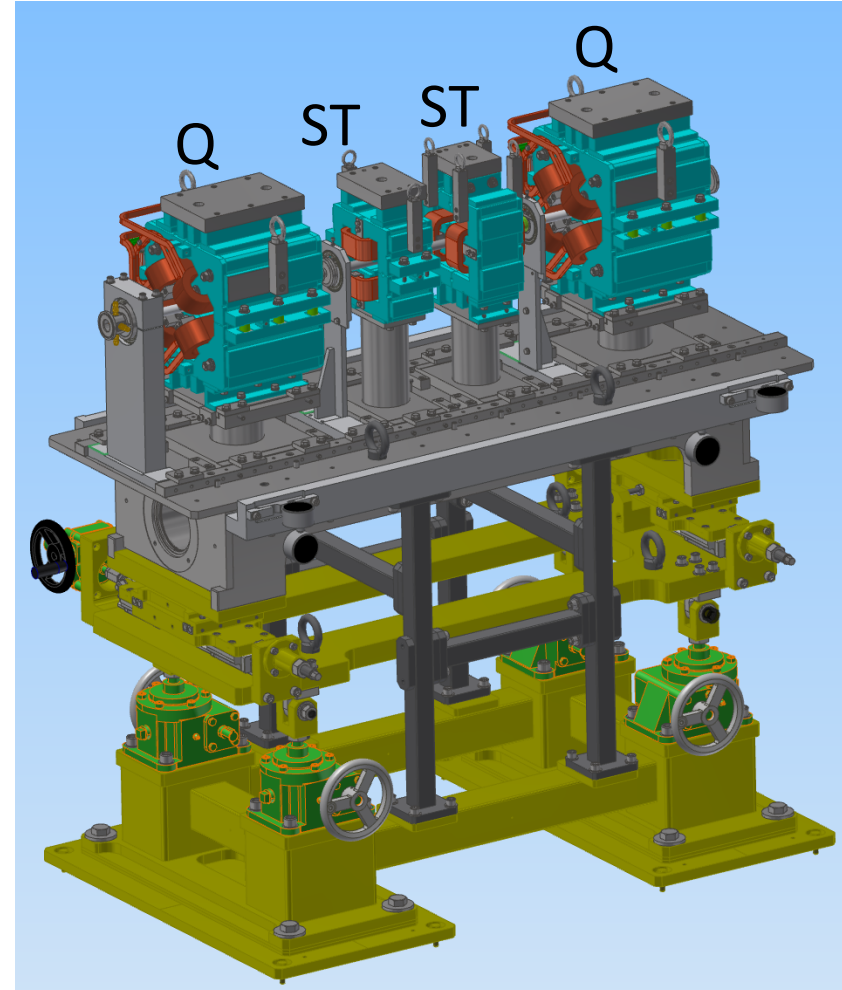


# Pulse Magnets

ビームのパルスごと切替に重要となる以下の部分では pulse magnet が使われている。

- AT, A1入射部の切替のため、24度ライン合流部周辺の bend, Q, ST をPulse 化した。
- 陽電子生成のため e- beam をターゲットに当てるか、HER等への入射のためにターゲット横の穴を通すかを切り替えるために、target 部分付近の Q, ST をPulse 化した。
- 1, 2-sector で e+ beam と e- beam の軌道を独立に調整するために、一部の ST をPulse 化した。
- 3, 4, 5-sector で DR からの e+ beam 及び上流からの HER, PF, PFAR 入射用 e- beam の beam optics, beam orbit を切り替えるために、この領域のすべてのQ & ST をPulse 化した。

3,4,5-sector標準型Pulse Magnets & 架台



# Stand-by ユニット

- 加速ユニットの中にはRFによる運転をしているが加速に寄与していないものがある。このような状態のものをStand-byユニットという。
- RF運転を止めてしまうと、時間をおいて次に立ち上げたときにすぐには調子が上がらず使えないことがある。そこでRF運転はするが、ビームが来るタイミングから十分離して(50 $\mu$ s)動作させると、加速には寄与しない。
- クライストロンの故障などが発生した際には、そのユニットのRF運転を止めて、代わりにどれかのStand-byユニットを加速状態に切り替えて beam energy が入射に足りるようにする。
- その際、各部分での energy profile が変化するため、beam optics 的には Q や ST のK値が少し変化することになる。この補正のためには、新たな energy profile に基づいて Q や ST の磁場値を変更する必要がある。

