

大強度陽子加速器用ビームモニタ (J-PARCモニタの実際)

高エネルギー加速器研究機構

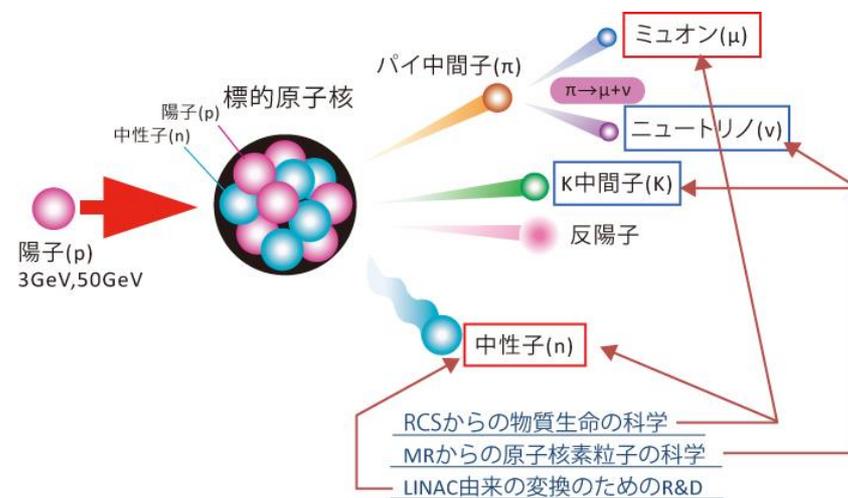
加速器第1研究系

佐藤健一郎

目次

- はじめに
 - J-PARCの概要
 - 加速器のパラメータ
 - J-PARC MRビームモニタの要求性能
- 大強度陽子加速器施設における放射化について
 - 放射化リミット
 - 核反応：確率、各破碎反応、中性子数
 - 残留放射線の評価
- ビームロスモニタ (BLM)
 - 直接電離放射線： dE/dx
 - 間接電離放射線：光子、中性子の衝突カーマ
 - ガス検出器
 - 比例計数管、イオンチャンバー
- ビーム位置検出器 (BPM)
 - ストリップラインBPMの原理
 - 静電誘導型BPMの原理
- ビームプロファイルモニタ
 - J-PARCのプロファイルモニタ：縦方向、横方向、エミッタンス
- まとめ

J-PARC



J-PARC鳥瞰図

<https://j-parc.jp/c/index.html>から転載

Linacの主要パラメータ

Linacのパラメータ表

加速粒子	H-		
全長	248m	Chopping factor	56%
出射エネルギー	400MeV	Chopping後のBeam duty	1.4%
出射時のピーク電流	50mA(加速開始時は30mA)	Chopping後の平均電流	700 μ A
RCSへの入射サイクル	25Hz	横方向ビームエミッタンス(99%, 規格化)	$<4\pi$ mm \cdot mrاد
RCSへの入射バンチ長	455ns	入射時の運動量分散	$<0.1\%$
RCSへの入射時間	500 μ s		

RCSの主要パラメータ

RCSのパラメータ表			
周長	348.333m	繰り返し周期	25Hz
入射エネルギー	0.4GeV	励磁パターン	Sin+DC
出射エネルギー	3GeV		500 μ s入射
ハーモニック	2		20ms加速
最大加速粒子数	8.3×10^{13} ppp	平均電流	333 μ A
周回時間	1.629 μ s@400MeV 1.196 μ s@3GeV	周回電流	8.2A@400MeV 11.1A@3GeV
		最大出力	1MW

※荷電変換入射により、加速粒子は陽子

MRの主要パラメータ

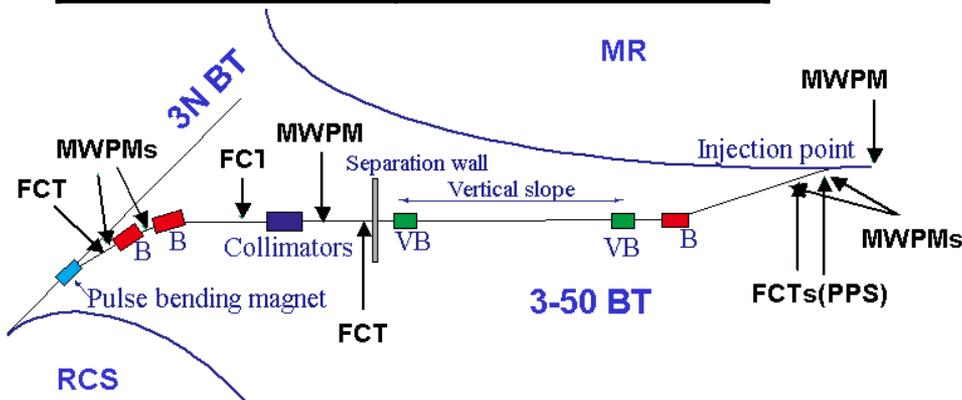
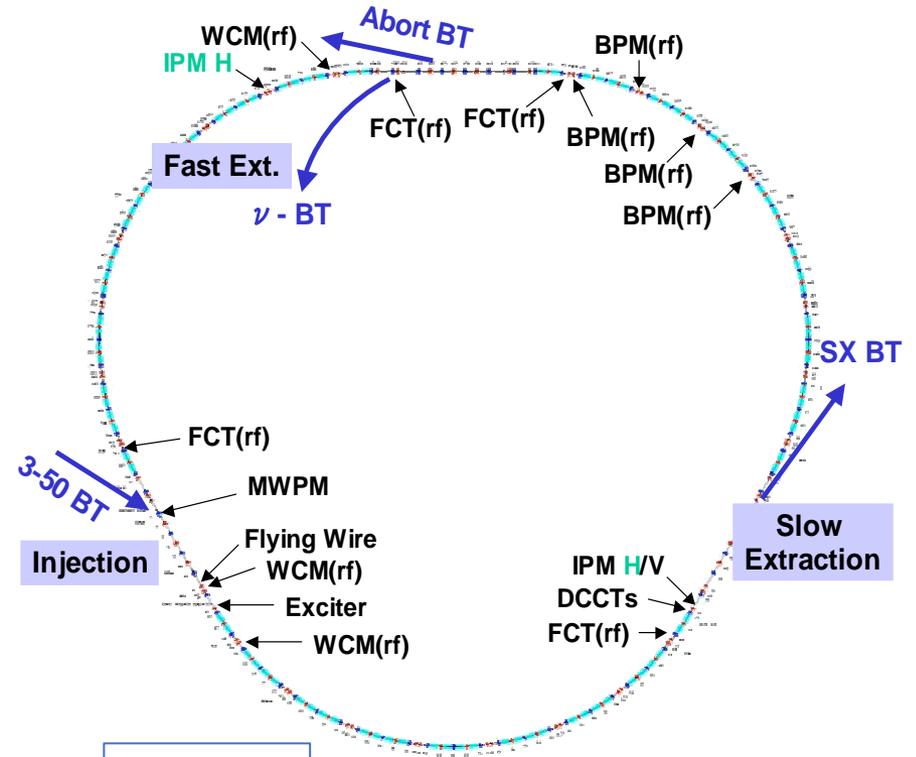
MRのパラメータ表			
周長	1567.5m	周回時間	5.384 μ s@3GeV 5.231 μ s@30GeV
入射エネルギー	3GeV	基本RF周波数	1.67MHz@3GeV 1.72MHz@30GeV
出射エネルギー	30GeV	繰り返し周期	2.48s@FX時 5.52s@SX時
ハーモニック	h=9	加速時間	1.4s
周回バンチ数	8	最大平均電流	21.5 μ A@FX時
最大加速粒子数	3.3×10^{14} ppp	最大周回電流	10.1A@FX時
入射横方向ビーム エミッタンス	<54 π mm \cdot mrاد	最大出力※	0.75MW@FX時

※アップグレード計画：繰り返し周期を~1.2sに短縮することで1.3MW

J-PARC MRのモニタ配置

MR

Monitors	Number
BPM	186
Single-pass BPM	2
Dump/abort BPM	2
16電極BPM	1
Tapered Coupler BPM	2
WCM(>100MHz)	3
FCT(~20MHz)	6 + 1 (v-BT)
DCCT(DC-30kHz)	2
MWPM	1 (inj.), 2 (SX, Abort BT)
OTR	1
Flying Wire (H/V)	1 / 1
IPM (H/V)	2 / 1
BLM	PBLM 216 sAIC 52 longAIC 19



3-50 BT

Monitors	Number
Single-pass BPM	17
FCT(~20MHz)	5
MWPM	9
OTR	1
BLM	PBLM 50 sAIC 6 longAIC 3

J-PARC MRを例にしたビームモニタの要求精度

• ビームの時間構造⇒信号周波数

- 周回周波数×ハーモニック＋その高調波
 - (光速/1568m) × (h=9) ⇒ 1.7MHz
 - バンチ長の $\sigma_t=20\text{ns}\sim 200\text{ns}$ ⇒ $1/20\text{ns}/3 \Rightarrow < 17\text{MHz}$
- モニタ種によって要求が違う
 - 速いCT (WCM, FCT) ⇒ 詳細なバンチ時間構造 ⇒ $< 100\text{MHz}$
 - 遅いCT (Feed Back CT、DCCT) ⇒ 周回ビーム電流測定 ⇒ 1周期(1/2.48s) ~ kHz
 - BPM ⇒ COD測定 ~ バンチ毎測定 ⇒ 数100 ~ 数100kHz
 - Feedback用BPM ⇒ 数100MHz
 - BLM ⇒ 1周期 ~ ターン毎測定 ⇒ 1周期(1/2.48s) ~ 数100kHz
 - プロファイル ⇒ ~ バンチ毎 ⇒ 種類によって様々



DC~20MHzがメインターゲット

• 測定精度

- 速いCT ⇒ 1%
- 遅いCT ⇒ 差分からロス粒子数を評価 ⇒ 0.1%(現状で確度1%,)
- BPM ⇒ 位置精度 ⇒ ~0.1mm/ダクト径130mm ⇒ 0.1%以下
- BLM ⇒ 1%(入射) ~ 0.1%(出射)のロスを測定 ⇒ 0.01%
- プロファイル ⇒ ビームコア(±2σ領域:測定対象95.4%) ~ ビームテール・ハロー(±3σ領域以:測定対象99.7%以上)

• 周波数帯域はバンチ長が長いいためDC~20MHz

• ダイナミックレンジは 10^3 以上

低周波信号がメインターゲットであるが、高い信号精度

放射化の問題と測定精度の関係

モニタへの高い精度要求

J-PARC MRで許容されるビームロスと許容被ばく量

J-PARC MRの各エリアの許容ビームロス量とJ-PARC作業員の許容被ばく線量(管理目標)。
ガンマ線の場合、 $Sv=Gy$ と換算。

許容ビームロス量		J-PARCにおける作業員の許容被ばく量	
アーク部	0.5W/m	男性	0.5mSv/日
入射直線部コリメータ	2kW		7mSv/年
SX直線部	7.5kW	女性	0.3mSv/日
FX直線部	1.25kW		5mSv/年

トンネル構造

敷地境界での放射線
地下水の放射化

作業エリアが1mSv/h以下が目標

1 hoot distance (30cm)離れた線量率で考えることが多い
シールドなしで30分程度の作業

許容ロス =

全加速粒子数の1% (3GeV) ~ 0.1% (30GeV)

モニタシステムは0.1%~0.01%の信号変動を測定しなければならない

核反応確率

- ① 高エネルギー陽子の飛程
(電離損失によるエネルギー散逸によるもの)

$$R = 233 \left[\frac{g}{\text{cm}^2} \right] \rho^{-1} Z^{0.23} (E[\text{GeV}] - 0.032)^{1.4}$$

Target: Fe, 3GeV -> R=2.9m

- ② 非弾性散乱断面積

$$\begin{aligned} \sigma &= \pi r_0^2 A^{2/3} \\ &\text{(ここで } r_0 = 1.26 \text{ fm)} \\ &= 16\pi A^{2/3} \text{ mb} \quad (b = 10^{-28} \text{ m}^2) \end{aligned}$$

平均自由行程 $\lambda = 33.2 \cdot \rho^{-1} A^{1/3} \text{ cm}$

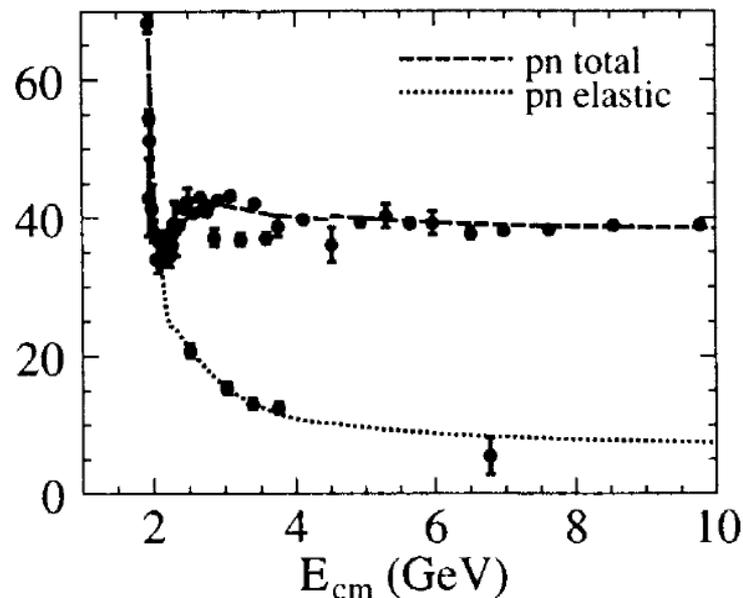
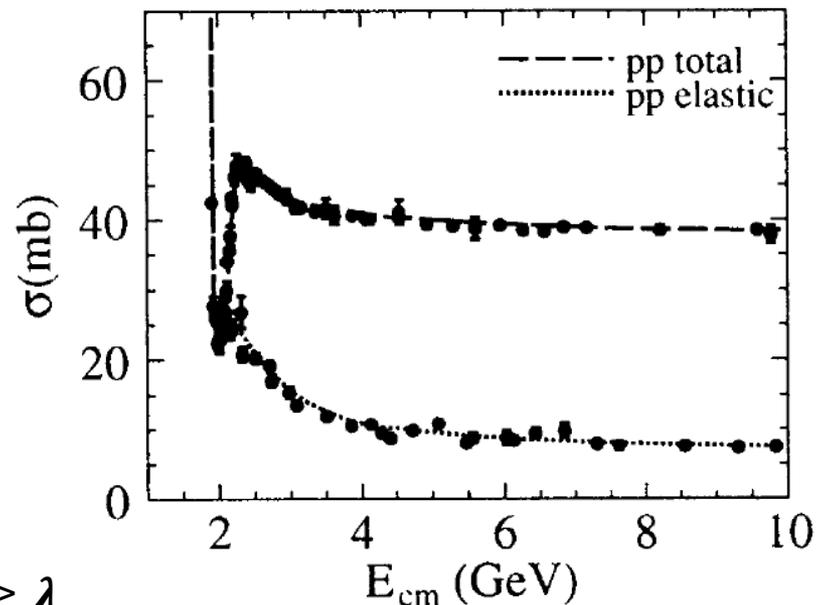
鉄の場合 $\sigma = 757 \text{ mb}, \lambda = 16 \text{ cm}$

厚み z を通過した際の反応率

$$P(z) = 1 - \exp(-z/\lambda)$$

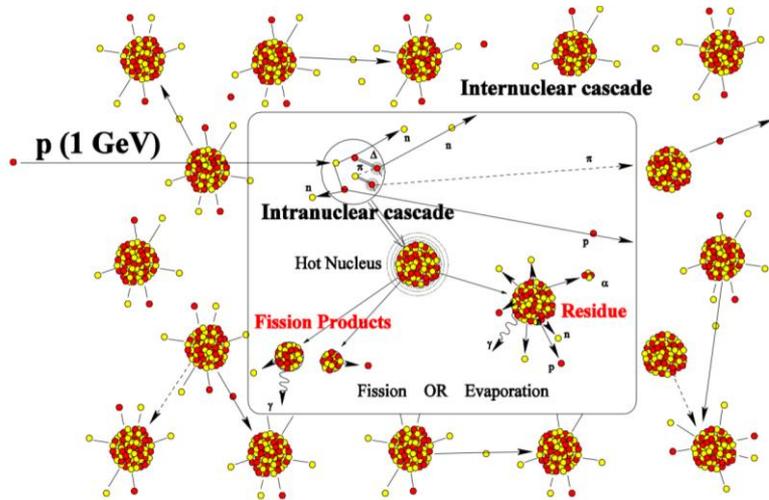
厚み16cmで63%が核反応
さらに2次粒子も反応に寄与する

$R \geq \lambda$



厚いターゲットによる核破碎反応

厚いターゲット内での核反応
Spallation: 核破碎反応



Stefano Panebianco, "The physics of the spallation (target)", ITC-8 2009, Presentation file より転載

<Intra-nuclear Cascade(直接反応)>

・入射陽子(数100MeV以上)は**ターゲット原子核内の複数の核子と準自由散乱**(原子核媒体内での自由な核子・核子散乱)

・高エネルギー(>15MeV)の前方方向に陽子、中性子が放出
⇒**1GeV以上**では陽子、中性子に加え、**パイオンも放出**

<Inter-nuclear Cascade>

・十分にエネルギーが高い放出粒子が**ターゲット内で再散乱**
・放出ハドロンエネルギーが直接反応の閾値以下にさがるまで可能な限り繰り返す

<前平衡過程>

上記の反応生成物が、高励起状態の核種へと至る中間状態

<複合核の脱励起>

・高励起状態の反応生成核が脱励起(冷却)

Multi-fragmentation(複数の核子への分解)

核分裂(ほぼ同質量の2核子への分裂)

蒸発過程

・**蒸発過程**では**中性子、陽子、α粒子、光子が等方的に放出**される(1中性子当たり8~10MeV程度のエネルギーを持ち去る)。

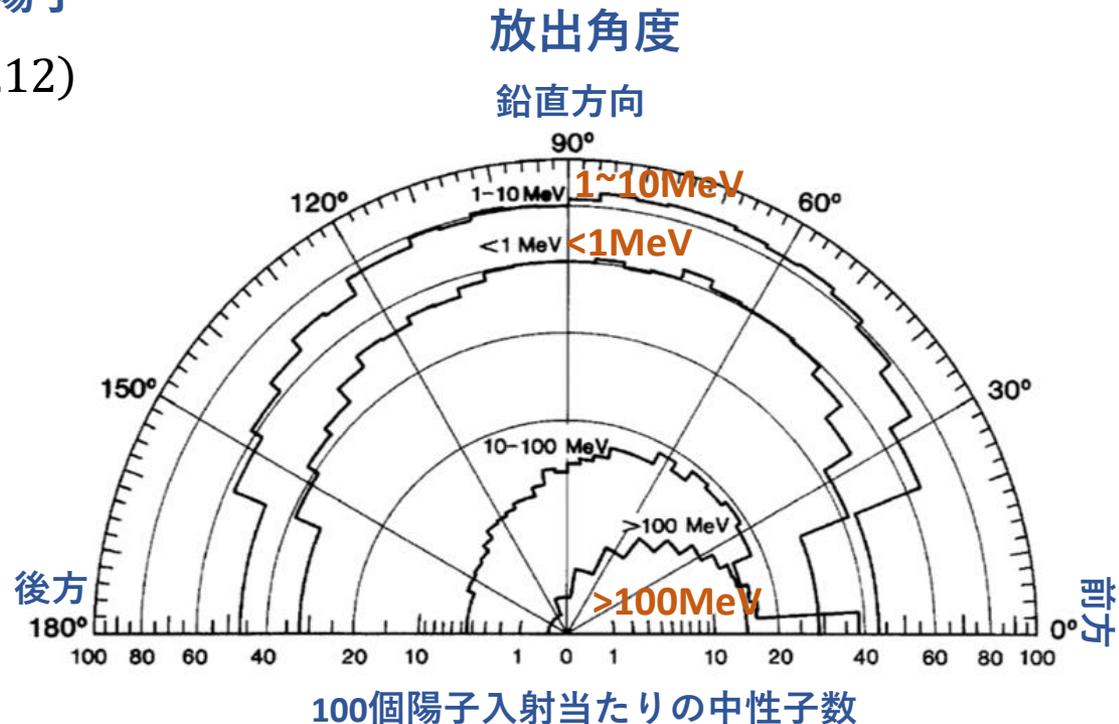
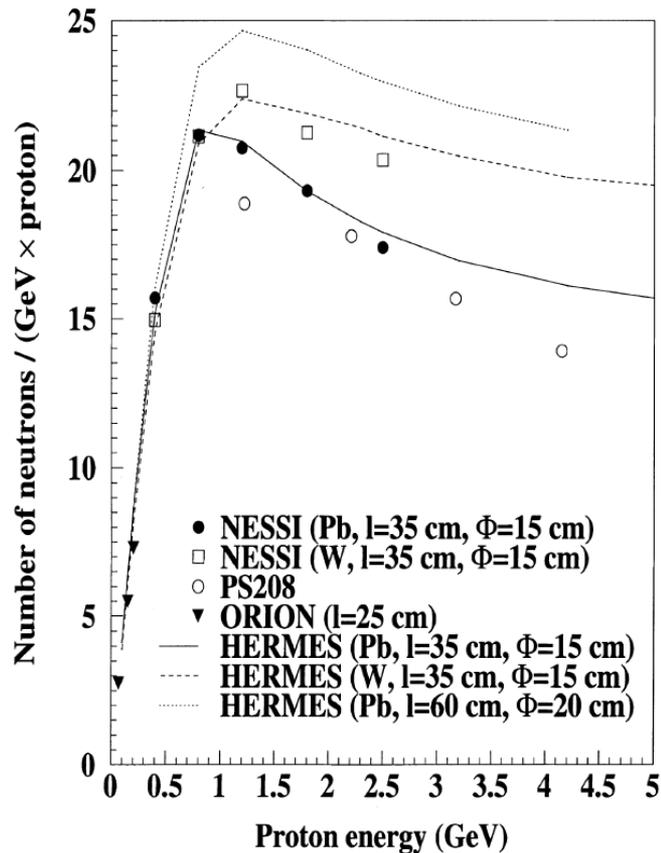
PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System)等の粒子輸送計算コード
で評価する <https://phits.jaea.go.jp/indexj.html>

生成中性子の生成数と角度分布

Spallationによる中性子放出数/1陽子

$$Y = 0.1 \cdot (A + 20) \cdot (E[GeV] - 0.12)$$

10 < A < 210



G.S. Bauer, Journal Of Fusion Energy, Vol. 8, ¾, 1989より転載

・ ターゲット種や厚み(数10cm)によるが、**最大 20n/p@1GeV程度**

- ・ 1GeVからはパイオン生成が競争する。
- ・ 高エネルギー中性子は前方放出
- ・ 10MeV以下は等方的に放出される

ビームロスによる残留放射線の評価

Sullivan-Overton formula

崩壊定数 λ の核種の崩壊

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$



運転時間 T 後の特定の核種からの線量率は

$$D(t)|_{\lambda} = G\phi(1 - e^{-\lambda T})e^{-\lambda t}$$



ϕ :不安定核を生成する放射線のFlux[1/m²/s]⇒ビームロスパワー
 T :加速器運転時間
 G :比例定数

線量率はすべての核種からの寄与を積分して

$$D(t) = \int_0^{\infty} D(t)|_{\lambda} \frac{dn(\lambda)}{d\lambda} d\lambda$$

$$\approx Ga\phi \frac{\int_0^{\infty} (1 - e^{-\lambda T}) e^{-\lambda t} d\lambda}{\lambda}$$

$$= B\phi \ln\left(1 + \frac{T}{t}\right)$$

崩壊定数が λ 以下の核種

$$N(\lambda) = \int_0^{\lambda} \frac{\Delta n(\lambda)}{\Delta \lambda} d\lambda = a \cdot \ln(\lambda)$$

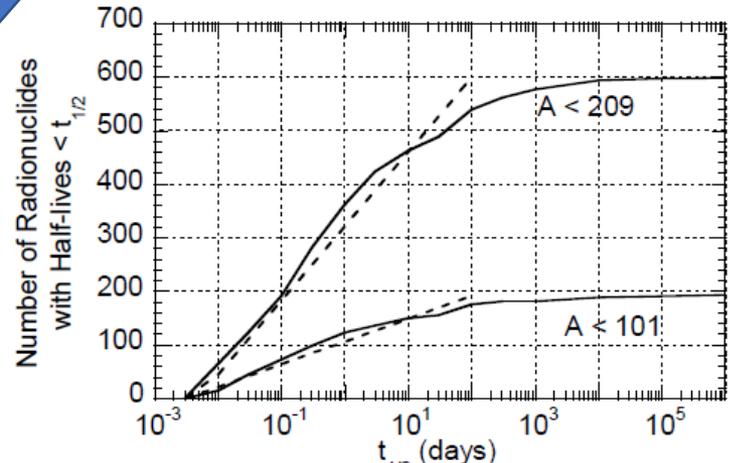
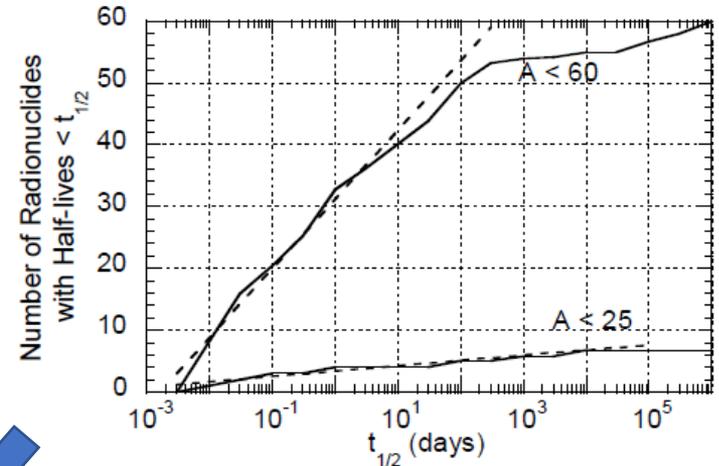
↓ 微分

$$dn(\lambda) = a \frac{d\lambda}{\lambda}$$

比例定数 B

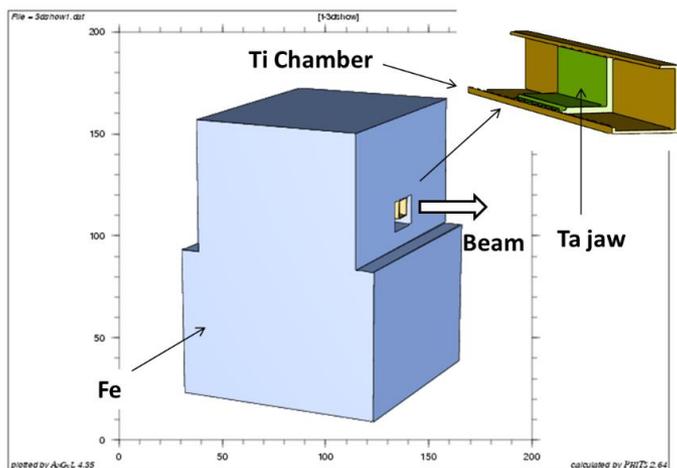
- ターゲット幾何学形状
- ターゲット構成物質
- ビームロス時の状況 (エネルギー、ターゲット内の衝突場所)

