

SuperKEKB用Low-Z
コリメータヘッドの開発
**DEVELOPMENT OF LOW-Z
COLLIMATOR FOR SUPERKEKB**

照井真司, 石橋拓弥, 阿部哲郎, 船越義裕

KEK

項目

- はじめに
- コリメータ損傷
 - コリメータの原因
 - コリメータ損傷の影響
 - 機器保護するコリメータ
- **Low-Zコリメータについて**
 - 材料の選択
 - コリメータヘッドの構造について
 - スキャッタリングされた粒子のビームトラッキング
 - ダスト
 - ビームインピーダンス
 - カーボンの高周波領域の抵抗
- まとめと今後の試験

はじめに

SuperKEKB：高ルミノシティ電子・陽電子衝突型加速器

SuperKEKBプロジェクトの目的：
ルミノシティをKEKBの達成値の約40倍 ($8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) に上げ、標準理論を越えた新しい物理の探索



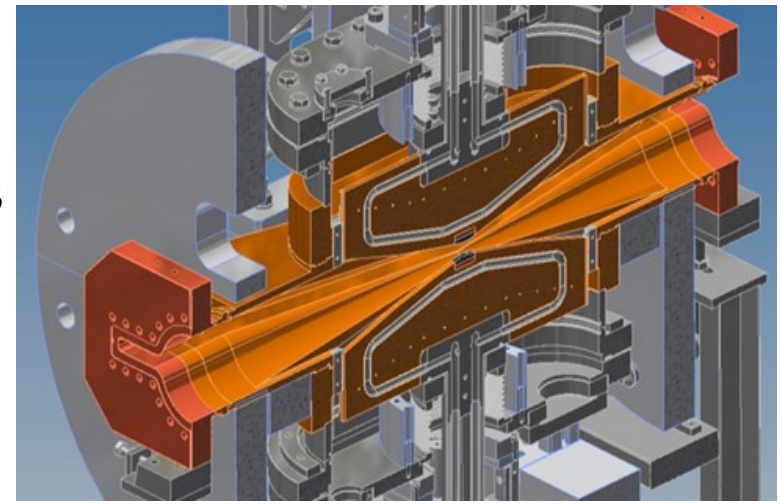
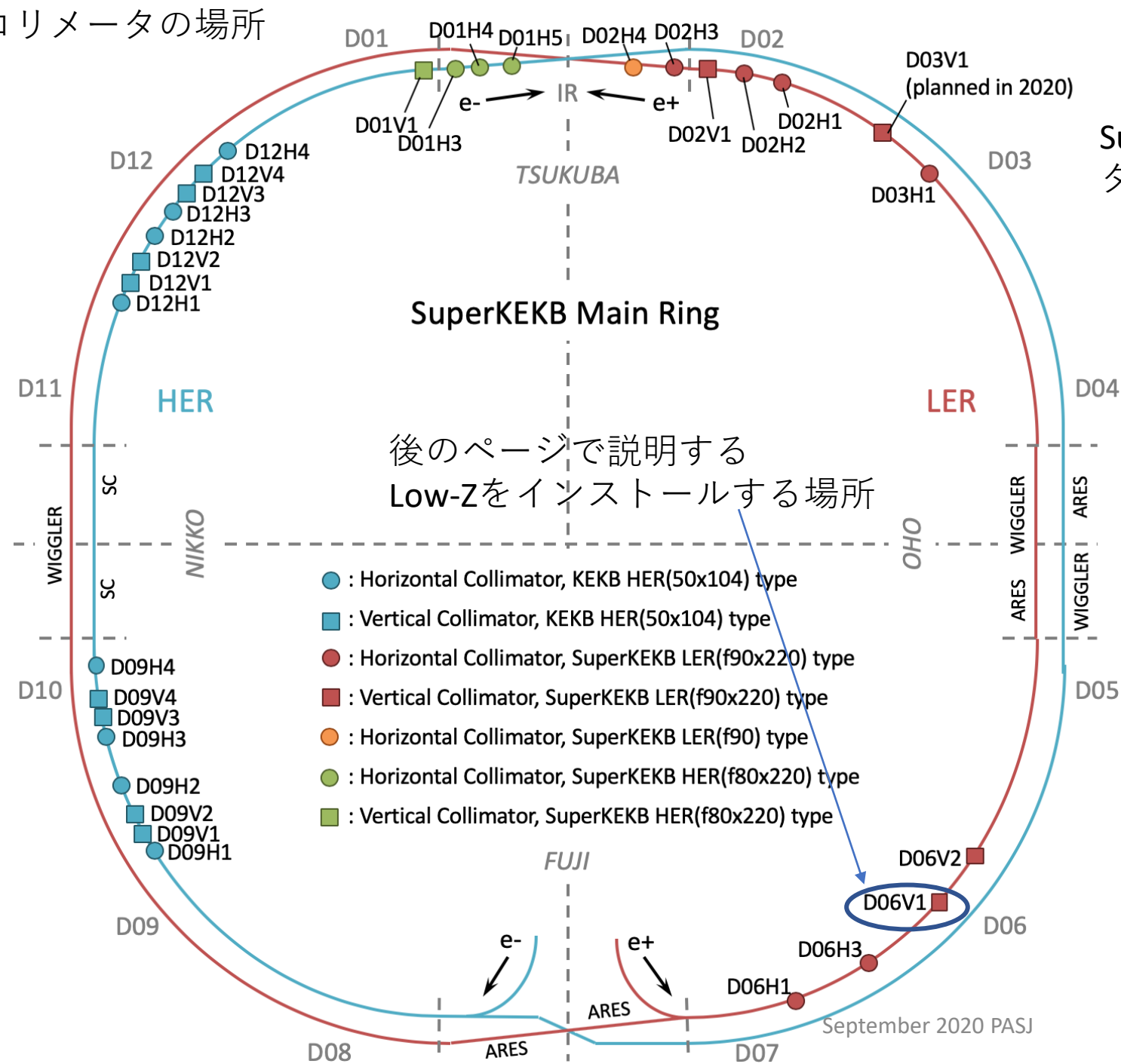
現在までの成果

- ・ 実用型衝突型加速器では世界最小衝突点の垂直 $\beta = 0.8 \text{ mm}$ 達成
- ・ **世界最高瞬間ルミノシティ（衝突性能）を達成 ($2.40 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)**



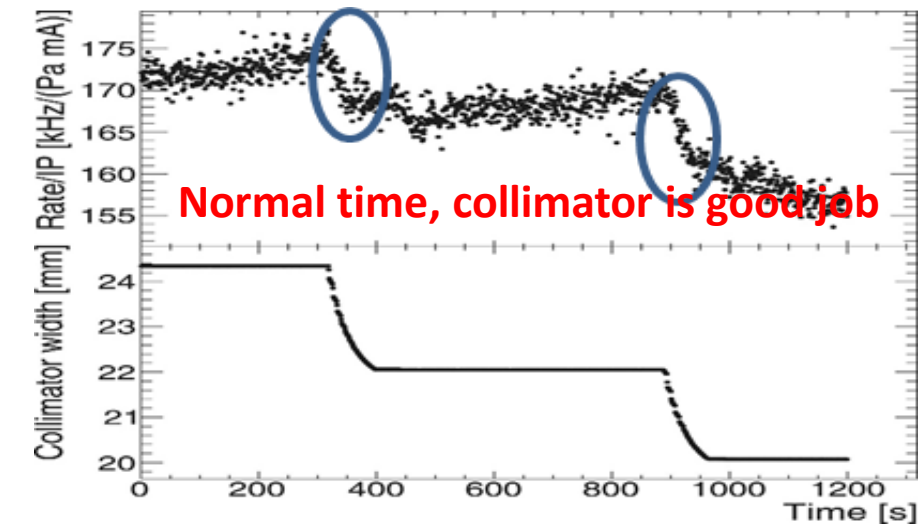
	LER	HER	Units
Beam energy	4.0	7.0	GeV
Beam current	3.6	2.6	A
Circumference	3016		m
Number of bunches	2500		
Bunch length	6.0	5.0	mm
ϵ_x/ϵ_y	3.2/8.64	4.6/11.5	nm/pm
β_x/β_y (at collision point)	32/0.27	25/0.3	mm
Luminosity	8×10^{35}		$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

コリメータの場所



SuperKEKB
タイプ

ヘッドだけ交換可能。ヘッド先端は10 mm。



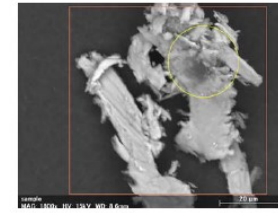
現在問題になっているのが
SuperKEKBタイプのコリメータの損傷
現在まで4回起きている。
すべて、垂直方向コリメータが損傷
損傷の理由は、次ページから説明⁴