# energy margin [A, B-sector]

Sector	Unit	special units	Full Gain	KLY-Es	Real Gain	Factors e <sup>-</sup>	HER e <sup>-</sup>
A	1		65	38.0	57.4	0.946	57
	2		160	42.0	160.0	0.946	209
	3		160	42.0	160.0	0.946	360
	4		160	42.0	160.0	0.946	511
B	1		160	42.0	160.0	0.946	663
	2		160	42.0	160.0	0.946	814
	3		160	42.0	160.0	0.946	965
	4		160	42.0	160.0	0.946	1116
	5	energy-knob J-arc	160	42.0	160.0	0.726	1233
	6	energy-knob J-arc	160	42.0	160.0	0.726	1349
	7	standbyとする	160	42.0	160.0	0.000	1349
	8	加速する	160	42.0	160.0	0.946	1500
		J-arc				J-arc	1500

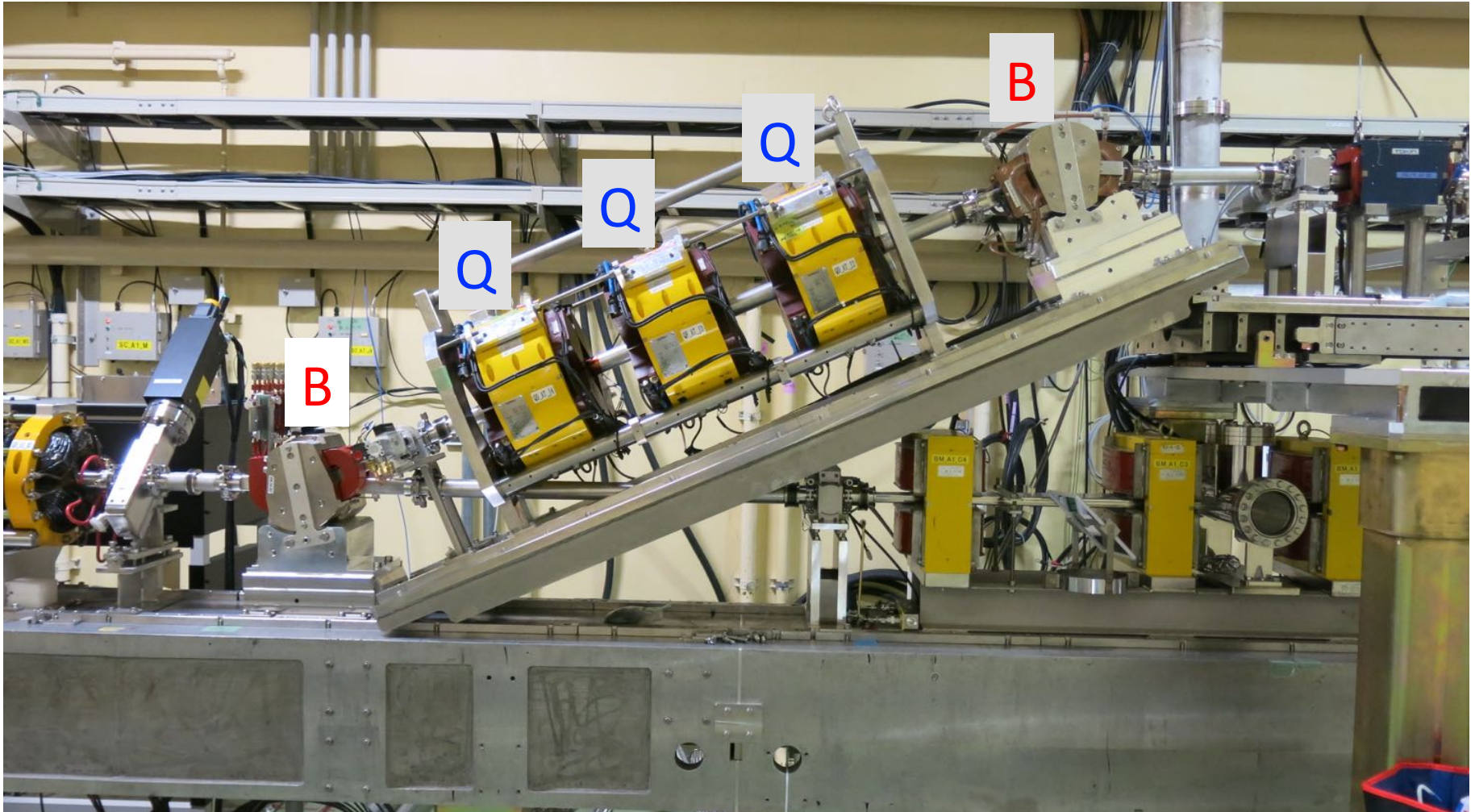
Beam energy を限定される箇所

(1) AT/A1 合流部24度ライン: 57 MeV

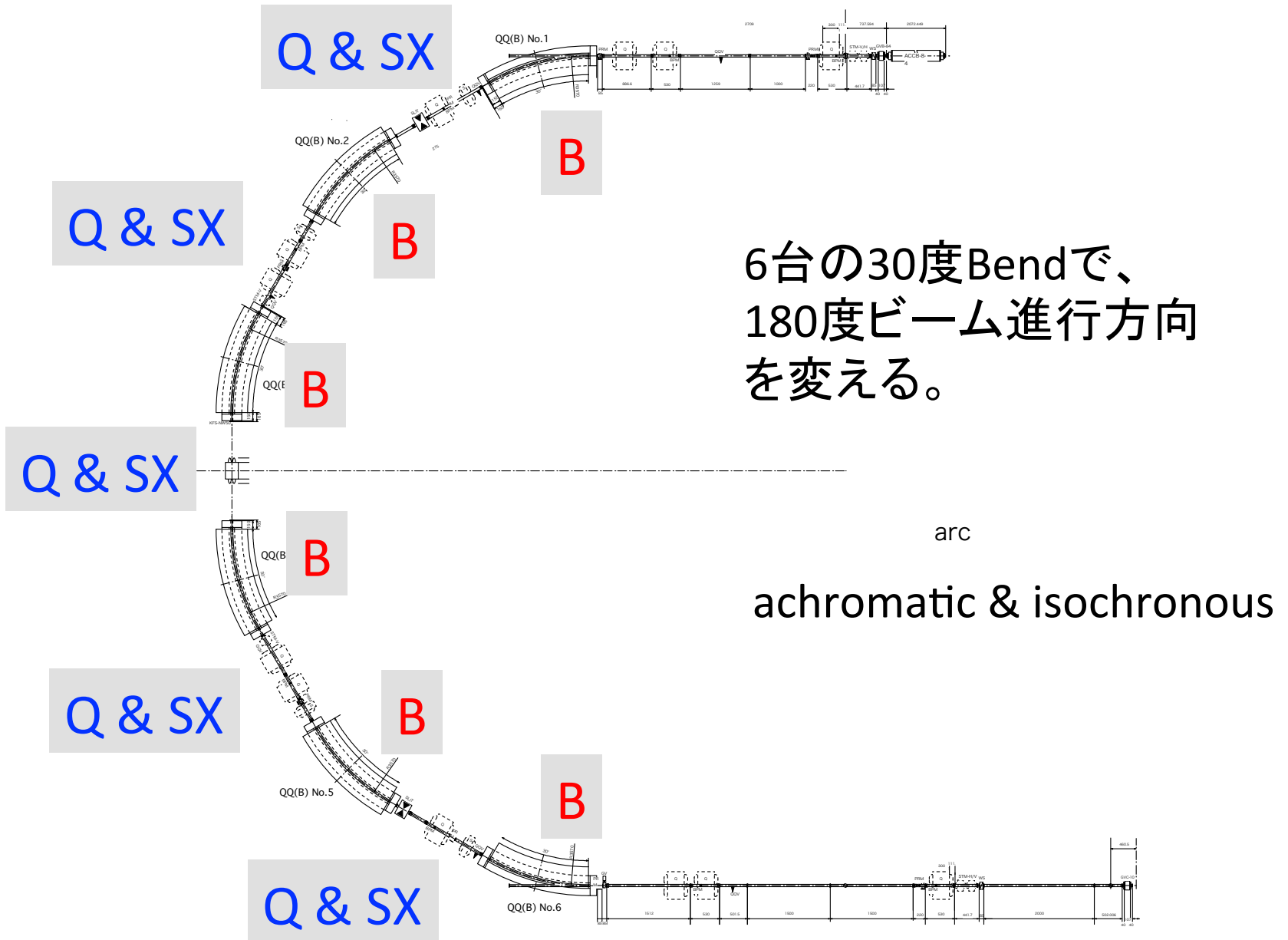
