

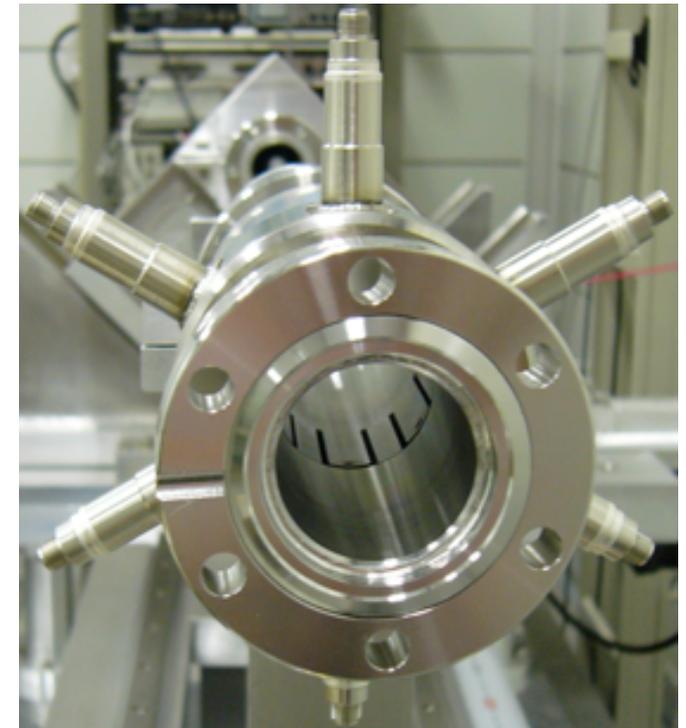
# SPring-8線型加速器 静電型ストリップラインモニタの出力波形解析

柳田謙一、鈴木伸介、花木博文

公益財団法人高輝度光科学研究センター

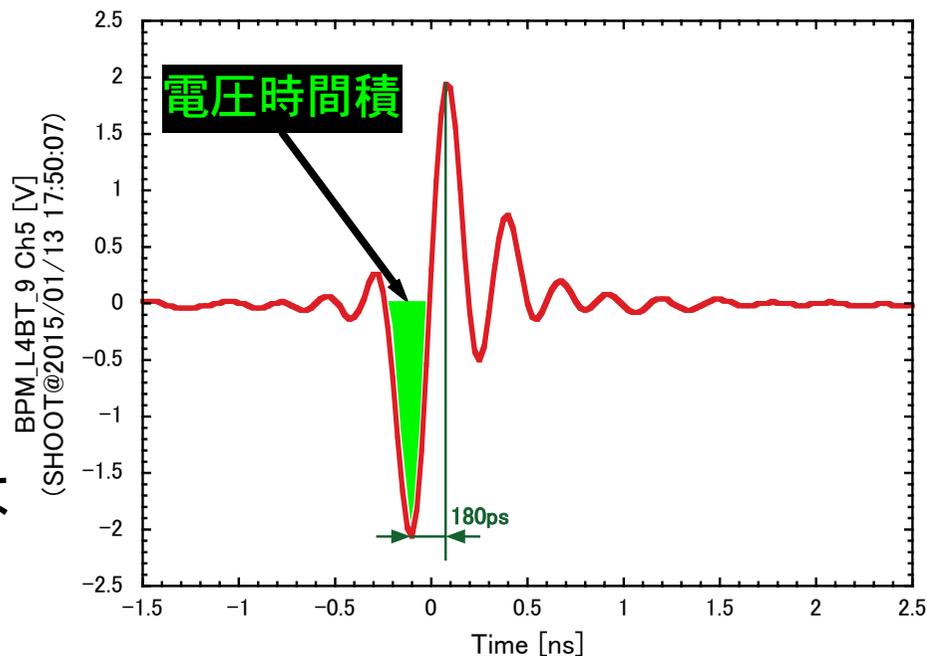
## ●はじめに(研究の動機)

- SPring-8線型加速器では四電極or六電極ストリップラインモニタを設置
- 各電極からの相対的電圧差分  
→ビームの位置(一次)及び二次モーメントを計算
- 一次及び二次モーメントを得るだけならば各電極からの相対的電圧のみで良い←全体較正
- 写真のモニタを使用して得られる物理量(6つ)
  - ・バンチ電荷量(0次電荷モーメント、単位は長さの0乗×電荷の1乗)
  - ・水平及び垂直方向ビーム位置(1次モーメント、単位は長さの1乗)
  - ・ $P_2$ 及び $Q_2$ (2次モーメント、単位は長さの2乗)
  - ・ $Q_3$ (3次モーメント、単位は長さの3乗)



## ●はじめに(研究の動機)

- 全電極からの絶対電圧がわかれば  
→ビーム電荷量は計算出来る
- SPring-8線型加速器ストリップラインモニタの電極からの波形は右図の通り両極性
- 経験的(実験的)に片極性側の電圧時間積は  
電圧時間積[V・s]



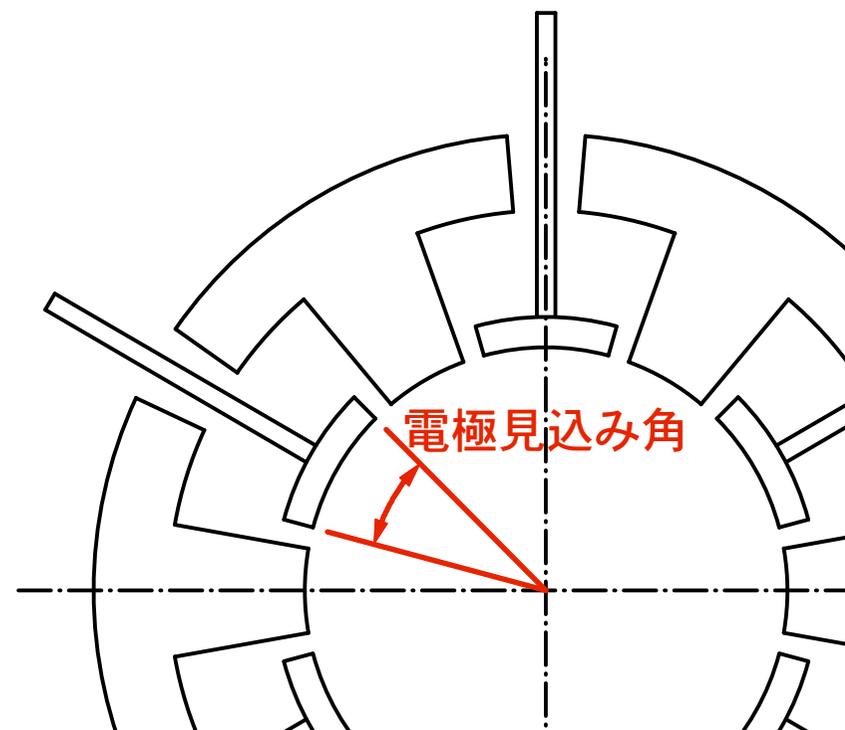
$$= \text{バンチ電荷量}[C] \times \frac{\text{電極見込み角}[^\circ]}{360[^\circ]} \times \text{ストリップライン特性インピーダンス}[\Omega]$$

$$= \text{バンチ電荷量}[C] \times \frac{30[^\circ]}{360[^\circ]} \times 50[\Omega]$$

$$= \text{バンチ電荷量}[C] \times 4.17[\Omega]$$

で得られる。

勿論、ケーブルの減衰率も考慮して計算



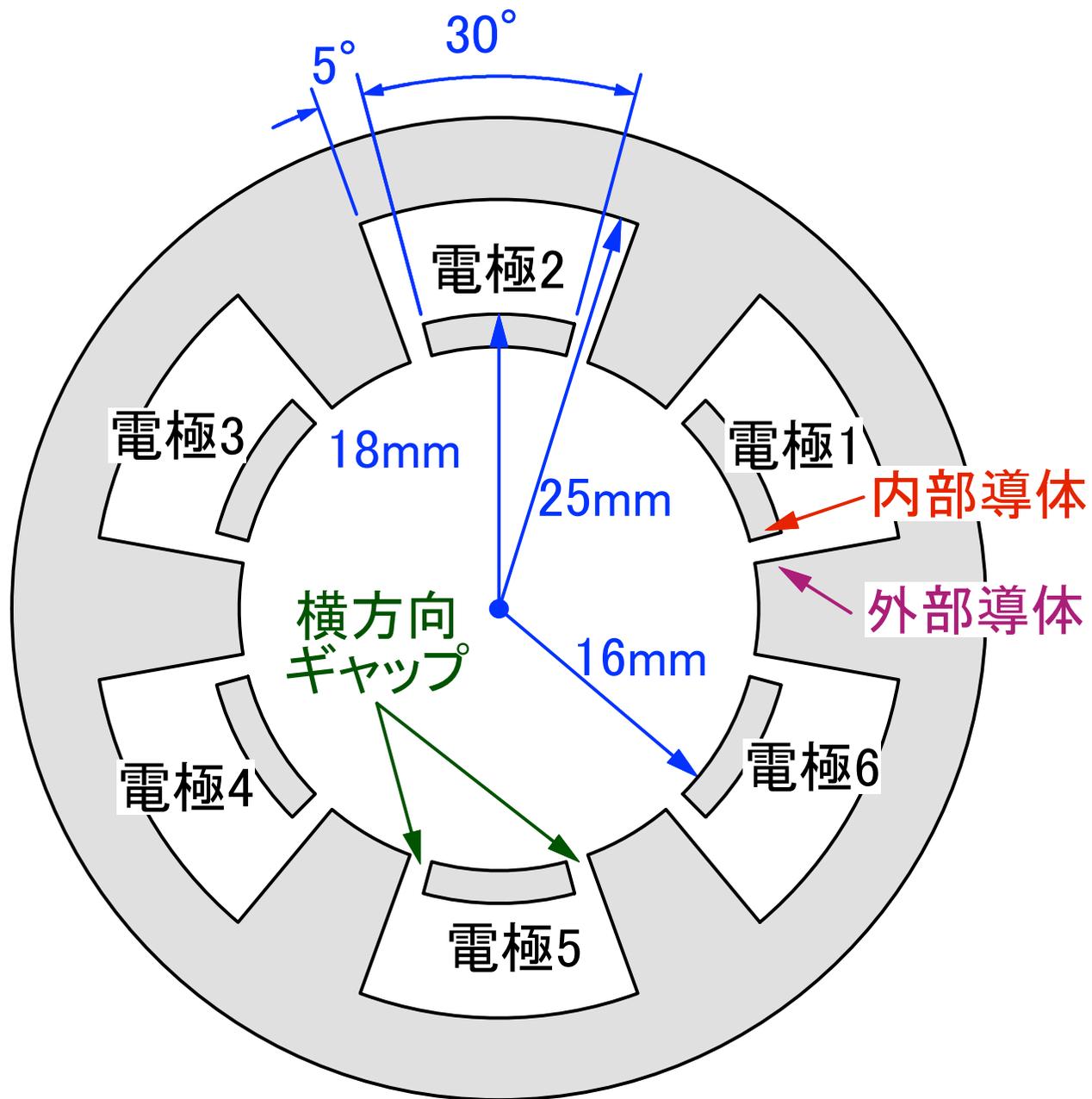
## ●はじめに(研究の目的)