コリメータ損傷の原因

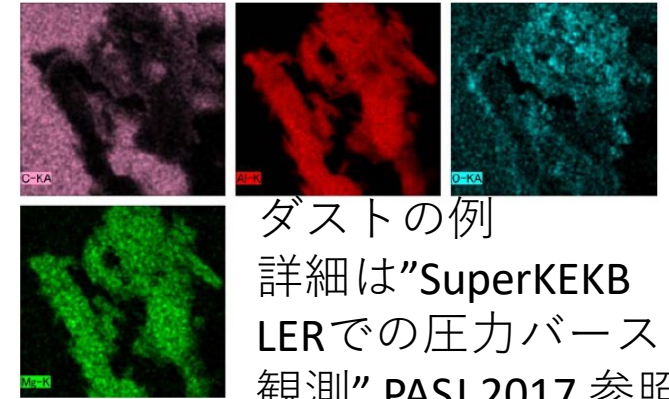
- ビームにダストが衝突したことにより、急激にエネルギーが変化。

→XYカップリングが原因で、Y方向に振動
 →一番アパーチャーが小さい垂直方向コリメータに衝突

粒子7

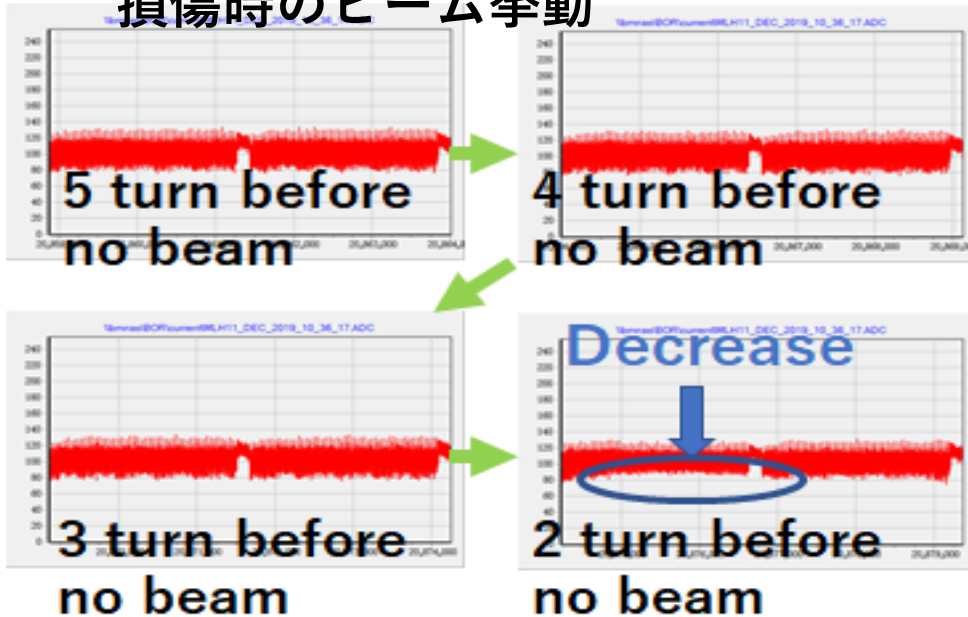


Element	AN	Series	norm. C	Atom. C
		[wt.%]	[at.%]	
Aluminium	13	K-series	41.82	26.09
Carbon	6	K-series	38.51	53.98
Oxygen	8	K-series	17.52	18.49
Magnesium	12	K-series	2.15	1.49
Total:			100.00	100.00

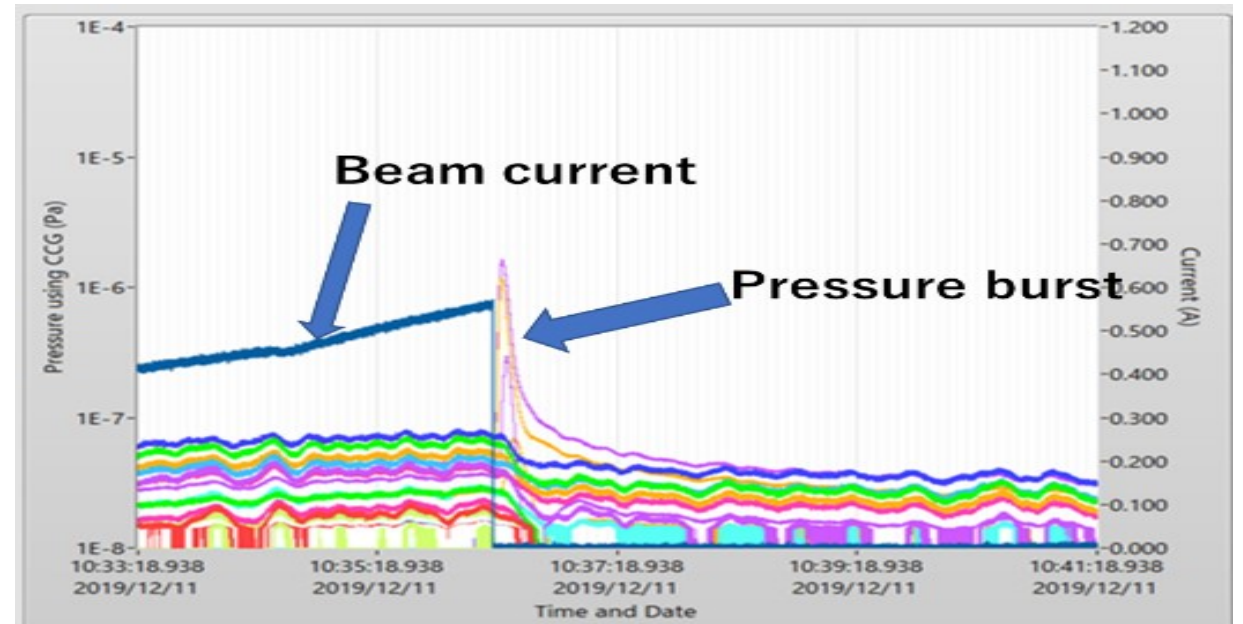


ダストの例
 詳細は”SuperKEKB LERでの圧カバーストの観測” PASJ 2017 参照

損傷時のビーム挙動



横軸がバケットナンバー
 縦軸がビーム強度 × ビーム振動

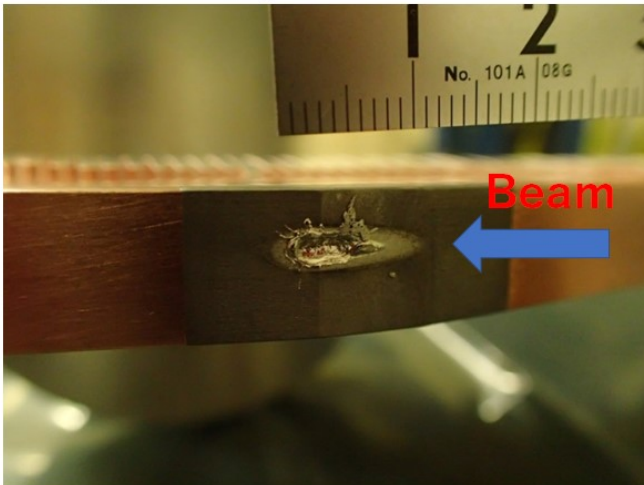


損傷時の圧力上昇

コリメータ損傷の影響

- ビームが当たってタングステンが蒸発。反対側のコリメータヘッドにタングステンが蒸着。
- コリメータ損傷時、BELLE II のPXDも損傷。
- 現在のコリメータでは、異常ビームの時BELLE II を守れない。

