

KEK B-factory のアップグレード における IR loss factor の シミュレーション研究

東北大 中野浩至

山本均, 阿部哲郎, 宇野彰二, 金澤健一, 柴田恭, 幅淳二,
岩崎昌子, Clement Ng, 他Belle MDI Group

発表内容

- ・IRの発熱計算の結果
- ・Nano beam optionにおける
IR周辺の発熱計算の結果

KEK B-factory

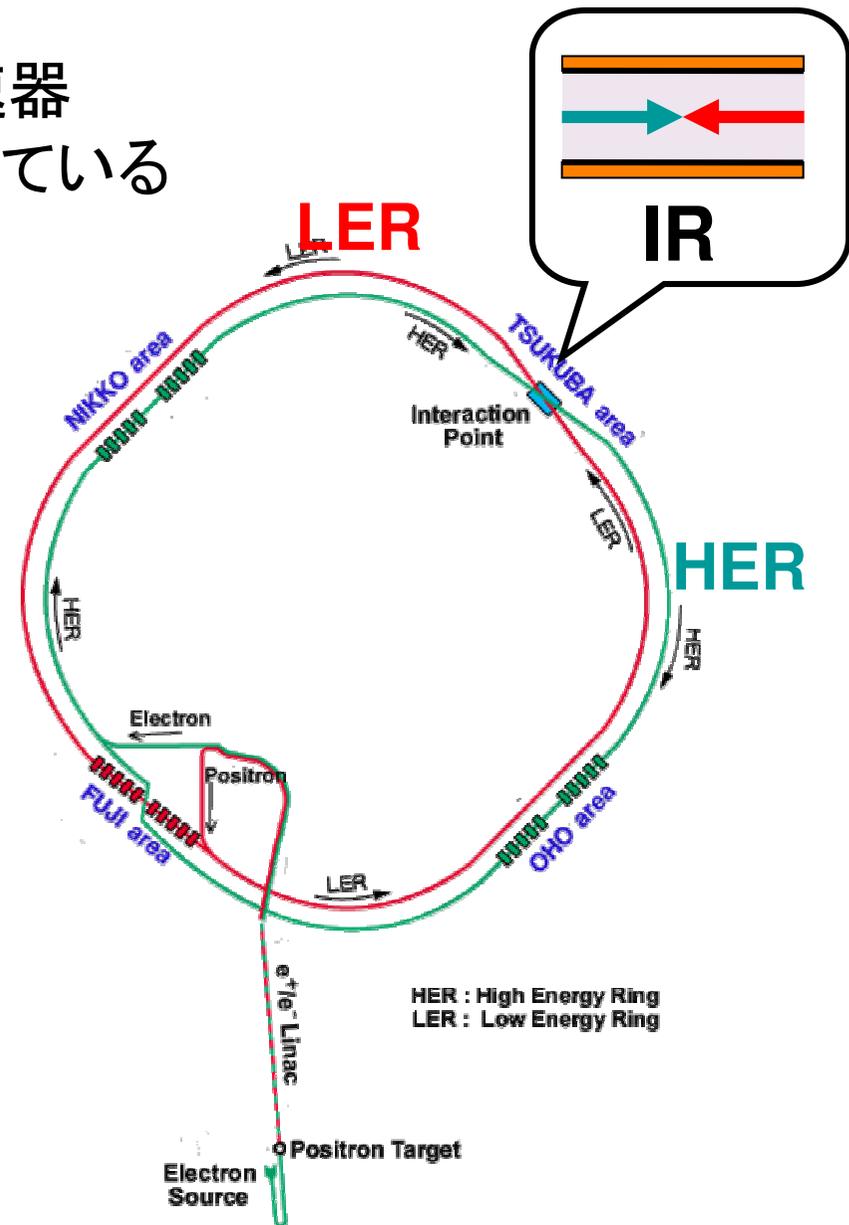
- ・電子、陽電子衝突型の円形加速器
- ・ルミノシティの高さが非常に優れている



高ルミノシティによる、
標準理論を超える物理の探索



さらにKEKBのルミノシティ
を上げる計画がある！

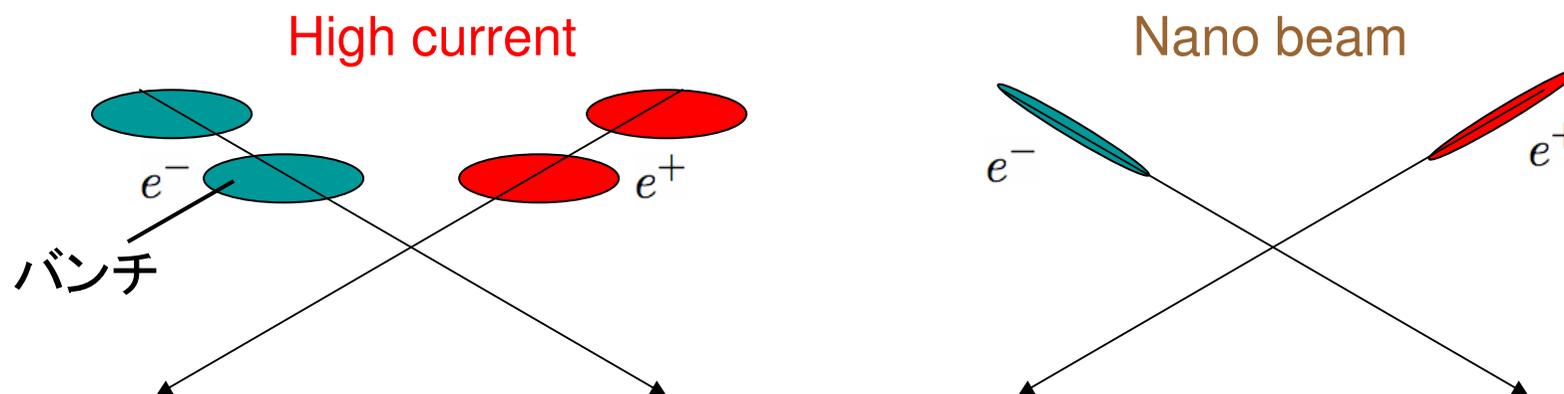


アップグレードのオプション

ルミノシティを上げる、2種類のオプション

	現在(設計値)	High current (電流を上げる)	Nano beam (ビームを絞る)
$I(A)$	2.6 / 1.1	9.4 / 4.1	3.7 / 2.1
σ_x^* (μm)	44	69 / 60	5.9
σ_y^* (μm)	1.1	0.85 / 0.73	0.034 / 0.044
L ($cm^{-2}s^{-1}$)	1×10^{34}	5.3×10^{35}	10×10^{35}