(2) J-arc部 : 1500 MeV

# 24度斜めAT/A1合流ライン

achromatic & isochronous



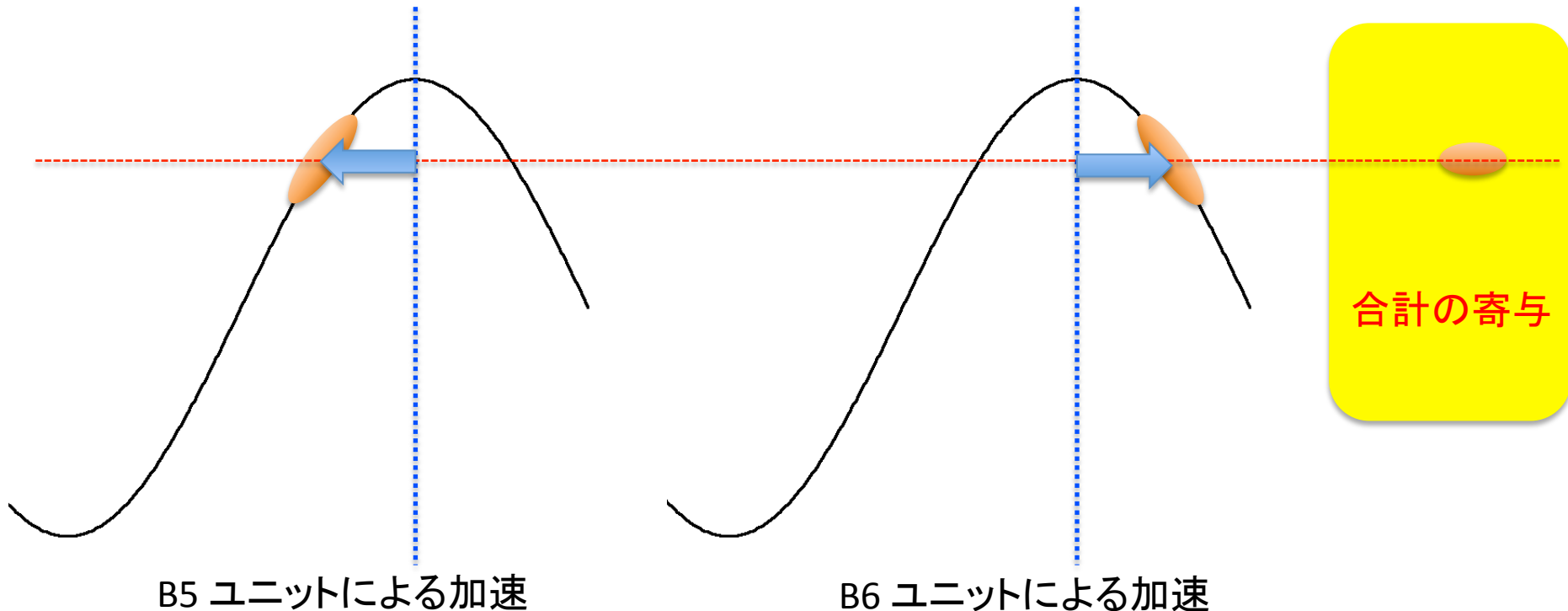
# 180-deg J-arc部





# energy knob ユニット

- J-arc部などの beam energy が限定されている部分に送り込む beam の energy を微調整するためには、  
2台の加速ユニットを用いて、それぞれの crest (頂上) 位相から  
反対方向に同じ量だけ位相をずらすことで、中心 energy は変化するが  
energy-spread は大きくならないようにすることができる。