半減期が $T_{1/2}$ 以下の核種数



“Radiation Physics for Personnel and Environmental Protection”, Fermilab Report TM-1834, P197から転載

粒子輸送計算コードによる評価



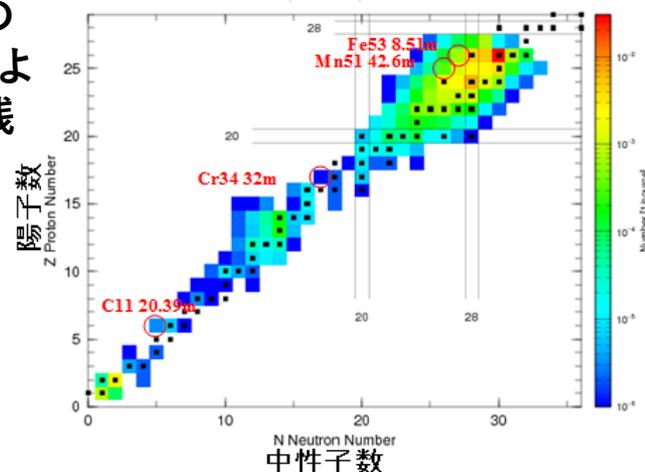
PHITS

入射粒子とターゲットの反応、2次粒子の生成および反応を計算して生成残留核を評価する

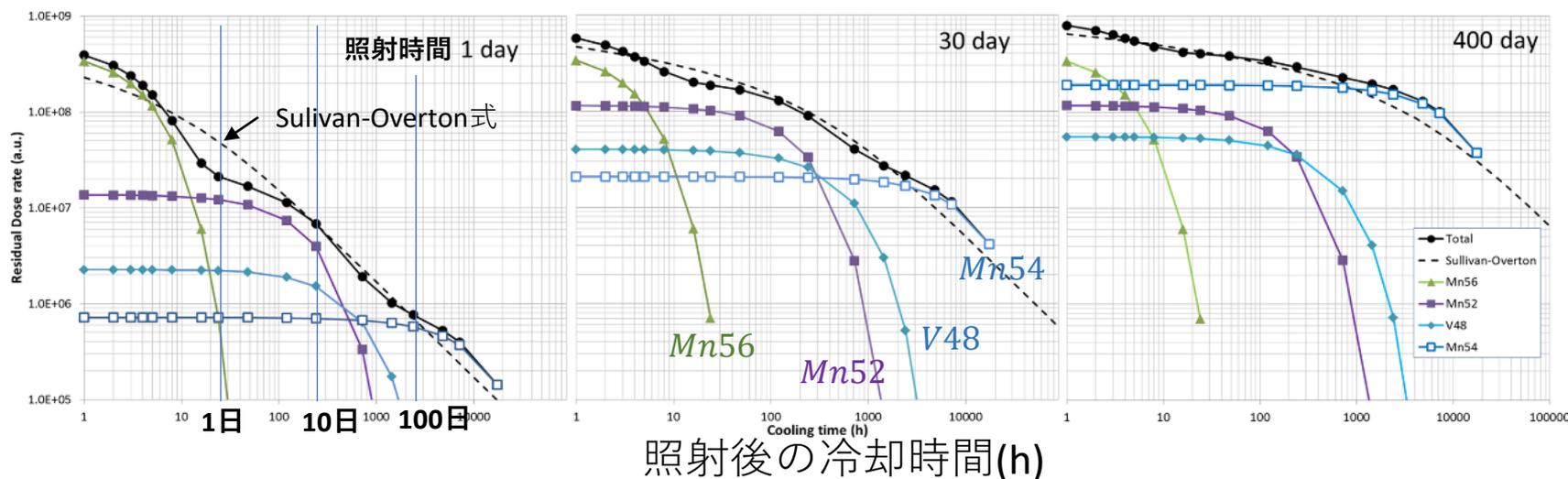


DCHAIN-SP

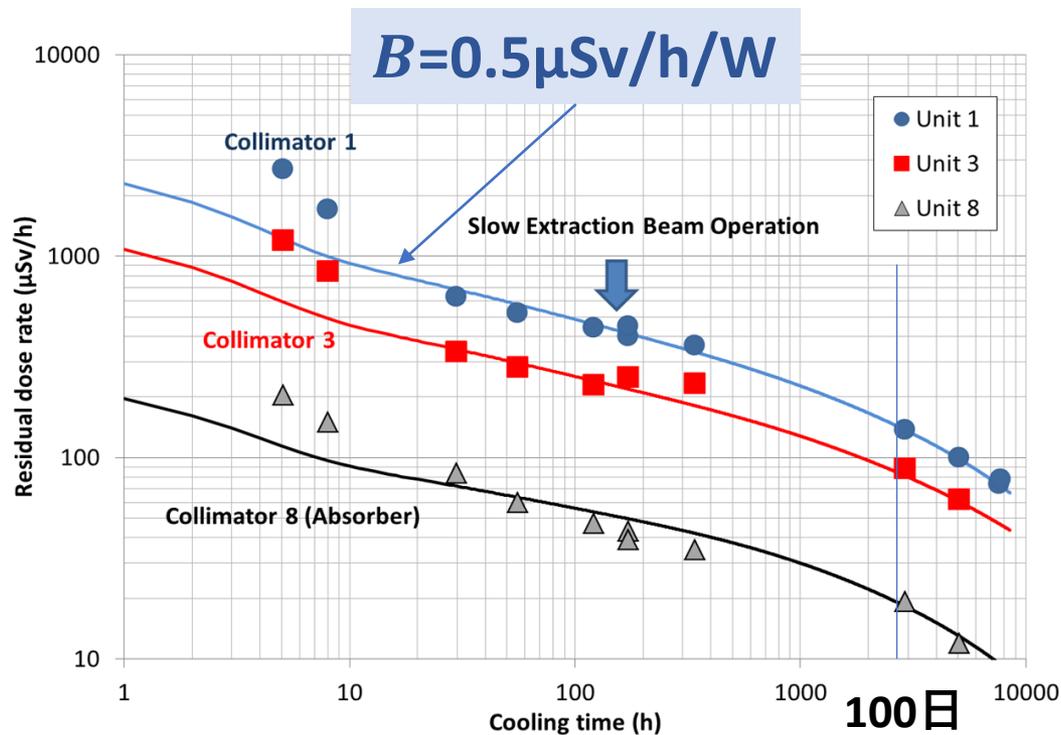
生成残留核の崩壊過程を計算



MR用コリメータの計算体系



運転後の残留線量との比較



500Wロス @1コリメータ
 1か月運転
 24時間冷却後
 ↓
1mSv/h

0.7% @ 75kW inj. Beam
0.4% @ 130kW inj. Beam

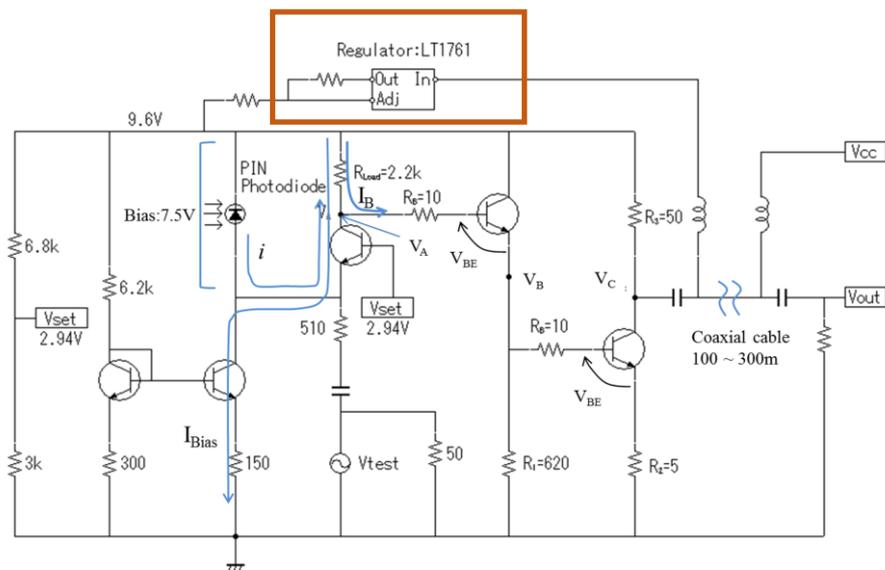
Mn54, Mn56からの寄与を補正した式を使用

$$D(t) = B\phi \log\left(\frac{T}{t} + 1\right) + B\phi\alpha e^{-t/T_{1/2:\text{Mn56}}} + B\phi\beta(1 - e^{-T/T_{1/2:\text{Mn54}}})e^{-t/T_{1/2:\text{Mn54}}}$$

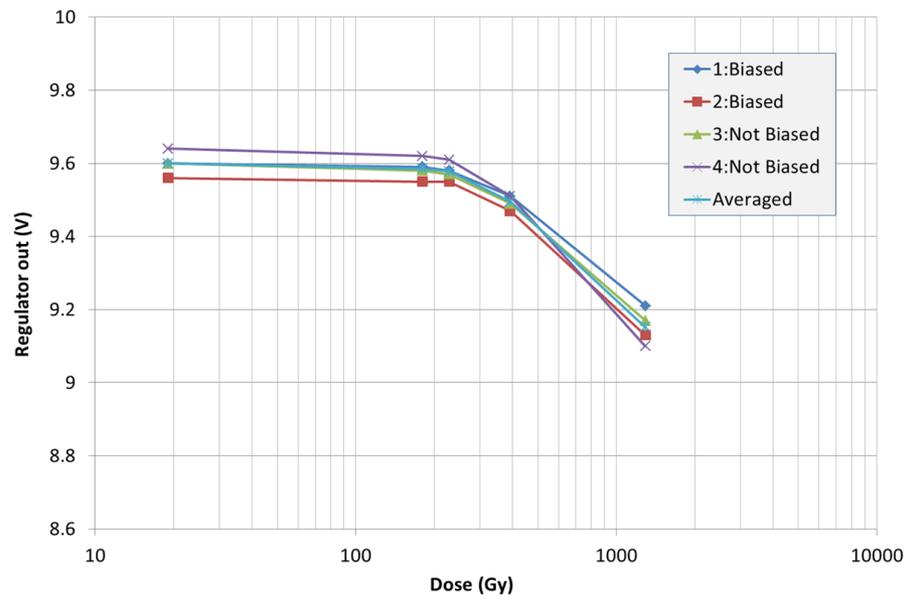
運転中と運転後(1h後)の線量の相関

- KEK-PSの経験からよく言われるいるのは**1000倍**
- J-PARCの場合、運転中の線量率は運転後の線量率のおおよそ**500倍**：場所によりfactor 2~3のばらつきがある
- 停止後の残留線量が**1mSv/h**の場合、運転中は**0.5~1Gy/h**の線量を受ける
- トンネル内にアンプ等を設置した場合、**10**か月の運転で**3.6kGy~7.2kGy**

放射線の影響 (Total dose effect)

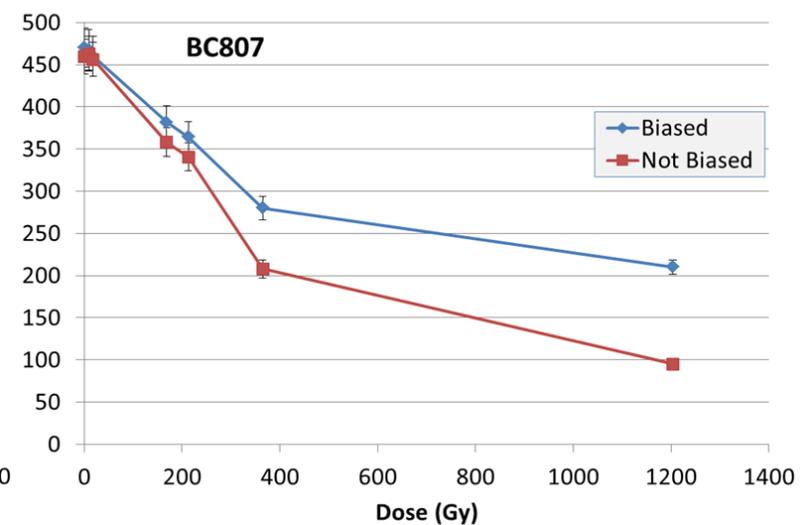
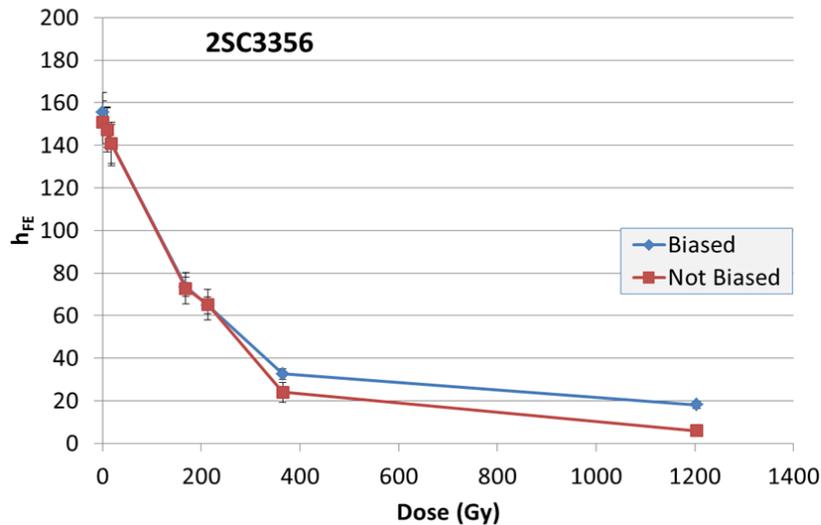
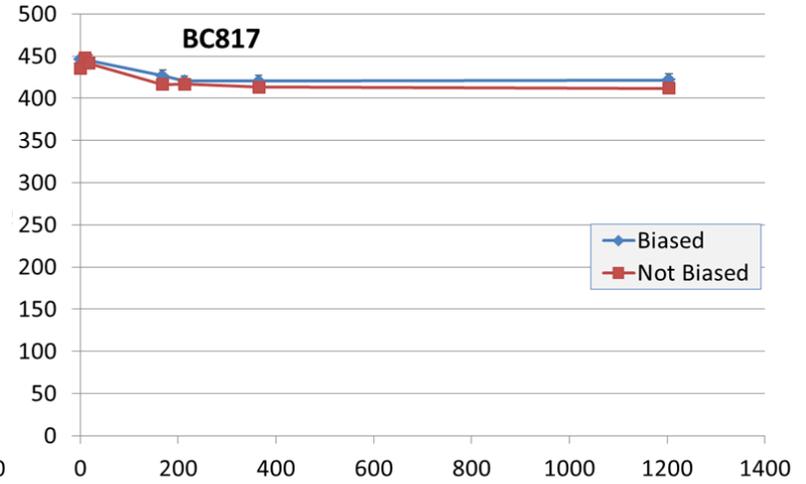
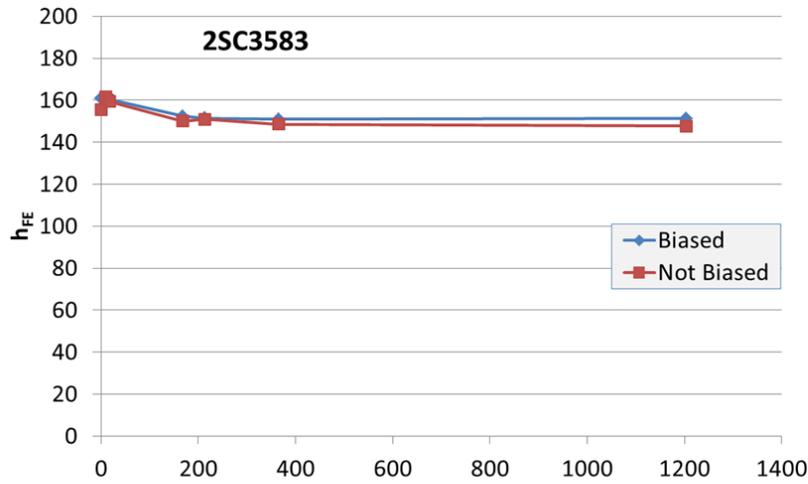


高速ロスモニタ用の試験回路



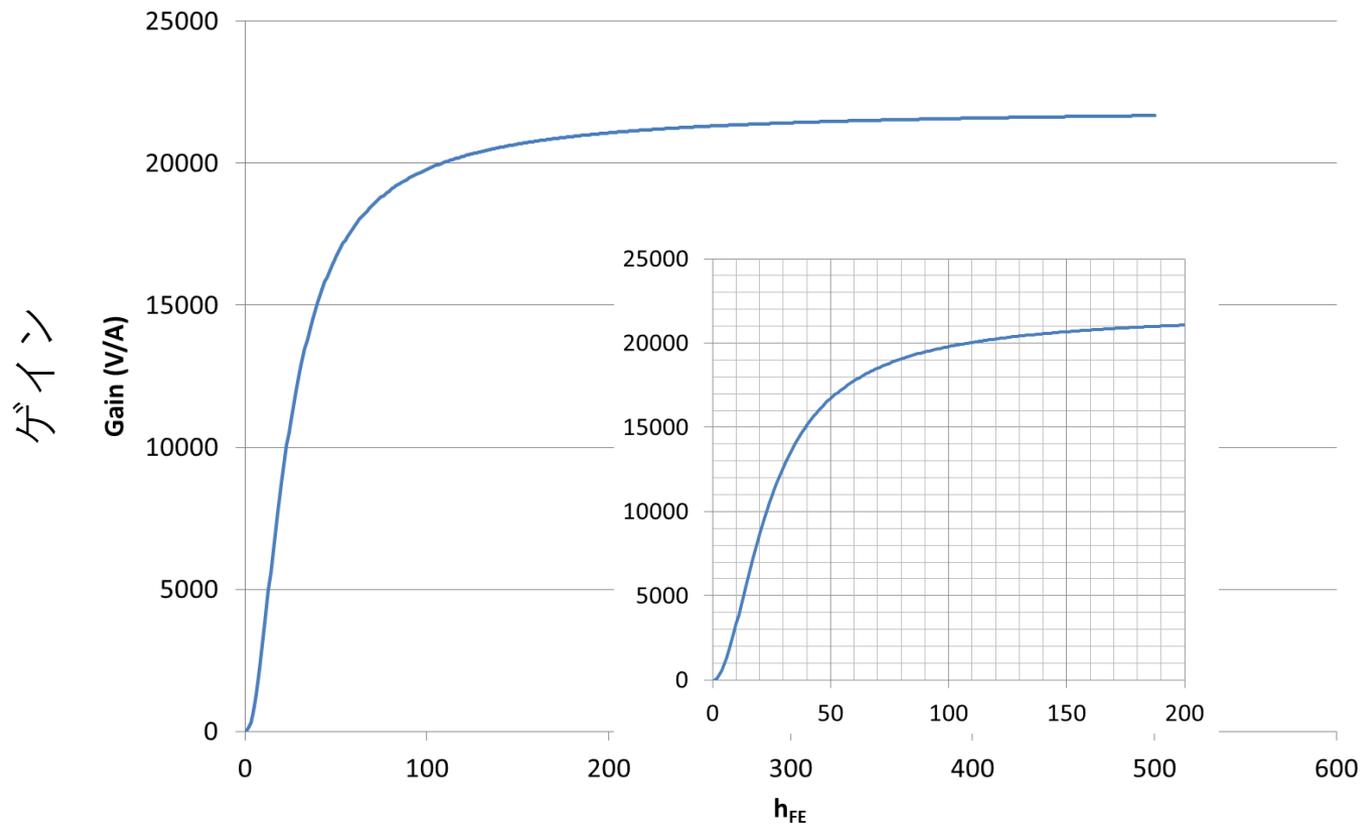
電圧レギュレータの変動

BJTの直流増幅率の変動(Total dose effect)



アンプゲイン変動

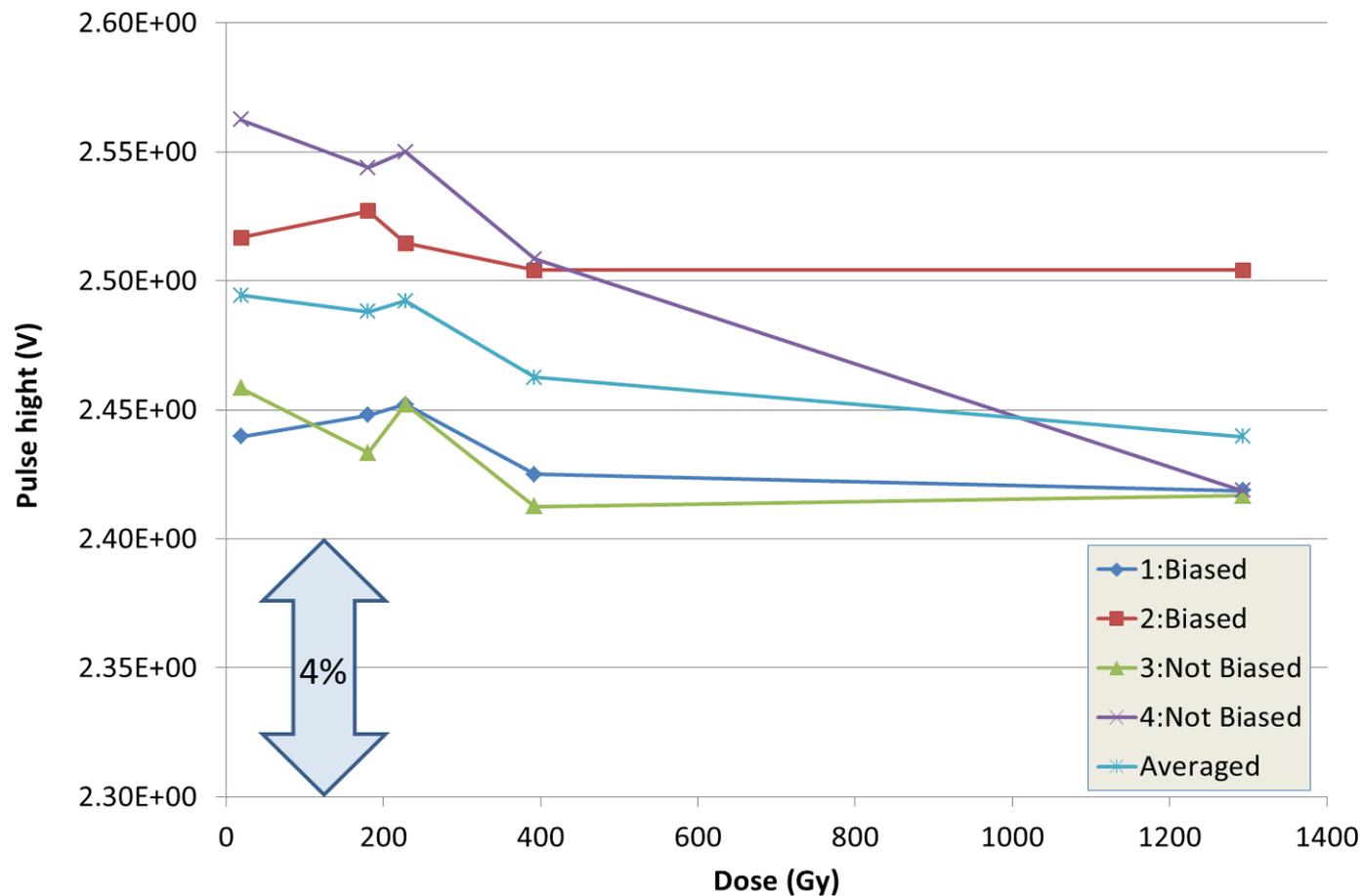
FeedBackがあるので h_{FE} (Open loop gainに相当する) の変動が即アンプゲイン変動ではない



直流増幅率の変動

2SC3583の場合、1.3kGy (50~100日) で1%のゲイン変動が起きる

2SC3583の場合



中性子の場合の影響

- ロス粒子数の10～20倍の中性子が発生
- ほとんどの中性子は10MeV以下で、等方的に放射される
- センサーや部材への影響：DPA(Displacement per Atom)
 - 放射線照射による結晶格子位置からはじかれる原子の数
 - DPAによって材料特性の劣化
 - 核反応とクーロン散乱を評価する
- 入射中性子が核反応を起こすと荷電粒子が生成
 - 半導体メモリ中にチャージを誘起してビット反転→SEU:ソフトエラー
 - SEB:焼損（運が悪いと、、、）

J-PARCのモニタ機器への対応

- 運転中の放射線がきついため、アンプ、ADC、FPGA、ネットワーク機器等はトンネル内に入れない方針→初段アンプまで100~300mの信号伝送
- 光ケーブルへの影響:Transmissionが低下（Color centerができる）
- MRではシンチレータタイプのBLMは使っていない
- ただし例外はある⇒DCCTドライブアンプ、IPMアンプ、16電極Pick-up用ADC機器
 - DCCT用ドライブアンプ：サブトンネルに設置しており、30m離れている⇒いまのところ問題なっていない
 - IPMアンプ：サブトンネルに設置しており、30m離れている⇒目立ったゲイン変動はない
 - 16電極Pick-up用ADC機器：入射エリアの近く⇒時々意味不明は通信エラーが出る⇒シールドの追加等の対策を講じる予定
- ケーブルの減衰を嫌い、一部のモニタ機器でヘッドアンプ利用を検討を開始している
 - IPM：チャンバー直付けタイプのI-V変換
 - 高速BLM：PINダイオード+ヘッドアンプ（I-V conv.）

Beam Loss Monitor (BLM)

BLMの目的

- ビームロス分布測定 → ビームチューニング
 - インターロック信号MPS(Machine Protection System)
 - 電磁石機器の停止
 - RF機器の停止
 - 真空悪化
 - **残留放射線レベルのコントロール**
 - DCCT信号の差分でロスパワーを算出
- 過大なビームロスが発生
レベルに対してインターロックをかける(<1 μ s)
ビームアボート (<1ms)