*LER/HER



ビームパイプの発熱増加 → 見積もりが必要

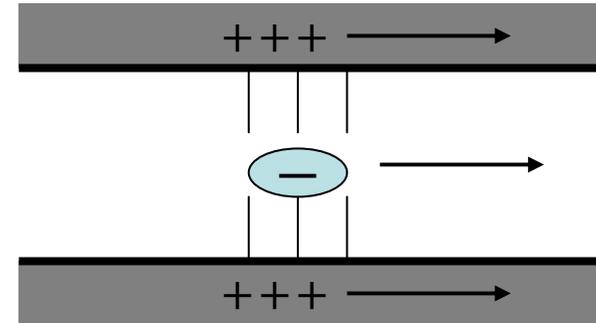
ビームパイプの発熱

発熱の原因には3種類ある

- 1、バンチ通過の際、パイプ表面の電荷が引きずられることによる発熱

Image current

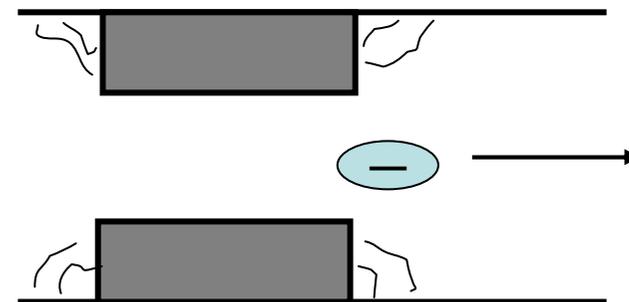
公式を用いた



- 2、パイプの形状により電磁場が乱れ発生する熱

HOM (High Order Mode)

シミュレーションで計算した



- 3、シンクロトロン放射による熱

Image currentの計算方法

発熱の公式を用いた

※Gaussian bunch を仮定

$$\frac{\Gamma(\frac{3}{4})c}{4\pi^2 b \sigma_z^{3/2}} \left(\frac{Z_0}{2\sigma_c}\right)^{1/2} \frac{I^2}{f} \quad [V/C/m]$$

真空のインピーダンス

電流

パイプ内径

バンチ長

伝導率

バンチの交差頻度

HOMの計算方法

ビームのエネルギーロスによる発熱量

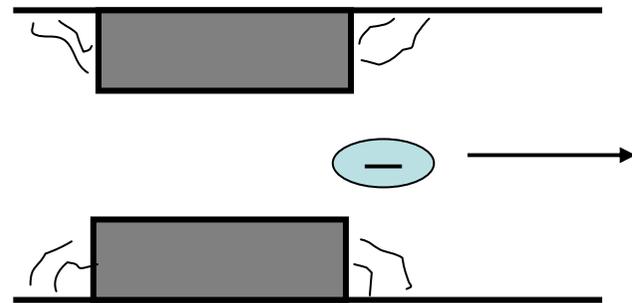
$$Heat[W] = \frac{Loss\ factor[V/C] \times I[A]^2}{f[s^{-1}]}$$

ビーム電流

バンチの交差頻度

3次元電磁場計算コード "GdfidL" を用いて
HOMによる loss factor を計算した(シミュレーション計算)

