

軌道安定化 & SRモータ

東京大学物性研究所
中村 典雄

軌道変動源と軌道安定化

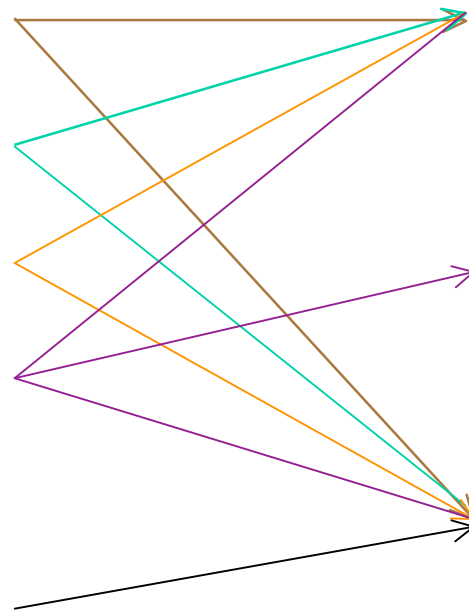
建物の変形
地盤振動

冷却水・空調

電氣的ノイズ

挿入光源(ID)
ギャップ変更
偏光スイッチ

その他
原因不明



変動源の除去

建物・ユーティリティ設計
加速器機器設計・ID端部補正

フィードフォワード制御

ID積分磁場の補正
チューン補正

軌道フィードバック

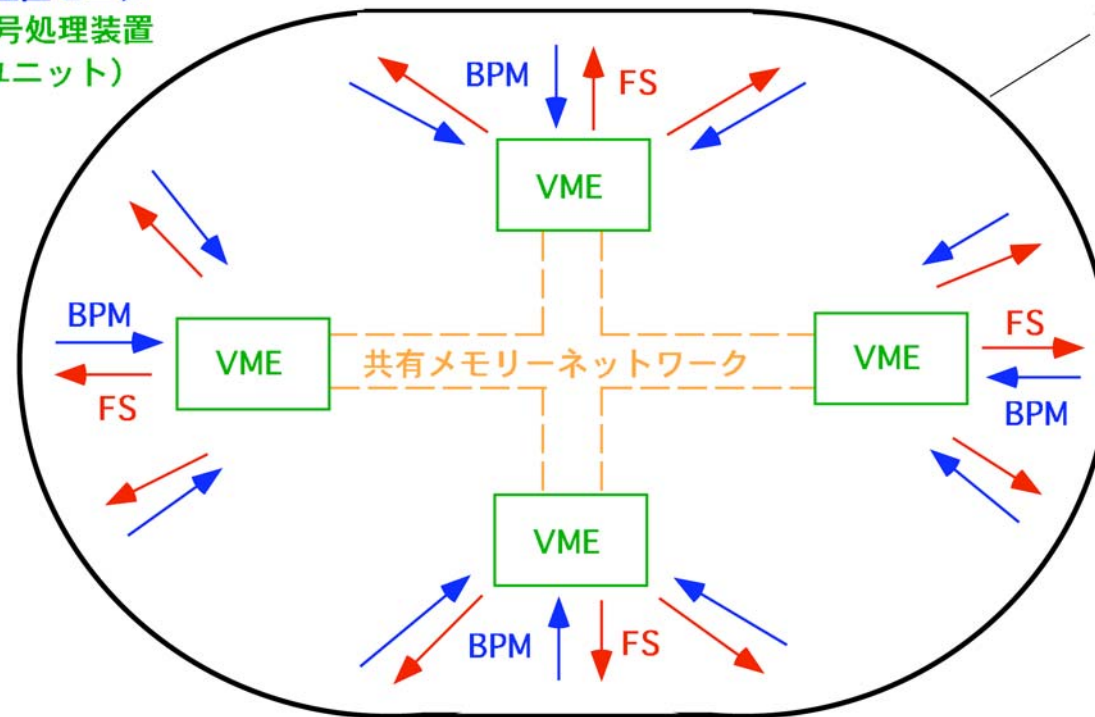
変動周波数 0 ~ 100 Hz、低周波数での変動大

軌道フィードバックシステム

FS:フィードバック用補正電磁石
BPM:ビーム位置モニタ
VME:高速信号処理装置
(制御ユニット)

光源リング

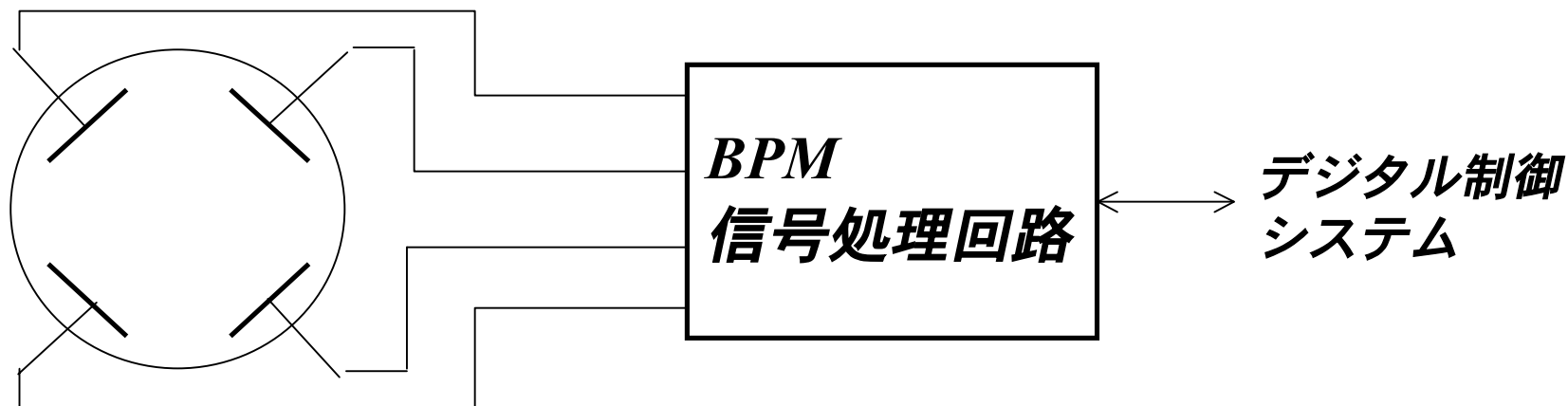
BPM 140台
FS 70台
VME 14台(+1台)



目標 : サブミクロンの安定化

- (1) 高速高精度ビーム位置測定 $< 1 \mu\text{m}$
- (2) 軌道変動減衰度 -20dBz 以下 @ 10Hz (帯域 100Hz以上)
- (3) 挿入光源での安定度重視

ビーム位置モニタ (BPM)



