

3GeV 次世代放射光施設 加速器デザインレポート

2020 年 9 月

量子科学技術研究開発機構
次世代放射光整備開発センター

本デザインレポートは、東北大学の青葉山新キャンパスに建設される 3GeV 次世代放射光施設の加速器設計の概略を示すものである。当施設は、SPring-8 と共に、日本における放射光科学のプラットフォームを形成するものであり、両施設により、UV から硬 X 線に至る幅広いスペクトルレンジをカバーすることが期待される。特に当 3GeV 放射光施設は、主に UV からテンダー X 線に至る長波長領域の光を提供し、高いパフォーマンス、安定性、信頼性を持つ実用的な光源としての役割を担う。

本 3GeV 次世代放射光施設建設プロジェクトは、限られた予算、人員、時間スケジュールの中で目標を達成すべく、理研、JASRI、KEK の加速器グループの強力なサポートのもとで加速器複合体の設計を行ない、SPring-8-II に向けて行われてきた R&D や設計検討の結果を積極的に取り入れてきた。

本加速器設計には、以下の特徴がある。

1. 軟 X 線領域で高いコヒーレンスを得ることを想定し、目標エミッタンスを 1nm.rad 程度に設定
2. 機能複合型偏向磁石を用いた 4 ベンド・アクロマート構造によるコンパクトな蓄積リング設計
3. 将来の軟 X 線自由電子レーザー (SX-FEL) を考慮した 3GeV フルエネルギー C バンド線形加速器

最後に、QST、理研、JASRI、および KEK の加速器グループによる多大な貢献に感謝すると共に、これら研究所の各責任者、事務の関係者等、多くの方々の御尽力に感謝致します。

QST 加速器グループ代表
西森信行、渡部貴宏、田中均

目次

1.	ラティス	5
1.1.	蓄積リングのラティス構成	5
1.2.	蓄積リングにおける電子ビームの動力学的解析	8
1.2.1.	力学的口径を広げる六極磁場強度の最適化	8
1.2.2.	モーメントムアパーチャとタウシェックビーム寿命	10
2.	電磁石システム	12
2.1.	電磁石	12
2.1.1.	四極電磁石	14
2.1.2.	六極電磁石	14
2.1.3.	機能複合型偏向電磁石	15
2.1.4.	ステアリング電磁石	15
2.1.5.	架台	16
2.2.	電磁石電源	16
2.2.1.	概要	16
2.2.2.	偏向電磁石、多極電磁石用電源	17
2.2.3.	ステアリング電磁石用電源	17
2.2.4.	四極電磁石補助電源	17
2.3.	アライメント	18
2.3.1.	直線部アライメント	18
2.3.2.	架台の輸送、設置	19
2.3.3.	架台アライメント	19
2.3.4.	鉄芯半割作業及び復旧	19
2.3.5.	最終測量、架台アライメント	20
3.	真空システム	20
3.1.	概要	20
3.2.	真空システムの構造と機能	21
3.2.1.	直線部真空チェンバ	21
3.2.2.	偏向部真空チェンバ	22
3.2.3.	フォトンアブソーバ	22
3.2.4.	真空チェンバ部品	24

3.2.5.	真空排気システム	24
3.3.	真空寿命と圧力	24
3.3.1.	真空寿命	24
3.3.2.	ガス放出量	25
3.3.3.	圧力分布	25
4.	高周波加速システム	26
4.1.	概要	26
4.2.	高周波源と大電力伝送系	27
4.3.	加速空洞	28
4.4.	低電力高周波系	30
5.	ビーム診断系	32
5.1.	概要	32
5.2.	ビーム位置モニタ (BPM)	34
5.3.	放射光を用いたビームサイズモニタ	35
5.4.	ビーム不安定性抑制	36
6.	リングビーム入射システム	37
6.1.	概要	37
6.2.	入射部パラメータ	38
6.3.	入射電磁石	39
7.	ライナックビーム入射器	40
7.1.	概要	40
7.2.	電子入射部	43
7.3.	主加速部	45
7.4.	ビーム輸送路	47
7.5.	低電力 RF 系	49
8.	加速器制御システム	51
8.1.	概要	51
8.2.	制御フレームワーク	52
8.2.1.	データベースシステムとデータ収集系	52
8.2.2.	データ収集プロセス	53
8.2.3.	メッセージサーバー	53
8.2.4.	機器制御用プロセス (Equipment Manager : EM / Equipment Manager)	

Agent : EMA)	54
8.3. 機器制御	54
8.3.1. 機器制御プラットフォーム	54
8.3.2. 真空機器制御系	54
8.3.3. 高周波加速システム制御系	54
8.3.4. 電磁石電源制御系	55
8.3.5. ビーム診断機器制御系	55
8.3.6. 機器保護インターロック	55

1. ラティス

1.1. 蓄積リングのラティス構成

スウェーデンの放射光施設 MAX IV の 3GeV 新光源が 1 セルあたり 7 偏向磁石のいわゆるマルチベンドアクロマート構造のラティスを採用して 1nmrad を切る低エミッタンスリングを目指したことは、光源リングデザインにとって極めてエポックメイキングであると言える。理論的に偏向磁石数の 3 乗に反比例してエミッタンスは小さくできるためマルチベンド構造は低エミッタンス化には必須であるが、磁石配置のパッキングファクタが非常に高くなるため、ゲートバルブやビーム診断装置等の配置が容易でない。また低エミッタンス化のために多重極磁場も従来に比べ相当に強いいため、ボア系を大きく取れずビームダクトが必然的に細くなりコンダクタンスが小さくなるために真空システムの設計も難しくなる。しかしながら既存の放射光施設のアップグレード計画のほとんど

表 1.1 蓄積リングの主要パラメータ

電子ビームエネルギー	E	2.998 GeV
ラティス構造		4-Bend Achromat
周長	C	348.843 m
セル数 (偏向磁石数)	N_{cell}	16 (64)
長直線部	LSS	5.44 m $\times$ 16
短直線部	SSS	1.64 m $\times$ 16
ベータトロンチューン	(ν_x, ν_y)	(28.17, 9.23)
自然クロマティシティ	(ξ_x, ξ_y)	(-60.50, -40.99)
自然水平エミッタンス	ϵ_x	1.14 nmrad
運動量収縮因子	α_0	0.00043
自然エネルギー広がり	σ_E/E	0.0843%
長直線部中央のラティス関数	$(\beta_x, \beta_y, \eta_x)$	(13.0, 3.0, 0.0) m
短直線部中央のラティス関数	$(\beta_x, \beta_y, \eta_x)$	(4.1, 3.0, 0.05) m
減衰分配数	(J_x, J_y, J_e)	(1.389, 1.0, 1.611)
減衰時間	(τ_x, τ_y, τ_e)	(8.1, 11.2, 7.0) ms
偏向磁石でのエネルギー損失	U_0	0.621 MeV/turn
高周波加速周波数	f_{RF}	508.759 MHz
高周波加速電圧	V_{RF}	3.6 MV
ハーモニック数	h	592
自然バンチ長	σ_b	2.92 mm (9.74 ps)

はこのマルチベンドラティスを採用しており、今後の光源リングラティスのトレンドになることは必至であろう。

次世代放射光施設（以降、本施設と記す）の蓄積リングもマルチベンドラティスの一つである、セルあたり 4 偏向磁石の 4BA（Four-Bend Achromat）ラティスを採用した。セル数は 16 で、水平方向の自然エミッタンスは 1.14 nmrad、リング周長は 349 m である。マルチベンドラティスではあるが偏向磁石数が MAX IV の 3 GeV リングのように極端に多くはなくエミッタンスはさほど小さくならないが、コンパクトなセル構造にできるため、比較的短い周長で低エミッタンス化が可能である。

本施設の蓄積リングの主要パラメータを表 1.1 に示す。4BA ユニットセルは、偏向電磁石 4 台、収束用四極磁石 10 台、電子ビーム収束時に発生する色収差補正用および非線形効果抑制用の六極磁石 10 台、その他軌道補正用双極電磁石等で構成され、1 セルの長さは 21.8 m である。16 ケ所の 5.4 m 長直線部のうち 14 か所にアンジュレータを、残り 2 か所にはビーム入射システムと高周波加速空洞を設置する。また当初案として 1.6 m の短直線部には、14 か所に偏向電磁石に代わる高強度で白色の硬 X 線を生成する多極ウィグラ（Multi-pole Wiggler：MPW）を置き、残りの 2 か所にビーム不安定性抑制装置、各種ビーム診断装置やビーム電流モニタ（DCCT）等を設置することとしている。

ユニットセル内のビーム光学におけるラティス関数を図 1.1 に示す。長直線部のエネルギー分散関数をゼロとするアクロマート（色消し）構造を持つラティス

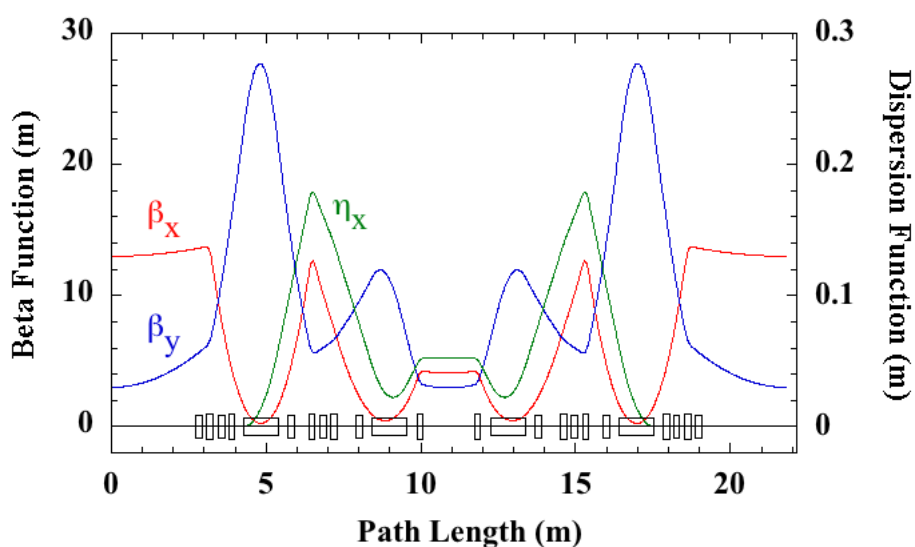


図 1.1 ユニットセル内の光学関数。赤線と青線はそれぞれ水平方向と垂直方向の β 関数、緑線は水平方向のエネルギー分散関数

である。

偏向電磁石には、リングのコンパクト化と水平エミッタンスを低減するために、偏向磁場と四極磁場を重ね合わせた機能複合型電磁石を採用した。電子ビームの一周あたりのエネルギー損失があまり大きくなならないよう偏向磁石の双極磁場は 0.87 T として高周波空胴の消費パワーの負担をやや軽減した。四極成分については 7.06 T/m とした。四極電磁石および六極電磁石の磁場有効長は 20 cm

表 1.2 本施設の蓄積リング電磁石の主要パラメータ

Magnet	Name	Length (m)	Strength (T, T/m, T/m ²)
Combined Dipole	B	1.13	0.8688, 7.06
Quadrupole	Q1	0.20	+32.6151
	Q2	0.20	-2.6278
	Q3	0.20	+49.1523
	Q4	0.20	+5.4300
	Q5	0.20	+44.6423
Sextupole	S1	0.20	+949.50
	S2	0.20	-1124.87
	S3	0.20	-472.34
	S4	0.20	+1061.73
	S5	0.20	-1540.68

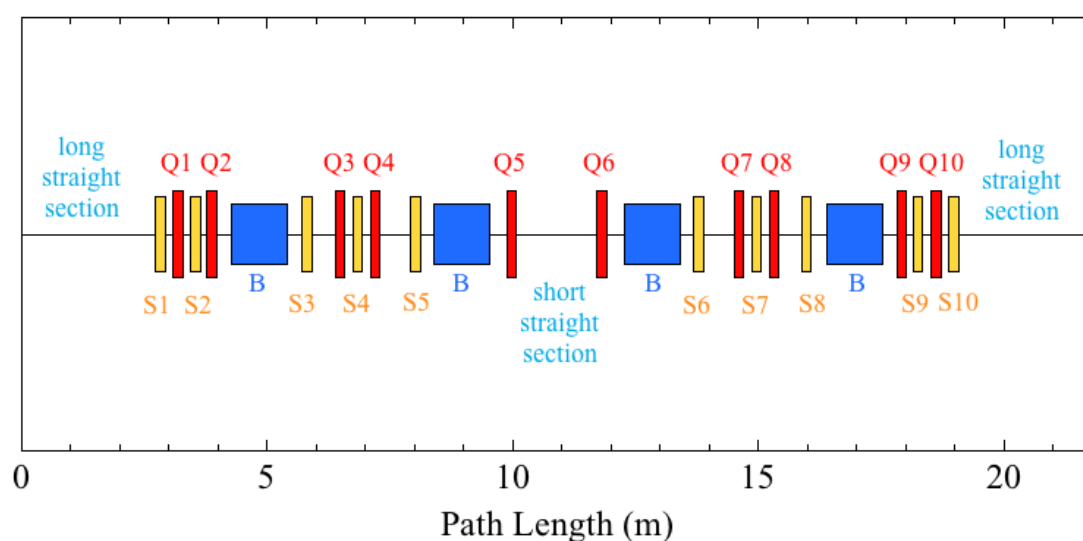


図 1.2 単位セル内の電磁石配列。青：偏向磁石（1 ファミリー）、赤：四極磁石（5 ファミリー）、黄：六極磁石（5 ファミリー）。

に統一した。最大強度はそれぞれ 49 T/m および 1541 T/m^2 であるが、これらは現実的なボア径で十分達成できる強度である。これらの電磁石の諸仕様について表 1.2 に、また磁石配列を図 1.2 に示した。

磁石配置では、Q3 と B の間および Q4 と B の間のドリフトスペースが比較的広いように見えるが、アーク部中央でエネルギー分散関数を大きくして S4 の強度を下げるための措置である（但し六極磁場を透明にする意図的な位相整合は行っていない）。短直線部に MPW を挿入して発生するベータ関数の歪みは、セル当たり 2 台設置予定の 4 極トリムコイル（上流 Q1 と下流 Q5）をメイン電源と組合せ、位相進みも合わせて補正する。

1.2. 蓄積リングにおける電子ビームの動力的解析

1.2.1. 力学的口径を広げる六極磁場強度の最適化

本施設蓄積リングのラティスからわかるように、クロマティシティ補正は S4、S3、および S5 を使って行うが、S3 と S5 のバランスはリングの力学的口径（Dynamic Aperture : DA）を左右するので、S1 と S2 の強度も含めて、力学的口径を最大に広げる六極磁石の強度を求めた。

ターゲットクロマティシティは (+1, +1) とし、エネルギー偏差を持つ粒子 (off-

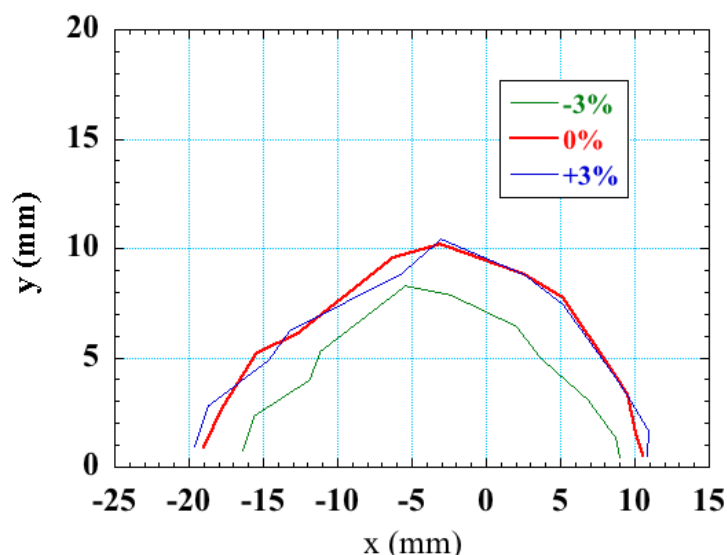


図 1.3 5.4 m の長直線部中央で見た on-momentum 粒子とエネルギー偏差 $\pm 3\%$ の off-momentum 粒子の DA。中心粒子のチューンは $(\nu_x, \nu_y) = (28.17, 9.23)$ 。

momentum 粒子) のシンクロトン振動も考慮するため、3.6 MV の高周波加速電圧を引加した。図 1.3 に得られた DA を示した。エネルギー偏差が $\pm 3\%$ であっても、水平方向に -15 mm 程度のアパーチャが確保されており、ビーム入射における十分に広い安定領域がある。垂直方向も中心で 7 mm 確保されているが、真空封止型挿入光源のギャップを考慮するとさほど重要ではない。

六極磁場強度は最大 1541 T/m^2 であるが、ボア径を 40 mm とすることで達成できる。図 1.4 にチューンの運動量依存性 (a) と水平方向および垂直方向の振動振幅依存性 (b, c) を示す。運動量依存の非線形性はあまり強くなく、 $\pm 3\%$ の範