注意点;
すべてのエネルギーロスが
その場で熱になるわけではない。



IRの発熱の計算結果

下図のようなモデルで発熱を見積もった

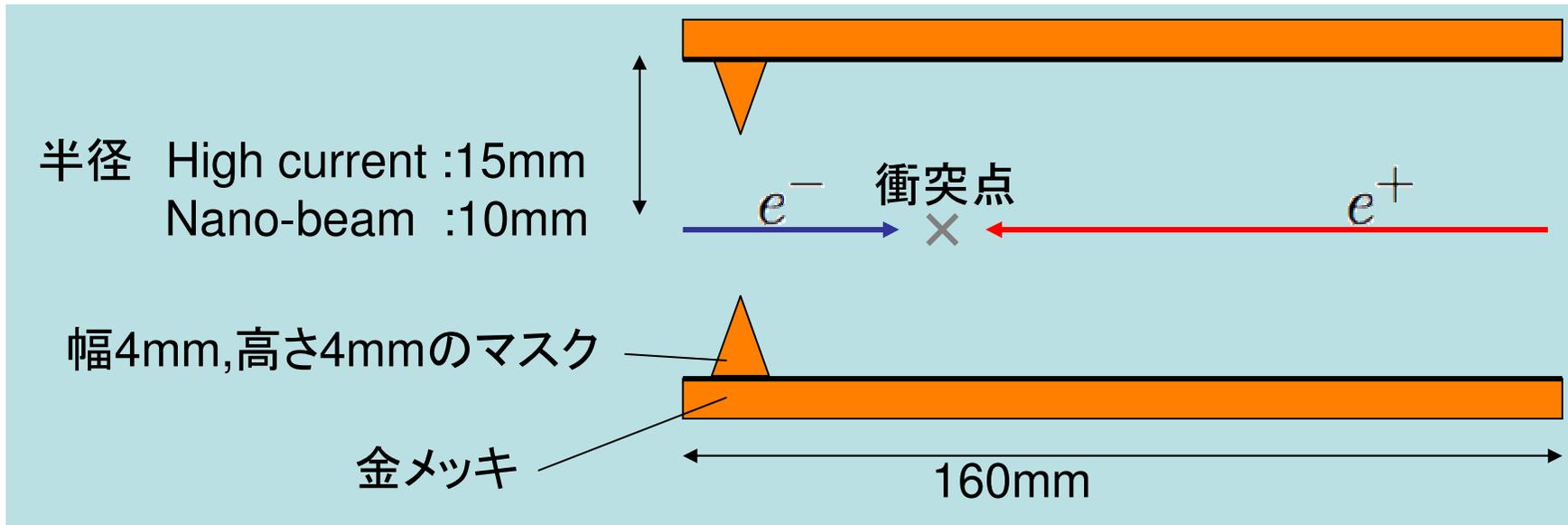


Image current

High current	135W
Nano beam	33W

HOM

High current	17kW
Nano beam	1.1kW

↑これらの熱の一部が IR に落ちる

IR の熱はマスクのHOMが大部分を占めると考えられる

交差部分の発熱の計算結果

Nano beam optionに関してはパイプ交差部分の発熱も見積もった

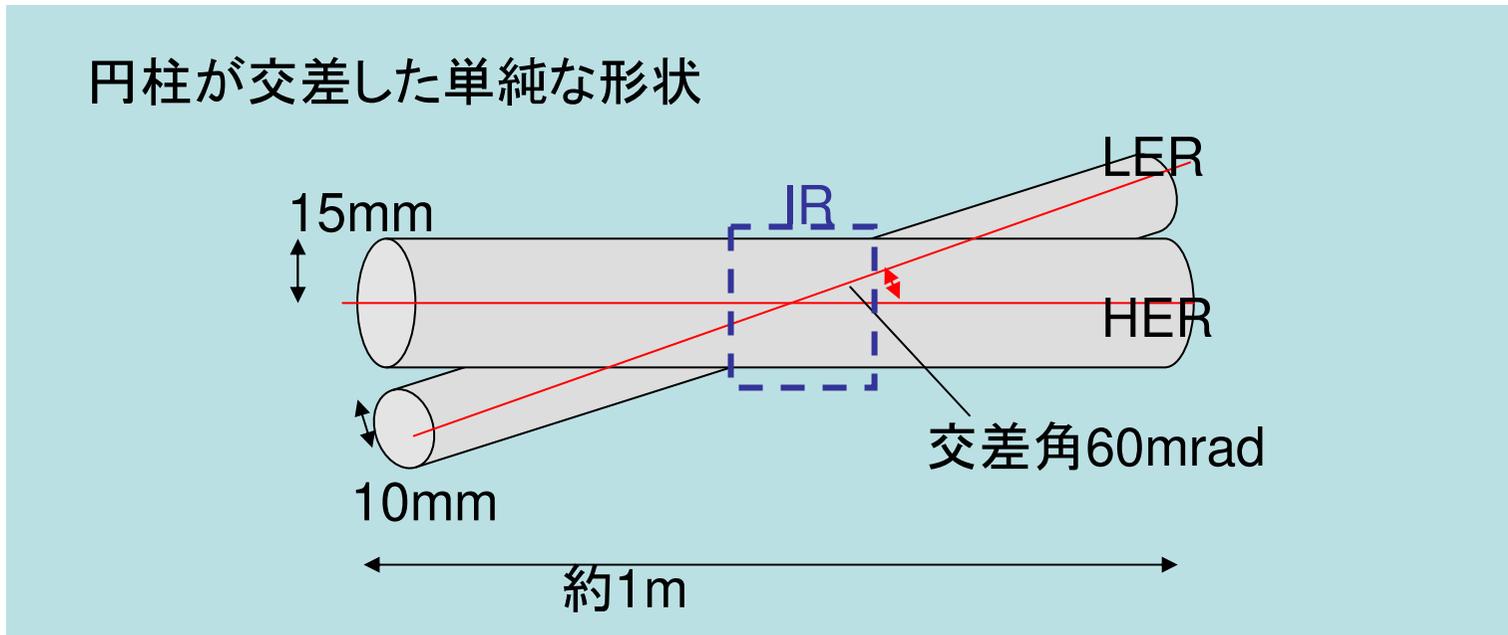
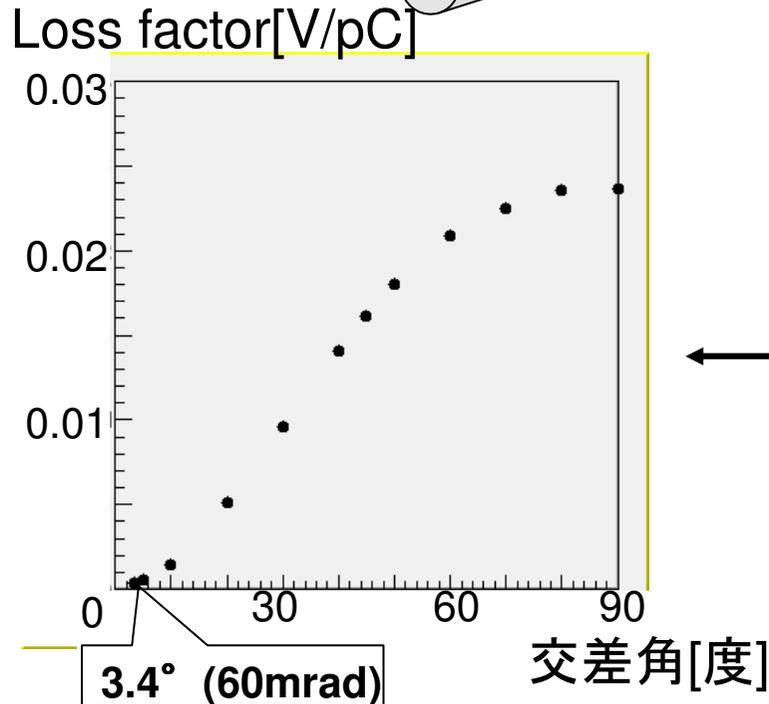
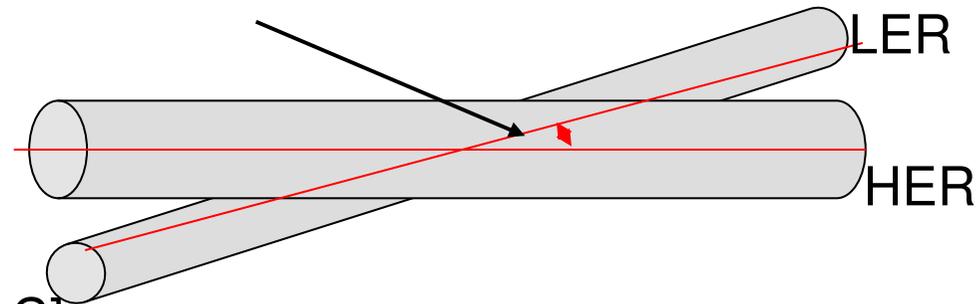


Image current	約180 [W]
HOM	65 [W]