BPM電極部

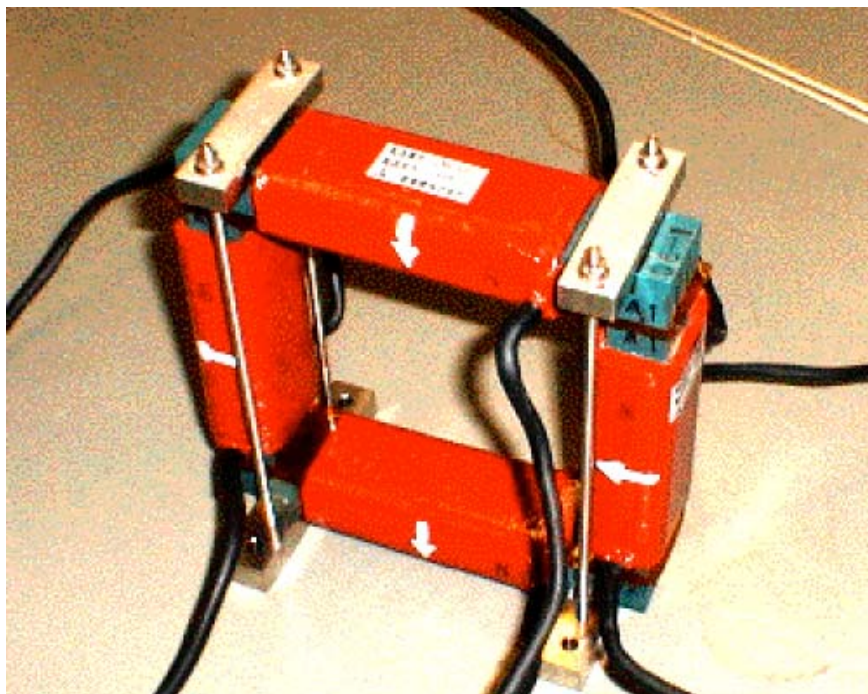
BPM電極部の設計

- ・ ブロック構造
- ・ 架台による固定
- ・ アブソーバによる放射光からの保護
- ・ ベローズによるストレスの吸収
 - (・ トップアップ入射による温度の安定化)
 - (・ 空調の精密制御による架台伸縮の抑止)

BPM信号処理回路の設計・選択

- ・ スーパーヘテロダイン&電極切換方式
 - 1 BPMに1回路
 - 1 ターン測定は不可
- ・ DBPM(Digital BPM)方式
 - 1 電極に1回路
 - 1 ターン測定可能

ステアリング電磁石システム



ステアリング電磁石（積層硅素鋼板）

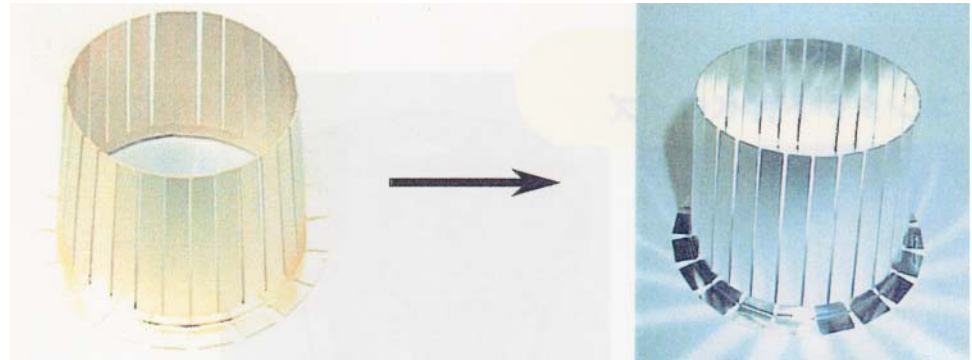


ステアリング電磁石電源
スイッチング方式
(リップルノイズ)
↓
リニアアンプ方式

R F シールド付きベローズ



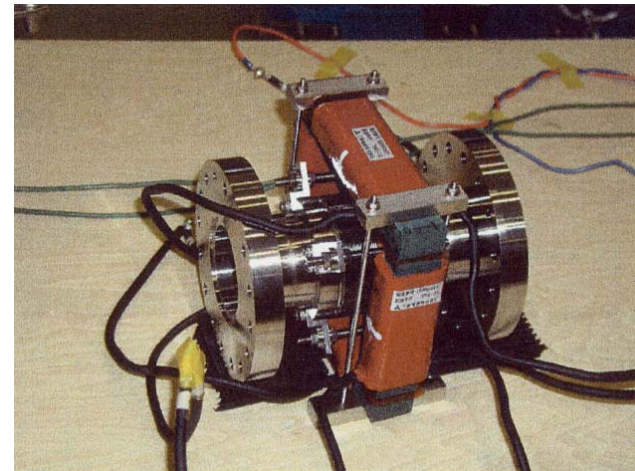
R F シールド付きベローズ



銀メッキ前 (ベリリウム銅製)

