

大電流蓄積リング真空システムの技術的課題 - KEKB加速器での経験 -

末次 祐介

高エネルギー加速器研究機構(KEK)、KEKB 真空グループ

THOS01

内容

- はじめに: 加速器の真空システム
- 大電流蓄積リング真空システムの技術的課題
(KEKB、SuperKEKBの経験を基に)
 - シンクロトロン放射光(電子、陽電子リング)
 - 高エネルギービームに伴う電磁波、壁電流
 - 電子、イオンの発生
 - ビームと物質(機器、ダスト粒子)との衝突
- まとめ

加速器の真空システム

● 加速器: 様々なサブシステムからなる複合システム

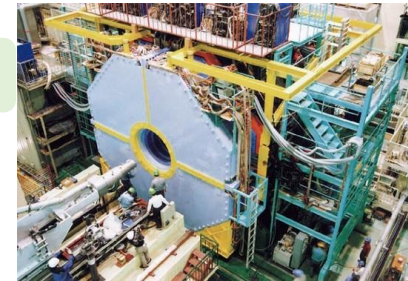
高周波空洞
(常伝導)



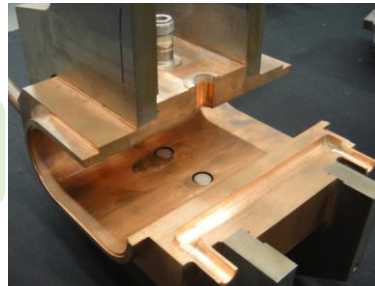
電磁石



測定装置



ビームモニター
フィードバック



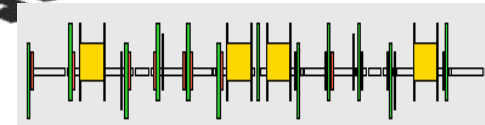
施設
設備



超電導
(空洞、電磁石)



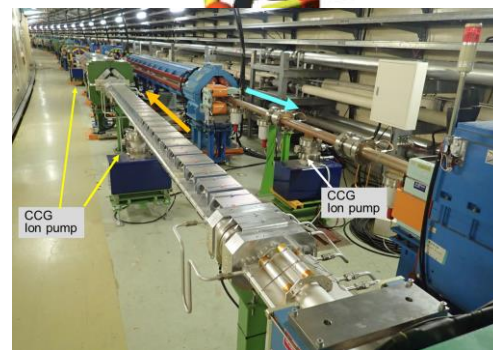
ビーム光学
加速器理論



計算機・制御
コミッショニング



粒子生成
ビーム輸送



真空システム

加速器の真空システム

● 真空システム:

- 荷電粒子が通る、蓄積されるビームパイプに直接関係するシステム。

→ ビームに一番近いシステム。

(加速空洞等でも真空装置は使うがここでは触れない)

● 真空システムの特徴(一般の真空システムと比較して)

- 真空容器内に高エネルギーの荷電粒子ビームが存在 (Hot vacuumとも呼ばれる)。

→ 加速器特有の様々な課題が発生する。

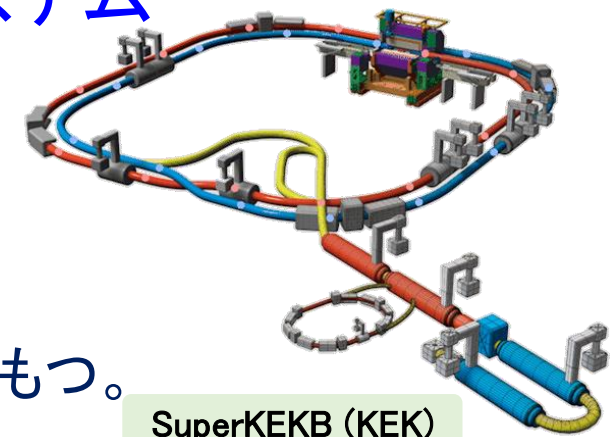
- 単に超高真空を作成・維持すればよい、という訳ではない。

● 今回特に注目するのは蓄積リングの真空システム

- 放射光リング
- 衝突実験用リング
- リニアコライダーのダンピングリング、など

→ 真空システムが特に重要な役割を持つ。

- 荷電粒子ビームが長時間周回する。周期的構造をもつ。



SuperKEKB (KEK)

加速器の真空システム

- 真空システムの役割
 - 粒子ビームの”通り道を確保”し、そして、粒子ビームを”安定に維持”する。
- 通り道の確保⇒ビームパイプを超高真空に維持：
 - 残留気体分子との衝突によるビームロス低減
 - 十分なビーム寿命の確保。
圧力で決まるビーム寿命 τ : 圧力 P に反比例 $\tau \propto 1/P$
 - 測定器等のバックグラウンド低減。
- 安定に維持⇒ビームパイプ内で発生する余計な電磁場やイオン・電子等の影響を軽減：
 - これらに起因するビーム不安定性の抑制
 - エミッタンスの維持(衝突リングでは衝突性能の維持)。
 - 不安定性に起因するビームロス低減。

実現するために、
様々な真空機器、
装置が必要となる。



ビームと関係した
いろいろな厳しい
(興味深い?)課題を
もたらす。

加速器の真空システム

● 真空システムの主要課題(チャレンジ)

● シンクロトロン放射光(電子、陽電子リング)

- 熱負荷、ガス負荷 ⇒ 機器発熱、圧力上昇
- パイプ壁からの電子(光電子)放出 ⇒ ビーム不安定性
- 放射線の発生

● 高エネルギービームに伴う電磁波、壁電流

- 高次高周波(Higher Order Mode, HOM)の励起 ⇒ 機器の発熱
- 機器のインピーダンス ⇒ ビーム不安定性
- 放電 ⇒ 機器の発熱、圧力上昇

● 電子、イオンの発生

- 電離イオン ⇒ ビーム不安定性(e^- ビーム)
- 光電子、二次電子放出・増幅 ⇒ ビーム不安定性(e^+ ビーム)

● ビームと物質(機器、ダスト粒子)との衝突

- ビームの衝突 ⇒ 機器の損傷、溶融、放射化
- ビームエネルギーの損失 ⇒ ビームロス c

ビーム電流が大きくなるほど、また、バンチ電流が大きくなるほど厳しい課題となる。

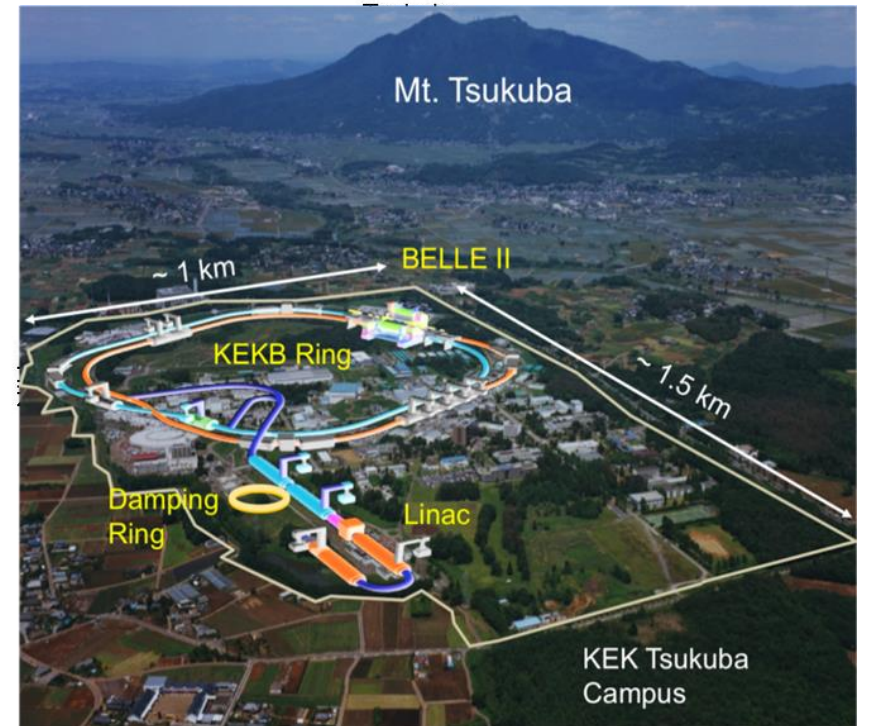


大電流(~ 1 A)を蓄積するKEKB、SuperKEKBで顕著で厳しいものとなる。

KEKBとSuperKEKB

- **KEKB (KEKB B-factory)** : 1998年12月～2010年6月。B中間子崩壊過程におけるCP非保存性を調べる加速器。
- **SuperKEKB** : 2016年3月～現在。KEKBのアップグレード計画。標準モデルを超える新理論を探求する。
- 非対称エネルギーの電子・陽電子衝突型加速器
 - 電子リング [HER] : 8 GeV (7 GeV) ()内はSuperKEKB
 - 陽電子リング [LER] : 3.5 GeV (4 GeV)
- 周長 : 3016 m
- ビーム電流[実績] = 1.4 A × 1.7 A (~1.2 A × ~1.5 A)
- バンチ数[実績] = ~1600 [6 ns毎] (~2340 [4 ns毎])
- バンチ長(σ_z) = ~6 mm
- ルミノシティ = $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ($4.7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

真空システムの主要な課題を、真空グループの一員としてこれまで携わってきたKEKB、SuperKEKBで実際経験したこと、トラブルなどを例にして紹介します。



SuperKEKB (KEK)

加速器の真空システム

- 真空システムの主要課題(チャレンジ)
 - シンクロトン放射光(電子、陽電子リング)
 - 熱負荷、ガス負荷 ⇒ 機器発熱、圧力上昇
 - パイプ壁からの電子(光電子)放出 ⇒ ビーム不安定性
 - 放射線の発生
 - 高エネルギービームに伴う電磁波、壁電流
 - 高次高周波(Higher Order Mode, HOM)の励起 ⇒ 機器の発熱
 - 機器のインピーダンス ⇒ ビーム不安定性
 - 放電 ⇒ 機器の発熱、圧力上昇
 - 電子、イオンの発生
 - 電離イオン ⇒ ビーム不安定性(e^- ビーム)
 - 光電子、二次電子放出・増幅 ⇒ ビーム不安定性(e^+ ビーム)
 - ビームと物質(機器、ダスト粒子)との衝突
 - ビームの衝突 ⇒ 機器の損傷、溶融、放射化
 - ビームエネルギーの損失 ⇒ ビームロス

放射光・熱負荷

● 放射光(SR)による熱負荷(特に電子、陽電子加速器)

- ビームパイプ内面に照射された放射光⇒**熱となる。**
- 前方に鋭いビーム: 広がり $\sim 2/\gamma$ 。
- パワーはエネルギーの4乗、電流、曲率に比例する。

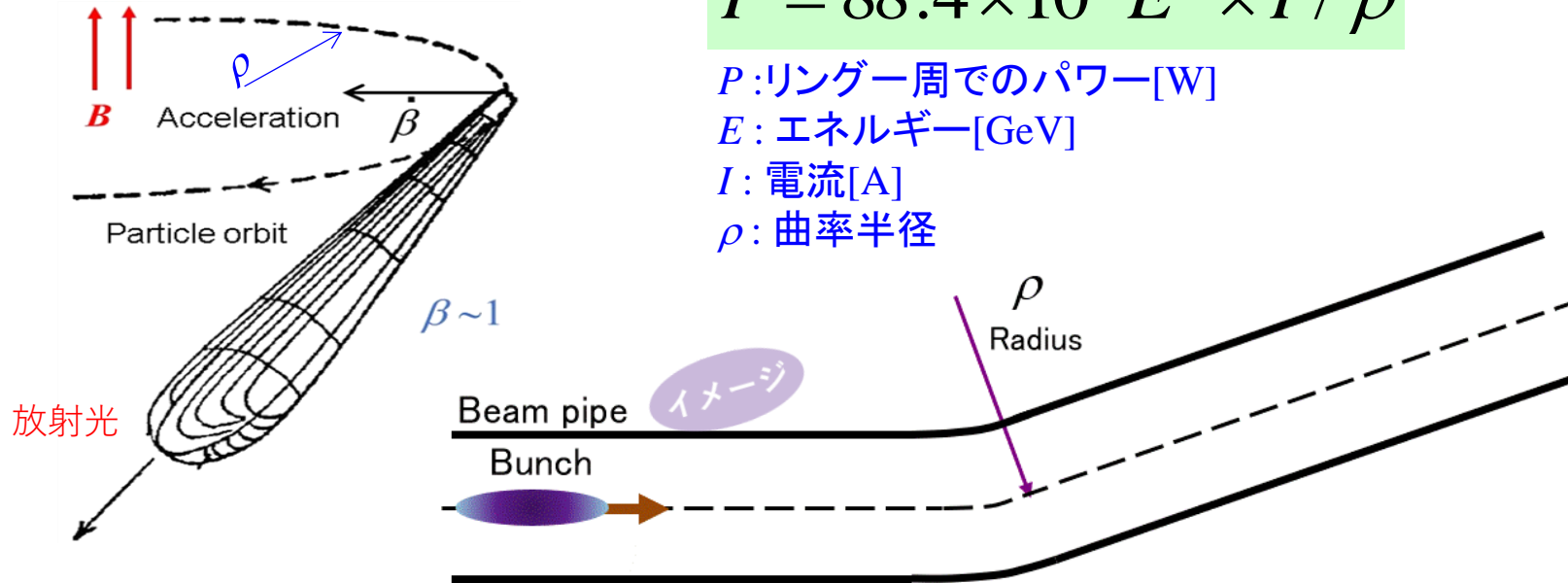
$$P = 88.4 \times 10^3 E^4 \times I / \rho$$

P : リンゲル周でのパワー[W]

E : エネルギー[GeV]

I : 電流[A]

ρ : 曲率半径



例えば(KEKB)、
 $E = 3.5$ GeV、
 $I = 1.5$ A、 $\rho = 14.1$ mでは
 $P_{total} \sim 1.4$ MW
パイプに沿って最大 9 kW m^{-1}
幅($\sim 2/\gamma$)を考えると $\sim 18 \text{ W mm}^{-2}$



- 照射部の発熱
- 最悪、溶融やリークに至る

放射光・熱負荷

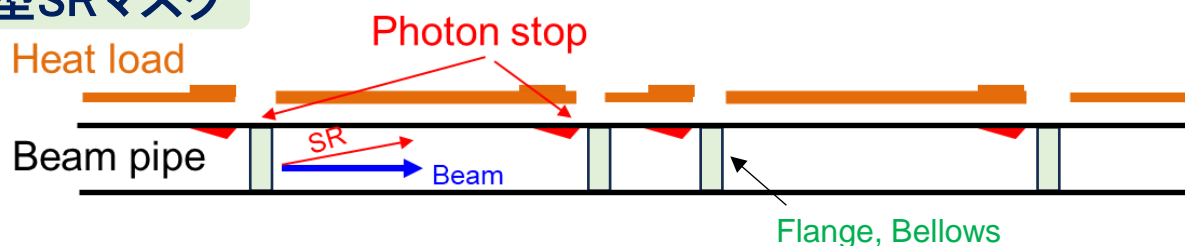
放射光(SR)による熱負荷(特に電子、陽電子加速器)

基本的対策

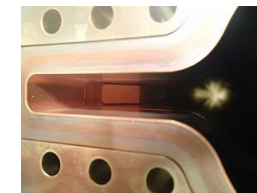
- 照射部に熱伝導率が高く、強度の高い材料を使用(銅、銅タンゲステン、GLIDCOPなど)。
- 冷却水等で十分冷却する。
- フランジやベローズなどの機器を守るSRマスク(Photon stop)を適切に配置する。
 - 放射光照射位置の正確な評価が必要。
 - 熱入力密度を下げる構造的工夫(斜面で受けるとか)。

分布型SRマスク

概念図

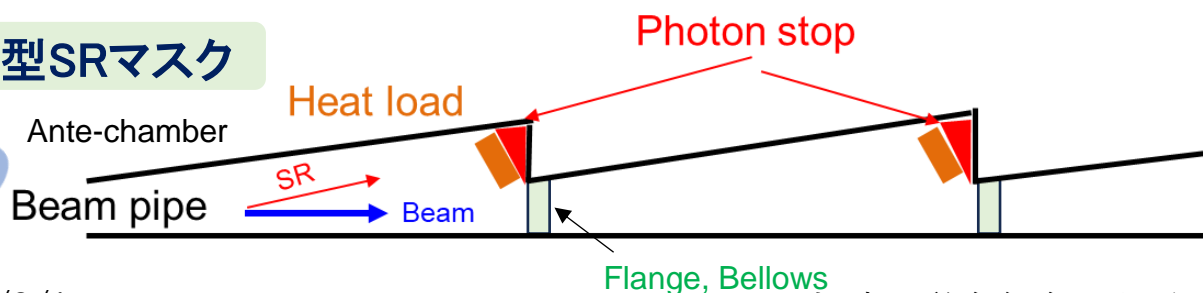


KEKB、
SuperKEKBなど

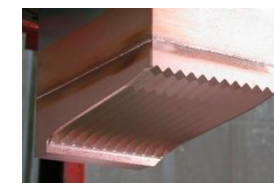
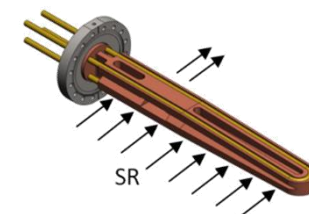


局所型SRマスク

概念図



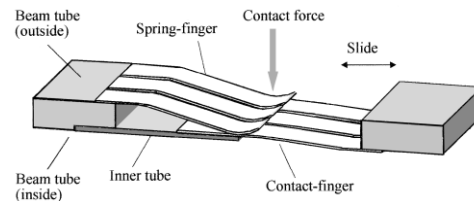
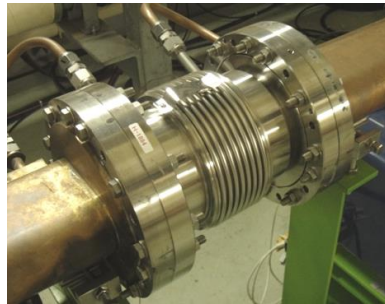
最近の放射光
リングでは主流



放射光・熱負荷

ベローズについて

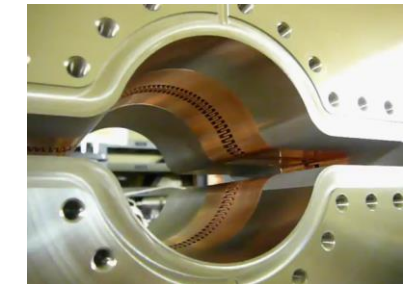
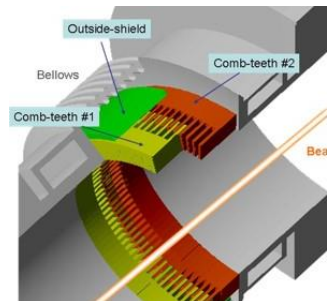
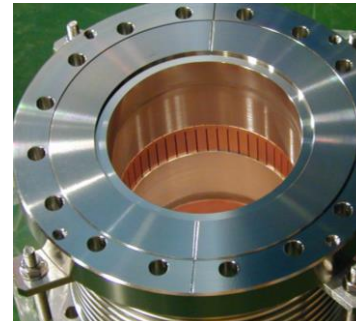
- ビームパイプ間に必須のコンポーネント。要はジャバラ構造をもつ。
 - ビームパイプの熱伸縮を吸収。ビームパイプの接続時に使用。
- 高次高周波(HOM、後述)の発生を防ぐために、内部には断面を滑らかにつなぐRFシールド(フィンガー型、櫛歯型)が必要。
 - 柔軟性が必要: 薄い金属、冷却が困難 → 熱的に弱い。
 - ゲートバルブにも必要。