BLMの測定対象

- 高エネルギー光（制動放射光）による対生成粒子（主に電子加速器）
 - 対生成による $\pm e$ 、 $\pm \pi$ 、 $\pm \mu$
- ロスしたビーム粒子の直接検出
 - 鉄内の飛程2.9m、平均自由行程16cm
 - ビームダクトや電磁石を突き抜けてくるもの
- 核反応による2次粒子（陽子、中性子、光子、パイオン、ミューオン）
 - 核反応による2次粒子
 - 陽子、 $\pm e$ 、 $\pm \pi$ 、 $\pm \mu$ 、ノックオン電子（ δ 線）等：直接電離放射線
 - 光子、中性子：間接電離放射線
- 不安定核からの崩壊
 - 核反応生成物からの β 崩壊
 - BLM検出器そのものの放射化
 - 崩壊時間の長いものはオフセットとして除去

ビームロス信号ではない
測定から差し引く

BLM出力≠ビームロス



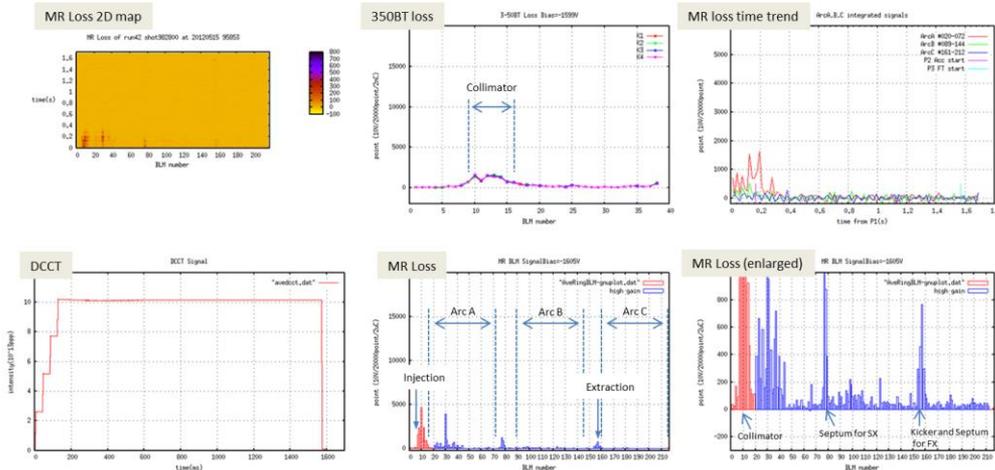
大強度加速器に必須

- 放射化抑制
- 放射線による損傷や電離ロスによる発生熱

➡ 寿命低下
損傷

BLMはビームロスを大雑把に把握するのみ

- ロス粒子を直接観測していない
- 検出器の数に限りがある
- 2次粒子検出⇒測定対象が複雑
 - 散乱体の構造・材質（様々な機器）
 - 衝突エネルギー
 - 衝突場所と検出器との位置関係
 - 放射線種・エネルギーによる感度違い
- 検出器の出力特性
 - 感度、ゲイン
 - 出力直線性
 - 最大出力電流



ロス粒子数はCT(FCT, DCCT)

- 電流の変位⇒ロスパワー
- 全電流の1~0.1%が下限
- 数は限られる（数か所）

分布と強度はBLMから

- リング内に216か所
 - 高感度検出器が使用できる⇒低レベルロス
 - どこまでも出力は上げられない
- ➡ダイナミックレンジ

直接電離放射線のエネルギー移行

電荷 ze ローレンツ因子 β の入射粒子が電子密度 n のターゲット物質に入射する場合の素子能（面積質量当たりのエネルギー移行 $\text{MeV}/(\text{g}/\text{cm}^2)$ ）

1) 核的阻止能

- 原子核間ポテンシャルによる弾性衝突の効果
- 核力が関わっているわけではない
- 斥力ポテンシャル（クーロンポテンシャル）による減速効果
- 100keV以下の低エネルギー

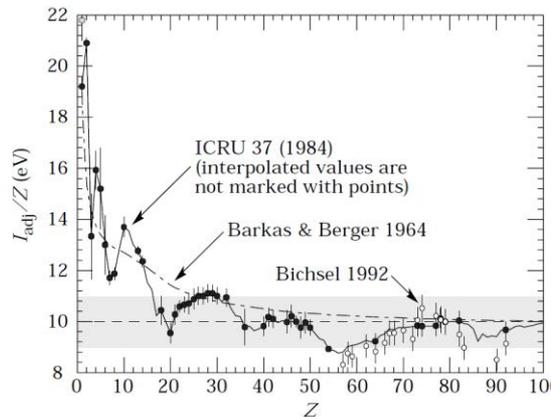
Bethe-Blochの式 密度効果は含まない

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi}{m_e C^2} \frac{nz^2}{\beta^2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \left[\ln \frac{2m_e C^2 \beta^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 \right]$$

$$\text{電子密度 } n = \frac{N_A Z \rho}{AM_{mol}}$$

2) 電子的阻止能

- 物質内原子（ターゲット）の束縛電子・自由電子との非弾性衝突によるエネルギー散逸



束縛電子のエネルギー構造は平均励起エネルギー I で代用

$$I/Z \approx 10\text{eV}$$

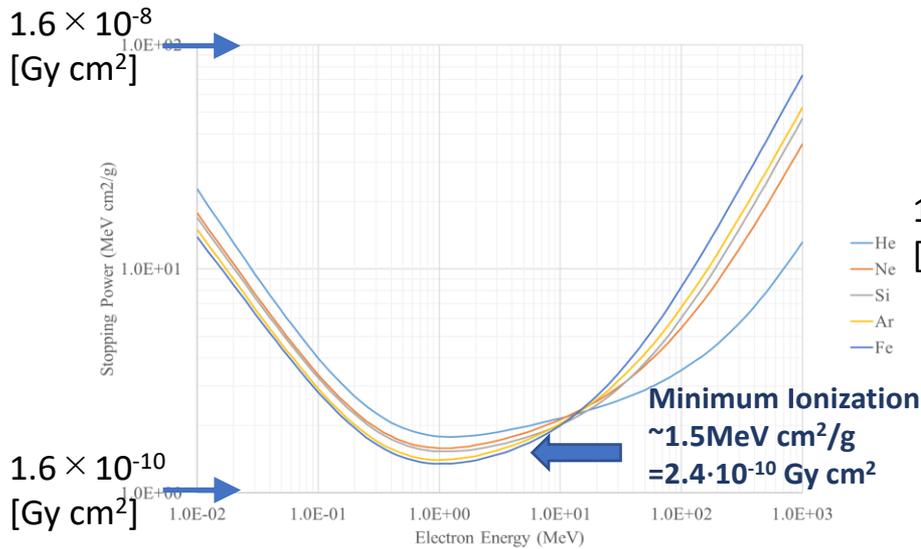
3) 放射阻止能(電子の場合)

- 制動放射により光子へ移行するもの

阻止能

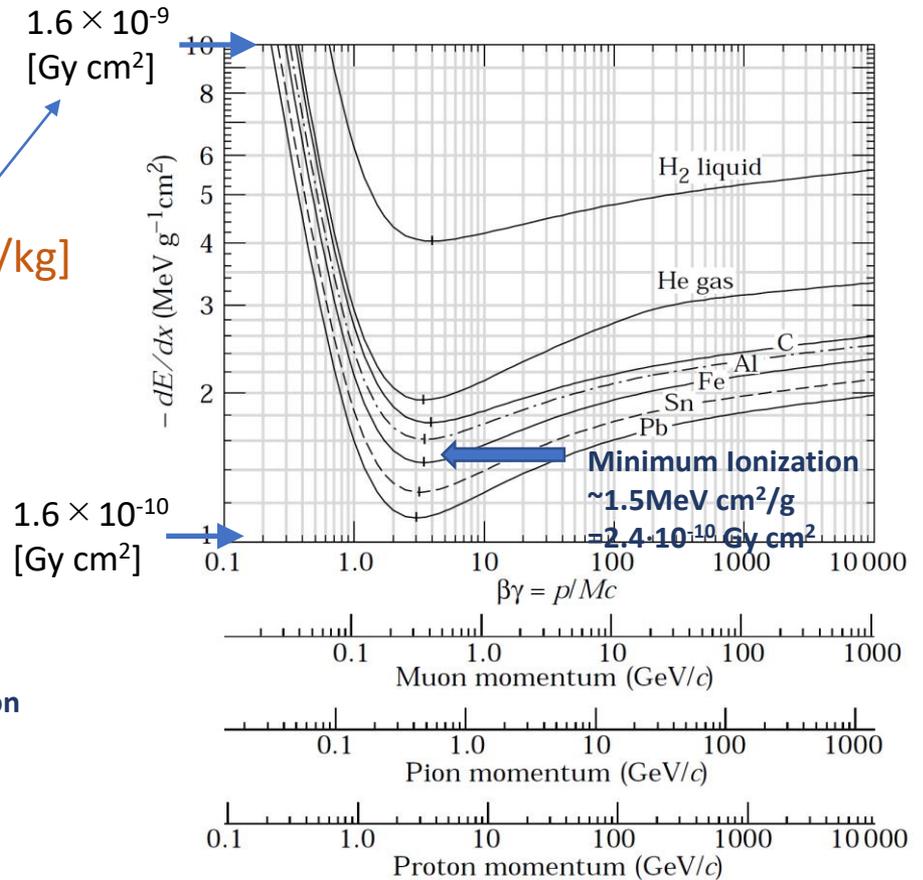
陽子加速器の場合
電子、陽子、パイオン、ミュオン
が主要な直接電離放射線

電子の阻止能



アメリカ国立標準技術研究所(NIST)のデータベースから
Web pageに電子、α、陽子のデータベース(ESTAR、
ASTAR、PSTAR)が公開されている

陽子、パイオン、ミュオンの阻止能



Particle Data Group, "Review of Particle Physics,"
Phys. Rev. D 98, 030001, 2018. より転載

間接電離放射線のエネルギー移行

光子や中性子は無電荷で電離相互作用がない
 放出される荷電粒子によってBLM検出器にエネルギーが移行する
 →光電子放出、電子対生成、核反応による陽子放出

光子の反応確率

$$I = I_0 \exp(-\mu z)$$

線減弱係数

$$\mu = \mu_{photo} + \mu_{coh} + \mu_{incoh} + \mu_{pair} \quad [cm^{-1}] \quad \rightarrow$$

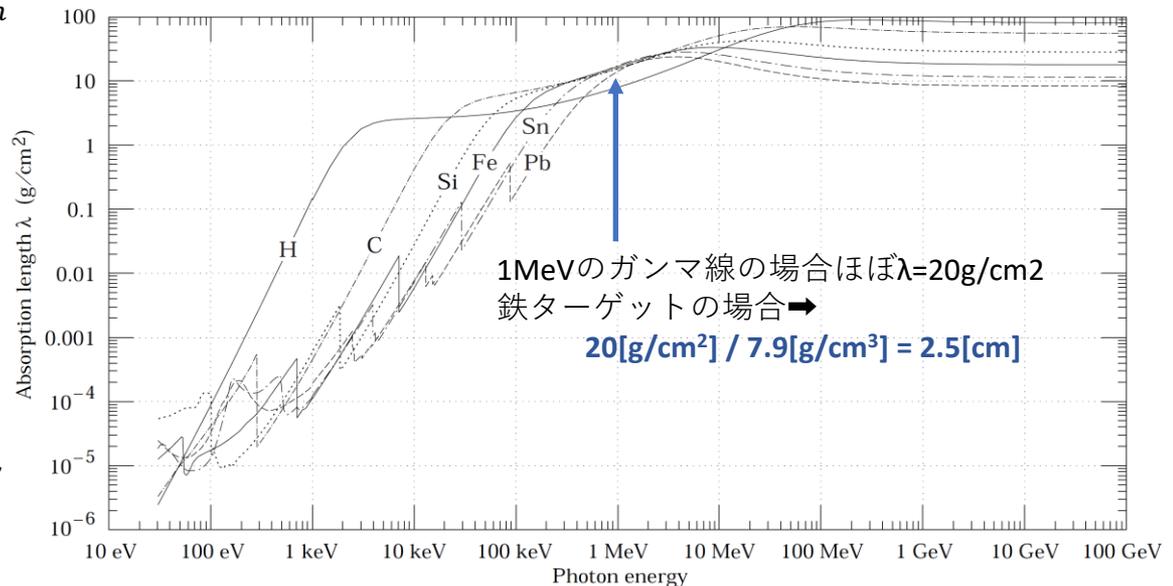
エネルギー移行係数 (移行割合 α_i)

$$\frac{\bar{E}}{h\nu_0} \mu = \alpha_{photo} \mu_{photo} + \alpha_{coh} (= 0) \mu_{coh} + \alpha_{incoh} \mu_{incoh} + \alpha_{pair} \mu_{pair} \quad [cm^{-1}]$$

線減弱係数 $[cm^{-1}]$ を密度で規格化した
 質量線減弱係数 $[cm^2/g]$ の逆数

→平均自由行程 $[g/cm^2]$ →

- 反応過程
- 光電効果(Photoelectric effect)
 - 干渉性散乱(Coherent scattering)
 - : トムソン散乱・レイリー散乱
 - 非干渉性散乱(Incoherent scattering)
 - : コンプトン散乱
 - 電子対生成(Pair creation)



換算係数

線量への換算係数

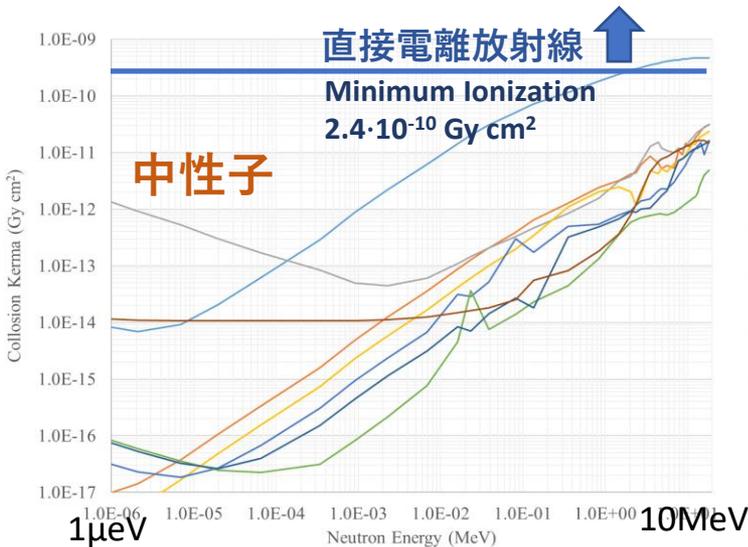
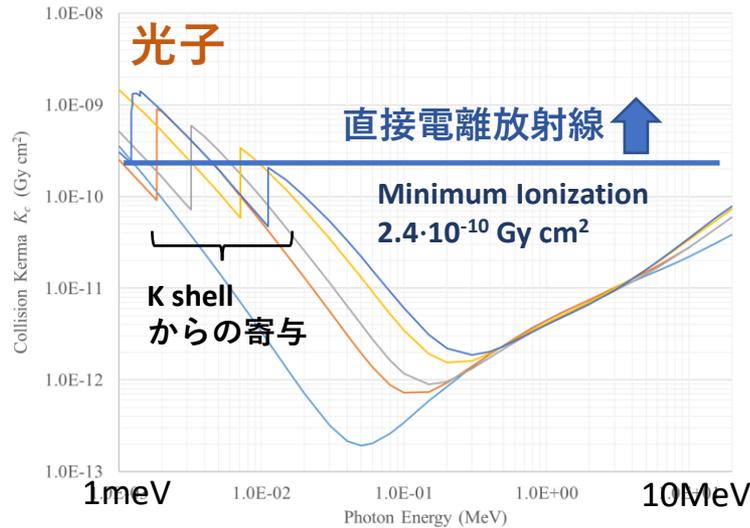
μ	線減弱係数		$[\text{cm}^{-1}]$
μ_m	質量減弱係数	μ/ρ	$[\text{cm}^2/\text{g}]$
μ_{tr}	エネルギー移行係数	$\frac{\bar{E}}{h\nu_0} \mu$	$[\text{cm}^{-1}]$
μ_{tr}/ρ	質量エネルギー移行係数		$[\text{cm}^2/\text{g}]$
K	カーマ	$\mu_{tr}/\rho \cdot h\nu_0 \Phi$	$[\text{Gy}=\text{J}/\text{kg}]$
μ_{en}	エネルギー吸収係数	$\mu_{tr}(1 - g^*)$	$[\text{cm}^{-1}]$
μ_{en}/ρ	質量エネルギー吸収係数		$[\text{cm}^2/\text{g}]$
K_C	衝突カーマ	$\mu_{en}/\rho \cdot h\nu_0 \Phi$	$[\text{Gy}]$
D	吸収線量	荷電粒子平衡時 $D = K_C$	$[\text{Gy}]$
X	照射線量	$\frac{\Delta Q}{\Delta m}$	$[\text{C}/\text{kg}]$

※ 放射損失 S_{rad} /衝突損失 S_{col} (電子的 + 核的阻止能)
 g :制動放射による光子への再移行割合

$$\frac{S_{rad}}{S_{col}} \approx TKE[\text{MeV}] \cdot Z/800[\text{MeV}]$$

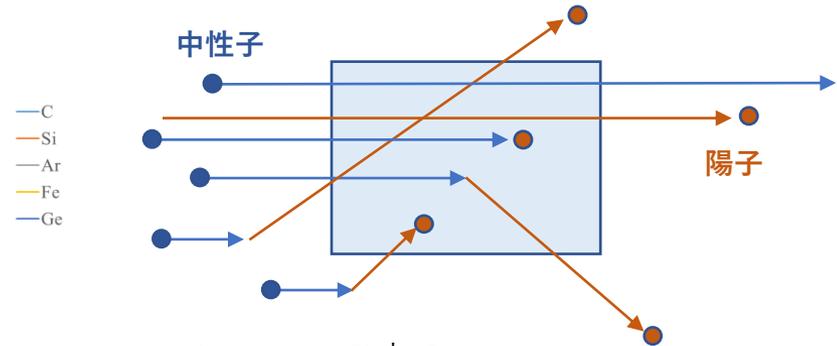
$TKE \ll 800/Z \rightarrow 31[\text{MeV}]$ in Fe \rightarrow 放射損失が無視出来て $g=0$

光子と中性子の衝突カーマとカーマ近似



カーマ近似 → 局所近似

反応が起こったその場所で全エネルギーを消費



Si(2.33g/cm³)中のRange

10MeV Electron: $R=5.6 \text{ g/cm}^2 \rightarrow d=2.4\text{cm}$

10MeV Proton: $R=0.17 \text{ g/cm}^2 \rightarrow d=0.7\text{mm}$

ある領域から逃げる荷電粒子と外から入る荷電粒子が同じであるとき荷電粒子平衡が成り立っている

$$D = K_C$$

境界が真空の場合、領域とは違う物質、境界の厚み、、、、

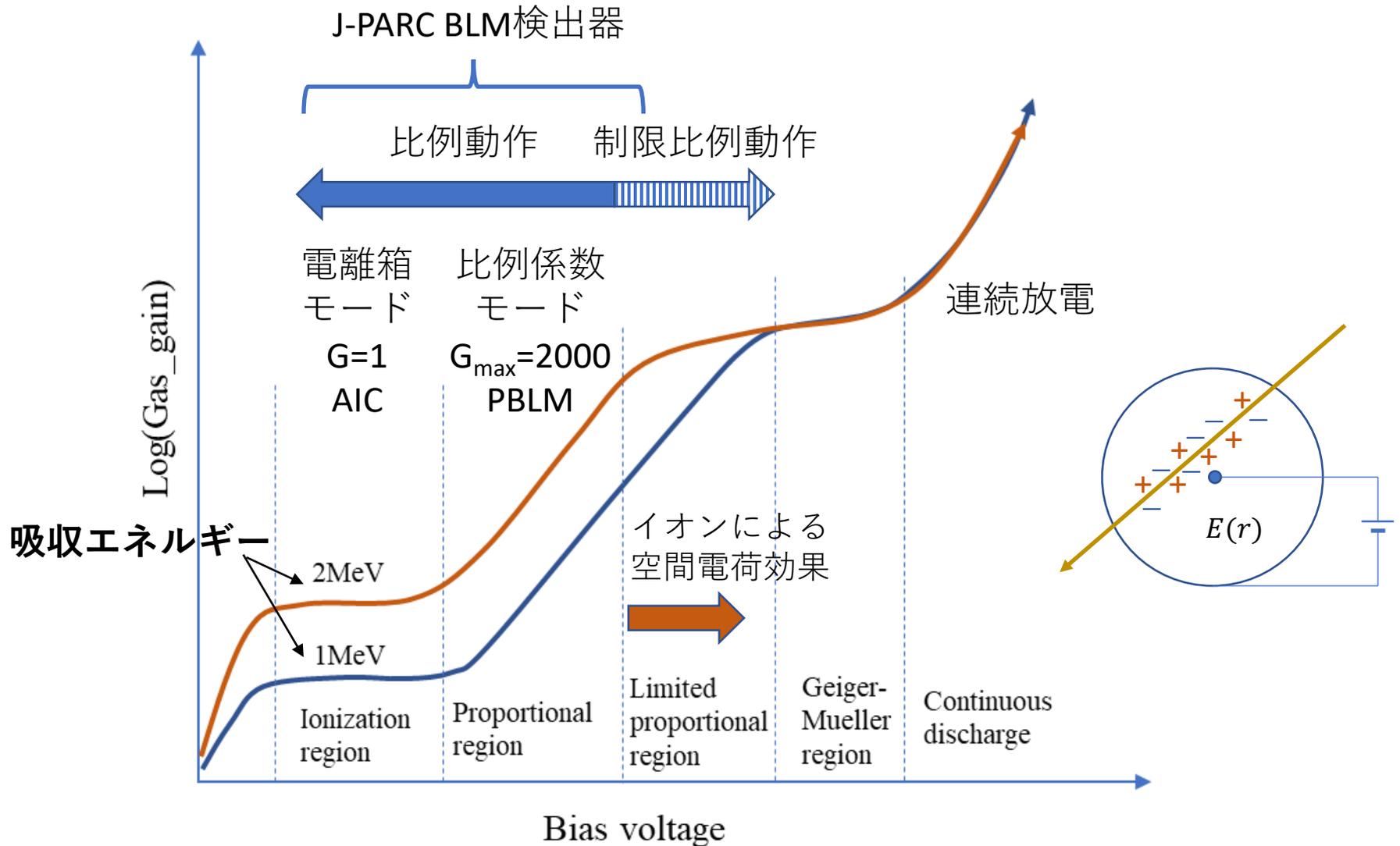
計算領域周りの影響(材質、大きさ、厚み)

Bragg – Grayの空洞原理

誘起電荷

- 検出器有感領域のエネルギー寄与 ΔE がわかれば誘起電荷 ΔQ が評価できる
- ガスの場合、 $\Delta Q = \Delta E / W$
 - 電子・イオンペアの平均生成エネルギー： W 値
 - W 値は多くの気体で22～43eVの範囲で平均値は約30eV
- 固体の場合、 $\Delta Q = \Delta E / \epsilon$
 - 電子・正孔対の平均生成エネルギー： ϵ 値
 - Si検出器の場合3.6eV、Ge検出器の場合3.0eV

ビームロス検出器：ガス検出器



比例計数管の動作原理（電離確率）

放射線による電離電子： n_0
 ガス中の平均自由行程： λ

アノード方向に r から $r + \Delta r$ へ移動後に、
 <電子が受け取るエネルギー＝電離エネルギー I >
 のときガスを電離する
 電離エネルギー・電場・距離の関係
 $dU = I = E(r)\Delta r$

Δr 移動するうちに、未散乱の電子は

$$n = n_0 \exp(-\Delta r/\lambda)$$



$$n/n_0 = \exp(-I/E\lambda)$$

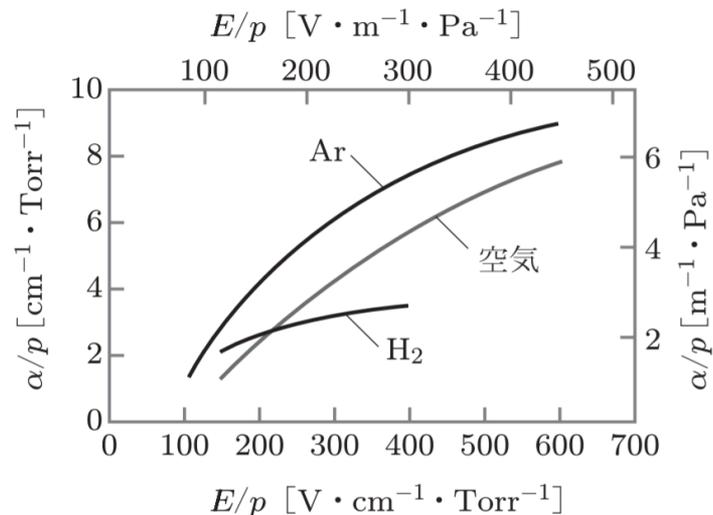
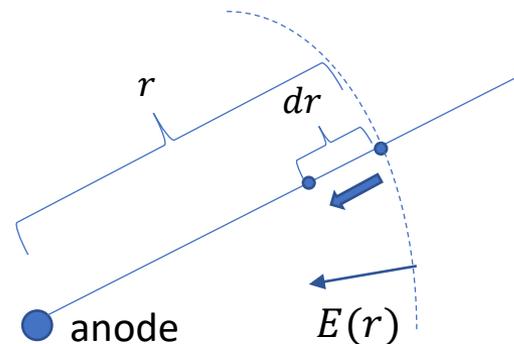
n_0 のうち、衝突しないで Δr 移動しそこで電離を起こす数が n より、**単位距離当たりの電離確率は**

$$\alpha = \frac{n}{n_0} \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} \exp(-I/E\lambda)$$

$$\frac{1}{\lambda} = Ap \text{ として}$$

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp\left(-\frac{AI}{E/p}\right)$$

← **Townsendの第1電離係数**



八坂保能著、放電プラズマ工学、森北出版 より転載

比例計数管の動作原理(ガス増幅度)

$$E(r) = \frac{V_0}{r \ln(b/a)}$$

α : 単位距離当たりの電離確率

$$dn/n = \alpha dr$$

$$\int \frac{dn}{n} = \int \alpha dr = \frac{V_0}{\ln(b/a)} \int \alpha(E) \frac{dr}{dE} dE$$