Image currentによる熱 > HOMによる熱

交差角と loss factor の関係

理解を深めるため、交差角を変化させて計算した

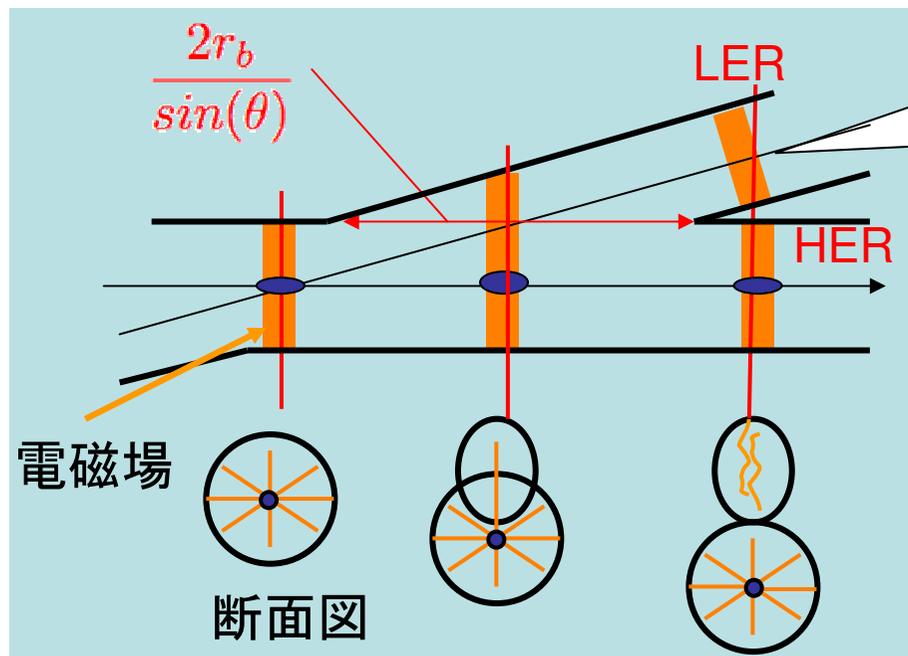


← 交差角を変えた場合の
HERの loss factorの変化

交差角が小さい程、loss factorも小さい

Loss factor変化の説明

交差角が小さくなるとloss factorが小さくなる理由



切り取られて、LER側に行ってしまった電磁場が loss になる



交差角度が小さい程、断面の変化はゆっくり



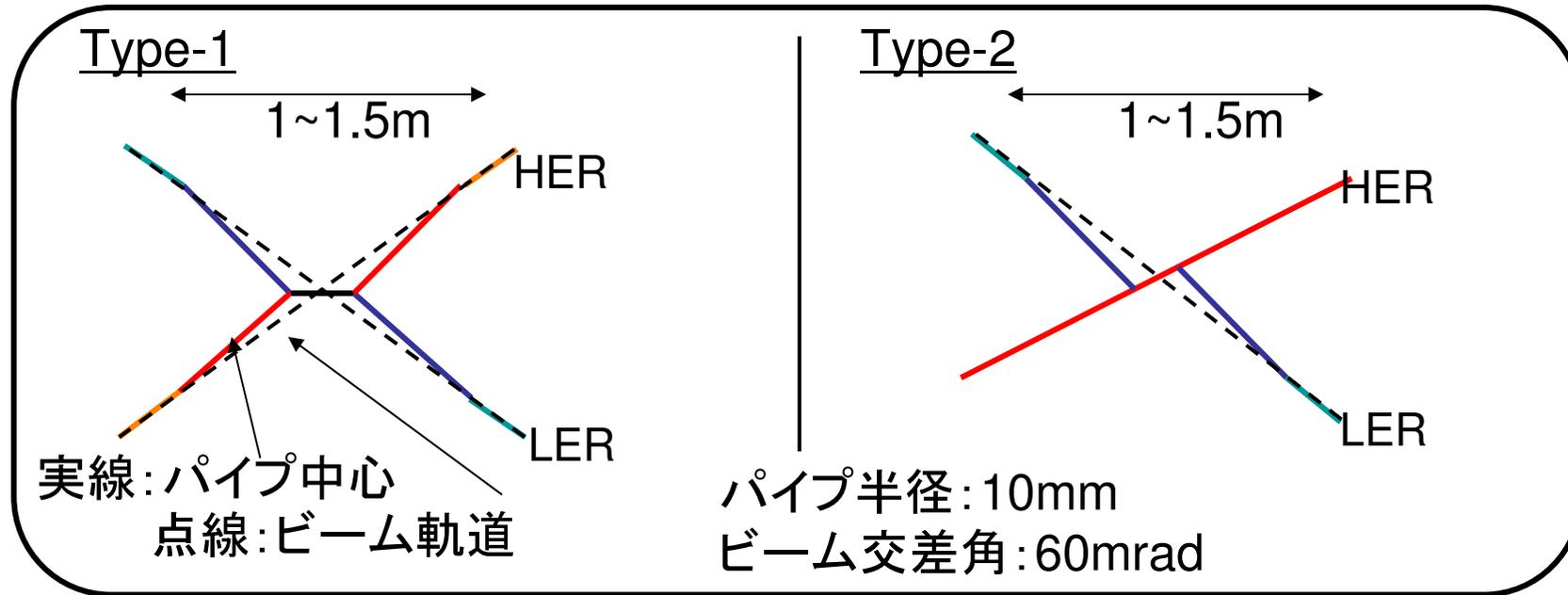
この場合、電磁場はLER側に行かない



交差角が小さいと電磁場がLER側に残らない為、lossが小さい。

その他の形状案

パイプ交差部分の形を少し変えて(さらに2種類)計算した



結果



Type-1		Type-2	
Image current	約200 [W]	Image current	約200 [W]
HOM	約70 [W]	HOM	約120 [W]

先ほどの形と比べても発熱量に大きな差はない。妥当。

Back up

Optionの表

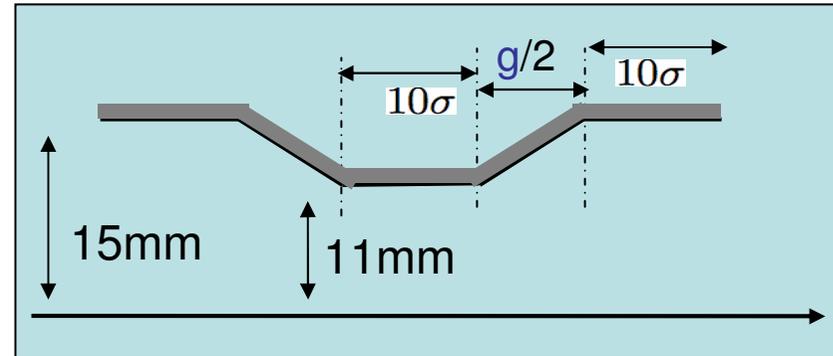
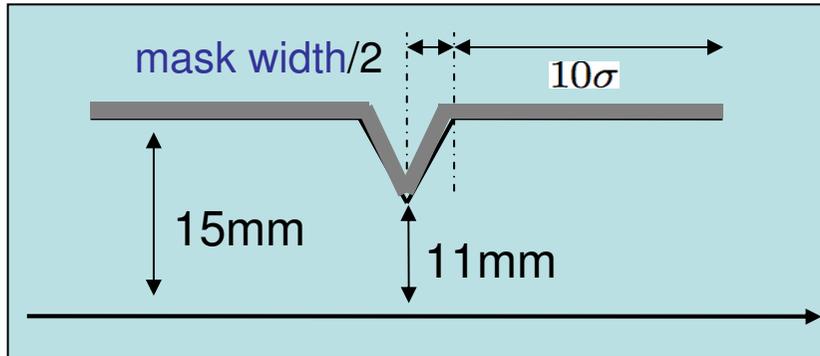
*LER/HER

	現在(設計値)	High current (電流を上げる)	Nano-beam (ビームを絞る)
$I(A)$	2.6 / 1.1	9.4 / 4.1	3.7 / 2.1
σ_x^* (μm)	44	69 / 60	5.9
σ_y^* (μm)	1.1	0.85 / 0.73	0.034 / 0.044
L ($cm^{-2}s^{-1}$)	1×10^{34}	5.3×10^{35}	10×10^{35}
$N_{e\pm}$ (1/bunch)	$3.3 / 1.4 \times 10^{10}$	$12 / 5.25 \times 10^{10}$	$6.78 / 3.89 \times 10^{10}$
$N_{e\pm} \times e(C)$	$5.28 / 2.24 \times 10^{-9}$	$19.2 / 8.4 \times 10^{-9}$	$10.8 / 6.22 \times 10^{-9}$
$\frac{N_{bunch}}{3016(m)} \times c(m/s) \leftarrow f(s^{-1})$	5.0×10^8	5.0×10^8	3.4×10^8
N_{bunch} (1/circle)	5000	5000	3425
σ_z (mm)	4	5 / 3	6