フィンガー型



櫛歯型



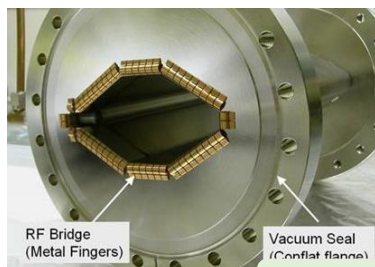
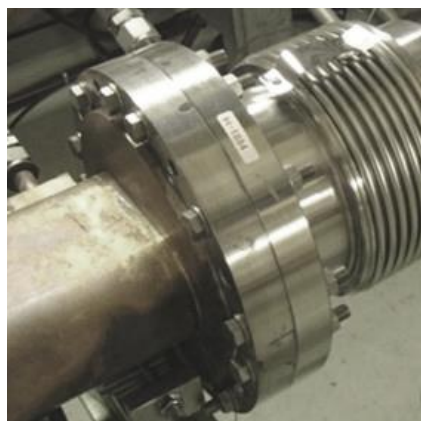
放射光・熱負荷

● フランジについて

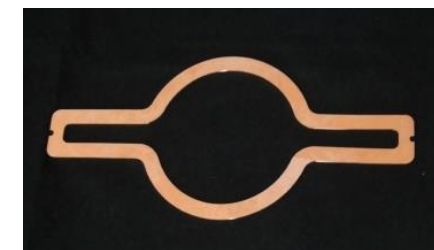
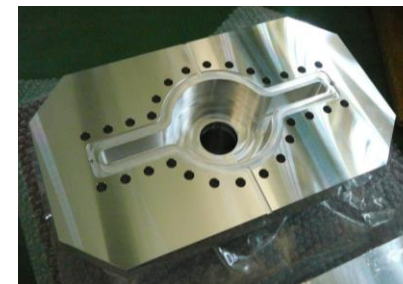
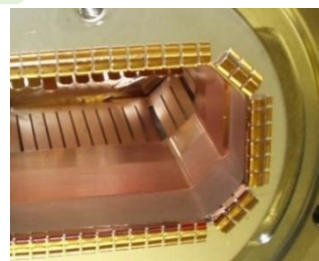
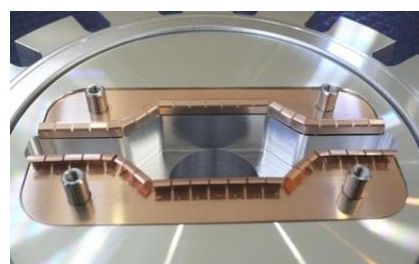
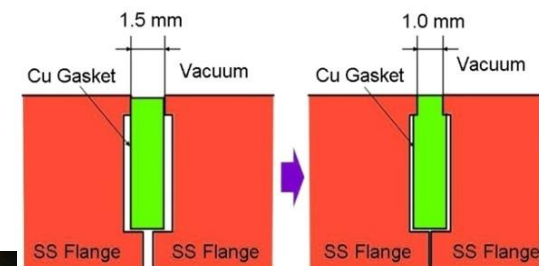
- これもビームパイプの接続に必須。
- フランジ接続部にギャップがあるとHOMが発生。微妙な接触だと放電する可能性もある(後述)。
↳ フランジ部をビームパイプ内断面と滑らかに、かつ、しっかり接触する必要あり。(構造的、電氣的)
- 通常の丸ガスケットを使う場合、フランジ間に内断面と同じ形状のRFシールド(フィンガー)等を挟む。
- KEKB、SuperKEKBでは内断面と同じ形状の真空シール(ヘリコフレックス、MO型ガスケット)を採用している。
- 薄い金属、冷却が困難→熱的に弱い

フヘリコフレックスシール

MO型ガスケット



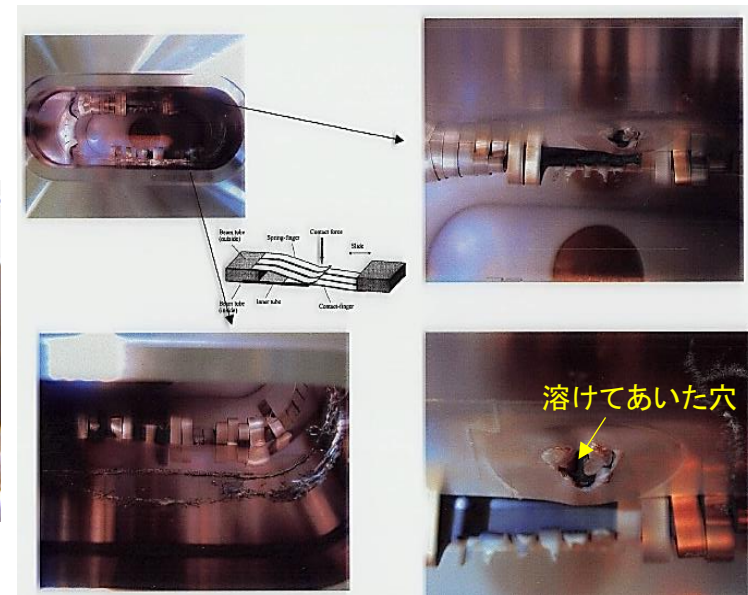
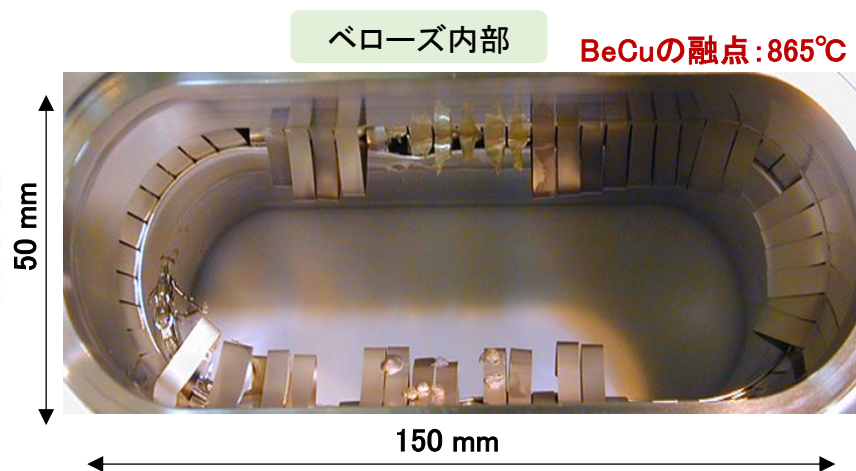
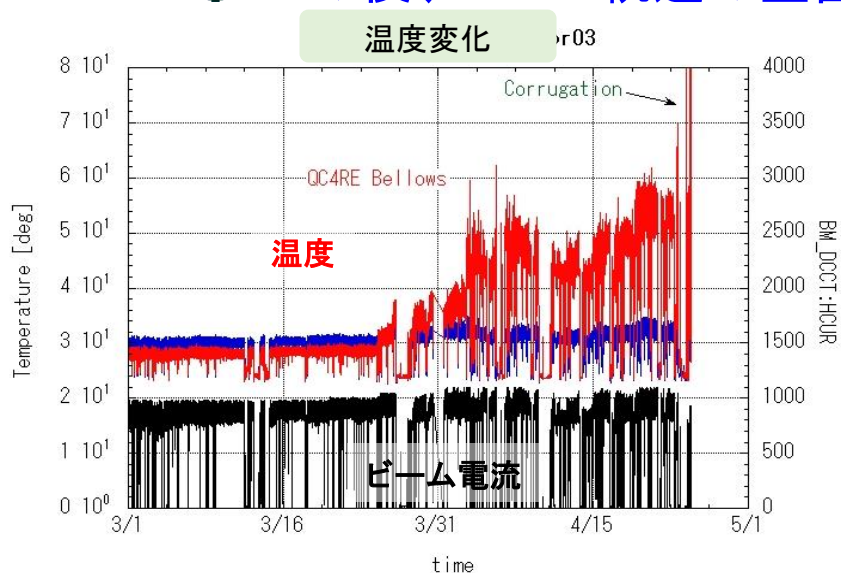
フィンガー型



放射光・熱負荷

●トラブル例：ベローズ損傷 [KEKB]

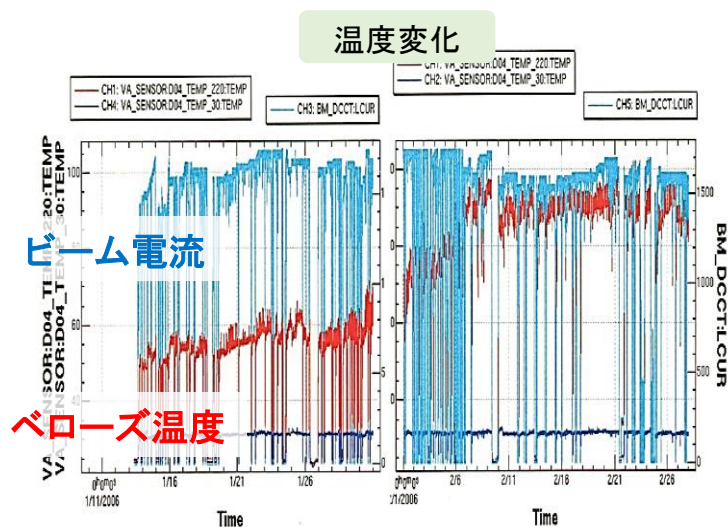
- 2003年、入射が困難となり、局所的な垂直方向バンパ軌道を作らないと入射できなくなった。
- 垂直方向ビーム振動の励起、ビームアポート時に圧カバースト(突出)もあった。
- 近くのベローズの温度が徐々に上昇していた。
- 内部を調べてみると、上側のRFシールドのフィンガー(BeCu)、ステンレス板(t0.8)が溶けていた。
 - 垂れ下がったフィンガーを避けるためバンパが必要だった。
- 上流のビーム軌道が上向きで、放射光が上部に当たってステンレス板、フィンガーが溶け、HOMが発生→HOMが内部に侵入→フィンガー、ベローズ全体がさらに発熱、か。
- この後、ビーム軌道の垂直方向角度に注意を払うようになった。



放射光・熱負荷

●トラブル例：ベローズ損傷 [KEKB]

- 2006年頃、エネルギーロスに伴うビームロス→ビームアボートが多発。
- シケイン部下流のベローズの温度が徐々に上昇。ビームアボート時に圧力が跳ねていた。
- 調べるとベローズ内部に放射光が当たった跡があり、RFシールドフィンガーが酷く損傷していた。
 - RFシールドフィンガーの金具(4点溶接に固定)がチェンバーから外れていた。
- シケイン部の調整(パイプの移動)でSRマスクの高さが実効的に変わり、放射光が当たったか。
- 放射光による発熱→金具外れ→HOM発生、漏洩 →ベローズの発熱、フィンガー一部の放電、溶融。
- エネルギーロスは放電で発生したダスト(粒子)との衝突(後述)が原因か。



内径 94 mm

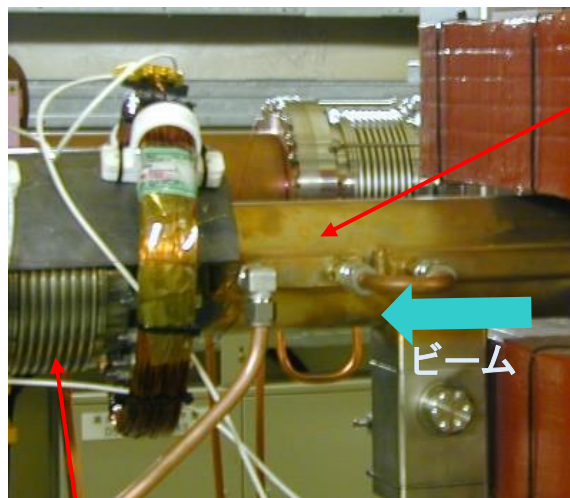
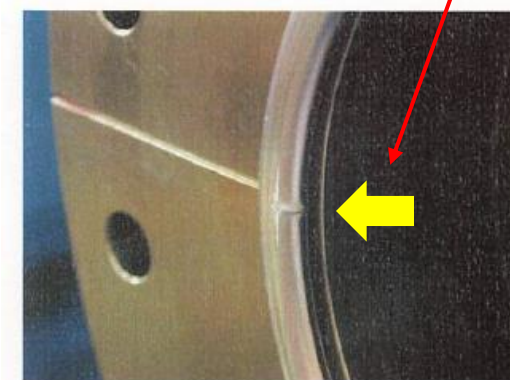
SR照射の跡

放射光・熱負荷

●トラブル例：フランジからのリーク [KEKB]

- 運転中幾度か発生した。圧力、温度にはあまり兆候は見えなかった。
- **ヘリコフレックスシールに放射光があたってリークした。** SRマスクはあったが
 - ビームパイプの水平方向ずれ(アラインメント不良) ~3 mm。
 - SRマスクの高さが低い(マスクブロック溶接時の差し込み不足)。
 - ビーム軌道の違い(ウイグラー部、設計より曲率が大きい状態)。
- 光マスク付きベローズ設置。再アラインメント。ビームパイプ交換。

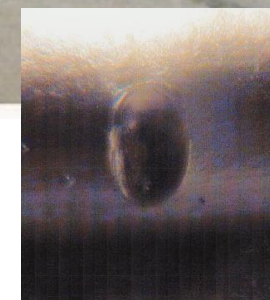
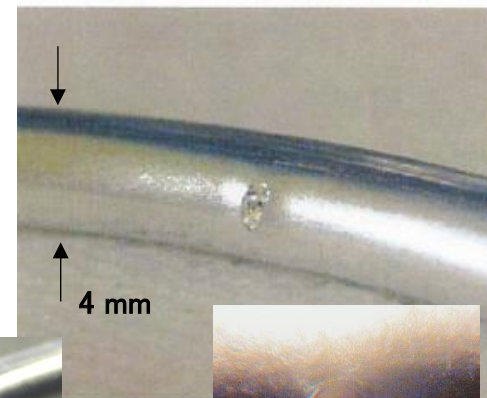
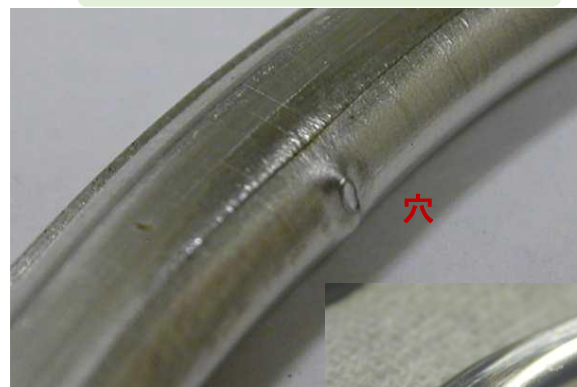
リング内側のビームレベル



ベローズ



リークしたヘリコフレックスシール



2024/8/1

加速器学会年会 山形

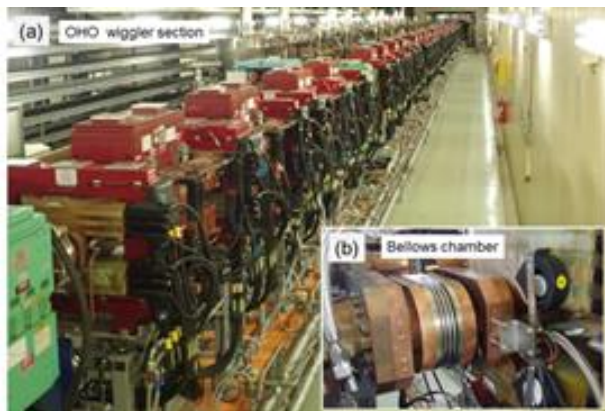
15

放射光・熱負荷

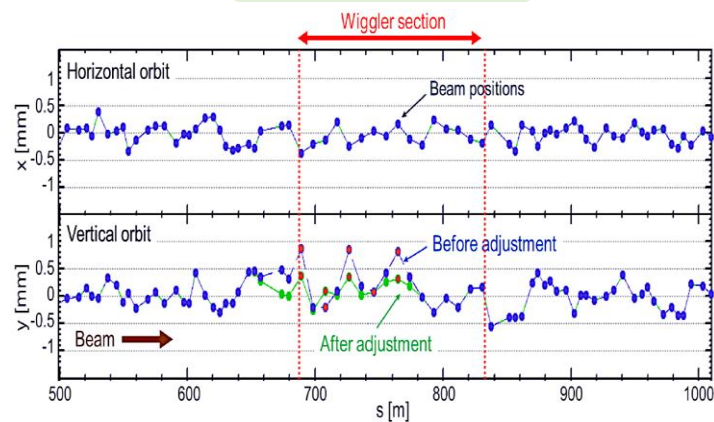
● トラブル例：フランジからのリーク [SuperKEKB]

- SuperKEKBではビームパイプをアンテチェンバー(アンテチェンバー一部高さ14 mm)付にした。
 - 大部分の放射光はアンテチェンバー内に納まる、はず。
- ウィグラー部では、フランジの温度が垂直方向ビーム軌道に非常に敏感であった。
 - 最初のリークはフランジ温度を下げるべく、軌道調整中に発生した。
- 長い直線部となるウィグラー部の上流からの放射光の一部が下流側のアンテチェンバーの上下面や入口付近にあたり、フランジ(ガスケット)、フランジを加熱(この部分を守るSRマスクはない)。
- 軌道の修正、アンテチェンバー部にSRマスクのあるベローズ設置、空冷など

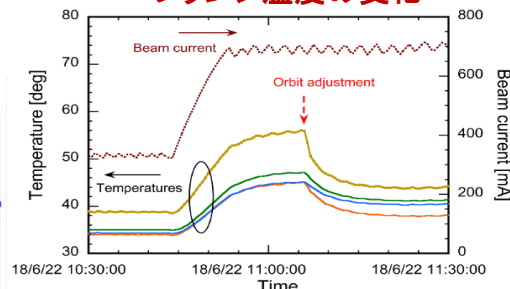
ウィグラー部 (~150 m)



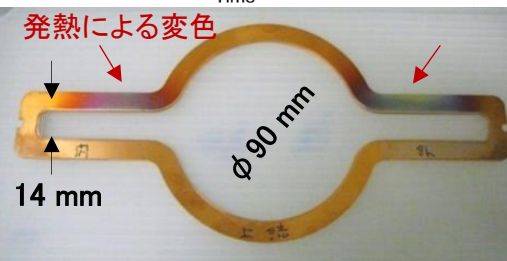
ビーム軌道の調整



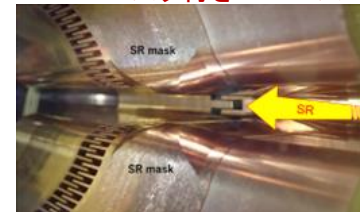
フランジ温度の変化



空冷ファン



SRマスク付きベローズ



放射光・ガス負荷

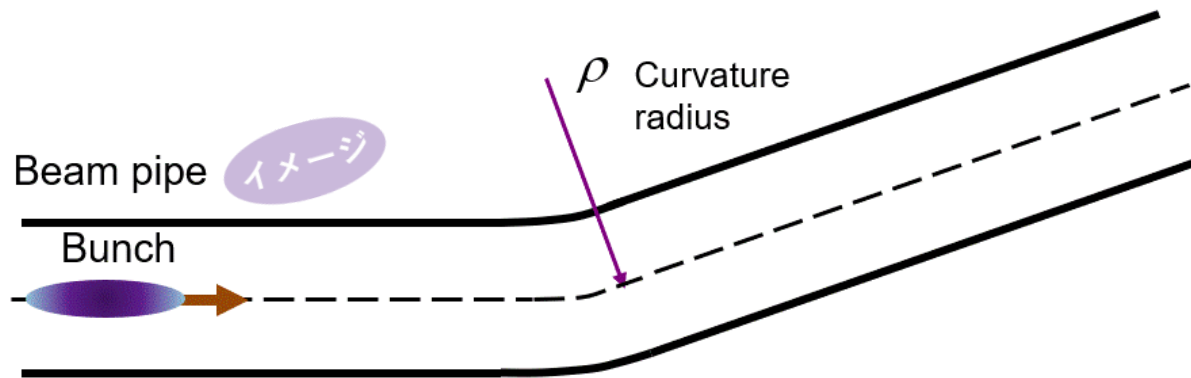
● 放射光によるガス放出(特に電子、陽電子加速器)

