

# 加 速 器

熊谷 教孝

## 1. SPring-8加速器施設の概要

SPring-8 ( Super Photon ring 8GeV ) は、X線領域での生物、物理、化学、医学等の先端的分野での基礎研究および応用研究に用いるため、日本原子力研究所・理化学研究所が共同して1990年から兵庫県播磨科学公園都市内に建設を始めた挿入光源を主体とした第三世代の高輝度放射光光源である。この加速器施設は高輝度光を作る8GeVの蓄積リングと、これに全エネルギー方式で電子ビームを供給できる入射器系 ( 1GeVの線型加速器と8GeVのシンクロトロン ) で構成され、1996年8月1日から1GeV線型加速器のビーム調整が、12月からシンクロトロンが、そして翌年の3月からは蓄積リングの調整が始まり、その年の10月から蓄積リングでの放射光利用実験が開始された。そして現在までの約4年半、世界最高性能の高輝度放射光を利用者に提供している。また、1998年10月からは、線型加速器からの1GeV電子ビームのNew SUBARUリング ( 姫路工業大学が建設した1.5GeVの放射光リング ) への供給が始まった。この加速器施設の主要諸元を表1に示す。

## 2. SPring-8の現状と進展

### 2-1 加速器の運転

1997年10月の供用開始から2000年末までの加速器総運転時間の年度毎の推移を図2-1に示す。2000年の加速器施設の運転は、第1週目の水曜日に始まり、翌々週の金曜日に停止する3週間モードを基本として運転された。蓄積電流は100mAで、電子ビームは多バンチモードで1日1回、少数バンチモードで1日2回の割合で蓄積ビームに足される方法で入射された。1月から12月までの年間の加速器総運転時間 ( サイクル毎の線型加速器のビーム運転開始から全系加速器の運転停止までの時間の総計 ) は5,168時間で、その内蓄積リングの運転時間は4,973時間であった。この運転時間の65.6%がユーザータイムに、32.6%が加速器の調整とビームラインの調整 ( この時間には、30m長直線部導入にともなう3週間に渡る加速器ビーム調整と新規ビームラインの立ち上げ調整時間が含まれている ) に、そして残り1.8%が機器故障等によるダウンタイムであった。

表1 加速器施設の主要諸元

1. 蓄積リング ( 30mLSS 磁石配列 )		2. 入射器系	
粒子	電子または陽電子	1) 線型加速器	
エネルギー	8GeV	エネルギー ( e <sup>-</sup> /e <sup>+</sup> )	1.2 / 0.9GeV
周長	1435.948m	全長	140m
磁石配列	Chasman-Green	エミッタンス ( e <sup>-</sup> )	<1 mm·mmrad
セルの数	44	ビーム電流 ( e <sup>-</sup> /e <sup>+</sup> )	100mA/10mA
エミッタンス	6.0 nmrad	繰り返し	60Hz
バンチ長 ( FWHM )	30ps	加速周波数	2856MHz
蓄積電流	100mA	加速管の本数	26本
加速周波数	508.6MHz	クライストロンの数	13本
加速空洞の数	32台	2) シンクロトロン	
ベータートロンチューン	40.16/18.36	エネルギー ( 入射 / 出射 )	1.0GeV / 8GeV
シンクロトロンチューン	0.0101	周長	396.12m
エネルギー拡がり ( E/E )	1.01 × 10 <sup>-3</sup>	磁石配列	FODO
ダンピング時間 ( msec )		セルの数/超周期数	40/2
( x / y / s )	8.3/8.3/4.15	エミッタンス	222nmrad
ビームラインの数	62本	ビーム電流	10mA
内訳 挿入光源	38本	加速周波数	508.6MHz
偏向電磁石	24本	繰り返し	1Hz
		ベータートロンチューン	11.73 / 8.78

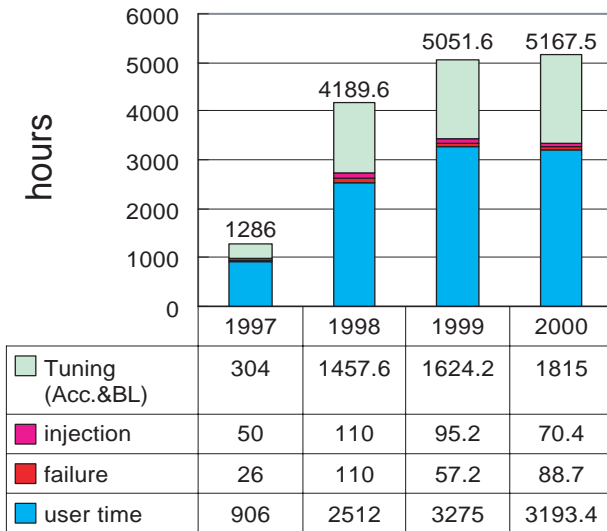


図2-1 運転統計

ユーザータイムでのパンチのフィリングモードは、多パンチモードの運転が全体の53.5%に当たる1,747.5時間、少数パンチモードの運転が30.8%に当たる1,003時間、そして残りの15.7%に当たる513時間が多パンチと少数パンチモードが共存するハイブリッドモードでの運転であった。少数パンチモードでのパンチ不純度（蓄積されていないはずのバケットに入り込んでしまう電子数を主バケット内に蓄積された電子数で割った値）は、おおむね $10^{-6}$ から $10^{-7}$ 台の値で運転された。

図2-2は、1997年10月からの供用開始から現在までのダウンタイムの原因を種類毎にまとめたものである。2000年の主な故障原因は、高周波加速空洞、電磁石電源、冷却水流量計、挿入光源部に設置された機器保護用ビーム軌道位置検出器等の故障および誤動作、ビームラインインターロック機器の誤操作、電力会社の送電線への落雷による瞬時電圧降下や地震であった。地震による停止の場合、放射線発生装置としての機器の健全性と遮蔽壁やビームラインハッチの健全性を確認するため復旧するまでに約3時間程度を要した。

この故障統計から、100mAの運転を始めた1999年頃から電磁石冷却水流量スイッチによるビームアポートが頻繁に発生することが分かった。動作が不安定な流量スイッチ

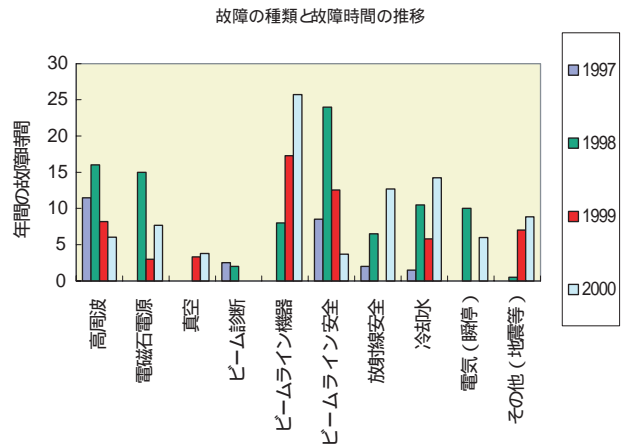


図2-2 故障統計

を分解調査した結果、流量スイッチ内部で冷却水の流速を圧力に置き換える部分の真鍮性のニードル部が摩耗し、圧力を正確に計ることができなくなっていた。写真1にニードル部の未使用品（左側）と摩耗した物（右側）を示す。この摩耗の原因は、冷却水中に多量に含まれている銅結晶（水質検査の結果）によるエロージョンで、その対策として、2001年夏期停止期間中に、より摩耗に強いタイプの流量スイッチへの交換を予定している。これとは別に、銅が冷却水（純水）に溶け出す過程の解明と、その溶出部位の特定を急ぐとともに、該当する機器の予備品の製作を進めている。一方、入射器系（線型加速器とシンクロトロン）が原因で、蓄積リングへの定時のビーム入射が延期され回数は2000年度では12回、延べ時間で約14時間であった。原因は、線型加速器ではクライストロンユニット（13台）内で使用している機器（ファンやサイラトロン）の寿命によるものが、シンクロトロンは、高周波空洞からの反射、真空計の異常、電磁石電源の故障によるものが主なものであった。線型加速器は、運転時間が30,000時間を越え始めていることから、クライストロン等機器の故障の頻度の増加と性能の劣化が今後予想される。