- 出力電圧(波形)に就いて、定量的には経験式で得られているが、定性的な理解が進んでいなかった。(そもそも、何故、**両極性のパルス波形が現れるのか?**)
- 定性的に理解すれば**ストリップラインモニタをどう改良すれば良いかわかる。**  
(数値計算を繰り返し、結果が良くなる方向へ改良する手法もあるが・・・)
- 2012年ビームの位置・モーメントがSPring-8線型加速器ストリップラインモニタの電極出力に与える影響を**静電結合のみを駆使して解析**(PRSTABで発表)  
→横(Transverse)方向の振舞いが理論と実験で一致(加速器学会年会で発表)
- 長手(Longitudinal)方向の振舞いも静電結合で説明可能な筈
- 長手方向の振舞いに寄与するもの
  - ・ビーム電流と壁電流
  - ・ストリップラインを流れる表面電流等
  - ・ストリップラインモニタに於いて電子回路的なノードを定義し、そのノードにキルヒホッフの法則を適用した。

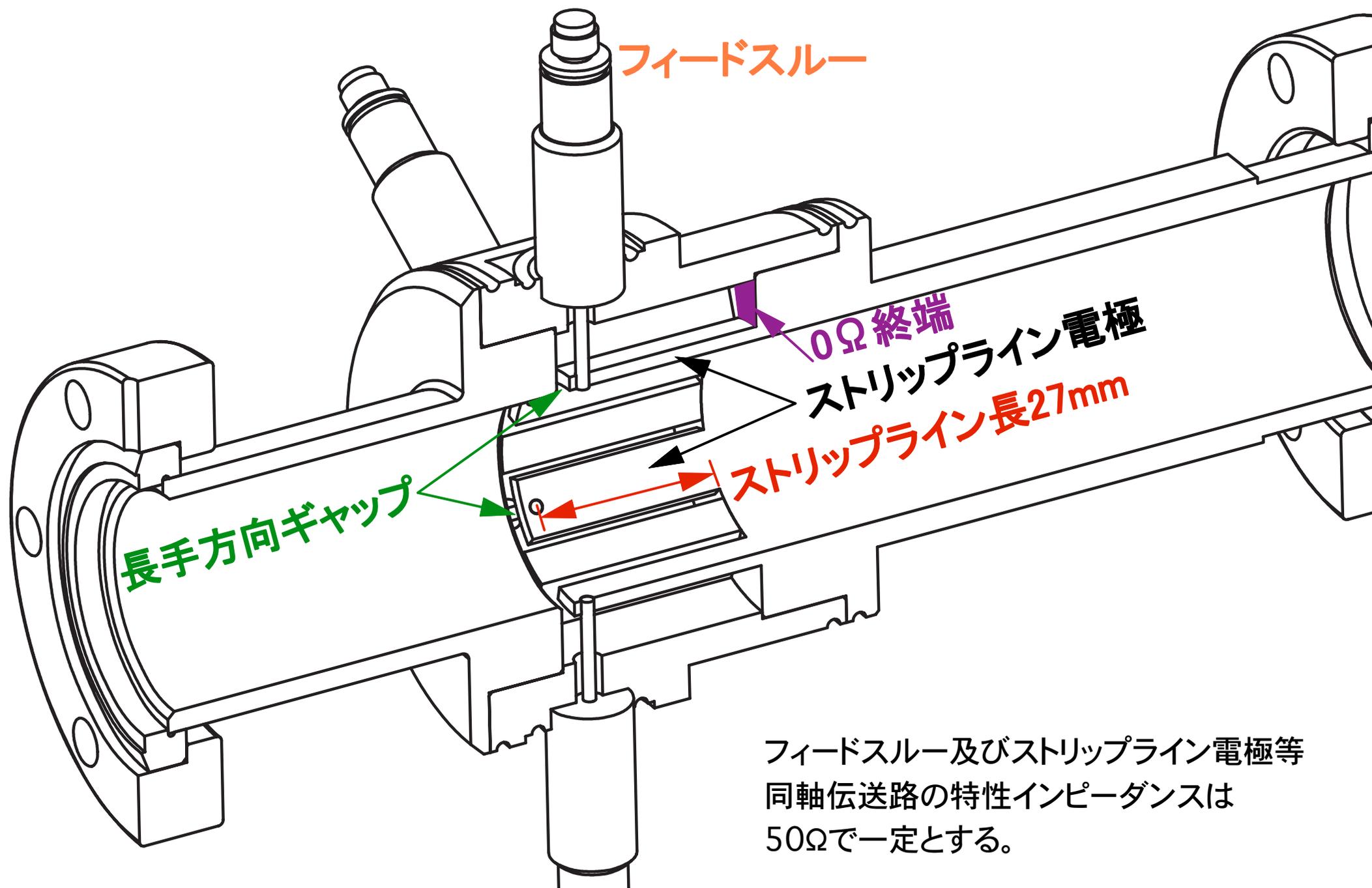
## ●はじめに(研究の目的)

- 重要な前提及び原理(Principle)は4つある。
  - 同軸伝送路(フィードスルー及びストリップライン)の特性インピーダンス $Z$ は  
段差無く一定で $50 \Omega$ とする。
  - 同軸伝送路の内部及び外部導体表面では、大きさと方向が同じ且つ逆符号の電流が流れる。
  - 同軸伝送路の内部導体及び外部導体間に掛かる電圧は、各導体表面電流の2倍に $Z$ を掛けたものとなる。
  - 各ノードに流れ込む電流の総和と流れ出る電流の総和は等しい(キルヒホッフの法則)。
- この解析の応用として以下の構造にも適用して解析する
  - 上流および下流側双方に信号取り出し用フィードスルーが有る場合
  - テーパ状の電極の場合

# ● ストリップラインモニタの構造 (横方向)



## ● ストリップラインモニタの構造（長手方向）

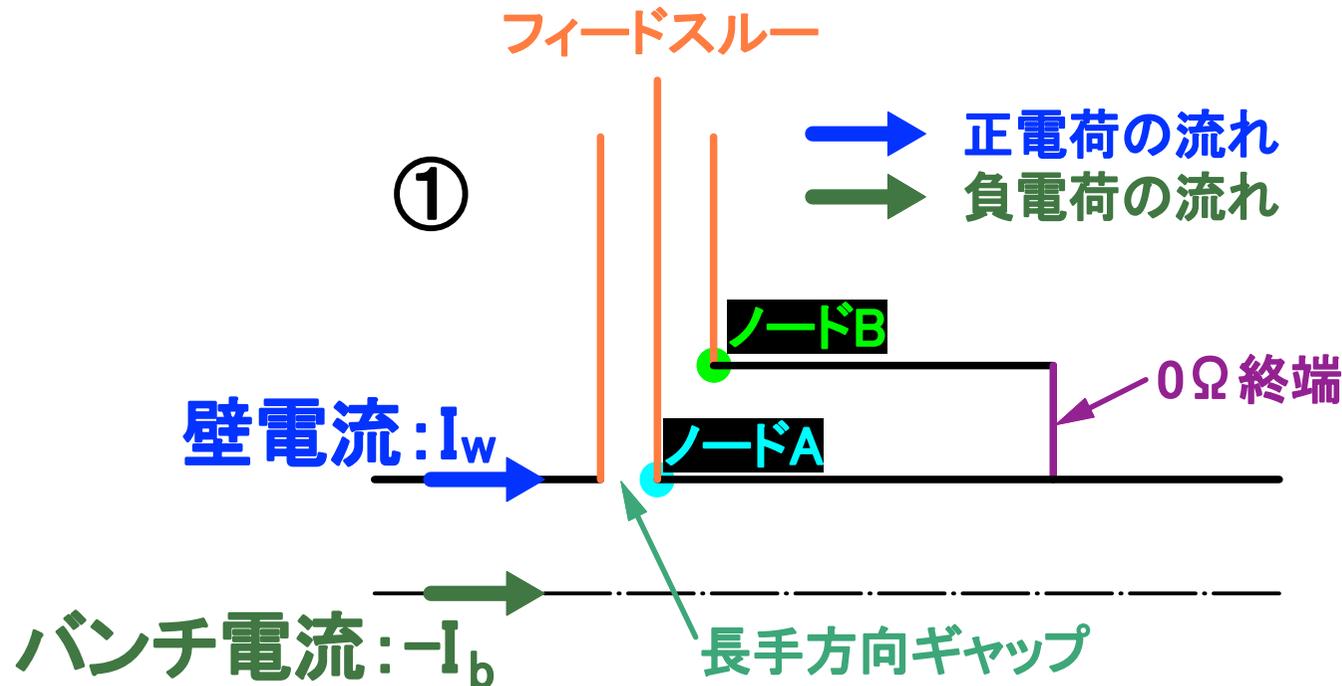


# ● 模式図を使用した解析

- 本来なら三次元的な電流の流れを表示すべきであるが、本質的には二次元模式図で十分説明出来る。

- ・フィードスルーとストリップライン電極を切り分ける **ノードA** 及び **ノードB** が存在する。  
**ノードA** は内部導体側に、**ノードB** は外部導体側に位置する。