# energy margin [C,1,2-sector]

Sector	Unit	special units	Full Gain	KLY-Es	Real Gain	Factors e-	HER e-	Factors e+	LER e+
		J-arc				J-arc	1500		
C	1	standbyとする	160	42.0	160.0	0.000	1500		
	2		160	42.0	160.0	0.946	1651		
	3		160	40.0	150.5	0.946	1794		
	4		160	42.0	160.0	0.946	1945		
	5		160	37.0	136.6	0.946	2074		
	6		160	41.0	155.3	0.946	2221		
	7		160	38.0	141.2	0.946	2354		
	8		160	34.0	122.9	0.946	2471		
1	1		160	36.0	132.0	0.946	2595		
	2		160	38.0	141.2	0.946	2729		
	3	加速する	160	40.0	150.5	0.946	2871		
	4	欠番					2871	減速位相	0
	5	e+生成部: LAS	40	42.0	40.0	0.946	2909	0.500	20
	6	e+生成部: LAS	120	42.0	120.0	0.946	3023	0.946	133
	7	LAS	120	40.0	112.9	0.946	3129	0.946	240
	8	S-band(当初LAS想定)	160	40.0	150.5	0.946	3272	0.946	383
2	1		160	34.0	122.9	0.946	3388	0.946	499
	2		160	38.0	141.2	0.946	3522	0.946	632
	3		160	38.0	141.2	0.946	3655	0.946	766
	4		160	42.0	160.0	0.946	3806	0.946	917
	5	欠番					3806		917
	6	stanbyとする	160	42.0	160.0	0.000	3806	0.000	917
	7	energy-knob DR e+	160	38.0	141.2	0.946	3940	0.636	1007
	8	energy-knob DR e+	160	39.0	145.8	0.946	4078	0.636	1100
		Damping Ring						DR	1100

Beam energy を限定される箇所

(3) DR入射点(28\_4部)e+: 1100 MeV

(4) SY2 chicane(e-): 4078 MeV



# energy margin [3,4,5-sector]

Sector	Unit	special units	Full Gain	KLY-Es	Real Gain	Factors e-	HER e-	Factors e+	LER e+	Factors	PFe-
		Damping Ring						DR	1100	ここまではHERと同じと仮定	
3	1	欠番:RTL					4078		1100		4078
	2		160	42.0	160.0	0.946	4229	0.946	1251	-0.946	3927
	3		160	38.0	141.2	0.946	4363	0.946	1385	-0.946	3793
	4		160	36.0	132.0	0.946	4488	0.946	1510	-0.946	3668
	5		160	42.0	160.0	0.946	4639	0.946	1661	0	3668
	6		160	42.0	160.0	0.946	4790	0.946	1812	0	3668
	7		160	42.0	160.0	0.946	4942	0.946	1964	0	3668
	8		160	40.0	150.5	0.946	5084	0.946	2106	0	3668
4	1		160	37.0	136.6	0.946	5213	0.946	2235	-0.946	3539
	2		160	40.0	150.5	0.946	5355	0.946	2377	-0.946	3397
	3		160	35.0	127.4	0.946	5476	0.946	2498	-0.946	3276
	4A	C-bandからS-bandへ	160	40.0	150.5	0.946	5618	0.946	2640	-0.946	3134
	4B	欠番					5618		2640		3134
	5	standbyとする	160	39.0	145.8	0.000	5618	0.000	2640	0.000	3134
	6		160	39.0	145.8	0.946	5756	0.946	2778	-0.946	2996
	7		160	42.0	160.0	0.946	5908	0.946	2930	-0.946	2845
	8		160	40.0	150.5	0.946	6050	0.946	3072	-0.946	2702
5	1	energy-knob e-/e+	160	41.0	155.3	0.755	6167	0.680	3177	-0.692	2595
	2	energy-knob e-/e+	160	37.0	136.6	0.755	6270	0.680	3270	-0.692	2500
	3		160	42.0	160.0	0.946	6422	0.946	3422	0.000	2500
	4	加速する	160	42.0	160.0	0.946	6573	0.946	3573	0.000	2500
	5		160	42.0	160.0	0.946	6724	0.946	3724	0.000	2500
	6		160	40.0	150.5	0.946	6866	0.946	3866	0.000	2500
	7		160	38.0	141.2	0.946	7000	0.946	4000	0.000	2500
	8	欠番:PF-BT					7000		4000		2500
						HER	7000	LER	4000	PF	2500