## 2-2 蓄積リング

### ビーム性能

蓄積リングは、2000年6月までチャスマングリーン型磁

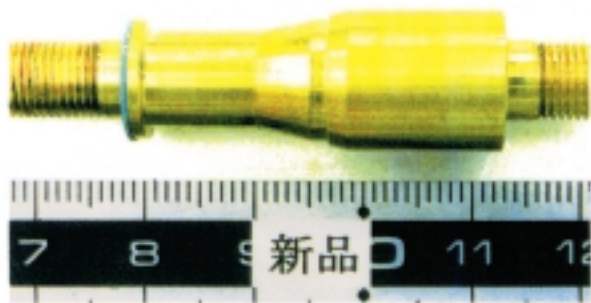


写真1 六極電磁石冷却水の流量を監視していた冷却水流量スイッチ中心軸部の損耗。左側が未使用品、右が使用品

表2 長直線部導入前後のSPRing-8蓄積リングのビーム性能 (2000年末現在)

	Designed value	Achieved value in phase1		In phase2
		Hybrid	HHLV	30m LSS
Symmetry	24/48	24	48	4
Stored current (multi/single)	100 mA/5mA	100mA/16mA	100mA/16mA	100mA/13mA
Emittance	<b>6.9/6.2/6.0nmrad</b>	6.8 nmrad	6.0 nmrad	6.3-7.4 nmrad
Coupling(acc. mode/ user mode)	less than 10 %	<0.06 %	<0.04 %/0.1%	0.06 %/0.1%
Tune( $\nu_x/\nu_y$ )		51.16 / 16.36	43.16 / 21.36	40.16 / 18.36
( $\Delta \beta/\beta$ ) <sub>xy</sub>	0 %	3.8% / 4.2%	3.8% / 4.2%	6.4%/6.6%(max15%)
Energy spread	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011
Chromaticity ( $\xi_x, \xi_y$ )	0 / 0	3.2 / 3.9	7 / 4	7 / 6
Rf voltage	12MV	12MV	16MV	16MV
Momentum acceptance.	1.8 %	1.3 %	2.9 %	2.1 %
Bunch length (multi/single) (FWHM)	35 psec	35psec/100psec	36psec/~100psec	32psec/~40psec
Life-time				
Multibunch(100mA)	24 hr	70 hr (2/3-filling)	160hr(24/29-filling)	120 hr(24/29-filling)
Single(1mA/bunch)		6 hr	32 hr	22 hr
Beamsizes(h/v) at ID(high-beta)	400 $\mu$ m / 80 $\mu$ m	400 $\mu$ m / 6.7 $\mu$ m	390 $\mu$ m / 3 $\mu$ m	410 $\mu$ m / 6.2 $\mu$ m
Orbit change at cell39 arc.		periodic correction	periodic correction	periodic correction
hor.(rms)/beam size	<b>10% of beam size</b>	<2.3 / 360 $\mu$ m	<7.0 / 390 $\mu$ m	<9 / 410 $\mu$ m
ver.(rms)/beam size	0 cm	<4.6 / 8.1 $\mu$ m	<5.3 / 6.3 $\mu$ m	<4.6 / 9.2 $\mu$ m
Dispersion at I.D.	0 cm	no correction		
horizontal(rms)		1.4 cm	1 cm	0.44 cm @200 st mag
vertical(rms)		0.4cm	0.11 cm @24 skew	0.13 cm @24 skew

石配列 (CGセル) 44セルと、そのセルから偏向電磁石2台を抜いた直線セルを11セル毎に配置したセル構造 (HybridとHHLV) で運転された。2000年夏 (約3カ月の停止期間) に、さらに高い輝度を目指し、その4カ所の直線セルの電磁石を全て取り払い、約30mの電磁石の無い長直線部の導入と、その1カ所に磁石長約30mのアンジュレータを設置する改造工事が行われた。そして約1カ月の加速器と新規設置されたビームライン等の調整の後、10月から利用運転が再開された。その後、関数の歪みの補正や、垂直方向の運動量分散関数の補正、運動量許容範囲の回復、ビーム不安定性を抑制するためのフィリングの最適化等のマシンスタディーが精力的に行われ、ほぼ改造前のビーム性能を達成している。表2は現在までに得られているビーム性能で、HybridとHHLVが改造前、30mLSSが改造後のビーム性能を示す。多バンチモードでのビーム寿命が、改造前に比べて多少短い。これは、HHLVの48回対称から4回対称に対称性が低くなったため、ベータトロン等のオプティカル関数に歪みが生じやすく、そのためこの歪みと結合して低次の共鳴が励起されやすくなっていること、対称性が低い分動作点近傍での共鳴線の分布密度が高くなっていること、真空度から生じていると見られるビーム不安定性を避けるためクロマティシティーを+7程度にしていること、そして改造部の真空度が悪いこと等による。

軌道安定度

蓄積リング内を周回する電子ビームの空間的サイズは、

挿入光源を設置する直線部で水平方向で数100ミクロン、垂直方向で10ミクロン程度である。そのため、軌道の揺らぎをこのビームサイズと比べて十分小さくすることが、高輝度放射光の特性を実験に利用するためには不可欠となる。閉軌道のずれ (cod) の内遅い変動に関しては、約1分間隔の周期補正で1ミクロン程度に、潮汐力による周長変化 (エネルギー変動) は5分間隔で加速周波数を微調する事で補正している。一方早い振動 (20から数kHz領域) に関しては、その原因を特定し、最終的には1ミクロン以下に補正するために、まずリングの4カ所 (ほぼ90度毎) に数10kHzまでのビーム位置振動を観測できる高速BPMシステムを導入した。図2-3がその1カ所で測定した結果で、数十から100Hz領域で水平垂直ともrms値で4ミクロンほどの振動は、機械棟内の各種ポンプ (防振対策済み) の振動あるいは電磁石冷却水の脈動が、電磁石および共通架台を揺らすことでビーム振動を誘起していることが、また、2kHz近辺に観測される全幅で200ミクロン程度の振動 (運動量分散関数がゼロでない偏向電磁石部でのみ観測される) は、シンセサイザーからの508MHzの加速周波数近傍 (数Hz) のノイズによって誘起されていることが分かった。後者の振動は、ビームとrf間の位相の偏差信号で加速周波数を変調する事で、図2-3に示すように約1/100に抑制した。現在、前者の数十から100Hz領域の振動の低減あるいは振動原因を除去するため、電磁石および架台の振動特性、冷却水の低脈動化、各種振動発生機器の静粛化等、各種R&Dを進めている。

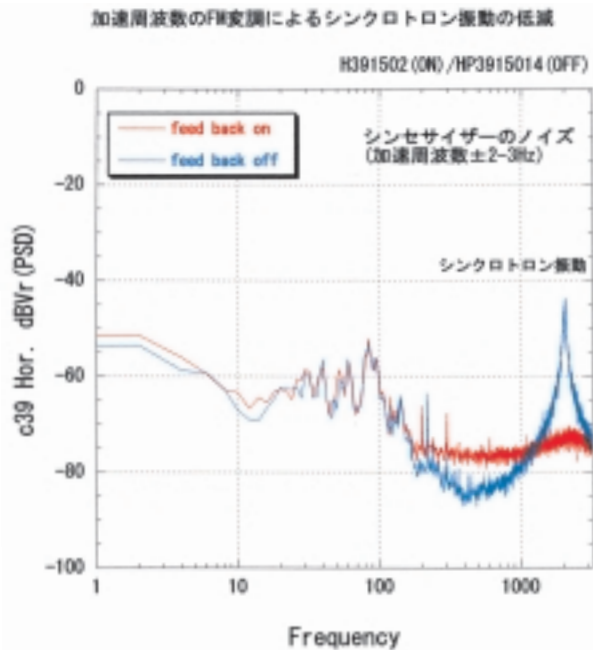


図2-3 蓄積リングにおける軌道の振動スペクトル

#### ビーム診断系

電子軌道は、リング1周に設置された288台（30m長直線部導入前）、あるいは280台（導入後）のビーム位置検出器（BPM）によって測定され、そのデータをもとに軌道の補正や、ベータ関数、運動量分散関数等のオプティックスの補正、輝度を定めるカップリング比の補正等を行っている。現在、これら蓄積リングのビーム性能は、このビーム診断系の精度によって決まっている。そのため、2000年度はビーム診断系の高精度化と、それを決めている要因の一つである、主四極電磁石電源に起因する1Hz近傍の低周波軌道変動の除去を行った。前者は、処理系に0.25秒の積分特性を導入することで、後者（これについては後で詳しく述べる）は、電源の電圧、電流定格値の最適化、電流制御回路と電流検出器（DCCT）の高精度化で改善した。その結果、BPMの測定再現性が数ミクロンから1ミクロン以内に、またチューンの揺らぎも0.01から0.001と約1/10に減少した。このBPMの測定精度の大幅な改善により、より精密な軌道制御とエラーソースの推定が可能となった。このBPMの高精度化によって、codの周期補正時に軌道がランダムに数ミクロン飛ぶ現象が目立つようになった。詳細なマシンスタディーの結果、これは軌道補正用のステアリング電磁石（鉄心型）のヒステリシス効果と電源の設定分解能（16ビットA/D変換器）の不足により、磁場が正確にセットされていないことが判明、これを受け、急遽1/100の分解能を可能とする空芯型の高分解能ステアリング電磁石を水平、垂直方向ともに12台設置し、チューンハーモニクスに対応した軌道成分をサブミクロンから1ミクロンレベルで補正した。今後、さらなる高輝度化を目指して、サブミクロンの精度を持つBPMシステムの開発を現在進めている。