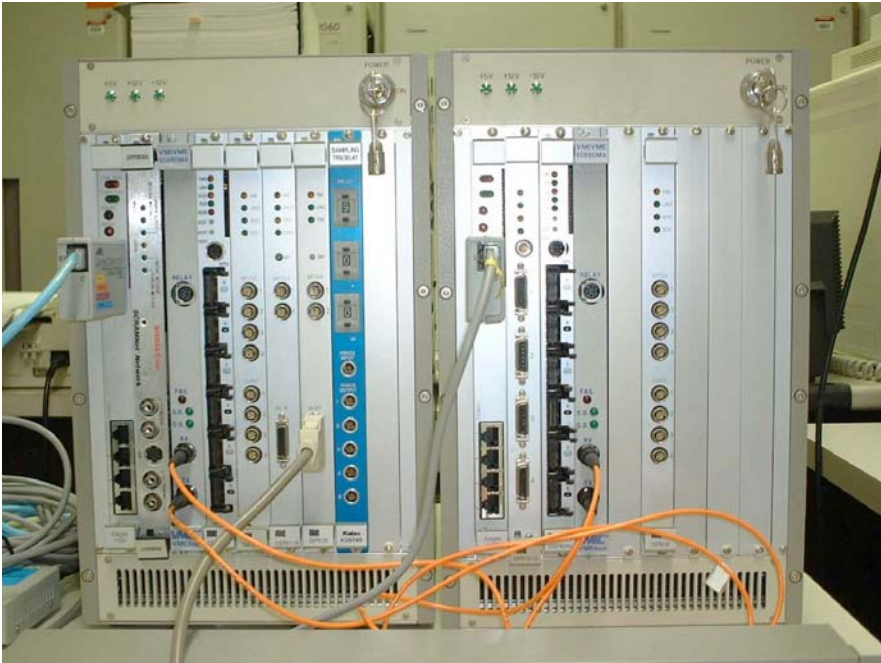
銀メッキ後

R F シールド

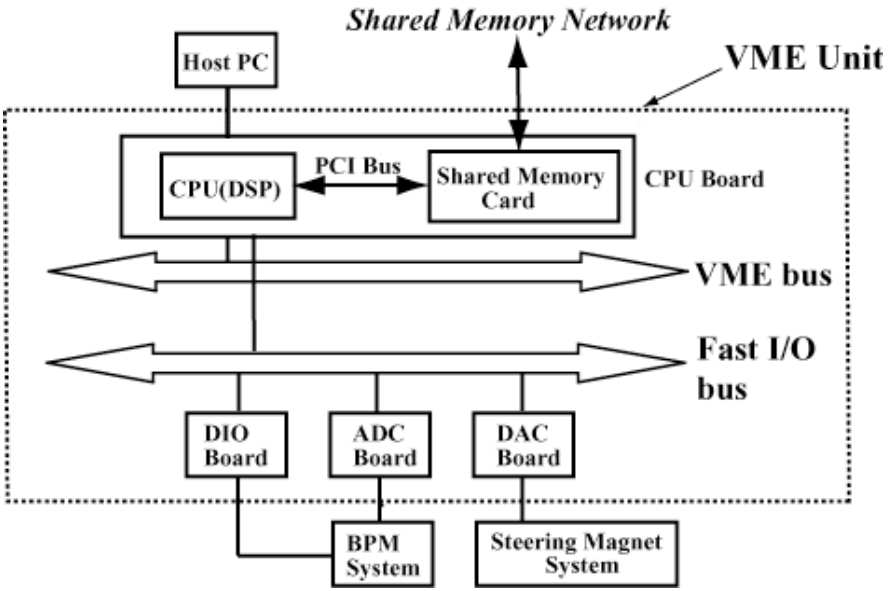


ステアリング+ベローズ

フィードバック制御システム（1）



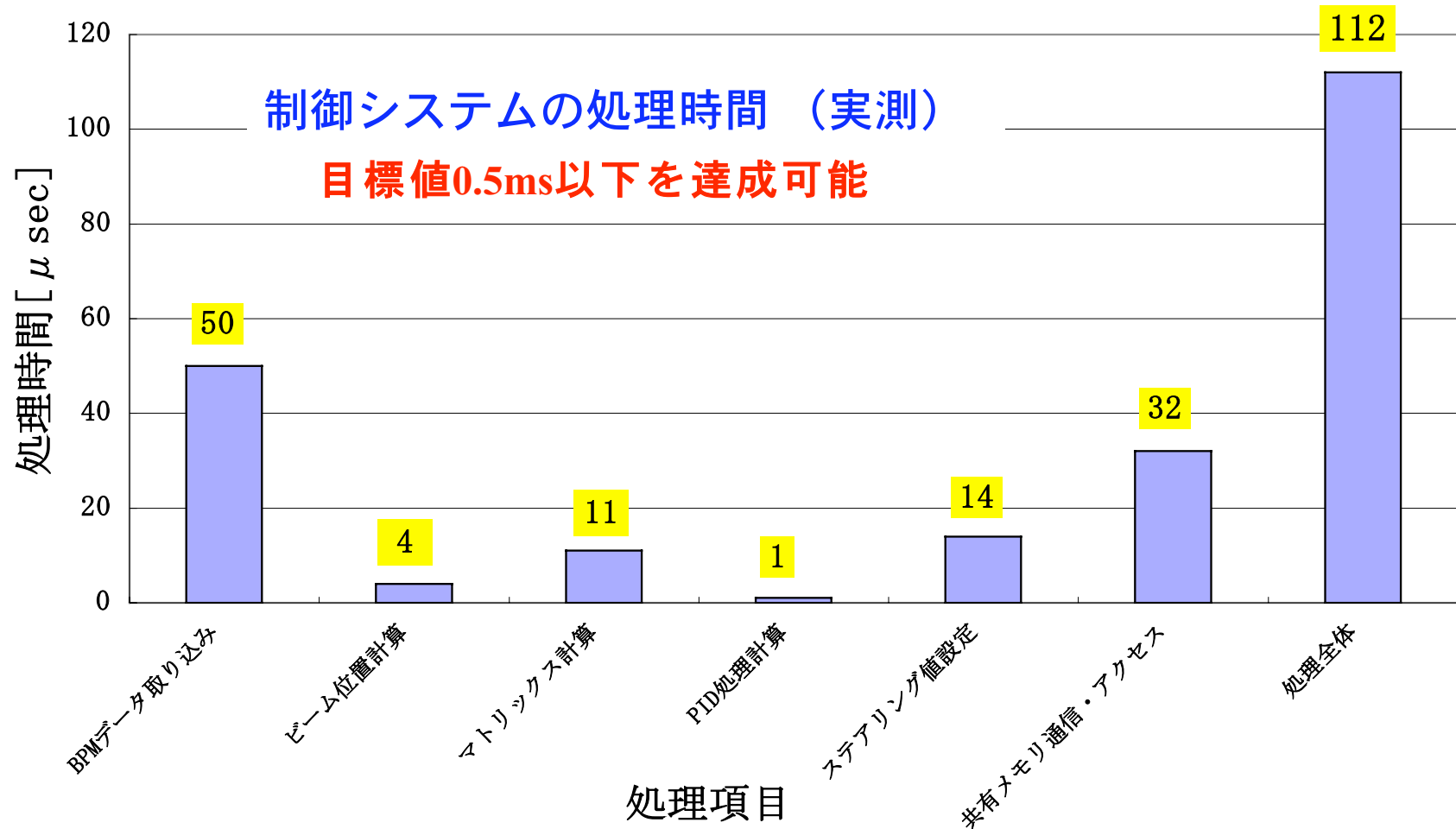
制御ユニットx2（初期モデル）



制御ユニットブロック図（現状）

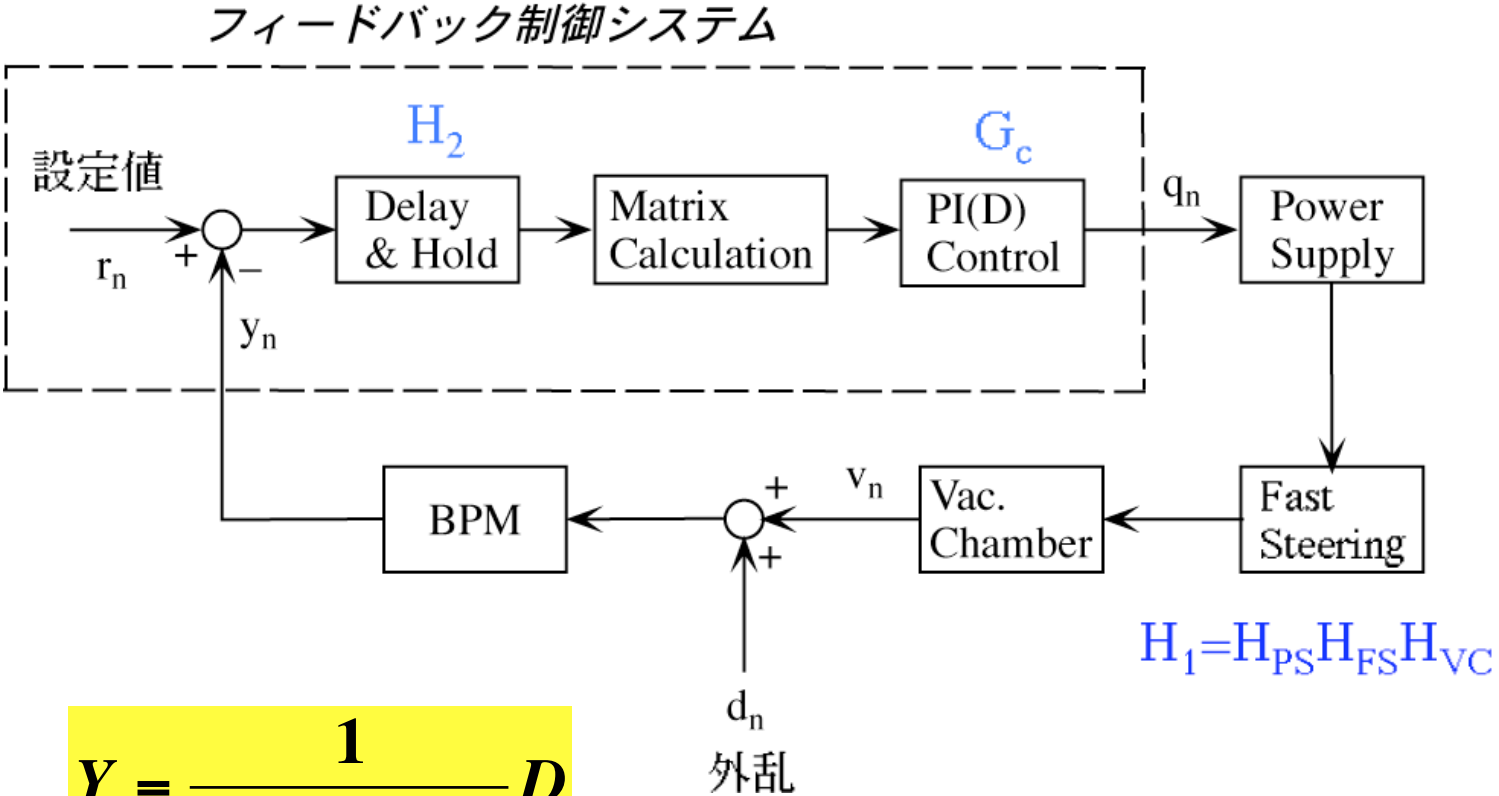
フィードバック周期（目標）： $T_s=0.5ms$

フィードバック制御システム（２）



- 条件 1) VME1 4 台でビーム位置モニタ (BPM) 140 台、ステアリング電磁石電源 70x2=140 台を処理する。