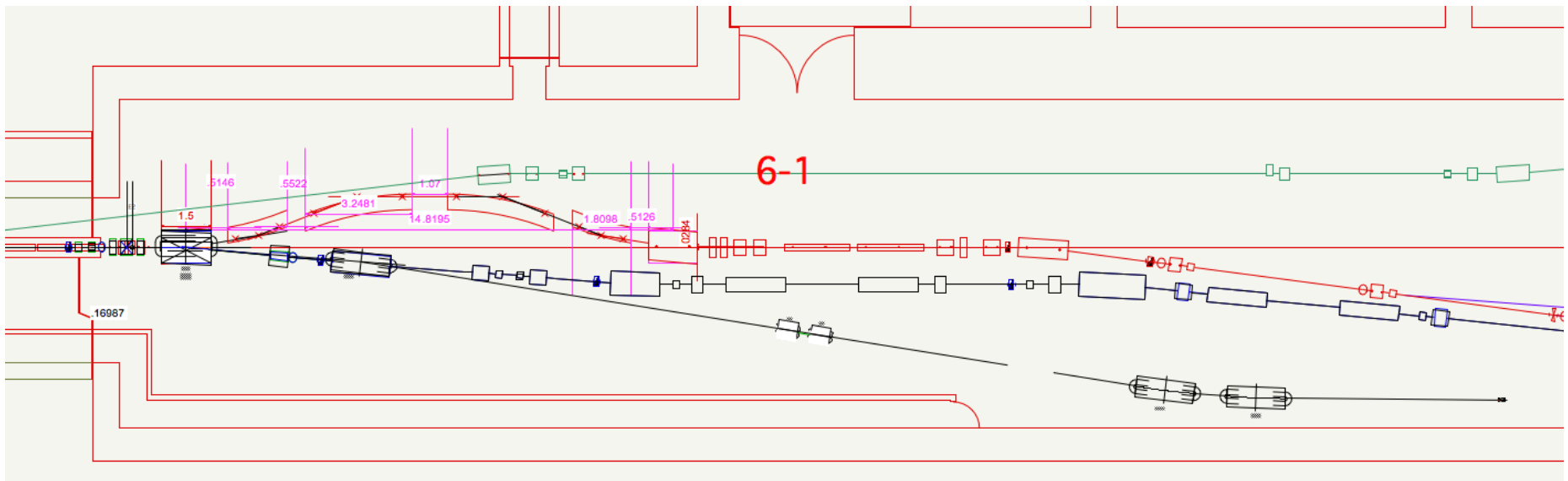
Beam energy を限定される箇所

(5) SY3: HER 7000 MeV, LER 4000 MeV, PF 2500 MeV, AR 6500 MeV



# 第3スイッチヤード部 (SY3)

- LER, HER, PF, PFAR へ分岐する
- 東側 beam dumpライン
- 直進 beam dump ライン (現在はAR-BTと交差するため使用できない。)



# Energy Analyzer & RF phasing

- KEKBよりも前の時代には SLED を使っていなかったもので、非常に長いパルス ( $\sim 1\mu\text{s}$ ) の平均電流値の高いビームを出すことができた。
- これを用いてビーム誘起波とクライストロンからのRF波の位相差を測定して、ビームに対する crest 位相を決めることができた。これを Phasing と呼ぶ。
- しかし、KEKBの時代になって使えるビームはbunch電荷量は大きい**が**bunch数が少ないために、平均電流値は低くて誘起波の測定が難しくそれまでのPhasing 手法が使えなくなった。
- そこで J-arc や SY3 などの energy analyzer として使える箇所までなんとかビームを運んで bend で曲げてその位置を測り、KLY位相を変えてこの位置の変化を調べて crest 位相を決めるようになった。
- 現在ではこのやり方のことを Phasing と呼んでいる。

# 機器名称の付け方

- Linacで用いられている装置の場所を特定するには
  - ❖ どの sector の、どの unit にあるか？  
その中でさらに
  - ❖ どの加速管(或いはBend)の後(またはその加速管上)にあるか？  
が分かればよい。
- 加速ユニットの名称は、例えば 1-5 のように表す。"1の5ユニット"などと発音する。これは第1 sectorの第5 unit ということである。
- セクター名称としては、実際に加速管が置かれている A, B, C, 1, 2, 3, 4, 5-sector以外に、J-arc部は R-sector、DR入射出射部は D-sector、第3スイッチヤードは 6-sector として取り扱っている。