- ビームパイプに照射された放射光→表面に吸着していた気体分子を放出 = **光刺激脱離**。
- 光子一個あたりに放出されるガス分子数 = **光刺激脱離係数** (η [molecules/photon])で評価。
- 光子数はエネルギー、電流に比例する。

$$N = 8.08 \times 10^{20} E \times I$$

(電子・陽電子)

N : リングで発生する光子数
[photons/s]
 E : エネルギー[GeV]
 I : 電流[A]



$E = 3.5 \text{ GeV}$ 、 $I = 1.5 \text{ A}$ では
平均光子密度：
 $1.4 \times 10^{18} \text{ photons s}^{-1} \text{ m}^{-1}$
 $\eta = 1 \times 10^{-6} \text{ molecules photon}^{-1}$
とすると
平均ガス負荷：
 $\sim 5 \times 10^{-9} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$
圧力 $\sim 1 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ を得るためには
排気速度 $\sim 0.05 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$

- 圧力悪化⇒ビーム寿命低下、電離イオンによるビーム不安定性など

放射光・ガス負荷

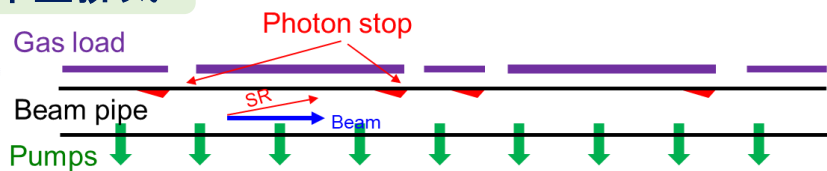
放射光によるガス放出(特に電子、陽電子加速器)

基本的対策

- 清浄な表面にする(化学洗浄)→表面の酸化層(ガスがたくさん含まれる)の除去する。
 - ビームパイプの(プリ)ベーキングも有効(熱的ガス放出低減に有効)
- コンダクタンスが小さいビームパイプを効率よく排気するための排気方式の工夫。
- η は、照射される光子数量とともに減少する = “枯れ”(scrubbing)。
 - とは言え最初から η の小さい表面が良い。いわゆるビームによるベーキングが短くてすむ。
 - 近年では排気速度も持つ*NEGコーティングなどが効果的なことがわかり、最近の放射光リング等ではよく採用されている。(SuperKEKBでは技術的問題、排気容量の懸念があり採用しなかった。)

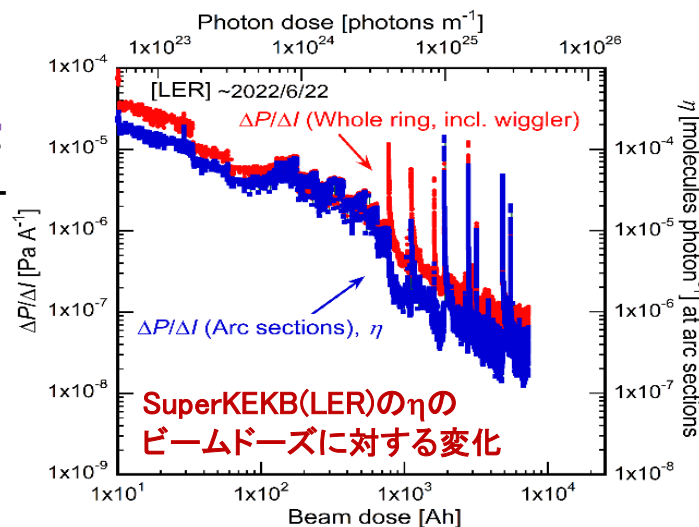
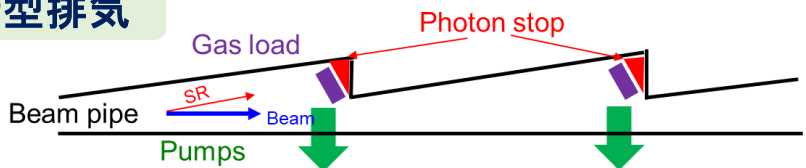
分布型排気

概念図

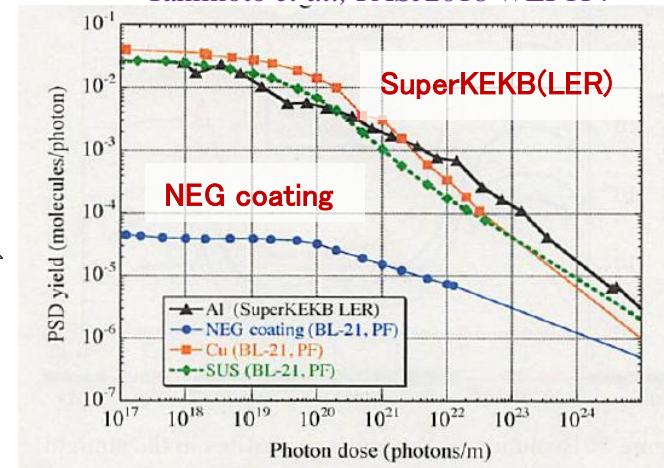


局所型排気

概念図



Tanimoto *et al.*, PASJ2018 WEP114



2024/8/1

加速器学会年会 山形

*NEG: Non Evaporable Getter
 (非蒸発型ゲッター)

18

放射光

● 中間まとめ

● 熱負荷

- SRマスクは適切に設置し、高さには十分余裕をみましょう。

- 放射光源(発光点)をしっかりと見定めましょう。

- ただし、ビームは設計軌道通りに通るとは限りません。ビームの軌道(COD、バンプ等)には注意を払いましょう(特にスタディ時とか)。

- 冷却水路、構造をしっかりと考えましょう。

● ガス負荷

- 表面は清浄に。表面酸化膜は取り除く。

- SRマスクの配置等に合わせ効率の良い排気方法を選択しましょう。

- コンダクタンスの小さいビームパイプには η が小さいNEGコーティング等が有用です。

● シミュレーションソフトを活用しましょう。

- 昨今はSynRad+、MolFlow+といった無料の優れたソフトが使用できます(CERNで開発)。

<https://molflow.web.cern.ch/>



加速器の真空システム

● 真空システムの主要課題(チャレンジ)

- シンクロトロン放射光(電子、陽電子リング)
 - 熱負荷、ガス負荷 ⇒ 機器発熱、圧力上昇
 - パイプ壁からの電子(光電子)放出 ⇒ ビーム不安定性
 - 放射線の発生
- 高エネルギービームに伴う電磁波、壁電流
 - 高次高周波(Higher Order Mode, HOM)の励起 ⇒ 機器の発熱
 - 機器のインピーダンス ⇒ ビーム不安定性
 - 放電 ⇒ 機器の発熱、圧力上昇
- 電子、イオンの発生
 - 電離イオン ⇒ ビーム不安定性(e^- ビーム)
 - 光電子、二次電子放出・増幅 ⇒ ビーム不安定性(e^+ ビーム)
- ビームと物質(機器、ダスト粒子)との衝突
 - ビームの衝突 ⇒ 機器の損傷、溶融、放射化
 - ビームエネルギーの損失 ⇒ ビームロス

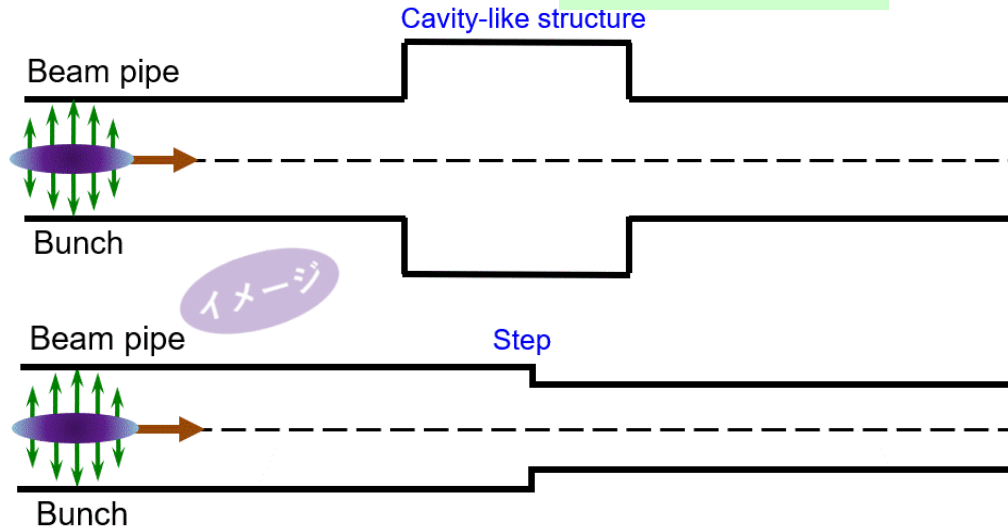
高次高周波

● 高次高周波(HOM)の励起

- 高エネルギー荷電粒子のかたまり(バンチ)は電磁波を伴う。
- パイプの導電率が悪い、または断面形状に変化があるとHOMが発生。→**ビームエネルギーの一部がHOMのエネルギーとなって損失。**
- 失われるエネルギーはビーム電流の2乗、バンチ間隔、ロスファクターに比例。ロスファクターはバンチ長にほぼ反比例。

$$P = k(\sigma_z) I^2 \tau_b \quad k(\sigma_z) \propto \frac{1}{\sigma_z}$$

P : 損失パワー[W]
 k : ロスファクター[V/C]
 I : 電流[A]
 τ_b : バンチ間隔[s]
 σ_z : バンチ長[m]



例えば、

$$k = 1 \text{ V pC}^{-1}, I = 1.5 \text{ A}, \\ \tau_b = 4 \text{ ns (2 RFバケット) では} \\ P = 9 \text{ kW}$$



- **コンポーネントの発熱、放電 ⇒ 故障、ガス放出**
- **捕捉モード ⇒ ビーム不安定性**

※ パイプのカットオフ周波数よりも低い周波数のHOMは捕捉される(捕捉モード)。高い電磁波はパイプ内を伝搬する。
※ バンチ長が短いほど高い周波数成分を持つHOMが発生する。

高次高周波

● 高次高周波(HOM)の励起

● 基本的な対策

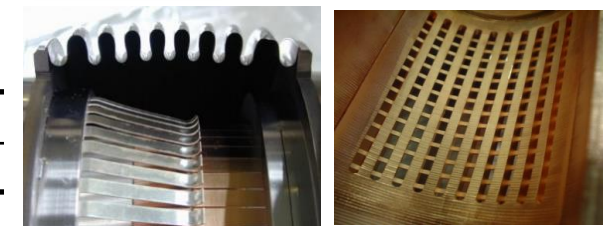
- 導電率の良い材料を用いる(銅、アルミ、または内面銅コーティング、など)。
- 断面変化を極力減らす。RFシールドの装備(ベローズ、ポンプポート)。
- 滑らかな断面変化にする(テーパ構造)。
- HOM吸収体(SiC, フェライトなど)の導入。

S.Terui *et al.*, NIMA
1053 (2023) 168371

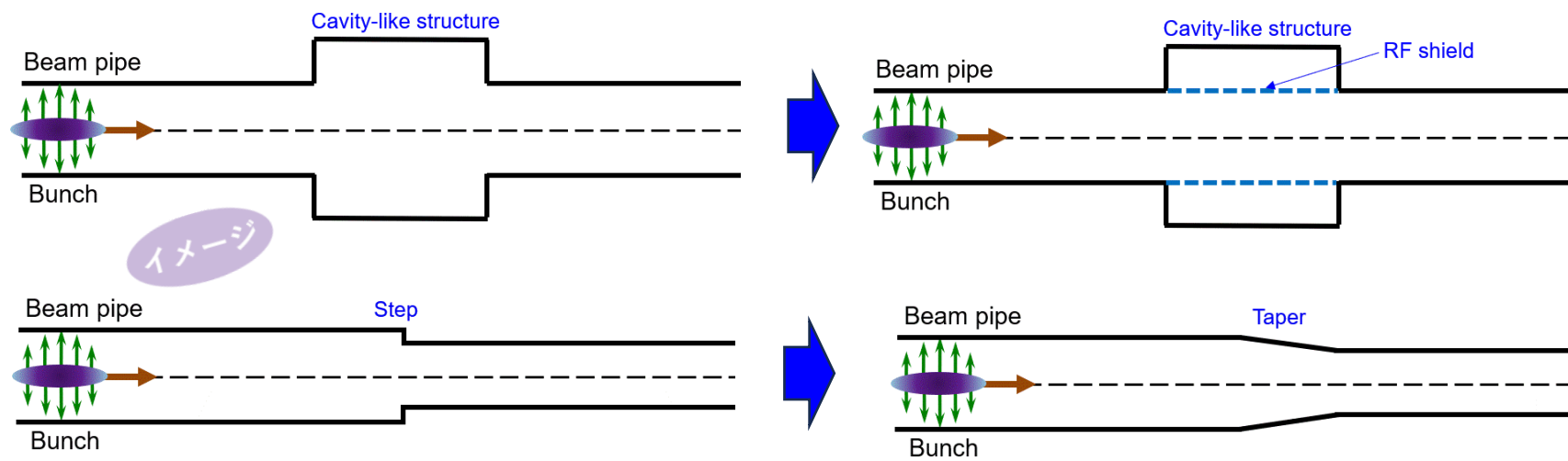
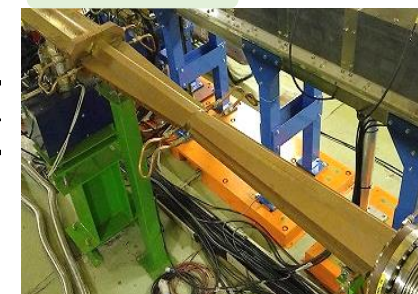
HOM吸収体(フェライト)



RFシールド



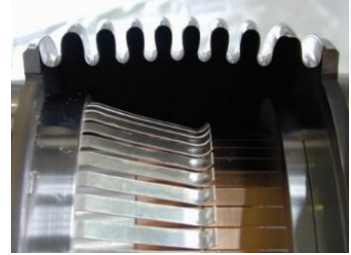
テーパ管



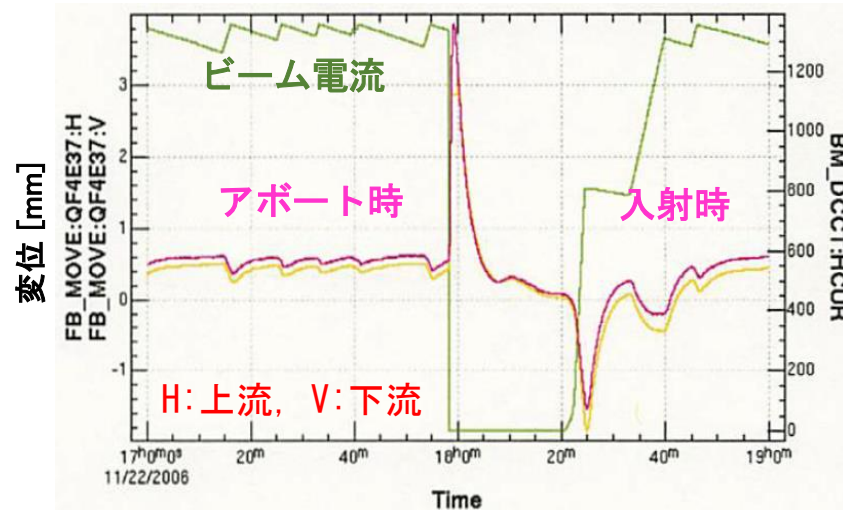
高次高周波

●トラブル例:ベローズ破損 [KEKB]

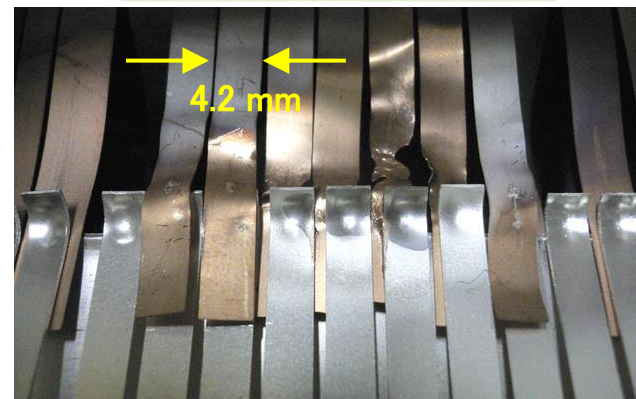
- アーク部で頻繁に発生。例えば2006年には4回ぐらい。
- 偏向電磁石の下流側が多かった。
- ↳ SRの影響でビーム入射時やアポート時、ビームパイプの水平方向の動きが大きい。～4 mm。
- 温度の高かったベローズを調べると、内部のフィンガー(BeCu)が鈍り、変形して、スプリングフィンガーとずれていた。
- ビームパイプの変位(SRによる熱)→ベローズのオフセット(横ずれ)→フィンガーのズレ、接触不良、破損→HOMの発生、侵入→発熱→さらなる破損、発熱
- ビームパイプやベローズの横方向の動きをできるだけ抑制する金具を取り付けた。



ベローズチャンバーのフランジ変位の例



ベローズ内部(外側から見る)



コンタクトフィンガーとスプリングフィンガーがずれている！

ベローズ内部

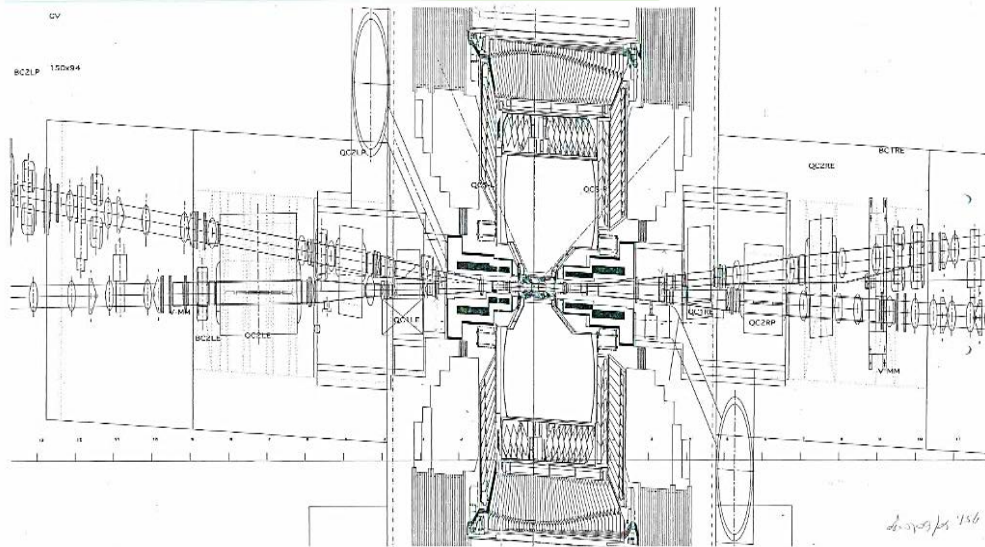


高次高周波

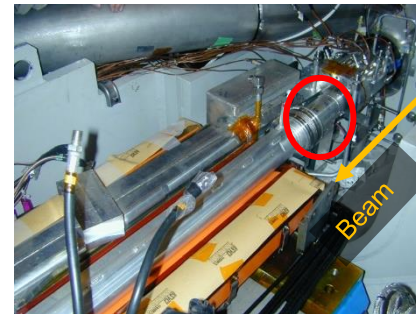
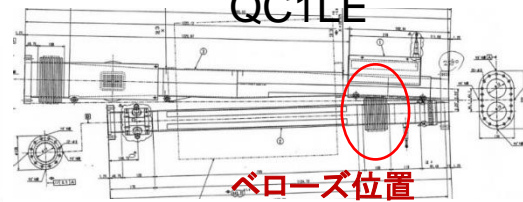
●トラブル例:IR部ベローズ破損 [KEKB]