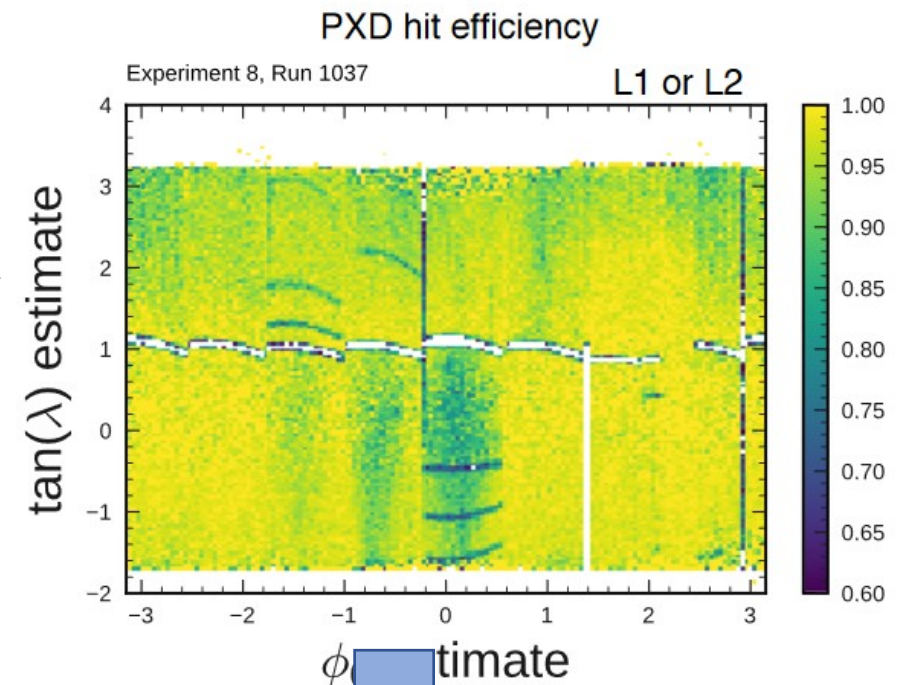
Top side jaw



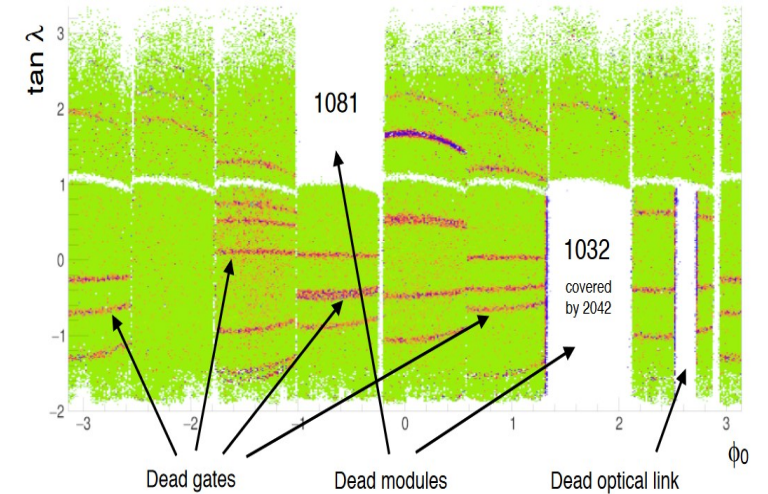
Bottom side jaw



損傷したコリメータヘッド (ヘッド材質はタングステン)



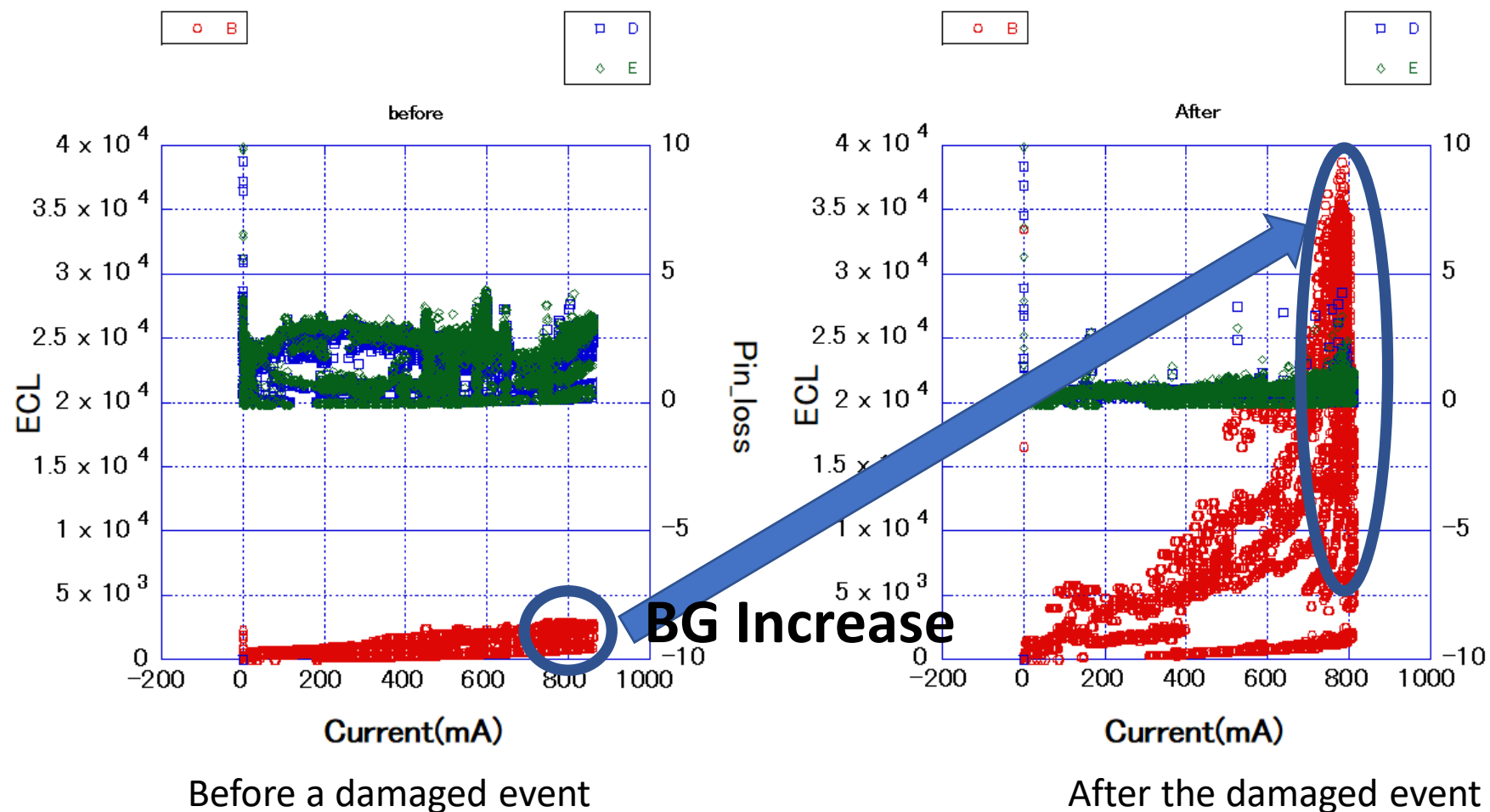
After accident of QCS power failure and accident of collimator damaged



損傷したPXD

コリメータ損傷の影響

Red dots refer to BG signals from an electromagnetic calorimeter in Belle II
Green and blue dots refer to signals in a loss monitor near a collimator.



コリメータ損傷

コリメータのロスモニターが発報して、ビーム運転できない

コリメータのギャップを広げると、ビーム運転できる

コリメータのギャップを広げた影響で、BGが上がりBelleがHVを印可できない

BG削減用コリメータやBelleを保護するコリメータが必要

機器保護するコリメータ

**異常なビームが、当たる
ポイントを意図的に作る。**

そのポイントでは、わずかに
ビームエネルギーを失うだけにする。

わずかにビームエネルギー失った
粒子は、偏向電磁石を通るたびに、
軌道がずれていく。

軌道がずれた粒子を、衝突点に到達する
までのアパーチャーが小さい場所
(水平方向コリメータ)で、ロスさせる。

一番最初に当たるポイントの
材質と構造の条件

- ビームが当たっても壊れにくい。
- ビーム運転時に問題にならない。
 - インピーダンス的に許容できる。
 - 電子雲不安定性を引き起こさない。
 - ガス放出率が大きくない。
 - 放電を起こさない。
 - 熱伝導率が高い。
 - ダストが出てこないのが理想
(極力少ないものを選ぶ)