ノードが0Ω終端より上流に位置する場合



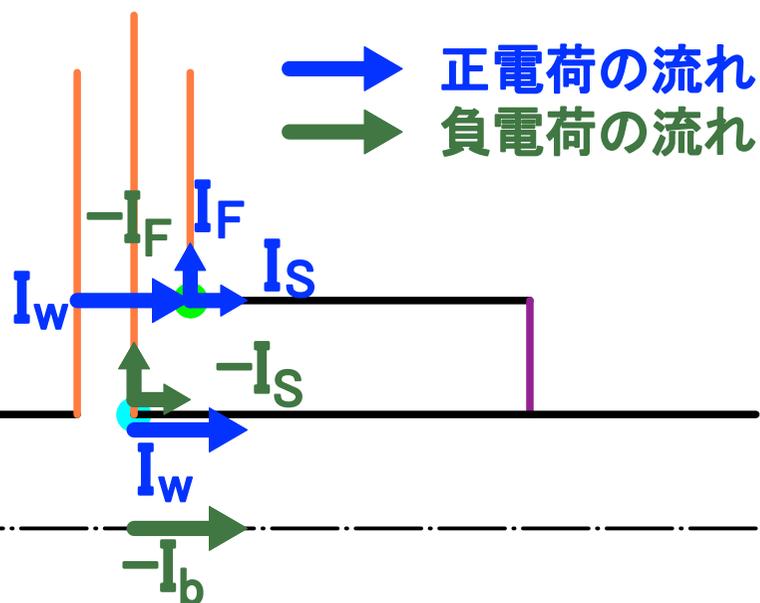
壁電流:  $I_w$

$$\begin{aligned} I_w &= \frac{\text{電極見込み角}[\text{°}]}{360[\text{°}]} \times I_b \\ &= \frac{30[\text{°}]}{360[\text{°}]} \times I_b \\ &= \frac{I_b}{12} \end{aligned}$$