#### 冷却水

電磁石および真空機器用冷却水のストレーナに大量の茶褐色物が付着する現象が100mA運転になって顕著になった。この茶褐色物を分析したところ銅化合物と銅結晶で、冷却水が純水であることから通常では銅が水の中に溶け出すことはない。そこで、この溶出原因と溶出箇所を特定するために電磁石真空系冷却水を定期的に水質検査を実施すると共に、加速器診断ラインBL38B2光学ハッチ内に水冷の無酸素銅製のアブソーバーを設置し、放射光を照射しながら冷却水のpHと溶存酸素量を測定した。その結果、放射光の照射により、図2-4に示すように冷却水のpHが酸性側に、溶存酸素濃度が下がることから、銅表面で何らかの酸化現象が起こっていることが推測された。そのため、直線部の導入で不要になった溶出の可能性の高いアブソーバ（銅、グリッドコップ）および電磁石コイルを分解し、水路内面の表面観察と表面分析を行った。しかし表面が有る程度腐食しているものの溶けだしている銅の量を説明できる程ではなかった。現在、溶け出した銅の量が無視できるほど少なくなはないので、溶出箇所の特定とそのメカニズムの解明を進めている。また、放射光照射部位の銅結晶の大きさもかなり成長していることも明らかになった。

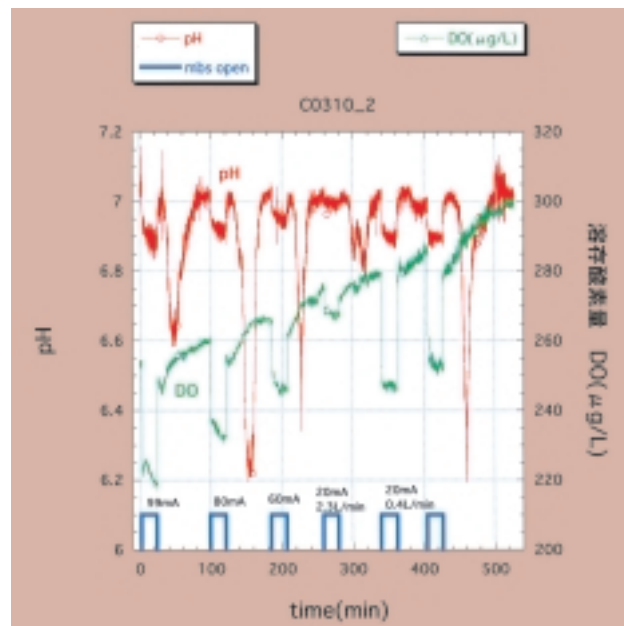


図2-4 放射光の照射による冷却水のpHと溶存酸素濃度の変化

#### 2-3 入射器系の現状

##### 線型加速器の経緯と現状

1998年、RF伝送系環境温度とクライストロン冷却水温度の安定化と、クライストロン変調器のPFN電圧の安定化を実施し、加速RFの振幅と位相の変動を抑制した。そして1999年からは、ビームローディングによるバンチ毎のエネルギーシフトの補正と、RF機器の不調あるいは室温変化によるエネルギー変動を補償する目的でエネルギー圧

縮システム (ECS) を設置、2000年度にはビームを用いた調整を実施した。このECSの設計製作に当たっては、高性能ビームを実現するために、ドライブラインをPLLで位相安定化する (図2-5参照) など加速管に供給するRFの電力と位相の高安定化に特に注意を払った。

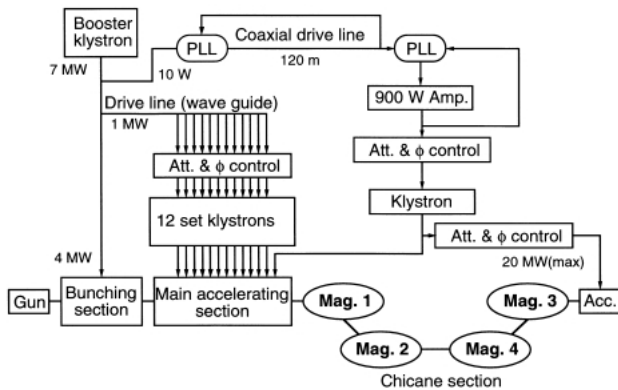


図2-5 ECSシステムの概要

このECSの導入により、40ns/350mAの条件でビームエネルギー幅 (全幅) は、3.5%から1.4%に抑制され、シンクロトロンでの入射効率が飛躍的に改善された。また1.9nC/1nsビームのエネルギー安定度は、図2-6に示すように、導入前0.06%rmsであったものが導入後0.02%rmsへ改善されるなど、ECS導入による著しい効果が確認された。今後、このECSの、ビーム電流を増減しても一定のエネルギーを維持できる機能を利用し、電子銃からのビーム電流を変えることでリニアックの出射電流を調整し、蓄積リング周の電流分布を平滑化することが可能となる。このECSは2001年4月より利用運転に使用される。

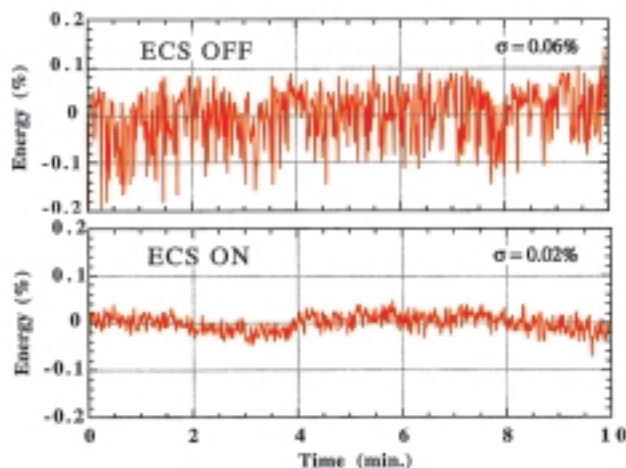


図2-6 ECSによるエネルギーの安定化

表3は、現在シンクロトロンとNew SUBARUに供給されているビームの種類と性能をまとめたものである。

表3 入射ビームのパラメータ (ECS運用時)

	シンクロトロン		New SUBARU
パルス幅	1 ns	40 ns	1 ns
繰り返し	1 pps	1 pps	1 pps
入射電流	2 A	350 mA	200 mA
dE/E (全幅)	-	1.4 %	-
エネルギー安定度	0.02%rms	-	-
n (90%)	<240 nrad	<160 nrad	<200 nrad

### 線型加速器の運転

2000年の総運転時間は、約5,200時間で、その内機器の故障または不調のために、1GeVビームの出射を延期した時間の割合は約0.13%であった。図2-7は、2000年運転サイクル毎の故障統計で、夏期保守期間後故障が急増しているのは、線型加速器の制御系の改造にともなって導入されたデータベースにより、インターロックの履歴が正確になったためである。主な故障原因は、例年と同じくRF系に関するもので、大電カクライストロン変調器内機器の寿命と性能劣化 (サイラトロン等) およびクライストロンの管内の放電等であった。この大電カクライストロン変調器の2000年末までの累計運転時間は、ヒーターオン時間で約29,000時間、高圧オン時間で約23,000時間に達している。今後機器の寿命による故障頻度が増えると予想されるため、日常的な点検や監視を十分行う事ができる体制を整備する必要がある。

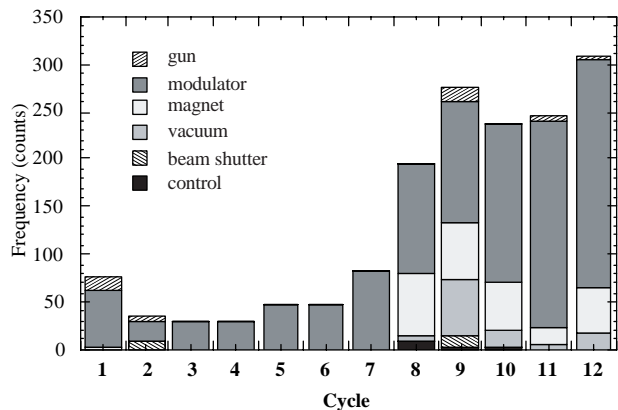


図2-7 線型加速器の2000年運転サイクル別故障頻度

### ブースターシンクロトロンの現状

シンクロトロンでは、運転の当初は、ビーム入射期間0.15秒、加速期間0.35秒、フラットトップ期間0.15秒、減速期間0.35秒の1秒周期で運転していた。しかし、入射期間の0.15秒でrf-ko法で高性能単バンチビームを生成するためには限界があるため、1999年から、入射期間の長さから0.15秒から0.25秒に、加速期間を0.35秒から0.36秒に、フラットトップを0.15から0.13秒に、減速期間を0.35秒から0.26秒に変更した。