1次の関数で近似 $\alpha(E) \propto E$

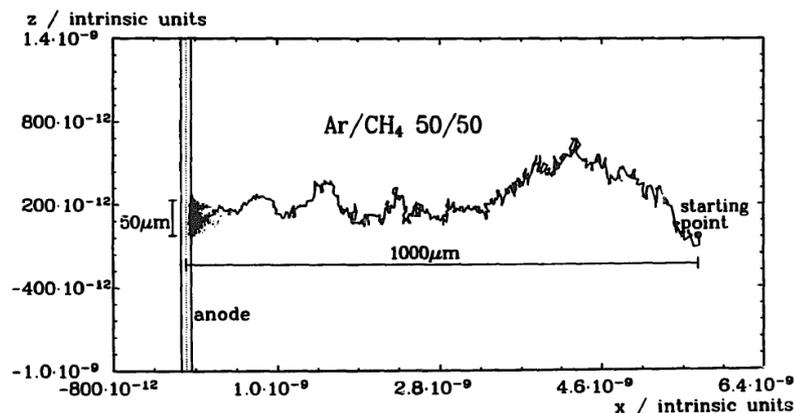
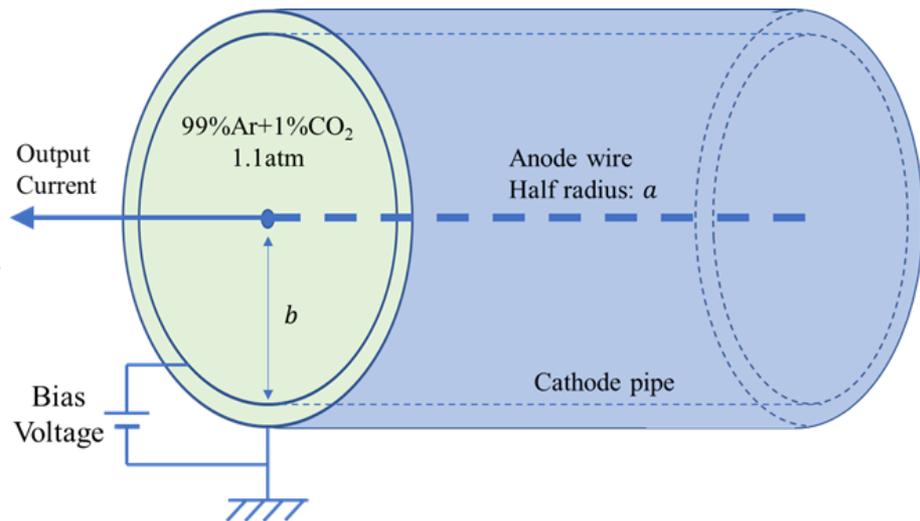
$$\begin{aligned} \ln M &\propto \frac{V_0}{\ln(b/a)} \int_{E(r=a)}^{E_{crit}} E \frac{d}{dE} \left(\frac{1}{E} \right) dE \\ &= \frac{V_0}{\ln(b/a)} \left\{ \ln \frac{V_0}{a \ln(b/a)} - \ln E_{crit} \right\} \end{aligned}$$

Dithornの関係式

$$\kappa = E_{crit}/p$$

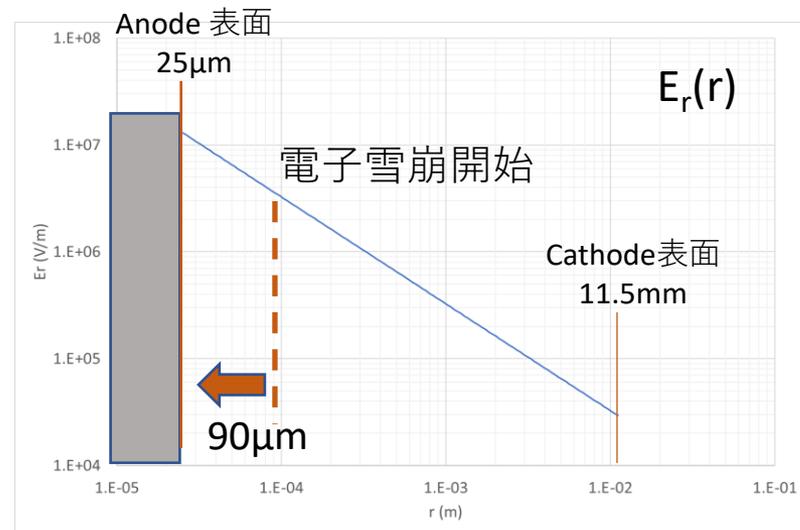
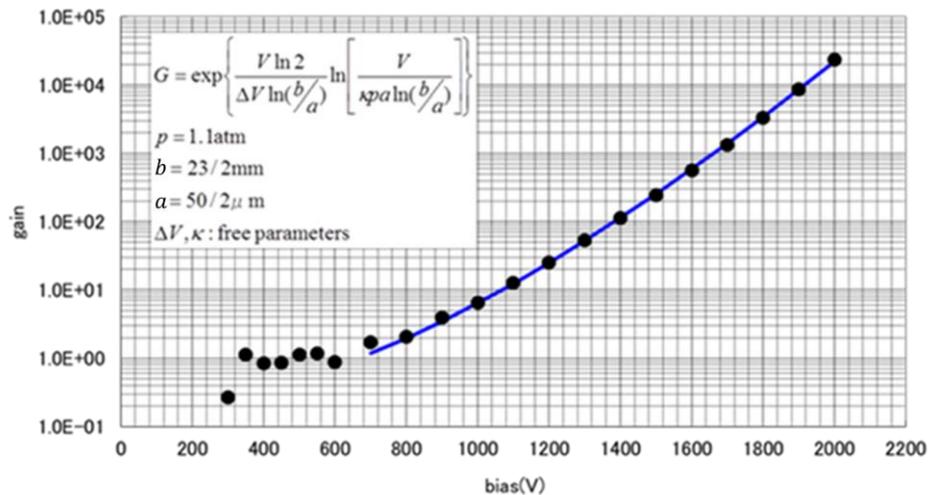
$$\ln M = \frac{V_0}{\ln(b/a)} \frac{\ln 2}{\Delta V} \left\{ \ln \frac{V_0}{pa \ln(b/a)} - \ln \kappa \right\}$$

引き続いて起こる電離事象間に得られるポテンシャル



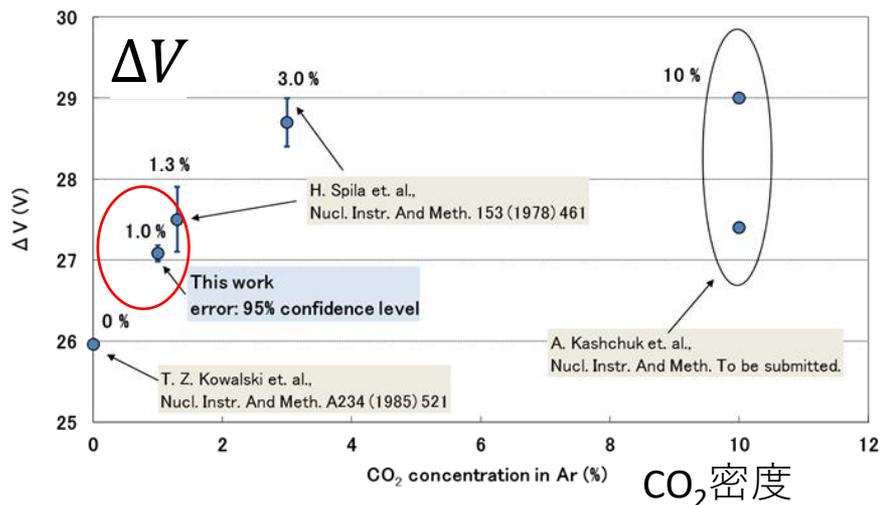
アノードワイヤの極近傍で増幅が起こる

PBLM(Gas:Ar+CO₂1%)のガス増幅特性

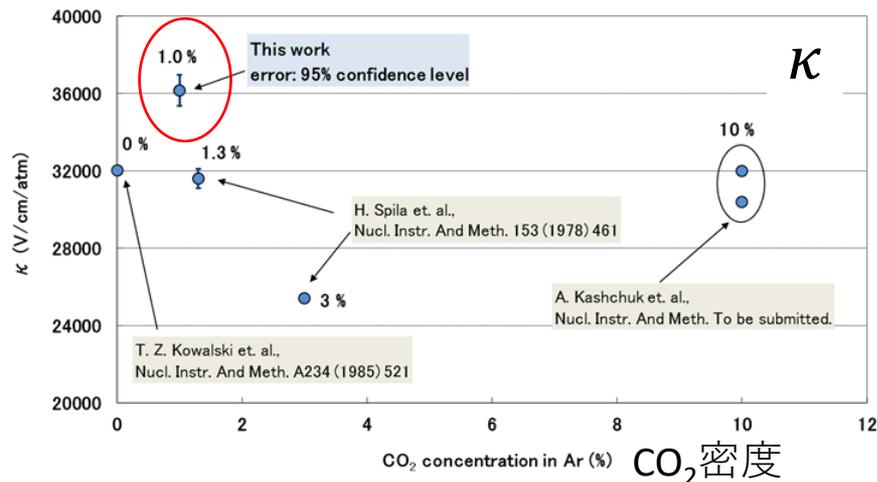


Diethorn Parameter: ΔV

κ 、 ΔV はガス種固有の定数



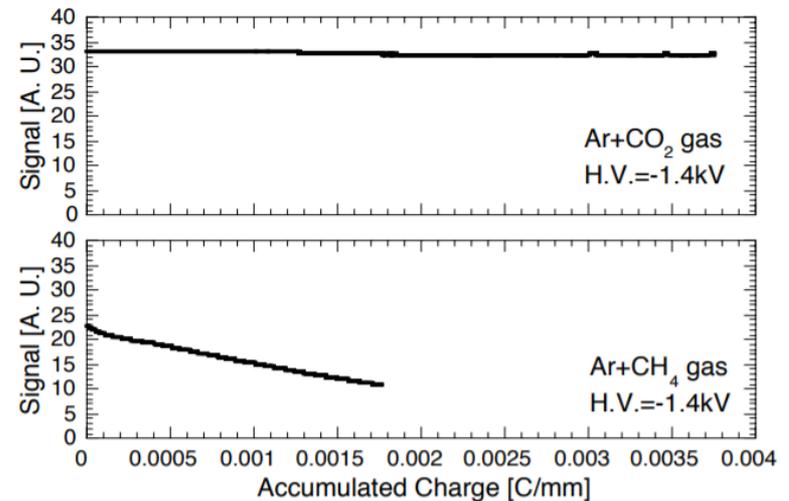
Diethorn Parameter: κ



比例計数管の動作原理(クエンチガス)

- ・ 電子により気体分子が励起され脱励起時に**紫外光が放出**される
- ・ 紫外光はガス原子や陰極から光電効果によって**光電子を放出**→アノードに移動してガス増幅をくり返す
- ・ **紫外光を吸収するクエンチガスを加える**
- ・ クエンチガスとしては、メタン、エタン、イソブタンなどの多原子分子の有機ガスが多く使われる→耐放射線性の確認
- ・ J-PARC BLMでは耐放射線性を考慮して**Ar + CO₂ 1%**

クエンチガスの耐放射線性



S.Lee et al, "The Beam Monitor System of the J-PARC Linac, 3GeV RCS and 50GeV MR", p2667, Proc. EPAC04
より転載

比例計数管の空間電荷効果

電子は素早くアノード収集

→信号立ち上がり $\sim 0.1\mu\text{s}$

陽イオンは移動度が小さくゆっくりとカソードに収集

→TOF 数ms

空間電荷効果

陽イオンが検出器に残留しガス増幅度が低下

< 自己誘導型 >

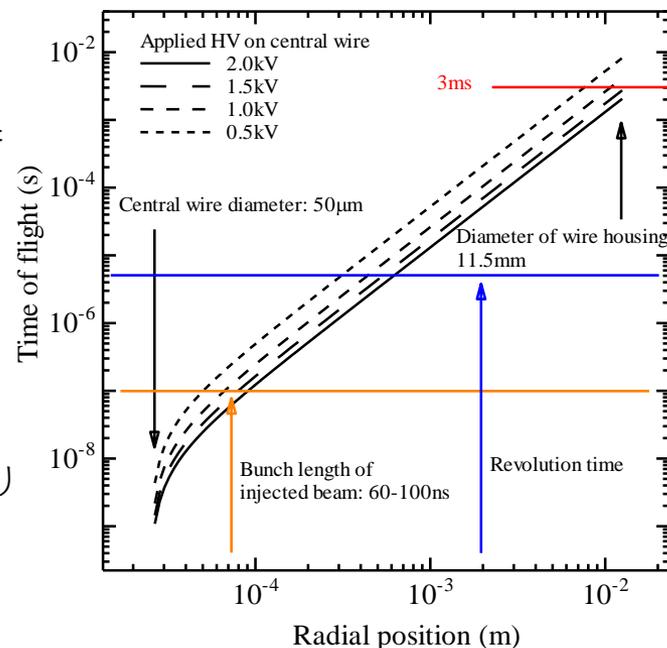
- 高いガス増幅によりなだれ増幅中の陽イオン数が過大になり
同一なだれ増幅の後段で影響する

- 検出器の幾何学的効果と単一パルス出力電荷に依存
- 出力電流の時間構造・パルスの計数率には非依存

< 蓄積型 (一般的空間電荷効果と呼ばれる) >

- 多数回のなだれ増幅で発生する陽イオンが検出器内で溜まり蓄積効果によってバイアス電圧の実効値が低下しガス増幅度が低下

Drift time of positive ions from the central wire



電子パルスの立ち上がりが高速 \neq 繰り返し動作が高速

ガス増幅は過去の出力履歴に依存する

過去の履歴は数ms持続しガス増幅度が低下するので過小評価になる

制限比例領域

蓄積型（一般的）空間電荷効果の
Hendricks評価式

$$\frac{\Delta G}{G} = \frac{\ln 2}{8\pi^2 \epsilon_0} \frac{b^2 p}{\Delta V \mu L} \left\{ 1 + \ln \left[\frac{V}{\kappa p a \ln(b/a)} \right] \right\} \frac{I}{V}$$

I : 出力電流

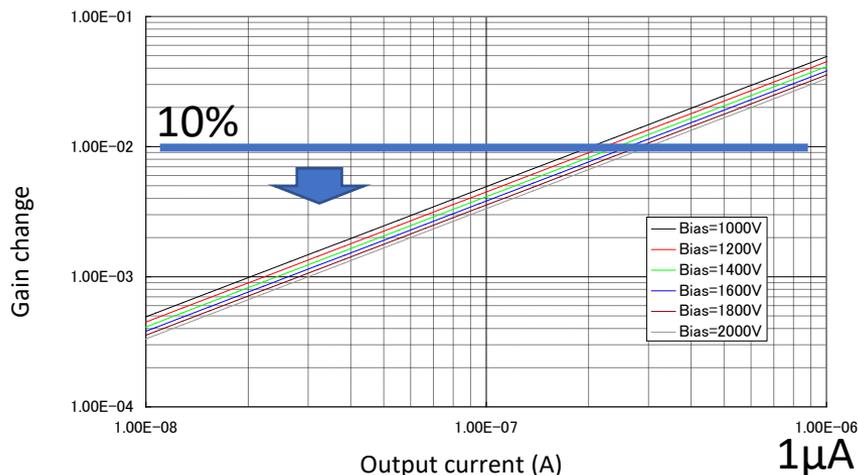
L : 検出器長0.8m

μ : 陽イオンのガス内移動度

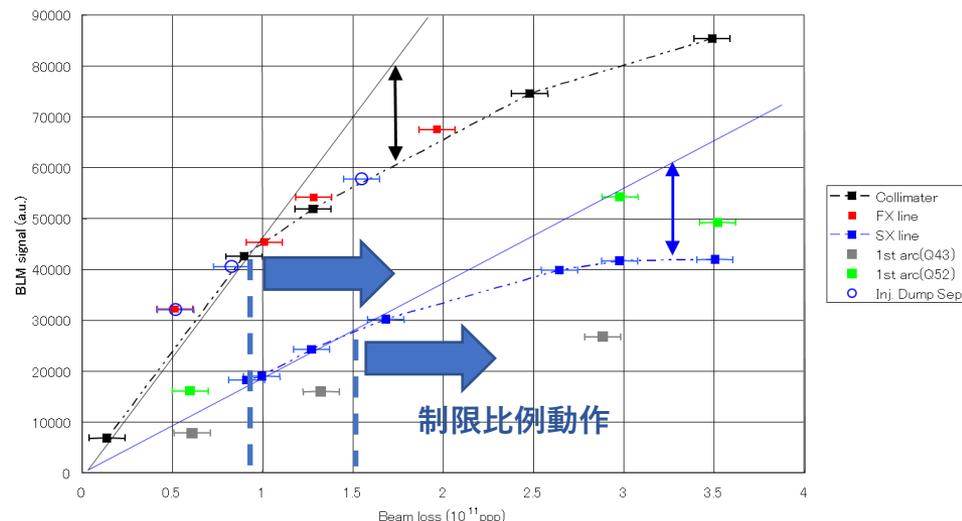
➡ Arガス内Ar+ ~ 1.54 [cm²atm/V/s]



Gain reduction due to large output current



BLM cariblation using beam



高いガス増幅

低レベルのロス検出に絶大な効果を発揮するが、
安定運用が難しい

誤差10%以下で運用するには、

1μA以下(Δt=3ms間の平均)

- ・ バイアス電圧の設定

瞬間的な電流増加:Fast Lossに注意

入出射キッカーによるロスなど
直後のロスは測れない

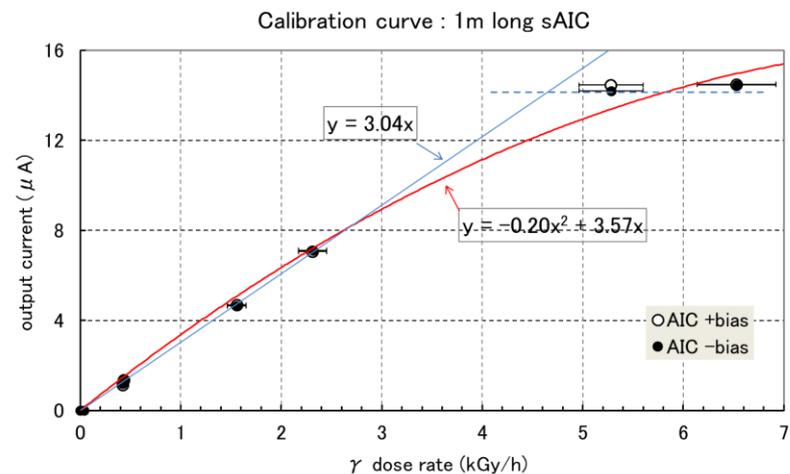
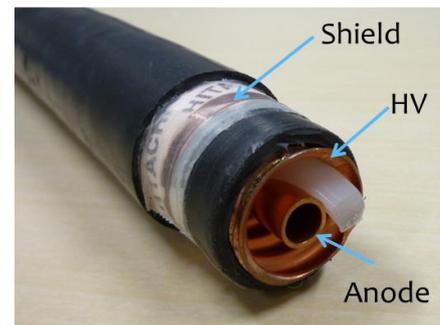
AIC(Air Ionization Chamber)

Gain=1

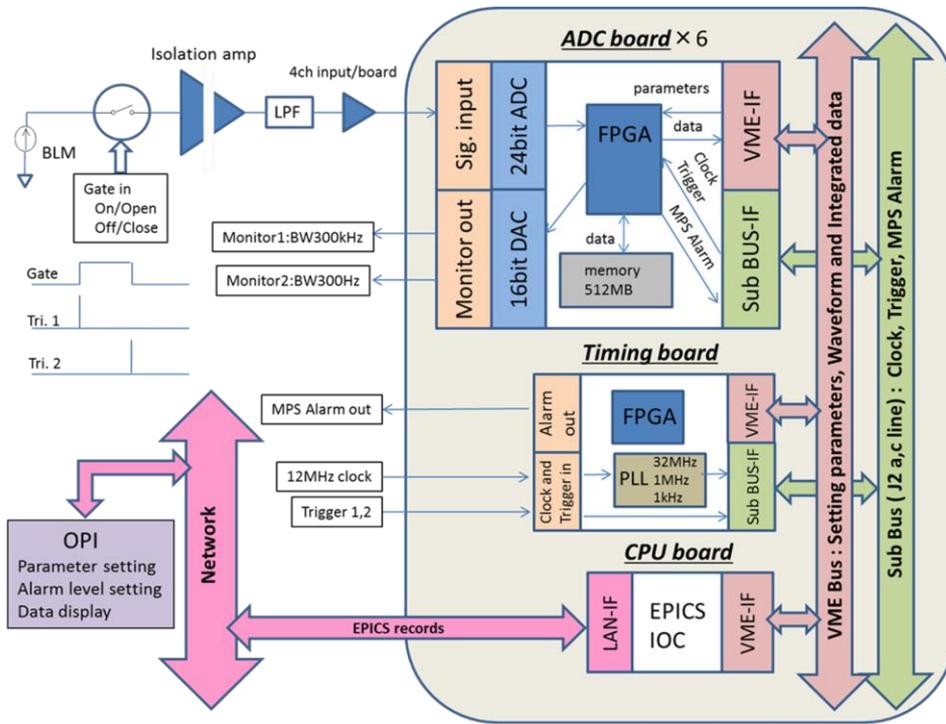
- 感度が悪く、信号立ち上がりも遅い
→信号立ち上がりを早くするには充填ガス
- **高レベルのロスイベントに最適**
→**PBLMと相補的**

自然還流空気を使用する

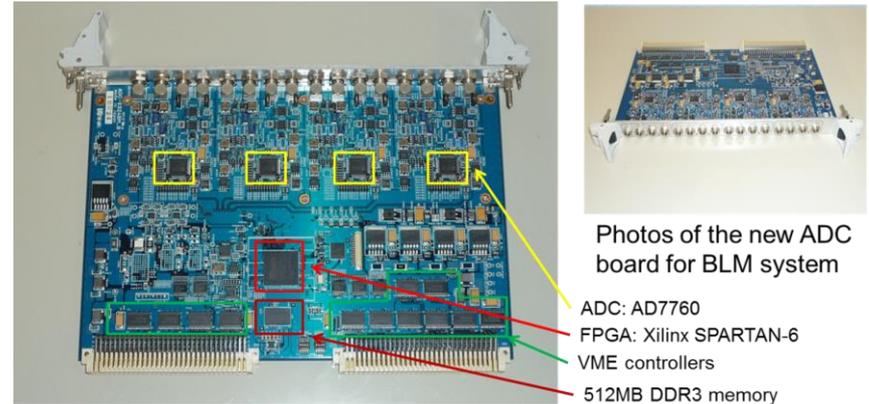
- 電子ではなく負イオンを収集している
- 充填ガスの変質の問題がなく安定
- 移動度が低く、収集時間が遅い
- 同軸ケーブルを使用するので安価で長尺のものが製作できる



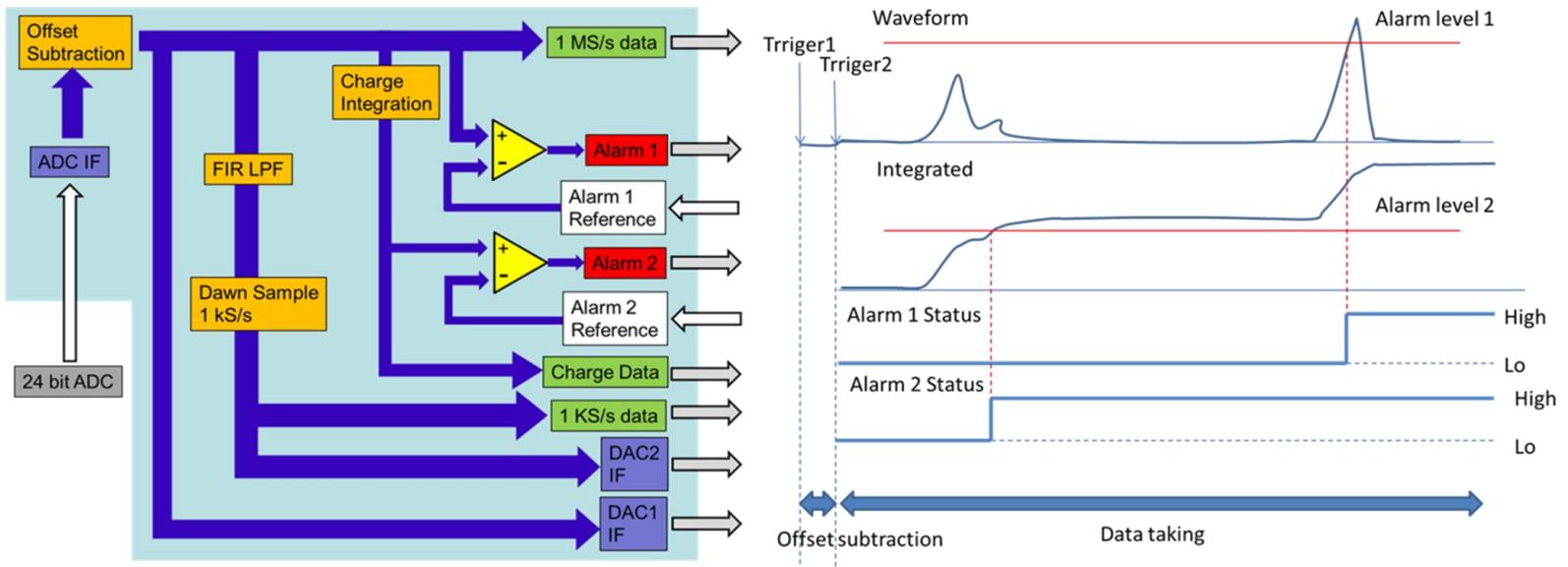
信号处理回路



Block diagram of the new data taking system



ブロック図



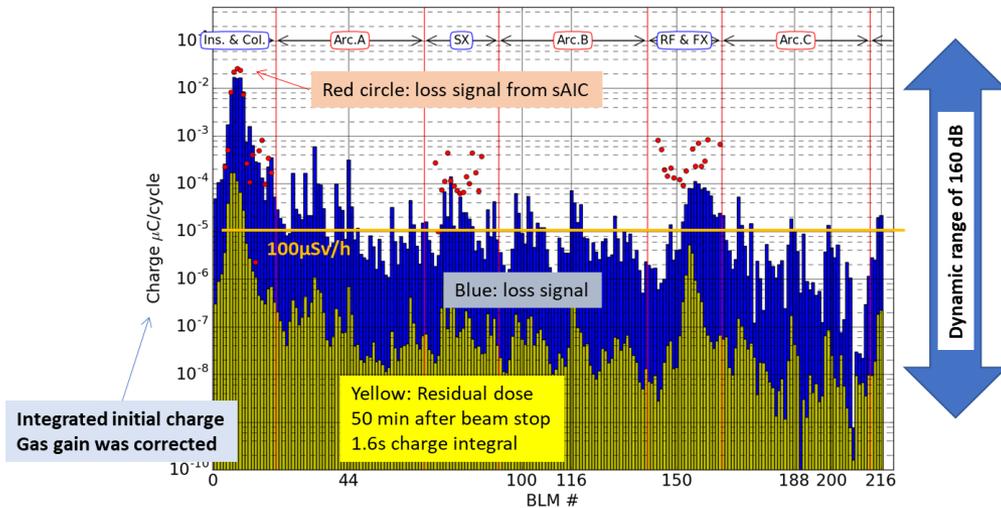
The block diagram and the schematic drawing of the signal processing in the FPGA.