# ● 模式図を使用した解析

ノードが0Ω終端より上流に位置する場合

②



・各ノードからフィードスルー方向へ流れる電流を $I_F$   
ストリップライン方向へ流れる電流を $I_S$ とする。

## ノキルヒホッフの法則

ノード入電流    ノード出電流

ノードA

$$0 = I_W - I_F - I_S$$

ノードB

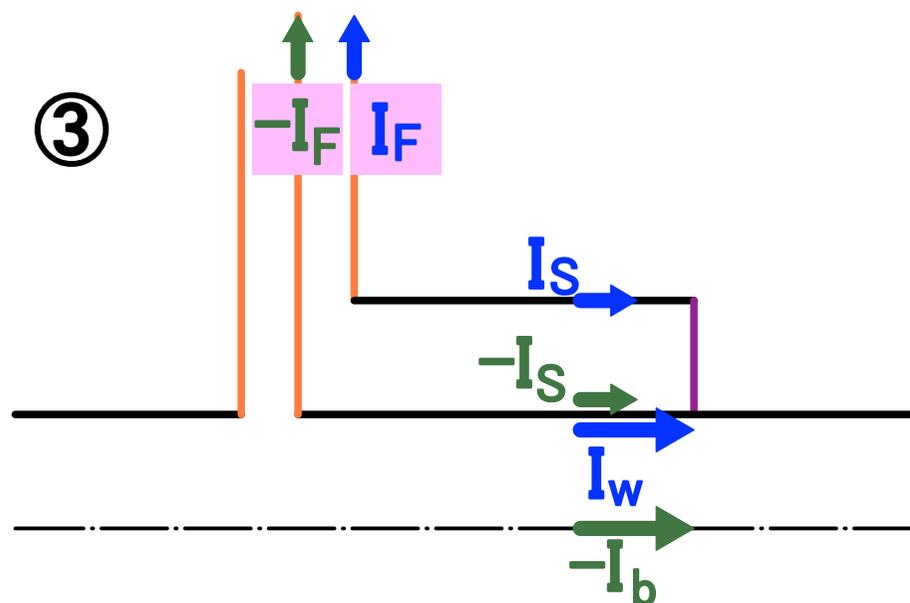
$$I_W = I_F + I_S$$

ノードAB間の電圧 =  $2ZI_F = 2ZI_S$

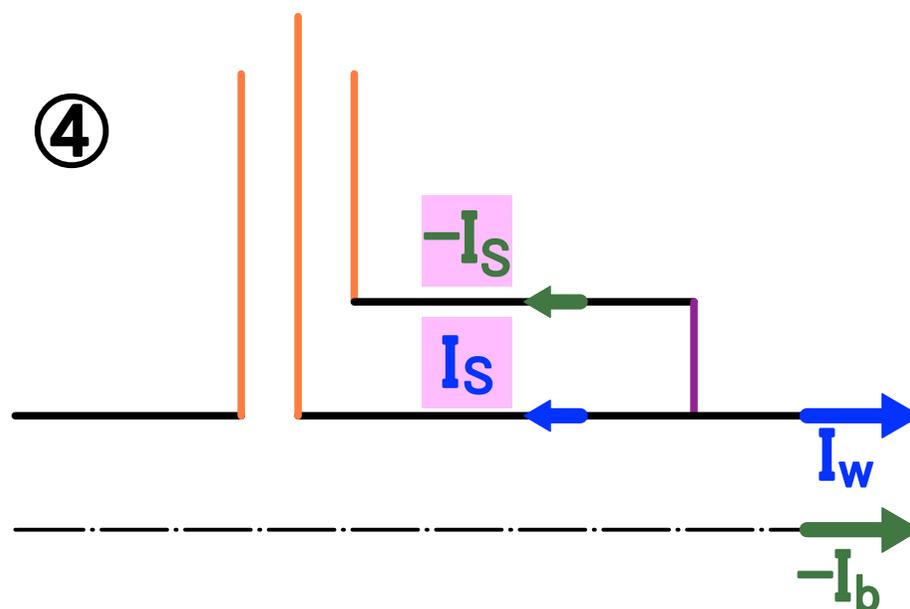
但し、 $Z=50 [\Omega]$

$$\Rightarrow I_F = I_S = \frac{I_W}{2}$$

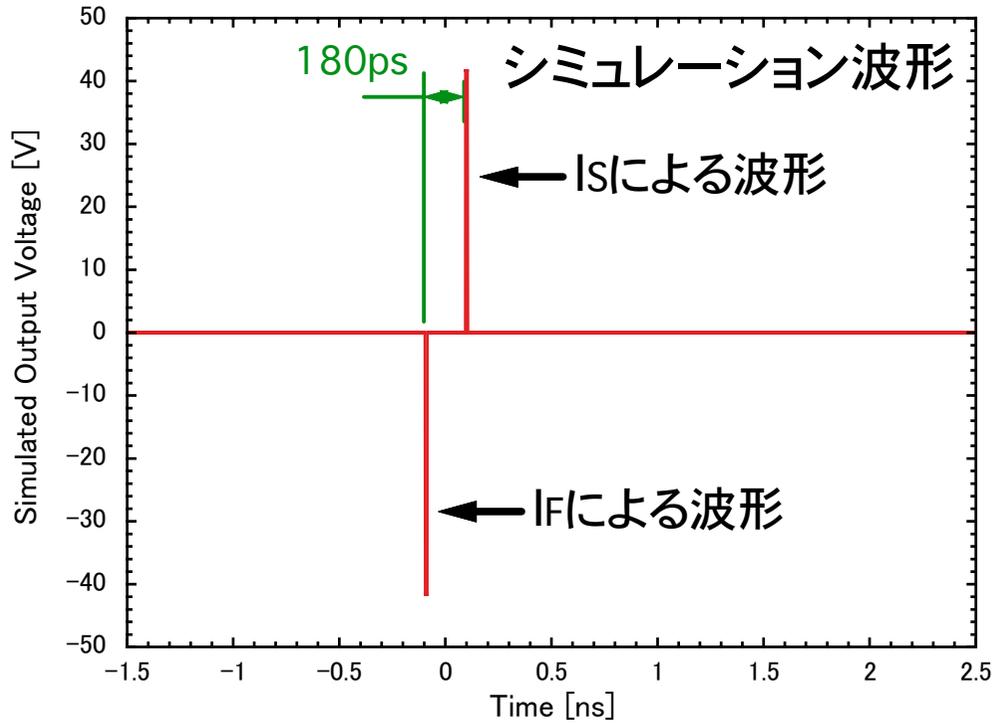
③



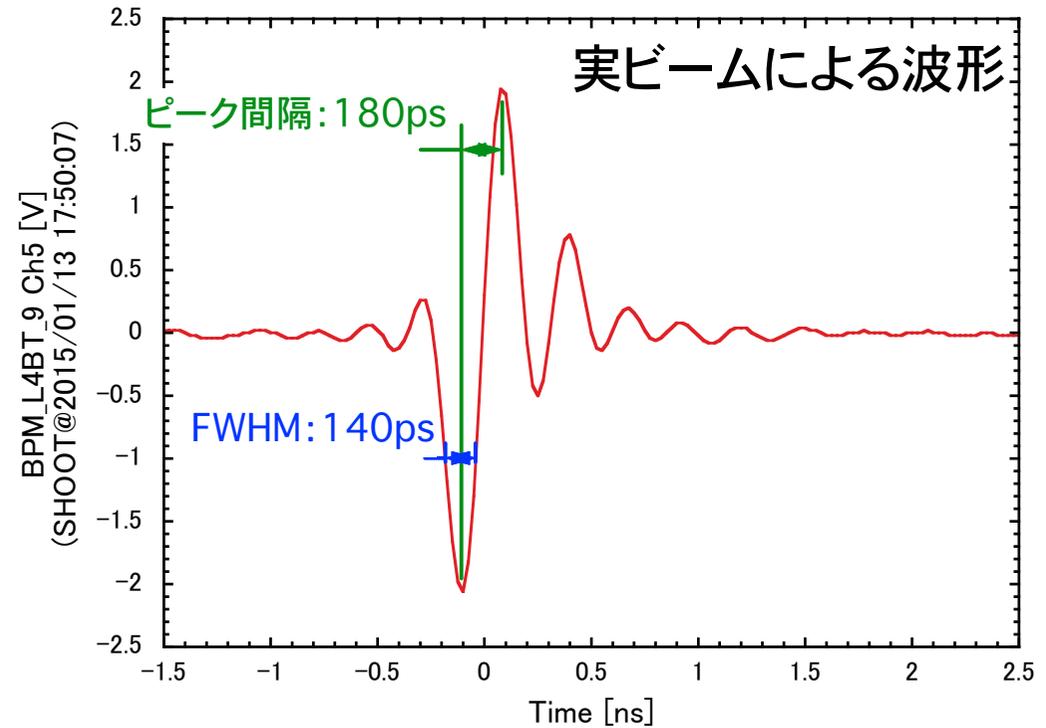
④



# ●電極出力のシミュレーションと実ビーム試験 ノードが0Ω終端より上流に位置する場合



パルス幅 (FWHM) 10ps、尖塔電流10Aの矩形パルスのシングルバンチ電流を仮定すると  
 バンチ電荷量:  $10 \text{ [A]} \times 10 \text{ [ps]} = 100 \text{ [pC]}$   
 Ifによる波形: -41.7V、10psの矩形波形  
 Isによる波形: +41.7V、10psの矩形波形  
 Ifによる波形とIsによる波形の時間間隔: 180ps  
 がフィードスルーから出力される。



●CTによる測定でバンチ電荷量は160pC程度  
 フィードスルーからの電圧時間積は  
 $-66.7 \text{ [V]} \times 10 \text{ [ps]} = -667 \text{ [pV}\cdot\text{s]}$

ピーク電圧      FWHM

●ケーブル等による減衰は-7.4dB程度  
 フィードスルーからの電圧時間積は

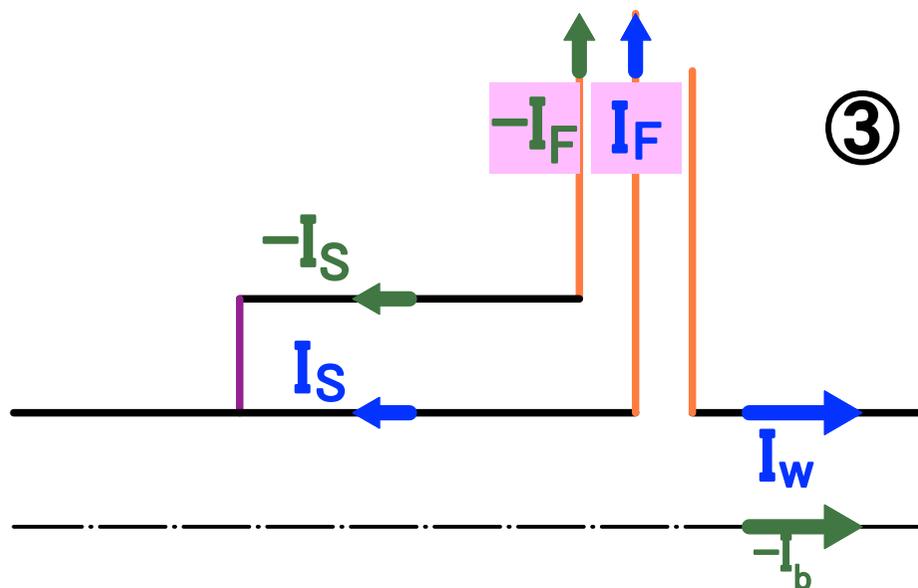
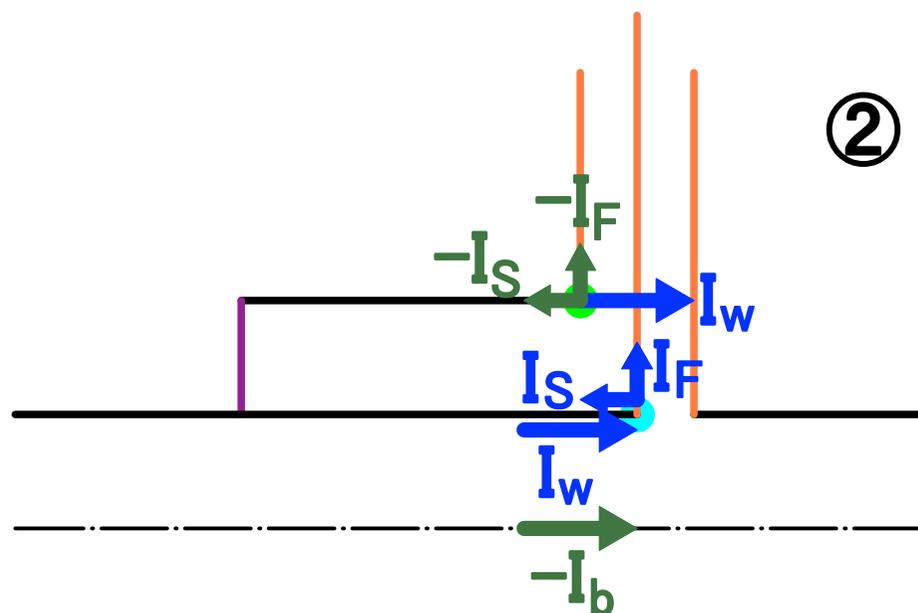
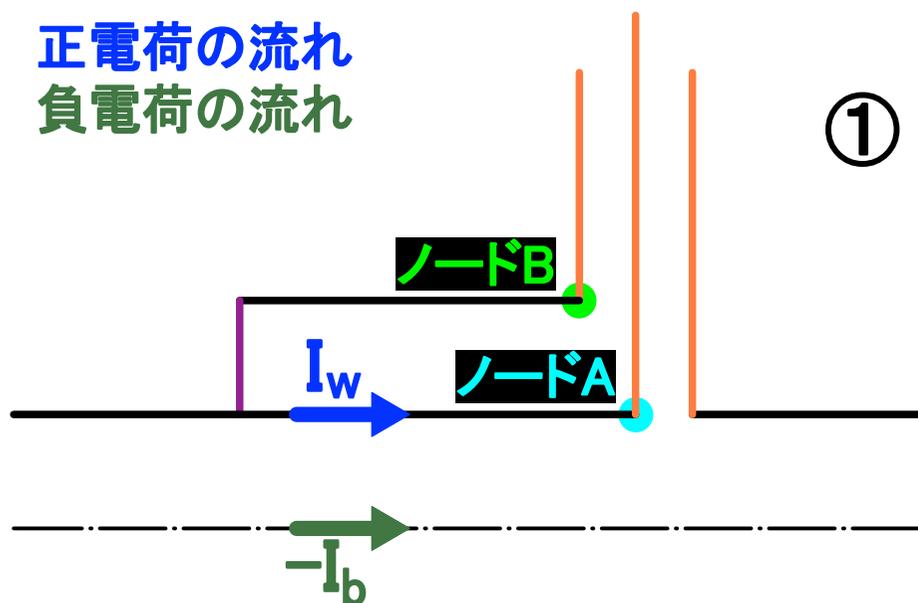
$$-2.1 \text{ [V]} \times 140 \text{ [ps]} \times 10^{\frac{7.4}{20}} = -689 \text{ [pV}\cdot\text{s]}$$