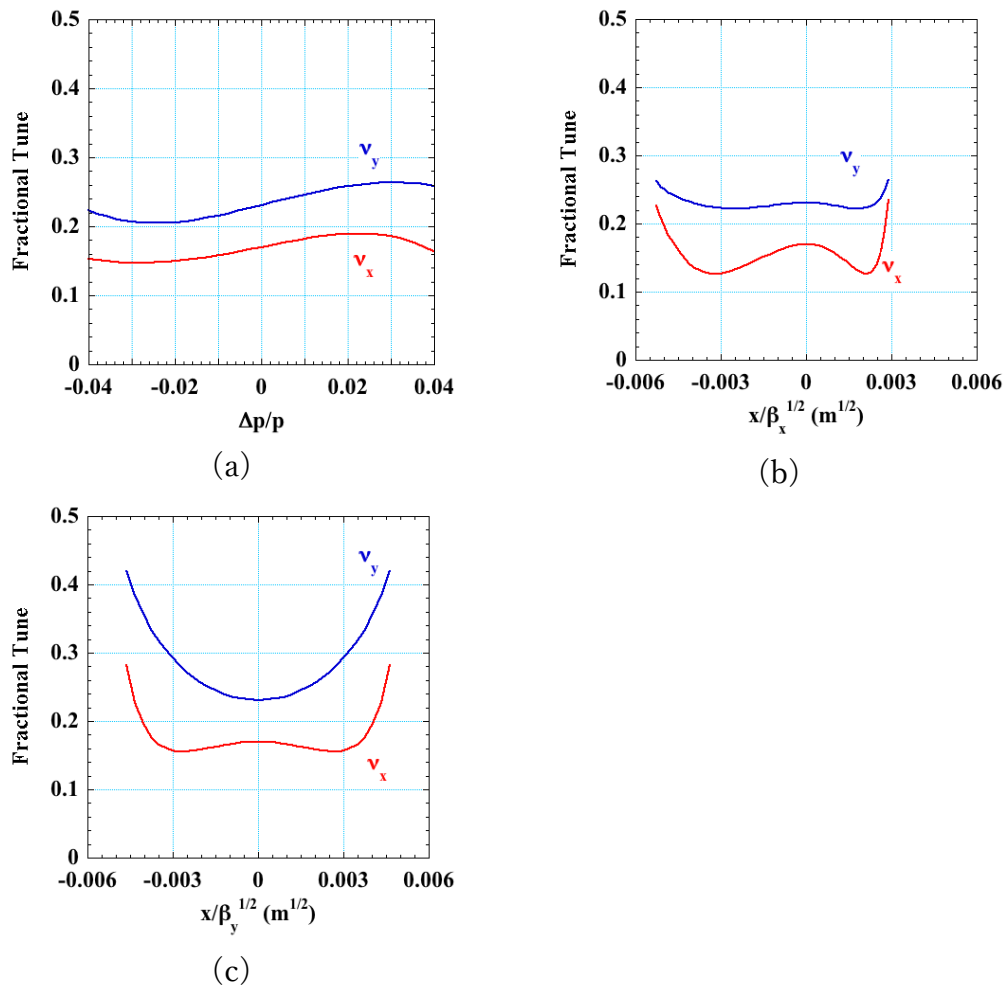


図 1.4 動作点のチューン(v_x, v_y) = (28.17, 9.23)における、(a) 非線形クロマティシティ (運動量依存のチューンシフト)、(b) 水平方向ベータatron振動振幅依存チューンフト、(c) 垂直方向ベータatron振動振幅依存チューンフト。(b) および (c) はいずれも長直線部中心での振幅を横軸とする。

囲でのチューンシフトは 0.1 以下である。振幅依存チューンシフトでは非線形性がやや強く見られる。磁石のミスアライメントで DA が数 mm 程度狭まることがシミュレーションにより予想されているが、運転に支障が生じるようなチューンシフトはないと判断できる。

1.2.2. モーメンタムアパーチャとタウシェックビーム寿命

最大許容誤差の範囲内で、通常レベルの COD 補正、チューン補正、ベータ関数補正等を適正に実施すれば、モーメンタムアパーチャ (MA) がランダム誤差の影響で激しく変動することはない。タウシェックビーム寿命を評価する上で、まずシミュレーションにより、レギュラーセルの局所的 MA の分布を次の条件により安全側に評価した。(1) 四極電磁石と偏向電磁石の上下流端、および直線部中心の計 31 点をセル当たりの評価点とする、(2) 六極電磁石にランダムな設置誤差 ($\sigma=25\mu\text{m}$ の 2σ で短絡) を与える、(3) 3.6 MV の加速電圧を仮定する、(4) シンクロトロン振動はモデルに考慮するが、放射損失なしの保存系でトラッキング、(5) 挿入光源は計算モデルには取り入れない (放射損失+磁場の影響)。シミュレーション結果を図 1.5 に示す。MA の絶対値は規格化運動量偏差 ($\Delta p/p$) で 3% から 5% の間に分布し、主に水平ディスパージョンと相関していることが分かる。平均の MA はプラス側が +4.1%、マイナス側が -4.4% となった。

図 1.5 の MA 分布並びにリング一周のラティス関数を考慮し、タウシェックビーム寿命を数値計算で評価した。条件としては以下を仮定した。(1) 3.6 MV の加速電圧を仮定する、(2) 放射損失は偏向電磁石からのもののみを考慮する、

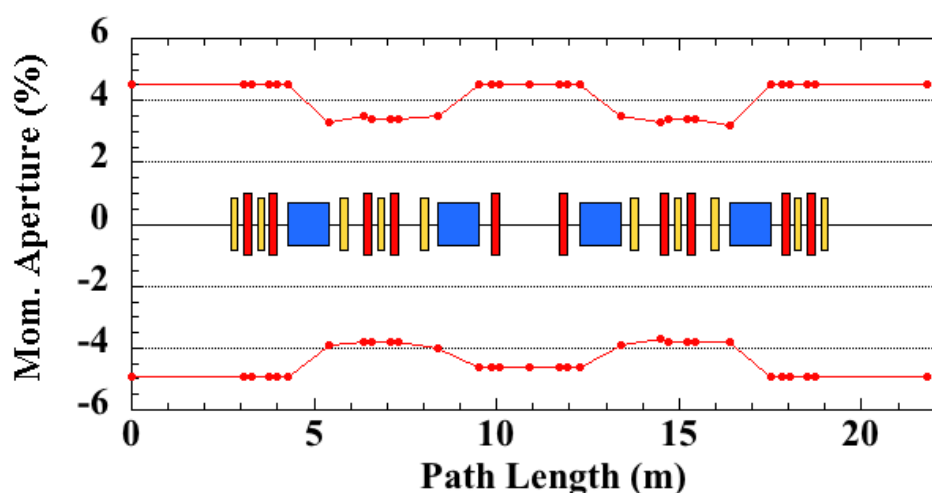


図 1.5 モーメンタムアパーチャの 1 セル内の分布

(3) ビームロスを生じるリミットとしては、MA、物理口径とバケットハイトのいずれか小さい物を適用する、(4) 電子ビーム密度は、ゼロ電流ベースの自然ビームボリュームに対し、カップリング比とバンチ長で調整する。図 1.6 にタウシェックビーム寿命のバンチ電流依存性を示す。カップリング比は通常得られる 0.2%と制御して大きくする想定の 1%の 2 種類を、また、バンチ長として短バ

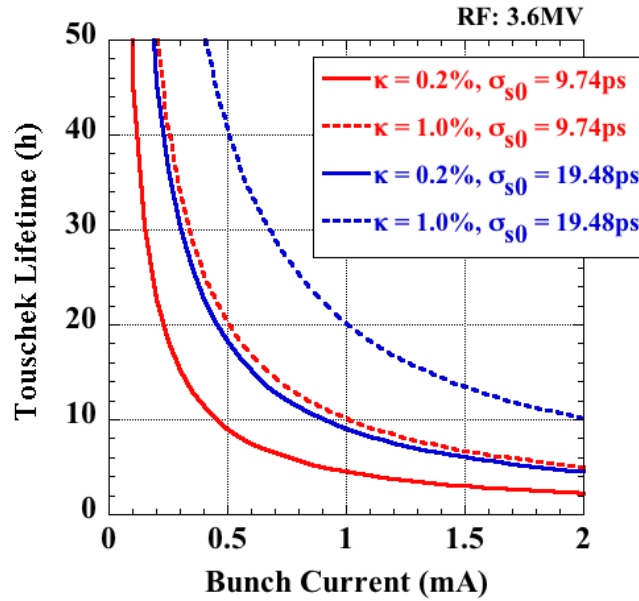


図 1.6 バンチ長とカップリング比をパラメータとして計算したタウシェックビーム寿命のバンチ電流依存性

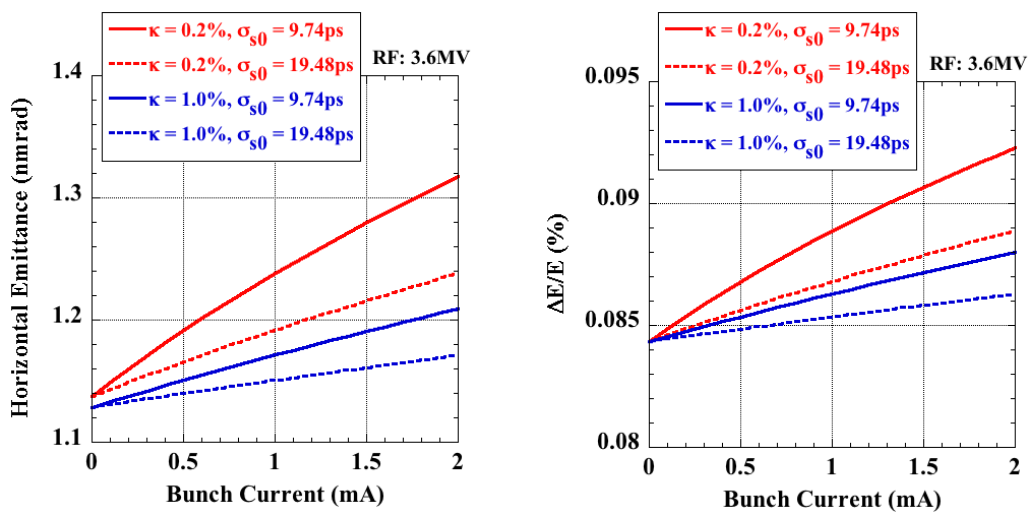


図 1.7 IBS による水平エミッタンス (左) とエネルギー広がり (右) の増大のバンチ電流依存性

ンチの限界を与えるゼロ電流限界値と通常の運転電流値で得られるバンチ伸長を模擬した限界値の2倍を組み合わせた計4通りの条件で計算した。

蓄積電流の目標値は400 mAであり、592 バケットのおよそ2/3にビームを入れるフィリングを標準と考え、バンチ当たりの電流値は1 mA（電荷で1.16 nC）である。ビーム寿命の目標設定は単純ではないが、目安として5～10 時間とすれば、カップリングを1%程度まで増加する必要があることが分かる。一方でリングのインピーダンスの効果、特にポテンシャルウェル歪みの効果でバンチ長はゼロ電流限界より長くなる。これとカップリング増加の効果を合わせることで、400 mA-400 バンチフィリングにおいて10 時間程度のビーム寿命は確保できると予想される。

バンチ内の電子・電子散乱（Intra-Beam Scattering：IBS）は、電子ビームの3軸方向でエミッタンスの増加を引き起こす。この効果は、電子・電子散乱の中でエネルギー交換が小さくビーム損失とならない小角の散乱によりもたらされ、これらの小角散乱のみを考慮し、水平、垂直、エネルギーの3軸に対し、放射減衰と散乱によるエミッタンス励起が釣り合う動的平衡を、自己充足条件を課して数値的に計算することができる[1.1]。

図1.7中の左図は、IBSによる水平エミッタンスの増加を、右図はエネルギー広がり増加を示す。計算の条件はタウシェックビーム寿命を数値計算で評価した時と同様である。タウシェックビーム寿命が約10 時間となるカップリング比1%、バンチ長がゼロ電流限界値の2倍でバンチ電流1 mAの条件では、水平エミッタンスとエネルギー広がり増大は、それぞれ無視できるレベルにあることが分かる。

参考文献

[1.1] K.L.F. Bane, et.al., PRST-AB 5, 084403 (2002).

2. 電磁石システム

2.1. 電磁石

図2.1に示すとおり、各セルは機能複合型偏向磁石4台、四極磁石10台、六極磁石10台で構成され、セル内の磁石配置は短直線部を中心とする線対称となっている。各磁石に要求されるパラメータは表1.2に示すとおりである。機能複合型偏向磁石は偏向と四極の複合磁場を生成する。これらの磁石を全て、電磁石

で製作する[2.1][2.2]。各セルにおいて短直線部を挟んで対称位置に配置される2台ずつの四極、六極電磁石は同一仕様のため、16セル分の計32台を1台の電源で直列励磁する。直列励磁する磁石間の積分磁場の個体差は $\pm 0.2\%$ 以内とする。機能複合型偏向電磁石は全て同一仕様であり、1台の電源で直列励磁する。直列励磁する磁石間の積分磁場の個体差は $\pm 0.4\%$ 以内とする。磁極形状の設計においては、挿入光源からの光をビームラインへ輸送する真空系との空間干渉がなく、かつ、以下に示す磁場勾配均一度等の要求値を満たすことに留意した上で、極力コンパクトな設計を行った[2.3]。また、高いパッキングファクタを実現させるため、ビーム軸方向への鉄芯端からのコイル飛び出し寸法を極力小さくする設計を施した。コイルはホローコンダクタを用いた直接水冷方式とした。消費電力を抑制し、励磁による熱変形を抑制するため、コイルの電流密度を 3.2 A/mm^2 未満に制限した。冷却水の圧損 0.6 MPa における運転電流値での冷却水温度上昇を5 K 未満に設定した。

全ての電磁石において、積分磁場、励磁特性、及び多極成分を測定する。励磁特性、磁束密度の三次元分布はホールプローブで測定し、多極成分は Single Stretched Wire (SSW) で測定する。

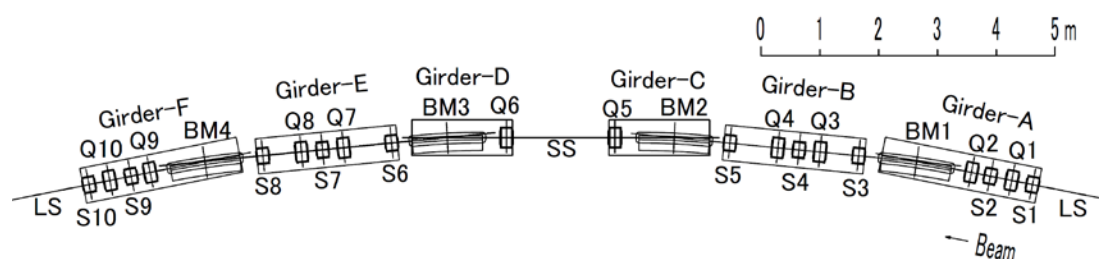


図 2.1 1セル分の磁石配置図。

表 2.2 六極電磁石の主パラメータ

	S1	S2	S3	S4	S5
ボア直径 [mm]	40				
メインコイル定格電流 [A]	250				
メインコイルターン数 [T/Pole]	9	9	9	5	9
有効磁場長 [mm]	200				
コイルを含む全長 [mm]	≤259	≤259	≤259	≤309	≤259
磁場勾配均一度 [%] ($x \leq \pm 6$ mm)	≤±0.1				
補助コイル定格電流 [A]	20				
補助コイルターン数 [T/Pole]	48	48	48	20	48
員数	32	32	32	32	32

2.1.1. 四極電磁石

主パラメータを表 2.1 に示す。厚さ 0.5 mm の無方向性珪素鋼板を積層して鉄芯を形成する。ボア直径を 34 mm、最大励磁電流を 352 A とした。磁石中心での磁場勾配は最大 53 T/m とし、実効長は 200 mm とした。ビームベースドアライメント、ツイスパラメータの局所補正の目的で四極電磁石単独の個別調整を行う場合には、各電磁石のメインコイルに単独調整用電源を接続する。

2.1.2. 六極電磁石

主パラメータを表 2.2 に示す。厚さ 0.5 mm の無方向性珪素鋼板を積層して鉄

表 2.1 四極電磁石の主パラメータ

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
ボア直径 [mm]	34				
メインコイル定格電流 [A]	352				
メインコイルターン数 [T/Pole]	17	12	20	20	20
有効磁場長 [mm]	200				
コイルを含む全長 [mm]	≤248	≤230	≤248	≤248	≤266
磁場勾配均一度 [%] ($x \leq \pm 8$ mm)	≤±0.1				
員数	32	32	32	32	32

表 2.3 機能複合型偏向電磁石の主パラメータ

ビーム軌道上のギャップ [mm]	28
定格電流 [A]	650
ターン数 [T/pole]	16
有効磁場長 [mm]	1130
コイルを含む全長 [mm]	≤ 1315
員数	64

芯を形成する。ボア直径を 40 mm、最大励磁電流を 250 A とした。磁石中心での磁場勾配は最大 2120 T/m^2 とし、実効長は 200 mm とした。六極電磁石はステアリング機能を持たせるため、メインコイルとは別に空冷の補助コイルを用意した。補助コイルは、ビームベースドアライメントの目的で六極電磁石単独の個別調整機能も兼ねる。ステアリング機能と両立させ、かつステアリング磁場の六極成分を抑制するため、3 対の対向磁極の起磁力を独立に調整できる構造とした。

2.1.3. 機能複合型偏向電磁石

主パラメータを表 2.3 に示す。電磁軟鉄のブロック削り出しにより鉄芯を形成する。通常の偏向電磁石と異なり、磁極表面は双極面になっている。ビーム軌道上でのギャップは 28 mm とし、最大励磁電流を 650 A とした。磁石中心での二極成分は最大 0.9 T、四極成分は最大 -7.3 T/m 、実効長は 1130 mm とした。四極、六極電磁石の場合と異なり、鉄芯上面に設けた基準面上の基準点を用いて精密アライメントを行う。このため、磁極表面の加工は鉄芯組み上げ後の工程にて行い、同一加工機で基準面、及び基準点の加工を同時に行う。

2.1.4. ステアリング電磁石

ステアリング機能のための補助コイルを全ての六極電磁石に配置し、ビーム調整の観点から、セルあたり 6 台の六極電磁石 (S1、S3、S5、S6、S8、S10) にステアリング電磁石電源を接続する。この六極電磁石の補助コイルは、同時に水平、垂直方向にキック可能で、最大キック角は 0.4 mrad となる。これとは別に、最大キック角が 0.2 mrad となる単独ステアリング (水平、垂直両方) を、短直線部の MPW 両端に配置する。また、アンジュレータが設置される長直線部には、その両端に別途単独ステアリング (水平、垂直両方) が配置されるため、セルあたりステアリング電磁石 (各、水平、垂直両方) は 10 台となる。

2.1.5. 架台

電磁石はセル当たり 6 台の共通架台上に設置する。便宜上、上流から A 架台～F 架台とする（図 2.1 参照）。短直線部を中心とした線対称の A、F 架台、B、E 架台、及び C、D 架台は同一構造とする。床面の高さ変動を抑制し、かつ位置調整機構を簡略化するため、脚部は 4 点支持とした。電磁石他の荷重による変形は 0.05 mm 未満とし、固有振動数は 110 Hz 以上とした。設置場所床面の凹凸の影響を回避し、かつ床面からの振動の伝達を抑制するため、トンネル内の設置該当箇所に樹脂床を施工する予定である。

2.2. 電磁石電源

2.2.1. 概要

電磁石を励磁する電源の主なパラメータを表 2.4 に示す。いずれも高い電流安定度と共に、電磁石の用途に応じて様々な制御動作が要求される。そこで、電源の電流制御を FPGA（Field Programmable Gated Array）を用いたデジタル・フィードバック制御にて行う。一方で、デジタル変換時の量子化ノイズを抑えるために、24 bit の高分解能でデジタル変換を行える DCCT-ADC 回路を用いる。