線型加速器から1GeVのビームを受け取り8GeVまで安定に加速するためのトラッキング比を、加速の途中に運転条件が一定になる区間(“フラットミドル”と称す)を作り正確に測定し、このデータをもとに計算した真空チャンパーに流れる渦電流磁場を、その測定値に足し合わせることで精密なパターンを作成した。図2-8は、この補正結果で、入射、加速、取り出しの全区間に渡り、チューンの変化を水平垂直方向ともに0.02以内に、クロマチシティをほぼゼロに補正する事ができた。

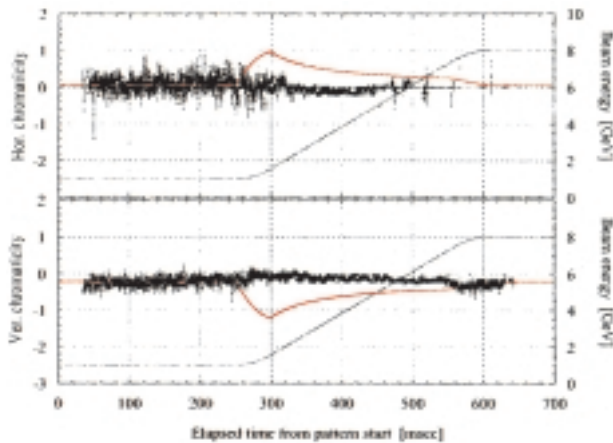


図2-8 運転周期全域におけるクロマチシティの変化。ビームエネルギーの推移を黒実線、誤差棒付き黒丸はクロマチシティ測定値、渦電流効果によるクロマチシティの計算値を赤実線で示す。

単バンチビームの純度改善を行うために、rf-ko周波数に鉛直方向のベータatron周波数(の端数)の導入、キック量増強のためにrf増幅器の大電力化、およびrf-koの安定化のために加速周波数の位相安定化を実施した。その結果、蓄積リングでの単バンチ不純度は最高で $2 \times 10^{-9}$ の値を実現した。3週間わたる利用運転期間中、1日1回から2回の割合で同一バケットに電子ビームを追加入射するため、タウシェック寿命がサイドバンチ内の電子ビームの方が主バンチのビーム寿命より長い場合、入射回数が増えるにつれて純度が徐々に悪くなる。蓄積リングでは、このサイドバンチ内の電子をシンクロトロンのようにrf-koで純化することが非線形効果のため難しいため、ユーザーからの要求によってビームを廃棄し再入射を行って対処している。

シンクロトロンでのパターン運転に必要な加速電圧は、2本のクライストロンからのそれぞれ750kWの高周波電力を各4台の加速空洞系に供給し、その2本の位相を制御して必要な電圧を生成している。このクライストロンの出力は、rf機器の安定運転のために入射終了後も同じ出力で待機していたが、2000年、利用運転時の蓄積リングへのビーム入射が1日1~2回と少ないことから、電気代の節約とクライストロン等機器の長寿命化を図るため、蓄積リングへのビーム入射の1時間前に750kWの所定のrf出力に上げ、入射

終了後、130kWの待機状態に入るモードに変更した。図2-9に待機状態から運転定格出力までの出力推移(実線)を、空洞内の真空度(空洞2の真空度を一点鎖線、空洞4の真空度を破線)とともに示す。出力の増加は空洞内真空度の変化を監視しながら、高周波加速設備制御計算機システムで行われており、8分程度で運転定格出力まで到達する。この運転方法の変更により、空洞温度および冷却水温度の変化により高次モードによるビーム不安定性が誘起される場合が生じたため、次年度以降、空洞冷却水温度の安定化( $\pm 0.1$ 度)を実施する予定である。

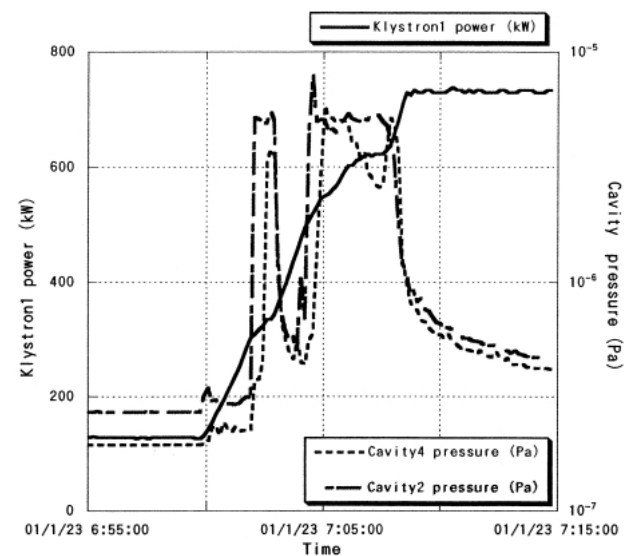


図2-9 クライストロンの運転時の出力推移：クライストロン出力を実線、加速空洞2、4の真空度(Pa)を一点鎖線、破線で示す。

#### 入射効率

2000年には、リニアックからの1nsバンチ長のビーム中心とシンクロトロンのバケット中心を時間的に同期させることが可能となり、シンクロトロンでの入射時の縦方向のエミッタンスの増大を押さえることが出来た。その結果、より高い入射効率を実現することが可能となった。図2-10は、リニアックからシンクロトロンにいたるビーム輸送系のビーム電流値(黒丸)とシンクロトロンに入射された(入射してから20ms経過した)ビーム電流値(赤丸)と入射効率(緑丸)を示したものである。しかし、シンクロトロンから出す電子銃トリガー信号とリニアックの加速周波数とが現在非同期であるため、リニアックで加速されるバンチの数が2~3バンチとなる。そのため、バンチ毎の加速エネルギーがビームローディングによって変わり、シンクロトロンでのrf捕獲効率に差が生じ、入射効率がランダムに変化している。現在、この入射効率の変動とrf-koの効率を改善するために、リニアックの加速周波数をシンクロトロンの加速周波数に完全に同期させる新しいタイミングシステムの開発を進めている。

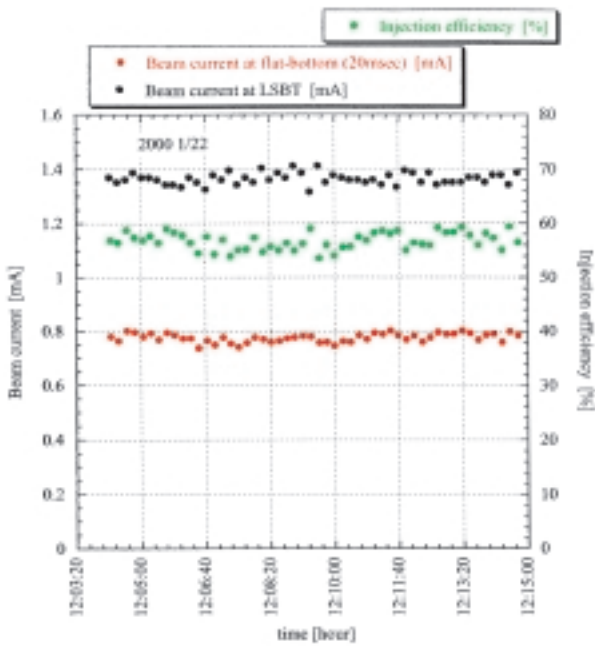


図2-10 シンクロトロンでのビーム入射効率

2-4 制御系の現状

SPring-8の制御システムは、建設時の事情から線型加速器、シンクロトロン加速器、蓄積リングの三つの加速器で異なった制御システムが用いられていた。しかし、各加速器に対するビーム性能の向上および改善要求に対して、この制御系が異なることが大きな障害となってきた。そのため、1998年からシンクロトロンと線型加速器の制御システムをSPring-8の標準制御システムである蓄積リング制御システムで統合する作業を始め、1999年にはシンクロトロン加速器の制御システムの統合化を終了した。そして2000年夏には、最後に残された線型加速器の制御系の統合が行わ