ピーク電圧      FWHM      減衰補正

とほぼ一致する。

# ● 模式図を使用した解析

→ 正電荷の流れ  
→ 負電荷の流れ



ノードが0Ω終端より下流に位置する場合

## ノキルヒホッフの法則

ノード入電流    ノード出電流

ノードA

$$I_W = I_F + I_S$$

ノードB

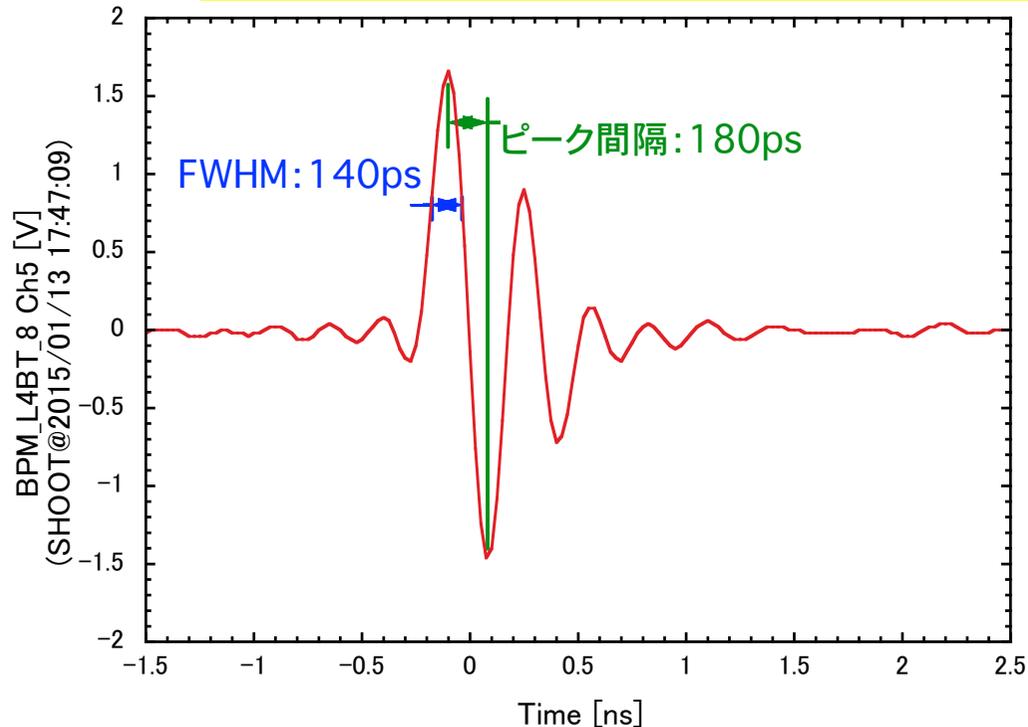
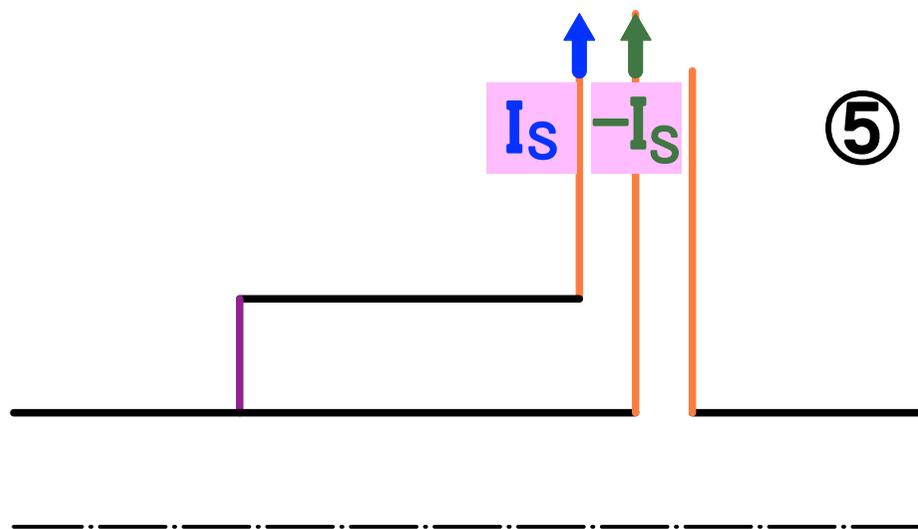
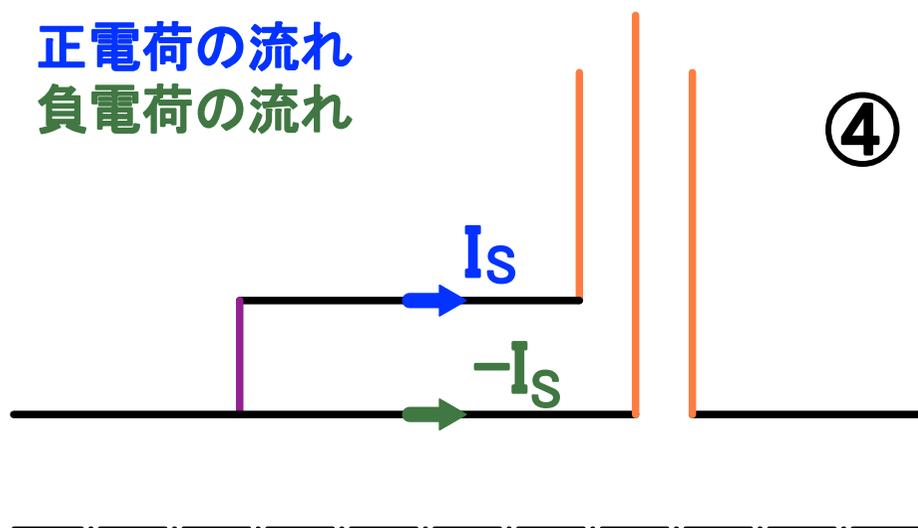
$$0 = I_W - I_F - I_S$$

$$\Rightarrow I_F = I_S = \frac{I_W}{2}$$

# ● 模式図を使用した解析・実ビーム試験

ノードが0Ω終端より下流に位置する場合

➡ 正電荷の流れ  
➡ 負電荷の流れ



● CTによる測定でバンチ電荷量は120pC程度  
 フィードスルーからの電圧時間積は  
 $50.0 \text{ [V]} \times 10 \text{ [ps]} = 500 \text{ [pV} \cdot \text{s]}$

ピーク電圧      FWHM

● ケーブル等による減衰は-7.4dB程度  
 フィードスルーからの電圧時間積は

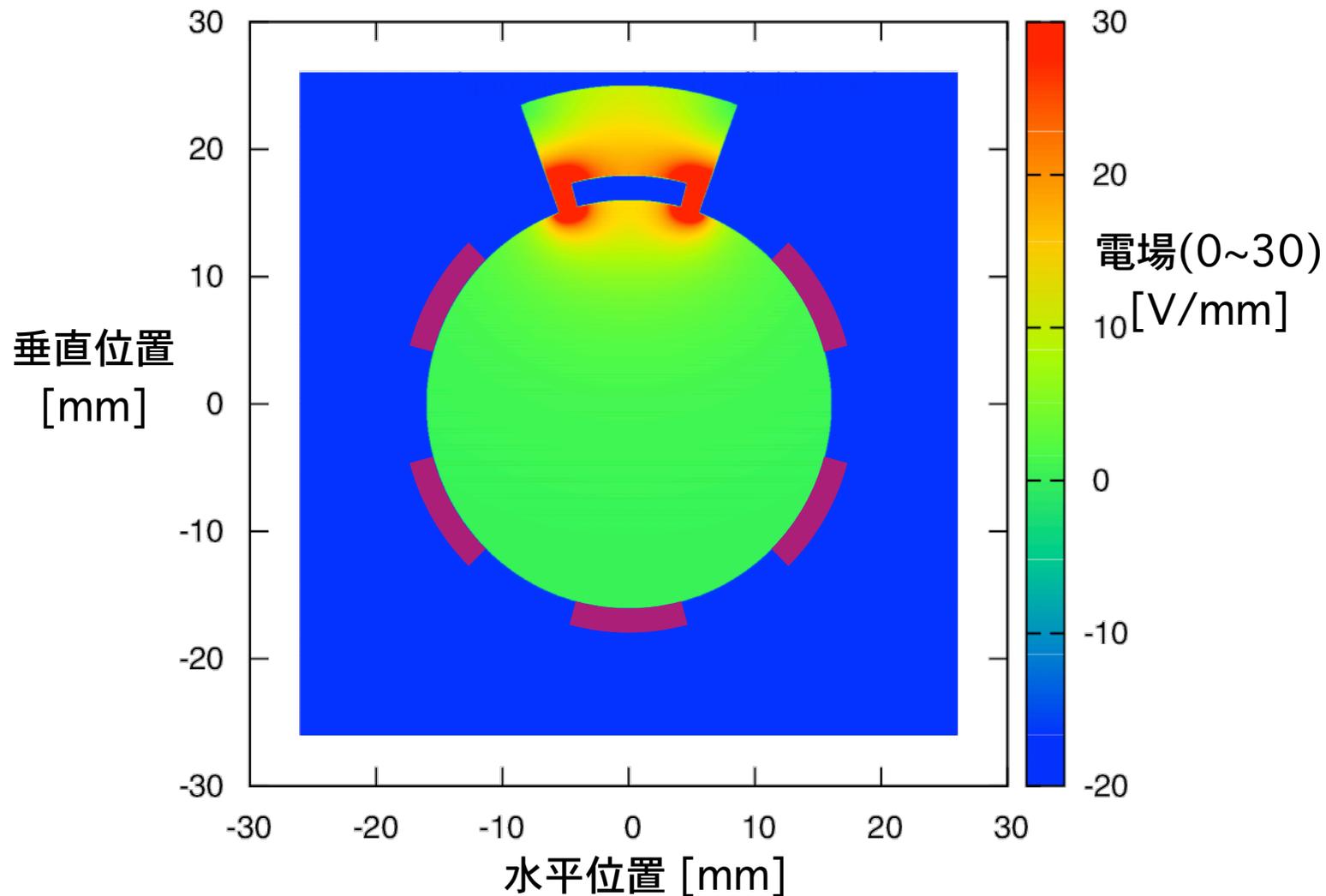
$$1.7 \text{ [V]} \times 140 \text{ [ps]} \times 10^{\frac{7.4}{20}} = 558 \text{ [pV} \cdot \text{s]}$$