表 2.4 電磁石電源の主パラメータ。台数に予備電源は含まない。

電源名称	負荷	出力形式	定格電流	定格電圧	電流リップル 安定度	台数
偏向電磁石電源	BM	単極	650A	400V	20ppm, p-p 20ppm/8H	1
四極電磁石電源 Type1	Q1,Q3,Q5	単極	350A	200V	20ppm, p-p 20ppm/8H	3
四極電磁石電源 Type2	Q2,Q4	単極	50A	50V	50ppm, p-p 50ppm/8H	2
六極電磁石電源	S1~S5	単極	250A	110V	20ppm, p-p 20ppm/8H	5
ステアリング電源	六極電磁石 単独ステアリング	双極	± 16A	± 8V	50ppm, p-p 50ppm/8H	384
ステアリング電源	アンジュレータ両端 単独ステアリング	双極	± 5A	± 4V	50ppm, p-p 50ppm/8H	96
四極電磁石 補助電源	四極電磁石	四象限	± 18A	± 10V	50ppm, p-p 50ppm/8H	96

2.2.2. 偏向電磁石、多極電磁石用電源

機能複合型偏向電磁石、四極電磁石、及び六極電磁石用の電源は、同一仕様の電磁石ごとに電源を整備し、各電源からリング1周分直列に励磁する。台数は偏向電磁石電源1台、四極電磁石電源5台、六極電磁石電源5台となる。電源の共通化のため、四極電磁石電源は2タイプ、六極電磁石電源は1タイプにまとめた。比較的出力の大きい電源に関しては、最大定格に対する出力電流リップル、安定度とも20 ppm (peak-to-peak) 以下とした。電流制御方式はPWM (Pulse Width Modulation) 制御を用いたチョッパ・スイッチング方式とし、変換効率は0.85以上とした。正負対称出力の midpoint 接地方式とした。出力経路には切替器を設け、電源の不具合時には、経路を予備電源に変更することで、迅速に復旧する。このため、各タイプそれぞれについて1台、計4台の予備電源を整備する。

蓄積リングを回る出力ケーブルの配線は、ループによる磁場を抑制するため、時計回りに電磁石1台おきに接続し、中間点で折り返した後に反時計回りに残りの電磁石を接続する。

2.2.3. ステアリング電磁石用電源

六極電磁石の補助コイル、単独ステアリング電磁石に接続するステアリング電磁石用電源は、フルブリッジ・スイッチング方式を用いた双極型電源とする。最大定格に対する出力電流リップル、安定度とも50 ppm (peak-to-peak) とした。六極電磁石において、ステアリング用磁場の六極成分を補正するには、対向する3対の磁極の起磁力を個別に調整する必要がある。そこで、3台の電源を補助コイルの対ごとに接続し、電源間で電流変更の同期性を確保する。また、電磁石を介して発生する電源間のカップリングを考慮し、平滑回路や保護回路の設計を行う。電源は小型であるため、電磁石に最寄りの内周通路のラックに収納される。電源の不具合時には予備電源に交換することで迅速に復旧する。六極電磁石の補助コイル及びMPW 両端の単独ステアリング電磁石（合計8台/セル）については、コミッショニング以降、蓄積リングの軌道補正に組み込まれる。アンジュレータ両端の単独ステアリング電磁石については、将来的に軌道補正システムに組み込まれる。

2.2.4. 四極電磁石補助電源

四極電磁石単独で電流調整を行うため、四極電磁石補助電源を用意する。この電源は、四極電磁石電源と同じコイルに接続し、電磁石に電力を供給する力行動

作だけでなく、電力を吸収する回生動作も行える四象限電源とする。最大定格に対する出力電流リップル、安定度とも 50 ppm (peak-to-peak) とした。この電源の電位は接続された四極電磁石の電位に依存するため、電力回路には対地間絶縁が施される。また、電磁石からのサージ電圧に対する保護回路も備える。

2.3. アライメント

アライメントは、共通架台上で多極電磁石を直線上に並べる直線部アライメント（別称：架台内アライメント、磁石アライメント）と、共通架台をリング状に並べる架台アライメントに分けて行う。機能複合型偏向電磁石のアライメントについては後述する。アライメントの各工程を以下に示す。

2.3.1. 直線部アライメント

まず、トンネル外の磁場測定エリアにて直線部アライメントを行う。直線部の四極、六極電磁石の水平、垂直方向位置は、ダイナミックアパーチャをより広く確保する観点から、実現可能な範囲内で極力高精度なアライメントが要求され、 $\pm 50\mu\text{m}$ がトレランスとなる（表 2.5 参照）。このアライメントを Vibrating Wire Method（以下、VWM）によって行う[2.4]。VWM は、ビーム軸に相当する直線上に導電ワイヤを張り、ワイヤの共鳴周波数に相当する交流電流を流し、1 台ずつ励磁された磁石の磁場によって励起される振動の強弱から、磁場中心を割り出す手法である。磁場中心を直接観測しながらアライメントするため、磁場中心を一旦外部の基準点に移す際の誤差がアライメント誤差に含まれない。

実際の VWM の工程においては、ワイヤの自重による撓み、励磁後の電磁石の熱膨張による磁場中心位置の変動などが測定精度に影響を与える。そこで、真直度の高いワイヤの選択、ワイヤの撓みを考慮した補正、一定の条件で行う電磁石の予熱、といった方策を施すことで、アライメントトレランスを十分満たすことが可能となる[2.4]。電磁石個々の回転誤差である Yaw、Pitch、Roll については、VWM の工程の前後において、レーザトラッカ、水準器を用いて調整、確認

表 2.5 アラメントトレランス

種別	x, y	Yaw, Pitch, Roll
直線部アライメント	$\pm 0.05\text{mm}$	$\pm 0.1\text{mrad}$
直線間アライメント	$\pm 0.09\text{mm}$	$\pm 0.1\text{mrad}$

する。

セル中央の C、D 架台は四極電磁石 1 台だけとなるため、A、B、E、F 架台についてのみ VWM によるアライメントを実施する。

直線部アライメントを行った後、後続く工程のため、以下に示す 2 つの作業を行う。まず、架台アライメントを行うため、直線部両端の電磁石について、VWM を使って磁場中心位置を磁石上面に設けた基準点に移す[2.4]。C、D 架台については四極電磁石 1 台について、磁場中心を基準点に移す。もう 1 つの作業は、直線上に並べられた磁石の位置変位をモニタすべく、新たに開発したアライメント監視システム (Wire Alignment Monitoring System、以下 WAMS) [2.5] を用いて各磁石の位置を記録する。WAMS では、直線部両端電磁石の上面基準面にワイヤを張り、中間電磁石の基準面上のワイヤ位置を測定することで、磁場中心位置の相対的变化を評価する。そのため、真空チェンバが設置された状態で各磁石位置を測定でき、かつ励磁する必要がないことが特長となっている。

2.3.2. 架台の輸送、設置

共通架台に磁石を載せた状態でトンネル内に輸送する。トンネル内では架台脚部が設置される床面に樹脂床を施工し、その上に架台を設置する。磁石の基準面に水準器を置き、Pitch、Roll を調整する。調整後、WAMS により磁場中心位置の確認を行う。トレランスを超えて磁場中心位置が変動した場合、架台毎にトンネル外の磁場測定エリアに戻したうえ、再度 VWM によるアライメントを行う。

2.3.3. 架台アライメント

リングトンネル内に配置された基準点に対する各架台の相対位置をレーザトラッカとレベルにより測量することで、架台アライメントを行う。直線部両端の多極電磁石の基準点に SMR ターゲットを置き、これに基づいて架台をリング状に並べる。また、機能複合型偏向電磁石についても、磁石基準点に置かれた SMR ターゲットを用いてレーザトラッカにてアライメントを行う。

2.3.4. 鉄芯半割作業及び復旧

真空チェンバを設置するため、多極電磁石、機能複合型偏向電磁石の上側鉄芯を取り外す。真空チェンバ設置完了後、鉄芯を復旧する。復旧後、WAMS により架台上アライメントの確認を行う。

2.3.5. 最終測量、架台アライメント

上述の 2.3.1 節から 2.3.4 節までの工程をリング一周にわたって行った後、各架台位置を改めて測量し、最終的な架台アライメントを行う。この際、リングトンネルの建屋基準点は用いず、リング一周にわたる架台位置のネットワーク測量に基づいてアライメントを実施する。最終的なアライメントトレランスは表 2.5 に示されるとおり $\pm 90\text{ }\mu\text{m}$ となるが、電子のベータトロンチューンよりも長い周期を持つ滑らかな架台変位は、その限りではない。

参考文献

- [2.1] T. Watanabe et al., Proc. Of IPAC2016, Busan, Korea (2016).
- [2.2] K. Fukami et al., Proc. of IPAC2019, Melbourne, Australia (2019).
- [2.3] N. Nishimori et. al., Proc. of IPAC2019, Melbourne, Australia (2019).
- [2.4] K. Fukami et. al., Review of Scientific Instruments, 90, 054703 (2019).
- [2.5] C. Zhang et. al., Proc. of IWAA2016, Grenoble, France (2016).

3. 真空システム

3.1. 概要

真空システムは、蓄積電流 400 mA 運転時のビーム寿命 8 時間を達成することが可能な圧力の実現を目標に検討を行った。必要圧力は、CO 換算で 1×10^{-7} Pa である。直線部真空チェンバは、ビーム室内寸を高さ 16 mm、横幅 30 mm とし、アンテチェンバ付きの構造とした。直線部に分散配置した 12 台のフォトンアブソーバ (CR1、2 及び AB1~10) と偏向部真空チェンバ最下流に配置した 4 台の補助フォトンアブソーバ (SAB1~4) により偏向電磁石で発生する放射光を受光し、放射光が真空チェンバの壁面を直撃することのない設計とした。図 3.1 に単位セルの電磁石、真空チェンバ及びフォトンアブソーバの配置を示す。真空ポンプはフォトンアブソーバ部に集中的に配置し、放射光照射により発生した光刺激脱離 (Photon Stimulated Desorption : PSD) ガスを発生源で局所排気し、運転中に低い圧力を維持する設計としている。

真空チェンバの材質はステンレス鋼とした。1 セルの真空チェンバは偏向部真空チェンバ 4 式と直線部真空チェンバ 5 式で構成され、真空チェンバ同士は ICF フランジで接続される。また、直線部 3 中央部の短直線部にはマルチポールウィグラ (MPW) に対応したチェンバを設置する。これらの真空チェンバをリン

グトンネル内に据え付けた後、本施設建屋で 150°C のベーキング、NEG 活性化を実施し、超高真空への立ち上げを行う。

3.2. 真空システムの構造と機能

3.2.1. 直線部真空チェンバ

直線部真空チェンバの断面を図 3.2 に示す。直線部真空チェンバの垂直方向の内寸は、電子ビームのビームサイズや動力学的安定性を確保できる領域を考慮して、16 mm とする。水平方向の内寸は、電子ビームの入射時の軌道振幅に対して十分な裕度を確保するために ± 15 mm とする。スロット高さは偏向電磁石からの X 線を通すことができるように 5 mm とした。アンテチェンバ内壁はビーム中心から 73 mm とし、アンテチェンバ内壁に偏向電磁石からの放射光が照射しないように、フォトンアブソーバを配置した。また電子ビーム廃棄時に電子ビームを衝突させ、その熱エネルギーを分散、吸収させるためのグラファイト製電子ビームアブソーバを蓄積リングの 16 か所に均等に設置する。

チェンバ材質は、耐食性、耐孔食性に優れ、非磁性安定性の高いステンレス鋼 (SUS316L) を用いる。チェンバの内面にはインピーダンス低減を目的に、厚さ

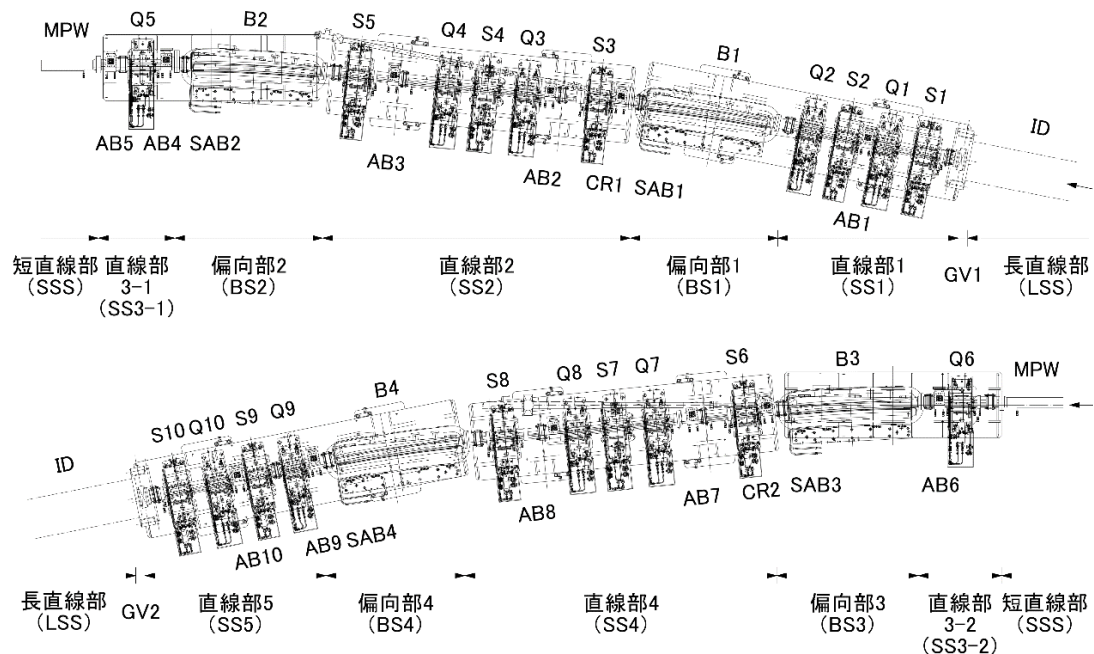


図 3.1 単位セルの電磁石、真空チェンバおよびフォトンアブソーバの配置。偏向電磁石(B)、四極電磁石(Q)、六極電磁石(S)、フォトンアブソーバ (CR1, 2、AB1~10 及び SAB1~4)。

100 μm 以上の銅メッキを施す。また真空チェンバには、チェンバの温度を安定させるための冷却水路を設ける。

3.2.2. 偏向部真空チェンバ

偏向部真空チェンバの断面を図 3.3 に示す。偏向部真空チェンバは、真空力で大きく変形することなく狭ギャップの磁極間に収まり、かつアンジュレータからの X 線を取り出すことができる形状に設計した。チェンバ材質は直線部真空チェンバと同様にステンレス鋼とした。曲げ加工済みのステンレス鋼板を偏向部の電子ビーム軌道に沿った形状で切断した上・下面材に内外の側板を溶接し

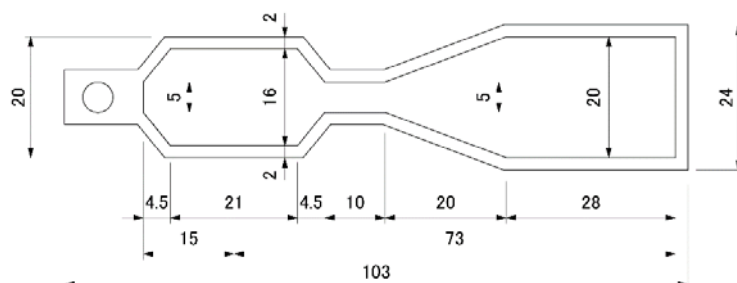


図 3.2 直線部真空チェンバ断面。数字の単位はミリメートル。

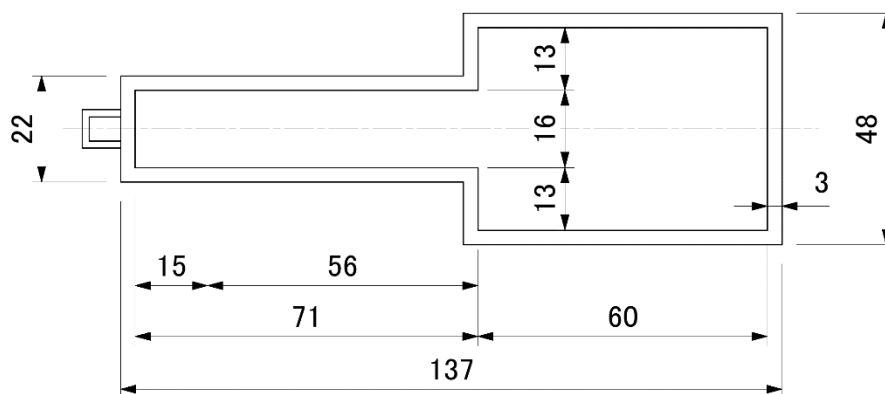


図 3.3 偏向部真空チェンバ断面。数字の単位はミリメートル。

て偏向部真空チェンバを製作する。

3.2.3. フォトンアブソーバ

放射光を真空チェンバ壁に当てないこと、受光面が受ける放射光パワーが大きくなりすぎないこと、必要な発散角の光をビームラインに取り出すことを考慮して、フォトンアブソーバの効率的な配置（図 3.1 参照）並びに受光面先端の

表 3.1 単位セルあたりの各フォトンアブソーバが受けるパワー (TP) と最大パワー密度 (PPD)。なお、最大パワー密度は直入射換算値を示す。

	CR1	AB2	AB3	SAB2	AB4	AB5	AB6	SAB3
TP (kW)	1.80	1.44	0.40	0.24	1.81	1.33	0.53	0.15
PPD (W/mm ²)	210.9	131.5	26.7	8.8	210.9	163.3	23.0	10.0

	CR2	AB7	AB8	SAB4	AB9	AB10	(IDD _ab)	AB1	SAB1	Total
TP (kW)	1.77	1.54	0.38	0.26	1.71	1.55	0.38	0.20	0.04	15.53
PPD (W/mm ²)	215.9	131.5	30.7	8.8	215.9	126.6	27.6	2.6	1.6	—

電子ビーム軌道に対する適切な位置を決定した。フォトンアブソーバは多極電磁石間に挿入する 2 台のクロッチアブソーバ (CR1、CR2) と 10 台のアブソーバ (AB1～10) および偏向部真空チェンバ最下流に組み込む 4 台の補助フォトンアブソーバ (SAB1～4) から構成される。CR と AB はビームラインへの光取り出し用窓の有無で区別される。各々のフォトンアブソーバに照射されるパワーの一覧を表 3.1 に示す。多極電磁石間に配置されるフォトンアブソーバは、放射光取出管や電磁石との干渉を避けるため、専用チェンバ上面から縦に挿入し、受光面の位置決めが可能な面タッチ型フランジで締結する。縦挿入型のアブソーバは、受光部で散乱した放射光を専用チェンバ外部に極力漏らさないための散乱防止構造を有している。アンジュレータと MPW の下流に位置する CR1 と CR2 には、それぞれ水平方向に ± 1.5 mrad 及び ± 4.0 mrad の開口を有する光取り出し窓を設ける。フォトンアブソーバは全て水冷構造を有している。CR と AB の材質は、有限要素法 (FEM) による熱および熱応力解析結果に基づいて[3.1]、高温強度特性に優れた GLIDCOP を使用する。基本的に受光面は斜入射構造とし、SPring-8 の使用実績より 20 W/mm^2 (斜入射換算) 程度を目安として設計した。SAB に関しては、最高温度が 200°C 以下であり、熱応力が降伏点を超えないため電子管用無酸素銅で製作する。冷却機構の設計については、小型化に対応可能な流路設計を行うとともに、冷却水と放射光との相互作用によって引き起こされる受光部の腐食[3.2]を回避する構造を検討した。また、振動や流路の浸食の問題