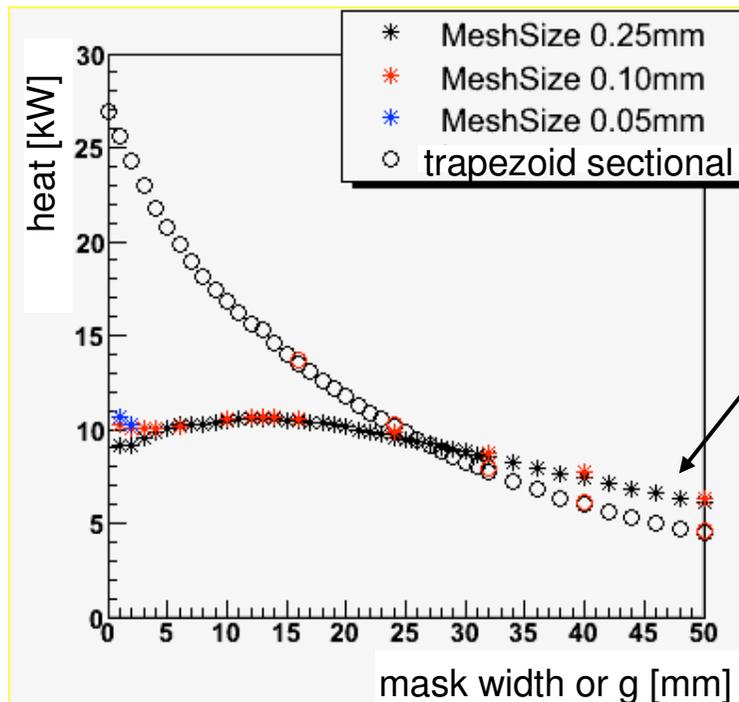
マスク幅を変えた

HOM heating of two shapes was compared.

Two shapes should be similar when **mask width** or value **g** are large.



trapezoid sectional



Each of the results are close for long **mask width** or **g**.

It suggests that this calculation is believable

Image current の計算

概算による確認

① Skin depth を求めた

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}}$$

$$= 4.73 \times 10^{-7} m \quad (< 10\mu m)$$

ω : 振動数

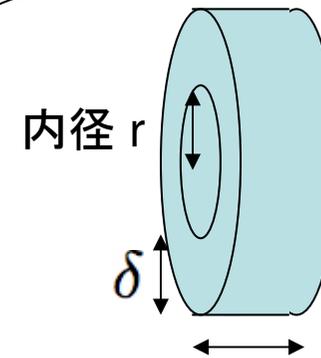
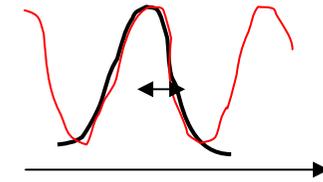
σ : 電気伝導率

μ : 透磁率

② バンチの電荷をQとし、簡単のためパイプ表面に-Qの電荷が図のように密度 ρ で一様に分布すると考えて計算した

振動数は、1/4 波長とバンチ長が等しいと仮定して求めた。

$$\omega = \frac{\pi c}{2\sigma_z}$$



バンチ長 $2\sigma_z$

$$\rho = \frac{Q}{4\pi r \delta \sigma_z} \quad (\delta \ll r)$$

high current 30mm、nano beam 20mm

厚さ $10\mu m$ の Au

伝導率 $\sigma_c = 4.52 \times 10^7 [1/\Omega m]$

透磁率 $\mu \simeq \mu_0 = 1.26 \times 10^{-6} [H m^{-1}]$

幅4mm、高さ4mm
のマスク

衝突点付近 (IR)