- IR部(衝突点部)はビームパイプの構造が複雑。様々なビームパイプ径。断面の変化が多い。ビームがビームパイプの中心を必ずしも通らない。⇒HOMの宝庫。
- 衝突点ビームパイプに”共鳴構造”(両端のSRマスクの間)がありバンチフィルパターンを制限した。
- ベローズ等コンポーネントの発熱等が頻繁にみられた。
- (熱サイクルで?)ベローズ内金具が外れ、ギャップが生じ、HOMが発生および侵入→発熱→傷口が広がり、更に発熱。→フィンガーも鈍り変形し、更に発熱→結局、外側金具の溶接部でリーク。
- 溶接部を増やすなど構造を強化した改良型ベローズに交換。

IR部の断面図



QC1LE



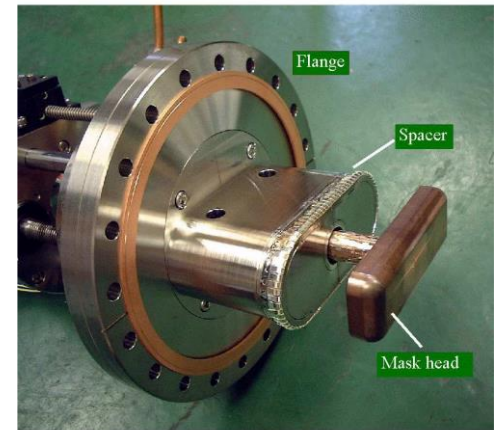
ベローズ内部



高次高周波:可動マスク(コリメータ)

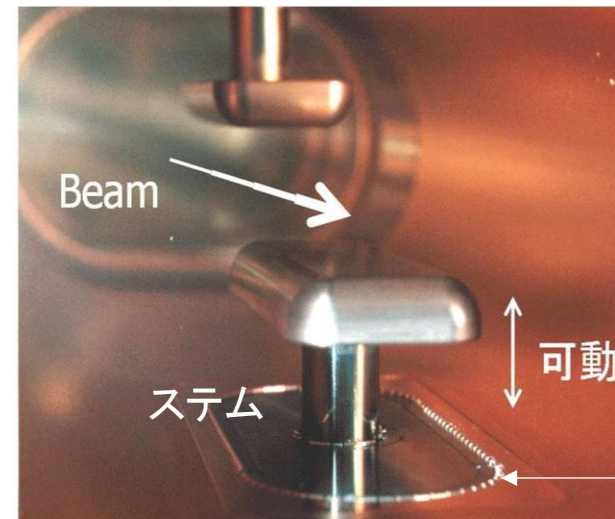
- KEKB時代の可動マスクの例 [KEKB] 末次 他、高エネルギーニュース(2001)
 - 可動マスク(コリメータ):周回するビーム(バンチ)のハローをカットし、測定器のバックグラウンドを低減する、衝突型加速器では重要な機器の一つ。
 - ハローをカットするための物質(ヘッドと呼ぶ)をビームのすぐ傍まで近づける。
↳ 必然的に強い高次高周波(HOM)を発生。
 - 最初のKEKB用可動マスク(Ver.1)は単純な構造だった。ビームパイプから金属のブロックが飛び出ている。ステムで位置をリモートで調整。
 - 今から考えると恐ろしくて設置できない。

Ver.1可動マスク(真空側)

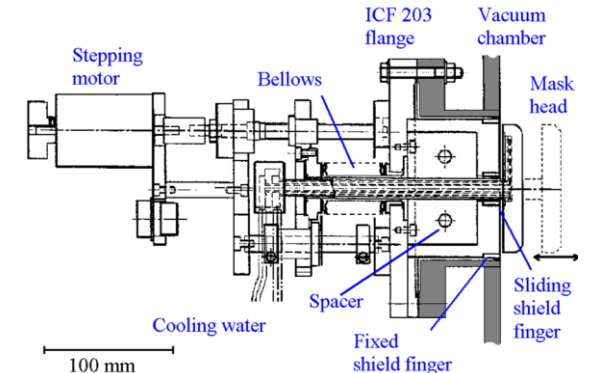


垂直方向Ver.1可動マスク内部

ヘッド: 80 mm x 40 mm x t15

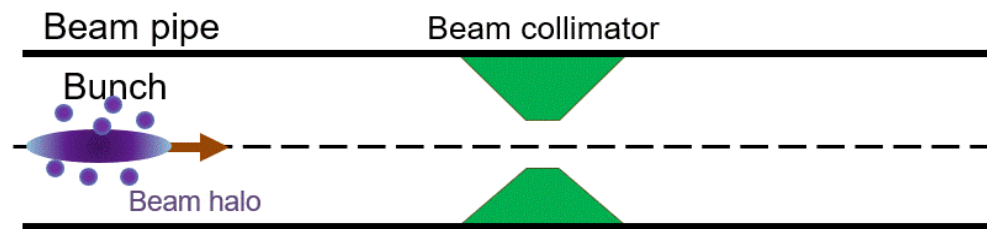


Ver.1可動マスク断面構造



イメージ

ビームコリメータ(可動マスク)の概念図



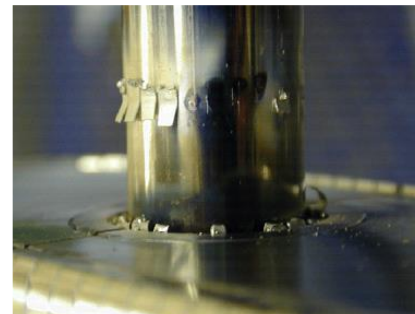
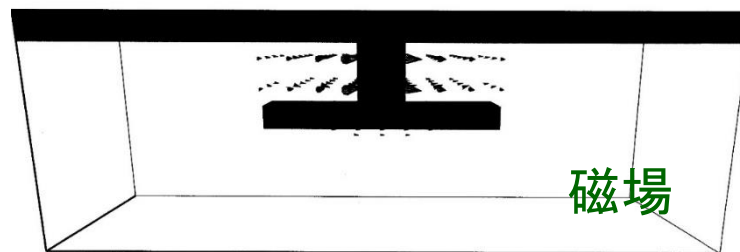
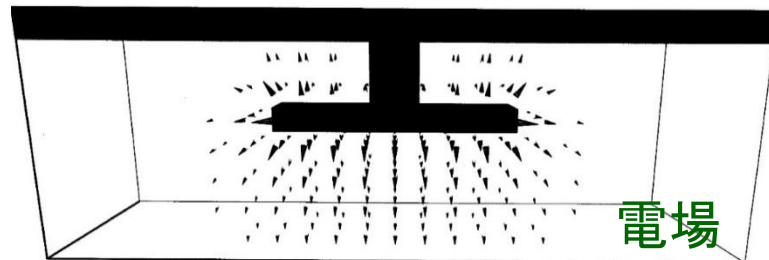
ヘッド高さの微調が必要

高次高周波:可動マスク(コリメータ)

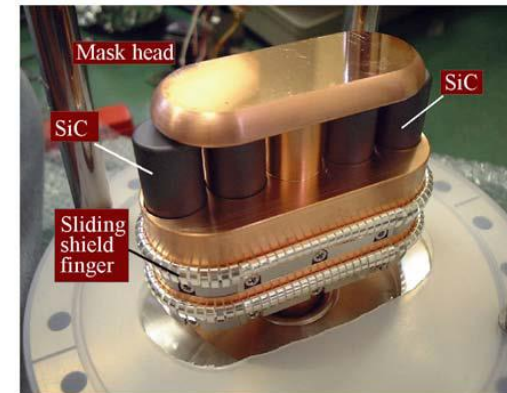
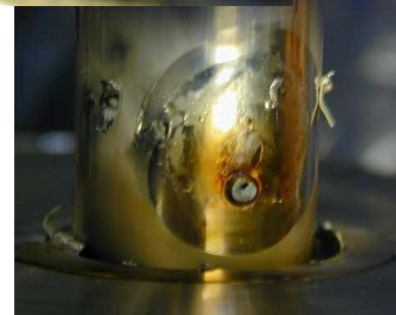
● Ver.1、Ver.3可動マスク [KEKB]

- ビーム電流～数百mAで**ステム部根本で放電、発熱、リークが多発。**
- 改めて計算してみると可動マスク部に周波数～660 MHzの捕捉モードが発生。Q値は2,000程度。
- **ステム周囲に磁場が巻き付き、ステム表面に数10 kA/mの電流が流れる。**
 - ➡ **摺動部(フィンガー部)で放電、発熱、溶融。**
- ヘッドをビームに近づけると、バンチのシンクロトン振動を引き起こした。
- SiC(HOM吸収体)を備えたタイプなど改良を加えたが失敗。(Ver.3)

捕捉モードの電場と磁場(Ver.1) by MAFIA

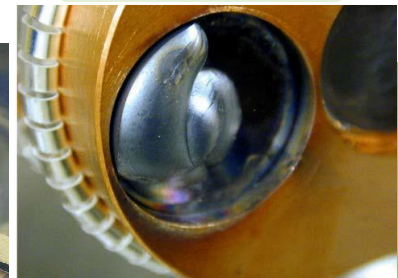


ステム根元部の放電、リーク(Ver.1)



SiC付きの改良型(Ver.3)

SiCの破損(Ver.3)

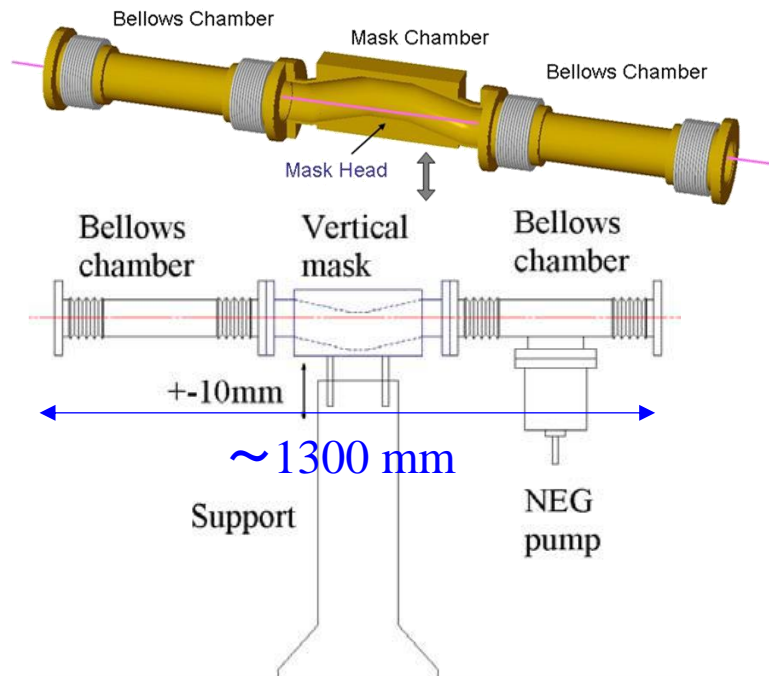


高次高周波:可動マスク(コリメータ)

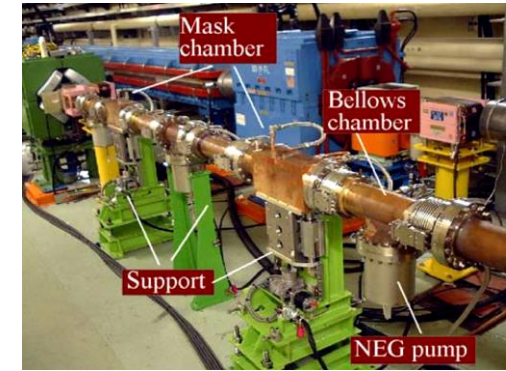
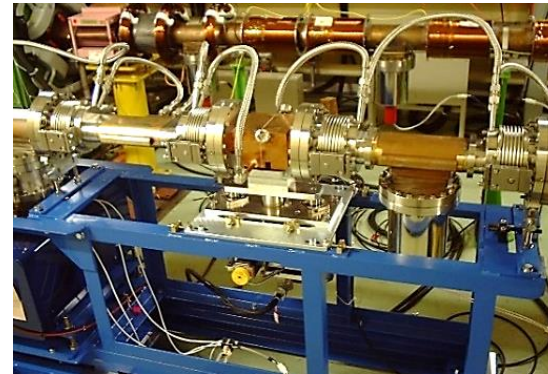
● Ver.4可動マスク [KEKB]

- 結局、捕捉モードが発生しない、Ver.1, 3とは全く異なる構造を採用(RFグループのご助言、ご協力)。
 - “への字”チェンバーを移動させる。断面は変化しない。
 - HOMは発生するが、上流、下流に伝搬していく。
- 結構設置スペースが必要(～1300 mm)となったが、可動マスク自体の放電や発熱、リークは無くなった。

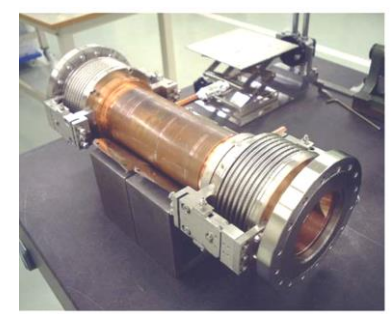
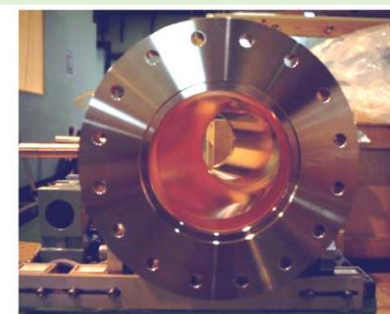
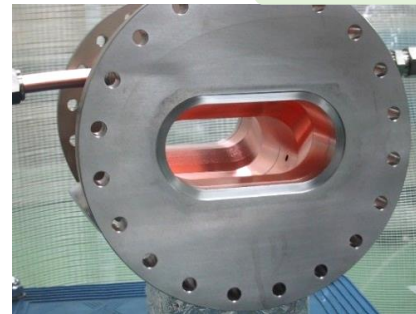
Ver.4垂直方向可動マスク概念図



Ver.4垂直方向可動マスク



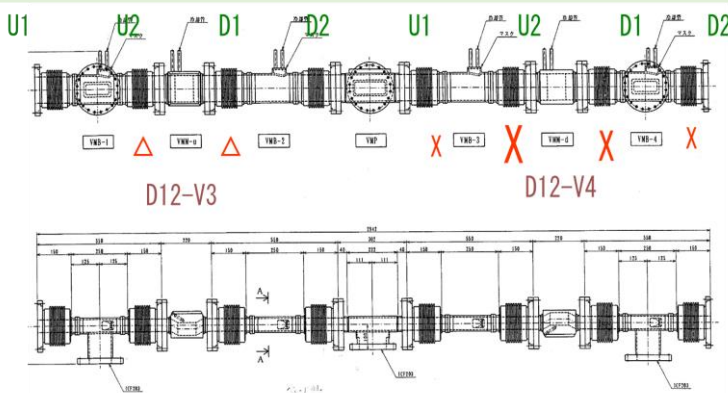
マスクチェンバー、ベローズチェンバー(Ver.4)



高次高周波:可動マスク(コリメータ)

- Ver.4可動マスク [KEKB]: 近隣機器の発熱
 - しかし、近隣のベローズやNEGポンプの発熱を誘引。
 - ベローズを加熱し、RFシールドフィンガーが損傷。
 - NEGポンプの発熱→ガス放出→圧力上昇。
 - 発生するHOMは、構造上TEモード(ビーム方向の磁場成分を持つ)が主なのでポンプポートのスロット状RFシールドやフィンガー型RFシールドを通過しやすい。
 - スロット状のRFシールドはビーム(バンチ)そのものを作る電磁場(TEMモードライク)には効果的。
 - ポートに小さい丸穴が多数あいたRFシールドを追加。でもHOMはさらに遠くへ。。

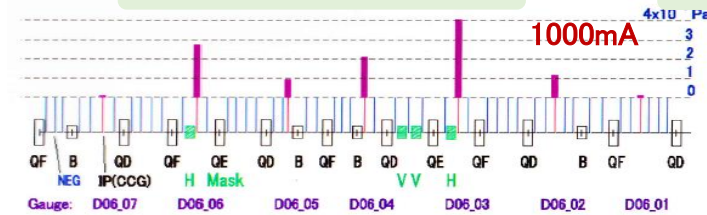
Ver.4垂直方向可動マスク配置とベローズの発熱場所



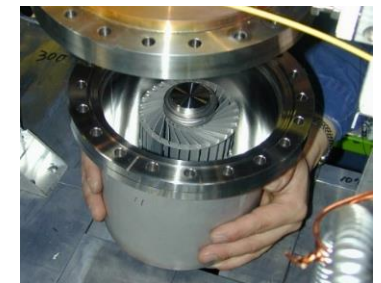
損傷ベローズの内部



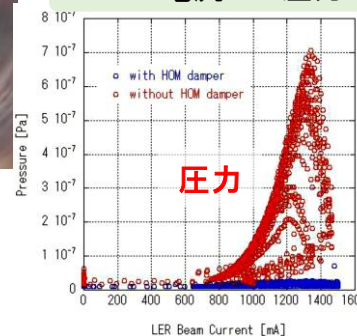
可動マスク近くの圧力分布



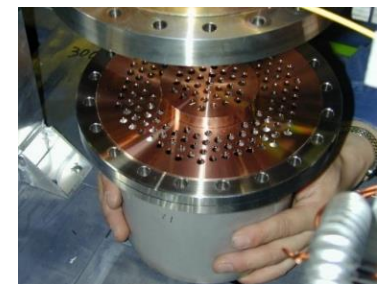
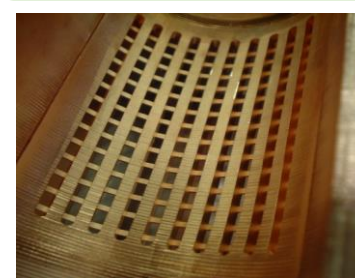
穴付きRFシールドガスケットへの交換



ビーム電流 vs. 圧力



ポンプポートのRFシールド (ビーム側はスロット状)



高次高周波:可動マスク(コリメータ)

● Ver.4可動マスク [KEKB]:近隣機器の発熱 Y. Suetsugu et al., NIM-PRA, 513 (2003)

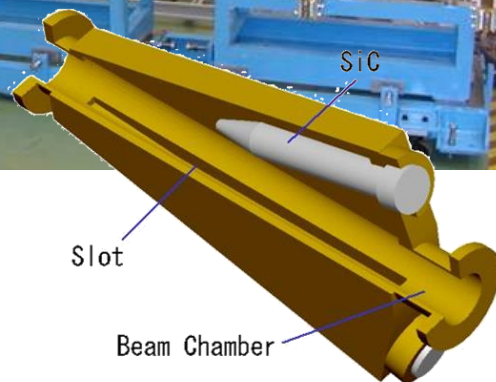
● 対策1

- TEモードを吸収するHOMダンパーを設置。
 - LERの可動マスク区間の両端に設置。
 - 水平方向マスクに対応して上下に設置。
- ARES空洞で使用している砲弾型SiCを使用。
(RFグループのご協力)