に対応するために、できるだけ流量を抑えることも重要である。

3.2.4. 真空チェンバ部品

真空フランジはステンレス鋼製とする。電子ビームが通過する箇所に関しては、フランジ同士の隙間に RF コンタクトを挿入して隙間を埋める。

ベローズはステンレス製溶接ベローズとし、内面にはインピーダンス低減のため RF シールドを設ける。パッキングファクタが厳しいため、据え付け誤差吸収のための短ストロークベローズと、フランジ締結時に使用する長ストロークベローズとに機能を分け、二種類のベローズを製作する。どちらもできる限り小型化することが重要である。

ビーム室の断面寸法が小さいため、インピーダンスには特に注意をしなければならない。真空チェンバ及び部品の断面を滑らかに接続するため、断面の段差やギャップを避け、必要に応じて緩やかなテーパ状に断面を変化させる必要がある。

アンジュレータとの取り合い部には、RF シールド付きのオールメタルゲートバルブ (GV1、2) を設置し、大気開放時の真空システムの保守性を確保する。また圧力悪化が発生した場合はゲートバルブを閉じ、悪化区間を分離する。

真空計はフィラメントの損傷がなく保守の不要なコールドカソードゲージを使用する。コールドカソードゲージの圧力接点信号とイオンポンプの圧力接点信号は、圧力悪化時にゲートバルブを閉じるインターロックとして用いる。

3.2.5. 真空排気システム

蓄積リングの真空チェンバは、その断面積が非常に小さく、ビーム軸方向に十分なコンダクタンスを確保することが困難な真空システムとなっている。そこで、偏向電磁石からの放射光をセルあたり 16 台のフォトンアブソーバで受光し、PSD によるガス放出を局在化させ、フォトンアブソーバの直近に配置した CO の実効排気速度が $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度のカートリッジ型 NEG ポンプとイオンポンプとで構成される局所型排気システムで効率良く排気を行うシステムを設計した。

3.3. 真空寿命と圧力

3.3.1. 真空寿命

蓄積リング内を周回する電子ビームの寿命は主に、放射光放射による量子寿命、バンチ内電子電子散乱による Touschek 寿命、残留ガスとの衝突による真空

寿命で決まる。RF 電圧 3.6 MV を考慮すると量子寿命は十分な長さが確保されるが、Touschek 寿命は 15 時間程度となる。ビーム寿命に対し真空寿命が大きな影響を与えないように、400 mA 蓄積時の真空寿命として 18 時間程度を確保する必要がある。その場合に要求される到達圧力は、アンジュレータでの最小ギャップ値、鉛直方向の光学関数から、CO 換算で 1×10^{-7} Pa 程度となる。

3.3.2. ガス放出量

放射光用電子蓄積リングの真空システムにおけるガス放出には、熱脱離によるものと光刺激脱離 (PSD) によるものの二種類がある。以下に結果を示す圧力分布計算では、ステンレス鋼の H_2 と CO の熱脱離は各々 2.8×10^{-9} 、 7×10^{-10} Pa · $m^3/s/m^2$ とし、真空チェンバの表面積に応じてガス放出を配分した。PSD は SPring-8-II での真空システム設計において用いたパラメータ[3.3]をもとに、各フォトンアブソーバの光子数と積分光子数に応じて配分した。

3.3.3. 圧力分布

図 3.4 に蓄積電流 400 mA、積分電流 1500 Ah 時の圧力分布の計算値を示す。S=0 は、アンジュレータ下流端のゲート弁の位置である。アンジュレータ位置にはダミーチェンバ (IDD) を配置した。計算の結果、CO の平均圧力は 6×10^{-8} Pa

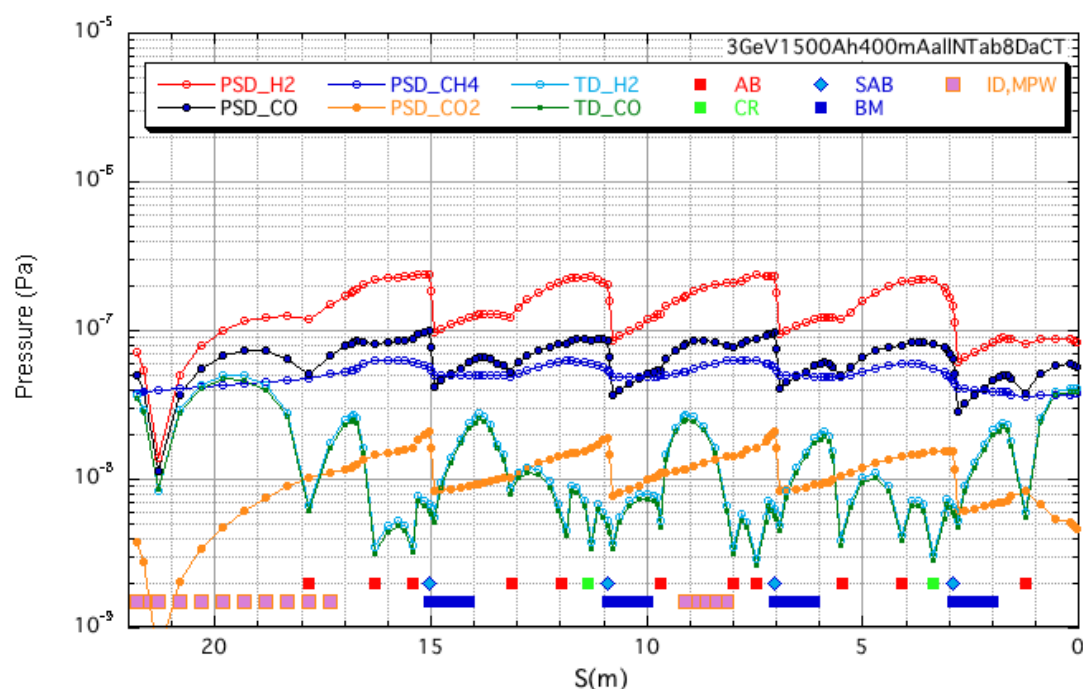


図 3.4 圧力分布の計算結果

となり、真空寿命は 22 時間、ビーム寿命は 9 時間となった。

参考文献

- [3.1] S. Takahashi, et al., J. Synchrotron Rad. 15, 144 (2008).
- [3.2] M. Shoji, et al., Vacuum 84, 738 (2010).
- [3.3] M. Oishi, et al., Proc. of IPAC2016 THPMY001, Busan, Korea, 3651 (2016).

4. 高周波加速システム

4.1. 概要

蓄積リングの高周波加速システムの役割は、電子ビームが偏向電磁石や挿入光源での放射光発生によって失ったエネルギー（放射損失）を、高周波加速空洞でビームを加速することにより補充するものである。リング 1 周あたりの放射損失は最大 1.26 MeV（挿入光源を含む）と見積もられ、400 mA のビーム電流に対して放射損失を補うためには、500 kW の高周波電力をビームに供給し続けなければならない。また、5 時間以上のビーム寿命を確保するためには、3.6 MV 以上の加速電圧が必要であり、これを高周波加速空洞で生成するためには、500 kW 程度の電力を必要とする。合計 1 MW 以上の高周波電力の生成と安定したビーム加速を実現するため、高エネルギー物理学実験用加速器や放射光源リング [4.1][4.2] で長年に渡り培われてきた 500 MHz 帯の高周波加速技術を用いて加速システムを構築する。この帯域の高周波機器は研究と改良が重ねられており、高い安定性と電力効率を有し、比較的安価に入手が可能である。

大電流の蓄積ビームが空洞を通過した時、空洞の寄生高次モード（Higher-order mode : HOM）によるビーム不安定性の問題が生じる。これはビーム自身が空洞に励起した HOM を介してビームの振動を増大させ不安定運動するものである。ビーム内のバンチ群が結合振動するため、バンチ間結合不安定性（Coupled-bunch instability : CBI）と呼ばれている。CBI はエミッタンスを悪化させ、またビームを損失させる。これらの有害 HOM による CBI を抑えつつ、大電流ビーム加速に必要な加速電場を効率的に生成するため、HOM 吸収体を内蔵した TM020 モードの高周波加速空洞 [4.3][4.4] を導入する。

表 4.1 に高周波加速システムの設計パラメータを示す。また、図 4.1 に高周波加速システムの構成図を示す。加速システムは（1）高周波源とその駆動電源、高周波伝送系、（2）加速空洞、（3）低電力高周波制御系から成り、それぞれ以

表 4.1 蓄積リング高周波加速システムの設計仕様

項目	設計仕様
ビームエネルギー	3 GeV
ビーム電流	400 mA
ビーム周回周波数	859.4 kHz
ビーム加速周波数	508.759 MHz
エネルギーロス	1.26 MeV/turn
偏向電磁石部（定常時）	0.62 MeV/turn
挿入光源（最大時）	0.64 MeV/turn
加速電圧	3.6 MV（空洞 1 台あたり 900 kV）
シンクロナス位相	170°
シンクロトロン周波数	6.0 kHz
加速空洞数	4 台
空洞での熱損失（1 台あたり）	119 kW
空洞への入力電力（1 台あたり）	245 kW

下の節で説明する。

4.2. 高周波源と大電力伝送系

500 MHz 帯の高周波源としては、クライストロンと半導体増幅器の 2 種類が考えられるが、1 MW を超える電力となると、高価な半導体増幅器は現実的でない。30 年以上の使用実績があり、安価で電力効率も良い 508 MHz、1.2 MW 出力の連続波クライストロン[4.5][4.6]を高周波源として採用する。このクライストロンはアノード電極を持つ三極管であり、出力電力に応じてアノード電圧を調整することにより、60～70%の高い電力効率で運転することができる。ゲインは 50 dB 以上あり、前段増幅器からの 10 W 程度の入力電力で駆動できる。クライストロン出力の制御は入力電力とアノード電圧によって行うため、カソード電圧の制御は不要である。そのため、クライストロンのカソードに 90 kV、20 A の直流高電圧を供給する電源は、単純な 12 相全波整流方式とし、コストの低減と故障率の低下を図る。

クライストロンで発生した高周波電力を加速空洞に伝送するため、WR-1800 規格と WR-1500 規格の導波管立体回路にて大電力伝送系を構築する。クライス

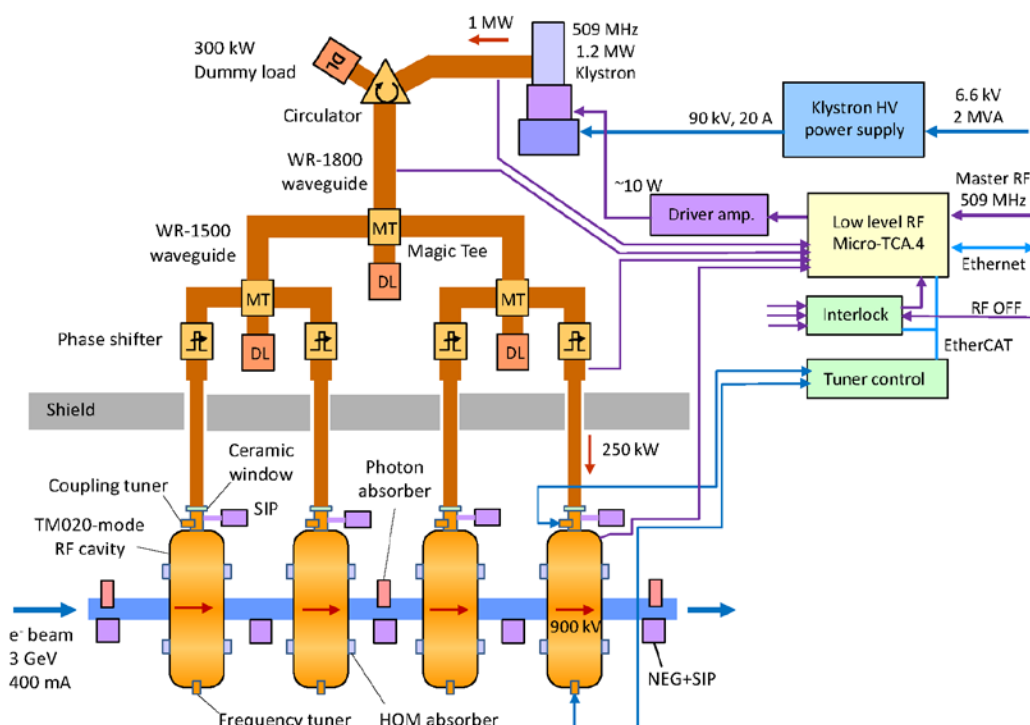


図 4.1 高周波加速システムの構成

トロンの直下流に、順方向電力 1.2 MW、逆方向電力 650 kW のサーキュレータ [4.7]を設置して、加速空洞等で生じた反射電力からクライストロンを保護する。サーキュレータの第 3 ポートに、定格電力 300 kW のダミーロード（20 μ s において最大許容電力 3 MW）を接続し、反射電力を吸収する。サーキュレータを出た高周波は 3 台のマジック T（電力分割器）により分割され、移相器で位相を調整されたあと、4 台の加速空洞へ伝送される。蓄積リング収納遮蔽体の貫通部直前で 381×100 mm の扁平導波管に変換し、貫通穴からの放射線漏洩を減らす。

4.3. 加速空洞

蓄積リングの 5 m の直線部に 4 台の空洞を収めつつ、なおかつ CBI を抑制するため、本施設の光源用に開発された TM020 モードの高周波加速空洞[4.3][4.4]を採用する。図 4.2 に加速空洞の試作品の写真と電磁場シミュレーションによる電場と磁場の分布を示す。空洞材質を無酸素銅とした場合のシミュレーションによるシャントインピーダンスは 6.8 M Ω で、無負荷 Q 値は 60,300 である。電子ビームに悪影響を及ぼす HOM の電磁場は空洞本体に設けた高周波吸収体内蔵スロットへ侵入し、大きく減衰する。図 4.3 はシミュレーションによって得られ

たモノポール HOM、ダイポール HOM のインピーダンス分布を表す。黒点は高周波吸収体のない場合、赤点は吸収体のある場合を表す。ビーム加速モードのインピーダンスは劣化せず、HOM インピーダンスは CBI 閾値以下まで減衰させることができる。

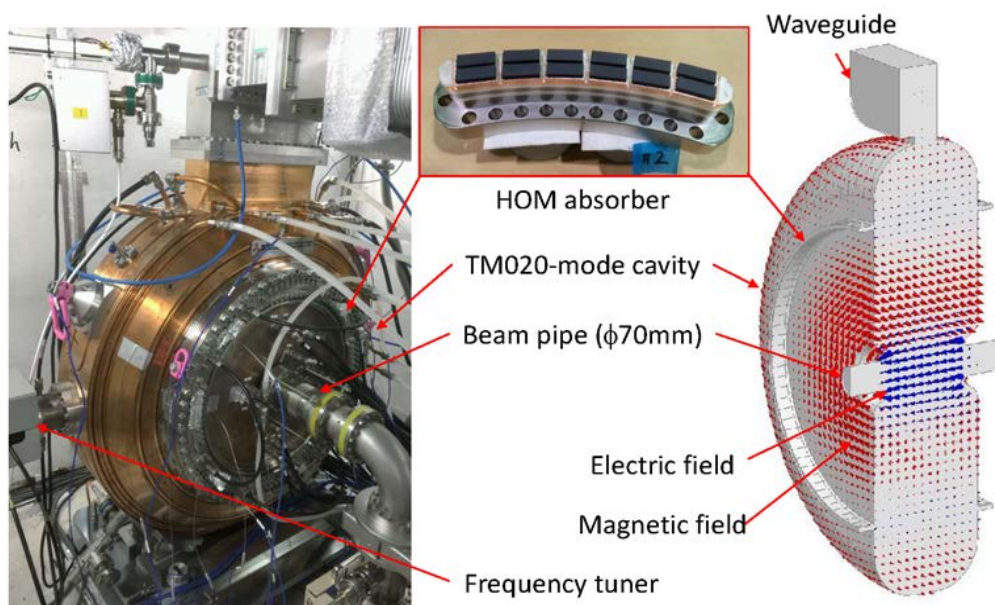


図 4.2 高周波加速空洞と HOM 吸収体 試作品の写真（左、上）と、電磁場シミュレーションによる電場と磁場の分布（右）

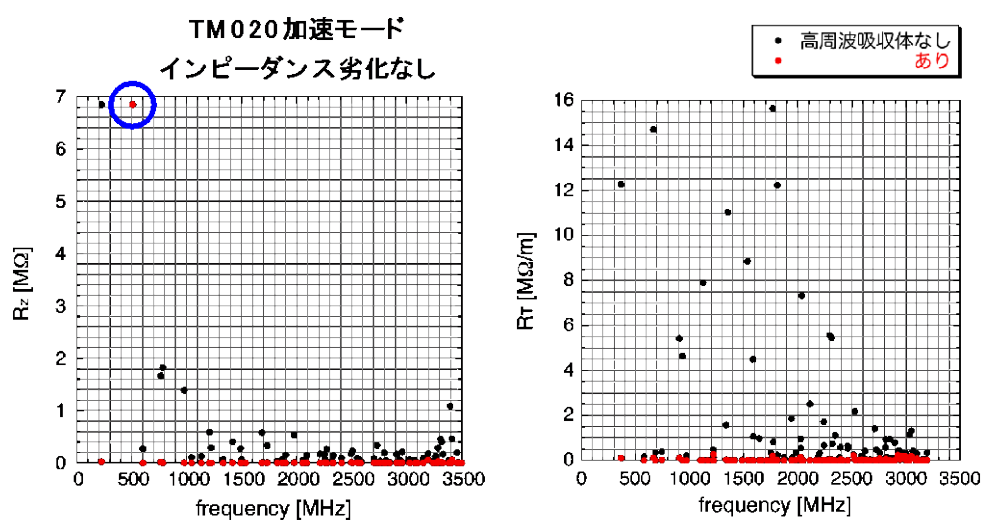


図 4.3 モノポール（左）ダイポール（右）共振モードのインピーダンス分布。青丸はビーム加速モードを表す。

空洞と導波管との接続部には、ビーム負荷の変化に応じて結合度を変えることができるカップラーを採用する[4.8]。導波管から空洞へ繋がるアイリスの直前に、銅製の可変長プランジヤー（カップリングチューナー）を設け、プランジヤーの挿入長を変えることによって 1 から 4 以上まで結合度を变化させる。これにより、ビーム電流が 400 mA まで蓄積された場合も、ビーム電流が少ない場合も、それぞれ最適な結合度に調整することにより、空洞からの反射電力を減らし、高周波電力を有効に使うことができる。