れ、秋から統一された制御システムで全加速器の運転ができるようになった。また、この加速器制御に加えて、ビームライン制御もこの標準制御システムを用いて構築し、中央制御室から全ての加速器とビームラインを同一の制御思想で運転できる環境が整った。

3. 加速器システムの改善と改造

3-1 蓄積リングへの30m長直線部の導入

2000年の夏期運転停止期間に4箇所の長直線部の電磁石を取り除き、電磁石の無い130mの長直線部を導入する改造工事を行い、その直線部の1カ所に長尺アンジュレータを設置した。図3-1は、改造前後の長直線部の磁石配列および真空チェンバー等の配置を示す。この改造に当たっては、改造前のビーム調整に関するノウハウがそのまま継承できること、通常のCGセルでチューンの調整にある程度の自由度が持てること、そして長直線部のベータatron関数のピーク値がビーム寿命を決定的に制限しないこと等の条件から、長直線部両端の四極電磁石の数は、上下流各6台（6ファミリー）とした。また、このラティスでは、大きな非線形効果を持つ6極電磁石の使用に対して、大きなダイナミックアパーチャーを確保するために、直線部を含む左右のマッチングセルでのベータatron振動の位相の進みを2の整数倍とした。これにより中心エネルギーを持つ電子に対しては、通常のCGセルが連続して繋がっている場合と等価になりHHLVとほぼ同じ安定性が得られる。またエネルギーのずれた電子に対する局所クロマティシティの補正は、マッチングセル内の運動量分散部に設置されている6極電磁石（S3、S4、S5）で、そして共鳴励起の抑制と運動量偏差を持った粒子に対する安定性の向上は、マッチングセル内の無分散部の4台の6極電磁石（S1、S2、S6、S7）で行った。

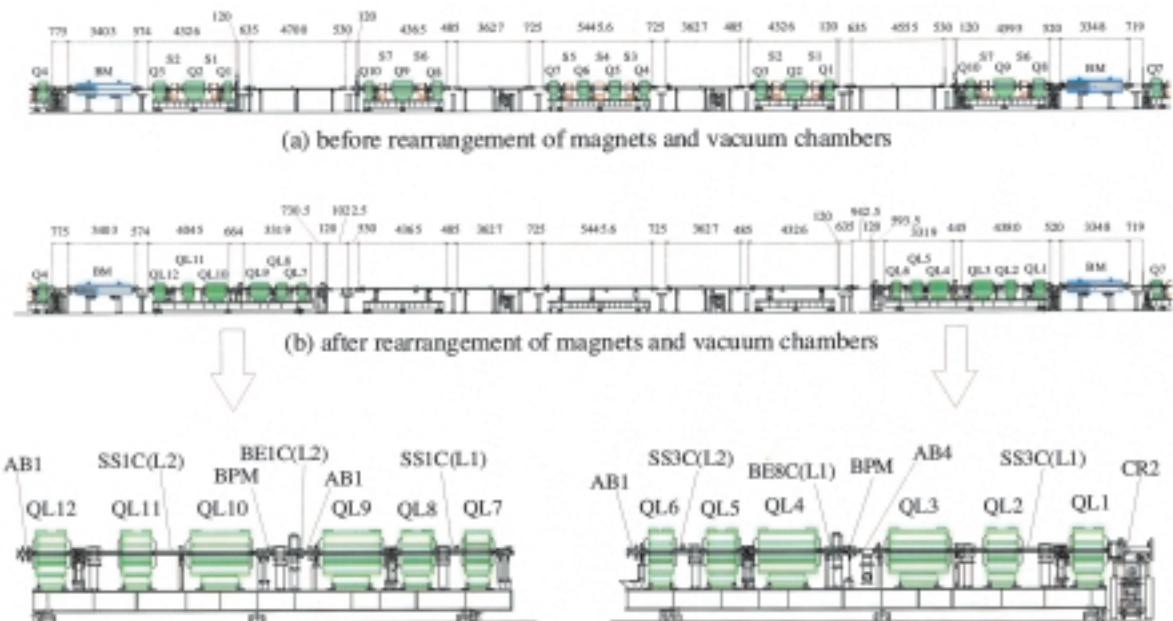


図3-1 30m長直線部の導入前と導入後の電磁石、真空チェンバーの機器配置

## 直線部電磁石の再配置とアライメント

直線部の6台の四極電磁石は、全長7.9mの共通架台上に設置され、それらは蓄積リングの建設時に開発されたレーザーとCCDを用いたアライメント装置で、水平、垂直方向ともに25ミクロン（rms）で、架台間は100ミクロン、架台のビーム進行方向の位置精度500ミクロン、架台の水平・垂直軸周りの回転誤差250マイクロラッド、軌道軸周りの回転誤差200マイクロラッド（いずれも標準偏差値）の据付精度で行った。また、30mの直線部を挟む共通架台間は同様の方法で100ミクロン以内の精度でアライメントした。

共通架台は全長7.9m、自重量4.2トンで、6本の支持台で床に固定されている。この支持台の内4本は既存のベースプレートに固定、残り2本は新規に埋設したプレート上に固定された。共通架台は、4極電磁石を乗せると最大で70ミクロンたわむ。この変位自体に問題はないが、床の振動によりこのたわみが振動を誘起することが懸念されたため、支持台の間に4個の振動防止用固定台を増設した。

## 電磁石電源の追加と主四極電磁石電源の改造

これら直線部の電磁石系の改造によって、1長直線部あたり4極電磁石電源（定格出力580A）9台（全周36台）、6極電磁石電源（定格出力300A）4台（全周16台）が新たに追加され、各長直線部近くに設けられている電磁石電源室に設置された。この設置に当たっては、環境温度の変動が電源性能に影響しないように、各電源室に空調設備を新設あるいは既存設備の増強を行った。現在、これら電源の電流リップルを含む電流安定度は $2 \times 10^{-5}$ の高い値を実現している。また、この改造で既存の四極および六極電磁石電源に接続されている電磁石の台数が、48台から36台に減少、さらにオプティックスの変更によって、電源によっては定格値の50%程度の励磁電流で運転することになった。そのため、チューンと軌道の安定度を確保するため、外付けトランスの設置による定格電圧の最適化、電流制御回路の高

精度化、および高精度電流検出器への交換等を実施し、長直線部導入当初0.01%程度であった電流安定度が、0.001%と約1/10以下に改善された。これにより、チューンの揺らぎは0.01から0.001程度に、またシンクロトロンの運転等による1Hz近辺のACラインの電圧変動による軌道変動も数10分の1に安定化されたため、codの測定精度が大幅に改善された。図3-2は、電源の改善前後での軌道変動のスペクトルである。

## 長直線部の磁気遮蔽

2000年のリング改造時には4カ所の長直線部の内、挿入光源が設置されたのは1箇所、他の3箇所には挿入光源は設置されていない。そのため、収納部内の環境磁場、たとえば地磁気や他の機器からの漏れ磁場、の変動が電子ビームに与える影響をできる限り少なくするためにFe系アモルファス箔（厚さ25 $\mu\text{m}$ 、比透磁率45,000）を真空チャンバーに3重に巻き磁気遮蔽を行った。

## 真空システムの改造

長直線部の導入に当たり、直線部1カ所当たり3セル約90mに渡る真空チャンバーが大気状態に戻され、長直線部およびその上下流セルの一部のチャンバーの撤去、再配置、および電磁石再配置部の新規製作チャンバーの設置が行われた。このチャンバーはビーム位置検出器の取り付けが難しいこととチャンバーの取り扱いを容易にするために、2本のチャンバーに分割し、共通架台上でビーム検出器が取り付けられたベローズ部チャンバーを介してフランジ接続された。ビーム運転再開時に、新規に製作されたチャンバーからの光脱離による多量の放出ガスを効果的に排気し、できる限り早くビーム寿命を一定の水準まで回復させるために、各長直線部上流セルのアブソーバ4の排気ポートに排気速度250  $\ell/\text{s}$ のターボ分子ポンプを2台タンデムに接続した。

## 3-2 改造後のビーム調整

長直線部の導入工事が終了した2000年8月末から、「新たな加速器になった」蓄積リングのビーム調整が再開された。蓄積リングの立ち上げ時の経験とHybridおよびHHLVでのビーム調整のノウハウとが十分生かされ、ビーム調整は順調に進み、初日の夜間からは蓄積電流1.5mA、ビーム寿命35時間で放射光によるクロッチアブソーバ、真空チャンバー等の焼き出し運転を行った。その後、オプティックスに大きな問題が無いことを確認し、3週間かけて詳細なビーム調整が行われ、直線部導入前とほぼ同じビーム性能（表2参照）を達成することができた。また、図3-3に、ビーム運転開始後の蓄積電流（I）とビーム寿命（ $\tau$ ）の積（I $\tau$ ）と積分ビーム電流値の関係を示す。I $\tau$ 積は1997年の蓄積リング運転開始時に比べると早い改善が見られ、放