- 条件 2) 共有メモリ通信・アクセス時間には、VME1 台当り 20 個のデータリード (x、y 各 10 個) と 280 個 (全 BPM の x、y) のデータライトを想定している。
- 条件 3) 減衰器制御、スイッチ切換待ち時間、その他オーバーヘッドなどは含まれていない。

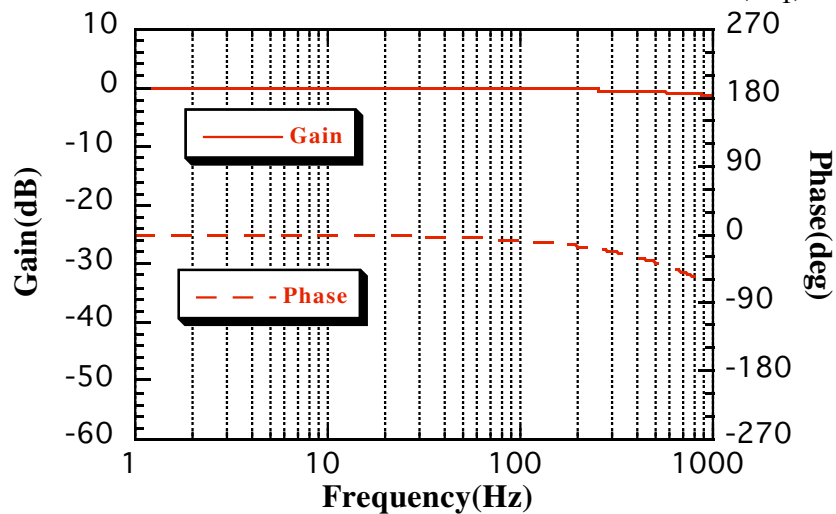
フィードバック制御システム



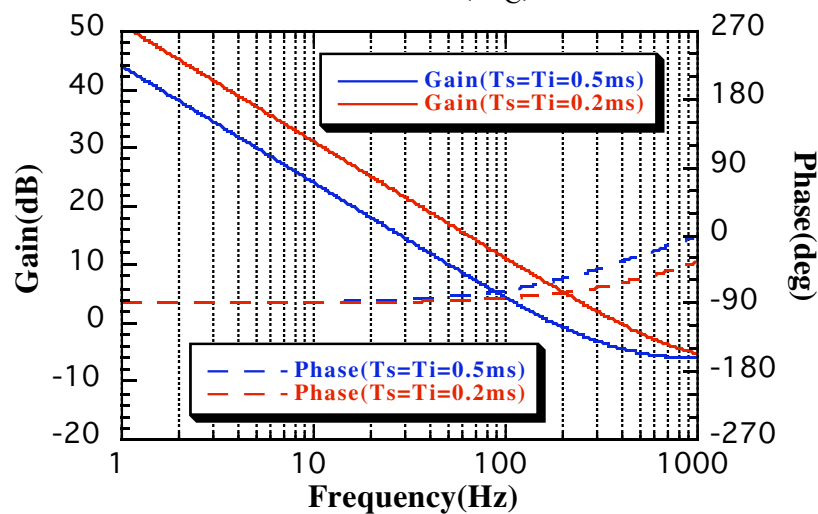
$$Y = \frac{1}{1 + H_1 H_2 G_c} D$$

周波数応答

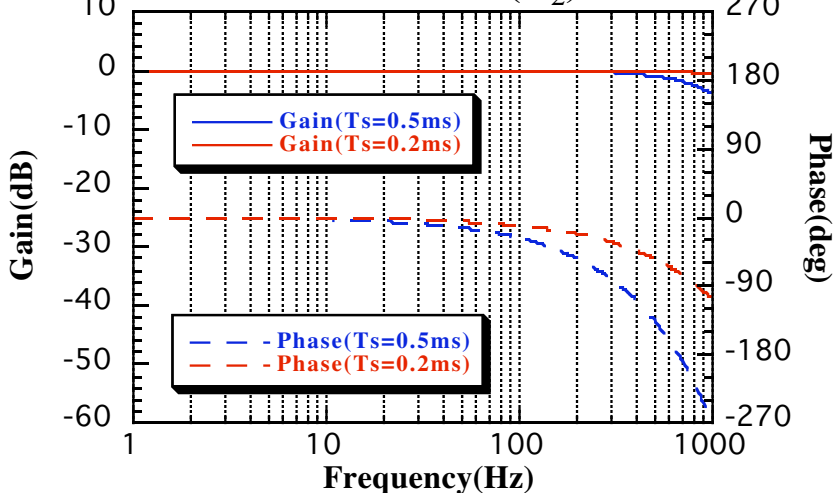
ステアリング・電源+SUSベローズ(H_1)



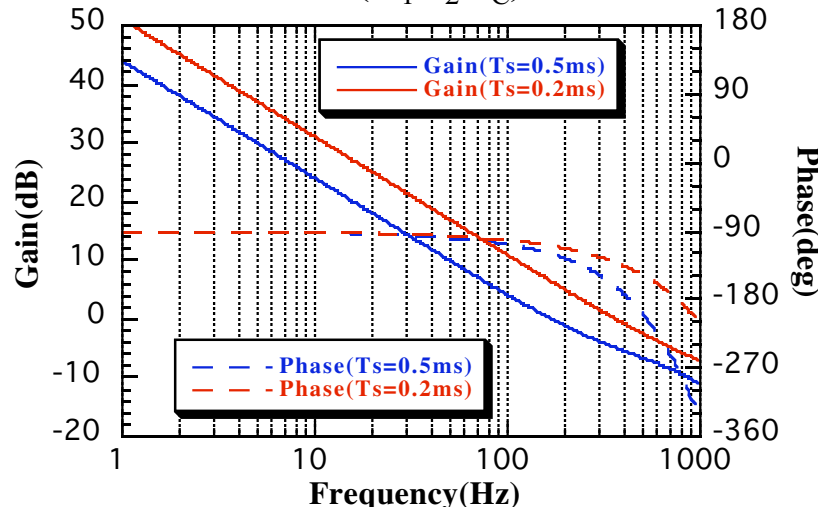
ゲイン+PI補償 (G_C)



遅延+零次ホールド(H_2)