空洞を真空封止するセラミックス窓は導波管部での接続型を用いる[4.3]。銅板に開けた R 付矩形アイリスに低損失アルミナ(誘電損失<0.0001)を接合した構造で、セラミックス破損時には窓のみ交換可能である。VSWR が 1.1 以下となる帯域は 30 MHz 以上あり、200 kW 以上の電力を透過させることができる。

設計した空洞の高周波性能を確認し、大電力高周波での実運転試験を行うため、無酸素銅製の空洞を試作した(図 4.2)。HOM 吸収体としてフェライトを装着すると、TM110、TM011 等の主要な HOM の Q 値は 1000 未満となり、十分な減衰性能が確認された。一方、ビームの加速に使用する TM020 モードの Q 値の低下は 1.4%と想定どおりであった。また、クライストロンから 120 kW の高周波電力を投入して、空洞に 900 kV の電圧を発生させて運転し、大きな問題が無いことを確認した[4.6]。

4.4. 低電力高周波系

ビーム負荷や気温・水温等の環境変化によらず、加速電圧を安定化させるため、低電力高周波制御システムを使用する。2017 年より SPring-8 蓄積リングにて導入された Micro-TCA.4 規格のデジタル制御システム[4.9]を採用し、高度な集積化によるシステムの小型化と低コスト化、制御の高機能化を図る。

図 4.4 にデジタル制御システムの構成を示す。16 bit、370 MHz でサンプリング可能な 10 チャンネルのデジタイザ AMC (Advanced Mezzanine Card) に信号処理 RTM (Rear Transition Module) を組合せ、導波管や加速空洞ピックアップからの高周波信号を計測する。また、DAC 出力を用いてベクトル変調をし、クライストロンの励振高周波を制御する。空洞高周波のベクトル和、位相の回転、フィードバック制御の数値演算などの機能を、AMC 内の FPGA 上で動作するファームウェアにて実現する。

クライストロン出力は 2 層のフィードバック回路にて安定化される。クライ

ストロン出力を対象としたフィードバックは数 kHz の制御帯域を有し、クライストロン電源の高圧部リップルによる速い出力変動を安定化する。空洞電圧を対象としたフィードバックはビーム負荷や環境温度の変化、冷却水温の変動等による数 Hz オーダーの緩やかな変動を補正する。

加速空洞の共振周波数の調整は、空洞に取り付けたモーター駆動のプランジャー（周波数チューナー）を空洞内へ挿入、引き出しすることによって行う。空洞への入力高周波と空洞内加速電場の位相差を検出し、ビーム負荷によるリアクタンス成分や空洞温度変化による周波数シフトを補償するように周波数チューナーの位置制御を行う。また、ビーム負荷に合わせて空洞との結合度を最適値に調整し、空洞からの電力反射を抑えるカップリングチューナーの制御も行う。

高周波機器の運転状態を監視し、異常を検出してインターロック処理を行う機能も設ける。異常発生時には高周波スイッチを高速遮断し、クライストロンの励振を停止して高周波機器を保護する。

参考文献

- [4.1] <http://www-superkekb.kek.jp//>
- [4.2] Y. Kawashima et al., Proc. of EPAC08, Genoa, p1485 (2008).
- [4.3] H. Ego et al., Proc. of 11th PASJ meeting, Aomori Japan, p237, (2014).
- [4.4] H. Ego et al., Proc. of 16th PASJ meeting, Kyoto Japan, p17, (2019).
- [4.5] S. Isagawa et al., Proc. of PAC87, Washington D.C., p1934 (1987).
- [4.6] M. Hara et al., J. Synchrotron Rad.5, p379 (1998).
- [4.7] H. Ego et al., Proc. of EPAC94, London, p1865 (1994).

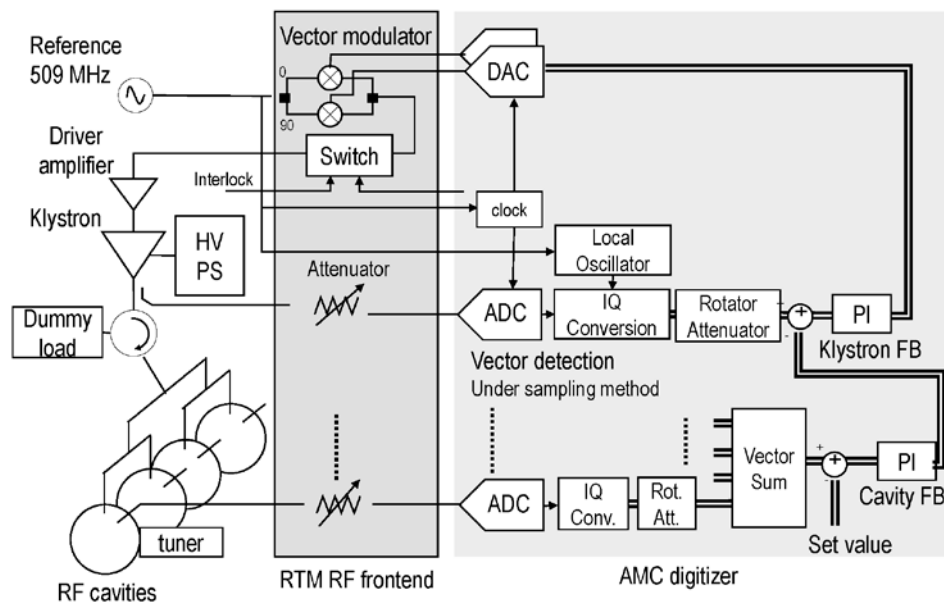


図 4.4 低電力高周波デジタル制御システムの構成

[4.8] H. Ego, Nucl. Instr. Meth. A564, p74 (2006).

[4.9] T. Ohshima et al., Proc. of IPAC17, Copenhagen, p3996 (2017).

5. ビーム診断系

5.1. 概要

本施設が目指す高品質の放射光ビームの利用運転を実現する上で、電子ビームの状態を測定し制御するためのビーム診断系が重要な役割を担う。本節では、入射ビーム輸送路の蓄積リング入射点付近と蓄積リングに設置するビーム診断機器について述べる。

入射ビーム輸送路の蓄積リング入射点付近には、表 5.1 に挙げた機器を設置する。次節に述べる入射システムを用いてビーム損失を抑制した安定なビーム入射を行うためには、入射ビームのサイズを調整しセプタム壁とのクリアランスを十分に確保することと、蓄積リングのバンパ軌道に対して輸送路の入射ビーム軌道を調整し入射されたビームのベータトロロン振動の振幅を抑制することが、必要である。このため、入射ビームサイズを測定するための OTR を用いるプロファイルモニタと、入射ビーム軌道の位置と角度を同時に測定するための 2 台のビーム位置モニタ (BPM) を設置する。また、入射ビームの電荷量を測定する

モニタ (CT) を設置して、後述する蓄積リングの電流モニタ (DCCT) による測定データと合わせて、ビーム入射の効率を評価する。

蓄積リングには、表 5.2 に挙げたモニタ機器とビーム不安定性抑制装置 (BBF) を設置する。コミッショニング時のビーム入射・蓄積のために必要な周回ごとのビーム軌道測定やビーム蓄積後の平衡軌道の監視には、後述するビーム位置モニタ (BPM) を用いる。また、蓄積電流を精度良く測定するための蓄積電流モニタ (DCCT)、バンチ電流・バンチ位相の測定や軌道変動等の診断用にストリップライン検出器も設置する。

安定な放射光ビームをユーザに供給するためには、ビームラインの光軸を精度良く測定できる安定な光ビーム位置モニタが必要となる。既存のブレード型光ビーム位置モニタ (XBPM) は、放射光ビームのピークから離れた裾を検出する方式のため挿入光源のギャップに依存して変動するオフセットを生じる問題点がある。SPring-8 の次期計画に向けた光位置モニタの開発動向などを参考に、今後詳細を検討する必要がある。

各ビームラインの発光点でのビームサイズは、リングの 1 か所でのエミッタンス及び結合比測定と BPM を用いる軌道レスポンス解析 (orbit response matrix

表 5.1 入射ビーム輸送路のビーム診断系機器

機器名	数量
ビームプロファイルモニタ	1 台
ビーム位置モニタ (BPM)	2 台
電荷量モニタ (CT)	1 台

表 5.2 蓄積リングのビーム診断系機器

機器名	数量
ビーム位置モニタ (BPM)	112 台 (7 台/セル)
蓄積電流モニタ (DCCT)	1 台
ストリップライン検出器	1 台
光ビーム位置モニタ	ビームライン毎に 1 式
ビームサイズモニタ	1 台
ベータatronチューンモニタ	1 台 (BBF に組み込む)
ビーム不安定性抑制装置 (BBF)	1 式

analysis) をもとに評価する。エミッタンスと結合比は、3-pole wiggler からの放射光を用いるビームサイズモニタで測定する。

ラティス関数の評価や、挿入光源のギャップ駆動に伴って生じるチューンシフトを監視して自動補正するため、リアルタイム性を持つベータトロンチューンモニタも設置する。設置スペースの節約及びリアルタイム性の実現のため、ベータトロンチューンモニタは後述する BBF システムに組み込むこととする。

BPM・光ビーム位置モニタ以外の蓄積リングのモニタ機器と BBF システムは、リングの短直線部 2 か所に設置するものとする。

5.2. ビーム位置モニタ (BPM)

表 5.2 に記したように、1 セルあたり 7 台の BPM を設置する。BPM の信号検出用電極は、SPring-8 の次期計画のために開発したボタン型電極を用いる。この電極は小口径真空チェンバに取付けるため、インピーダンスと発熱を低減する設計がなされている[5.1]。真空チェンバのボタン型 BPM 電極を取付ける部分は他より肉厚のブロック構造とする。BPM 電極取付部 (BPM ブロック) 断面の概念図を図 5.1 に示す。3 章に記された真空チェンバのビーム室形状に対応する配置での位置感度係数の値は水平、垂直ともに 7 mm 程度と見積もられる。この位置感度係数であれば、信号の典型的な S/N 比等から十分な位置精度が得られ

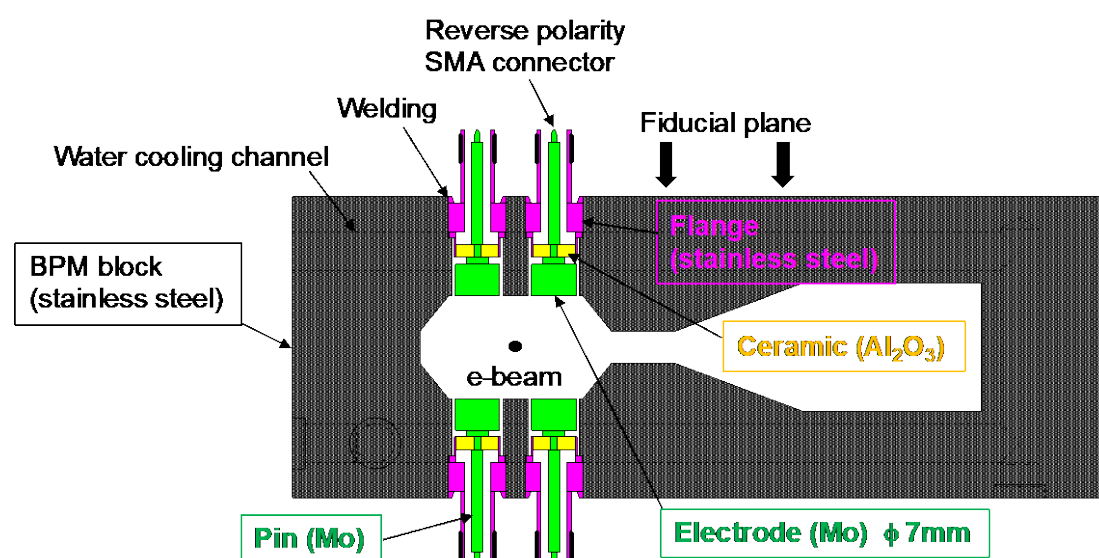


図 5.1 BPM の電極取付部 (BPM ブロック)

ることがわかっている。BPM ブロックの外面には、隣接する四極電磁石や六極電磁石との位置関係を測定するために、基準座を設けることとする。

BPM 信号処理回路は、蓄積リングのコミッショニング時にビーム入射・蓄積の調整に活用するため、周回ごとにビーム軌道の位置を高感度で測定できる機能が必要である。挿入光源が設置される短直線部・長直線部の両端の BPM 信号処理回路には、ビームライン光軸の異常を電子ビームの位置から検知するインターロック機能が必要となる。利用運転に必要な、ビーム軌道安定化のための高安定・高分解能ビーム位置測定、インターロック機能、機器のトラブル等でビームが失われた時の軌道変動診断などを実現するために、信号処理回路から turn-by-turn、10kHz、10Hz などの異なるレートで同時にデータを取得する必要がある。本光源計画に必要な機能と性能とを満たす BPM 信号処理回路として、MTCA.4 ベースの BPM 信号処理回路[5.2]を採用する。

安定な放射光ビームを利用運転で供給するため、電子ビームの軌道安定化が必要である。このため、電極や信号処理回路の設計はもとより、BPM システムとして長期に渡り安定に運用できる設計が重要である。ボタン型電極と信号処理回路とを繋ぐ信号伝送系の設計では、損失の低減やインピーダンスのマッチングに配慮したケーブルを選定し、且つ放射線照射などによる経年劣化への対策を施したケーブルを選定する。また、BPM ブロックを固定するサポートは、使用環境での温度条件などを考慮した上で今後詳細な構造を設計する。

コミッショニングに向けた運転開始前の BPM 位置較正の手順は、今後、コミッショニングシナリオ等の策定に応じ、目標とする位置測定精度とともに必要な検討を行う。ビーム蓄積後は、速やかにビームを用いる位置較正 (beam based alignment) を実施し、隣接する四極電磁石や六極電磁石の磁場中心に対する BPM のオフセットを $10\mu\text{m}$ 以下の精度で較正する。

5.3. 放射光を用いたビームサイズモニタ

3.5.1 に記したモニタ用短直線部の一つに 3-pole wiggler を設け、電子ビームのエミッタンスと結合比を測定するための放射光ビームサイズモニタを設置する。数ミクロンの空間分解能を達成するために、SPring-8 で使用実績のある X 線ピンホールカメラ[5.3]の改良を検討している。3-pole wiggler からの可視光や X 線の取り出しのため、下流側の真空チェンバは通常のセルとは形状を一部変更する。取り出された可視光はトンネル外に導かれ、実験ホールの暗室でバンチ長等

の測定に利用される。X 線ピンホールカメラについては、トンネル内に全機器を設置する。

5.4. ビーム不安定性抑制

3 章で述べた小口径真空チェンバの下、多様なビーム・フィリング・パターンで蓄積電流 400 mA の安定な利用運転を実施するためには、ビーム不安定性への対策が重要となる。利用運転の開始時期から実施が想定される top-up 運転では、ビーム入射時のビーム損失を極力低減するために、クロマティシティが小さい状態が求められる。このため、横方向のビーム不安定性を抑制する装置 (bunch-by-bunch feedback system : BBF) を運転開始当初から導入する。処理回路としては、各施設で運用実績のある FPGA をベースとするシステム (図 5.2) を採用することを検討している。また、ビーム位置の変動をバンチごとに検出するためのストリップライン電極、軌道変動をバンチごとにキックして安定化するためのストリップラインキッカと広帯域増幅器についても、SPring-8 での実績を参考に設計を進めている。なお、BBF システムを用いて得られる信号は、前述したようにリアルタイムでのベータatronチューン測定にも活用する。

参考文献

[5.1] M. Masaki, et al., Proc. of IBIC16, Barcelona, TUPG18 (2016).

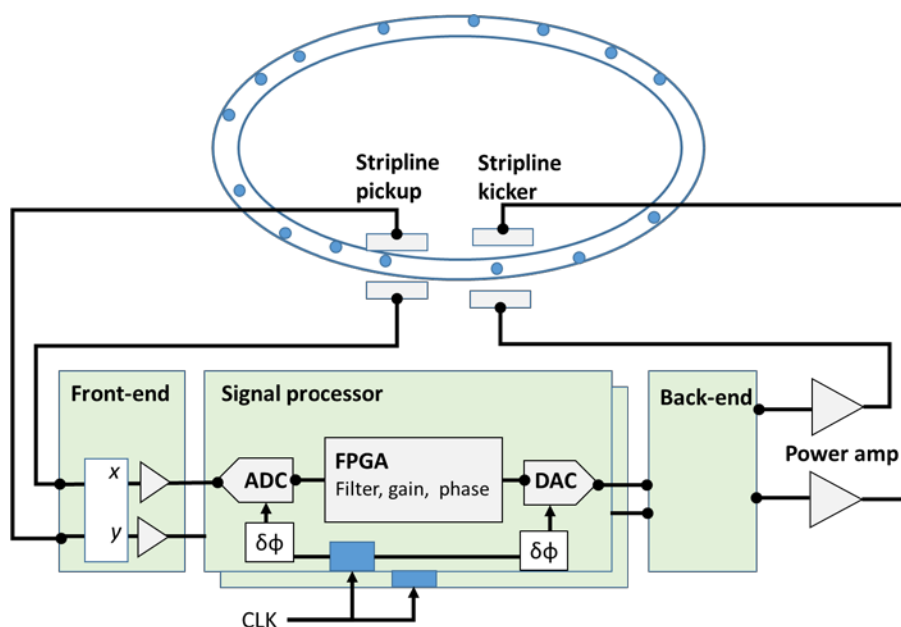


図 5.2 横方向のビーム不安定性抑制装置 (BBF システム) のブロック図

[5.2] H. Maesaka, et al., Proc. of IBIC19, Malmo, WEBO03 (2019).

[5.3] S. Takano, et al., Proc. of IBIC15, Melbourne, TUCLA02 (2015).