スキヤッタされた粒子のトラッキング
シミュレーションが必要

材料選択

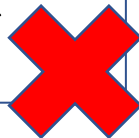
材料の選択を行うときに、
2つの異なる方法が議論

Low-Zな物質

重たい物質をビーム進行方向に薄くして
使用することで、energy depositが少なくさせる方法

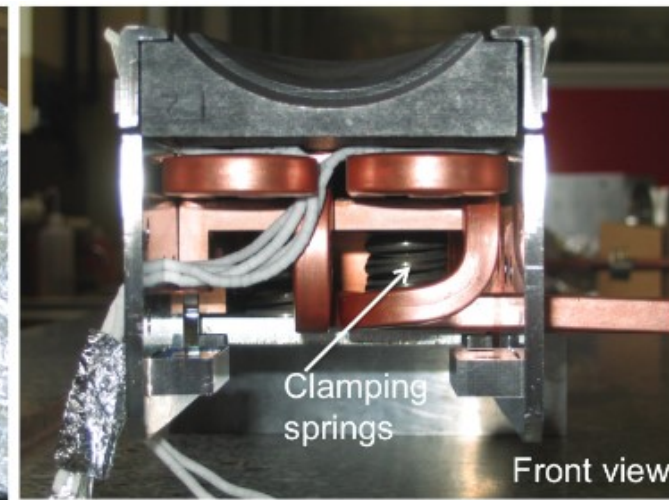
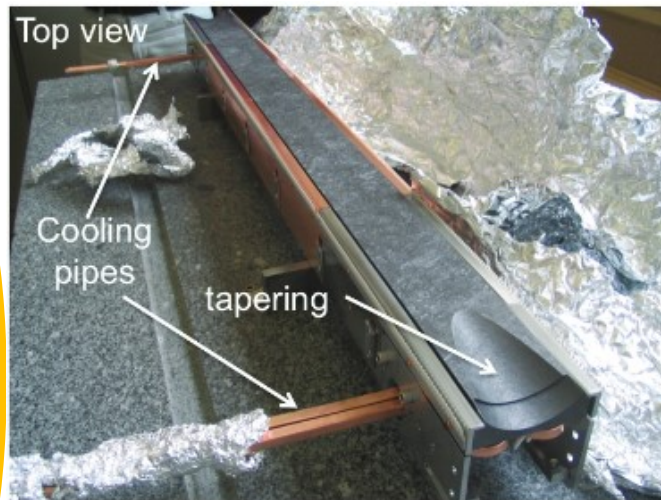
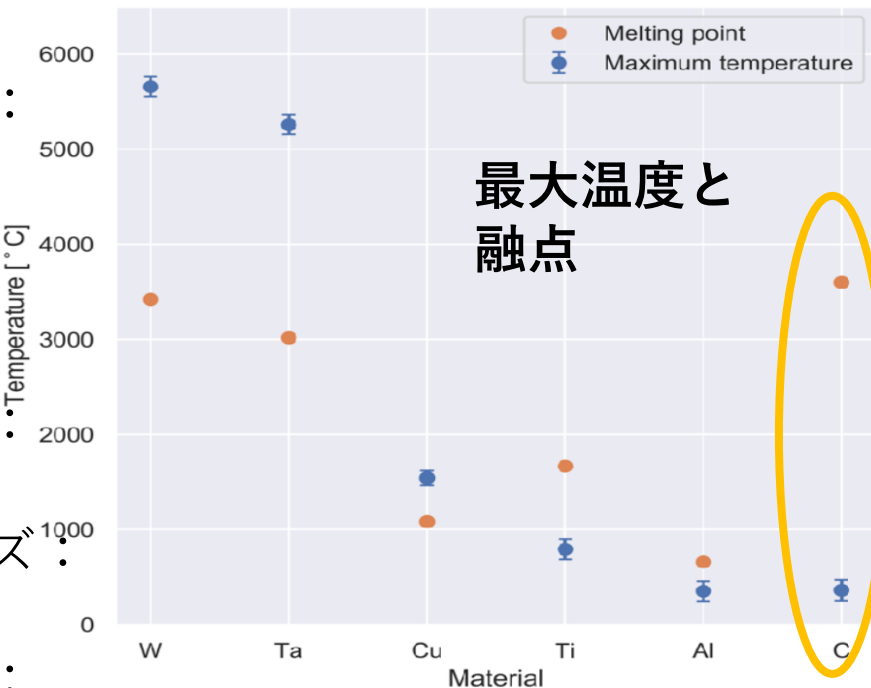
軽い物質を使用することで
energy depositが少なくさせる方法

SuperKEKBでは、インピーダンスや冷却の問題で、
ワイヤーのようなものをインストールが難しい



計算の結果、LHCで実績があるカーボンが
候補になった

計算条件
ターゲット：
円柱型
(Φ10 mm)
厚さ：
2放射長
エネルギー
4 GeV
ビームサイズ：
Φ0.5 mm
ビーム電流：
50 mA



LHCのコリメータ

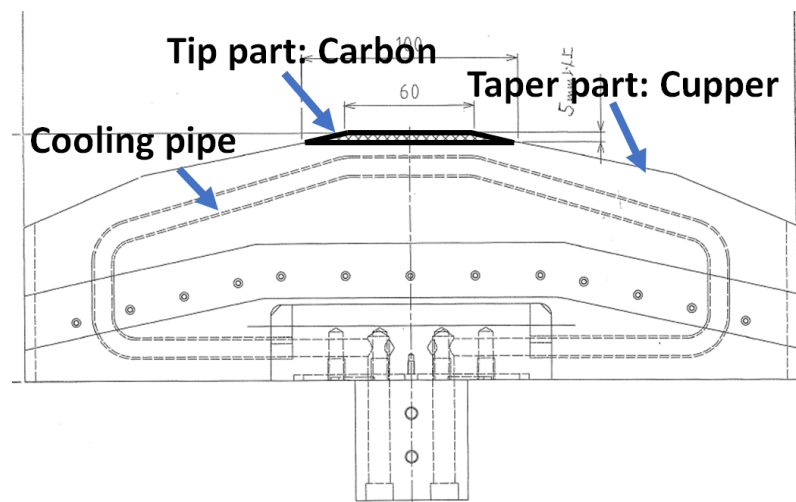
Commissioning Scenarios and Tests for the LHC
Collimation Systemより

Low-Z コリメータヘッドの構造

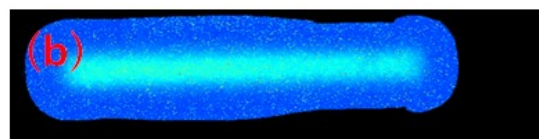
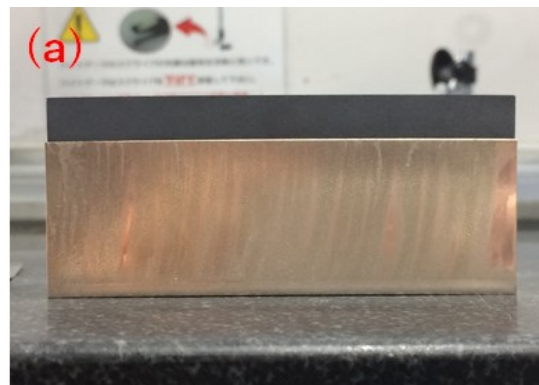
- 開発期間が短いため、チェンバーは変更せず、ヘッド部分だけ変更
- resistive wallなどが原因でヘッド先端は熱くなる
→徐熱できる構造が必要（冷却機構がある銅との接触が望ましい）
- バンチ長が短いため隙間で放電する可能性がある。できるだけ隙間をなくしたい



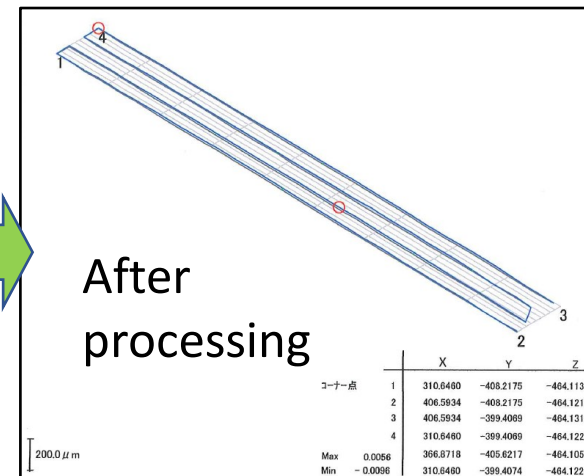
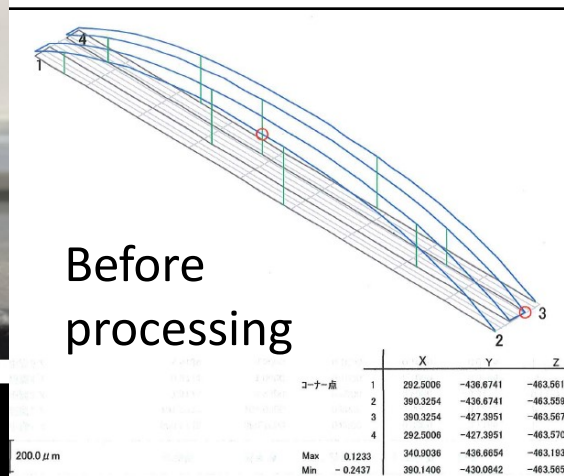
銅とカーボンのロウ付けでの接合