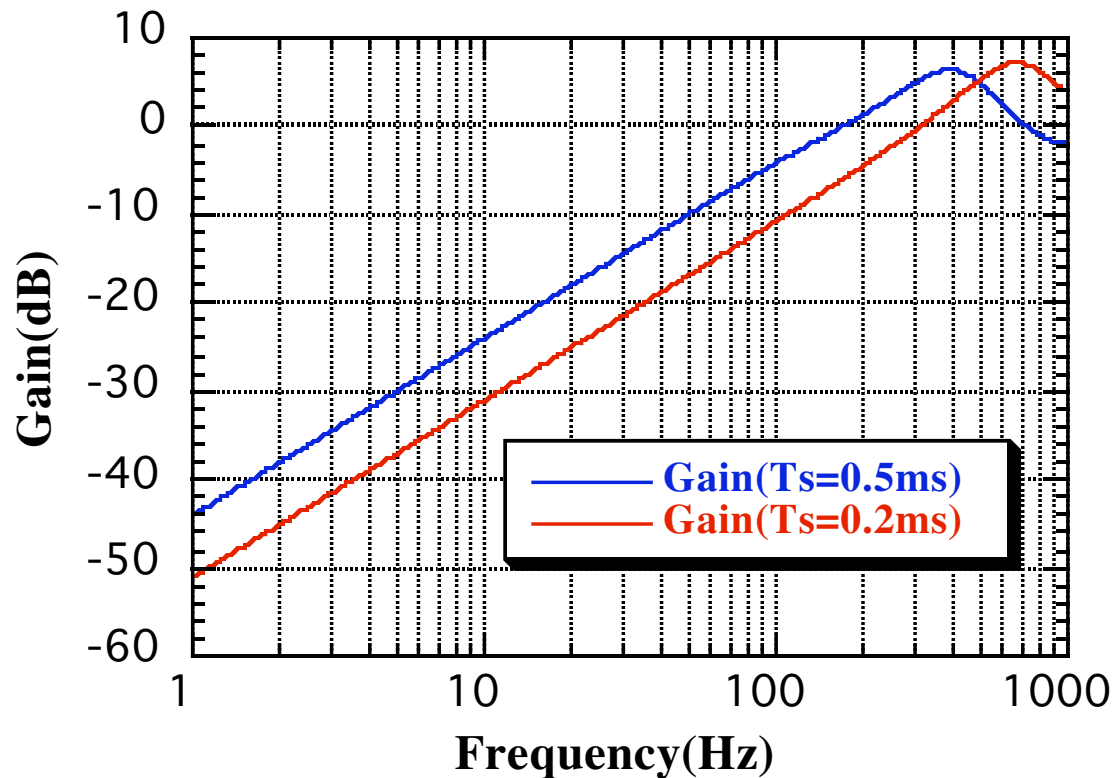


開ループ ($H_1H_2G_C$)



軌道変動減衰度

閉ループゲイン ($=1/|1+H_1H_2G_C|$)



帯域100Hz、 $< -20dB @ 10Hz$ を達成可能

新しい軌道補正方法（１）

従来の軌道補正方法

グローバル補正

リング全周に渡る補正
少ない電磁石で効率的に補正
局所的な補正は困難
(例：固有ベクトル法)

ローカル補正

光源点など特定場所での
局所的な補正が可能
多くの電磁石が必要
(例：ローカルバンプ法)

フィードバック間の干渉

統一化

新しい軌道補正方法（条件付き固有ベクトル法）

両方（グローバル／ローカル補正）の機能を兼備
単一のフィードバックループ（干渉がない）
挿入光源付近での軌道をより重点的に補正可能
その他に様々な束縛条件を付加可能（例：光位置モニタ）

新しい軌道補正方法（2）

Residual vector of COD:

$$\vec{\Delta} \equiv R\vec{\theta} + \vec{y} \quad (1)$$

y : beam position before correction (M)

θ : kick angle of steering magnet (N)

R : Response matrix ($M \times N$)

Constraint conditions:

$$\vec{C}_i^T \cdot \vec{\theta} + z_i = 0 \quad (i = 1, \dots, N_C) \quad (2)$$

Minimize the norm of Δ under the constraint conditions by introducing the following function of S (Lagrange's method of indeterminate multipliers).

$$S = \frac{1}{2}(R\vec{\theta} + \vec{y})^2 + \sum_i^{N_C} \mu_i (\vec{C}_i^T \vec{\theta} + z_i) \quad (3)$$

Set derivatives of the function S with respect to θ and μ to zero.

$$R^T R \vec{\theta} + R^T \vec{y} + C \vec{\mu} = 0 \quad (4)$$

$$C^T \vec{\theta} + \vec{z} = 0 \quad (5)$$

Solution of the above equations:

$$\vec{\theta} = B\vec{y} - D\vec{z} \quad (6)$$

where

$$B = (-A^{-1} + A^{-1}CP^{-1}C^T A^{-1})R^T \quad (7)$$

$$D = A^{-1}CP^{-1} \quad (8)$$

$$A = R^T R \quad P = C^T A^{-1} C \quad (9)$$

Definition of the matrix A^{-1} :

$$A^{-1} = \sum_{i=1}^{N_V} \frac{\vec{v}_i \vec{v}_i^T}{\lambda_i} \quad (N_V \leq N), \quad (10)$$

v_i : i -th eigenvector of the matrix A

λ_i : i -th eigenvalue of the matrix A

For zero and small eigenvalues, their reciprocals in the matrix A^{-1} is replaced with zeros to avoid very large kick angles of steering magnets. The condition of $N_V \geq N_C$ is required for the existence of the inverse matrix P^{-1} .

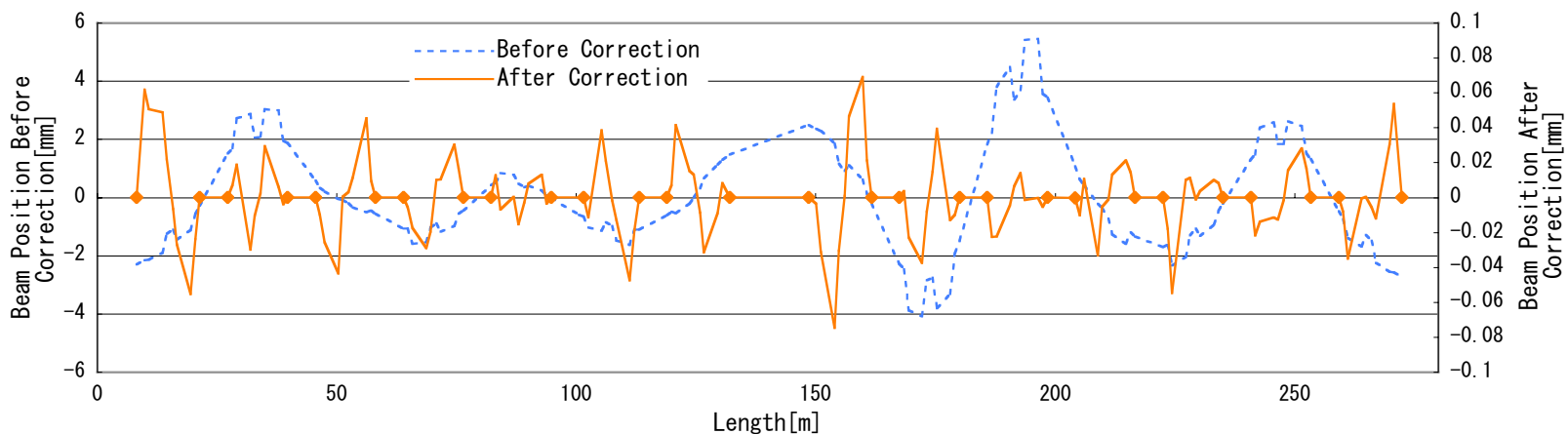
If \vec{y} is taken as the beam positions measured at arbitrarily selected BPMs and C as the corresponding part of the response matrix R , Eq. (6) can be rewritten in a simplified form,