③微小体積あたりに生じる熱 dP は

$$dP = \frac{j^2}{\sigma} dV \quad j: \text{電流密度} \quad j = \rho c$$

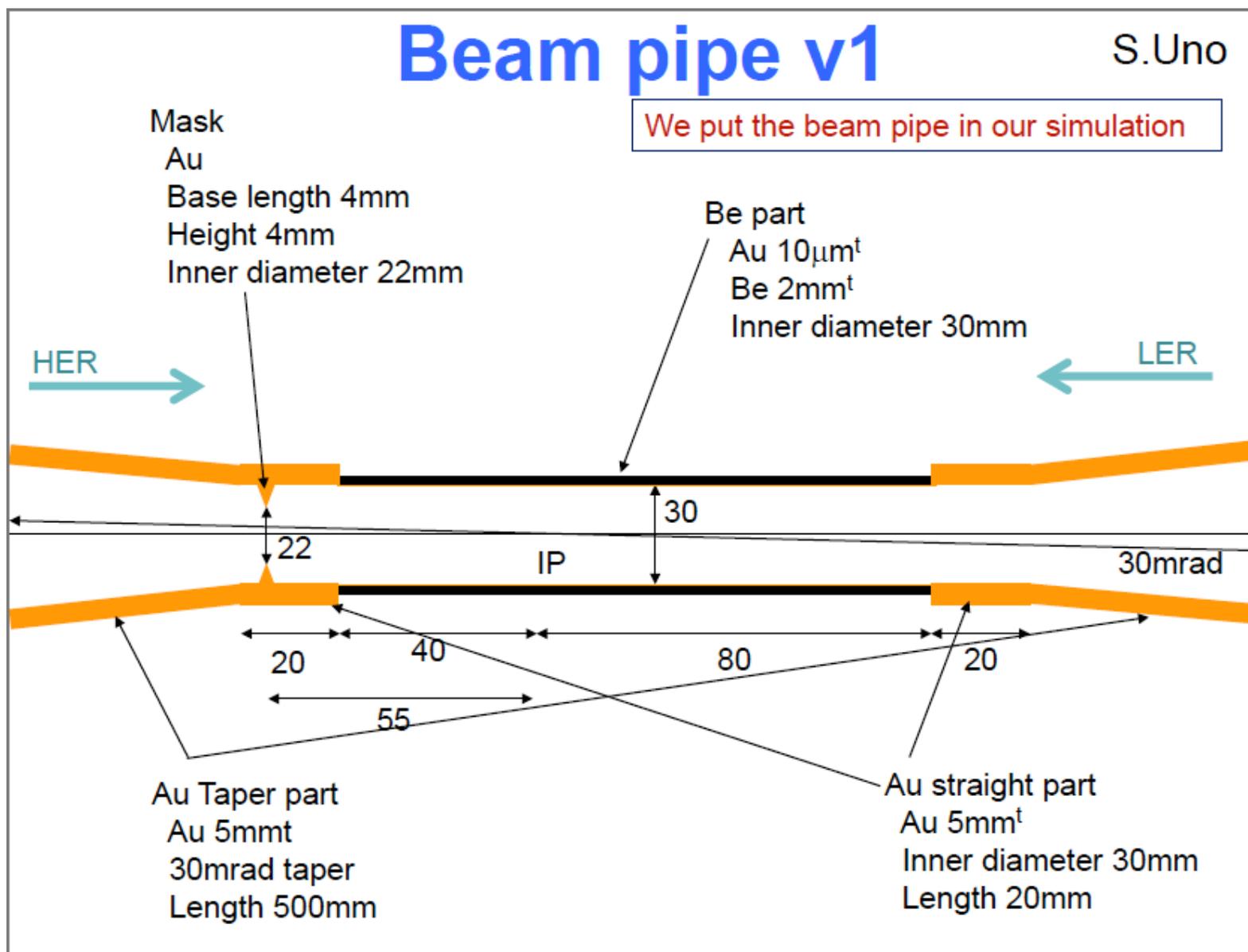
したがって、単位長さあたりに生じる熱 P/l は

$$P/l = \frac{Q^2 c}{4\pi r \delta \sigma \sigma_z} \quad (J/bunch)$$

値を代入し、1秒間に通過するバンチ数
 $4.99 \times 10^8 (bunchs/s)$ を掛けるとそれぞれ

710W(LER)
130W(HER) が得られた

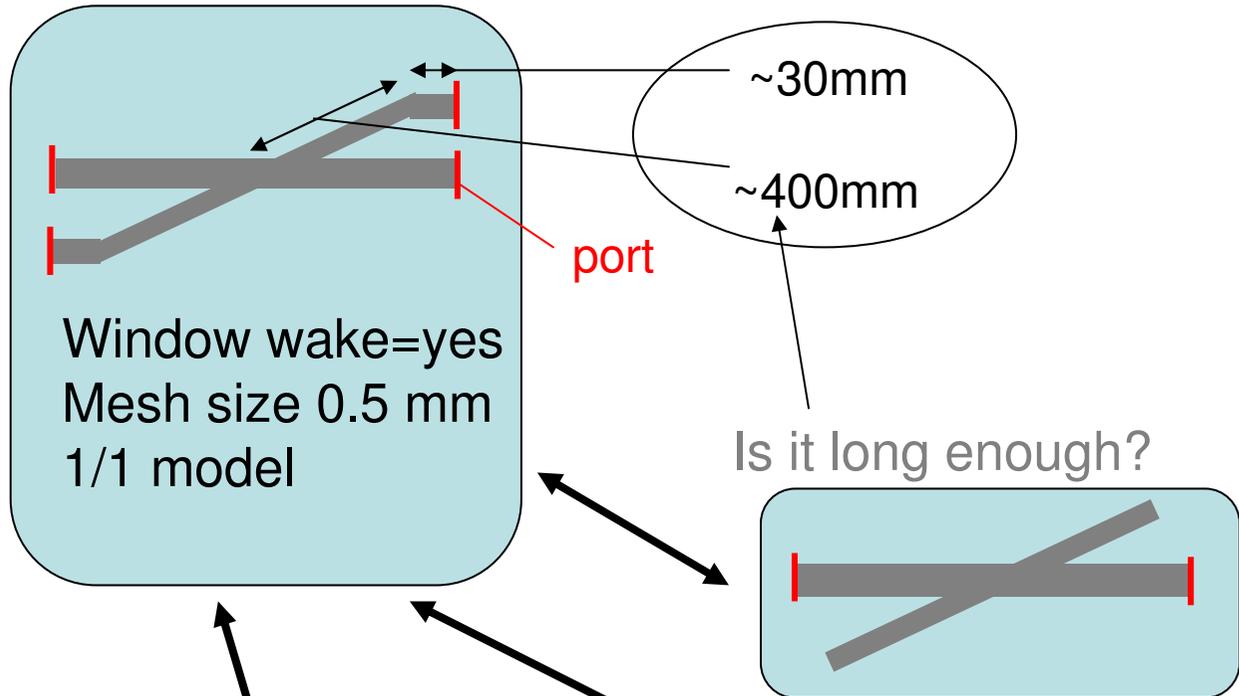
IRビームパイプデザイン



IR周辺の計算方法

Compare 6 ways of results

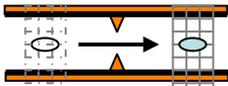
Calculated with GdfidL



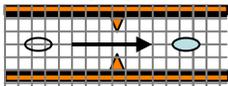
Is it long enough?

Window wake=no

*Window wake
=Yes: use bunch-fixed grid



=No: use pipe-fixed grid



Mesh size 0.3mm

Mesh size 1mm

Are mesh sizes good?

1/2 model

Calculated in various crossing angles

式

$$L = \frac{N_+ N_- f}{4\pi \sigma_x^* \sigma_y^*} R_L$$

バンチあたりの粒子数 : N
バンチの交差頻度 : f

$$\text{電流 } I = eNf$$
$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ (C)}$$

衝突点でのビームサイズ : σ^*

$$\text{Heat [W]} = \frac{\text{Loss factor [V/C]} \times I [\text{A}]^2}{f [\text{s}^{-1}]}$$

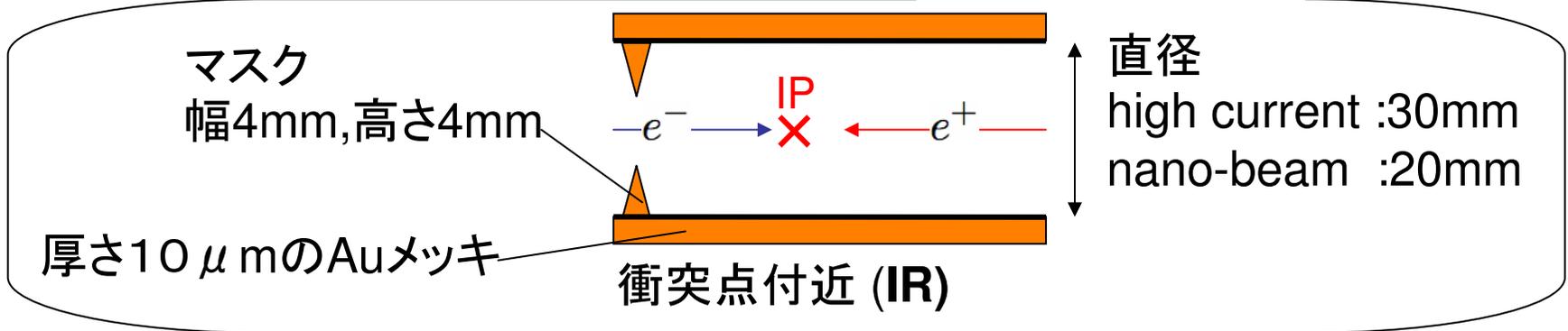
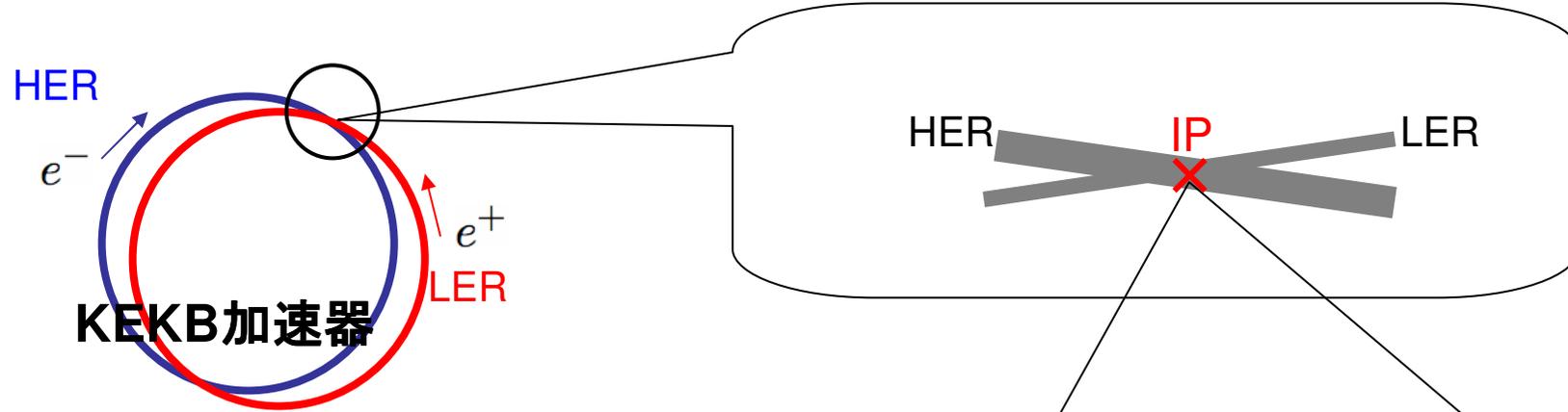
ビーム電流