6. リングビーム入射システム

6.1. 概要

蓄積リングへの電子ビームの入射には、セル 4 の長直線部（～5.4 m）にキッカー電磁石とセプタム電磁石を設置し、蓄積ビームに対して水平方向に変位した位置にリングの内側からビームを入射する off-axis 入射方式を採用する。入射器として 7 節で述べる高性能線形加速器を採用することで低エミッタンスの入射ビームが利用でき、入射システムのコンパクト化、並びに高効率安定なビーム入射を実現する。

入射システムの概要を図 6.1 に示す。入射システムは 4 台のキッカー電磁石（BP1～BP4）と 3 台のセプタム電磁石（DC SEP1、DC SEP2、Pulse SEP）から構成される。入射ビームのエミッタンスを劣化させる要因となるため、線型加速器からのビーム輸送部と蓄積リングとを仕切る Be 窓等は設置しないものとする。差動排気システムをセプタム電磁石（DC SEP1）の上流側に設置して、ビーム輸送部の真空を蓄積リングの超高真空中に窓なしで接続する。また実験ユーザに入射時のビーム変動が影響を与えないよう、ビーム入射のためのバンプ軌道の内側に六極電磁石等の非線形磁石を設置しない構成とする。

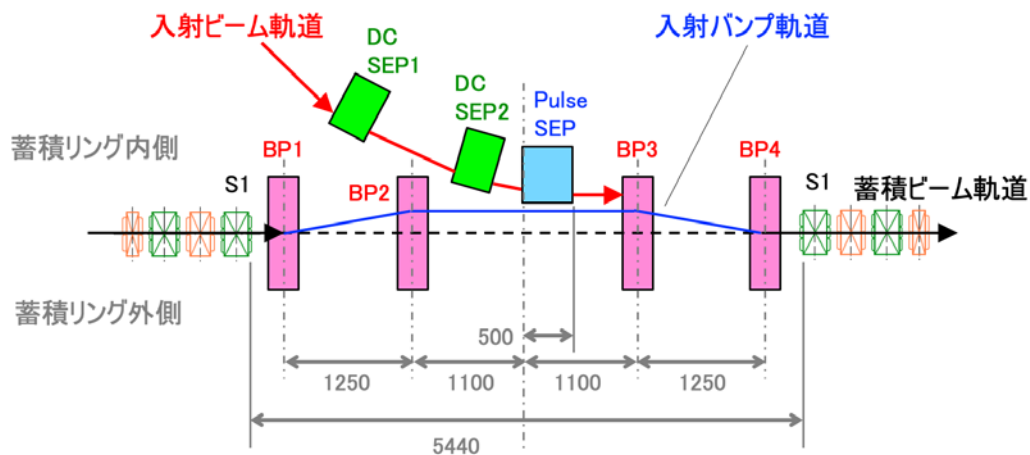


図 6.1 ビーム入射システムの概要。図中の単位なしの数字はミリメートルを表す。

6.2. 入射部パラメータ

ビーム入射部設計のために想定した入射点でのビームパラメータを表 6.1 に、入射ビームと蓄積ビーム軌道の位置関係を図 6.2 に示す。入射点での実効ビームサイズ(r.m.s.)は、入射ビームが $245\ \mu\text{m}$ 、蓄積ビームが $114\ \mu\text{m}$ である。パルスセプタム電磁石 (Pulse SEP) は真空封止型とし、渦電流シールド板の厚さと磁場シールドの厚さの和 (セプタム壁の実効的な厚さ) は、加工精度を含めて $1\ \text{mm}$ とする。入射に必要なバンパ軌道は、入射点内側の物理口径をどこまで確保するかで決まる。この口径を狭くすればキッカー電磁石の設計は容易になる。一方で、パルス駆動させるセプタム磁石 (Pulse SEP) の隔壁にリングの定常周回軌道、並びにバンパ軌道が接近し、ビーム不安定性や様々なビームロスの要因ともなる。さらに狭い口径は、チューニング上の不都合を与える場合もある。ここではビーム周回軌道からセプタム壁までの距離を $8.5\ \text{mm}$ に、パルスバンパ軌道の高さ $6\ \text{mm}$ に設定する。立ち上げ時の入射ビーム軌道の位置はセプタム壁から $2\sim 4\ \text{mm}$ の範囲を想定するが、ビーム調整によりセプタム壁に $2\ \text{mm}$ 程度まで近づけ入射

表 6.1 入射点での蓄積ビームおよび入射ビームのパラメータ

入射点でのビームパラメータ	Symbol	入射ビーム	周回ビーム
水平エミッタンス	ϵ_x	$3\ \text{nm rad}$	$1\ \text{nm rad}$
エネルギー分散	σ_E/E	0.1%	0.084%
ベータ関数と運動量分散関数	β_x, D_x	$20\ \text{m}, 0\ \text{m}$	$13\ \text{m}, 0\ \text{m}$
ビームサイズ (σ)	σ_x	$245\ \mu\text{m}$	$114\ \mu\text{m}$

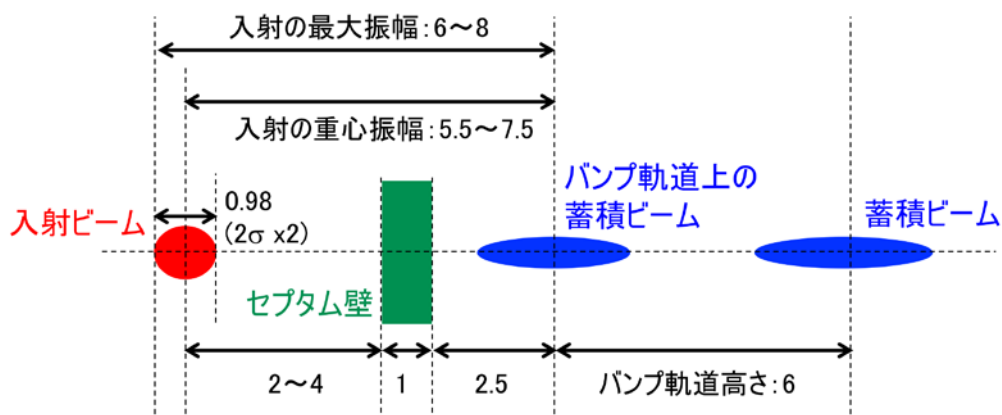


図 6.2 入射点での入射ビームと蓄積ビーム軌道の位置関係。図中の数字の単位はミリメートル。

の最大振幅を 6 mm 程度に抑えることを目指す。なお、立ち上げ時およびビーム調整時に On-axis 入射が必要となる場合には、ビーム入射部の両側のステアリング電磁石で補助的な DC バンプ軌道を作り、キッカー電磁石によるパルスバンプ軌道と重ね合わせることとする。

6.3. 入射電磁石

入射電磁石の諸元を表 6.2 に示す。キッカー電磁石 (BP1~BP4) は C 型とし、鉄芯には厚さ 0.1 mm の電磁鋼板を積層して用いる。実験ユーザに入射時のビーム変動が影響を与えないように閉じたパルスバンプ軌道を生成するために、上流側の 2 台 (BP1、BP2) 及び下流側の 2 台 (BP3、BP4) の各ペアを各々 1 台ずつの半導体化した高精度パルス電源で駆動し、4 台のキッカー電磁石の磁場波形の同一性を高めることとする。キッカー電磁石の真空ダクトはセラミックチェンバとする。セラミックチェンバの内面にはインピーダンス対策のため金属コーティングを施すが、コーティングの形状や厚さを渦電流による磁場波形への影響を考慮して設計する。

DC セプトラム電磁石 (DC SEP1 及び DC SEP2) はコイルをセプトラム板とする電流シート型で気中設置とし、鉄芯材は珪素鋼板または電磁軟鉄とし、コイルは水冷する。パルスセプトラム電磁石 (Pulse SEP) は渦電流型パルス電磁石で、0.1 mm の珪素鋼板を積層した鉄芯をステンレス製超高真空チェンバの中に設置する真空封止型とする。

表 6.2 入射電磁石主要諸元

	キッカー電磁石 (BP1、BP2、BP3、 BP4)	DC セプトム電磁 石 (DC SEP1、DC SEP2)	パルスセプトム 電磁石 (Pulse SEP)
電磁石の型	C 型	電流シート型	渦電流型
形状	矩形型	セクター型	セクター型
B (T)	0.22	1.2	1.4
電磁石長 (m)	0.22	0.4	0.5
パルス幅 (μs)	3 (half-sine)	DC	10 (half-sine)
繰り返し (Hz)	1	DC	1
鉄芯材	0.1 mm 厚電磁鋼 板	珪素鋼板または、 電磁軟鉄	0.1 mm 厚電磁鋼 板
チェンバ	セラミックチェ ンバ	SUS チェンバ	真空封止型

7. ライナックビーム入射器

7.1. 概要

蓄積リングへの電子ビーム入射用加速器として、ライナック（線型加速器）とシンクロトロンの 2 種類が考えられるが、我々はライナックを選択する。この理由はライナックのほうが建設費用はやや高いが運転時の電力費用が安く済むこと、将来的に自由電子レーザー（FEL）の併設が可能になること、理化学研究所の SACLA[7.1]で高精度・高安定なライナックの使用実績があることである。

高輝度蓄積リングの狭いダイナミックアパーチャへ安定したビーム入射を実現するには、高安定な低エミッタンスビームの供給が要求される。要求されるビーム性能を表 7.1 に示す。この要求を満たし、かつ限られた敷地内に入射加速器を納めるため、低エミッタンスの電子銃と C バンド加速管を組み合わせた構成をとる。図 7.1 には、ライナック及びビーム輸送路の配置図を示す[7.2]。全長 112 m の 3 GeV ライナックは、30 MeV 電子入射部、入射部直後のビームエネルギー測定のためのシケイン部（BC1）、20 台の C バンド高電場加速ユニットから成

表 7.1 ライナックビーム入射器への要求仕様

項目		要求仕様
ビームエネルギー	E	3 GeV
エネルギー広がり	$\Delta E/E$	0.16% (FWHM)
エネルギー安定性	$\delta E/E$	< 0.2%
ビーム電荷量	Q	0.3 nC/bunch
規格化エミッタンス	$\beta\gamma\epsilon$	< 10 mm · mrad
バンチ長	σ_z	< 5 ps (FWHM)
繰返し周波数	f_{rep}	1 Hz (ビーム運転時) 25 Hz (RF コンディショニング時)

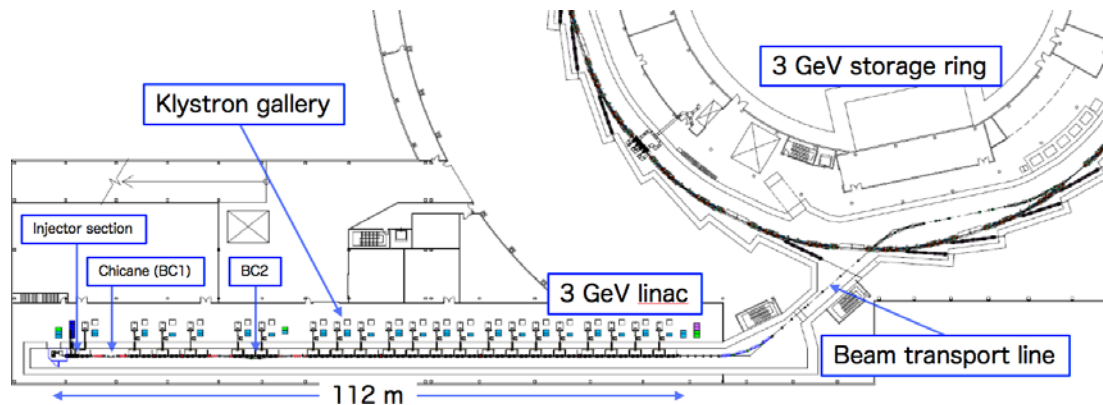


図 7.1 3 GeV ライナックとビーム輸送路の配置図

る。C バンド高電場加速ユニットは、50 MW クライストロン、RF パルス圧縮器、2 本の 2 m 長 C バンド加速管を使って、42 MV/m の加速電場を発生する[7.3]。設計の段階で構成部の性能、配置について、将来の軟 X 線 FEL のため拡張できる余地を確保する。C バンド加速ユニットの 3 台目と 5 台目の下流にスペースを設け、磁気バンチ圧縮用シケイン部 (BC2) を構成する偏向電磁石を設置できるように配置した。

高稼働率で加速器運転・利用実験をおこなうには、加速器構成機器の故障頻度を低減することが肝要である。とくに大電力機器に関して、高い信頼性と耐久性をもつ部品を選定し、故障時においても迅速かつ簡易に修理・交換可能であることを配慮した設計をおこなう。また、クライストロンやモジュレータといった大電力装置の重大故障時にもビーム入射を継続するため、2 ユニットを予備として待機させる。

蓄積リングへのビーム入射が最大 1 Hz であることから、クライストロンなど大電力 RF 機器の繰返し周波数も 1 Hz とする（ただし、RF コンディショニング時は 25 Hz 運転）。それに伴い、電子入射部の RF 空洞、C バンド加速管、クライストロンで使用する冷却水流量を 1 Hz 運転に最適化することで、電力消費を抑える。施設側冷却設備において、 0.1°C の精度で温度管理された冷却水を入射部 RF 空洞、C バンド加速管に直接使用する。また、本施設では経費削減と省エネルギー化のため、加速ユニット個別に超精密温度調整システムは使用しない。その他、外乱要因で引き起こされる RF 振幅・位相変動については、MicroTCA.4 を用いた低電力 RF システムの RF 振幅・位相帰還制御により高安定化を実現する。

ライナックで使用する電磁石は、入射部に備わる 6 台の磁気レンズ（水冷）、C バンド主加速部のビーム輸送のための 23 台の四極電磁石（空冷）、19 台のステアリング電磁石（空冷）、シケイン部に備わる 4 台の偏向電磁石（空冷）である。これら電磁石の電源は蓄積リングで使用するデジタル電源と共通仕様とすることで、バックアップ機器の合理化を図る。

ビーム診断系はトランス型ビーム電流モニタ（CT: Current Transformer）、ストリップライン型ビーム位置モニタ（BPM: Beam Position Monitor）といった非破壊型モニタを中心に配備し、全ての取得データは MicroTCA.4 による制御システムにて解析され、データベースシステムにて管理される。

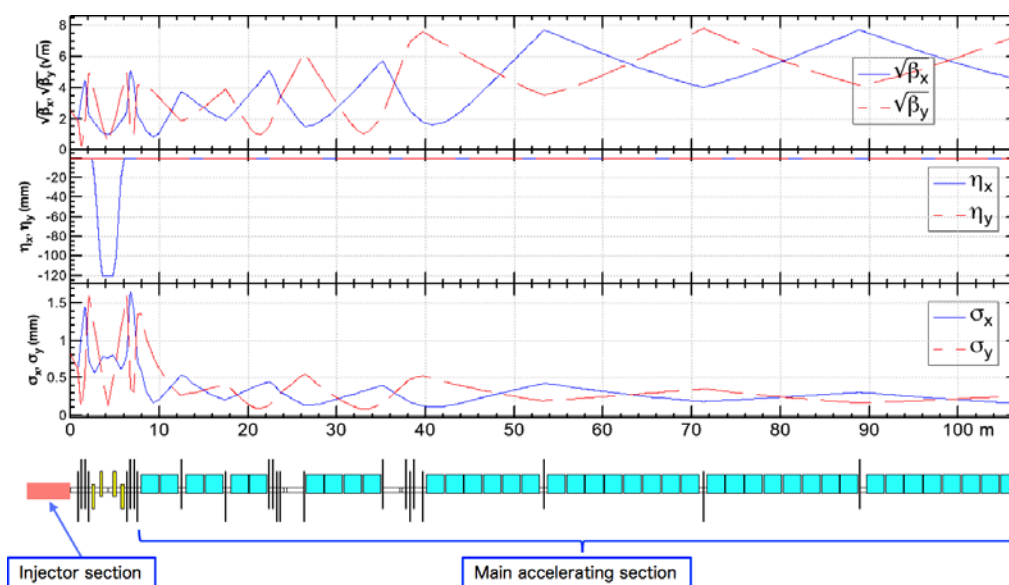


図 7.2 ライナックの β 関数（上）、エネルギー分散関数（中）、ビームサイズ（下）。

基本的なラティス構造は FODO である。図 7.2 に、ライナックの β 関数、エネルギー分散関数、ビームサイズを示す。入射部の後方(シケイン部前後)及び BC2 設置を想定した箇所には、オプティクスマッチングのために複数台の四極電磁石を設けている。それ以降は、C バンド加速ユニットが 4 ユニット (20 m) ごとに四極電磁石が設置される。

主加速部におけるビーム加速過程では、ビーム損失のない輸送を可能とし、主加速部の終端では、エミッタンスが 2 nmrad 以下、電荷量 0.4 nC、エネルギー広がり が 0.1% の 3 GeV ビームが得られる (図 7.3)。

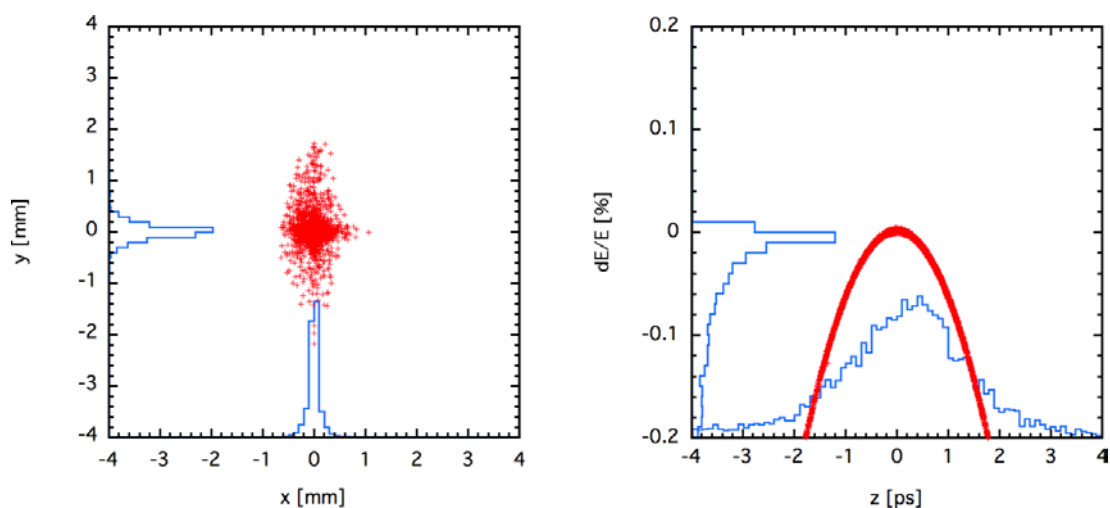


図 7.3 ライナック終端でのビームサイズと時間-エネルギー分布

7.2. 電子入射部

図 7.4 に、電子入射部の機器配置を示す。電子銃には $5 \mu\text{mrad}$ の規格化エミッタ

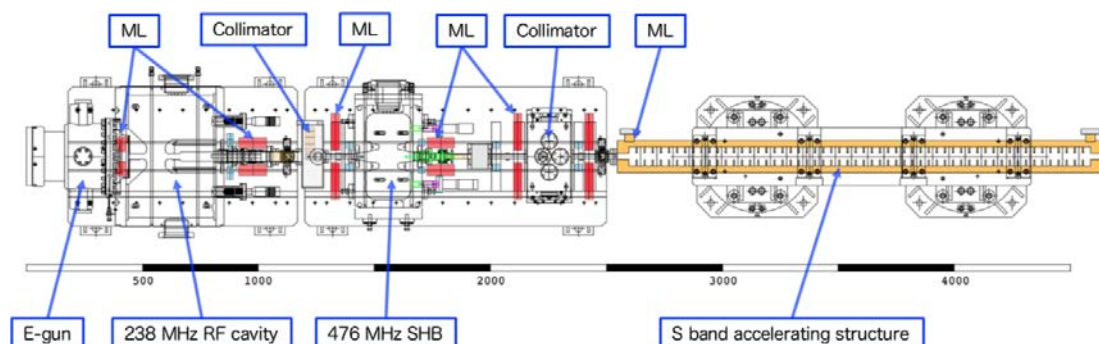


図 7.4 電子銃と入射部の配置図

ンスで 0.6 nC の電荷量が要求される。電子源として、多くの加速器施設で使用されているグリッド付き熱カソード（EIMAC Y-845、CPI 社製）を採用する。低