Offset subtraction procedure

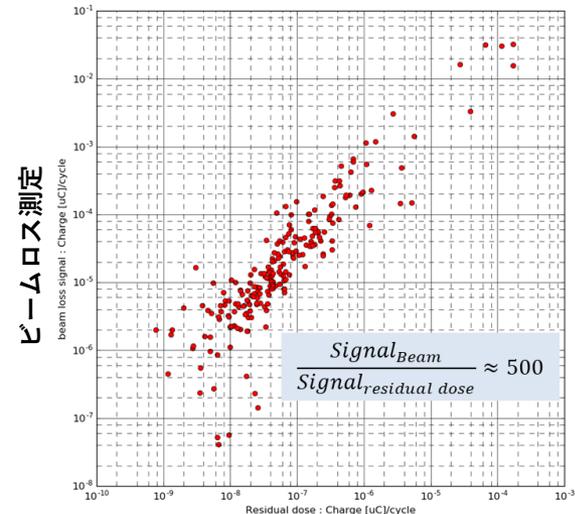
- 1, The switch in front of the front-end amp open after trigger 1 (Gate goes to high)
- 2, Offset due to front-end amp is calculated during trigger 1 ~ trigger 2
- 3, After trigger 2 the estimated offset is subtracted, and the switch is short
- 4, The signal during trigger 2 ~ K1 (first beam injection timing) shows current induced by the residual dose that should be extracted from the real beam loss signals.

MR BLM によるビームロス残留線量の測定例

リング一周の積算ロス信号
黄色は残留線量（停止後50min）

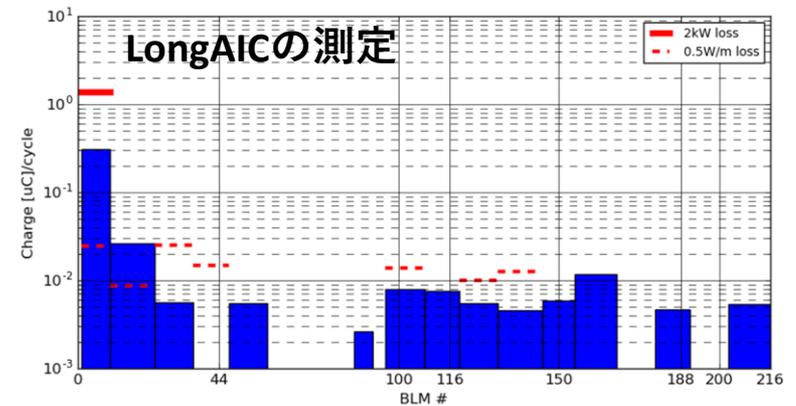
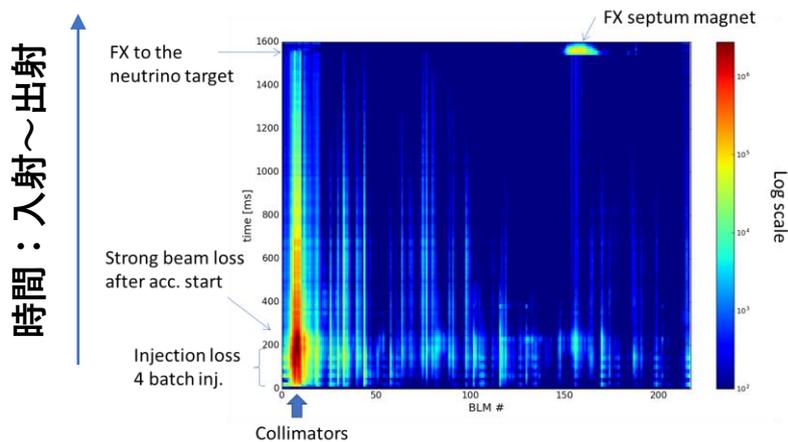


加速器運転時と停止後の
線量率測定と比較



残留線量測定

ビームロスの2次元プロット

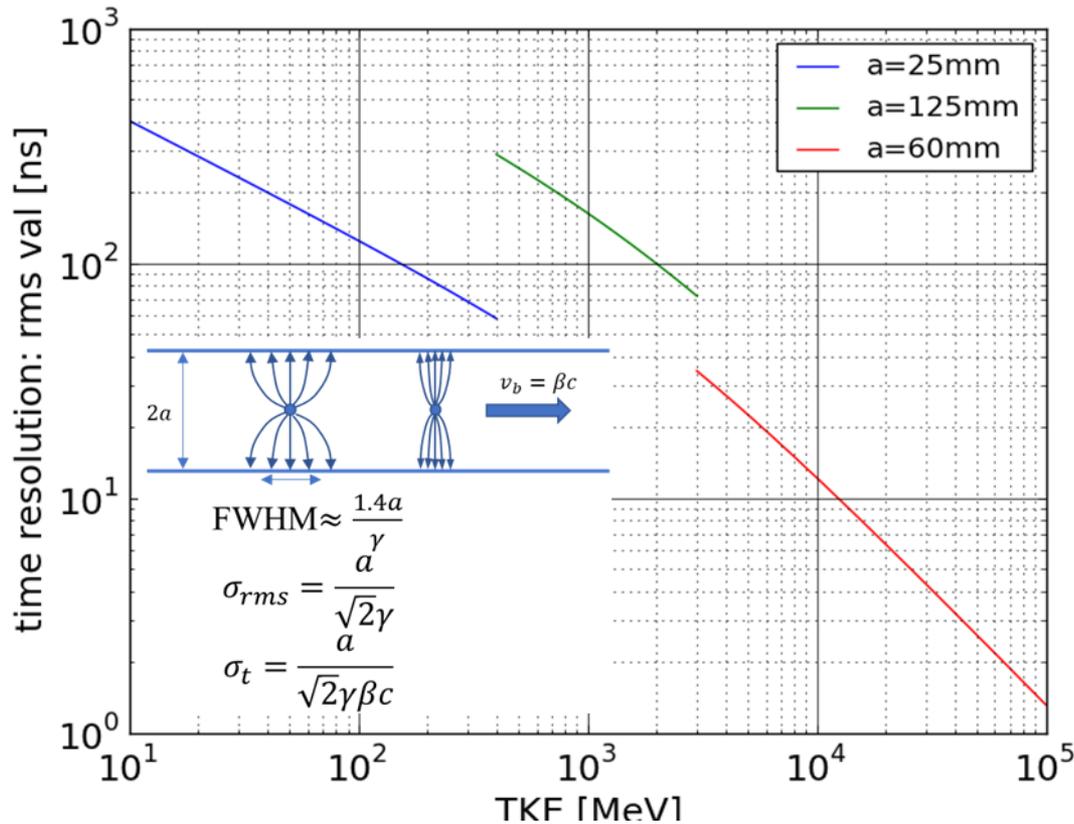


電磁場ピックアップによる非破壊
ビーム位置測定

Beam Position Monitor (BPM)

壁電流測定：時間分解能(点電荷の場合)

J-PARCの場合の時間分解能



ローレンツ収縮により時間分解能が改善される

無限に小さな検出器があれば時間分解能は

$$\sigma_t = \frac{a}{\sqrt{2}\gamma\beta c}$$

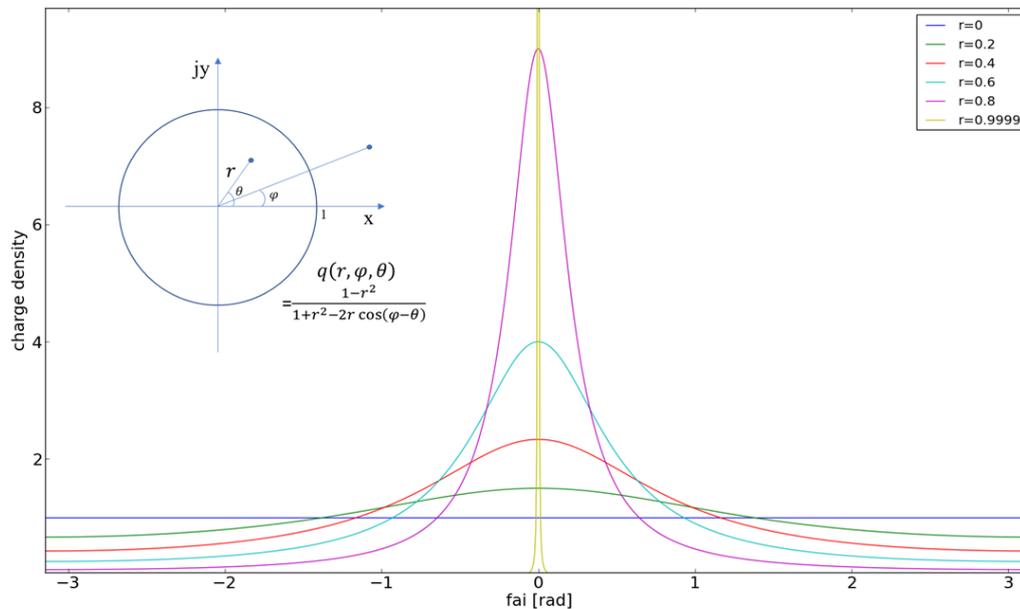
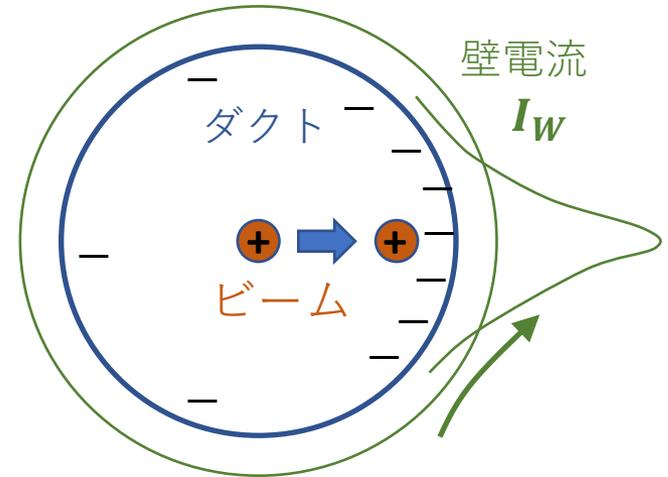
ダクトを小さくできれば時間分解能が向上する



ビームサイズの関係でどこまでも小さくできない

壁電流分布

$$\begin{aligned}
 I_w(a, r, \theta, \varphi, t) &= \frac{-I_B(t)}{2\pi a} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{a}\right)^n \cos n(\varphi - \theta) \right\} \\
 &= \frac{-I_B(t)}{2\pi a} \frac{a^2 - r^2}{a^2 + r^2 - 2ar \cos(\varphi - \theta)} \\
 &= \frac{-I_B(t)}{2\pi a} q\left(\frac{r}{a}, \varphi, \theta\right)
 \end{aligned}$$



ビームが中心
壁電流は一定

ビームが偏心
移動した方位の電流が増加する



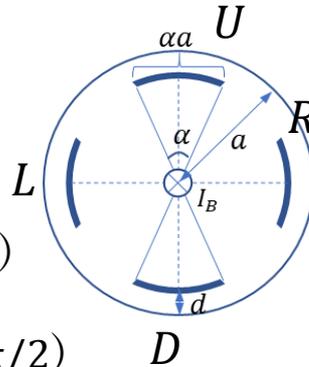
積分値 → ビーム電流
分布測定 → ビーム位置

ビーム位置測定

未定定数：電流、位置 (x,y) の3変数

→最低3か所の壁電流を測定

→普通は4か所



±x軸方向

L電極($\varphi = \pi$)、R電極($\varphi = 0$)

±y軸方向

U電極($\varphi = \pi/2$)、D電極($\varphi = 3\pi/2$)

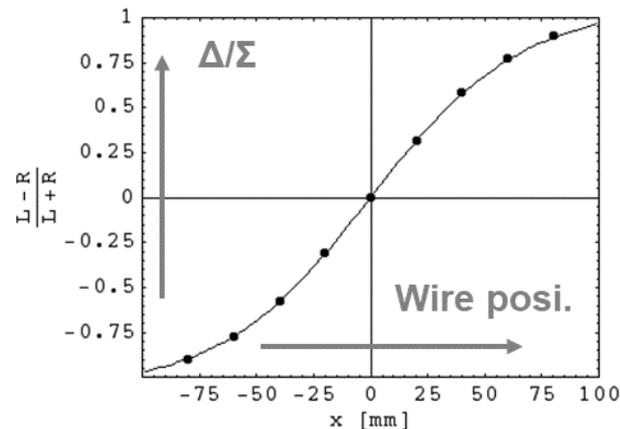
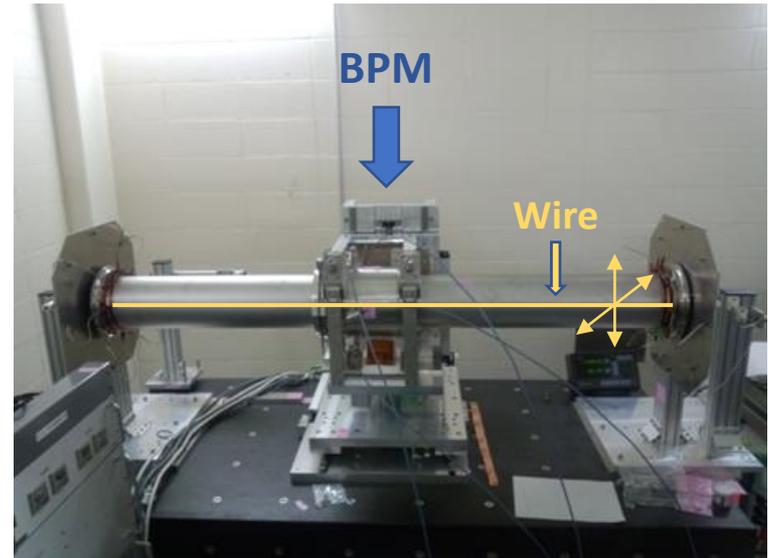
誘起電流 (電圧) S を測定

差信号： $\Delta_{x,y} = S_{R,U} - S_{L,D}$

和信号： $\Sigma_{x,y} = S_{R,U} + S_{L,D}$

$$x, y = \sum_{n,m=0} f_{nm} \left(\frac{\Delta x}{\Sigma x} \right)^n \left(\frac{\Delta y}{\Sigma y} \right)^m$$

感度係数はあらかじめ求めておく



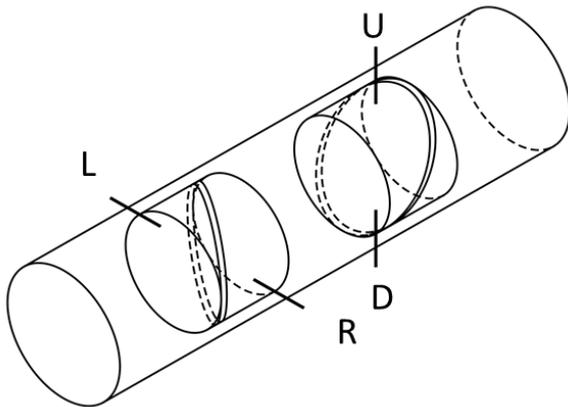
Single pass BPM:

- Mainly used at 3-50BT
- Bore: $\Phi 230, 200\text{mm}$



Diagonal-cut Pick-up:線形動作

$$I_w(a, r, \theta, \varphi, t) = \frac{-I_B(t)}{2\pi a} \left\{ 1 + 2 \left(\frac{x}{a} \cos \varphi + \frac{y}{a} \sin \varphi \right) + 2 \left(\frac{x^2 - y^2}{a^2} \cos 2\varphi + \frac{2xy}{a^2} \sin 2\varphi \right) + 2 \left(\frac{x^3 - 3xy^2}{a^3} \cos 3\varphi + \frac{3x^2y - y^3}{a^3} \sin 3\varphi \right) + \dots \right\}$$



電極Rの信号

$$I_R = \int_0^{2\pi} a d\varphi \int_{Z_0}^{Z_1(\varphi)} I_w(a, r, \theta, \varphi, t) dz$$

$$= \int_0^{2\pi} a \frac{l}{2} (1 + \cos \varphi) I_w(a, r, \theta, \varphi, t) d\varphi$$

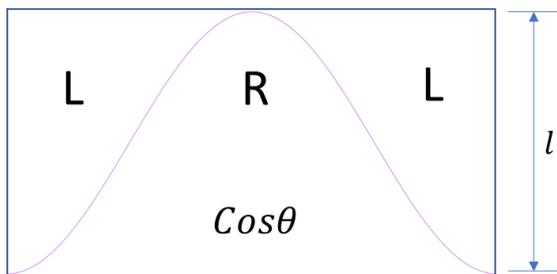
$$I_R = s \frac{I_B(t)l}{2v_B} \left(1 + \frac{x}{a} \right)$$

$$I_L = s \frac{I_B(t)l}{2v_B} \left(1 - \frac{x}{a} \right)$$

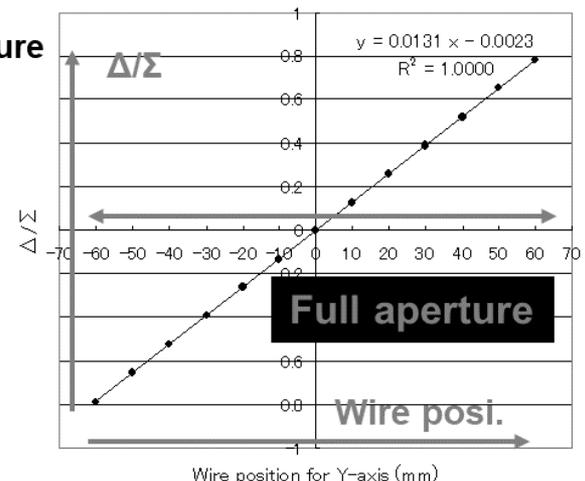
$$\frac{\Delta x}{\Sigma x} = \frac{I_L - I_R}{I_L + I_R} = \frac{x}{a}$$

Ring BPM:

- Mainly used in the ring
- Good linear response covering full aperture
- Bore: $\Phi 130\text{mm}$ (standard), $\Phi 134, 165, 200, 250, 320\text{mm}$ (special)



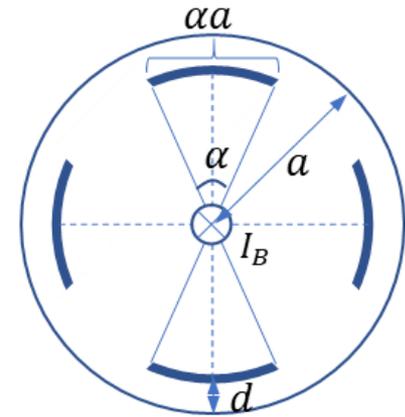
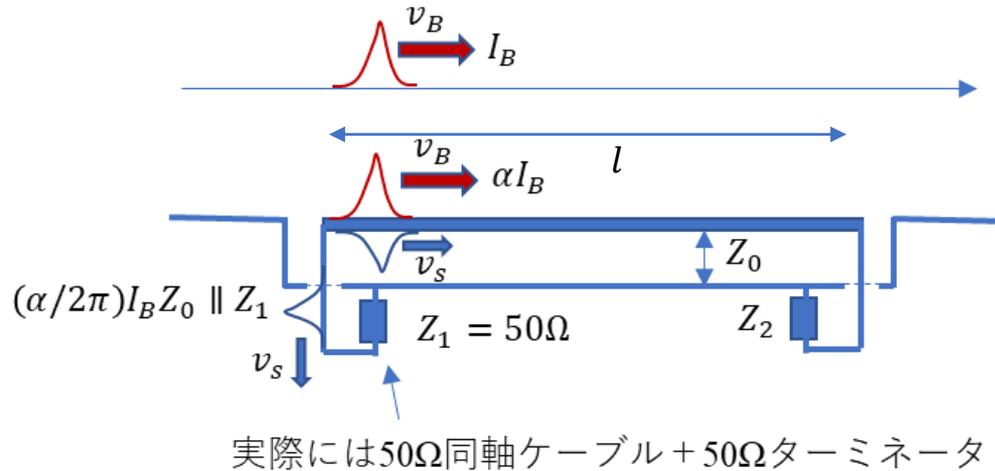
電極展開図



J-PARCのBPM

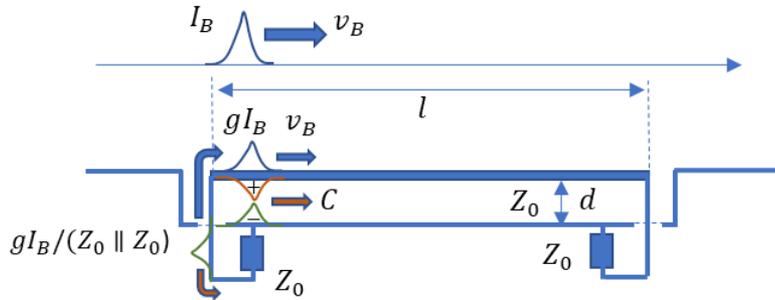
- Strip-line pick-up → 分布定数的取り扱い
 - 50Ω Matched (Directional coupler)
 - Unmatched
 - Magnetic coupler: 磁場ピックアップ
 - 16 pick-up: 16電極タイプ
 - Tapered coupler
- Electrostatic: 静電誘導型 → 集中定数的取り扱い
 - Diagonal-cut BPM
 - RCS, MR用

Strip-line pick up

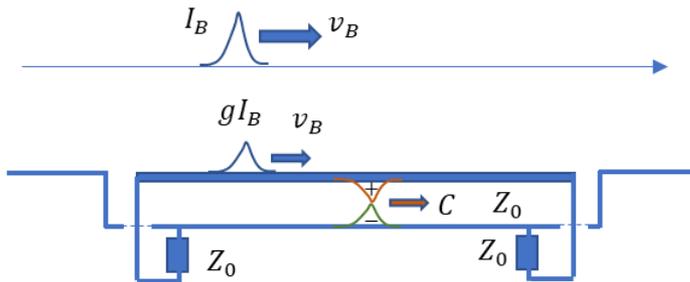


- 1平面に直線状4電極
- 電極とダクトで一定の特性インピーダンス Z_0
- 上流端と下流端でそれぞれ Z_1 、 Z_2 で短絡
 - ➔通常、 Z_1 は50Ω同軸+アンプの負荷(50Ω)
- J-PARCでは主にLinacで使用されている($Z_1 = Z_0 = Z_2$)
- 分布定数的取り扱い
 - 波長が電極長さに近い場合： $\lambda \Rightarrow 2l$

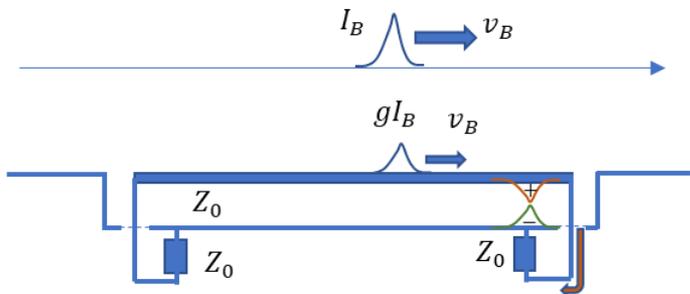
50Ω matched strip-lineの動作



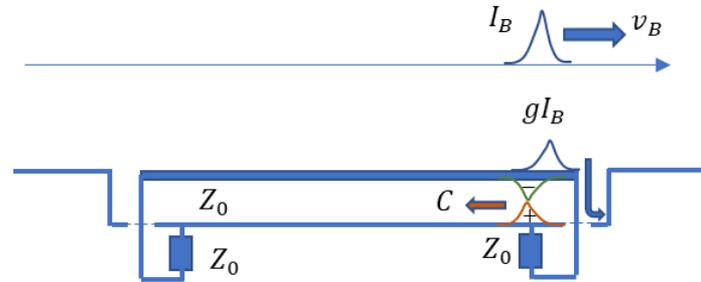
壁電流の一部 $g \approx \frac{\alpha}{2\pi}$ が電極上流端で電極に移動
 端部でのインピーダンス $\frac{Z_0}{2}$ を感じて電圧波が発生



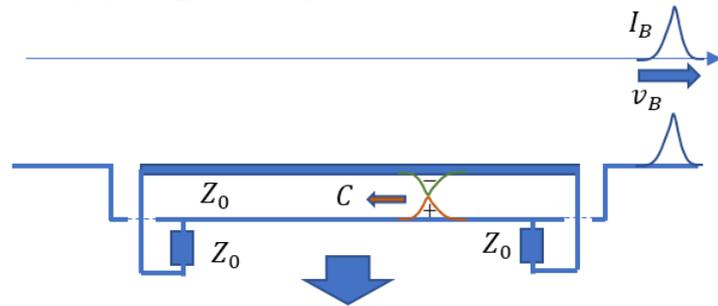
発生した電圧波はTEM波で電極を伝搬する



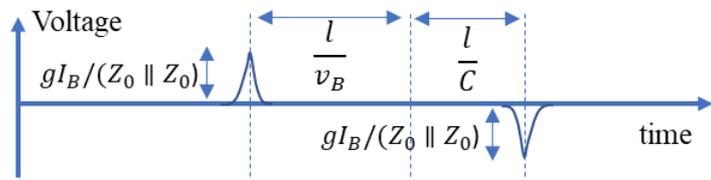
電圧波は下流端に到達して無反射で Z_0 に吸収



壁電流は下流端で $\frac{Z_0}{2}$ を感じてダクトに逃げる
 逆位相の電圧波が発生



電圧波は電極を伝搬して上流端の Z_0 で無反射で吸収

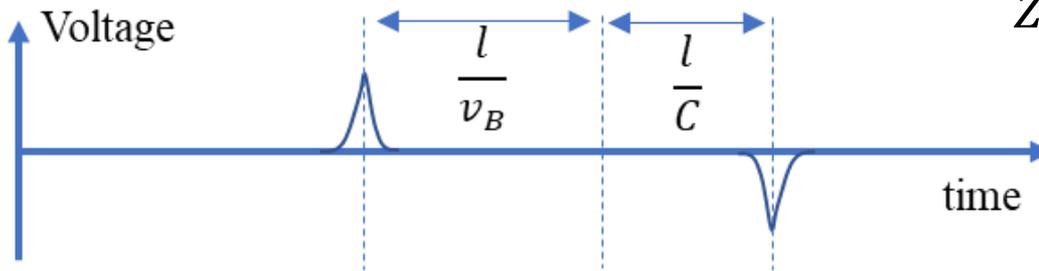


上流端で観測した電圧波形

50Ω matched strip-lineの特徴

1) Transfer impedance

定義 : $Z_t = \frac{V_m}{I_B}$



$$Z_t(\omega) = \frac{g(\omega)Z_0}{2} \{1 - e^{-j(\beta_B + \beta_s)l}\}$$

β : 位相定数

$$\beta_B = \frac{\omega}{\beta_l c}, \quad \beta_s = \frac{\omega}{c}$$

β_l : ローレンツ因子

位相定数が 2π の整数倍 $2n\pi = (\beta_B + \beta_s)l = (1 + 1/\beta_l) \frac{\omega}{c} l$