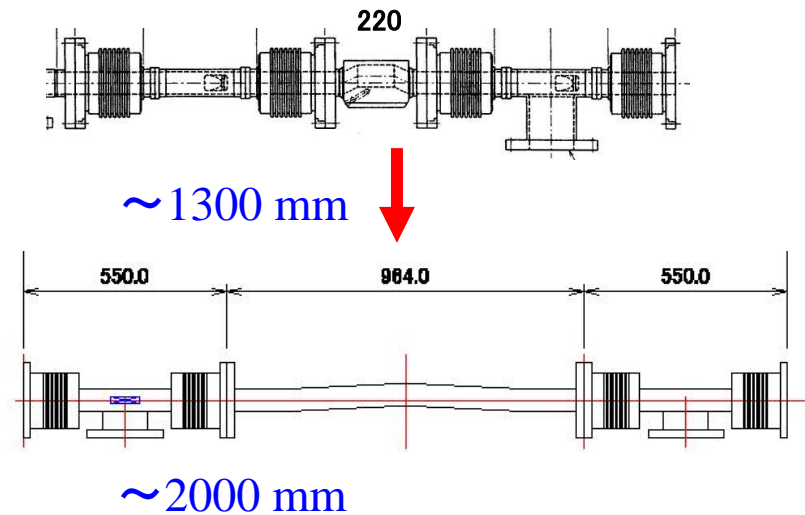
● 対策2

- 可動マスクチェンバーのテーパ部分を長くし、発生するHOMの強度を下げた。
- ベローズの温度上昇はかなり緩和された。
- ただし、設置に必要なスペースはさらに増え、隣接して設置できない。

HOM吸収体を接続したVer.4可動マスク



長いテーパを持つチェンバーへの変更



バンチに伴うパルス電流

● バンチに伴う壁電流

- 高エネルギー荷電粒子のバンチは周囲に電磁波を伴う。
- ビームパイプ内壁にはバンチに伴ってパルス電流が流れる。
- バンチ長が短いほどピーク電流は大きい。

$$I_w = \frac{I \tau_b c}{\sqrt{2\pi\sigma_z}} \exp\left(-\frac{c^2 t^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

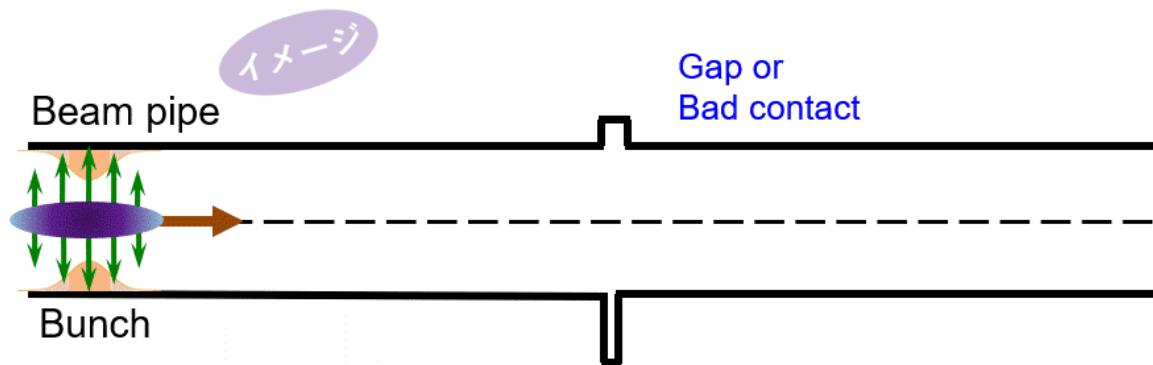
I_w : 壁電流[A]
 I : ビーム電流[A]
 c : 光速度[m/s]
 τ_b : バンチ間隔[s]
 σ_z : バンチ長 [m]
 t : 時間[s]

例えば、

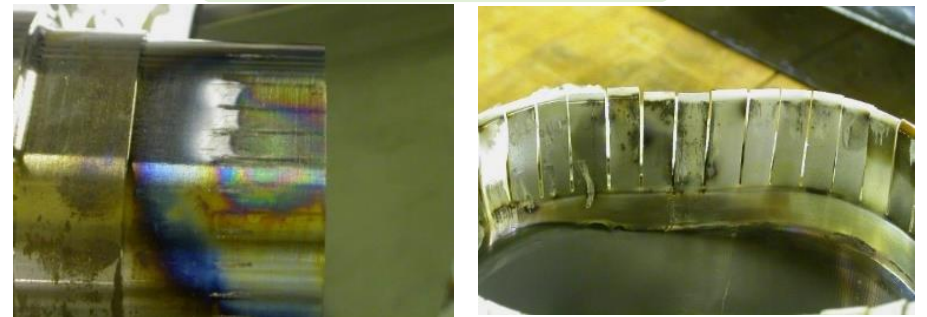
$I = 1.5 \text{ A}$, $\sigma_z = 6 \text{ mm}$, $\tau_b = 4 \text{ ns}$ では
 $I_w (\text{peak}) = 120 \text{ A}$



- 接触不良があると、放電、発熱。



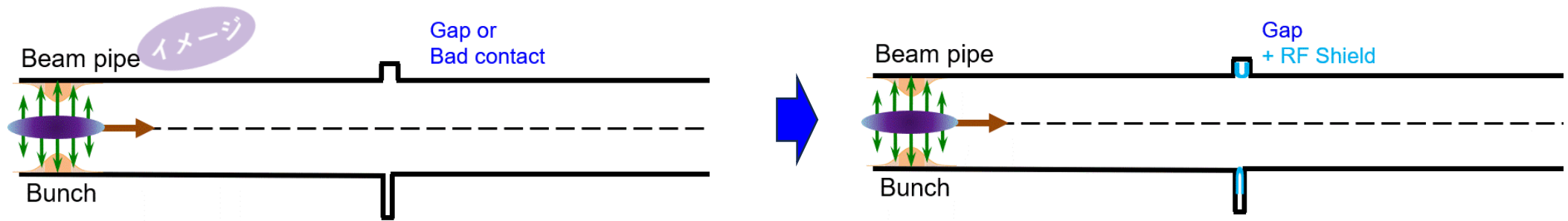
接触不良フィンガ一部の放電例



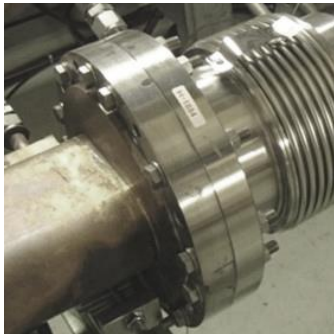
バンチに伴うパルス電流

● バンチに伴う壁電流

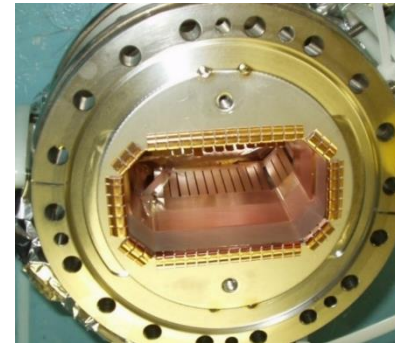
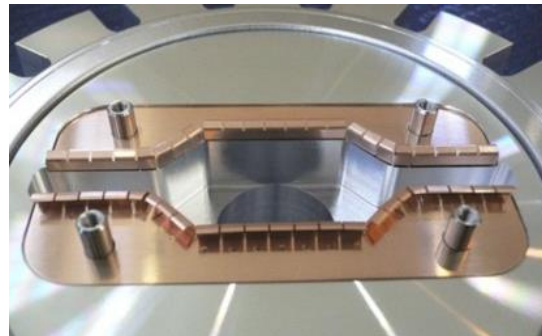
- 基本的な対策: RFシールド
 - ギャップをつくらない。埋める。
 - フィンガーやメタルリングなどを挿入する。
- フランジ接続部には必須。



フランジ接続部



RFシールドフィンガー



フヘリコフレックスシール

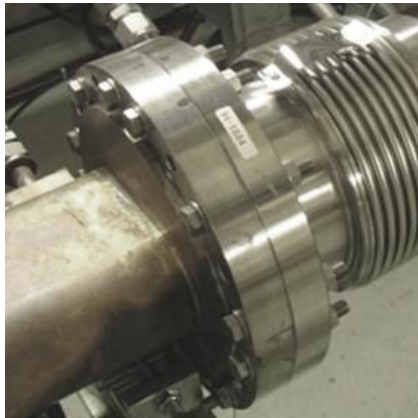


バンチに伴うパルス電流

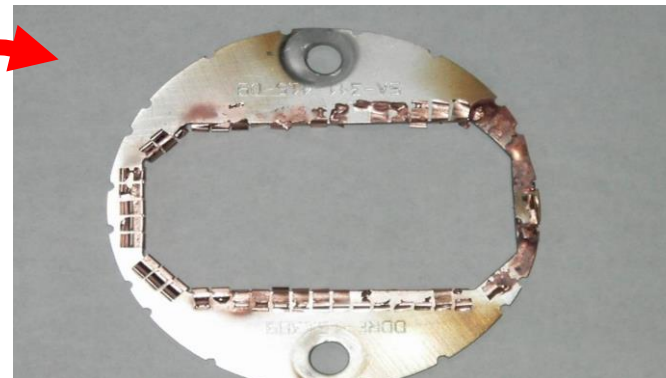
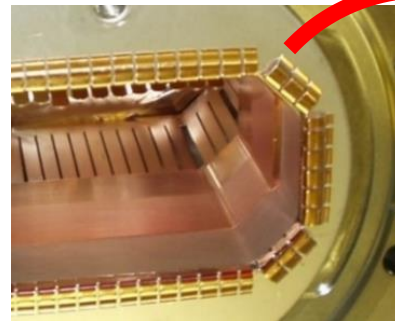
● トラブル例: フランジ部RFシールド破損

- RFシールドフィンガー: フランジ接続時の接触具合がよくわからない。
 - 真空シールはその外側にあるので見えない。リークテストではわからない。
 - 過熱してフィンガーの弾性がなくなると(例えばBeCuでは280°C程度)接触不良→さらに悪化する。
- KEKB、SuperKEKBでは基本的にビームパイプ断面と同じ真空シールを採用。
 - 真空シールがRFシールドを兼ねる。
 - リークテストでOK ⇒ 接触は十分と判断できる。

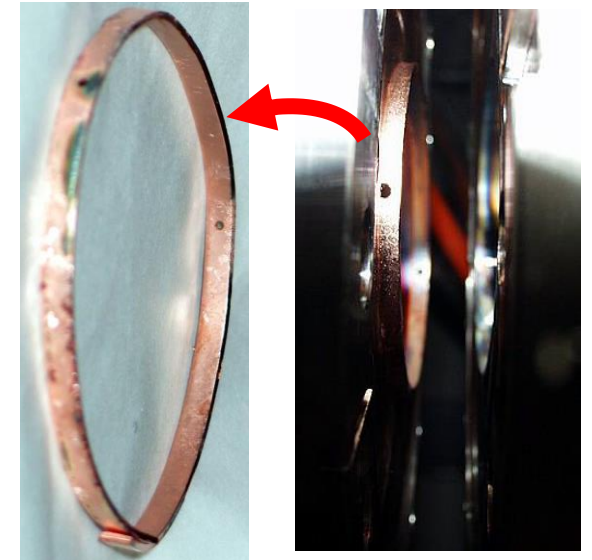
フランジ接続部



フランジ部RFシールド破損例(PEP II, SLAC)



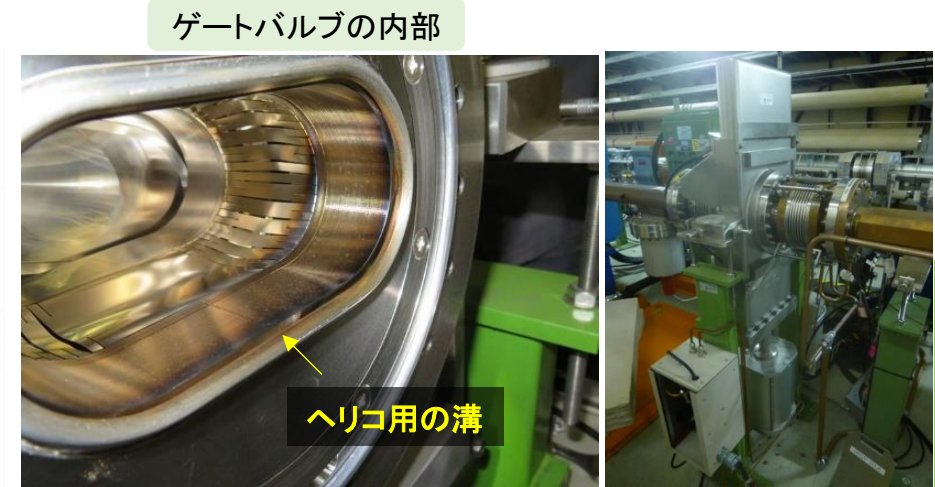
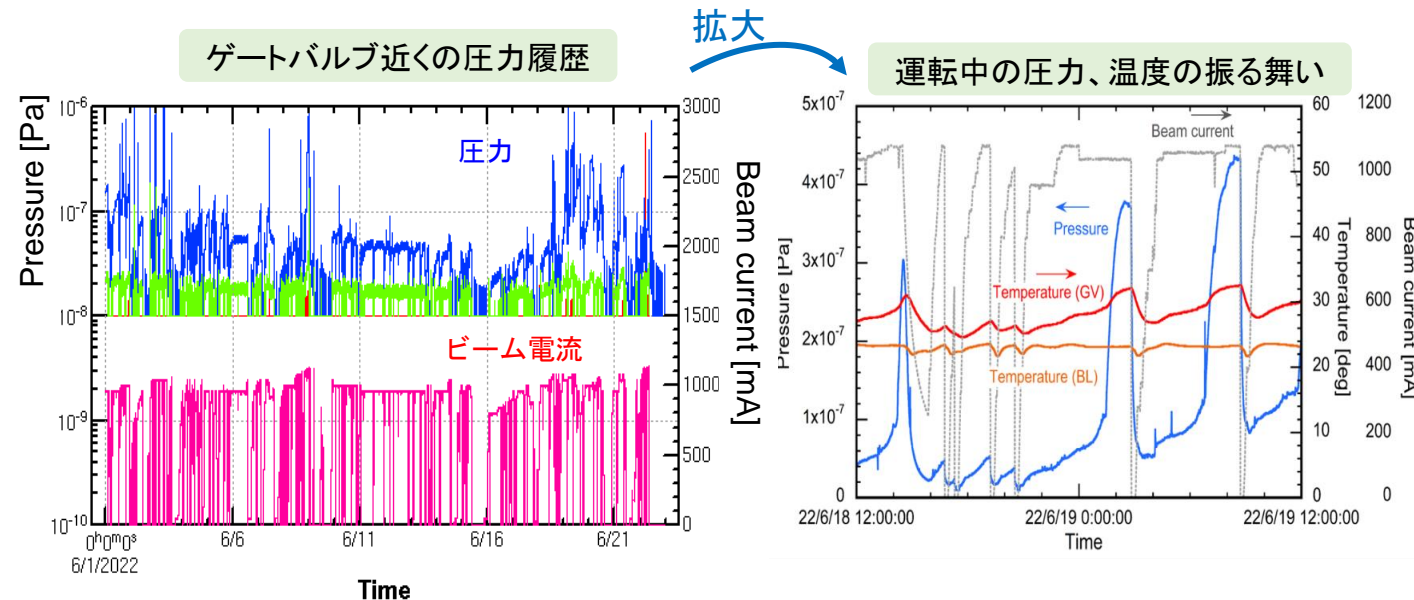
U. Wienands *et al.*,
EPAC2008



バンチに伴うパルス電流

● トラブル例: ゲートバルブフランジでの放電 [SuperKEKB]

- KEKB用ゲートバルブ: RFシールドはヘリコフレックス(メタルリング)。真空シールはその外側にある。
- 1000 mAを超えたぐらいから圧力の振る舞いが異常。同じ電流を蓄積中に途中で急に上昇する。
- ゲートバルブの温度とも相関あり。
- 内部を確認すると、ベローズ側のヘリコフレックス用の溝が所定より1 mm深かった。→接触不良
→放電、発熱→圧力の異常な振る舞い。
- 予備のゲートバルブ、正規のベローズと交換した。



高次高周波、壁電流

- 中間まとめ

- 高次高周波(HOM)

- 高次高周波は容易に励起されます。
 - 励起されるモードのタイプも大事です。捕捉モードには注意しましょう。
 - HOMはビームパイプ内を伝搬します。
 - ビームパイプ内はHOMだらけです。しかも周波数が高い(特にバンチ長が短い場合)。また、バンチフィルパターンでスペクトルが変わります。
 - 高次高周波は隙間を容易に通り抜けます。
 - 細かい隙間にも注意しましょう。ビームから直接見えないところも要注意です。

- 壁電流

- 微妙なギャップや接触不良があると容易に放電します。
 - 接続部の接触はしっかりとりましょう(接触圧を十分にとりましょう。)
 - KEKBのベローズでは100 g/fingerを目安にしました。

- シミュレーションソフトを活用しましょう。

加速器の真空システム

● 真空システムの主要課題(チャレンジ)

- シンクロトロン放射光(電子、陽電子リング)
 - 熱負荷、ガス負荷 ⇒ 機器発熱、圧力上昇
 - パイプ壁からの電子(光電子)放出 ⇒ ビーム不安定性
 - 放射線の発生
- 高エネルギービームに伴う電磁波、壁電流
 - 高次高周波(Higher Order Mode, HOM)の励起 ⇒ 機器の発熱
 - 機器のインピーダンス ⇒ ビーム不安定性
 - 放電 ⇒ 機器の発熱、圧力上昇
- 電子、イオンの発生
 - 電離イオン ⇒ ビーム不安定性(e^- ビーム)
 - 光電子、二次電子放出・増幅 ⇒ ビーム不安定性(e^+ ビーム)
- ビームと物質(機器、ダスト粒子)との衝突
 - ビームの衝突 ⇒ 機器の損傷、溶融、放射化
 - ビームエネルギーの損失 ⇒ ビームロス

電子ビームとイオンの相互作用

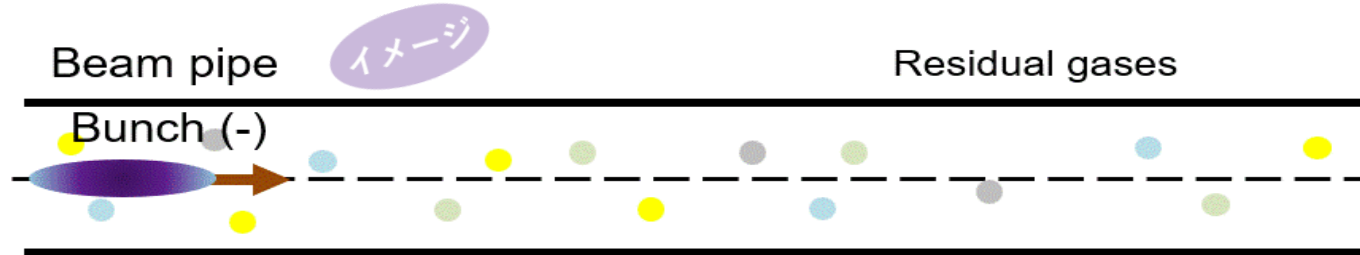
● ビームとイオンの相互作用 (電子リング)