バンチの交差頻度

HOM lossによって生じる熱。

一部がその場で熱に変わり、残りは他の場所で熱になる。

パイプ

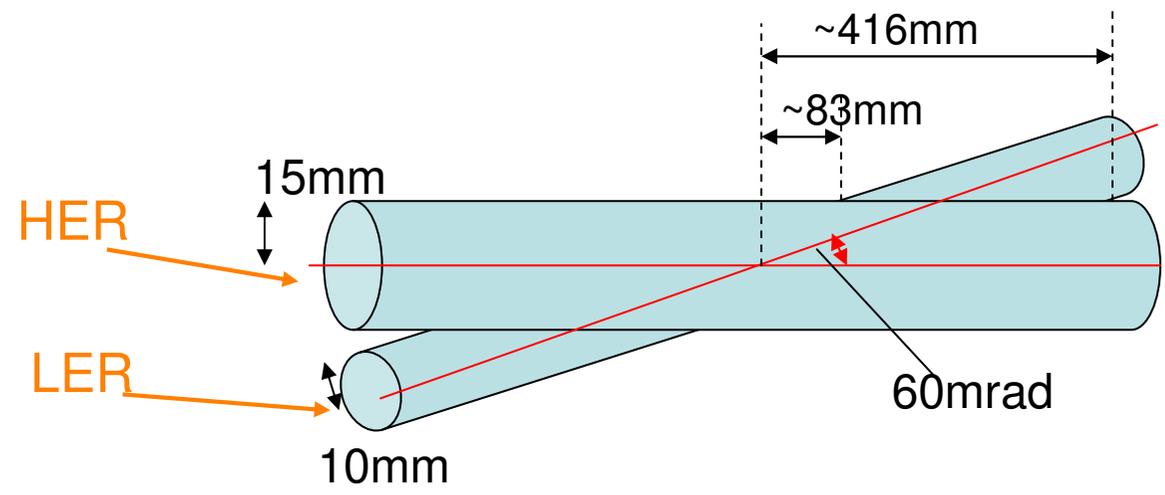


- ① IR部分のimage currentの熱
- ② マスクのHOMの熱
- ③ Nano-beam optionにおけるIR付近のビームパイプのいくつかのモデルのHOMの熱

公式を用いた

シミュレーション

交差パイプの詳細



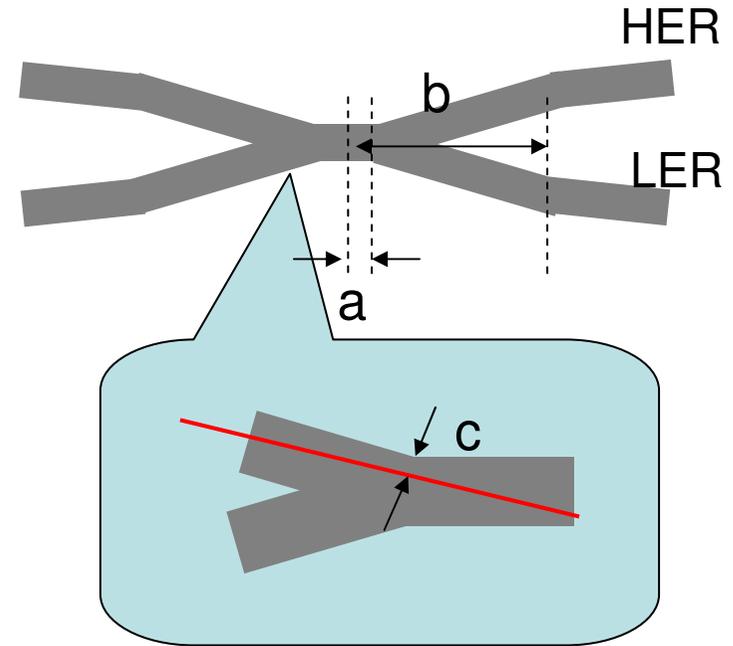
Type-1

a	b	c	Beam energy loss[W]
100	480	7.0	36
100	580	7.0	35
100	680	7.0	41
150	480	5.5	44
150	580	5.5	48
150	680	5.5	44



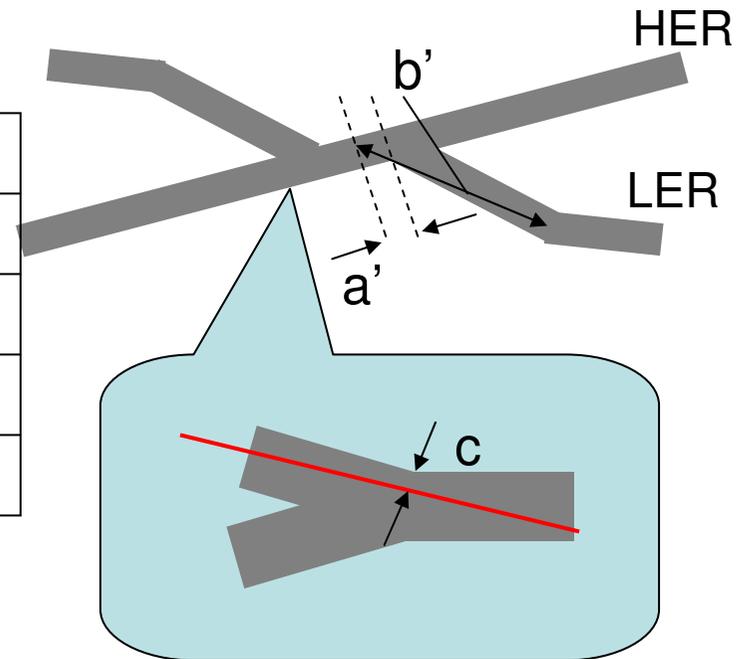
より細かいメッシュで確認

64W



Type-2

a'	b'	c	Beam energy loss[W]
86	480	7.3	117
165	480	5.0	116
84	680	7.5	120
165	680	5.0	116