$$\vec{\theta} = B^* \vec{y}$$

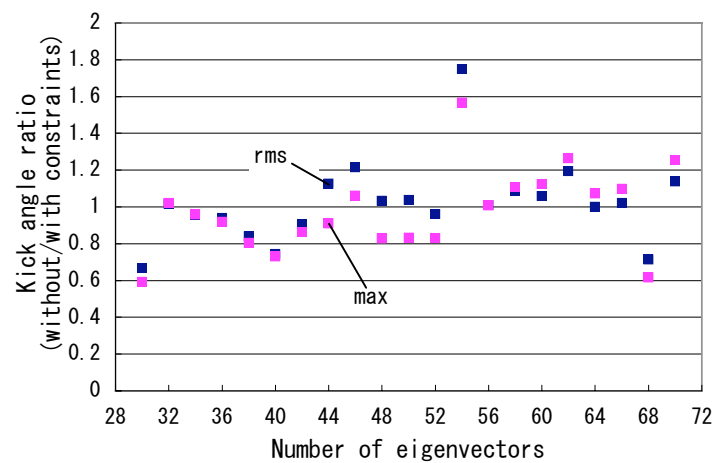
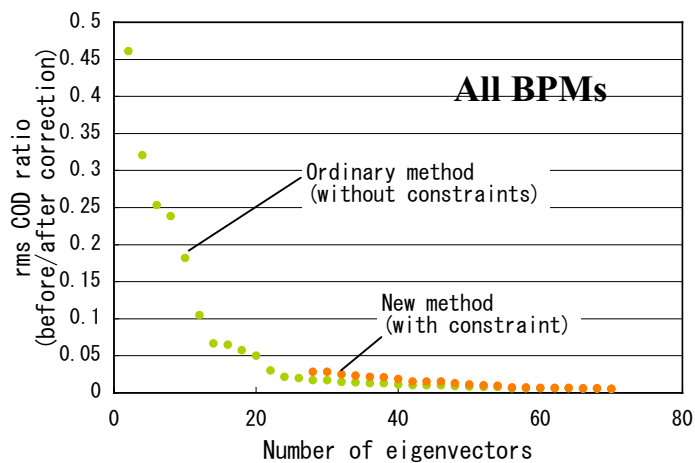
新しい軌道補正方法（3）