- ビームと残留気体が衝突すると電離イオンが発生。
- ビームの条件により、ある質量以上のイオンがビーム軌道近傍に捕捉(トラップされる): **イオントラッピング**
 - ビーム寿命の減少。
 - 後続のバンチと相互作用。→ **不安定性: ビーム振動**
- トラップされなくても先のバンチが電場を作る。
 - 後続のバンチと相互作用 → **不安定性: 振動、エミッタンスの増大**

捕捉されるイオンの最小質量電荷比

$$\frac{A}{Q} = \frac{N_e}{n_b} \frac{r_p c \tau_b}{2\sigma_y (\sigma_x + \sigma_y)}$$

r_p : 古典電子半径[m], c : 光速[m/s]
 τ_b : バンチ間隔[s], N_e : 総電子数,
 n_b : バンチ数, $\sigma_{x,y}$: バンチ幅 [m]



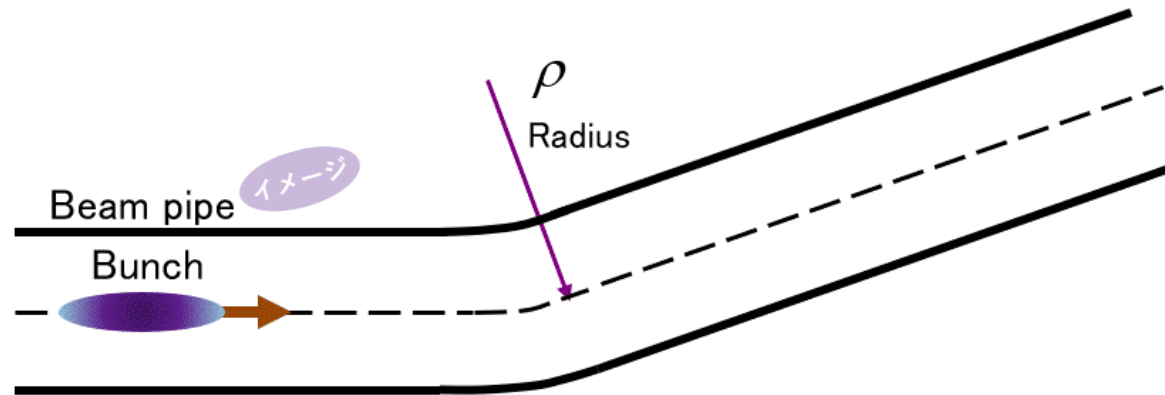
例えば:

KEKB: 1 A, $\tau_b = 6$ ns, $n_b = 1680$
 では $A/Q \sim 0.5$ 。ほぼすべてのイオンが捕捉される可能性あり。
 実際には、局所的に 10^{-6} Pa を超えると不安定性が観測される。

- 対策: 圧力を下げる、バンチ間隔をあける等。
 - バンチバイバンチフィードバックの開発が進みかなり抑えられるようになった。
- 運転開始初期に注意。
 - 運転再開後のビームによる焼きだし運転のビーム電流を制限する。

陽電子/陽子ビームと電子の相互作用

- **ビームと電子の相互作用 (陽電子・陽子リング)**
 - ビームパイプ内面に照射された放射光 → **電子(光電子放出)**
 - バンチで加速された光電子が壁に衝突 → **二次電子放出**
 - 二次電子が再度壁に衝突 → **増殖(電子雲生成)**

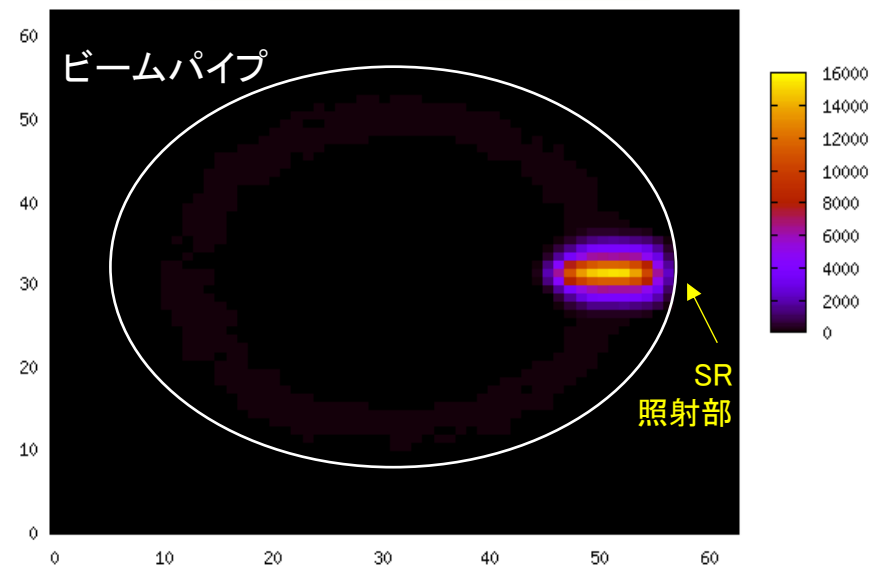
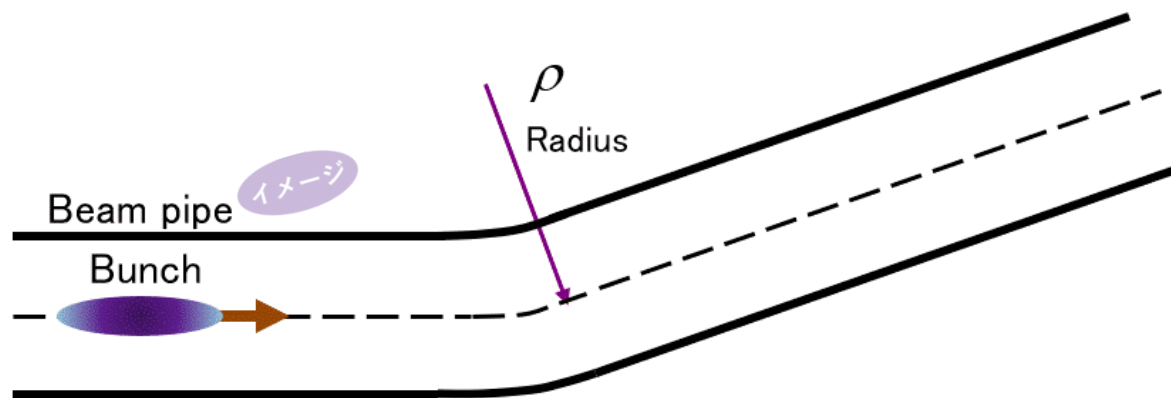


陽電子/陽子ビームと電子の相互作用

● ビームと電子の相互作用 (陽電子・陽子リング)

- ビームパイプ内面に照射された放射光→電子(光電子放出)
- バンチで加速された光電子が壁に衝突→二次電子放出
- 二次電子が再度壁に衝突→増殖(電子雲生成)

電子雲生成のシミュレーション



(K. Ohmi, KEK)

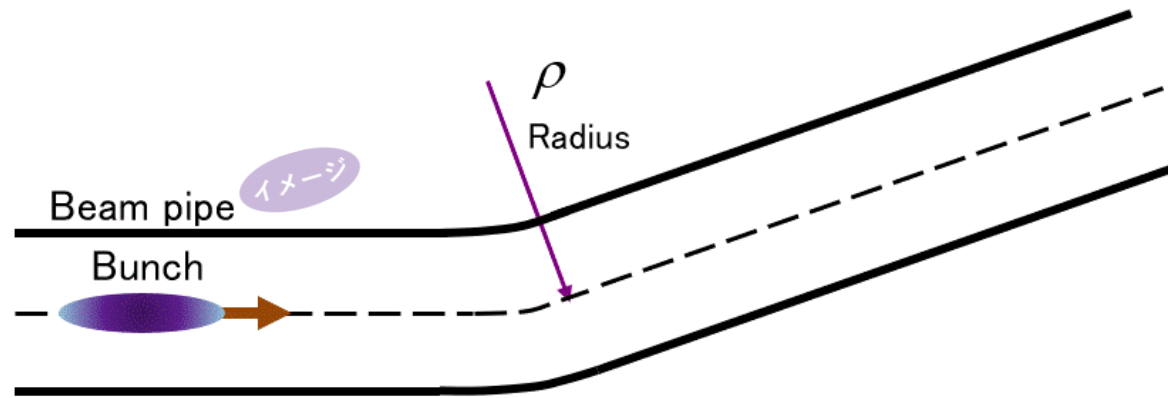
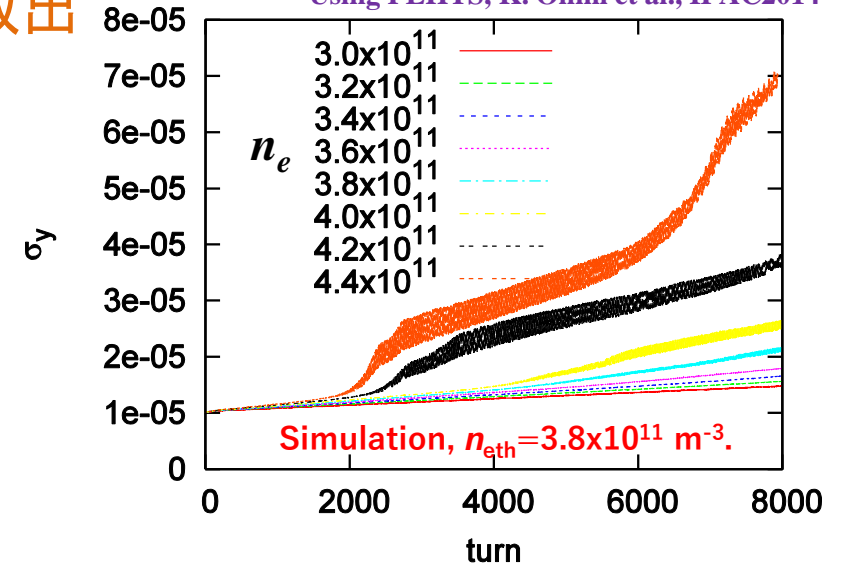
陽電子/陽子ビームと電子の相互作用

● ビームと電子の相互作用 (陽電子・陽子リング)

- ビームパイプ内面に照射された放射光 → **電子(光電子放出)**
- バンチで加速された光電子が壁に衝突 → **二次電子放出**
- 二次電子が再度壁に衝突 → **増殖(電子雲生成)**

ビームサイズブローアップシミュレーション

Using PEHTS, K. Ohmi et al., IPAC2014

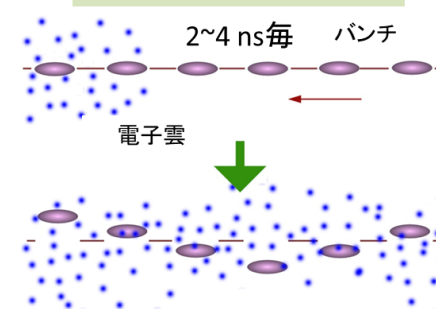


● 電子密度が閾値を超えると**電子雲不安定性**を励起。

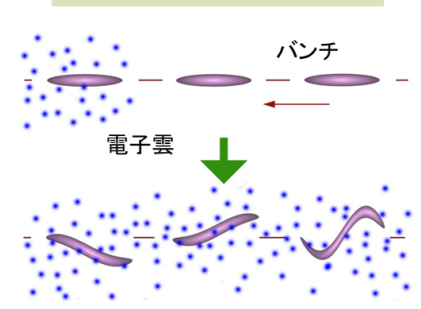
- 後続のバンチが不安定になる(揺れる)。
- バンチ内の粒子が振動する。
 - 衝突加速器ではルミノシティが低下。

● 近年の大強度陽子、陽電子蓄積リングでは大問題。

結合バンチ不安定性



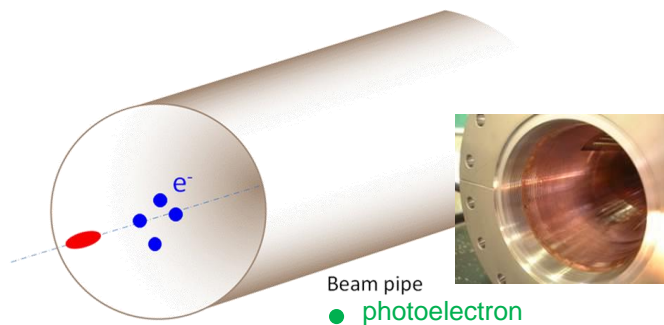
ヘッドテイル不安定性



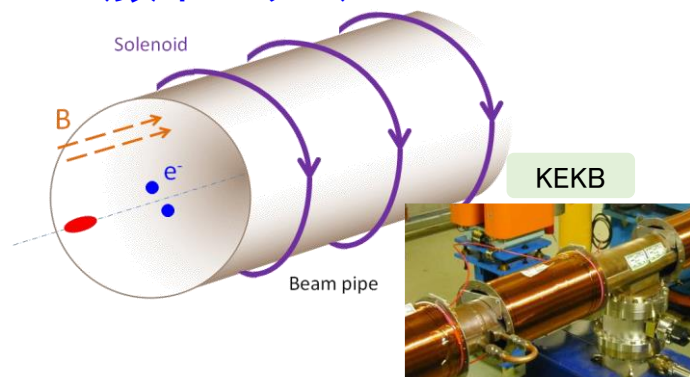
陽電子/陽子ビームと電子の相互作用

● 電子雲不安定性への対策

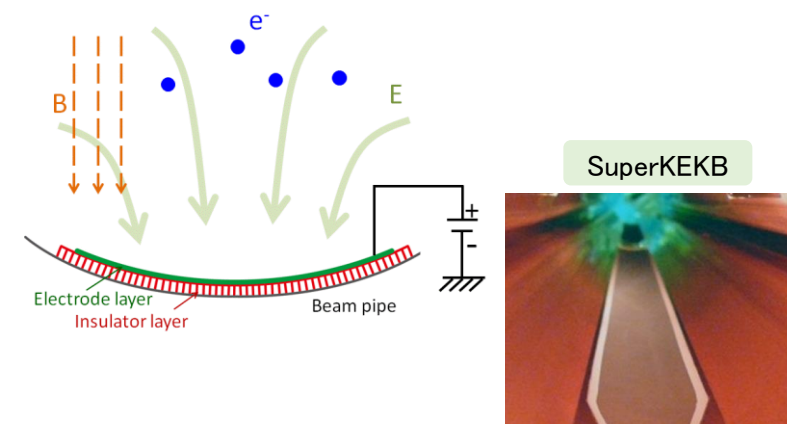
対策なし



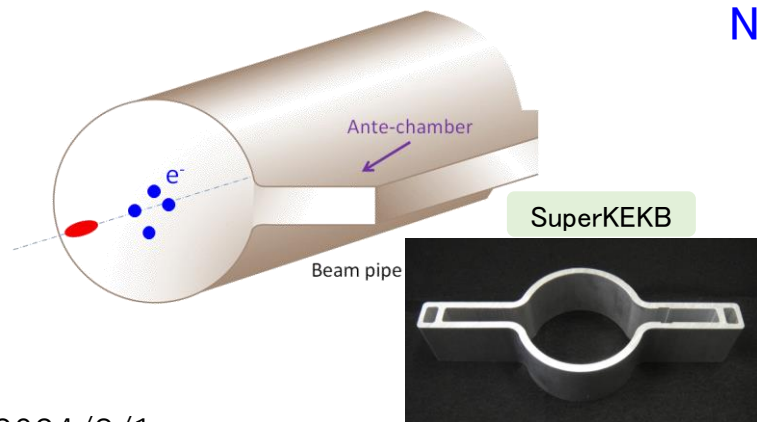
対策2: ソレノイド(軸方向)磁場
(数十ガウス)



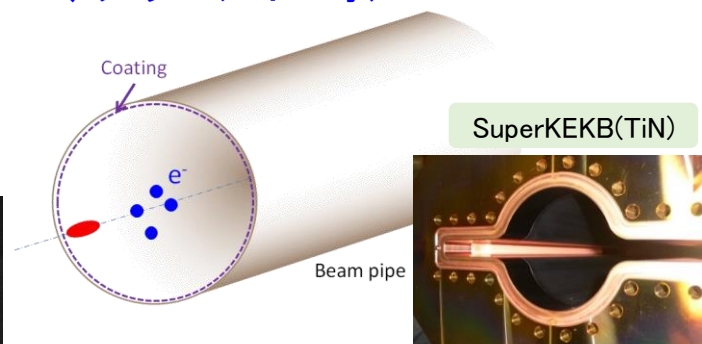
対策4: 電子クリアリング電極



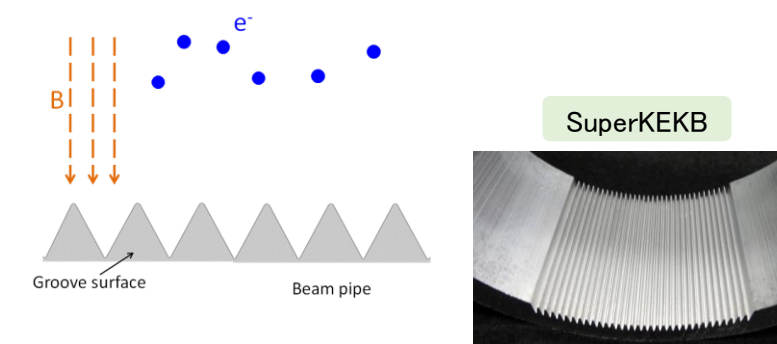
対策1: アンテチェンバー付
ビームパイプ



対策3: 二次電子放出率の小さい
物質のコーティング(窒化チタン、
NEG、グラファイト等)



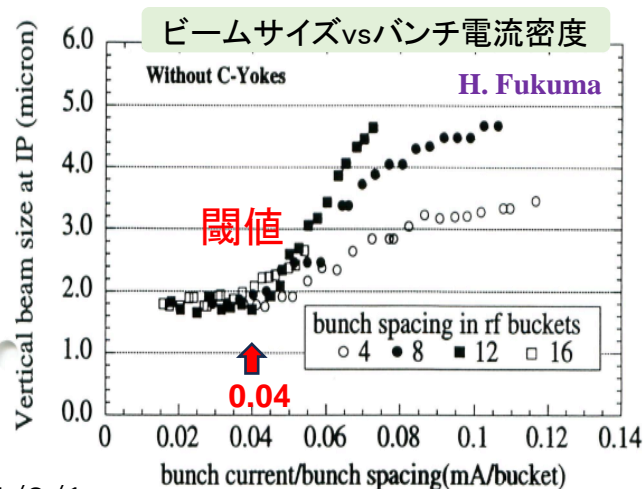
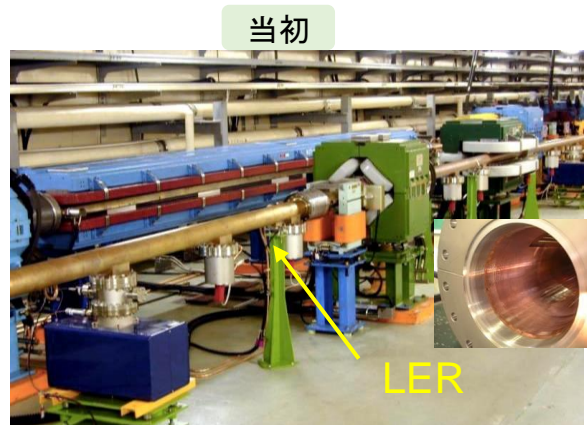
対策5: グループ構造