⇒パルスが重なり $Z_t = 0$ つまり出力が0になる

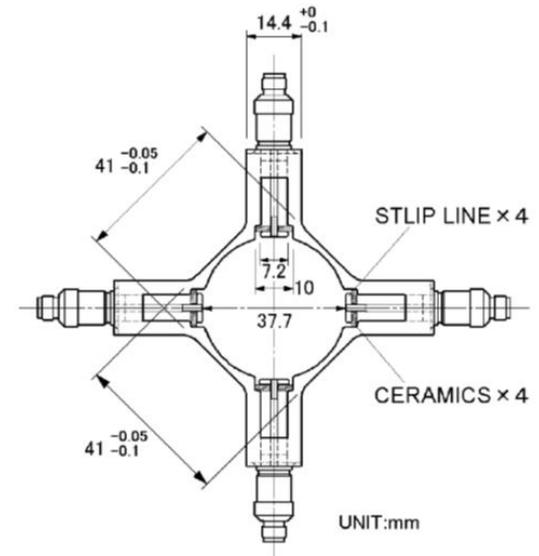
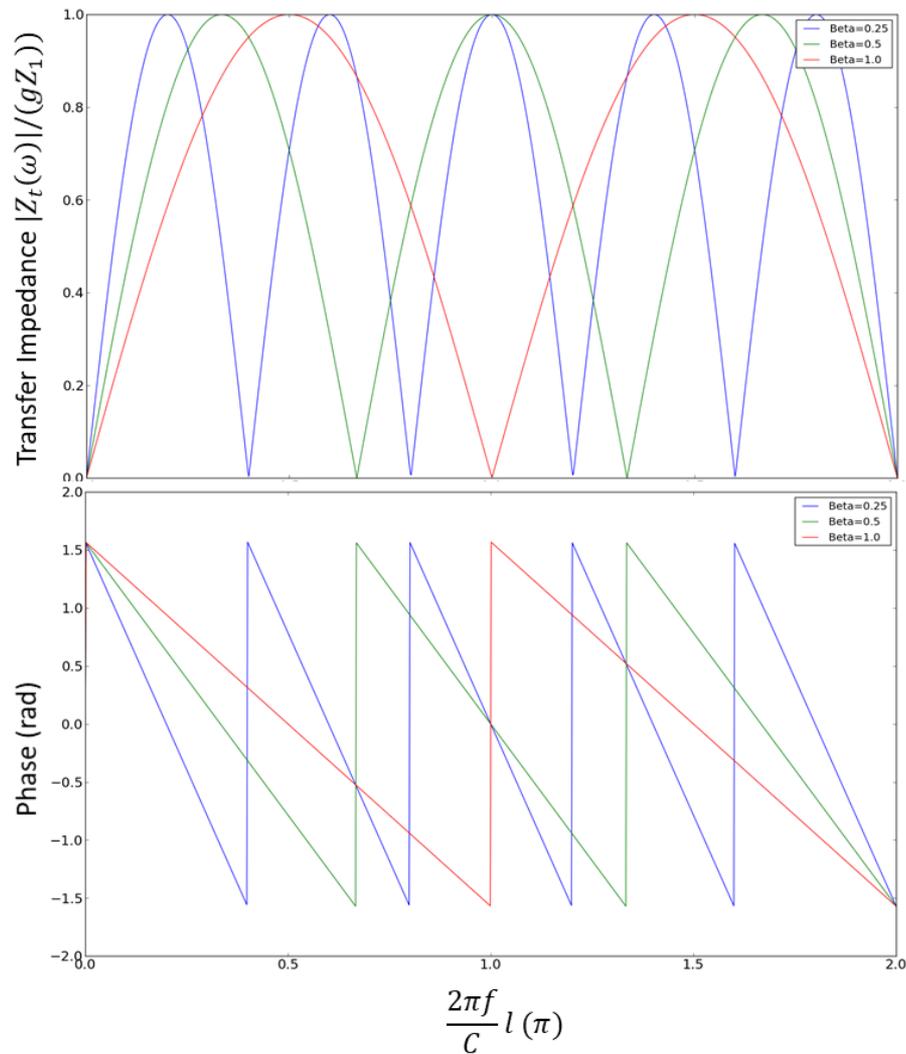
2)

$\beta_B = \beta_s$ ($\beta_l = 1$) のとき

電圧波と壁電流が同時に到達するので、上流端からの**伝搬波**と下流端での**生成波が相殺**して電圧が発生しない

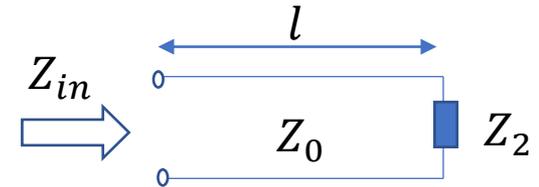
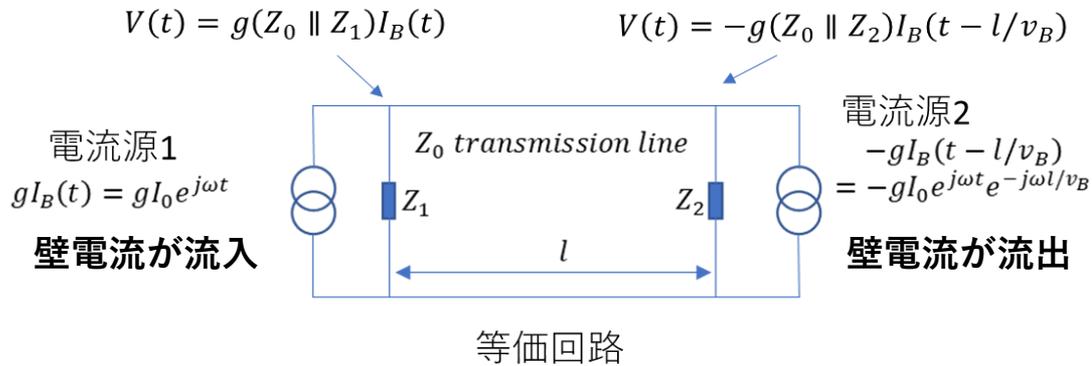
ビームの入射端のみ電圧が発生する ⇒ Directional Coupler

Linac BPM



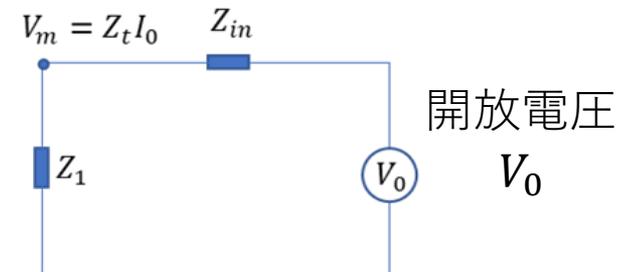
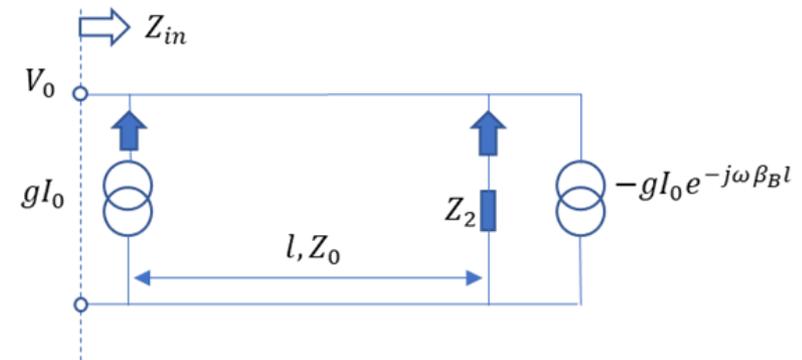
Linac用BPM

$Z_1 \neq Z_2 \neq Z_0$ の場合の Z_t (1)



$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_2 + jZ_0 \tan \beta_s l}{Z_0 + jZ_2 \tan \beta_s l}$$

$$= Z_0 \frac{1 + \Gamma_2 e^{-2j\beta_s l}}{1 - \Gamma_2 e^{-2j\beta_s l}}$$



計算手順

- ① 負荷 $Z_1 = \text{Open}$ 時の開放時インピーダンス $Z_{in}(\omega)$
 → 計算するときには電流源は短絡しておく
- ② 開放電圧 ($Z_1 = \text{open}$) を計算
 各誘起電圧を足し合わせ → 重ね合わせの原理
- ③ テブナンの定理で負荷インピーダンス Z_1 を接続したときの電圧を求める

$Z_1 \neq Z_2 \neq Z_0$ の場合の $Z_t(3)$

$$Z_t(\omega) = \frac{Z_1}{Z_{in}(\omega) + Z_1} \frac{V_0(\omega)}{I_0}$$

$$= \frac{g(\omega)(Z_0 \parallel Z_1)}{\{1 - \Gamma_1 \Gamma_2 e^{-j2\beta_s l}\}} \{1 + \Gamma_2 e^{-j2\beta_s l} - (1 + \Gamma_2) e^{-j(\beta_B + \beta_s)l}\}$$



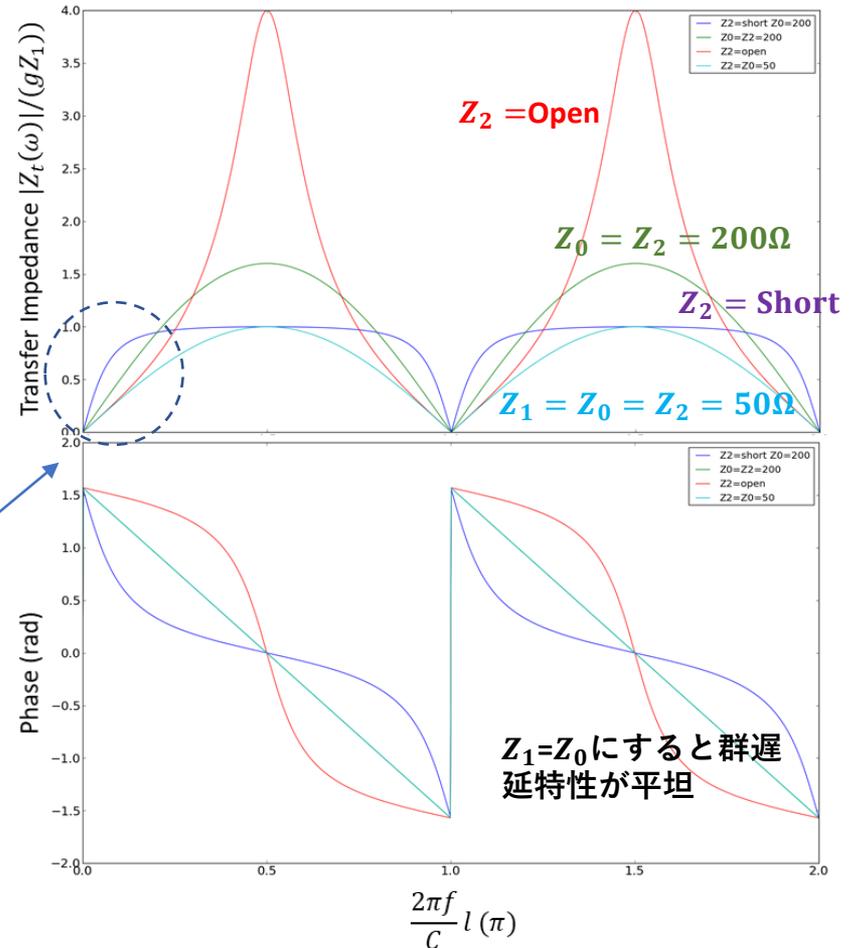
$$\beta_B \rightarrow \beta_s \quad (v_B \rightarrow v_s = C)$$

$$Z_t(\omega) = \frac{g(\omega)(Z_0 \parallel Z_1)}{\{1 - \Gamma_1 \Gamma_2 e^{-j2\beta_s l}\}} \{1 - e^{-j2\beta_s l}\}$$

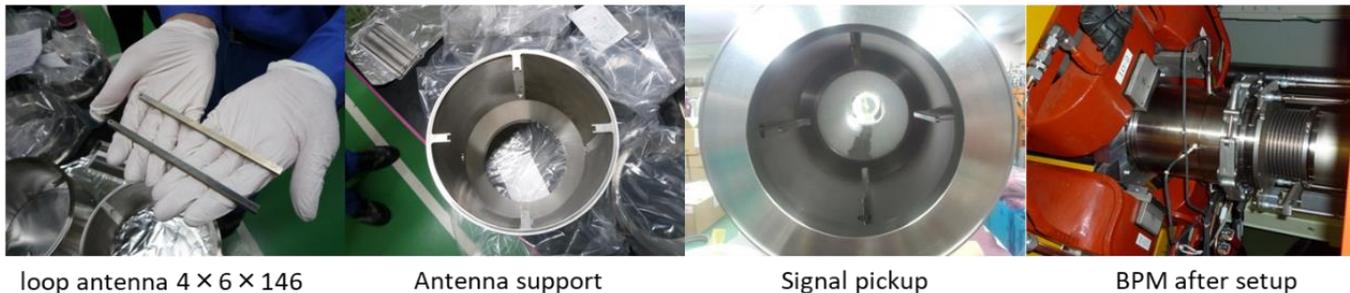
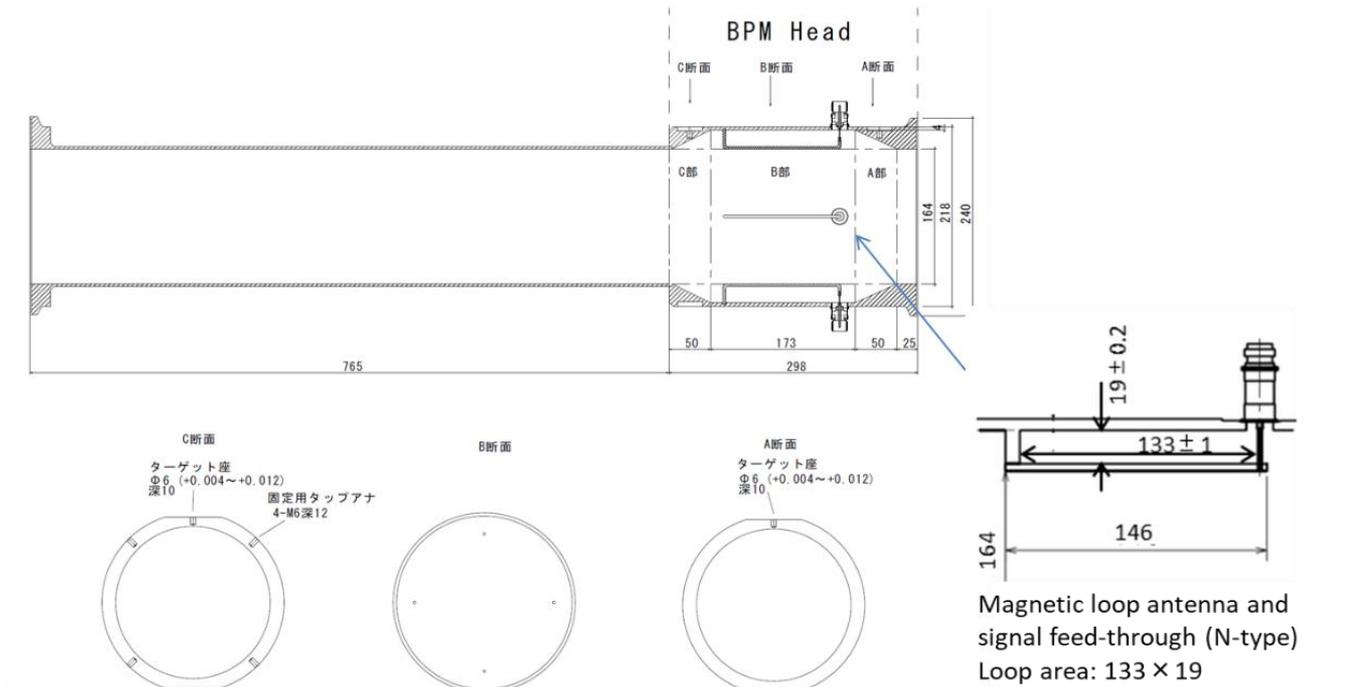
低周波数領域では
 $Z_2 = \text{short}$ の場合が最も感度が高い

電極とダクト間のループを交差する磁束
 電磁誘導 \rightarrow Magnetic coupler

$$Z_1 = 50\Omega, Z_0 = 200\Omega$$

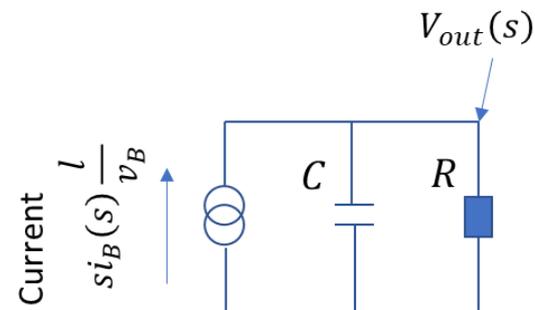
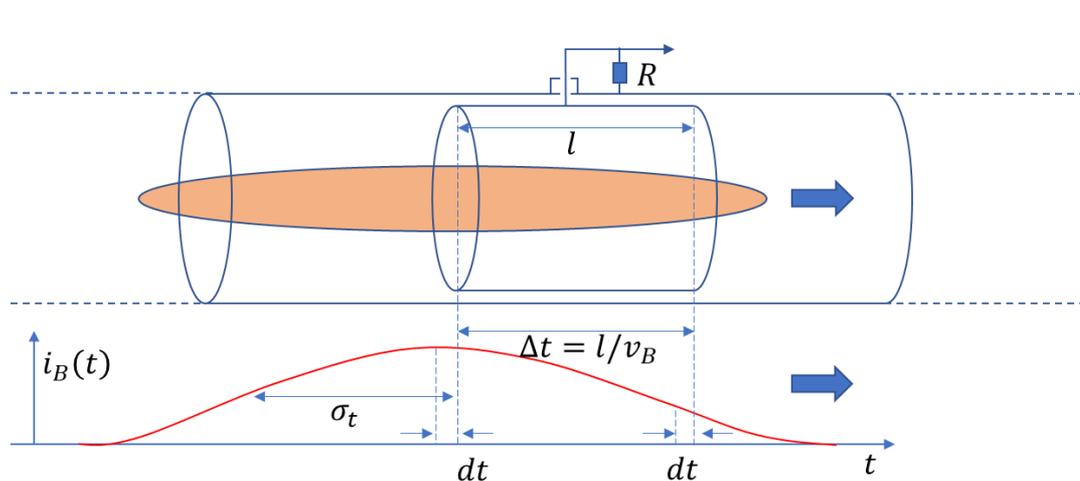


Magnetic coupler ($Z_2 = short$)



350BT コリメータエリア用のMagnetic coupler BPM

静電誘導ピックアップ (集中定数的)



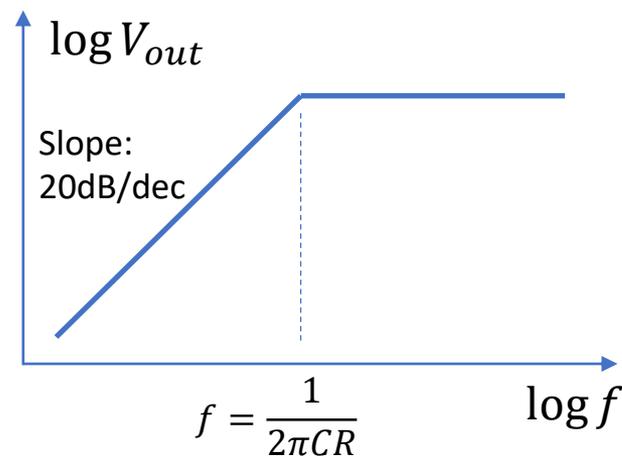
$$V_{out}(s) = i_B(s) \frac{Rs}{1 + CRs} \frac{l}{v_B}$$

$$dQ = i_B(t)dt - i_B(t - \Delta t)dt$$

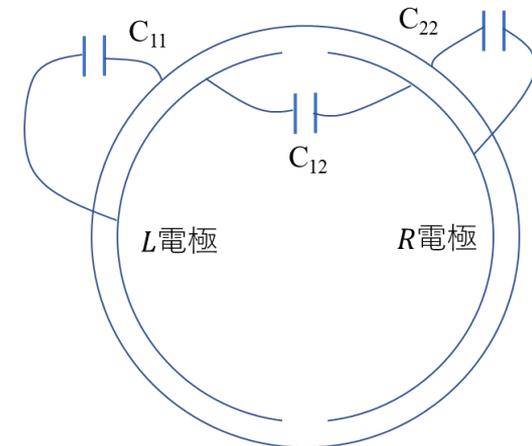
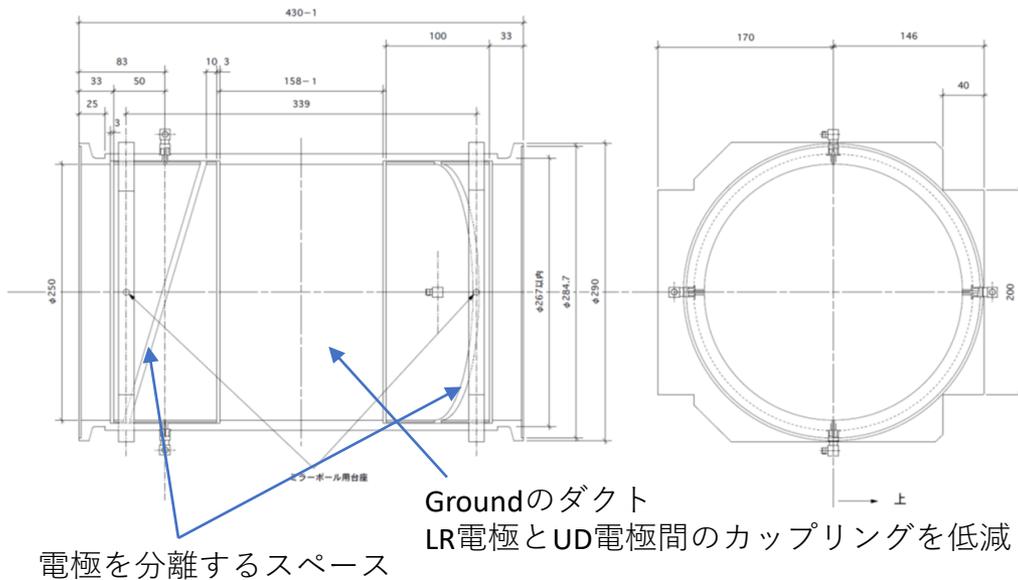
$$\frac{dQ}{dt} \frac{1}{\Delta t} = \frac{i_B(t) - i_B(t - \Delta t)}{\Delta t} \xrightarrow{\text{if } \sigma_t \gg \Delta t} \frac{di_B}{dt}$$

$$\frac{dQ}{dt} \approx \frac{di_B}{dt} \Delta t \rightarrow s i_B(s) \frac{l}{v_B}$$

ラプラス変換



Diagonal Cut BPM(1)

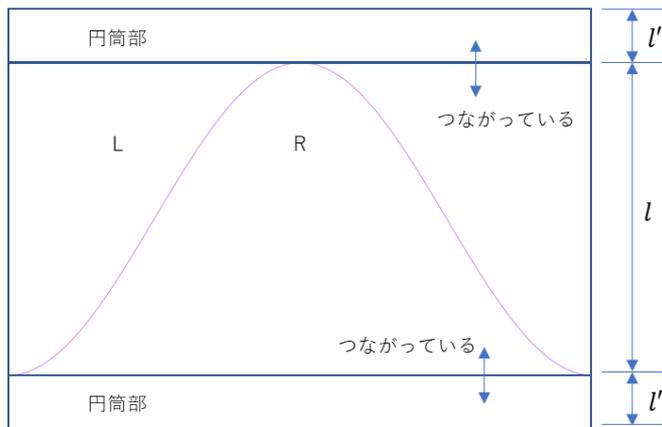


$$\begin{pmatrix} I_L \\ I_R \end{pmatrix} = sI_B(t) \frac{0.5l}{v_B} \begin{pmatrix} 1 + \frac{x}{a} \\ 1 - \frac{x}{a} \end{pmatrix} + sI_B(t) \frac{1}{v_B} \begin{pmatrix} l' \\ l'' \end{pmatrix}$$

$$= sI_B(t) \frac{gl}{fv_B} \begin{pmatrix} 1 + (\Delta + \frac{x}{fa}) \\ 1 - (\Delta + \frac{x}{fa}) \end{pmatrix}$$

$$\Delta = \frac{l' - l''}{l + l' + l''} \quad \text{電極面積の誤差に由来} \quad f = \frac{l + l' + l''}{l}$$

$$\frac{\Delta_x}{\Sigma_x} = \Delta + \frac{x}{fa}$$



想定される電極構造

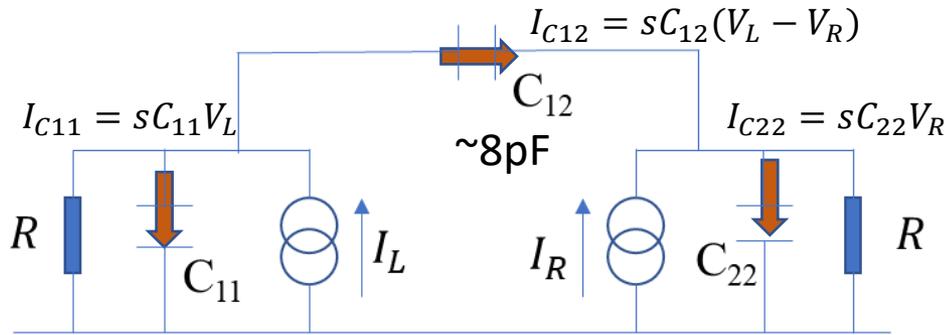
現実には電極面積は若干違うし → **Offset**
 正確なCos形状にならない → **多極成分**

Diagonal Cut BPM(2)