Low-Z コリメータ
イメージ図



接合サンプルのUT検査
→接合成功



ロウ付けしたとき、熱膨張が原因で
カーボンは変形する→2次加工が必要

スキヤッタされた粒子のトラッキング

手順

3次元CADで、コリメータをモデル作成

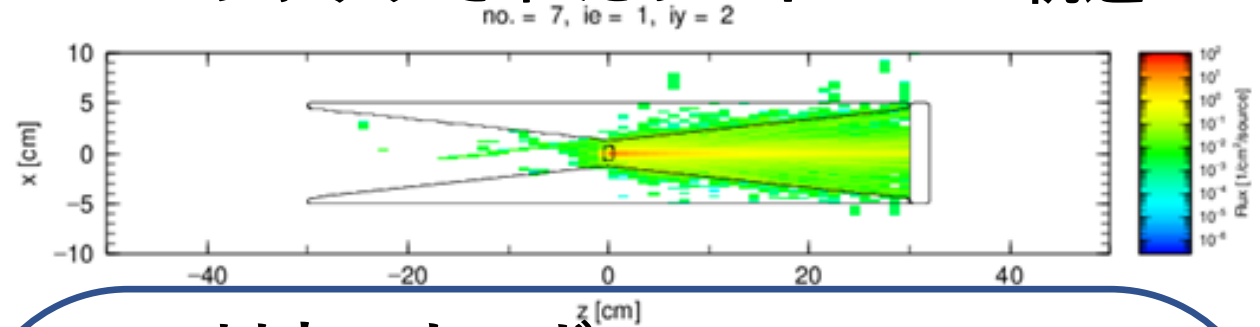
SuperMCで、コリメータモデルをPHITS形式にインポート

PHITSにて、スキヤッタリングのシミュレーション

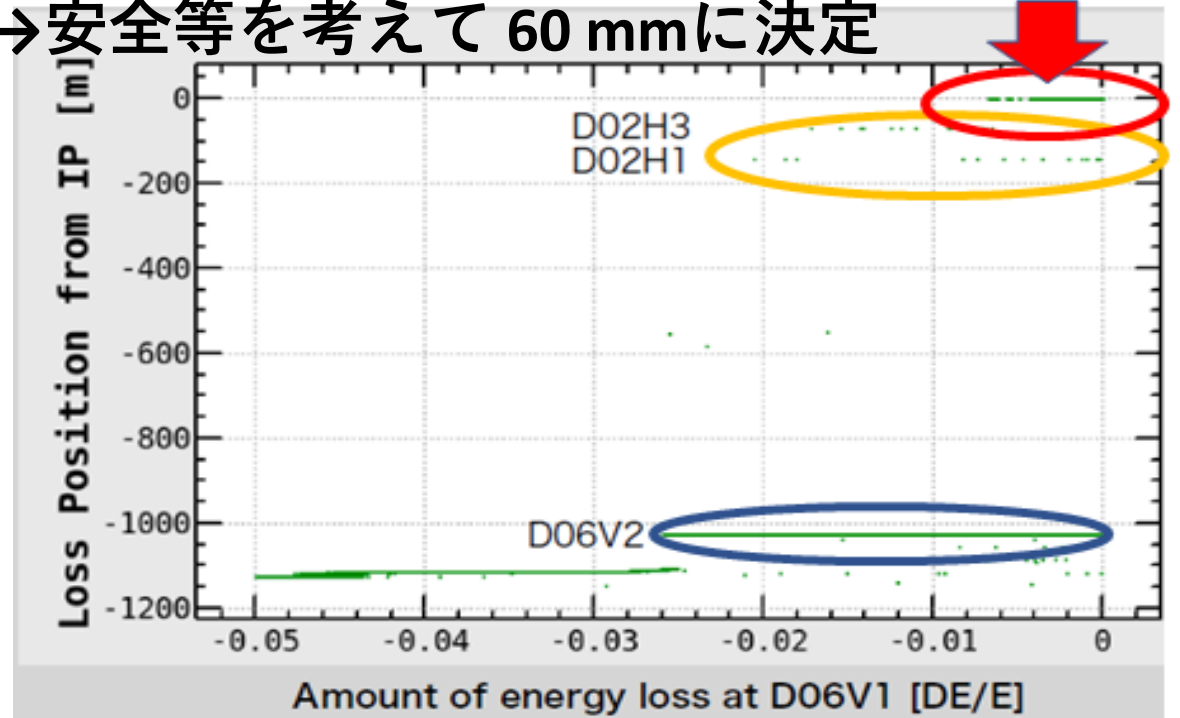
実際の運転に使われているオプティクスファイルを用いて、スキヤッタされた粒子をSADでトラッキングする

SuperMC：CAD形式のモデルをいろいろな計算用に変換可能
PHITS：物質中での様々な放射線挙動を計算可能

スキヤッタされたポジトロンの軌道



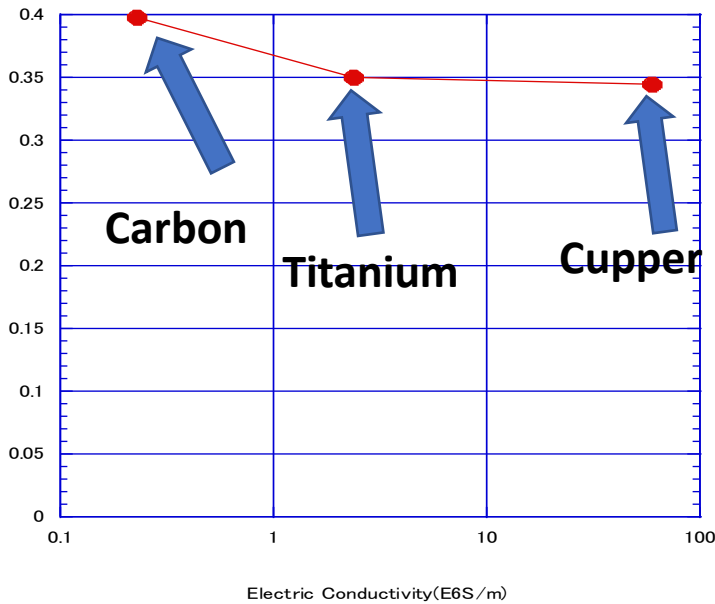
50 mm以上のカーボンの場合衝突点ではロスしない
→安全等を考えて60 mmに決定



ビームインピーダンス

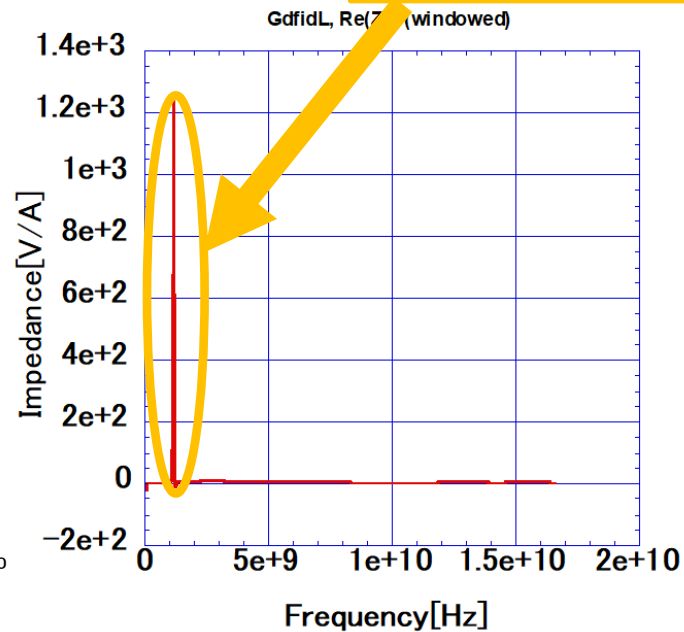
- Transverse Mode Coupling Instability (TMCI) :横方向インピーダンスが大きいと、バンチ電流を高くできない (**ルミノシティが上がらない**)
- Trapped modeがある場合、放電やビームをキックする危険性がある

Loss factor of collimator
(jaw material is Copper,
Titanium, Carbon)