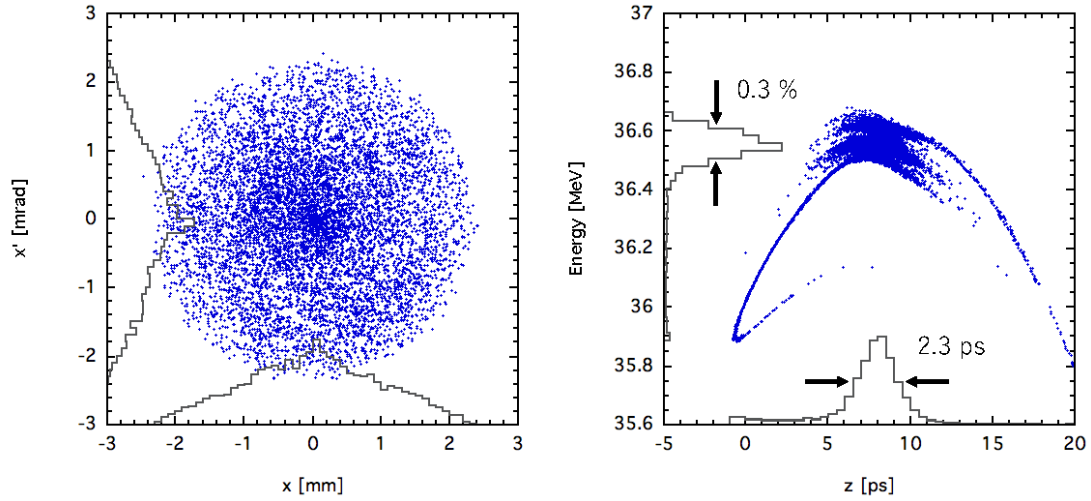


図 7.5 S バンド加速管出口でのビームサイズと時間-エネルギー分布

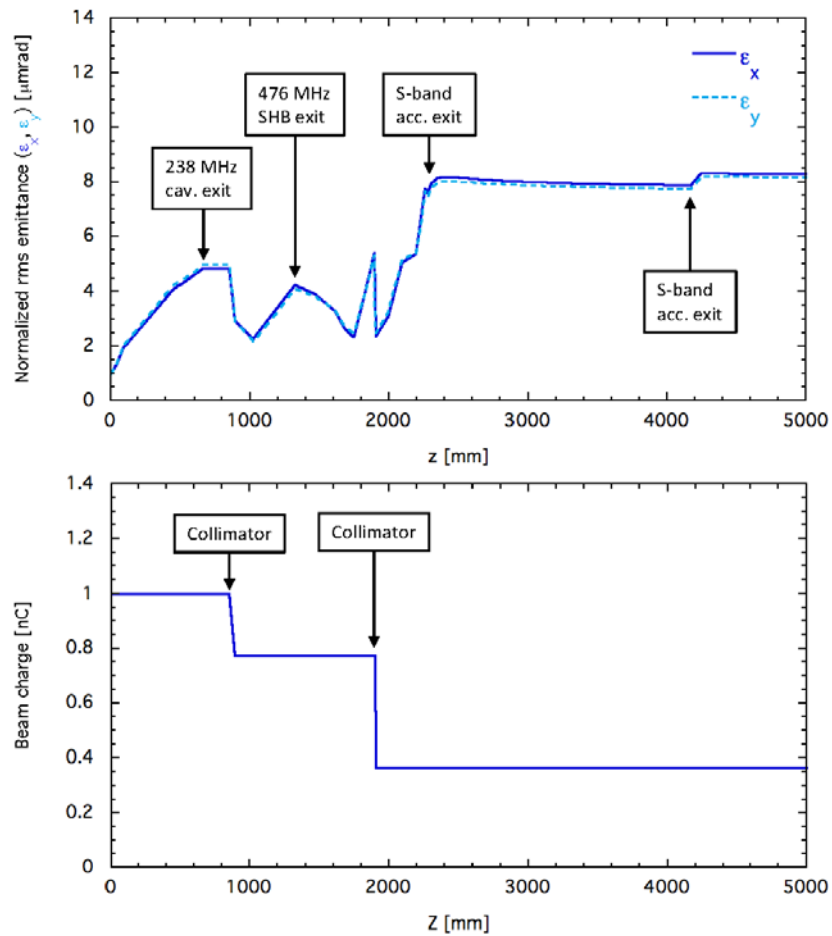


図 7.6 電子入射部での電子ビームの規格化エミッタンスと電荷量

エミッタンス実現のため、50 kV 電子銃のアノード電極直後に 238 MHz RF 空洞を設置し、500 keV まで直ちに加速する[7.4]。空洞出口に設置したエミッタンス制限コリメータを通過することで、2 μmrad (Normalized) /0.6 nC の低エミッタンス 500 keV ビームが生成される。続いて、500 keV ビームは 476 MHz サブハーモニックバンチャー (SHB) で速度変調を受け集群し、2 m 長の S バンド加速管に入射する。加速管の最初の 5 セルまでに集群が完結し、残りの加速セルでエネルギーが増加される。S バンド加速管出口でのビーム性能に関して、シミュレーションコード PARMELA で計算した結果を図 7.5 に示す。バンチ長は 2.3 ps (FWHM) まで圧縮され、エネルギーは 36 MeV に到達する。

収束系は離散的に配置された 6 台の磁気レンズ (ML: Magnetic Lens) によって構成される。横方向に均一な電子ビームのビーム径を一定に保ち、エミッタンスを悪化させる空間電荷効果の非線形成分を抑制する磁場強度に調整する。

本電子入射部における規格化エミッタンスの計算結果を図 7.6 に示す。入射部出口での規格化エミッタンスは 8 μmrad で、電荷量は 0.4 nC となる。ビーム電荷量の調整は、476 MHz SHB と S バンド加速管の間に配置されるコリメータの物理口径の調整で行う。

7.3. 主加速部

電子入射部で生成された 30 MeV の電子ビームを 3 GeV まで加速する主加速部には、高電場の C バンド加速ユニットを 20 ユニット使用する。

図 7.7 に C バンド加速ユニットの構成を、表 7.2 に主要機器のパラメータを示す[7.5]。SACLA で実績のある C バンド加速器システム[7.6]と同様の構成とする。パルス・クライストロンからの最大 50 MW、2.5 μs の RF 電力を、低損失空洞型の RF パルス圧縮器 (SLED) で約 4 倍に高めたあと、2 本の進行波型加速管に供給する。加速管は全長約 2 m のディスクロード準定電場型で、80 MW の RF 電力を供給すると、42 MV/m の平均加速電場が得られる設計[7.7]である。クライストロンの動作に必要な 350 kV、310 A のパルス電力はモジュレータが供給し、約 300 W の励振 RF は、クライストロンごとに用意されたドライバアンプが供給する。これらは、制御ラックに設置された低電力 RF システムと PLC 制御システムを通じて、上位制御系から遠隔制御される。加速管や RF パルス圧縮器、導波管の内部を超高真空に保つため、スパッタイオンポンプが使用される。また、

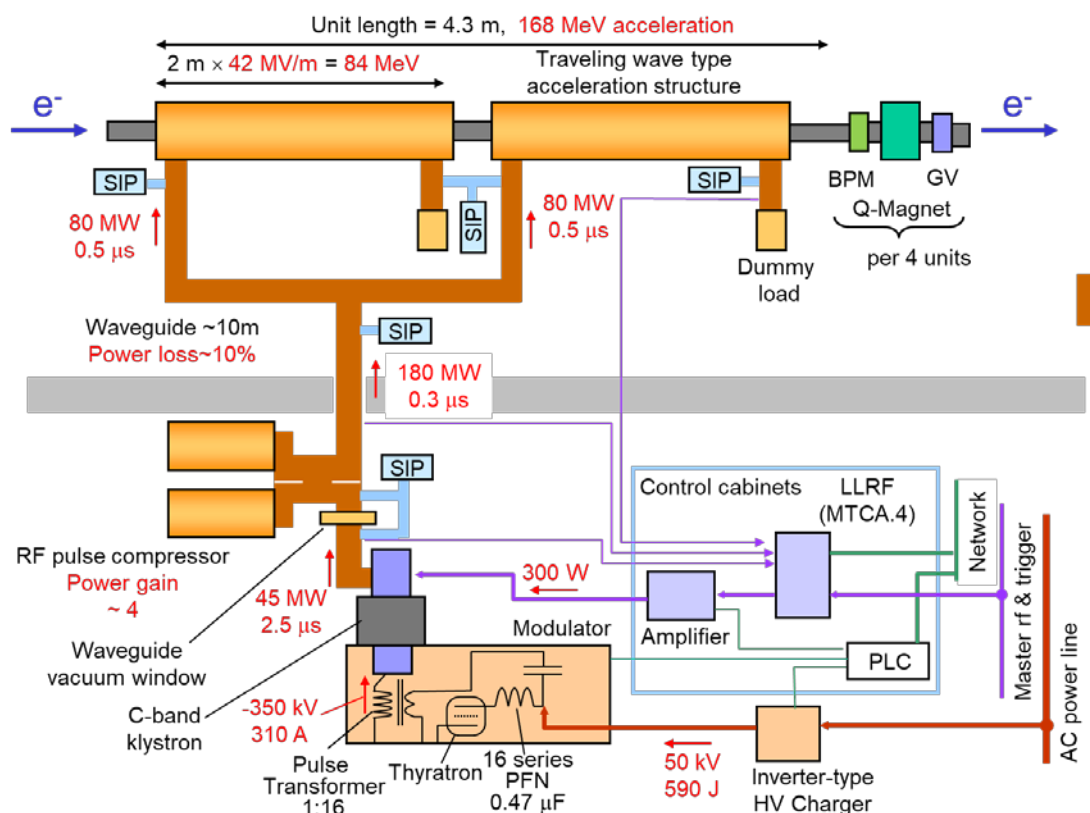


図 7.7 C バンド加速ユニット構成図

クライストロン交換時も加速管内を真真空に保つために、セラミック製の導波管真空窓がクライストロンと SLED の間に設けられる。電子ビームを集束する四極電磁石、軌道を制御するステアリング電磁石、ビーム位置モニタ (BPM)、超高真空領域を区切るゲートバルブ (GV) は、加速ユニット 4 組 (約 18 m) ごとにまとめて設置される。

加速管で 42 MV/m の加速電場が生成された場合、電子ビームは加速ユニットあたり 168 MeV 加速される。18 ユニットの 3 GeV まで加速されるため、残り 2 ユニットの予備となる。加速ユニットが故障した場合、直ちに予備ユニットと切り替えてビーム運転を継続する。

ライナックの通常繰り返し周波数は 1 Hz で、加速管や RF パルス圧縮器の発熱はわずかで、運転を切り替えた際の温度変動は無視できる。したがって、SACLA 冷却水の精密温度調節システムを採用せず、 $28 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内に制御された施設冷却水をそのまま通水する。加速管と RF パルス圧縮器の温度係数を表 7.2 示す。主加速部はクレスト位相で使用するの、位相変化による影響は少なく、冷却水の温度が $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内で安定であれば問題ない。

表 7.2 C バンド加速ユニット主要パラメータ

区分	項目	仕様
クライストロン	RF 周波数	5.712 GHz
	最大出力 RF 電力	50 MW
	出力 RF パルス幅	2.5 μ s
RF パルス圧縮器 (SLED)	無負荷 Q 値	18,5000
	結合度	11
	電力増倍比 P_{out}/P_{in} (300 ns 平均電力比)	4.0
	温度係数	振幅 $-0.06\%/0.1$ K
		位相 $1.7^\circ/0.1$ K
加速管	加速モード	$2\pi/3$ モード進行波 準定電場型
		標準セル 112 + カプラーセル 2
	実効加速長	1.994 m
	減衰定数 τ	0.604
	充填時間 t_F	300 ns
	シャントインピーダンス R_{sh}	63 M Ω /m
	定格加速電場	42 MV/m
	温度係数	位相 $1.1^\circ/0.1$ K

7.4. ビーム輸送路

ライナックで 3 GeV まで加速した電子ビームは、全長約 80 m のビーム輸送路を通して蓄積リングまで輸送される。図 7.8 に示すように、まずライナック下流で水平に 42° 蓄積リング方向へ曲げられ、遮蔽壁を経て蓄積リング内周側へと導かれる。その後電子ビームは水平方向に 2 回 (30° と 19.7°) 曲げられた後、蓄積リング入射部のセプタム電磁石を用いて蓄積リングへと入射される。

ライナックの床上ビーム高さは 800 mm、蓄積リングは 1200 mm である。ライナックトンネルと蓄積リングトンネルの床は、境界である遮蔽壁を境に蓄積リ

ング側が 200 mm 高いため、ビーム輸送路の床上ビーム高さはライナックトンネル内で 800 mm、遮蔽壁からリング内周側にある最初の垂直偏向電磁石までが

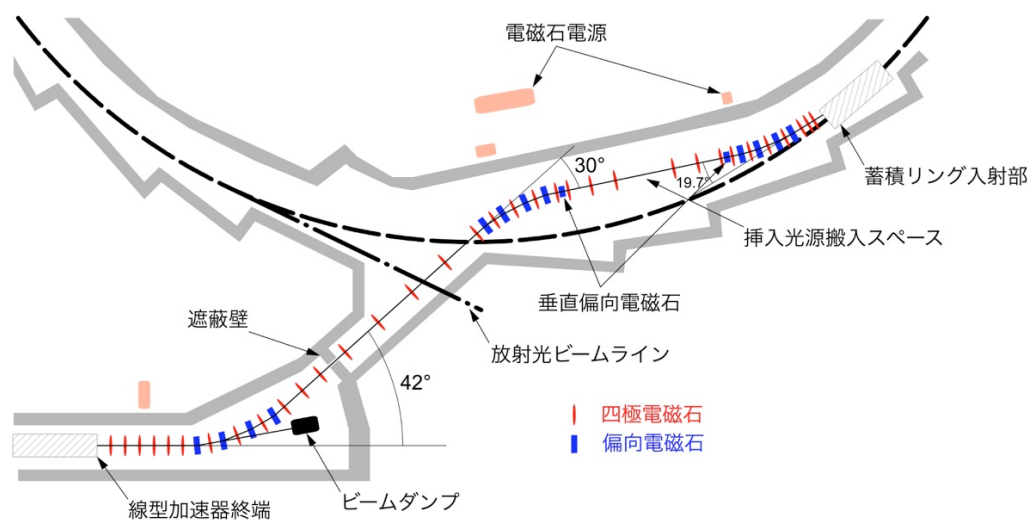


図 7.8 ビーム輸送路概略図

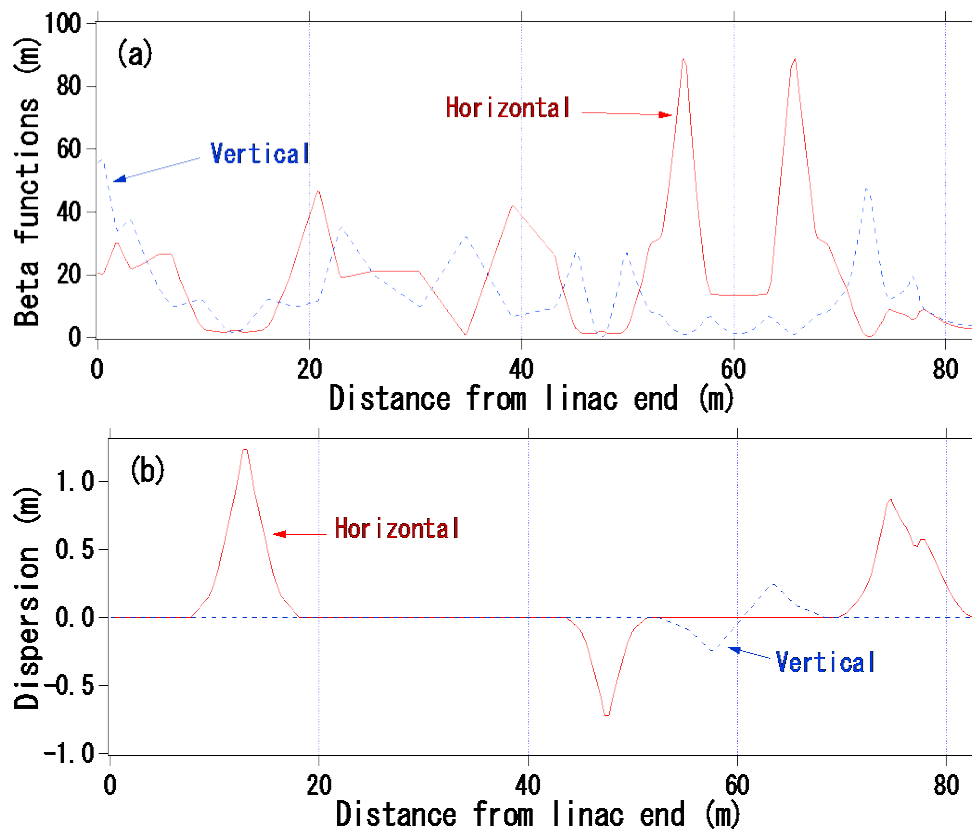


図 7.9 ビーム輸送路のオプティックス、(a) ベータ関数、(b) 分散関数

600 mm となる。リング入射部のビーム高さは 1200 mm であるため、リング内周側に設置する約 16 m 間隔の 2 台の垂直偏向電磁石でビーム軌道を 600 mm 持ち上げる。2 台の垂直偏向電磁石の間には、ビーム輸送路で囲われたリング直線部に設置する挿入光源を搬入するため、約 5 m のドリフトセクションを設けている。ビーム輸送路は、途中放射光ビームラインおよび蓄積リングビーム軌道と交差するが、600 mm の高さの違いを利用して干渉を避ける。