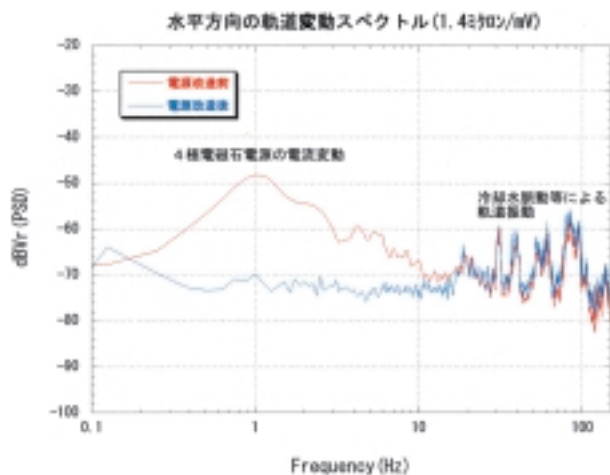


図3-2 電源改造前後の軌道変動スペクトル



射光の焼き出しの履歴がかなり残っており、新規チェンバ-および大気暴露部でのガス散乱によるビーム寿命は、今後順調に焼き出しが進めば改造前の水準に比較的短時間で回復する。

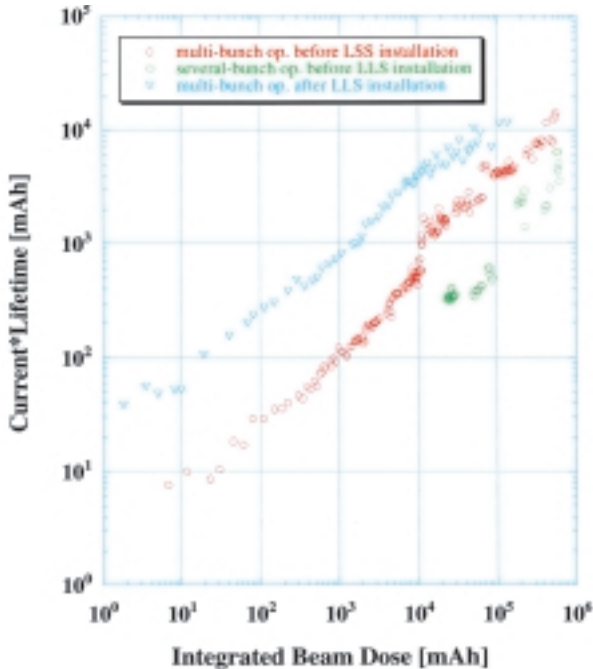


図3-3 直線部導入後のビーム寿命改善の進展：I 積（ビーム電流とビーム寿命の積）の積分電流依存性

改造後のビーム調整は、このように順調に進んだがいくつかの検討課題が残った。その一つは長直線部に設置した長尺アンジュレータのギャップを狭くしたとき、ビーム寿命の短縮が長直線部の垂直ベータatron関数の大きさを考慮しても説明が付かないこと、二つ目は通常セル内のハーモニック補正用6極電磁石と長直線部の局所クロマティシティ用の6極電磁石の調整では以前の入射効率（90%）を再現できないこと等で、いずれも非線型効果、動作点近傍の和共鳴、チェンバ-のインピーダンス等による影響と思われる。今後詳細なマシンスタディーを実施しこれらの現象を解明していくことが、トップアップ運転等、更に高機能運転を実現するために不可欠である。

### 3-3 入射器系の改造

#### 3-3-1 線型加速器

##### 制御系の改造

リニアック制御系の中央制御システムへの統合作業は99年から始まり、2000年8月までに終了し、秋以降新制御系による運転が再開された。

主な作業は、旧システムの調査、機器制御用VME-CPU 25台の更新、制御プログラム（VME上）の新規作成、制御端末用GUI作成、データベースシステムの導入、およびVMEのOSの変更（OS9からSolarisへ）等であった。また、

クライストロン変調器の信頼性保守性を高め、より故障診断が容易になるように、PLC制御系も同時に見直し、変調器制御盤上で得られる情報量を大幅に増やすとともに、それら全てがリモート監視できるようにした。その結果、アラームシステムによる状態変化の自動監視が可能となり、データベース上に保存された機器の履歴データを利用することで機器パラメータの変動把握が容易になるなど、故障診断に要する時間が大きく短縮された。また以前よりGUIを作りやすくなったため、新しい機能の搭載などのソフトウェア生産性も向上した。

#### ビームモニタの改造

引き続き開発を行ってきたビーム位置モニタ（BPM）として、静電型ストリップラインモニタの採用を決定し、2000年夏にリニアックの非分散部四重極電磁石に28台を組み込んだ。信号処理回路は、広いビーム電流範囲を検出できるLog演算方式を試作し、測定可能な信号強度範囲は45dB以上、最高分解能は十数ミクロン程度と、十分な性能を有することを確認した。信号処理回路には、Log変換回路、ピークホールド回路、ADC等を含み、上位のVME DIボードに平行接続する。全てのBPMデータを同期して取り込み処理するため、VME DIボードは共有メモリにデータを書き込み、データ取得は共有メモリからデータを読み出すことによって行う。共有メモリのデータ更新周期は最短で5msを想定している。この計測システムは2001年度内に設置を終了し、次年からの運用を目標としている。

ビームエネルギーは、ECS用シケイン中央に設置されたスクリーンモニタ上のビームスポット位置で測定しているが、この方法では、ビーム損失と質の劣化からビーム入射中、モニタを常時挿入してビーム性能を測定することはできない。この欠点を解決するために、薄いカプトンフィルム上にごく薄く蒸着したアルミからのOTR光を観測するモニタシステムを開発した。この方式では、薄膜通過時のビーム損失とエミッタンスの劣化が小さいため、加速中のビームを常時観測でき、加速エネルギーの制御性が大幅に改善された。

#### 3-3-2 ブースタシンクロトロン

建設時の発注方法の違いからシンクロトロンと蓄積リングで異なっていた高周波加速空洞の低電力高周波制御系が、運転時のビーム調整の効率化、故障時の復旧時間の短縮、および予備部品の共通化による機器のメンテナンス性の向上を目指して、2000年夏に蓄積リング高周波制御系に統一された。

#### 加速位相の安定化

基準信号に対して空洞までの信号路にもPLLをかけ、加速周波数の位相安定化を図った。これにより、従来は周囲

温度の変動に対して、加速周波数の位相変動が約1度/あったものが、温度変化に依らず一定値になり、位相安定化が実現できた。図3-4に空洞の温度変化（破線）と経路間の加速周波数の位相変動（実線）を示す。図中の時間軸で7:15~8:30の間が位相安定化回路をONした状態で、約3度の空洞温度の変動に対して、位相差は一定に保たれていることが分かる。この改造にともない、制御プログラムの更新と運転状態の監視視点の増加・適正化を図った。

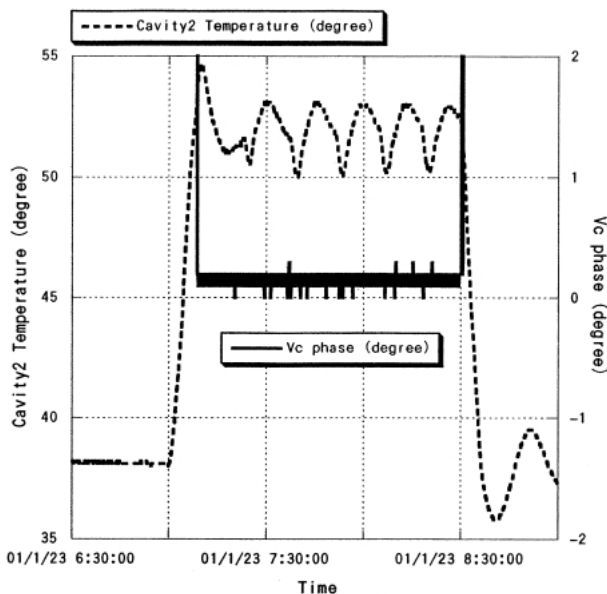


図3-4 空洞温度による高周波加速周波数の位相変動。空洞でピックアップした高周波加速周波数508.58MHzの位相を基準信号の位相と比較した。位相差を "Vc phase (degree)" (実線) で、空洞2の温度を破線で示す。

### 3-4 制御系の新規増設および改造

#### 3-4-1 線型加速器制御系の統合

SPring-8の全ての加速器を統一された制御システムで運転するために、最後に残されていた線型加速器制御系の統合を行った。統合はシンクロトロン制御系統統合の際と同様、蓄積リング制御系で使用している制御系フレームワークをそのまま使用し、ハードウェアの変更を最小限に留める方法で行った。