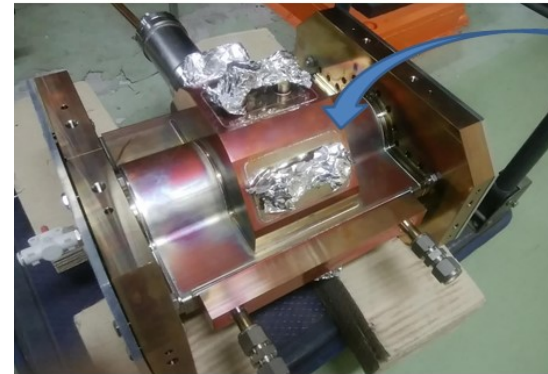
抵抗がDCと一定の場合の
ロスファクター

Trapped modeがあるため対処が必要
→HOM吸収体を置く



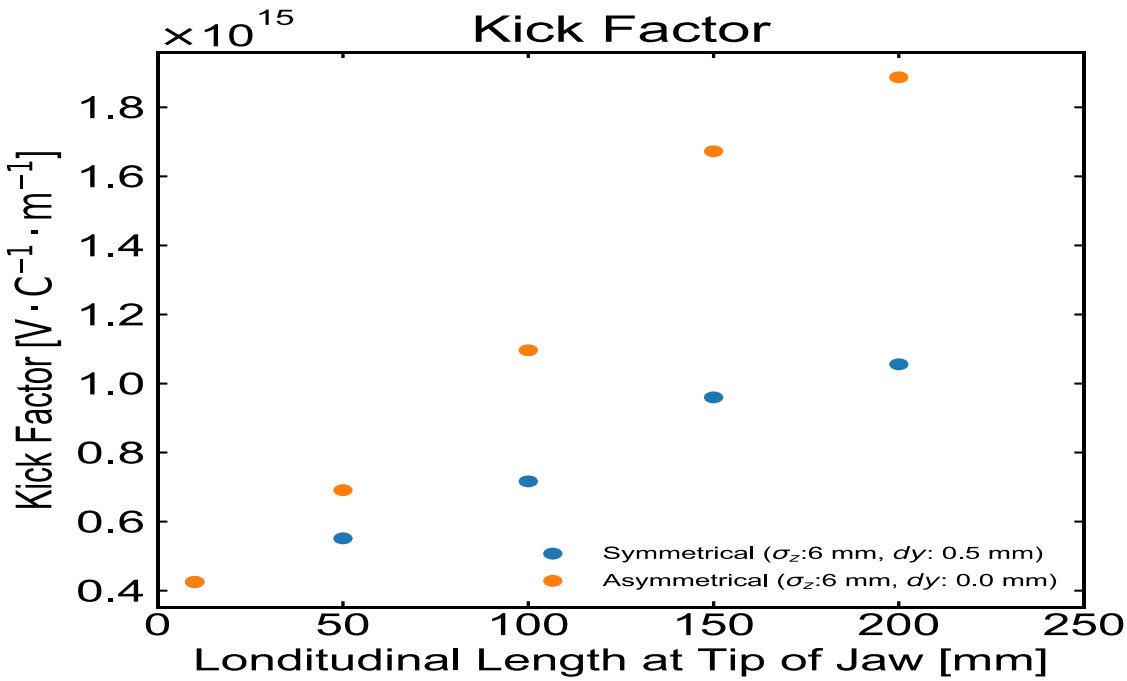
Real Y Wake potential

September 2020 PASJ



Low-Zコリメータの横にインスト
ールされるHOM吸収体チェンバー

ビームインピーダンス



TMCIの式

$$I_{thresh} = \frac{C_1 f_s E}{\sum_i \beta_i k_{\perp i}(\sigma_z)}$$

C_1 は定数(~8)

f_s はシンクロトロン周波数

E はビームエネルギー(eV)

β_i は対象コンポーネントでのベータ関数

$k_{(\perp i)}$ はキックファクター

$\beta y^* = 1.0$ mm 設計バンチ電流は1.44 [mA]

Collimator	βy [m]	$\Delta v y$	Aperture [mm]	k_T [V/pC/m] present Ver	k_T [V/pC/m] Low-Z Ver
D06V1	61.4	0.02	± 2.6	279	398
D06V2	19.2	0.16	± 1.8	490	490
D02V1	14.6	0.05	± 1.4	688	688
QC	782.2	0	± 13.5		
Threshold bunch current [mA]				2.15	1.80

$\beta y^* = 0.27$ mm

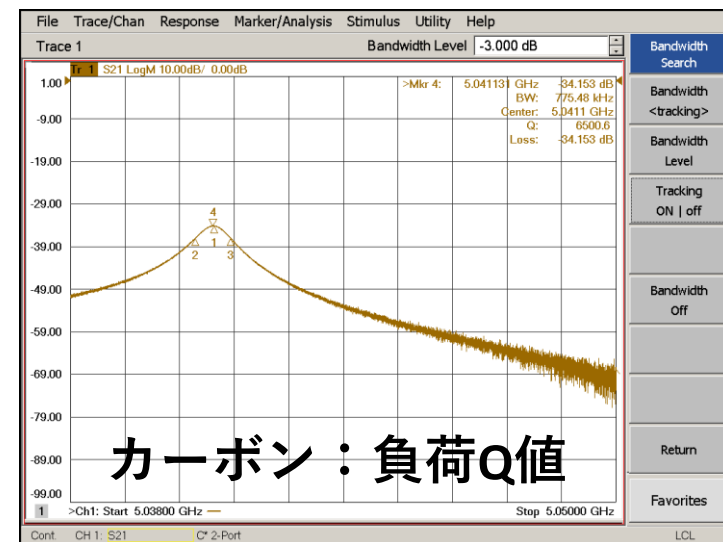
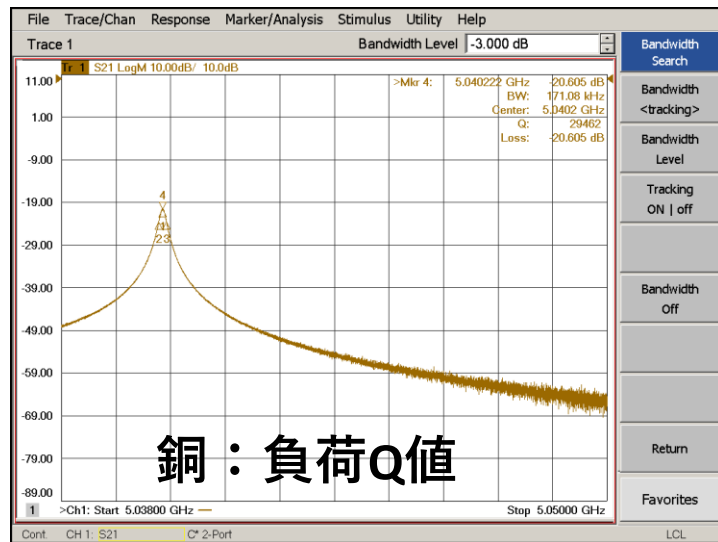
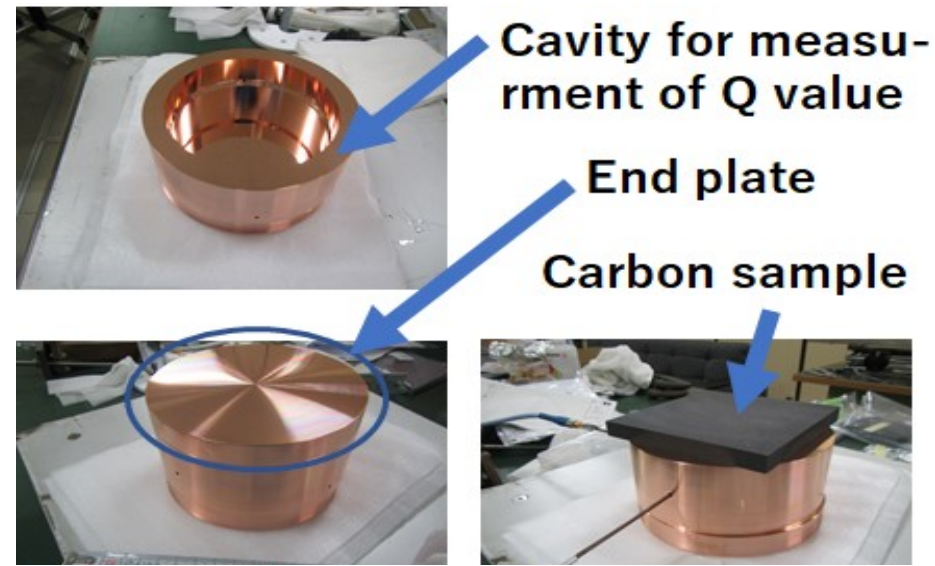
Collimator	βy [m]	$\Delta v y$	Aperture [mm]	k_T [V/pC/m] present Ver	k_T [V/pC/m] Low-Z Ver
D06V1	61.4	0.1	± 1.6	544	777
D06V2	19.2	0.24	± 1.2	901	901
D02V1	111.8	0.01	± 2.5	316	316
QC	2890	0	± 13.5		
Threshold bunch current [mA]				0.92	0.79