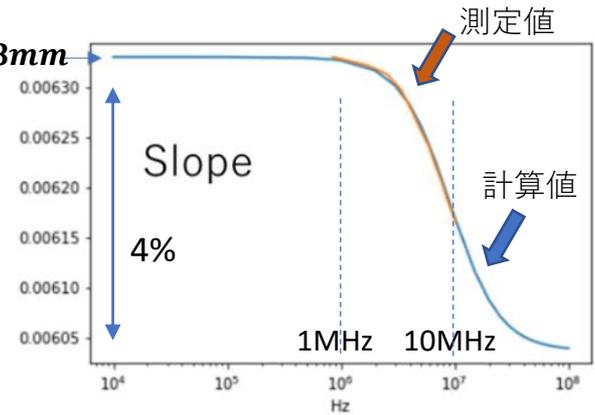
$$Pos. x = slope * \frac{\Delta}{\Sigma} + offset$$

$\Delta=0.011$ 面積誤差~1%

$C_{11} = 335.0pF, C_{22} = 340.5pF, C_{12} = 8pF$



$$\frac{1}{\alpha} = 1/158mm$$



コンデンサ電流 抵抗電流

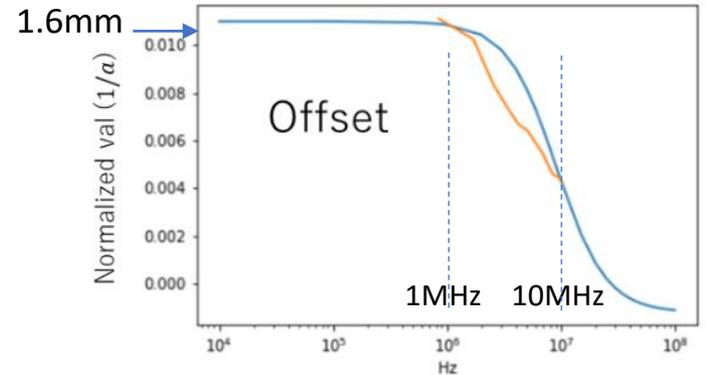
$$\begin{bmatrix} V_L \\ V_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & -C_{12} \\ -C_{12} & C_{22} \end{bmatrix} + \frac{1}{R} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ I_R \end{bmatrix}$$

$$s \begin{bmatrix} C_{11} & -C_{12} \\ -C_{12} & C_{22} \end{bmatrix} + \frac{1}{R} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} I_B(t) \frac{gl}{fv_B} \begin{pmatrix} 1 + (\Delta + \frac{x}{fa}) \\ 1 - (\Delta + \frac{x}{fa}) \end{pmatrix}$$



$$\frac{\Delta}{\Sigma} = \frac{V_L - V_R}{V_L + V_R} =$$

$$\frac{\left\{ (C_{11} - C_{22}) - (C_{11} + C_{22} - 2C_{12}) \frac{x}{fa} \right\} Rs - 2x/fa}{\left\{ (C_{11} - C_{22}) \frac{x}{fa} - (C_{11} + C_{22} + 2C_{12}) \right\} Rs - 2}$$

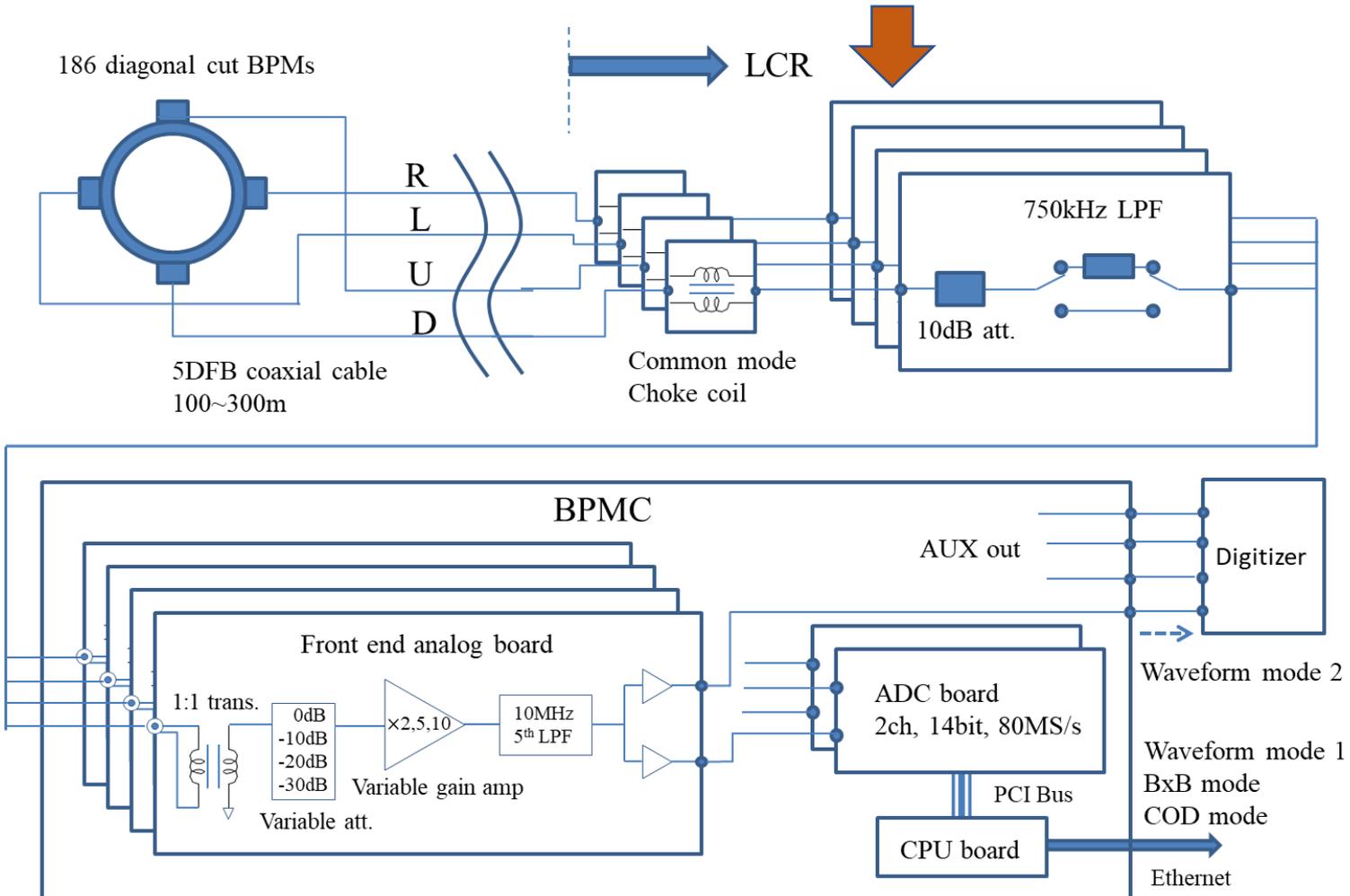


感度係数:Slope、Offset→周波数依存性
Slope:Const., Offset=Const.(=0) が理想

- 相互キャパシタンス C_{12} を小さく
- 電極キャパシタンスの誤差を小さく
- 電極誤差を小さく

信号処理系

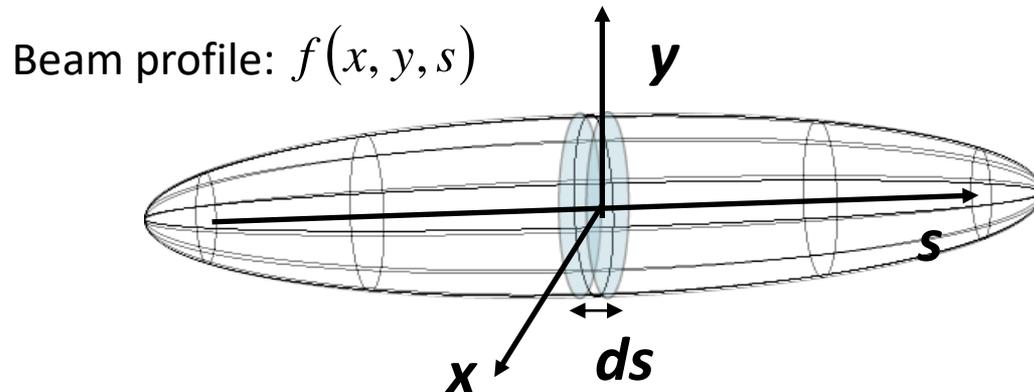
最大信号レベル
 $V_{pp} \sim 200V$



Beam profile monitor

ビーム形状

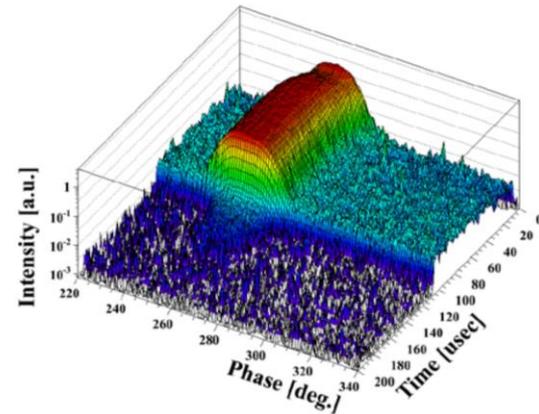
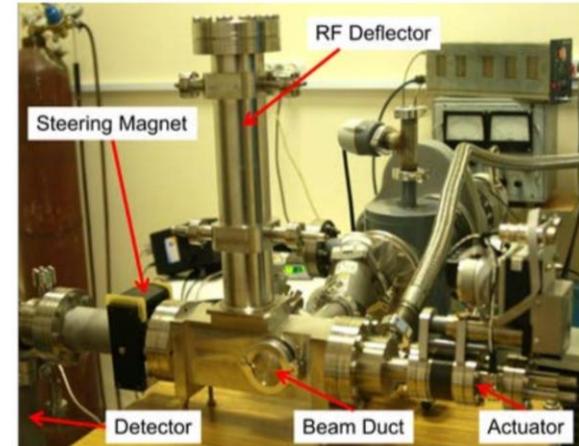
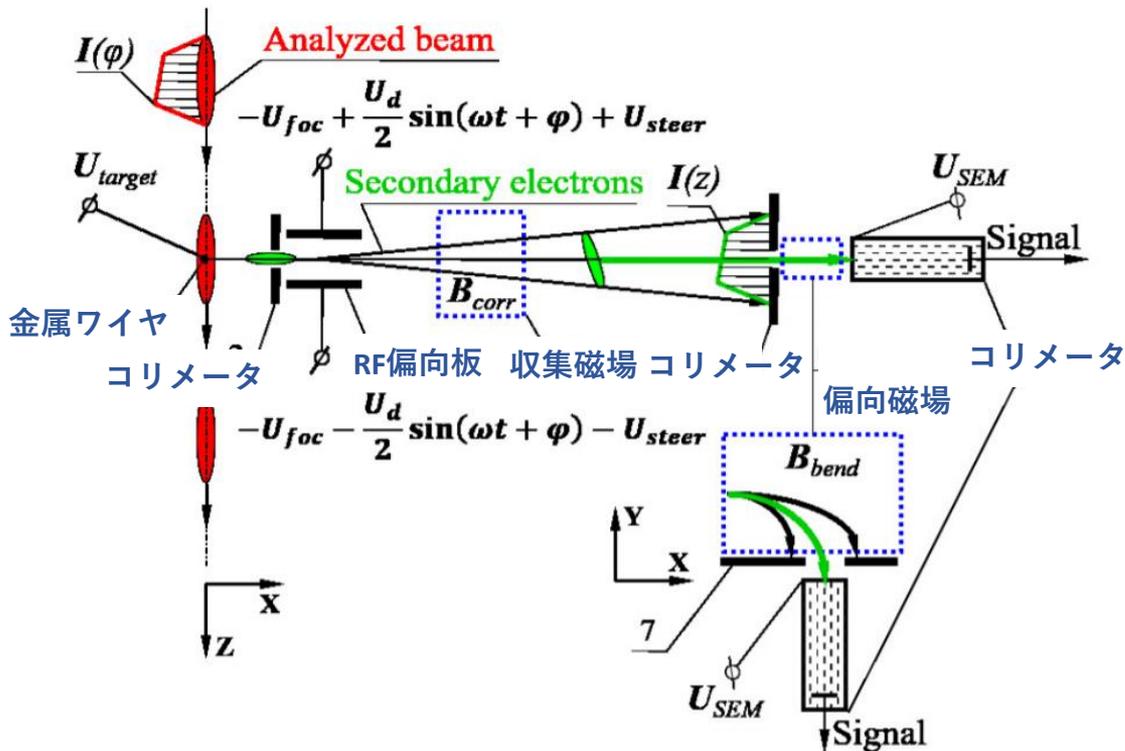
- ビーム運動は水平方向、垂直方向、ビーム進行方向の一般化座標と一般化運動量の、計6次元(x, p_x, y, p_y, s, p_s)



- 水平(x)、垂直(y)、ビーム進行(s)方向運動⇒3種類の2次元エミッタンス
- ビーム軸方向⇒縦方向(Longitudinal)プロファイル
- ビーム断面方向⇒横方向(Transverse)プロファイル
 - 水平方向(Horizontal)プロファイル
 - 垂直方向(Vertical)プロファイル

Longitudinal Profile (Linac)

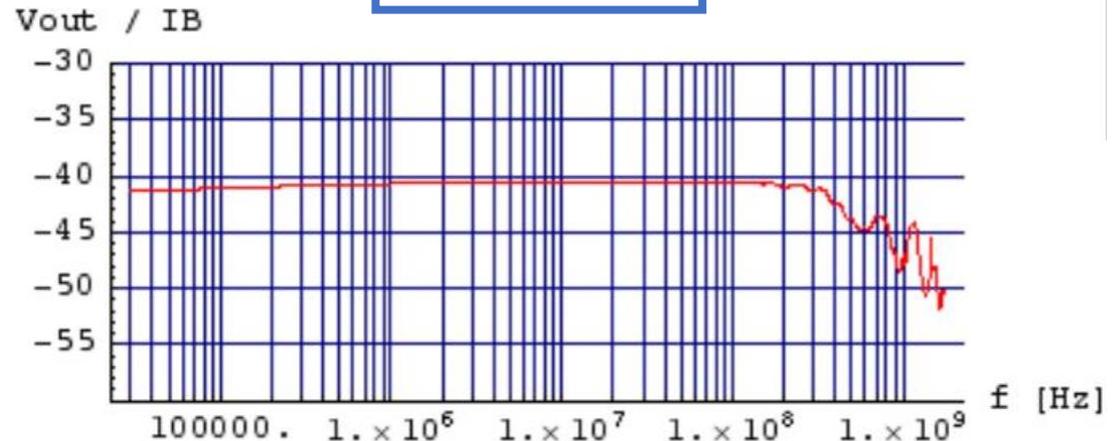
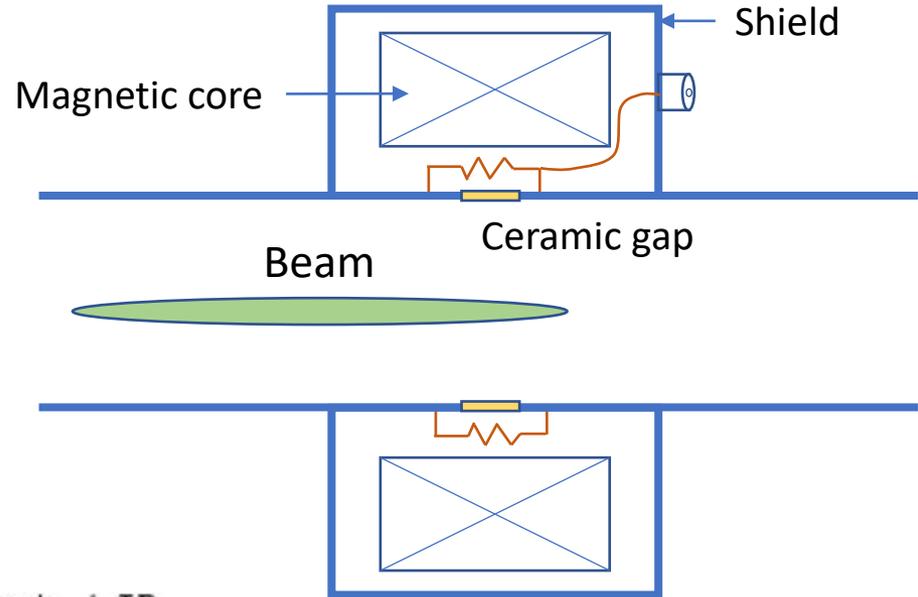
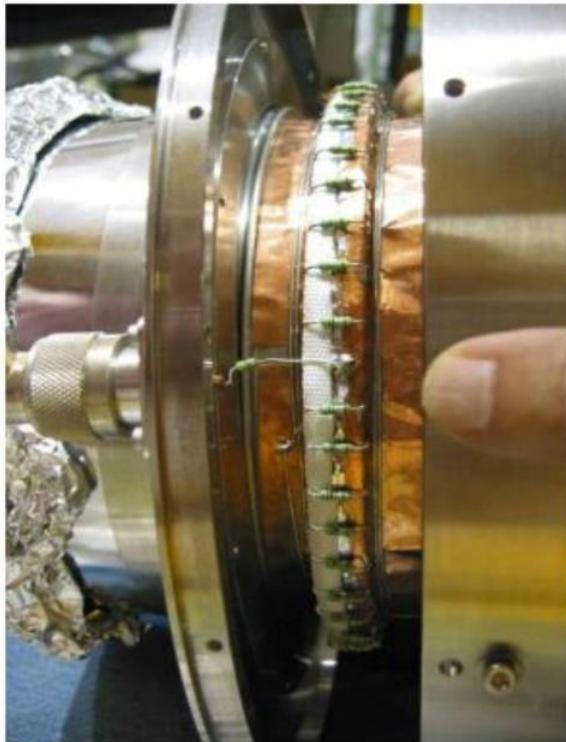
Bunch Shape Monitor (Streak Camera)



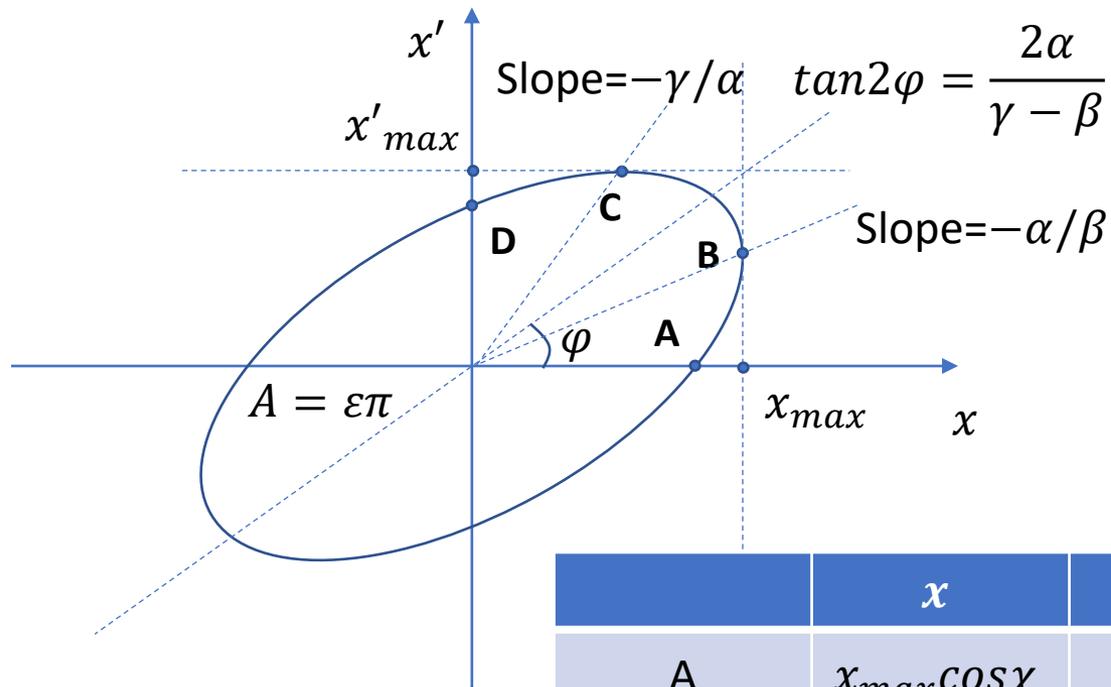
S. Gavrilov et al., "Bunch shape monitors for modern ion linacs", IOP, Vol. 12, 2017, P12014 より転載

三浦昭彦他, "BUNCH SHAPE MONITOR FOR J-PARC LINAC", 2013加速器学会プロシーディングス より転載

Longitudinal Profile (Ring)



Transverse Phase spaceの表現



Courant-Snyderのパラメータ

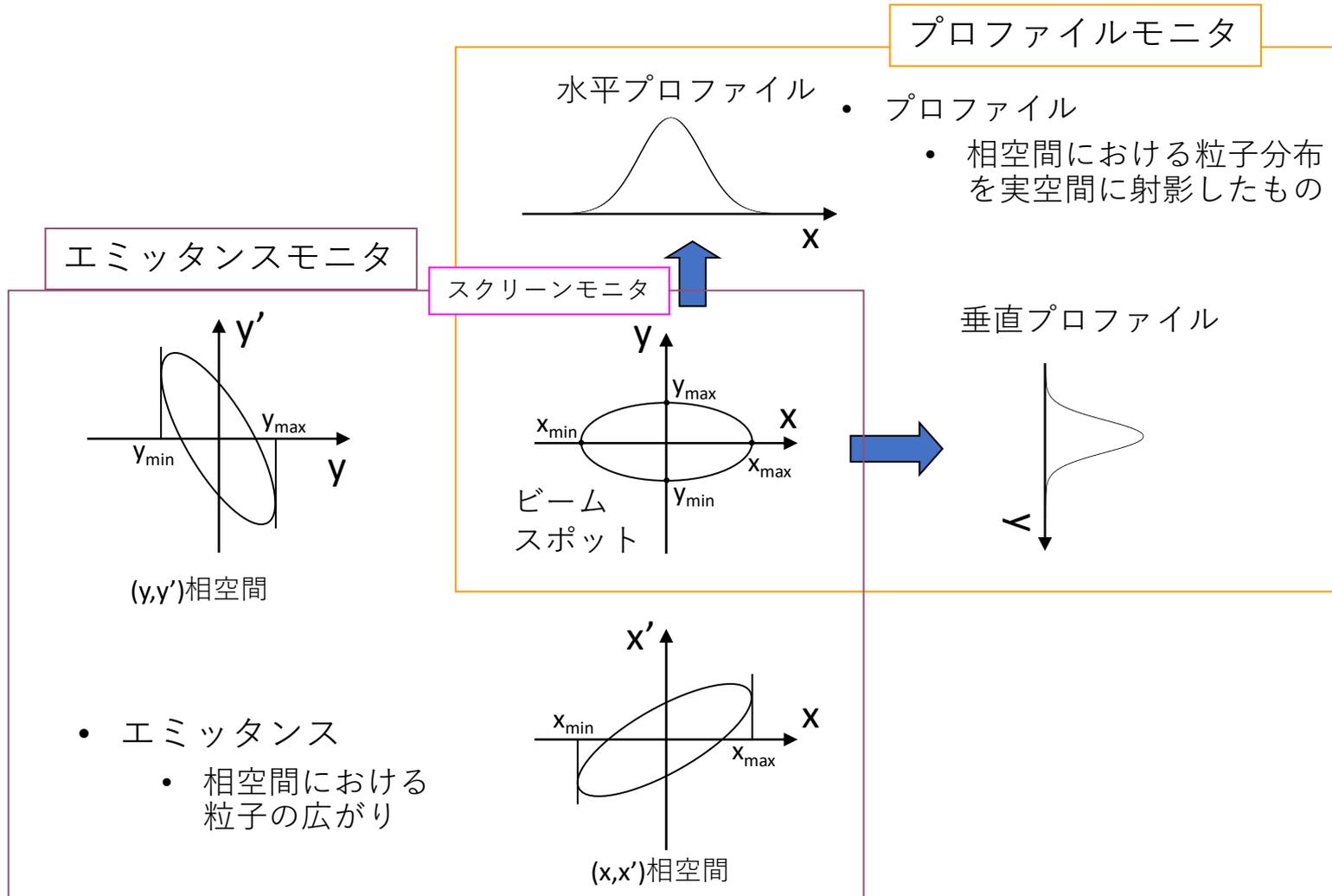
$$\gamma x^2 + 2\alpha x x' + \beta x'^2 = \epsilon$$

$$\gamma\beta - \alpha^2 = 1$$

$$\chi = -\arctan(\alpha)$$

	x	x'	x	x'
A	$x_{max} \cos\chi$	0	$\sqrt{\epsilon/\gamma}$	0
B	x_{max}	$x'_{max} \sin\chi$	$\sqrt{\epsilon\beta}$	$-\alpha\sqrt{\epsilon/\beta}$
C	$x_{max} \sin\chi$	x'_{max}	$-\alpha\sqrt{\epsilon/\gamma}$	$\sqrt{\epsilon\gamma}$
D	0	$x'_{max} \cos\chi$	0	$\sqrt{\epsilon/\beta}$

エミッタンスとプロファイルの関係

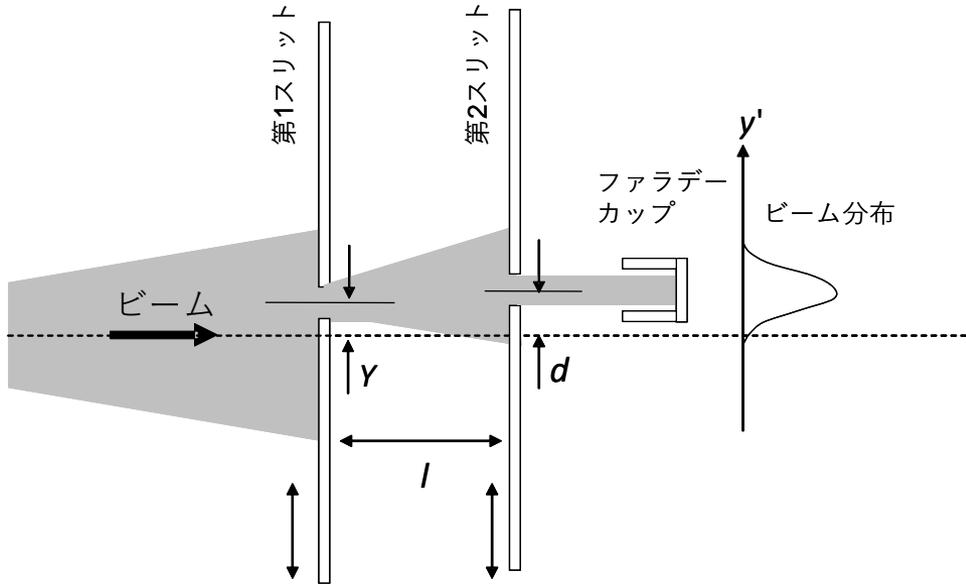


ハドロン加速器で使用される 測定プローブ

	プローブ	信号源	モニタ名	備考
	ワイヤ	誘起電荷(二次電子) 二次放射線	ワイヤスキャナモニタ、マルチワイヤモニタ、フライングワイヤモニタ	大強度ビームではワイヤの破断が問題
	スクリーン	蛍光 遷移放射光(OTR)	蛍光板スクリーンモニタ、OTRモニタ	ビームスポット観測
	レーザー	レーザー電離電子	レーザーワイヤモニタ	SNSの負水素リニアックで使用 J-PARCでも検討中(試験済み)
	放射光	シンクロトロン放射光	シンクロトロン放射光モニタ	200GeV以上で実用化 CERN-SPS, Tevatron, DESY-HERA, CERN-LHCなど
	荷電粒子 ビーム	電子ビームの変位 イオンビームの変位	電子、イオンビームプローブモニタ	SNS、CERNで動作試験
	残留ガス	ビームにより電離した荷電粒子	残留ガスプロファイルモニタ	非破壊プロファイルモニタ
	ガス	導入ガスとビームの反応で発生する蛍光	ビーム誘導蛍光モニタ	シートガスタイプをJ-PARC用に開発中 BTラインにガスセル方式