- 機器名称としては、例えば

機器の種類    sector    加速管の番号

QF\_18\_24  
      unit    枝番

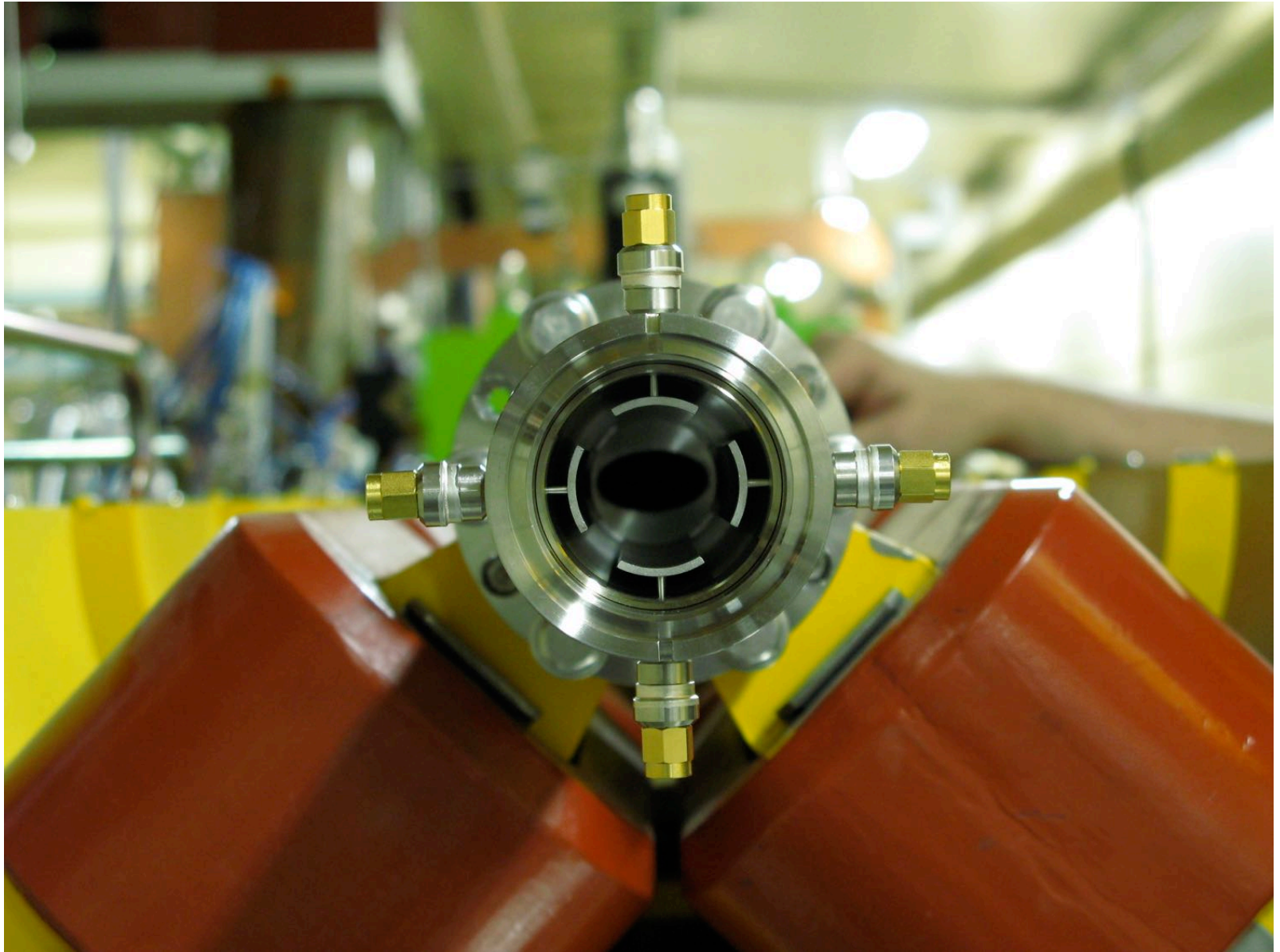
となる。

# 機器名称

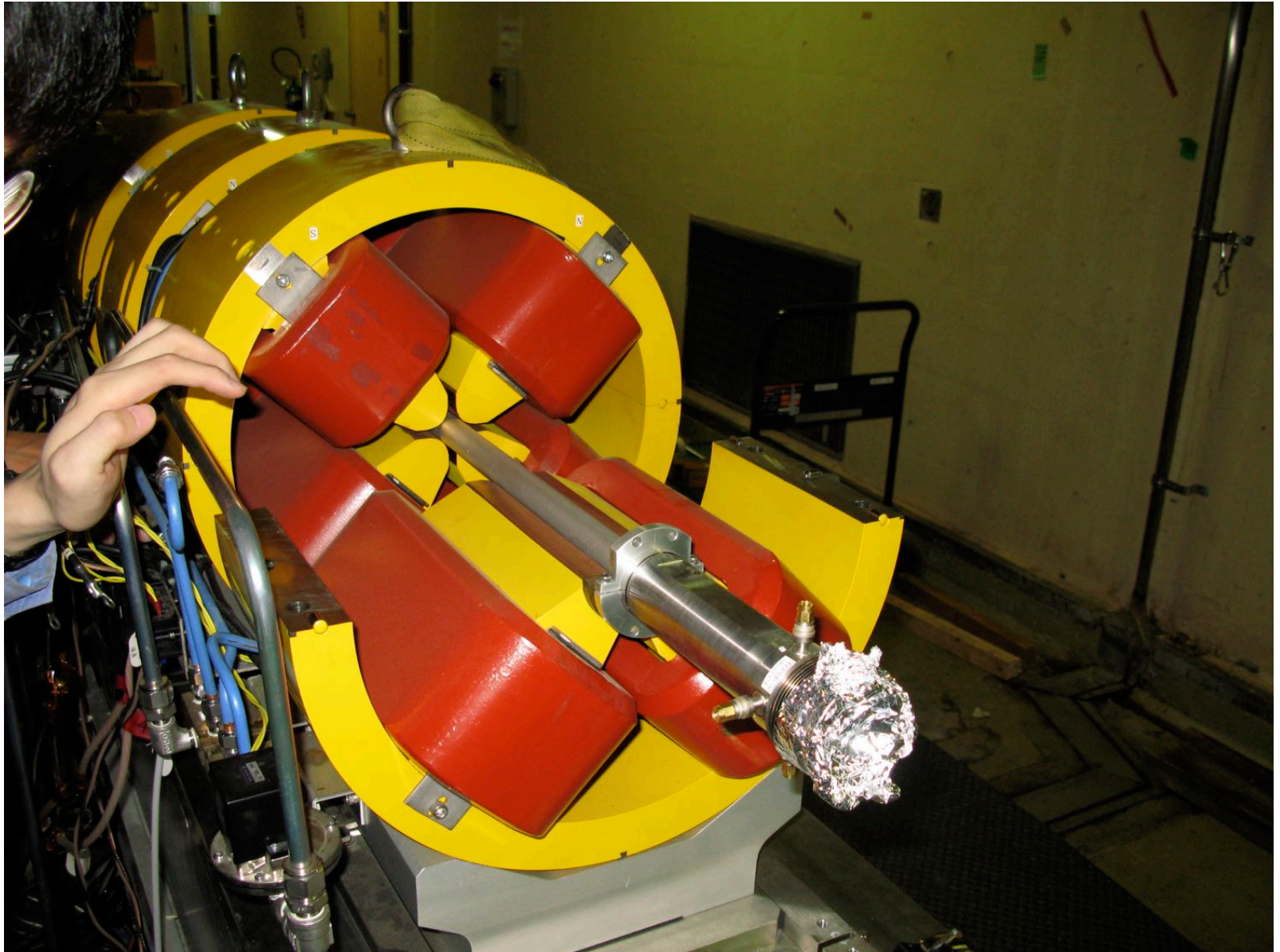
- 電子銃: **GU\_AT** (熱gun), **GR\_A1** (RF-gun)
- Sub-harmonic buncher: **SH**
- Pre-buncher: **PB**
- Buncher: **BU**
- 加速管: **AC**
- クライストロン: **KL**
- sub-booster: **SB**
- ヘルムホルツコイル又はソレノイド: **SL**
- 四極電磁石: DCマグネットは **QD, QF** (defocus, focus)、パルスマグネットは **PD, PF**
- 六極電磁石: **SD, SF** (defocus, focus)
- 偏向電磁石: DCマグネットは **BM**、パルスマグネットは **PB**
- ステアリングマグネット: 空心DCは **SX, SY**、鉄心DCは **BX, BY**、パルスは **PX, PY**
- target: **TG**
- Flux concentrator: **FC**
- Beam position monitor: **SP** (strip line monitorより)
- Screen monitor: **SC**
- Wire scanner: **WS**
- Streak camera: **OT**
- Gate valve: **GV**
- Ion pump: **IP**



# Beam Position Monitor 断面



# Q magnet + BPM



スライド、終わりです。

ご静聴ありがとうございました。