$\beta y^* = 1.0$ mm の場合は問題ない。

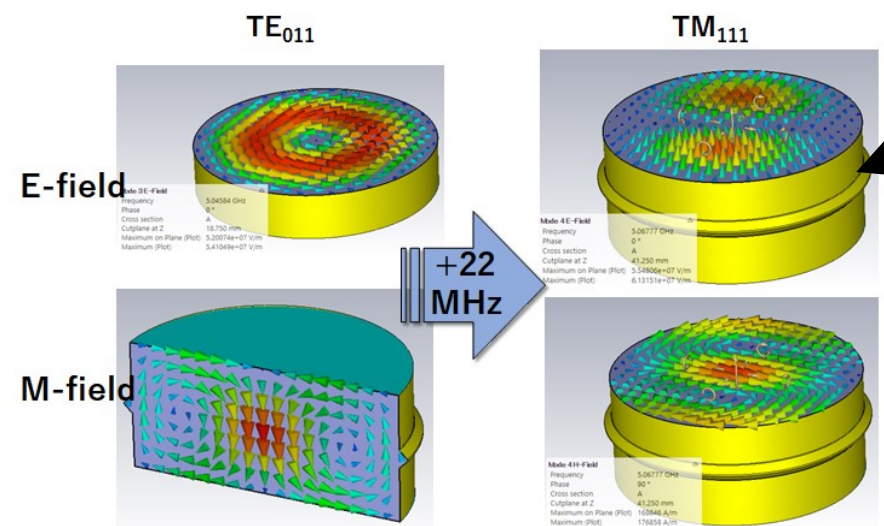
ただ、数年以内にさらなる開発が必要

カーボンの高周波領域での電気伝導度

- バンチ長が短いので、ビーム中心に近づける機器では、材質特性の調査が重要
→ 空洞の端板を変えるだけで高周波領域の電気伝導度が測れる空洞を製作



空洞内に溝：縮退モードを分離するため
測定値の周波数差は22 MHzとなり、計算と一致



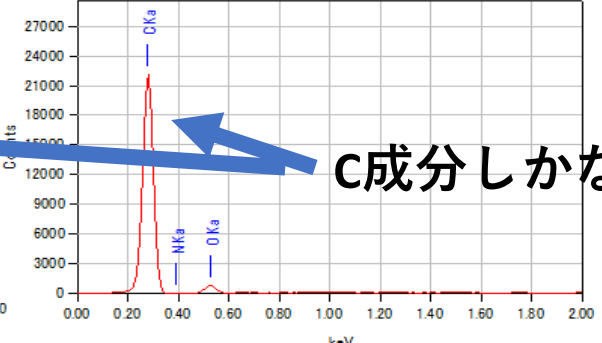
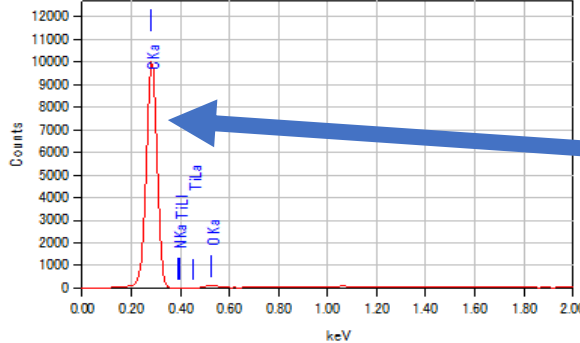
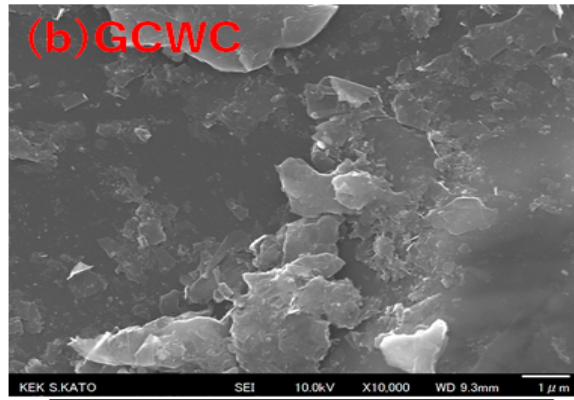
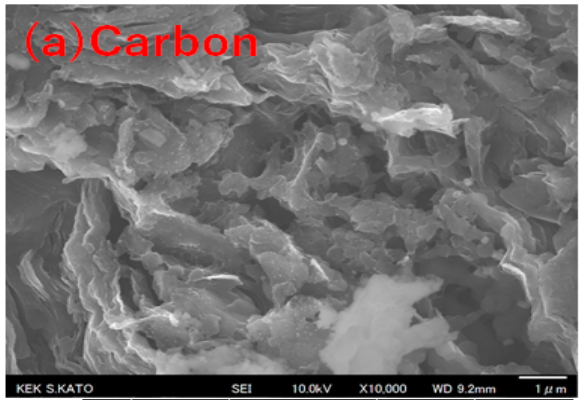
Q値から金属の高周波表皮抵抗の特性を仮定して算出した直流抵抗値は $3.33 \times 10^5 \Omega \cdot m$ 、DC抵抗(約 $3 \times 10^5 \Omega \cdot m$)と変わらないため、高周波領域でも金属と同様な性質であると推測できる