ピーク電圧      FWHM      減衰補正

とほぼ一致する。

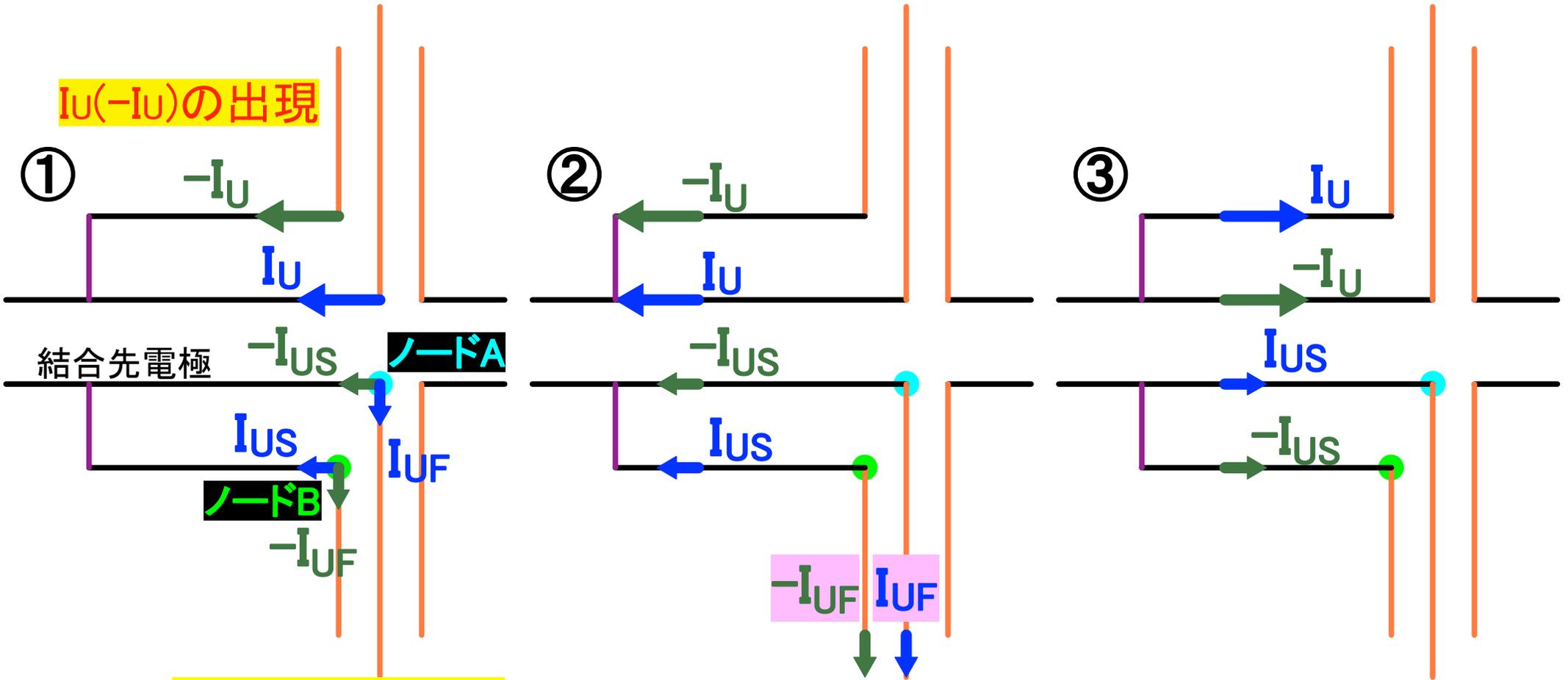
## ● 隣の電極との結合に就いて

- ストリップライン電極に信号電流 $I_s$ が流れた場合、電極(内部導体)とダクト(外部導体)との間に電位差 $I_s Z$ が生じている。この電位差が作る電場により、隣の電極に影響を与える(結合=カップリング)。
- 電場分布から電圧振幅で1%程度の結合はありそう。



# ● 隣の電極との結合に就いて(模式図を使用した解析)

- 結合元電極に現れた電流を $I_U(-I_U)$ とする。  
 $I_U(-I_U)$ の出現により各ノードから  
 フィードスルー方向へ流れる電流 $I_{UF}(-I_{UF})$ 、  
 ストリップライン方向へ流れる電流 $-I_{US}(I_{US})$ が生成される。



$I_U(-I_U)$ の出現

①

②

③

結合先電極

ノードA

ノードB

ノキルヒホッフの法則

ノード入電流    ノード出電流

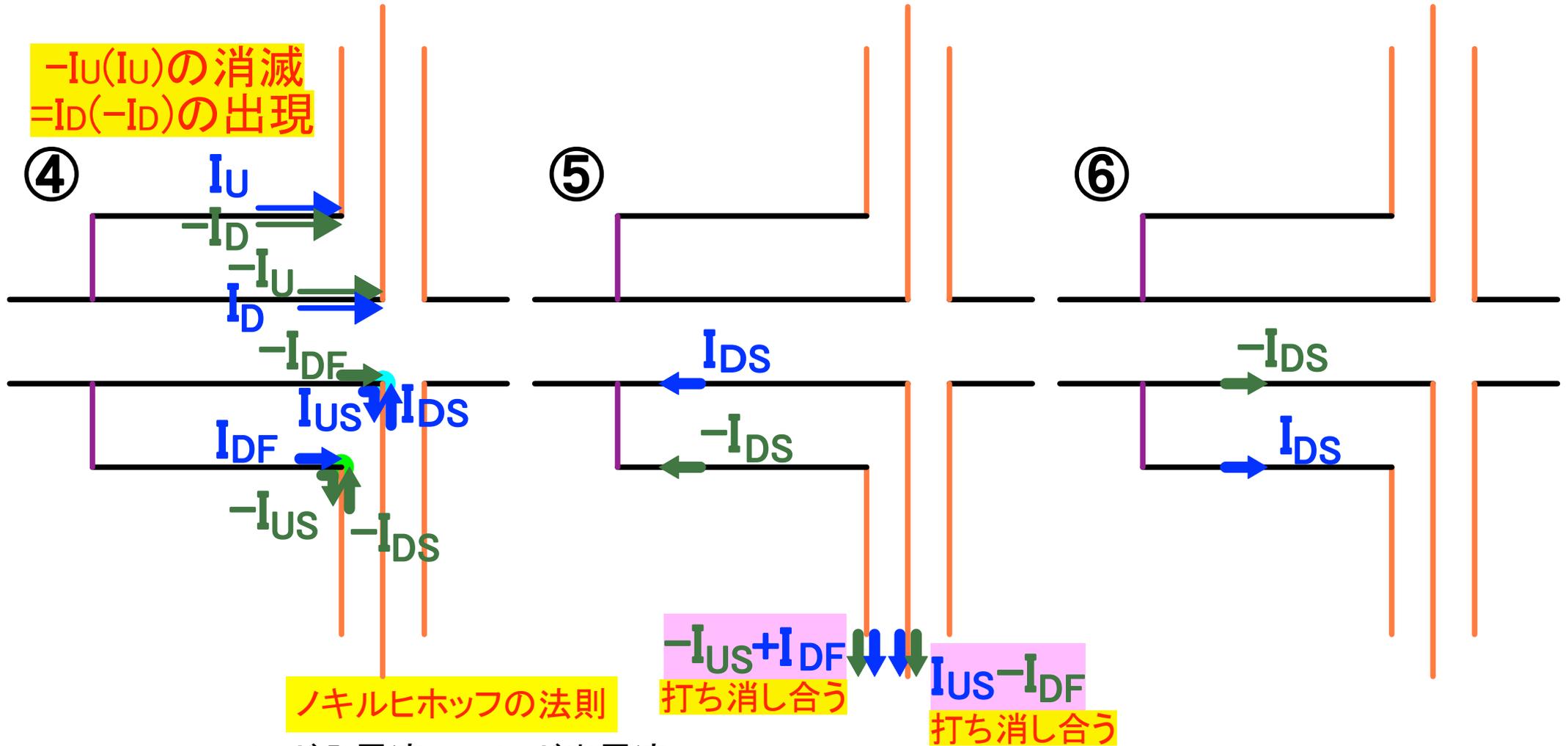
ノードA       $0 = -I_{US} + I_{UF}$

ノードB       $0 = I_{US} - I_{UF}$

# ●隣の電極との結合に就いて(模式図を使用した解析)

結合元電極に於いて、 $-I_U$  ( $I_U$ ) が消滅する時は、  
 電流  $I_D$  ( $-I_D$ ) が現れて互いに打ち消し合うと考える。  
 $I_D$  ( $-I_D$ ) の出現により各ノードからフィードスルー方向へ流れる電流  $-I_{DF}$  ( $I_{DF}$ )、  
 ストリップライン方向へ流れる電流を  $I_{DS}$  ( $-I_{DS}$ ) が生成される。