SuperSOR

計算機シミュレーション 挿入光源両脇のBPM 28台に束縛条件（BPM140台, FS 70台）



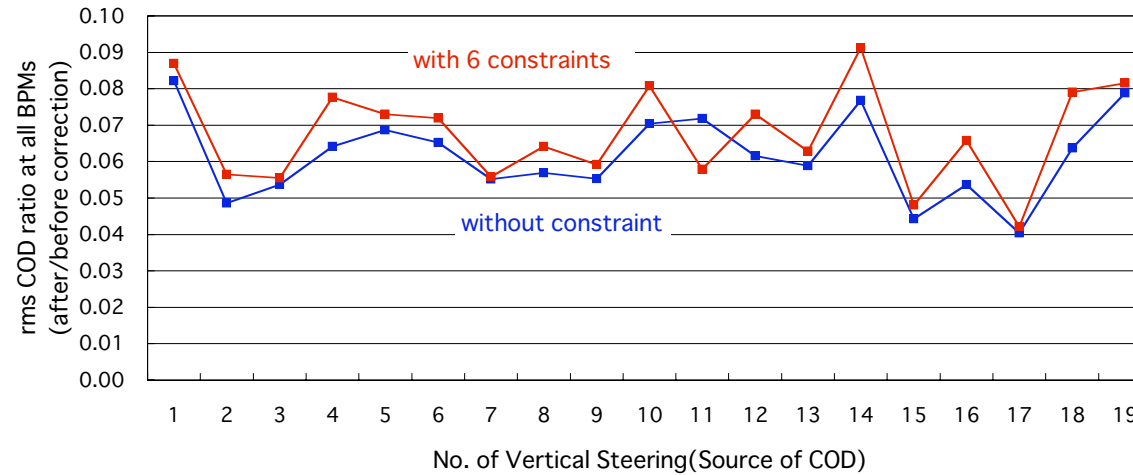
新しい方法による補正前後の軌道（固有値 50, 束縛条件 28）



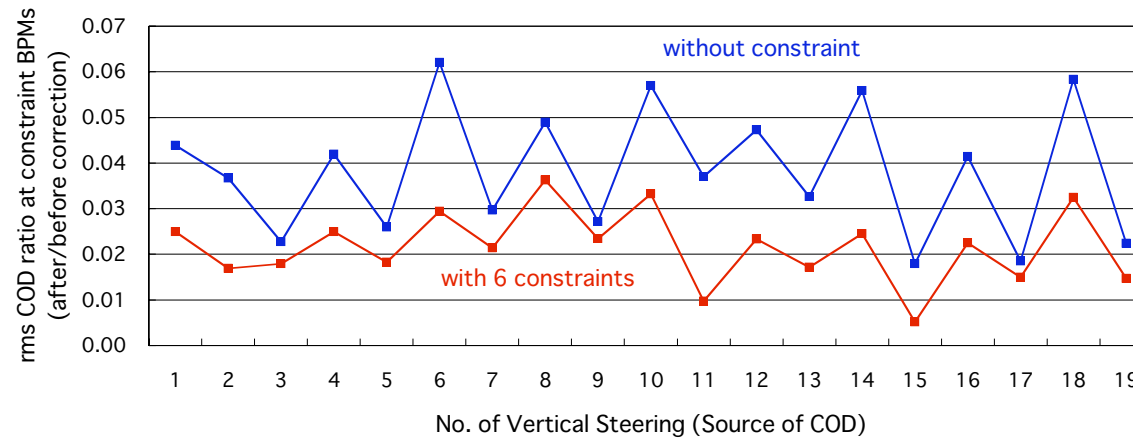
新しい方法と従来の固有値法との比較

新しい軌道補正方法（４）

PF-ARでの試験（実測）



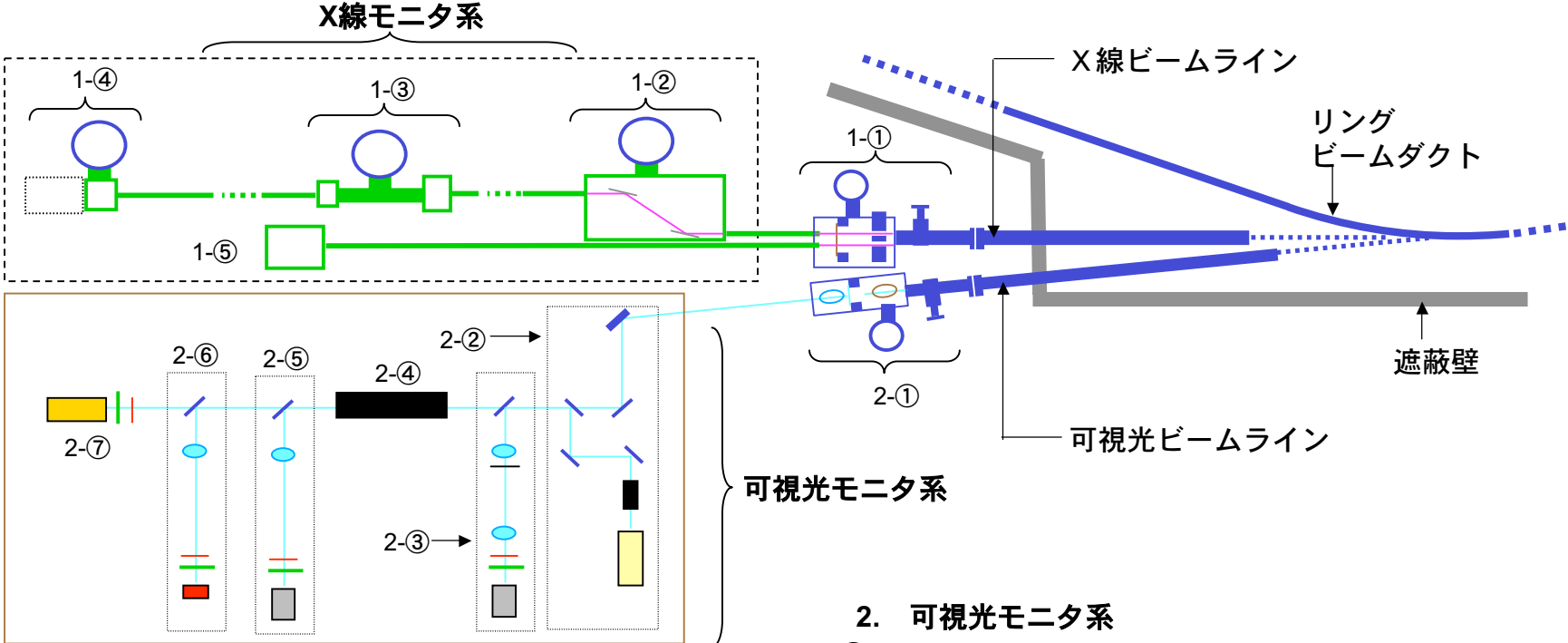
新しい方法と従来の固有値法との比較（全BPMでのCOD）



光源点でより精密な補正が可能

新しい方法と従来の固有値法との比較（束縛された6BPMでのCOD）

放射光モニタ



1. X線モニタ系

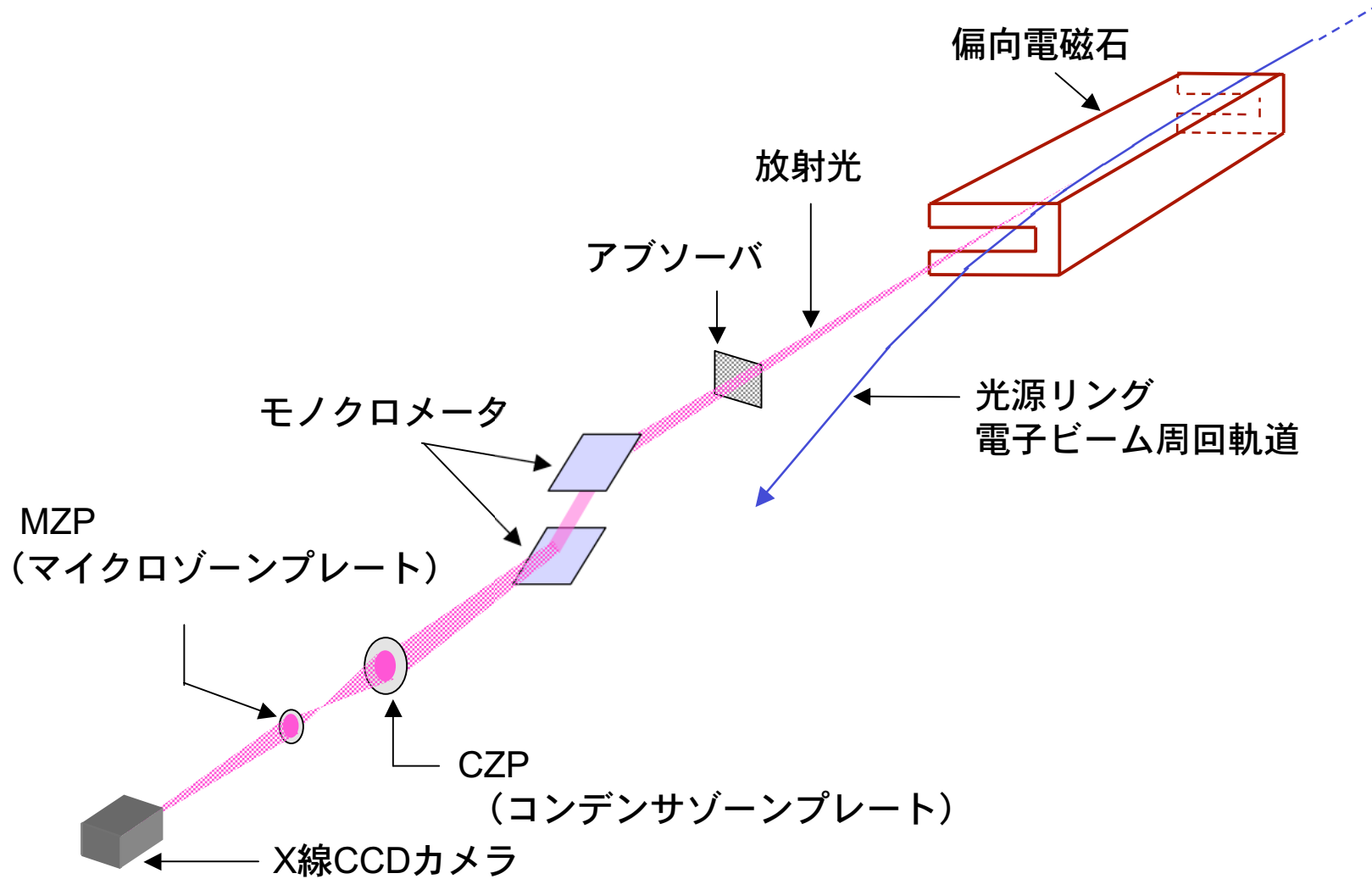
- 1-① : クロッチ+X線窓
- 1-② : モノクロメータユニット
- 1-③ : FZPユニット
- 1-④ : X線CCDカメラ収納ユニット
- 1-⑤ : 放射光位置モニタ

2. 可視光モニタ系

- 2-① : 可視光反射ミラーユニット
- 2-② : レーザアライメントユニット
- 2-③ : 干渉光学系ユニット
- 2-④ : テレスコープ
- 2-⑤ : プロファイルモニタ光学系ユニット
- 2-⑥ : チューンモニタ用光学系ユニット
- 2-⑦ : ストリークカメラ
- 2-⑧ : 光学ベンチ+遮光BOX