従来、線型加速器VME計算機のCPUボードにはMotorola社のMVME147-022 (68030、33MHz)が、OSにはOS-9が使用されていたが、ソフトウェアの移植性を考慮してこれらを置き換えることになった。新制御系に採用するCPUボードの候補としては、Solaris7そのものの動作や開発したデバイスドライバの動作などが良好であったCPUボードの中から選択し、最終的に米国Xycom社のXVME-658 (AMD K6-2 333MHz)に決定した。システムの起動は耐障害性を考慮し、ファイルボード上のストレージである500MBのIDEシリコンディスクから行えるようにした。

入出力ボードを操作するのに必要なSolaris用のデバイスドライバの作成も行った。使用している入出力ボードは5種類 (デジタル出力ボード、デジタル入力ボード、アナログ入力ボード、アナログ出力ボード、パルスジェネレータ・エンコーダボード)で、実際に制御用アプリケーションの作成を開始するまでに全てのデバイスドライバを完成させた。また、機器制御用ソフトウェアフレームワークであるEquipment Manager (EM)のSolarisへの移植も行った。EMは元々蓄積リングで使用しているHP-RTやHP-UXといったOS用に開発されたものであるが、当初から他のUNIX系のOSへの移植性を考慮して作成されたものであり、また既にLinuxへの移植の実績もあったため、移植は極めて容易であった。EM同様、データ収集系であるpoller/collectorのソフトウェアフレームワークのSolarisへの移植も行った。こちらも同様に、移植作業は極めて容易であった。

機器制御用アプリケーションの開発は4月頃から始められ、シュミレータでのテスト、テストベンチでの機器テストを通して、修正を加えながら10月には制御系統統合が完了した。月に1から2回程度のシステムトラブルが発生しているが、今後さらに安定に運転出来るように、システムの調整・改造を行っていく予定である。

#### 3-4-2 中央制御室運転用コンソール・運転情報表示の改善および改造

制御プログラムの高機能化、線型加速器制御のシステム統合化もあって、中央制御室における加速器運転用の計算機として、より多くのプログラムを実行し、情報を表示することが必要になった。本年はこれに対応して、運転用ワークステーション (WS)のグラフィック表示性能向上、更に運転情報把握の向上のため、大型情報表示画面の導入を行った。

運転用WSのグラフィック表示性能は、中央制御室運転用卓に設置した22インチディスプレイの表示性能を活かし、従来の256色1280×1072ドット表示を、1677万色1600×1200ドット表示まで向上させた。これはHP社製B180を中心とする既存の運転用端末はそのままだに、オプションのグラフィックカードを追加することで可能となった。この結果、画面の解像度が向上し、多くの運転用パネル (GUI)を同一画面上に表示できるようになった。また、シンクロトロン加速器に続いて線型加速器の制御を統合化したことで、GUIに使われる色が大幅に増加した。色数の多いGUIや、運転情報表示に用いるNetscapeを同時に表示させると、カラーパレットの取り合いによる色ずれが生じていた。表示色数を1677万色 (フルカラー)とすることで、これらのアプリケーションの同時実行による色の取り合い問題が解消し、視認性が向上した。

大型情報表示画面は50インチ型プラズマディスプレイ2

基に、加速器・ビームラインの警報情報、蓄積電流量といった、常時監視の必要な情報を制御卓のいずれの席からも見られるように表示するためのものである。従来は2台の21インチPC端末で、それぞれ蓄積リングのアラームと蓄積電流量だけを表示させていた。これを50インチ型ディスプレイを導入することで、十分な大きさで入射系加速器、ニュースバルについてもアラーム情報を表示する事が可能となり、視認性について大幅に向上した。大画面への表示情報は、表示性能を重視してLinux OSを搭載したPC画面上に表示されたものを大画面上に送ることで十分な性能を実現できた。

### 3-4-3 データベースシステムの改善および改造

2000年夏の長直線部の導入と線型加速器の制御系統合、およびビームラインの増設などで被制御点数が増加したことから、データベースの取得信号は激増し、2000年初めには約8000点であった信号数は年末には14000点を越えた。線型加速器の制御統合化ではパラメータデータベース、オンラインデータベース、アーカイブデータベース、およびアラームデータベースにテーブルの追加を行い、必要となる数値データなどの書き込みを行った。また、アーカイブデータベースの巨大化に対してバックアップ等の管理が困難になったため、データベースを分割して管理を容易にした。しかし、このデータベース管理系は、ソフトウェア的には問題なく信号の増加に対応できたが、ハードウェアの処理能力が不足してきたために、ハードウェアの増強が急遽必要となった。そこで、それまでのデータベースサーバーであったヒューレット・パッカード社製のサーバー機に替え、R&D中のインテル系CPUを4台搭載したLinuxサーバーを、本年度後期にヒューレットパッカード社製のより高速な高可用サーバー機に切り替えるまでの繋ぎとして暫定的に導入した。このR&Dは、フリーなオペレーティングシステムと、安価なサーバー機器でシステムを構築する可能性を模索していたもので、実運用では処理能力、運用とも問題なく順調に稼働した。

加速器の安定運転およびデータベースの運用にとって、データベースシステムの処理能力だけではなく、その安定性も重要となってきた。そこで、耐障害性と処理能力を上げるために主サーバーに5CPUと副サーバーに4CPUを搭載した2台のヒューレットパッカード社製のサーバー機をクラスター接続し、ディスク、ディスクコントローラ、ネットワークカードも二重化することで高可用性構成とした。また、データベース管理ソフトウェアも、以前はディスクのみの二重化だったが、CPUやネットワーク等の二重化を図り、さらに高い信頼性を確保した。

## 4. 高度化

### 4-1 蓄積リング

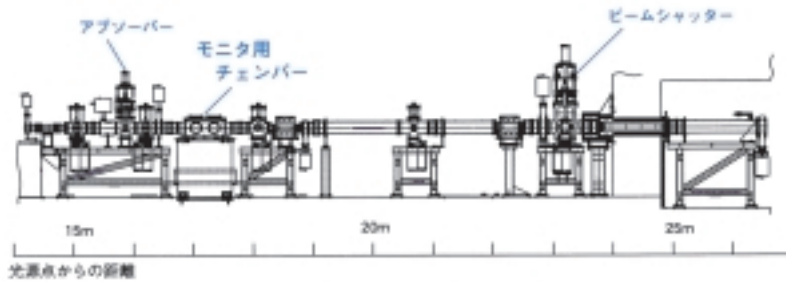
#### 蓄積リング加速器診断ラインの整備

偏向電磁石部からの放射光を利用して、蓄積リング周回電子ビームの診断を行うために加速器診断装置の整備を行ってきた。1999年には放射光の紫外線・可視光成分を実験ホールに導くために用いられる可視光輸送部と、可視光線を観測しビーム診断を行うための可視光暗室の製作、設置を行った。バンチ長測定のために、ストリークカメラを整備した。また、単バンチ純度測定のために、高速光シャッター付き光子計数装置の整備を行った。単バンチ純度の測定感度を向上させるために、高速光シャッターとして用いているポツケルスセル光学系の最適化調整や低ノイズ光子検出器の性能評価等を引き続き行った。可視光輸送部の光軸調整、可視光ビーム診断系の立ち上げ調整を行い、蓄積リング運転時にバンチ長測定や単バンチ純度測定等のビーム診断を実施し、蓄積リングビーム調整のための重要な知見を得た。

X線を利用したビーム診断系、および高熱負荷対応機器等の開発研究を行うためのX線輸送部を製作し光学ハッチ内に設置した(図4-1に輸送部の図を示す)。X線輸送部の主要装置として、単色X線を得るための二結晶分光器、X線ビームを整形するための四象限スリット、X線ビームの位置を測定するための蛍光板モニタやワイヤスキャナー、X線強度を調整するためのフィルター等が置かれた。二結晶分光器は、真空容器内で結晶を光軸から退避することが可能な構造となっており、分光器の下流側でも白色X線が利用できるようになっている。また、加速器コンポーネントの開発研究のために、硬X線だけでなく真空紫外光や軟X線等も含まれた白色光が利用できるように、ベリリウム窓等の真空隔壁を設けない構造としたため、X線輸送部全体を超高真空仕様とした。