ビーム輸送路のオプティックスを図 7.9 に示す。偏向電磁石は全て水冷式で、偏向角が大きい水平方向は 4 台の偏向電磁石を使って電子ビームを曲げ、分散関数をローカルに閉じている。四極電磁石は、水平偏向部に設置する 3 台を除いて全て空冷とした。線型加速器下流にある最初の水平偏向部にはビームダンプを設け、ダンプ入射時には 4 台中最上流の偏向電磁石 1 台のみを励磁する。モニタ系はダンプ部を含めたビーム輸送路全体で、ビーム位置モニタ (BPM) を 8 台、スクリーンモニタを 4 台、ビーム電流モニタ (CT) を 3 台配置する。ビーム軌道調整には、水平垂直コンバイン型のステアリング電磁石 11 台を用い、磁場のヒステリシスを避けるためパーマロイヨークを使用する。

7.5. 低電力 RF 系

ライナックには、3 GeV のエネルギーを持つ電子ビームをリングの狙ったバケットに効率よく入射することが要求される。タイミングの同期精度はリングのビームのバンチ長の約 10 ps よりも高い必要がある。このためにライナックでは、信号発生器 (SG) で生成したリング周波数 508.76 MHz を分周通倍器(sync oscillator)で通倍し、得られた 238 MHz を基準クロック (238M ref) として用いる (図 7.10)。この 238 MHz 基準クロックは、238 MHz RF 空胴、476 MHz SHB、S バンド (2.856 GHz) 加速管、C バンド (5.712 GHz) 加速管のそれぞれの制御ユニットへ光ファイバを通して伝送される。また、商用電力の 50 Hz 信号 (AC50Hz) とリングのバケットタイミング、238 MHz 信号と同期の取れたマスタートリガー信号(Master Trig)も同じ光ファイバを通して伝送される。それぞれの制御ユニットでは、光ファイバで伝送された 238 MHz 基準クロックを通倍し、パルス成形、位相、振幅の制御を行って空胴の励振に用いる (図 7.11)。必要とされる位相と振幅の安定度は、例えば C バンドでは振幅で $\pm 0.1\%$ 以下、位相で ± 2.5 度以下 となる。このシステム構築には高い信号伝送速度を持ち高密度実装が可能な MTCA.4 規格のモジュールを採用する。C バンド制御ユニットは 1 台の MTCA.4 クレートで 2 台のクライストロンを制御する。250 Ms/s 以上 のサ

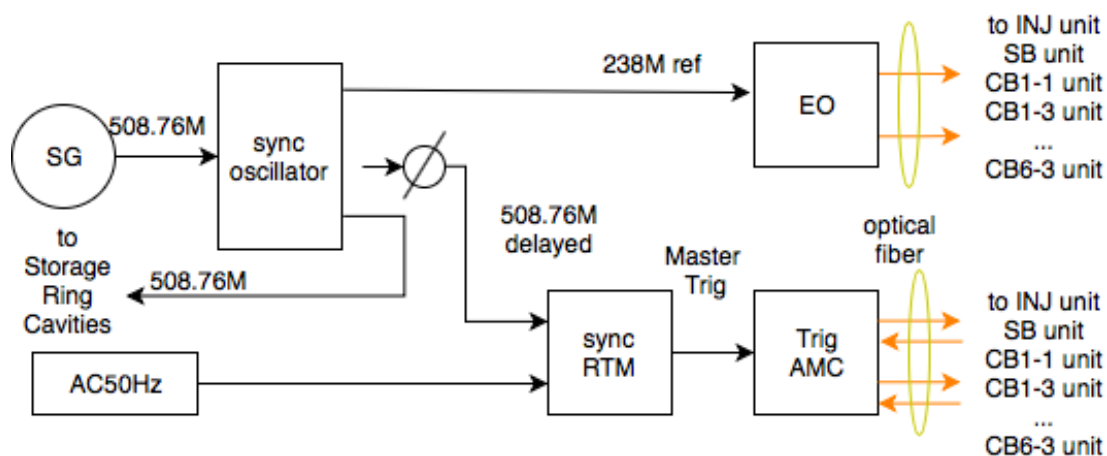


図 7.10 ライナックの基準 RF・トリガー系 ブロック図

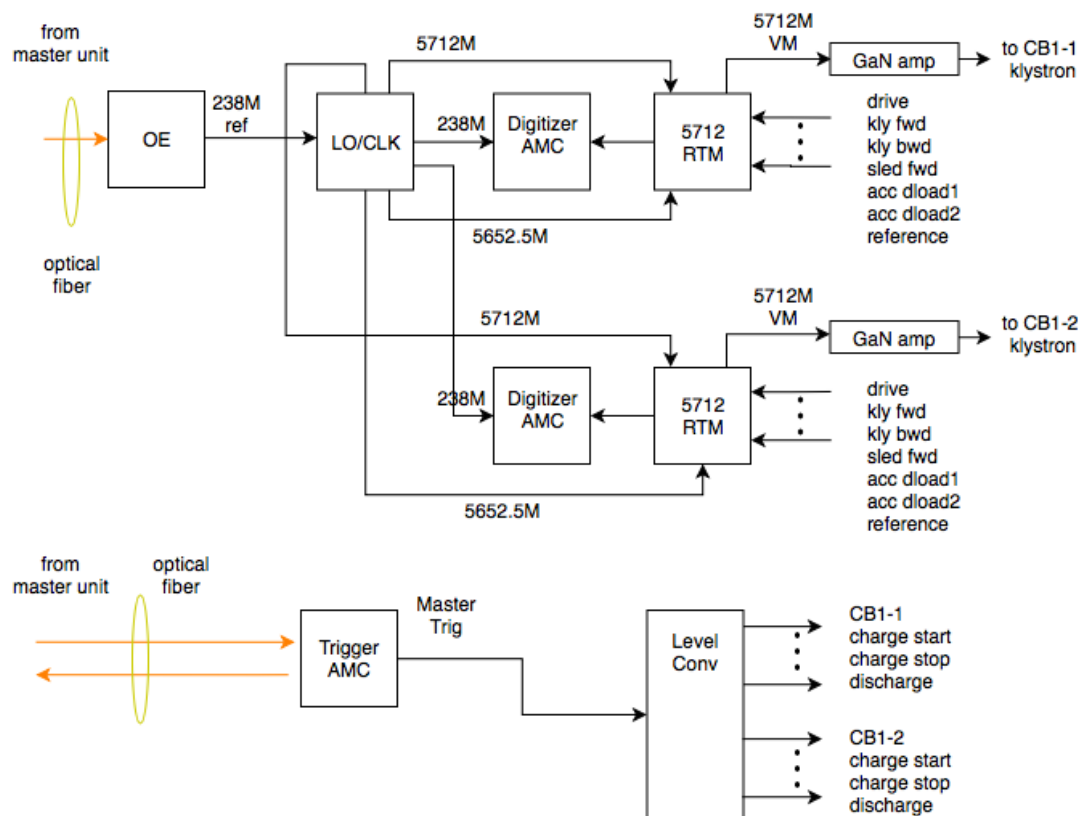


図 7.11 C バンド加速器用低電力 RF 制御ブロック図

ンプリング速度を持つ 10 チャンネルのデジタイザ AMC (Advanced Mezzanine Card) と 8 チャンネル入力 1 チャンネル出力の信号処理 RTM (Rear Transition Module) を 2 セット使用してこれらのクライストロンの励振信号の生成、ピッ

クアップ信号のモニタを行う[7.7][7.8]。この RTM から出力される励振信号は最大 800 W の GaN 半導体増幅器(GaN amp)を使って増幅され、クライストロンを駆動する。

参考文献

- [7.1] T. Ishikawa et al., Nature Photonics 6, 540 (2012).
- [7.2] T. Asaka et al., Proc. of 16th PASJ meeting, Kyoto Japan, p771, (2019)
- [7.3] T. Sakurai et al., Phys. Rev. Accel. Beams 20, 042003 (2017).
- [7.4] T. Asaka et al., Proc. of 29th Linea accelerator Conf, Beijing, China, p949, (2018)
- [7.5] T. Inagaki et al., Proc. of 16th PASJ meeting, Kyoto Japan, p766, (2019)
- [7.6] T. Inagaki et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 17, 080702 (2014).
- [7.7] T. Ohshima et al., Proc. of 15th PASJ meeting, Nagaoka Japan, p55, (2018)
- [7.8] E. Iwai et al., Proc. of 16th PASJ meeting, Kyoto Japan, p130, (2019)

8. 加速器制御システム

8.1. 概要

加速器制御用ソフトウェアとして SACLA/SPRing-8 で開発された制御フレームワークを採用する。[8.1][8.2]このフレームワークは分散制御型アーキテクチャで、特長として

- SVOC という人が読める形に抽象化された命令体系を用意することで機器の末端を GUI 製作者が知らなくてもよく、抽象化された命令を使いロジックを組み立てることで上位設計を促すことができる。
- RDBMS(Relational Data Base Management System)を前提とした制御フレームで Online, Archive, Parameter の各データベースを管理することでデータの一意性を保つことができる。
- Message を使った非同期処理とネットワークの隠蔽を行うことで GUI 製作の負担を軽減できる。
- コントロール系とデータ収集系のユーザ関数を共通化することでコントロールできればデータ収集が可能になる。
- Web サービスを使ったデータの可視化を行うことができる。

などが挙げられる。これらの特長により信頼性、Parameter データベースを使用

した再現性、安定した運転と柔軟な制御を満たすことができる。

運転用の端末として使用される上位計算機系はオペレーティングシステムとして Linux を使用して、GUI Builder やグラフィブラリーの提供を行う。

インターロックを司る制御機器は PLC (Programmable Logic Controller) で構成しハードワイヤ同等の安全性を確保する。また省配線システムを導入し作業工程の短縮とメンテナンス性の向上を目指す。

実験ユーザとの取り合いは実験に必要な加速器などの運転状況の取得と光源のパラメータ設定を行うための API (Application Programming Interface) を提供して実験システムからの操作を可能にする。

ネットワークは制御系ネットワーク及び実験系ネットワークで構成し、制御系ネットワークは他のネットワークから Firewall によって切り離し独立したネットワークとして構築する。各ネットワークは基幹 10 Gbit Ethernet、支線 1 Gbit Ethernet 接続とする。実験系ネットワークは将来の利用実験の高度化に応じて、高速 Ethernet 規格(支線 10 Gbit、基幹 40 Gbit, 100 Gbit)にアップグレードできる構成とする。制御系及び実験系ネットワークは各々異なるセキュリティポリシーで運用し、ファイアウォールにより通信制御を行う。

8.2. 制御フレームワーク

加速器の制御フレームワークの概要を図 8.1 に示す。

8.2.1. データベースシステムとデータ収集系

データベースマネジメントシステムとしてリレーショナルデータベース (RDBMS) を採用する。RDBMS の一つの特長としてデータ間のリレーションが保たれているためデータの不整合が起こりにくい。もう一つの特長は定義されたデータを検索する場合に SQL と呼ばれる言語を使用することで柔軟な検索が行える。このことはアーカイブされたデータに対して複数の信号の相関をとる場合などに有効なツールとなる。一方で書き込み性能に特化した NoSQL 系データベースをオンラインデータベースとして採用する。アーカイブとパラメータには RDBMS を採用してそれぞれのデータベースの特長を生かした構成とする。パラメータに関しては運転パラメータ、キャリブレーションデータなどを統一的に扱い、テキストファイルでの運用やハードコードされたプログラムのメン

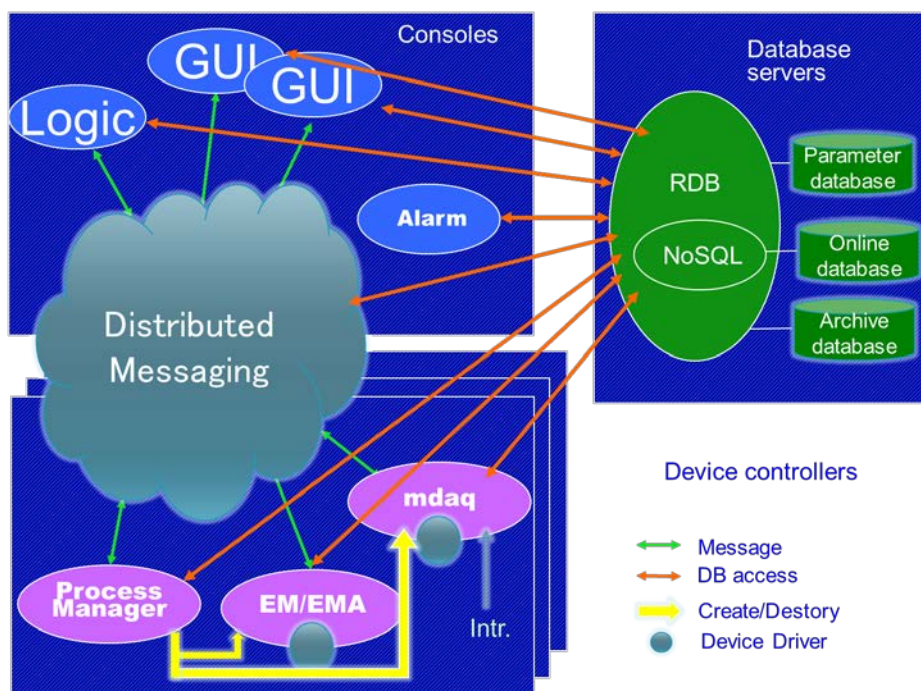


図 8.1 制御フレームワークの概要

テナンスなどの労力を省き移植性と見通しの良い構造とする。

8.2.2. データ収集プロセス

データ収集プロセス（図 8.1 では MDAQ）は定期データ収集、同期データ収集、波形データ収集に対応したプロセスを用意する。波形データ収集に関しては定期的に波形を収集してモニタできるものと異常を検知してその前後の波形を収集するプロセスを用意する。それぞれのプロセスは機器制御用のホスト（PC サーバーや MTCA.4 など）に置かれ直接データベースサーバーに書き込む。ネットワークによる遅延を考慮してデータ収集プロセスにバッファータを持たせデータの時系列が狂わないようにしている。

8.2.3. メッセージサーバー

プロセス間のメッセージのやりとりに関してはグローバルなメッセージサーバーを使用する。メッセージをやり取りするプロトコルとして MQTT[8.3]を採用する。このプロトコルは IBM によって開発されたあと ISO などで標準化されており非常に軽量でかつ双方向のプロトコルであり、基本的にキューを持っていない Publish/Subscribe モデルを採用している。ハードウェア障害などに対してはフォルトトレラントなハードウェアまたはソフトウェアによるフェイルオー

バーを利用することでダウンタイムを最小限に抑えることを想定している。

8.2.4. 機器制御プロセス (Equipment Manager : EM/Equipment Manager Agent : EMA)

EM は運転用 GUI とメッセージのやり取りをし、機器を制御するプロセスとして各制御ホストに 1 つずつ動作させる。ソフトウェアでの制御に関してはおおむね 100msec 以上のレイテンシーを想定していて、10msec 以下に関してはハードウェアでの対応を考えている。10~100msec に関してはプロセスの性格やインターロックなどにかかわる対応などを考慮して対応する。

EMA は複雑なフィードバック制御のためのプロセスで EM から起動される。フィードバックに使われるパラメータをデータベース管理にすることでパラメータの一元管理を行う。

8.3. 機器制御

機器制御系では、真空機器、高周波加速システム機器、各種電磁石電源、ビーム診断機器、入射システム機器およびフロントエンド等の制御、監視、データ収集等を行う。

8.3.1. 機器制御プラットフォーム

機器制御のプラットフォームに関して、高速な制御が必要な部分 (ビーム診断機器制御系や高周波加速システム制御系) には MTCA.4 の採用を予定している。必要に応じて (例えば PCI Express 対応フレームグラバード) 管理機能を装備した PC サーバーを利用する。MTCA.4, PC サーバー, ネットワーク機器類は、SNMP, IPMI 等の標準的なリモート管理プロトコルを用いて機器のステータスを統合監視・追跡する。

8.3.2. 真空機器制御系

真空機器制御系では、真空ポンプ等の排気系、ゲートバルブ類の制御及び状態監視並びに真空計データの取得を PLC で行う。また、収納部内で作業する際の機器の操作や状態監視が行えるよう、各 PLC にはタッチパネルを装備しリモートからの監視も可能にする。

8.3.3. 高周波加速システム制御系

高周波加速システム制御系では、加速空洞の電圧、位相、周波数、温度、タイミング等の設定、自動制御および状態監視を MicroTCA.4 計算機を用いて行う。大電力系および冷却系機器は PLC で制御し省配線システムを経由して MicroTCA.4 計算機とデータ等情報のやり取りを行う。

8.3.4. 電磁石電源制御系

電磁石電源制御系では、電磁石電源の起動・停止、電流設定、各種状態監視等の制御を PLC 互換モジュラー型 FA 計算機で行う。電磁石電源の制御には省配線システムとして EtherCAT[8.4]を用いる。

8.3.5. ビーム診断機器制御系

ビーム診断機器制御系は、ビーム電流検出器、ビーム位置モニタ、ビームサイズ測定装置およびビーム不安定性抑制装置を制御する。ビーム位置のモニタには高周波加速システムで採用する MicroTCA.4 を信号処理に使用する。放射光を用いたビームサイズの測定は、CCD カメラで取得した画像を PC（または MicroTCA.4 計算機）等に取り込み、画像処理等を行うことで実施する。

8.3.6. 機器保護インターロック

機器保護インターロックシステムは、加速器の各装置や、挿入光源およびビームラインからの機器保護インターロック信号を受け、蓄積ビームを速やかにビームアポート、電子銃のトリガー停止および真空の保護などを行う。

参考文献

- [8.1] T. Fukui, et al., “Status of the Control System for the SACLA/SPRING-8 Accelerator Complex”, Proceedings of ICALEPCS 2017, FRAPL03, Barcelona, Spain, 2017
- [8.2] T. Sugimoto, et al., “Status of the Control System for Fully Integrating SACLA/SPRING-8 Accelerator Complex and New 3 GeV Light Source Constructing at North Region in Japan”, Proceedings of ICALEPCS 2019, WECPL01, New York, NY, 2019
- [8.3] <http://mqtt.org>
- [8.4] <https://www.ethercat.org/default.htm>