→ 正電荷の流れ  
→ 負電荷の流れ



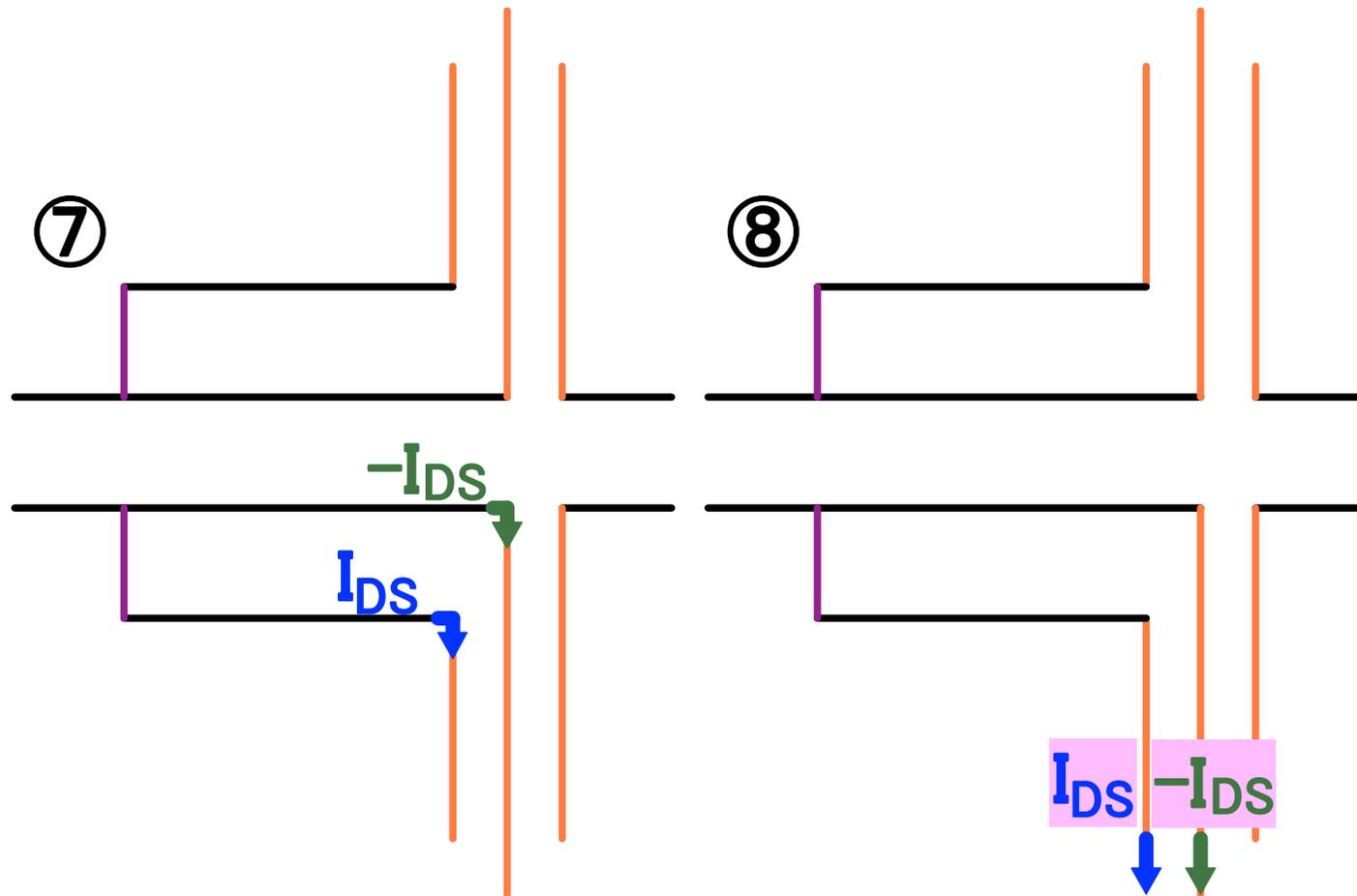
ノード入電流    ノード出電流

**ノードA**  $I_{US} - I_{DF} + I_{DS} = I_{US}$

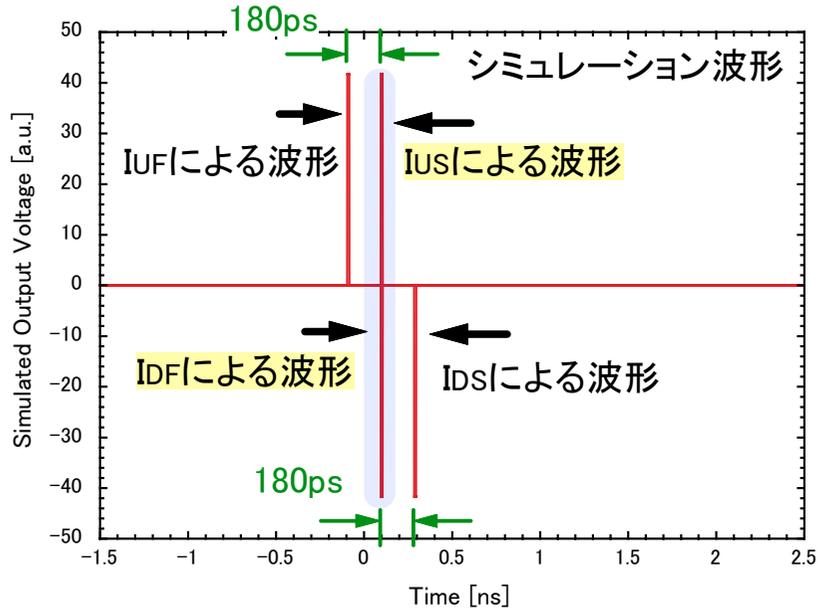
**ノードB**  $-I_{US} + I_{DF} - I_{DS} = -I_{US}$

● 隣の電極との結合に就いて（模式図を使用した解析）

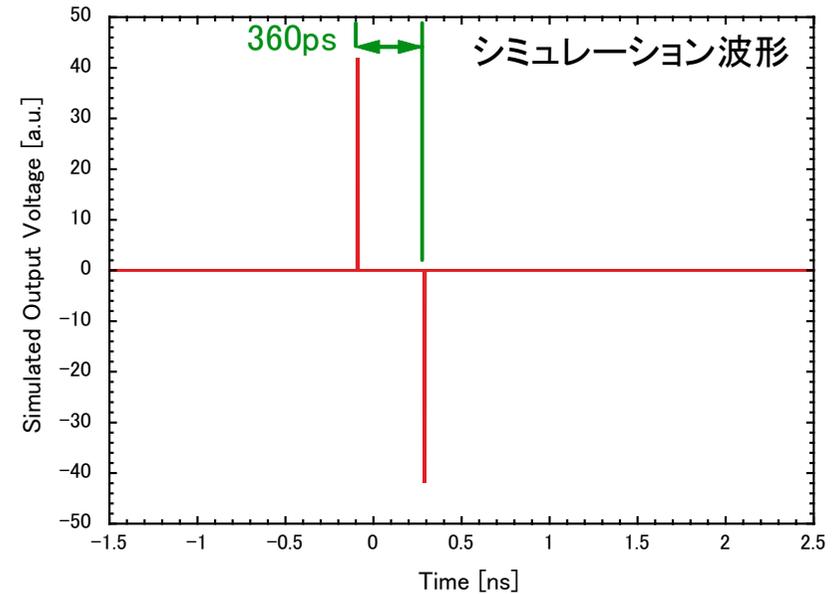
→ 正電荷の流れ  
→ 負電荷の流れ



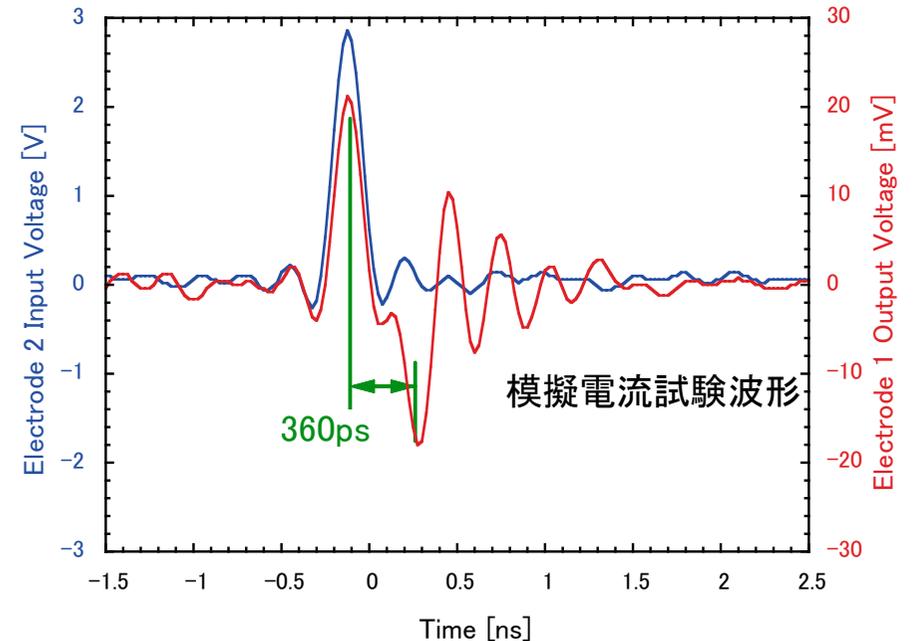
# ●隣のエー電極との結合に就いて (電極出力のシミュレーションと模擬電流試験)



$$I_{US} = I_{DF} \Rightarrow$$



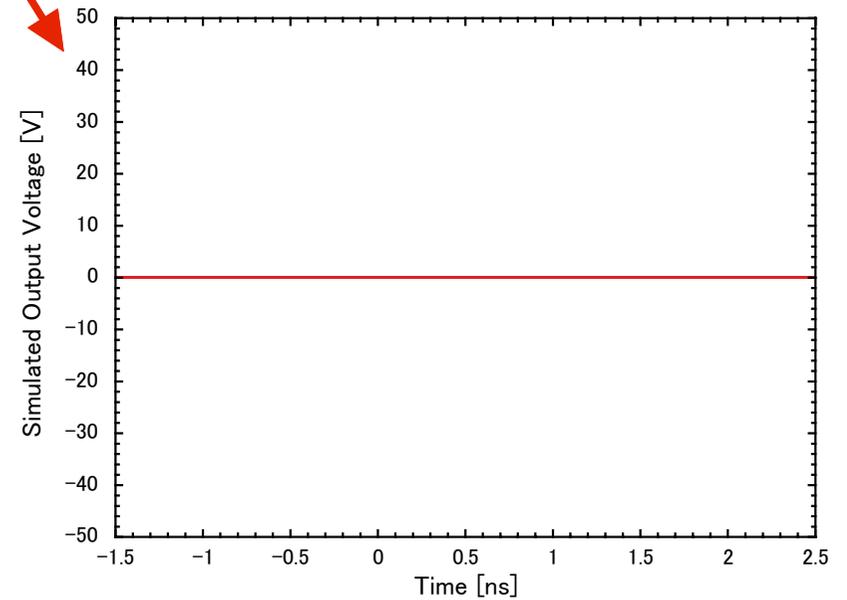
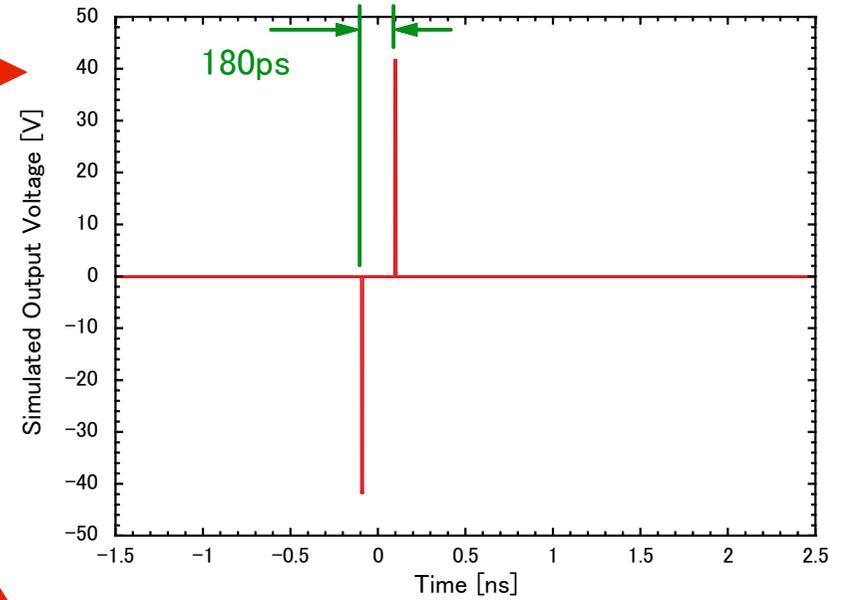
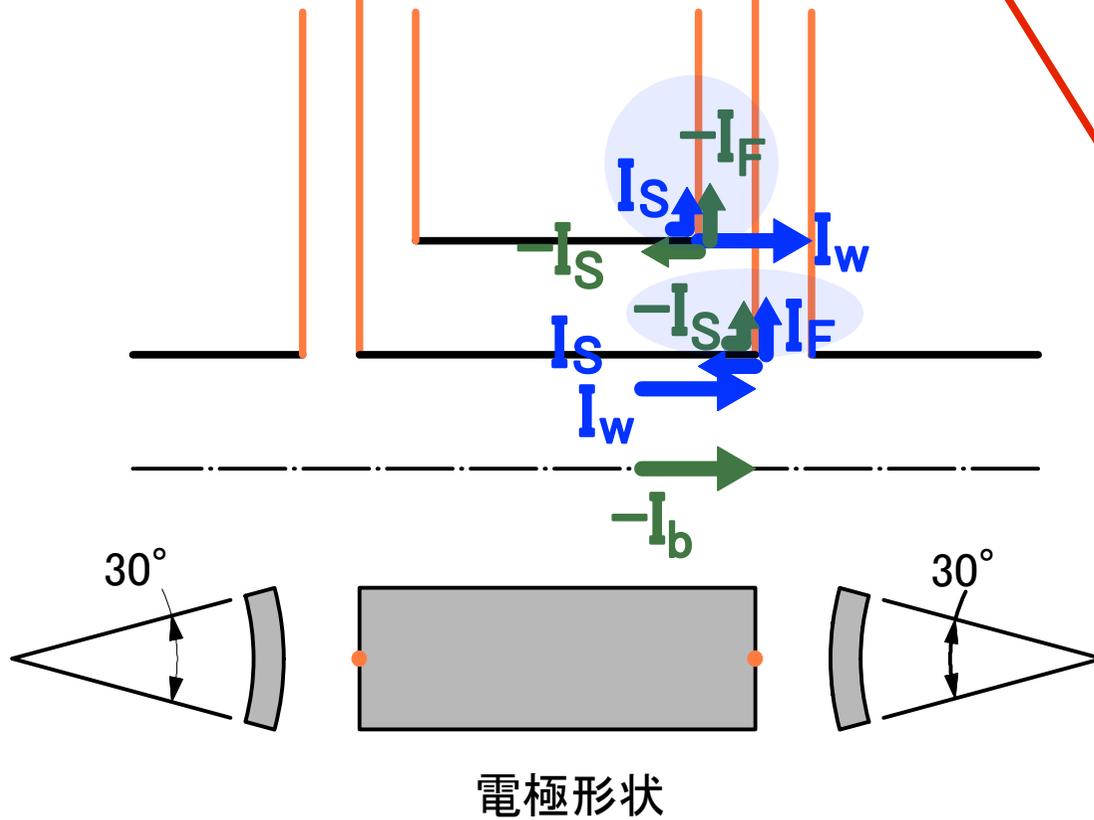
- 結合元電極へ模擬電流を流すことにより、結合先電極から出力される波形を確認した。
  - ・SPring-8線型加速器六電極ストリップラインモニタの電極2フィードスルーからパルス電圧を入力し、隣の電極1出力電圧を観測した。
  - ・入力振幅が3V程度に対し、出力振幅は20mV程度で、電圧の結合度は約0.7%である。
  - ・但し、信号の中心周波数は1.4GHz程度なので、2.856GHzのバンドパスフィルタで排除出来る。