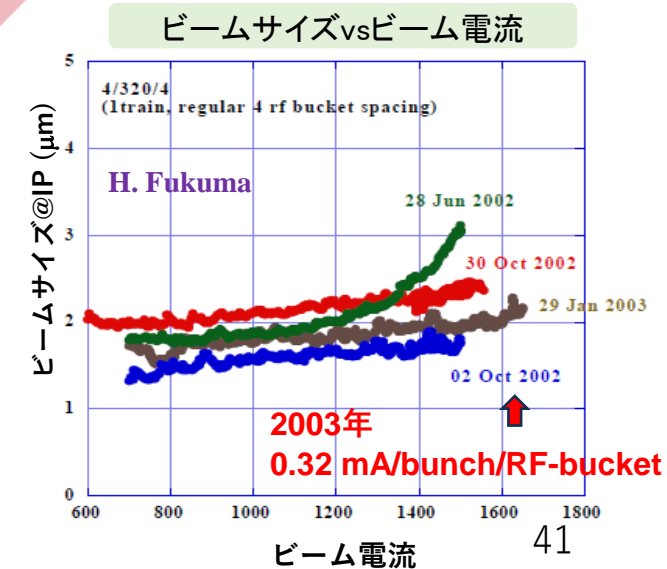
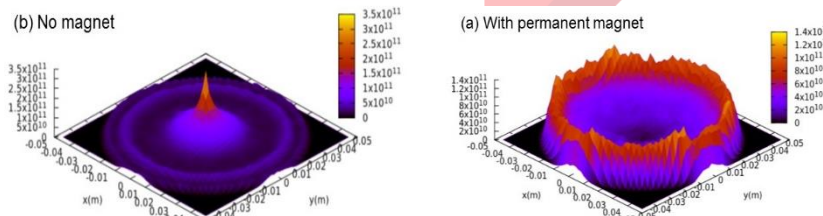
陽電子/陽子ビームと電子の相互作用

● KEKBの例

- 銅製の円断面ビームパイプ(1990年代、コーティングなし)。
- ソレノイドで対応していった。



ソレノイド磁場有るなしの電子密度分布シミュレーション例

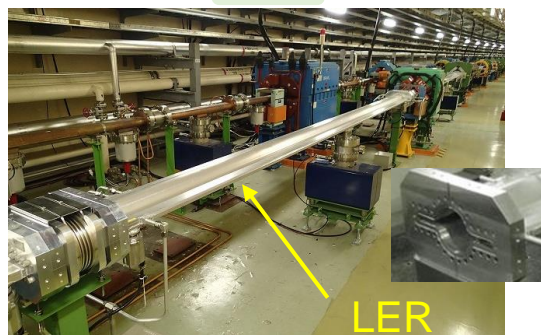


陽電子/陽子ビームと電子の相互作用

● SuperKEKBの例

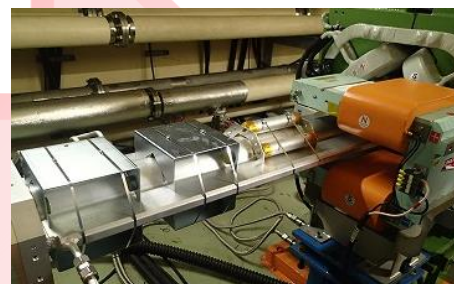
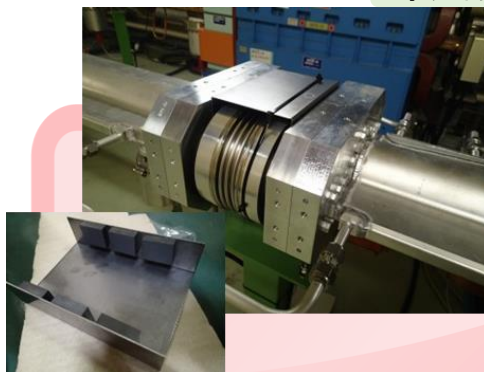
- 目標電子密度は 10^{10} m^{-3} 台。
- 当初、ソレノイド磁場以外(アンテチェンバー、TiNコーティング、グループ、電極)を装備。
- KEKB当初よりは緩和されたが不十分だった(放射光の影響、つまり光電子の影響が大きい)。
- 結局、永久磁石で軸方向磁場を加えた。

当初

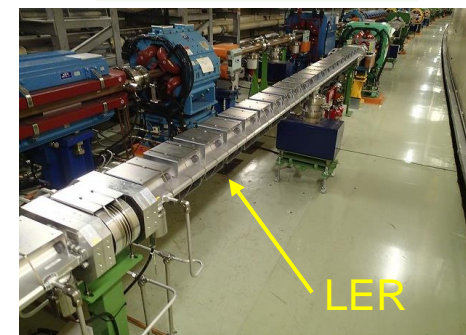


LER

永久磁石の取り付け

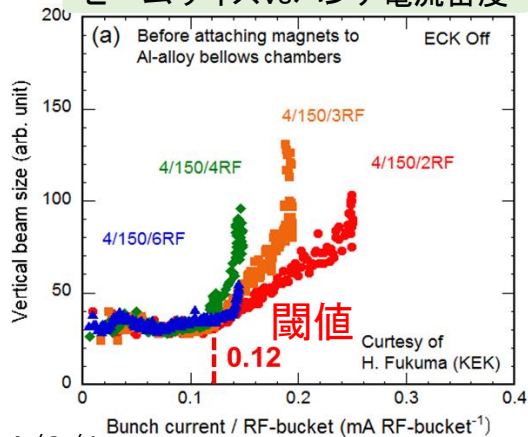


永久磁石取り付け後

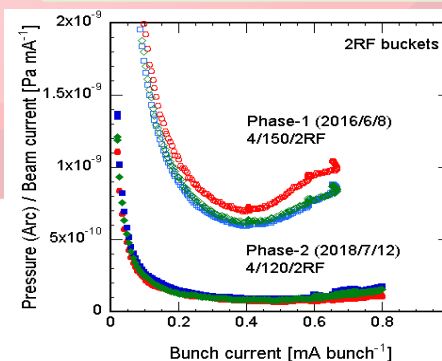


LER

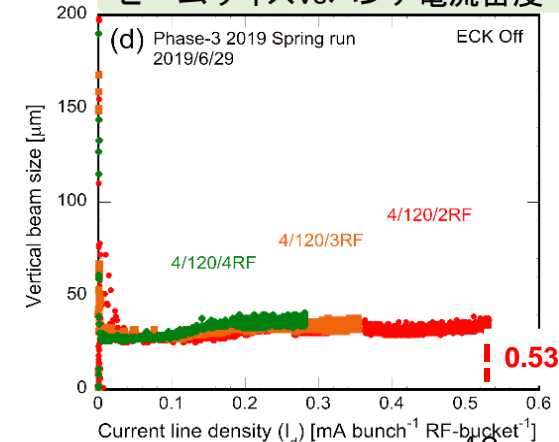
ビームサイズvsバンチ電流密度



永久磁石取り付け前後の圧力



ビームサイズvsバンチ電流密度



電子、イオンとの相互作用

● 中間まとめ

● ビームとイオン(電子ビーム)

- 近年のバンチバイバンチフィードバックの進歩によりかなり緩和されましたが、運転開始初期の圧力が高い時期に注意が必要です。
- バンチ間隔をあけるのが有効です。

● ビームと電子(陽電子・陽子ビーム)

- 電子雲不安定性は、1990年代～2010年代にかけて盛んに調べられ、その対策はかなり確立されました。
- 近年では、運転初期から二次電子放出率が低いNEGコーティングやグラフィイトコーティングが普及してきました。
 - 細いビームパイプではインピーダンスに注意が必要です。
- 放射光による光電子放出の評価も重要です。
 - シミュレーションソフト(SynRad+等)を活用しましょう。

加速器の真空システム

● 真空システムの主要課題(チャレンジ)

- シンクロトロン放射光(電子、陽電子リング)
 - 熱負荷、ガス負荷 ⇒ 機器発熱、圧力上昇
 - パイプ壁からの電子(光電子)放出 ⇒ ビーム不安定性
 - 放射線の発生
- 高エネルギービームに伴う電磁波、壁電流
 - 高次高周波(Higher Order Mode, HOM)の励起 ⇒ 機器の発熱
 - 機器のインピーダンス ⇒ ビーム不安定性
 - 放電 ⇒ 機器の発熱、圧力上昇
- 電子、イオンの発生
 - 電離イオン ⇒ ビーム不安定性(e^- ビーム)
 - 光電子、二次電子放出・増幅 ⇒ ビーム不安定性(e^+ ビーム)
- **ビームと物質(機器、ダスト粒子)との衝突**
 - **ビームの衝突** ⇒ 機器の損傷、溶融、放射化
 - **ビームエネルギーの損失** ⇒ ビームロス

ビームと物質との衝突

● 高エネルギービーム(電子・陽電子)の物質への衝突

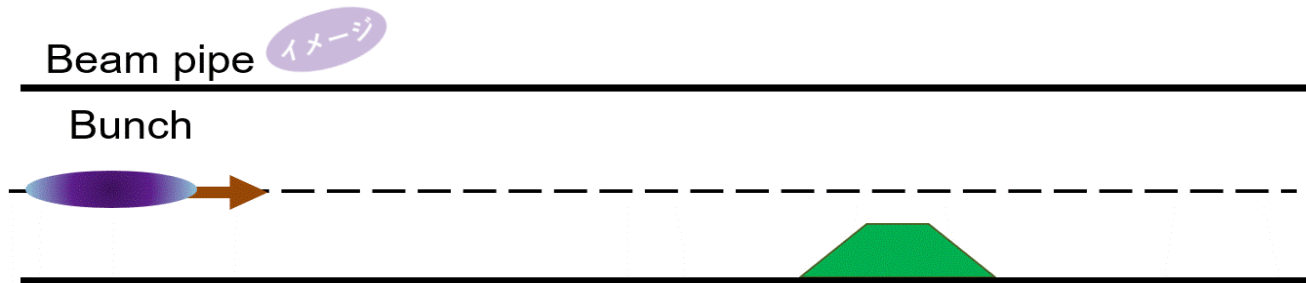
- 高エネルギービームが金属等の物質に衝突するとエネルギーが失われ、物質を加熱する。
 - 強力な”電子ビーム溶接機”
 - 制動輻射 → 電磁シャワーに発展しエネルギーを消費。

放射によるエネルギー損

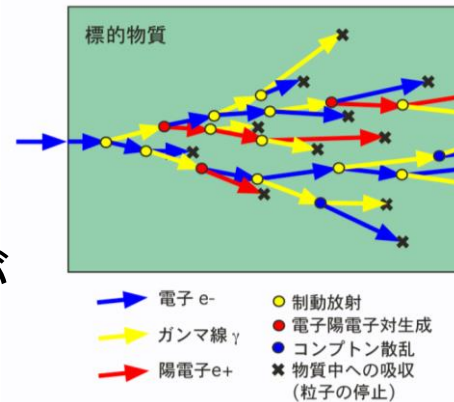
$$E = E_0 \exp\left(-\frac{x}{R_L}\right)$$

E : エネルギー
 E_0 : 初期エネルギー
 R_L : 放射長 $R_L = \frac{716.4 \text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot A}{Z(Z+1)\ln(287/\sqrt{Z})}$

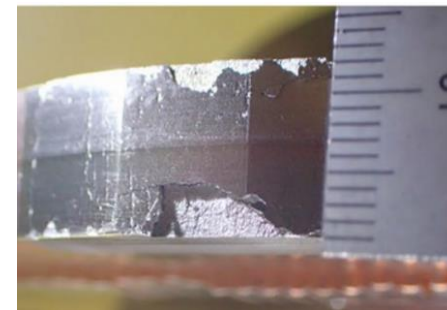
- 通常軌道なら衝突しないが、何らかの原因でビームが不安定になったり、蹴られたりすると衝突。
 - ↪ 物質の溶融、破損。また、核反応により放射化する。
- ビームパイプ内のダストと衝突することもある。



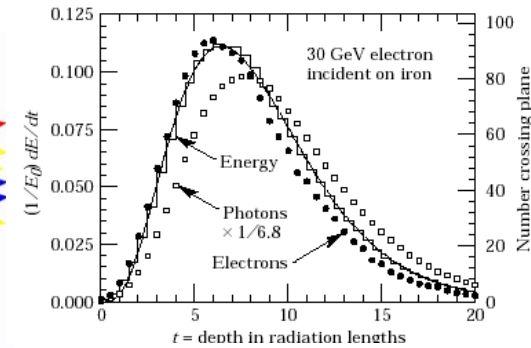
電磁シャワーの概念図
T. Kamitani, OHO2007



キッカー暴発によるコリメータヘッドの破損 (W) (SuperKEKB)



損失率 [(dE/dt)/E₀]



<https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/~morim/CR-Physics/Image37.gif>

コリメータの放射化 (SuperKEKB)

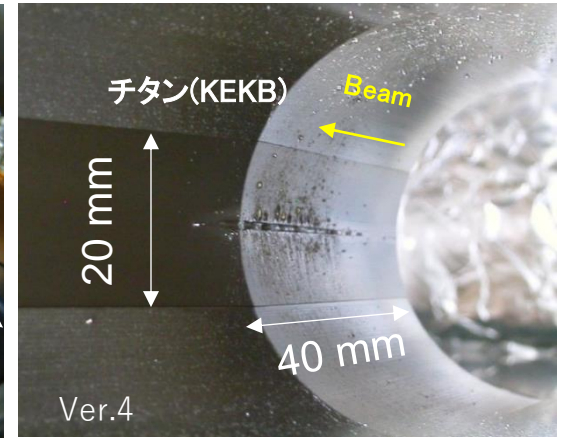
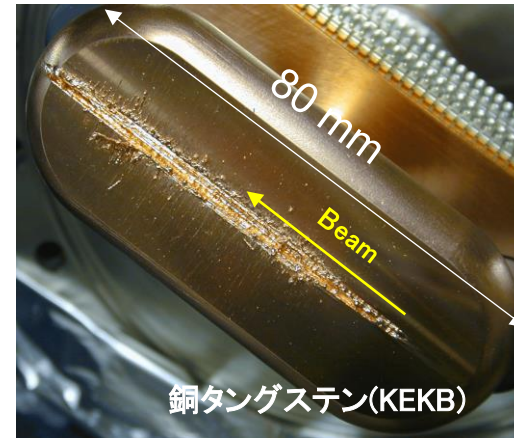


ビームの衝突：可動マスク(コリメータ)ヘッド

● トラブル例：可動マスク(コリメータ)ヘッド損傷 [KEKB、SuperKEKB]

- SuperKEKBでも続いている課題。 T. Ishibashi et al., PRAB, 053501 (2020)
- ビームとの距離が数mm程度と非常に近い(リング内で一番狭い)。
 - 自らを犠牲にして他の機器を守っている。
- 傷ができるとバックグラウンドが増えたり入射が阻害されたりする。→ヘッド交換が必要となる。
- 残留放射線は >10 mSvに達する場合もある。

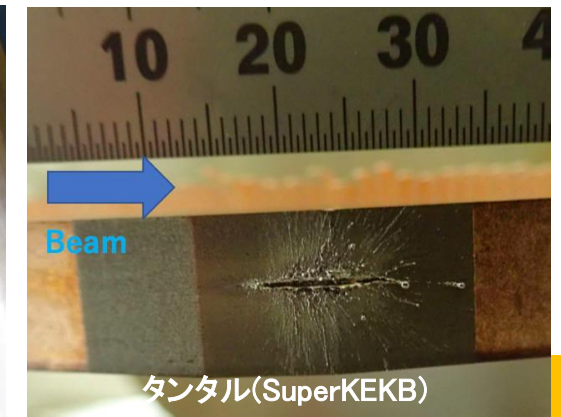
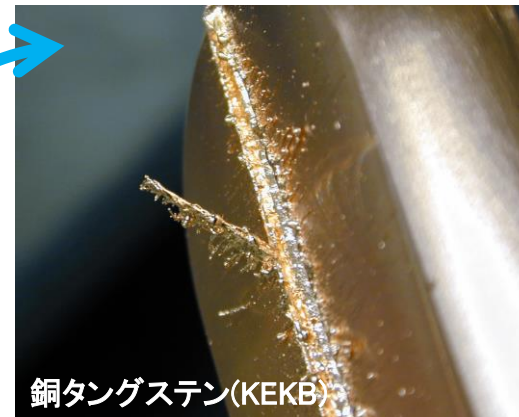
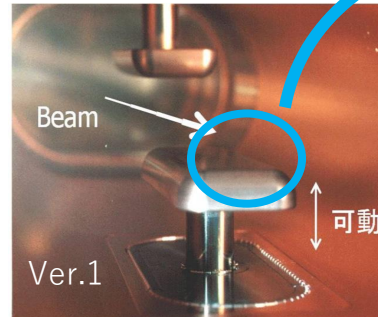
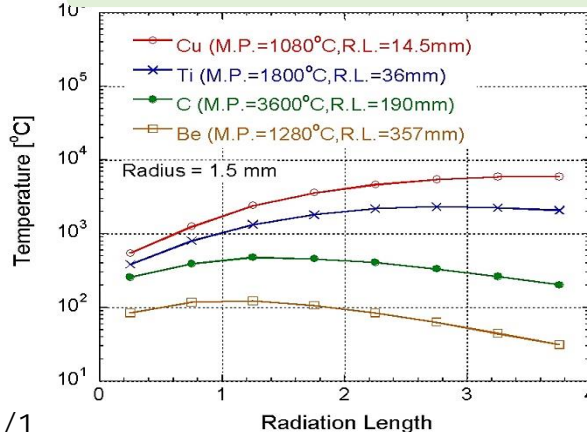
ヘッドの損傷



● 対策

- 損傷し難い材質を使用。 S. Terui et al., NIM-A, 2023
S. Terui et al., NIM-A, 2024
 - グラファイト(C)とか。ただし R_L は長い(18 cm)。
- できるだけ早いビームアポートシステム構築。

主な材質での温度上昇(EGS4での計算)



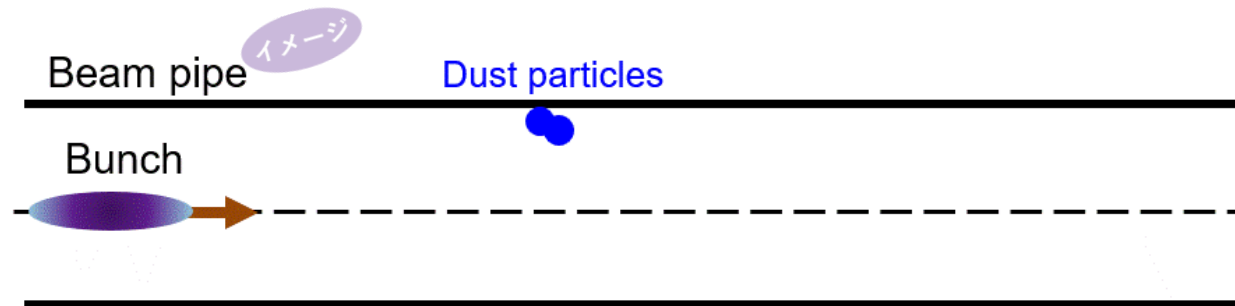
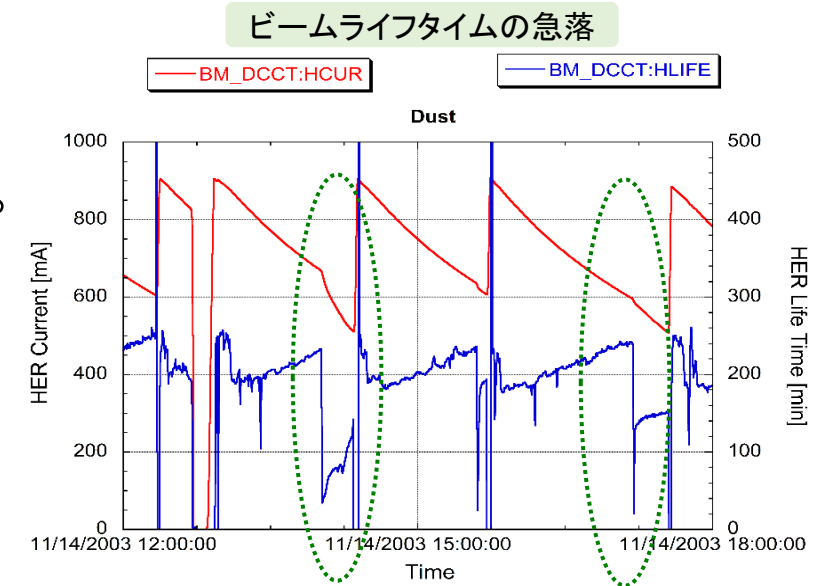
ビームの衝突:ダスト粒子