カーボンから出てくるダスト

- 垂直方向コリメータから、ダストが出てくるとビームやBPMに悪影響が出る可能性



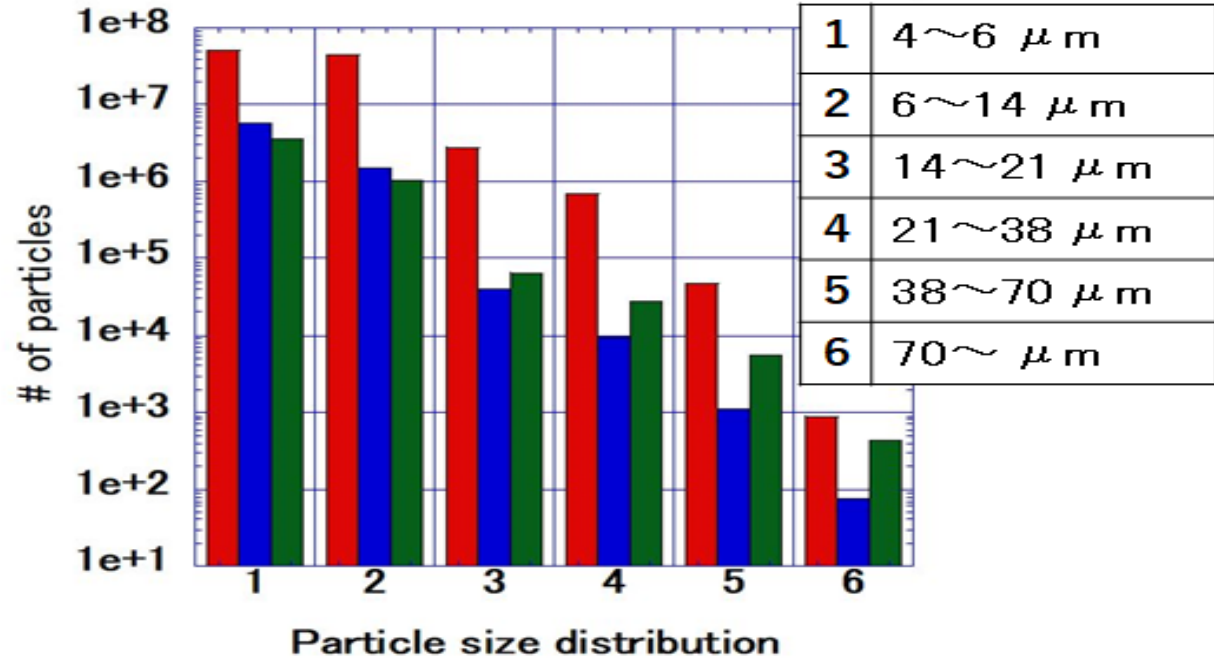
ダストを少なくするため、対処（表面処置）



C成分しかない

GCWCの表面のほうが、空隙が少ない

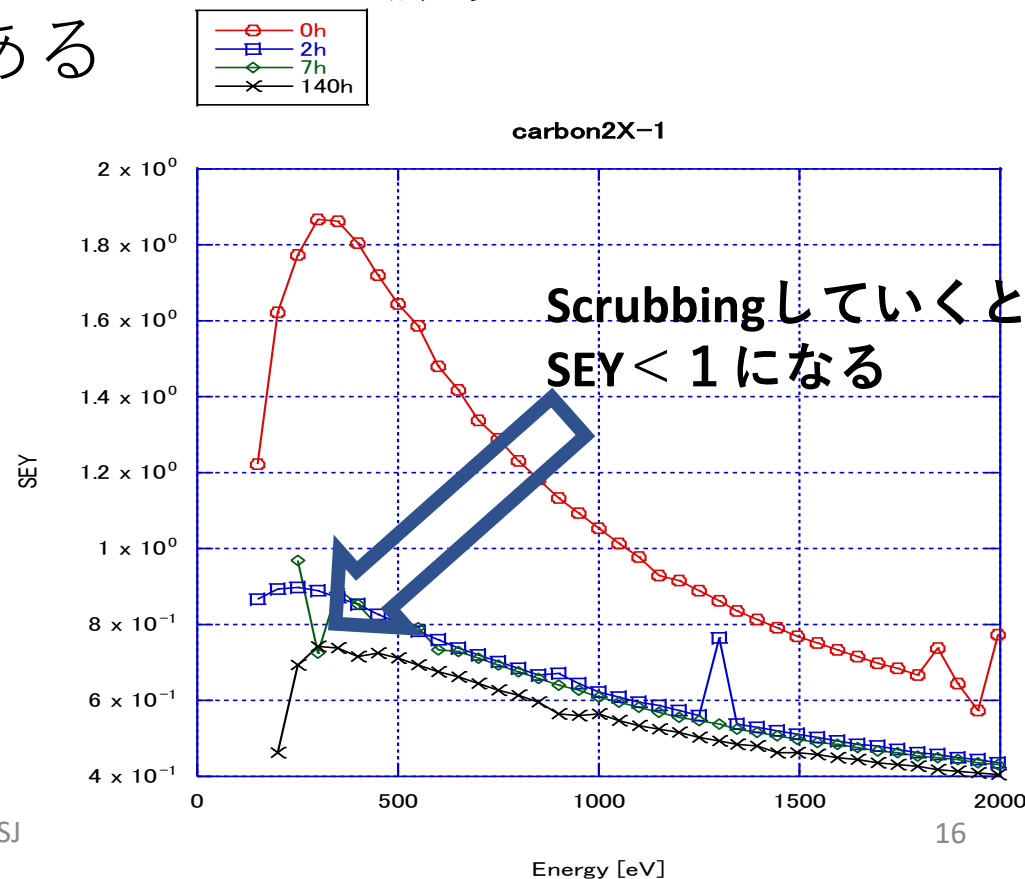
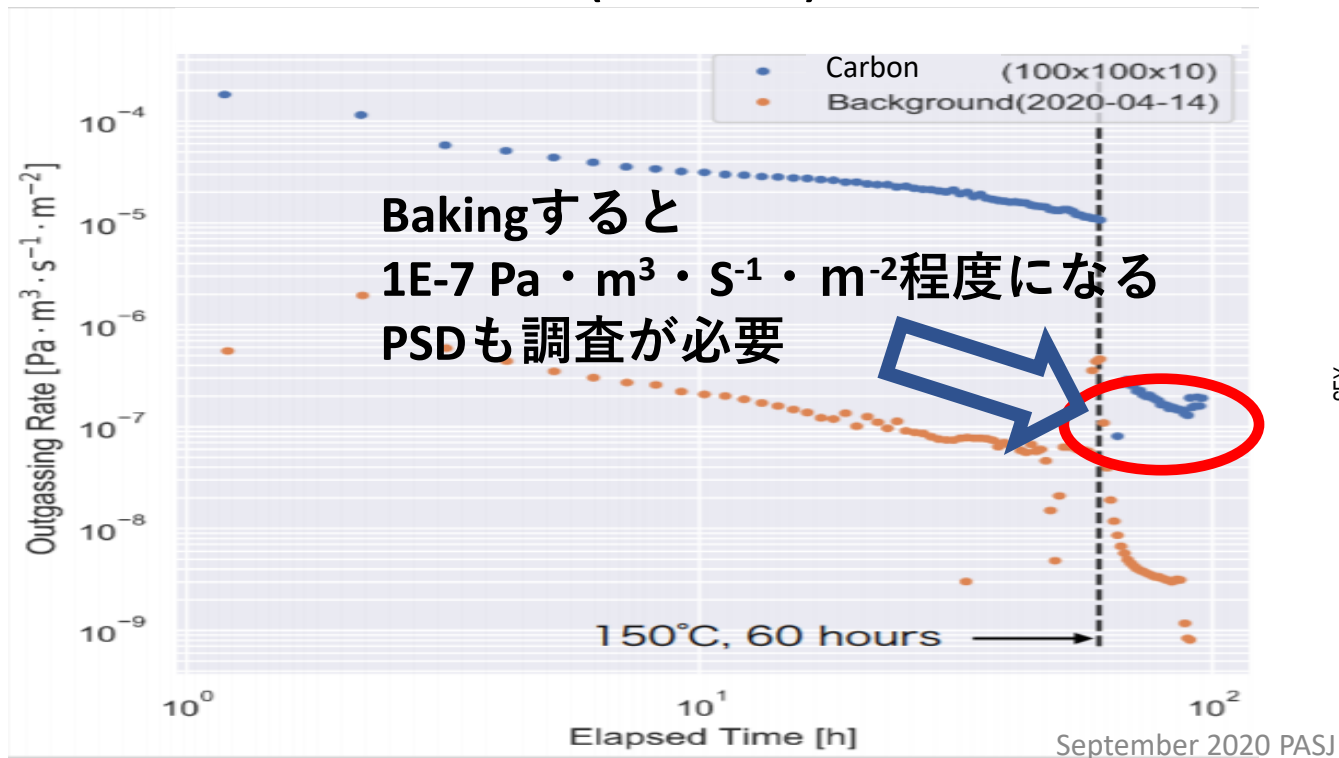
■ Carbon
 ■ Glassy carbon
 ■ Glassy carbon with carbon coat



加速器にインストールするのは、GCWCに決定

ガス放出率と Secondary Electron Yield(SEY)

- ガス放出率が多い場合、残留ガスと散乱が起こる
→BELLE II のBGになる→許容できるガス放出率であるかが重要
- SuperKEKB LERでは、Electron Cloud Effect(ECE)が起きる可能性がある
→ECEが起きるとビームサイズ増大→ルミノシティ減少
→SEYが低い材料(SEY < 1)である必要がある



まとめと今後の試験

- まとめ：決められた開発期間の中で、できるだけ計算と試験を行った。
→致命的な問題はなく、今秋に加速器にインストール
- 今後の試験：
 - コリメータのギャップを変化させたときの、チューンシフト量やバンチ長の変化を測定
→インピーダンスの計算と合っているのかを確認
 - ロスモニターや素粒子検出器での信号の変化を観察
→トラッキング結果と矛盾していないかを調査
 - ビーム電流やフィルパターンと、圧力値・ビームサイズの関連性を調査
→ビームの高周波成分や放射光からの影響での、放電の有無、ECEの有無を確認
 - コリメータで励振されるwake fieldをモニターする：
 - コリメータ近傍に電極付きチャンバーをインストール
 - 現在のコリメータでも入射時に、コリメータが励起するwake fieldの影響を示唆するデータ有

謝辞

- この開発は、多くの方のご助力があっできました。原子力開発機構の平野氏には、カーボンに関する多くの知見を教えてくださいました。高エネルギー加速器研究機構の岩瀬氏、萩原氏、大山氏、飯島氏、高富氏、東氏、保住氏、紙谷氏、飯田氏、佐藤政則氏、榎本氏、久松氏、柴田氏、白井氏、末次氏、金澤氏、森田昭夫氏、小磯氏、大西氏、飛山氏、有永氏、森川氏、阪井寛志氏、増澤氏、川本氏、江木氏、田中秀治氏、中山氏、橋本氏、牧村氏には、多くのコメントをいただき、また、手助けをしていただきました。深謝いたします。

おわり

ご清聴ありがとうございました。