# ● 応用編 (上下流にフィードスルーがあるストリップラインの場合)

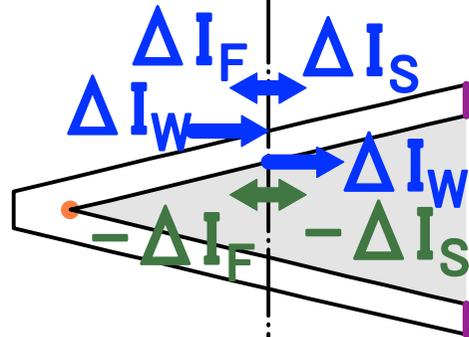
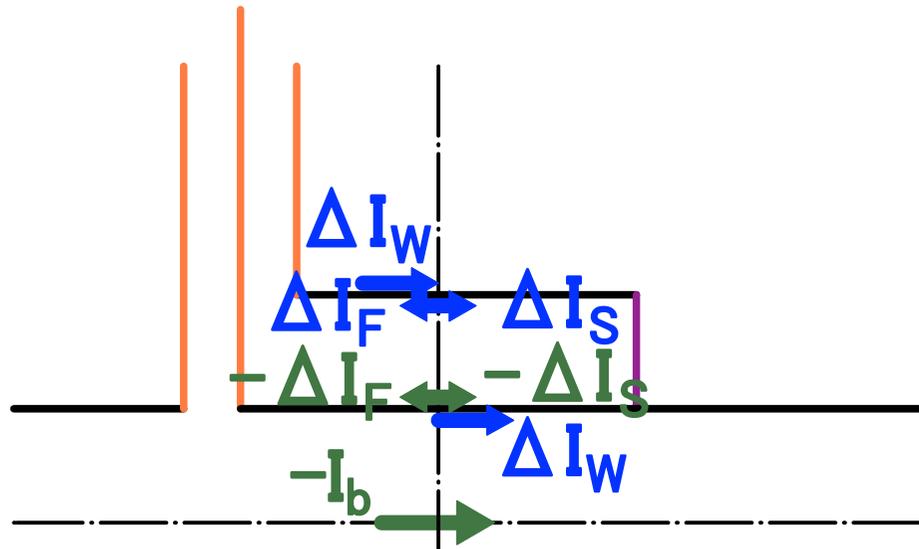
上流側電極出力電圧

下流側電極出力電圧

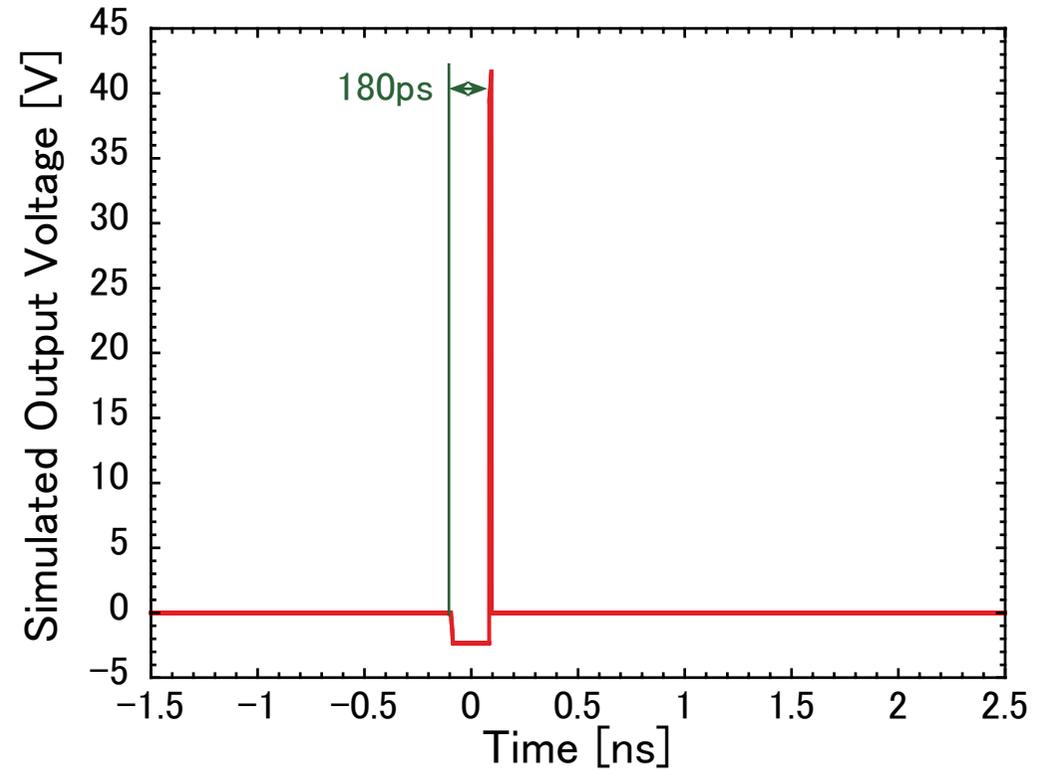


下流側電極からは信号が出力されない(方向性結合)

● 応用編 (テーパ状電極の場合 [連続分布ノード])



電極形状  
 $Z=50[\Omega]$   
 を維持



- $\Delta I_S$  ( $\Delta I_S$ )の成分は時間的  
 (位置的)に積み重なって  
 鋭いピークを持つ波形となるが、  
 $-\Delta I_F$  ( $\Delta I_F$ )の成分は  
 時間的に180 ps程度の  
 広い幅を持った波形となる。  
 但し、ストリップラインでの伝播遅延  
 (片方向で約3 ps)は無視した。

## ●まとめ

- 特性インピーダンス $50\ \Omega$ のSPring-8線型加速器ストリップラインモニタの出力波形を壁電流とキルヒホッフの法則を用いて解析した。
- パルス幅 $10\text{ps}$ のバンチを仮定した場合
  - ・フィードスルーが上流にある場合、負電圧と正電圧の双極のパルス出力
  - ・フィードスルーが下流にある場合、正電圧と負電圧の双極のパルス出力が得られる。パルス間隔は $180\text{ps}$ で、振幅は $4.17\ [\Omega] \times \text{ビーム電流 [A]}$ である。
- 電極内を往復する電流が隣電極に与える影響(結合)解析した。
  - 電極に正電流が発生した場合
  - 結合先電極から正電圧と負電圧の双極のパルス出力が得られる。
  - パルス間隔は $360\text{ps}$ で、模擬電流試験で電圧結合度は $0.7\%$ 程度が得られた。
- 信号取り出しフィードスルーが上流及び下流側双方にある場合
  - 上流側のみ出力があり、下流側には出力は無い(方向性結合)
- 電極形状がテーパ状(下流側が広い)の場合
  - 負電圧パルスは $180\text{ps}$ と時間幅が広く
  - 正電圧パルスは元々の $10\text{ps}$ 程度の時間幅を保つ(非対称出力)