● ビームパイプ内ダストとの衝突

● 電子ビーム(ビーム電流が低い時)

- **ダストラッピング**:ダストがビーム軌道付近に捕捉される。
- ビームライフタイムの急落。
- エミッタンスの増大。

Y. Tanimoto *et al.*, IBIC, 2012、あるいは、JVSJ, 2010が詳しい



ビームの衝突:ダスト粒子

● ビームパイプ内ダストとの衝突

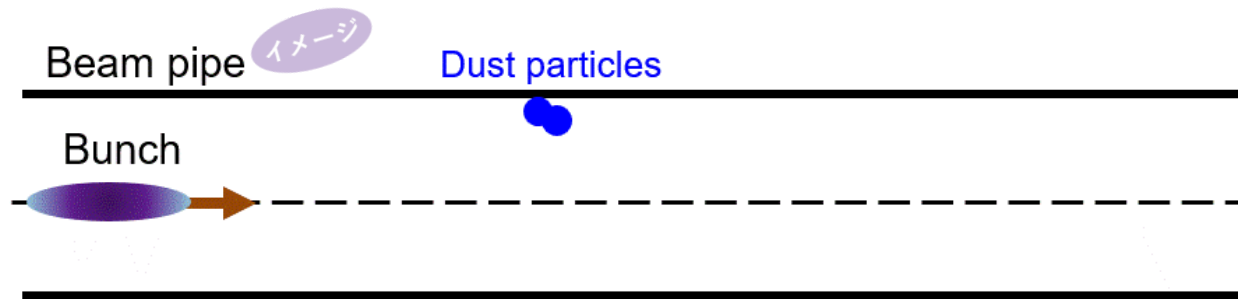
● 電子ビーム(ビーム電流が低い時)

- **ダストラッピング**:ダストがビーム軌道付近に捕捉される。
- ビームライフタイムの急落。
- エミッタンスの増大。

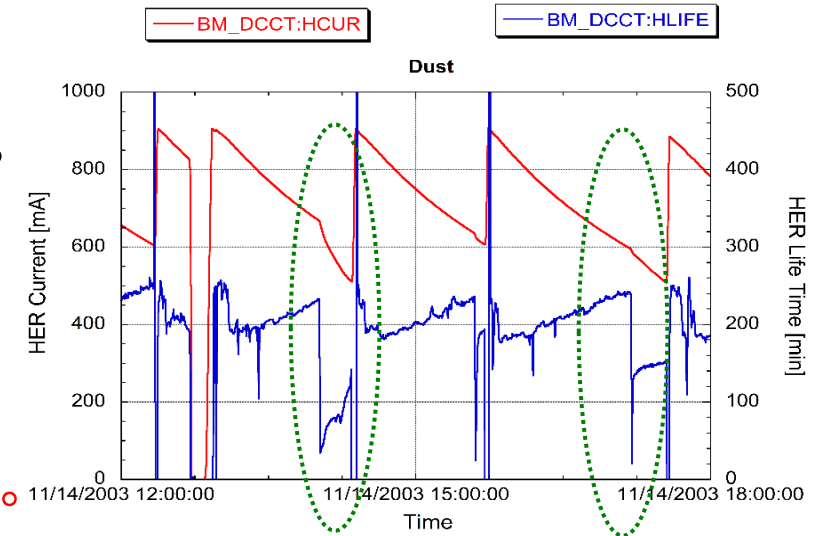
Y. Tanimoto *et al.*, IBIC, 2012、あるいは、JVSJ, 2010が詳しい

● 陽電子、電子ビーム

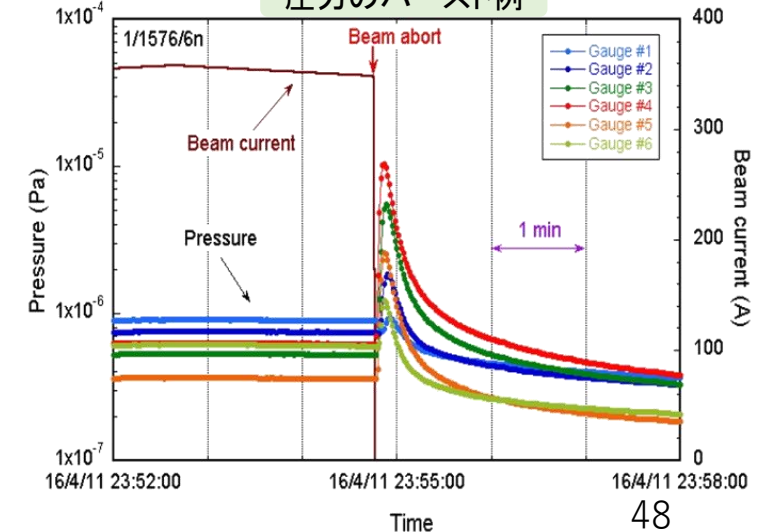
- 高いビーム電流ではダストの発熱、蒸発⇒**圧カバースト**。
 - ビームエネルギーの損失 ⇒ **ビームロス**⇒**ビームアボート**。
 - 衝突で生成されたイオン(プラズマ)等との相互作用⇒**ビームサイズ増大**など。
- ↪ コリメータヘッドの損傷、バックグラウンド増。



ビームライフタイムの急落



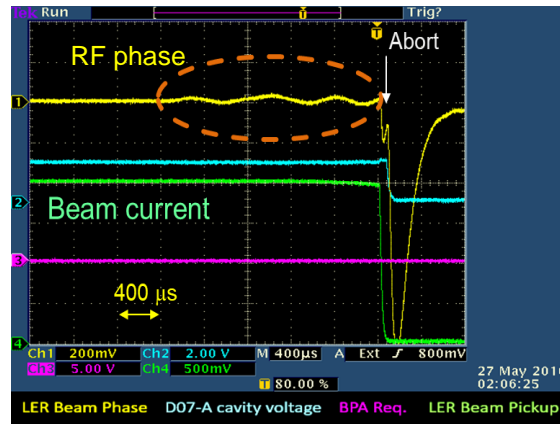
圧カのバースト例



ビームの衝突:ダスト粒子

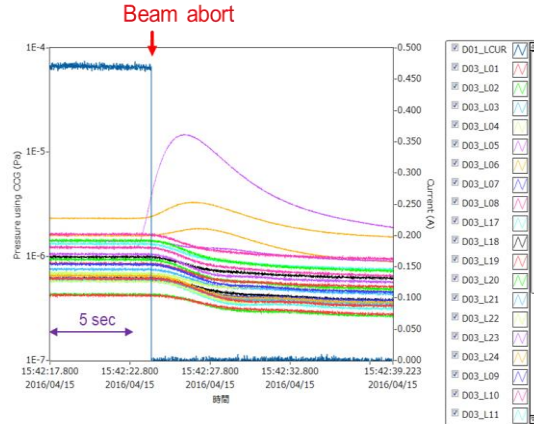
- **トラブル:ビームパイプ内ダストとの衝突[SuperKEKB]**
 - 2016～、ビームロスでロスモニターが発報しビームアボートが頻発。
 - ビームエネルギーロス(シンクロトン振動)も観測。
 - 偏向電磁石近くでビームアボート時に圧カバーストが観測された。
 - 次第に高いビーム電流で発生するようになった。エージング効果(クリーニング効果)が見えた。

エネルギーロスを伴うアボート

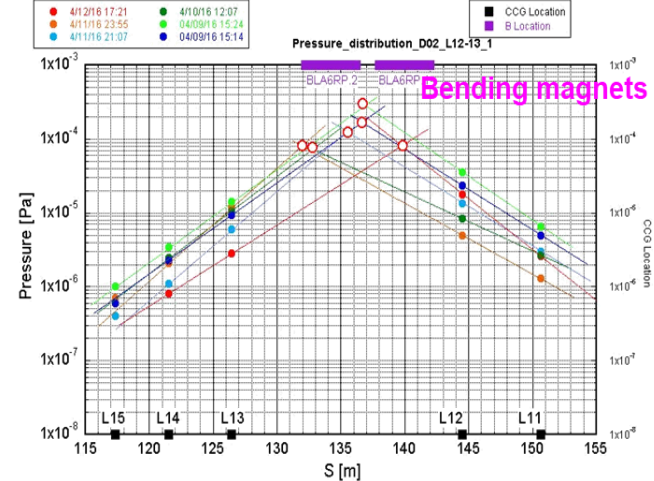


H. Ikeda

アボート時の圧カバースト



圧カバースト位置の推定



偏向電磁石ビームパイプに取り付けたノッカー



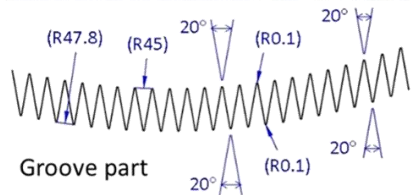
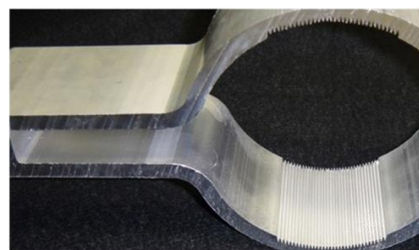
ビームの衝突:ダスト粒子

●トラブル:ビームパイプ内ダストとの衝突[SuperKEKB]

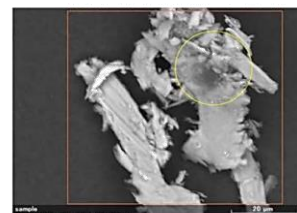
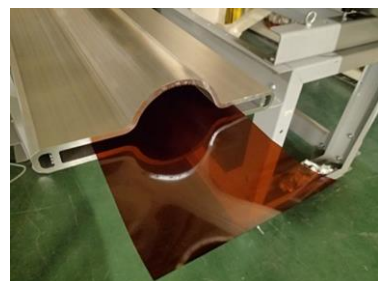
- 2016～、ビームロスでロスモニターが発報しビームアボートが頻発。
- ビームエネルギーロス(シンクロトン振動)も観測。
- 偏向電磁石近くでビームアボート時に圧カバーストが観測された。
- 次第に高いビーム電流で発生するようになった。エージング効果(クリーニング効果)が見えた。
- **電子雲対策として導入した”グループ構造(前述)”に挟まっていたダストとの衝突が原因と判明。**
 - ビーム蓄積中“**ノッカー**”でビームパイプをたたくと同様のビームロスを再現。
 - ダストは加工時のキリコが主(アルミやアルミ酸化物)。数百 μm のものも。
- **対策:グループ付きビームパイプをノッカーで叩いて回った。その後頻度は減った。**

S. Terui *et al.*,
IPAC2018

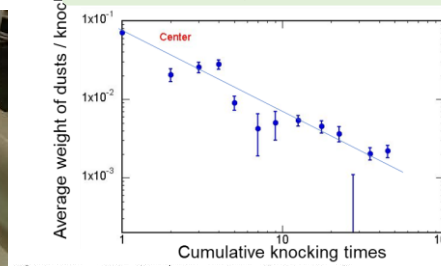
グループ構造



ノッカー(圧空使用)



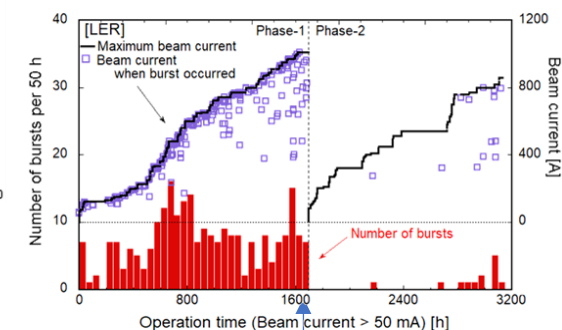
落下ダスト数vsノッカー回数



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	18.43
Magnesium	12 K-series	2.15	1.49

Total:		100.00	100.00
--------	--	--------	--------

ノッカーで叩く前後のバースト頻度(2016-2019)



シャットダウン中にノッカーでビームパイプを叩いた

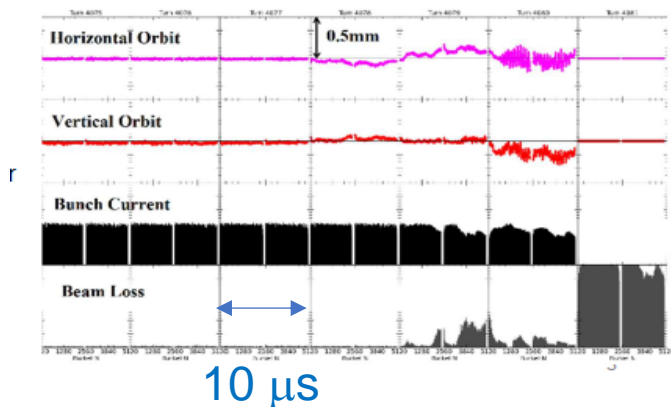
ビームの衝突：ダスト粒子

● トラブル：ビームパイプ内ダストとの衝突[SuperKEKB]

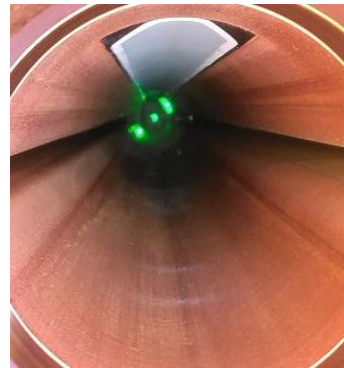
- 2019～、SBL (Sudden Beam Loss)と呼ばれる、速い(数十 μs)大きなビームロスが高いビーム電流で頻発 \Rightarrow コリメータ、測定器に大きな損傷を与えている。
- 同じく電子雲対策でウィグラー電磁石部に導入した”電子クリアリング電極(前述)”付ビームパイプ部のダストが原因か。
 - ノッカーで叩くとSBLを再現した。ビームアポート時ウィグラー部で圧力のバーストが観測。
 - 電極部がダストを捕捉しやすい？早いロスのメカニズムは？ \Rightarrow 調査、検討中
- 対策（現在進行中）
 - とりあえずは、電極を下側にする(ビームパイプ反転)。内部清掃。
 - 運転前にビームパイプをノッカーで叩く。

SBL時のBORログ

Beam signal measured by H. Ikeda et al., IPAC2023
Beam Oscillation Recorder(BOR) & Bunch Current Monitor(BCM)



クリアリング電極
(パイプ上側)



ビームパイプ反転(クリアリング
電極を下側にする)



ビームの衝突：ダスト粒子

● ビームパイプ内ダストとの衝突

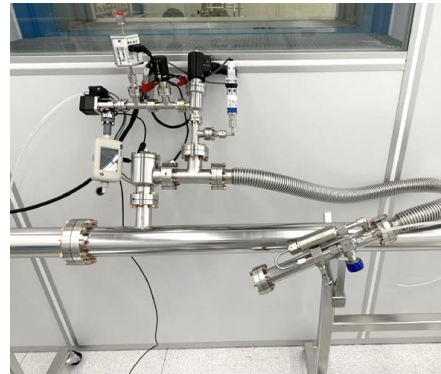
- 理想はダストフリーな真空 (Clean vacuum)だが。。。なかなか難しい。
 - 極力クリーンな環境での組み立て(SRF業界では標準)。リング組み立て手順の工夫。
 - 排気、大気導入をゆっくり行い、ダストが舞い上がらないようにする等の工夫。
- 今後ますます重要な課題となるでしょう。
 - ダストが主要トピックとなった最近の会議：
 - Workshop on Dust Charging and Beam-Dust Interaction in Particle Accelerators, CERN, Jun 13-15, 2023 (<https://indico.cern.ch/event/1272104/>)
 - OLAV-VI: 6th Workshop on the Operation of Large Vacuum Systems, FNAL, Apr 15 - 19, 2024 (<https://indico.fnal.gov/event/23500/>)

クリーンな環境での組み立て



Y. Tanimoto, OHO, 2015

ゆっくり大気解放する装置



G. Wu, OLAV VI (FNAL)

ロボットによる組み立て



ビームの衝突

● 中間まとめ

● 機器との衝突

- 可動マスク(コリメータ)等特殊な機器でなければ「稀」な事象ですが、ビーム本体が金属等の物質に集中して衝突すると損傷します。
 - 大電流だと、材質の選択だけで損傷を防ぐのは難しいので、まずは、衝突する原因を究明することが大事です。
- ビームが壁際を通ると予想される場合には構造、材質に注意して設計しましょう。

● ダストとの衝突

- 低電流の電子ビームではトラップ(捕捉)されることがあります。ビームライフタイムの急落、エミッタンス増がおきます。
- 高電流ではビームロスの原因になり、機器に衝突して損傷させることもあります。
- ノッカーも有効ですが、組立、作業時に極力ダストを入れないこと、排気時、大気圧に戻す場合にダストを舞い上げないようにすることが大事です。
- 今後ますます重要になるでしょう。

まとめ

- 大電流を蓄積するリングの真空システムの課題(チャレンジ)を、KEKB、SuperKEKBのトラブル事例(失敗?)を基に紹介しました。
 - 荷電粒子ビームの存在が加速器特有の様々な課題を持ちこみます。単に超高真空にすればよいという訳ではありません。
- 設計時には様々な観点から検討することが大事です。
 - 今から思えば、なんでこんなことをしたんだろう、という点が多々あります。
 - 最近では優れたシミュレーションソフトがありますので活用しましょう。
- それでも見落としがあつたり、想定外の事が起きたりします。
 - その原因の究明が大事です。次につながります。
- 多くの場合なにかしら兆候があります。
 - 運転時には温度や圧力などから「異変」の兆候を見つけることが大事です。
- 紹介した事例を反面教師として、今後の開発、設計、製作、運転に生かして頂ければ幸いです。

謝辞

- 共に真空システムを開発、製作、維持管理してきた、KEKB、SuperKEKBの真空グループメンバー(退職された方を含め)、金澤健一氏、久松広美氏、嶋本真幸氏、佐藤政行氏、加藤茂樹氏、白井満氏、柴田恭氏、石橋拓弥氏、照井真司氏、Yao Mu Lee氏に深く感謝いたします。
- 様々なトラブルを引き起こしご迷惑をお掛けしましたが、作業等で快くご協力頂いたKEKBの電磁石グループ、RFグループなど他グループの皆様に感謝いたします。
- さらに、温かい目で応援して頂いた歴代の施設長、研究主幹の皆様、そして加速器施設各位に深謝いたします。
- また、急なお願いや無理難題に迅速に答えて頂いた、真空機器等製作会社、真空関連作業会社の皆様に深くお礼申し上げます。
- 引き続きよろしく願いいたします。

ご清聴ありがとうございました