より細かいメッシュで確認

124W

Type-1,2ともに発熱が小さいのは交差角が小さいから。

HOMの計算方法

シミュレーションについて

3次元電磁場計算コード "GdfidL" を使用。
Loss factor を計算することができる。

$$Heat[W] = \frac{Loss\ factor[V/C] \times I[A]^2}{f[s^{-1}]}$$

ビーム電流

バンチの交差頻度

ビームのエネルギーロス → **発熱**
ただし、すべてのエネルギーがその場で熱になるわけではない。

ビームによるHOM → パイプ内の発熱
||
ビームのエネルギー

- ・その場で熱になる。
- 又は
- ・他の場所で熱になる。

今回はビームパイプを完全導体と仮定して計算した。

シミュレーションについて

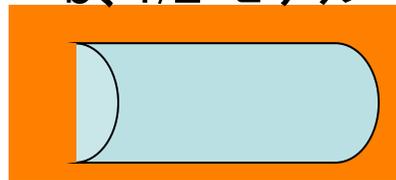
「メッシュサイズ」をより細かくとるほど現実の値に近づく。

さらに結果の信頼性を確かめるため、
1つの形状にたいして様々な計算方法を用いて確認した。

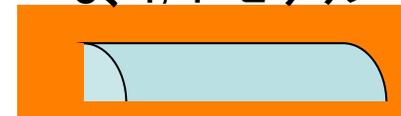
a、1/1 モデル



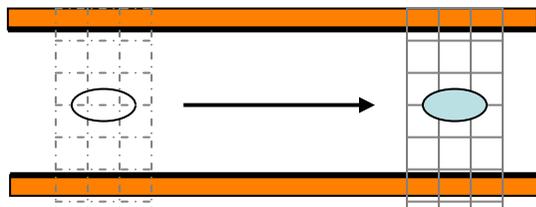
b、1/2 モデル



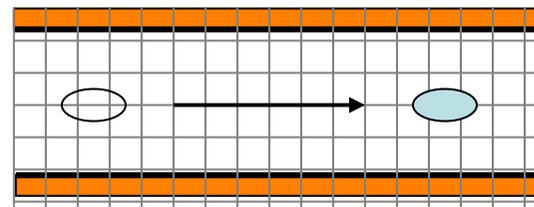
c、1/4 モデル



1. メッシュをバンチに固定



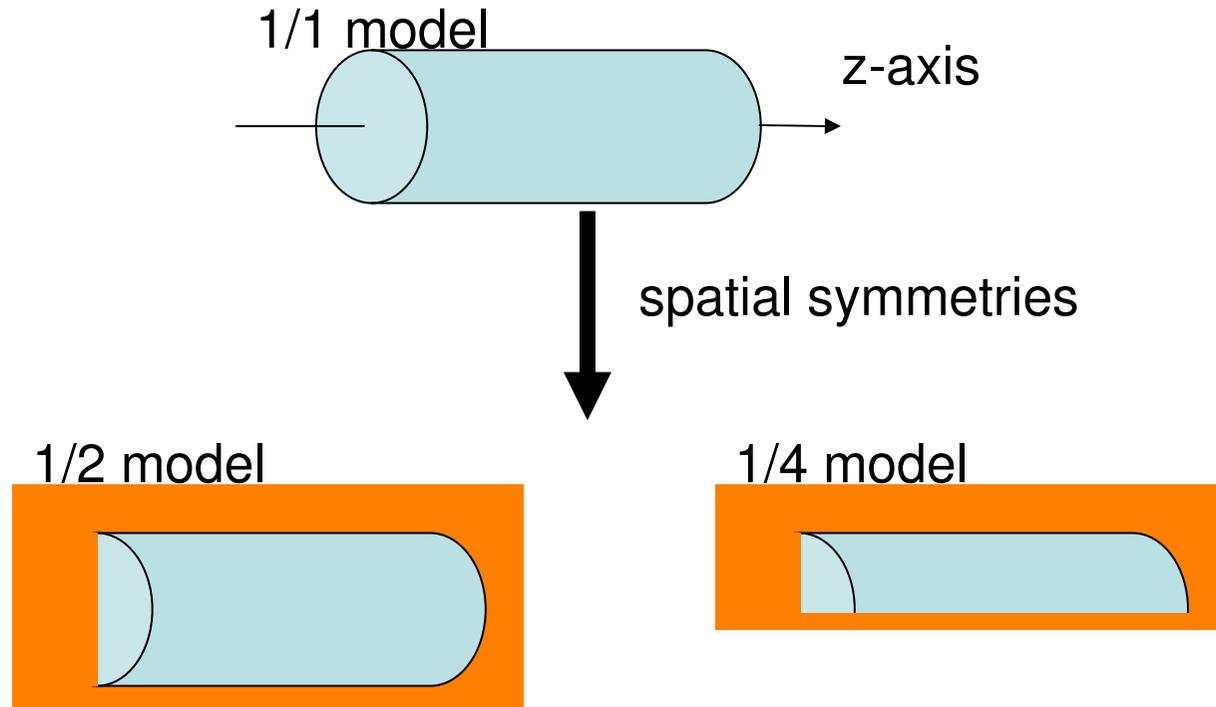
2. メッシュをビームパイプに固定



Segmentation of calculation area

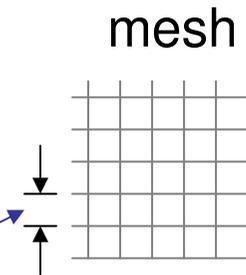
The calculation time can be reduced by considering the spatial symmetries.

Software:GdfidL(3D Electric Magnetic field simulator)



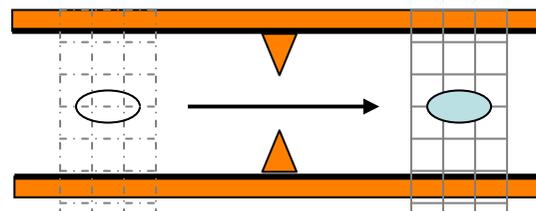
How to grid the space

The space is divided into the fine grids to carry out numerical calculation.
The length of the grid is called **mesh size**.



There are two calculation methods.

1. fixing the grid to a bunch
(**window wake = yes**)



2. fixing the grid to beam pipe
(**window wake = no**)