横方向エミッタンスモニタ

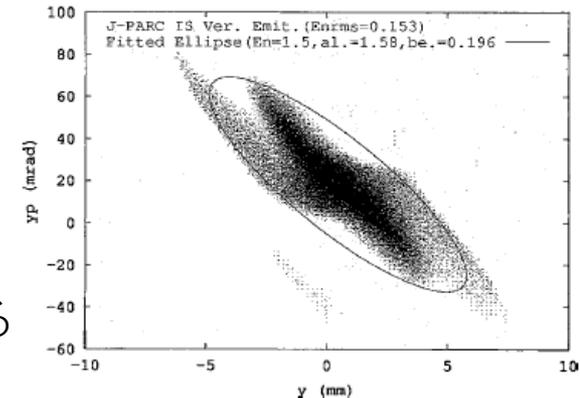
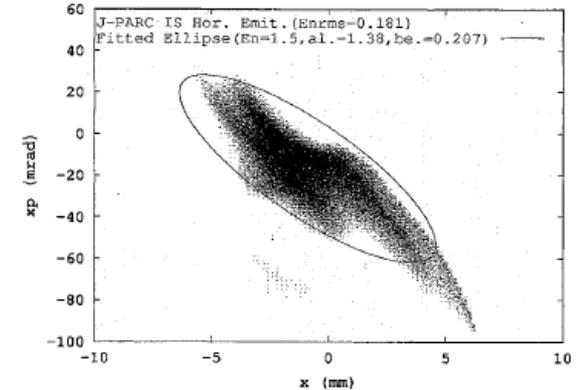
ダブルスリット法



第1スリットである座標 Y の粒子を選別し、
第2スリットの位置を変えながら発散角度を測定する

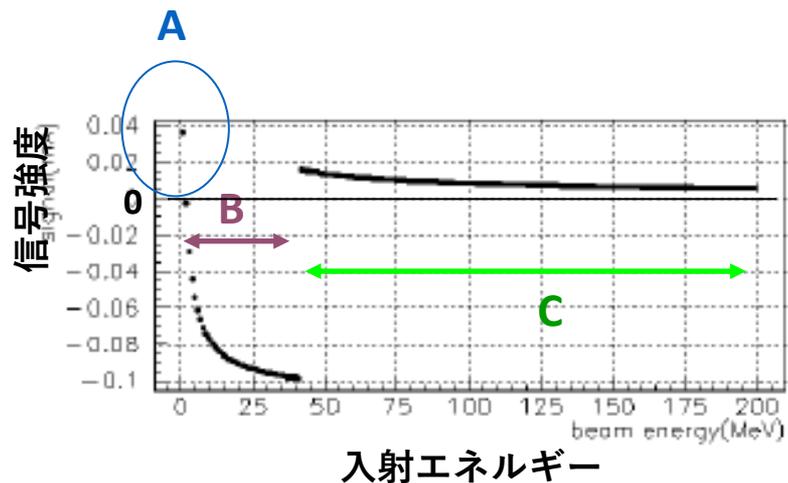
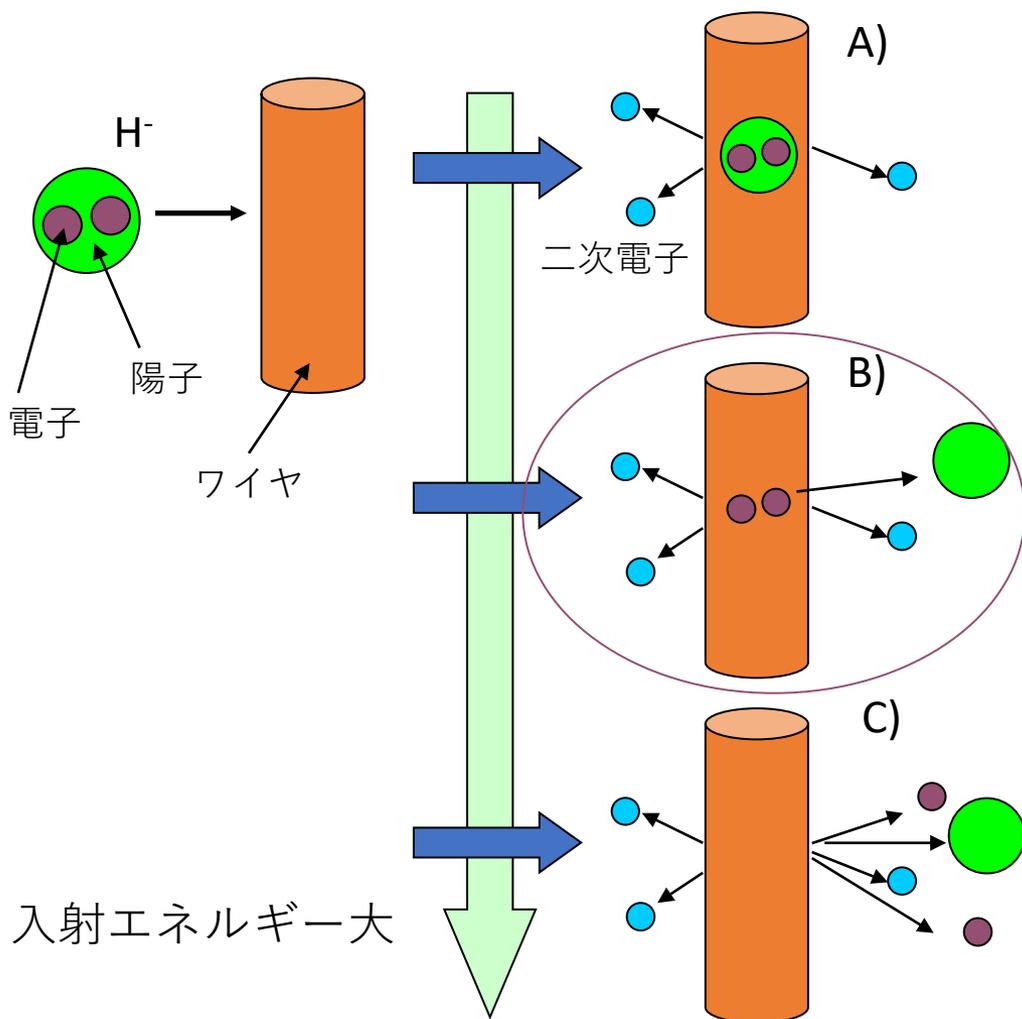
$$y' = \theta = \frac{d - Y}{l}$$

高エネルギー粒子にはスリットが使えないため、
低エネルギーに限る



イオン源におけるビームエミッタンス
測定例

負水素ビームの誘起信号



ワイヤに誘起する信号強度

B)の過程がもっとも信号強度が大きい
ワイヤ径および材料を調整し最適化する

$$B) \cong 10 \times C)$$

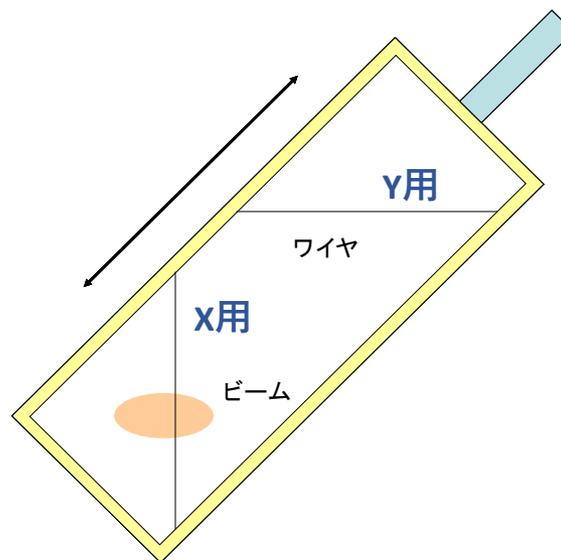
Linacのワイヤモニタ

ワイヤスキャナーモニタ (WSM)

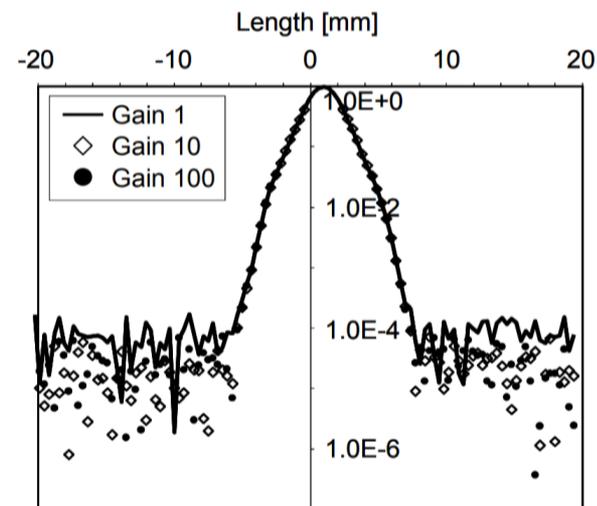
- リニアックで使用されているワイヤをプローブに使うプロファイルモニタ
- ワイヤをビームに対して挿入し、ワイヤ電流を測定する
- 信号処理回路の数を抑えられる



J-PARC WSM



WSMのヘッド

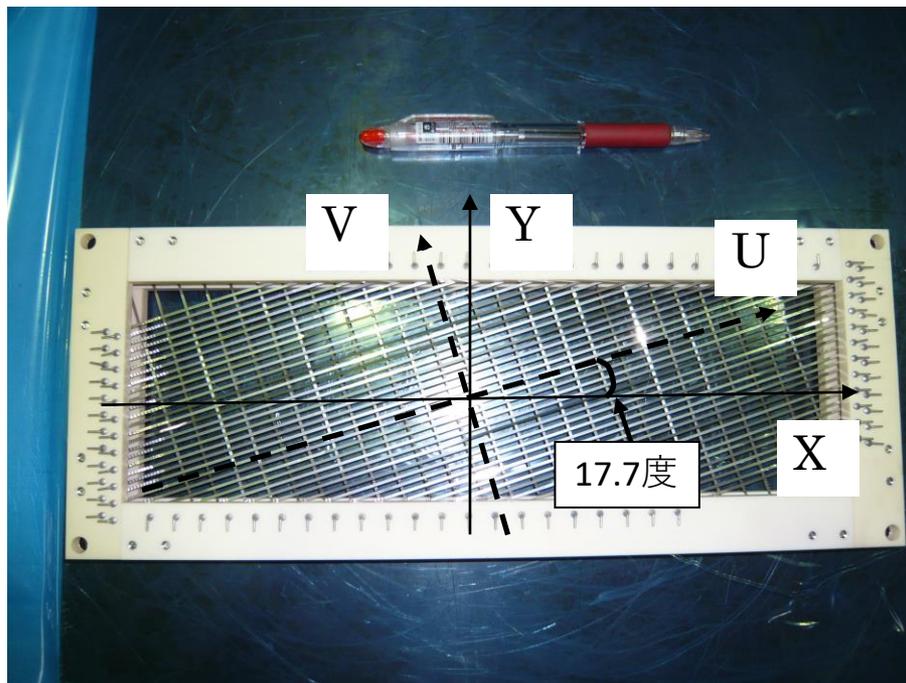


J-PARC Linac ビームの測定例

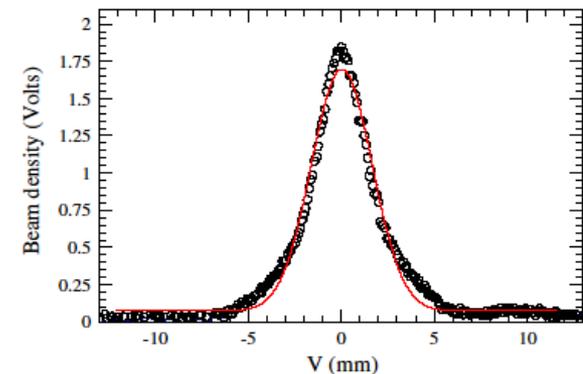
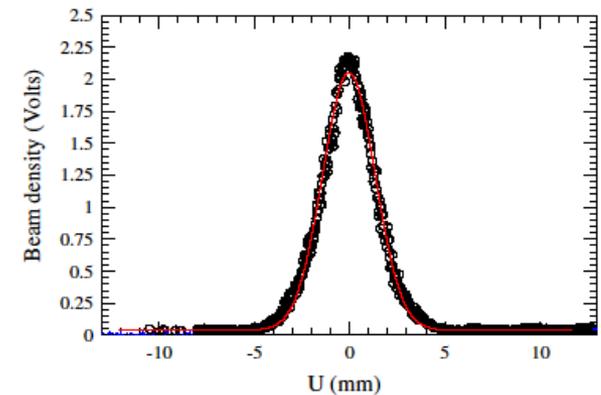
A. Miura et al, "OPERATIONAL PERFORMANCE OF WIRE SCANNER MONITOR IN J-PARC LINAC", Proc. Of IPAC'10, MOPE021 より転載

マルチワイヤプロファイルモニタ (MWPM) 入射部およびBTに設置

- RCS入射部および3-50BTに設置
- RCS入射部は負水素ビームが通るので、負水素についている電子信号と二次電子信号を測定するため、信号強度が大きい
- 3-50BTは二次電子信号のみを測定

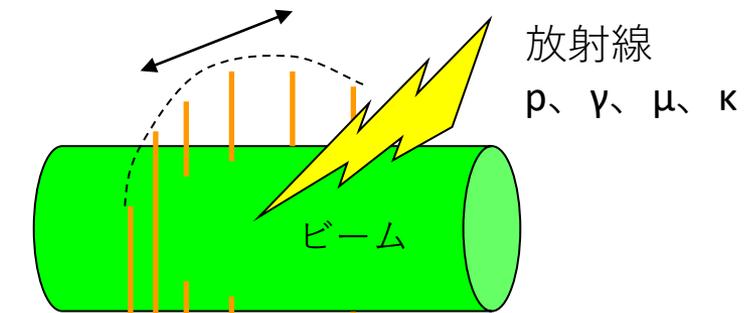


RCS用MWPMヘッド



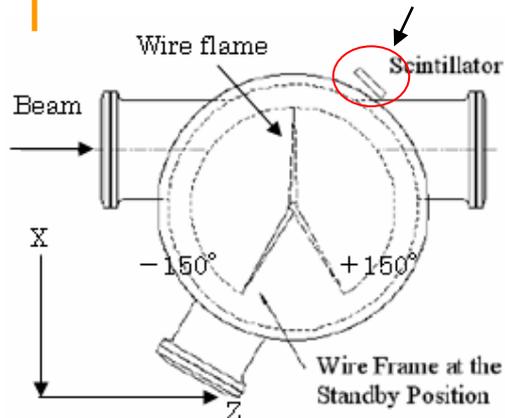
リングのワイヤモニタ

フライングワイヤモニタ

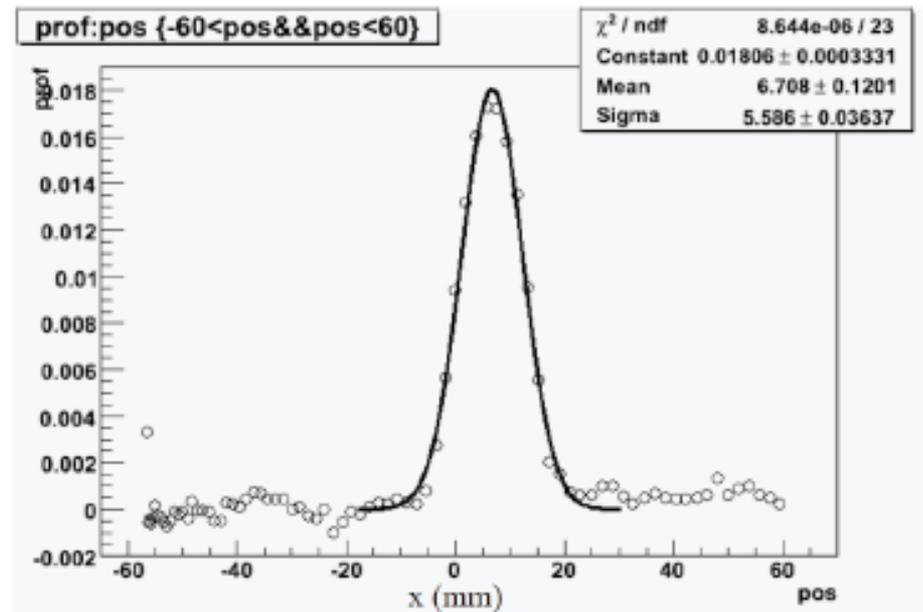


ワイヤ

シンチレータにより発生する放射線を測定



ワイヤスピード5m/s
一連の動作を0.2sで行う

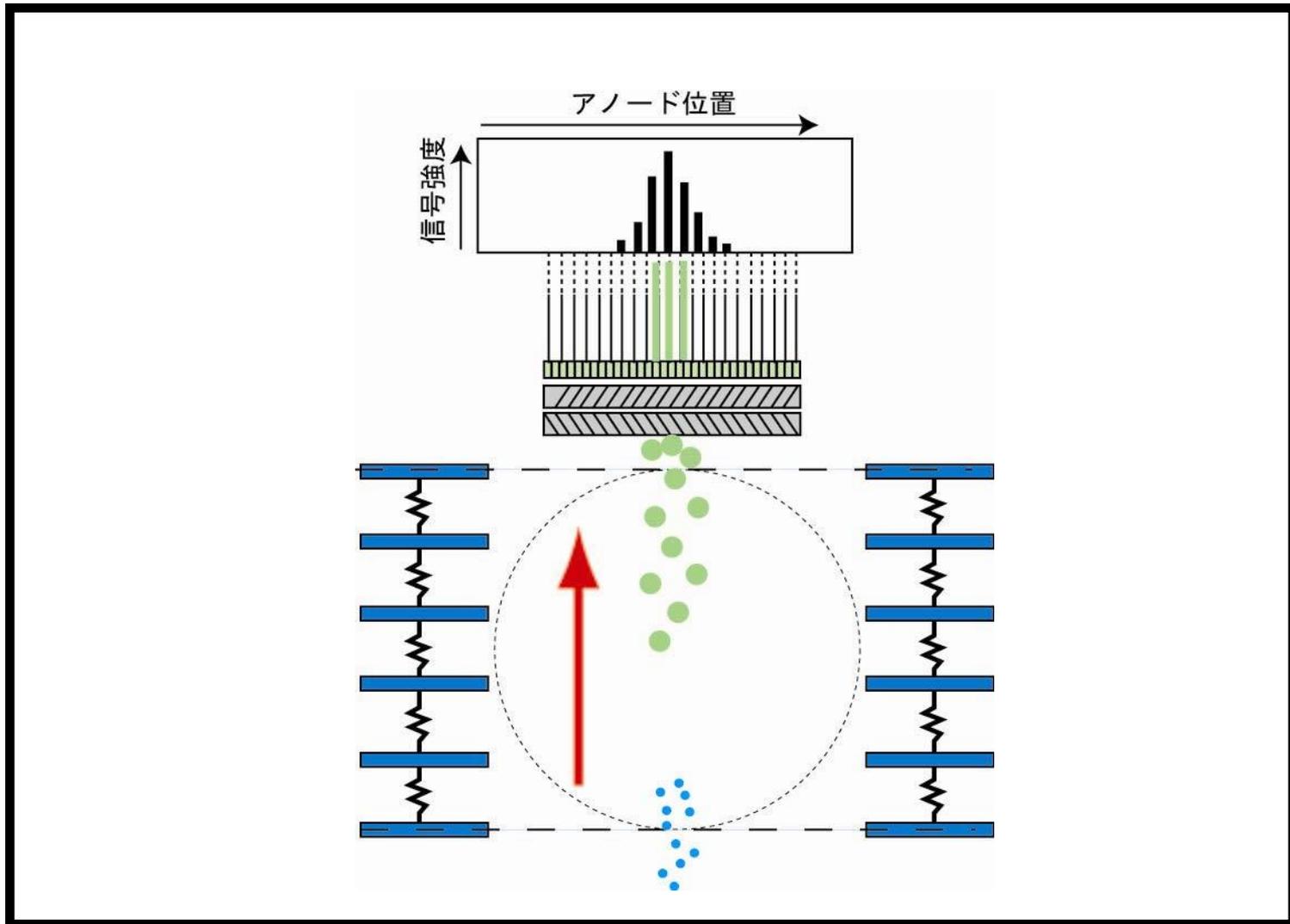


ワイヤスピード⇒信号強度
位置を補正⇒立体角
に影響するため、要校正

ワイヤの破断、ビームの変質、ビームロスの恐れあり

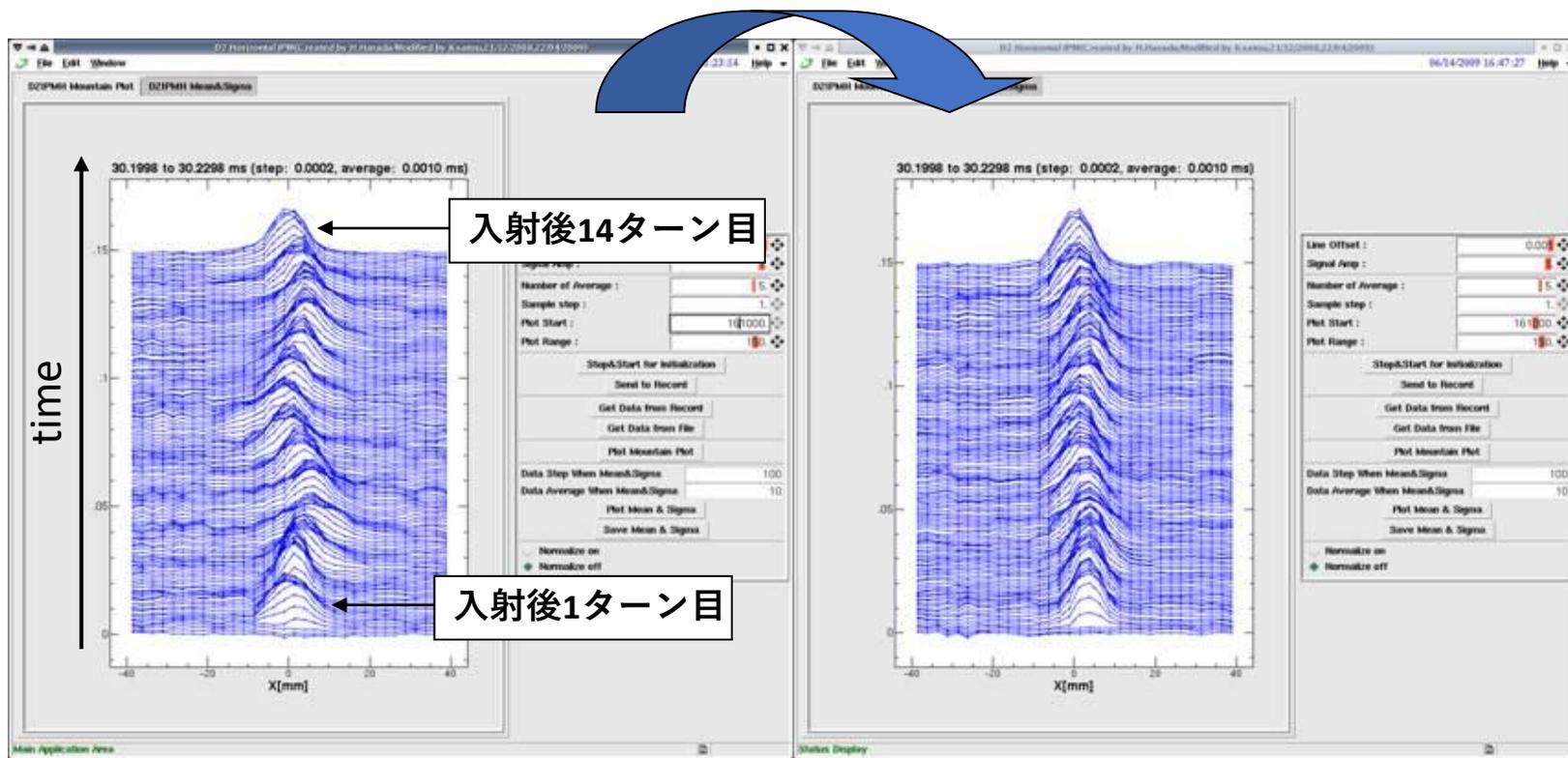
残留ガスパロファイルモニタ（IPM）の測定原理

RCSおよびMR、ハドロンBTに設置



IPMによるターン毎測定

周回毎のプロファイルを測定し、入射ビームの調整を行う



MR入射ビームのマッチング調整

まとめ

- 陽子加速器用モニタ？
 - 基本的に電子のものと同じモニタで同じ原理で動作
 - J-PARCでは電子と比べてLong Bunch: $\sigma_t > 20ns$ であり、周波数はDC~数10MHz程度がメインターゲット
 - エネルギーが上がると電子加速器と同じような時間構造になる
 - KEKB: 3.5GeV/8GeV, $\sigma_t = 0.02ns$, Bunch space:2ns
 - LHC : 6.5TeV, $\sigma_t = 0.3ns$, Bunch space:25/50 ns
 - モニタ設計も同様
 - BPM:ボタン電極
 - 放射光によるプロファイル
 - 大強度陽子加速器：機器の放射化の抑制が重要なタスク
 - 放射化とモニタ精度の関係を理解
 - 非破壊モニタが基本（できるだけ）

予告していたCT装置については断念しました。ごめんなさい
→もし次回（何年後？）があれば、その際に