放射光モニタ配置案

電子ビームプロフィールモニタ



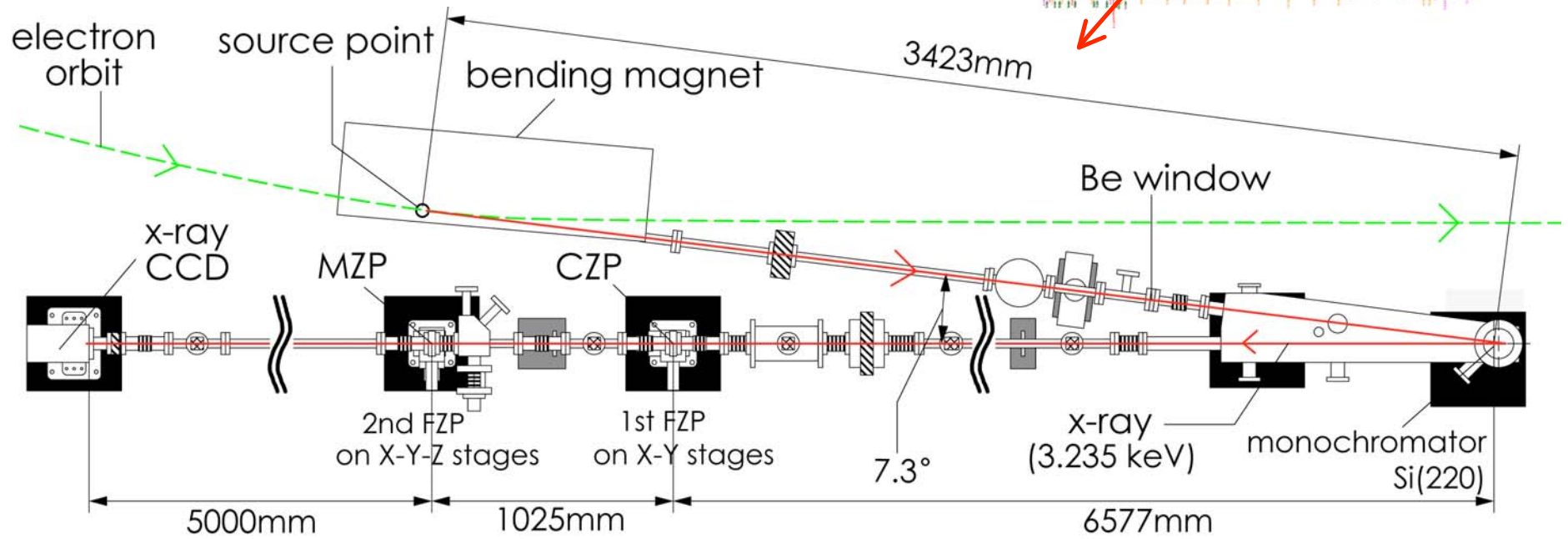
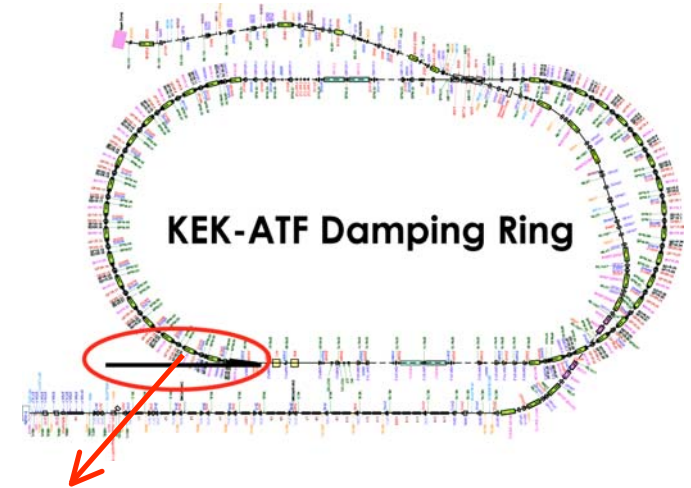
R&D (1)

測定システム

拡大率 $M = M_{CZP} \times M_{MZP}$

空間分解能 $\delta_0 = \delta_{CZP} / M_{CZP}$

$M=20$ ($M_{CZP}=1/10$, $M_{MZP}=200$), $\delta_0=1.7 \mu\text{m}$



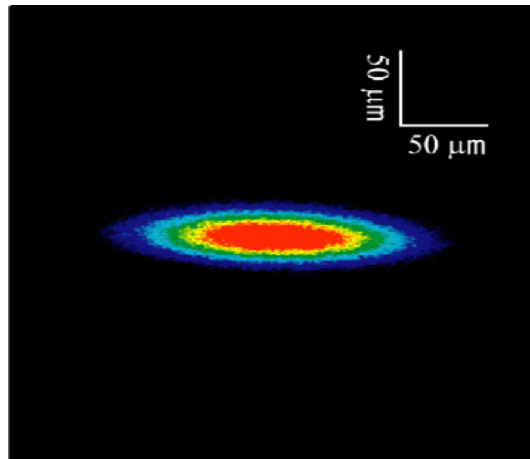
R&D (2)

測定結果

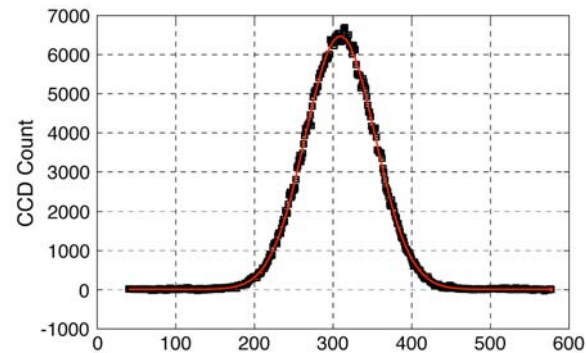
2003.03.11, I=1.96mA(SB), T_{exp}=400ms

$$\sigma_x = 44.2 \pm 1.2 [\mu\text{m}]$$

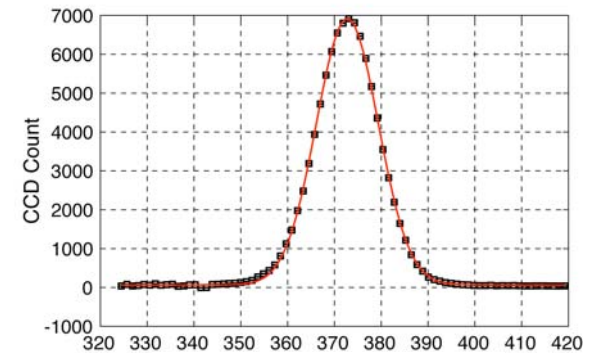
$$\sigma_y = 6.67 \pm 0.19 [\mu\text{m}]$$



電子ビーム像



Horizontal profile



Vertical profile

電子ビーム形状&サイズ

まとめ

- 軌道フィードバックシステムは、軌道変動による輝度の実効的低下を抑えるために、光源点のサブミクロンの位置の安定化を目標として開発している。
- 1 μm 以下の高精度で高速軌道測定を行えるために、ビーム位置モニタ（信号処理回路を含む）の設計・開発が進行中である。
- 高速ステアリング電磁石は積層ケイ素鋼板コアを用い、電源についてはリニアアンプ型を採用・開発する。また、電磁石をアルミ製ダクトの代わりに、ベローズ（SUS製、BeCu製RFシールド付）に設置することで、渦電流による周波数応答の劣化を防ぐ。
- フィードバック制御システムは、最新のCPU(DSP)&共有メモリカードと高速バスを使うことで目標であるサンプリング周期0.5ms以下を達成できる。結果として、ビーム変動の減衰度として $< -20\text{dB} @ 10\text{Hz}$ （帯域100Hz以上に対応）が実現できる。
- 新しい軌道補正方法（条件付き固有ベクトル法）によって、挿入光源での位置の安定化をより高める。現在、計算機シミュレーションの他に、実際のビームを用いた評価を行いつつある。
- 放射光モニタについては、ビームサイズ測定用に2つのゾーンプレートによるX線結像光学系を用いた高分解能ビームプロファイルモニタの開発を行っている。