光源としての電子ビームのサイズ、形状を測定するためのビーム診断装置として、X線ビームプロファイルモニタを製作し、X線輸送部に設置する。このビームプロファイルモニタは、微少な鉛直方向エミッタンスが精度良く評価可能なように1ミクロンの空間分解能を目標性能としている。そのため、可視光線ではなく、二結晶分光器で得られた単色X線を結像することで光源電子ビームのサイズを測定する装置とした。X線の結像光学素子には、1999年から開発してきた位相型ゾーンプレートを用いる。2000年は、この位相型ゾーンプレートをX線輸送部に格納するための超高真空チェンバーとゾーンプレートを光軸に対して位置合わせを行うための調整装置の製作設置を行った。光源電子ビームの像を計測するための検出器として、1ミクロン以下の高分解能を持つX線ズーム管を製作しX線輸送部の最下流に設置した。2001年は、二結晶分光器等X線輸送部の調整を行い、光源電子ビームの縦方向ビームサイズ測定を実施する。

## 基幹チャンネル



## X線輸送チャンネル

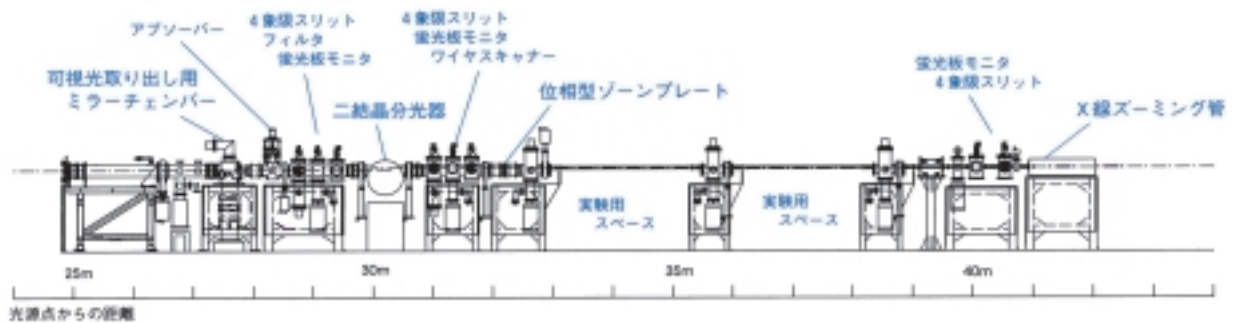


図4-1 加速器診断ラインの構成

### 高熱負荷機器の試験および放射線損傷の解明

光源の高輝度化、大電流化に対応するために、蓄積リングで使用しているアブソーバ等高熱負荷機器の、材料の物性的特性、機械的強度特性、および真空特性の実験的評価と、加速器に用いられている材料の放射線損傷について各種測定を実施した。また、これと平行してクロッチ、アブソーバ等への放射光照射によって、銅が冷却水中に多量に溶け出す現象を解明するため冷却水の水質検査や表面状態の観察と分析を行った。

また、予備的実験として、蓄積リングの冷却水で観測されている放射線による冷却水の変質の原因をオンラインで調査するために、冷却水照射用の水冷フランジを製作して加速器診断ビームラインで測定を行った。その結果、放射光照射により冷却水のpH、溶存酸素濃度が変化するなど幾つかの重要な知見が得られた。この問題は、第三世代の高エネルギー放射光リングにおける真空、高周波、電磁石

等機器の寿命を決める重要な問題となると思われることから、これら現象を科学的に究明できるよう照射装置の設計と高分解能質量分析計の整備を早急に進める。

### 2次元干渉計を用いた蓄積リングビームサイズの評価

SPring-8蓄積リングのビームサイズを測定するために2次元干渉計を開発した(図4-2に2次元干渉計の原理を示す)。偏向電磁石を光源とする放射光が、縦横に4つの矩形開口を持ったスリットにより作る干渉縞の可視度(visibility)から、光源のビームサイズを評価することが出来る。干渉計による放射光源のビームサイズ測定は従来から行われていたが、水平方向と鉛直方向のビームサイズを同時に計測する2次元干渉計を開発したのは初めてである。この干渉計を用いて30m長直線部導入後のビームサイズを測定して、蓄積リングの設計ビームパラメーターにより評価したエミッタンスは水平方向が $7.3\text{nm}\cdot\text{rad}$ 、鉛直方向が $14.2\text{pm}\cdot\text{rad}$ であった。

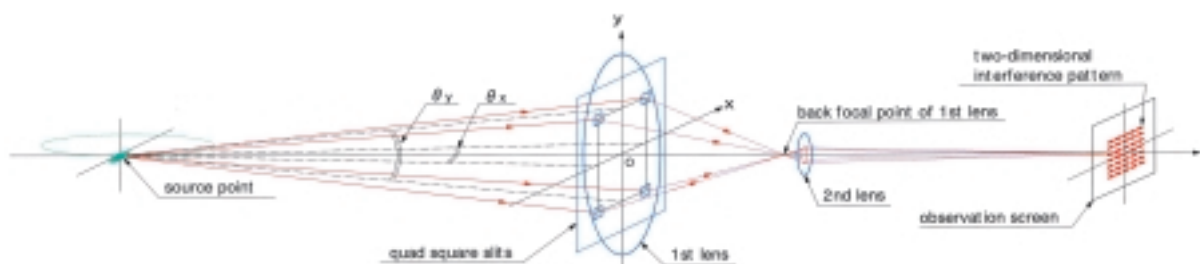


図4-2 ビームサイズ測定用2次元干渉計の原理

ビーム不安定性制御システムの開発

ビーム不安定性は、電子ビームの通過する真空ダクト等のインピーダンスなどが原因となって発生するため、SPring-8蓄積リングでは、真空ダクト等のインピーダンスが小さな値を取るよう設計製作されている。しかしながら、光源の高輝度化、30m長直線部の導入、多数の挿入光源の設置により、蓄積リングのインピーダンスは建設当初より次第に高くなってきている。そのため、ビーム不安定性が顕著になる前にビーム不安定性抑制システムの開発を始めた。ビーム不安定性の抑制は、bunch-by-bunch フィードバックと呼ばれる手法で行う。この方法は、リングを周回する2436個すべてのバンチに対して、各々に位置を測定して不安定性による振動を検出し、その振動を打ち消すようにキッカーによりバンチを偏向させるものである。このbunch-by-bunch フィードバックシステムは以下の部分で構成されている。

1) バンチ毎位置検出系：バンチ毎に位置を計測するための位置モニタおよびその信号処理回路系。2000年には、位置モニタからの生信号をバンチ毎の位置情報に変換する信号処理回路の製作と試験を行い、その出力をデジタルオシロを用いて測定し、バンチ毎の振動が計測できることを実際の蓄積リングのビームを用いて確認した。

2) デジタル信号処理系：バンチの位置信号をデジタル化してDSP 信号処理系によりリアルタイムに解析し、不安定性による振動成分を取り出してキッカーへのフィードバック信号を作り出す。蓄積リングで使用する処理系は、必要とする軌道精度がミクロン以下であるため、他の加速器施設等で用いられているものより高い精度のアナログ・デジタル変換器（ADC）が必要となる。しかし、このよう

な ADC は変換レートが遅いため、一つで実現することはできない。そのため複数個を用いて、信号を処理する信号処理システムの開発を始めた。2000年には、その原理検証のために、高精度のアナログ・デジタル変換器とDSP信号処理装置で構成したシステムで、DSP信号処理のプログラミングおよび信号変換等のテストを行った。

3) キッカーシステム：DSP信号処理系によりバンチ毎の測定により得られたフィードバック信号を増幅しバンチを電磁場によりキックして偏向させる装置である。2000年には、シュミレーションプログラムを用いて、必要な偏向角と応答時間を実現できるキッカーの設計を行った。

光励起遠赤外レーザーを用いた低エネルギーガンマ線の生成

8GeV蓄積リングの電子ビームと遠赤外レーザー光との逆コンプトン散乱により、数10MeV領域の狭い角度広がり（ $<0.1\text{mrad}$ ）を持った直線偏光または円偏光のガンマ線を生成し、電子ビームの偏極度、エミッタンス、バンチ長の測定等の加速器ビーム診断を行う。

2000年には、前年までに製作した炭酸ガスレーザー励起の遠赤外レーザーの調整、および付帯装置の製作を行った。図4-3に開発を進めている光励起遠赤外レーザーシステムを示す。炭酸ガスレーザーのガス圧依存性、ガス混合比依存性等の最適化を行い、約200Wの連続出力を達成した。この炭酸ガスレーザーを励起光として用いた遠赤外レーザーは、レーザー媒質 $\text{CH}_3\text{OH}$ の $119\mu\text{m}$ での発振が確認され、発振出力の最適化を進めた。また、蓄積リングへのレーザー光導入のために、加速器診断装置の設置されている実験ホールにレーザークリーンルームを設置し、レーザー光導入光学系の検討を行った。

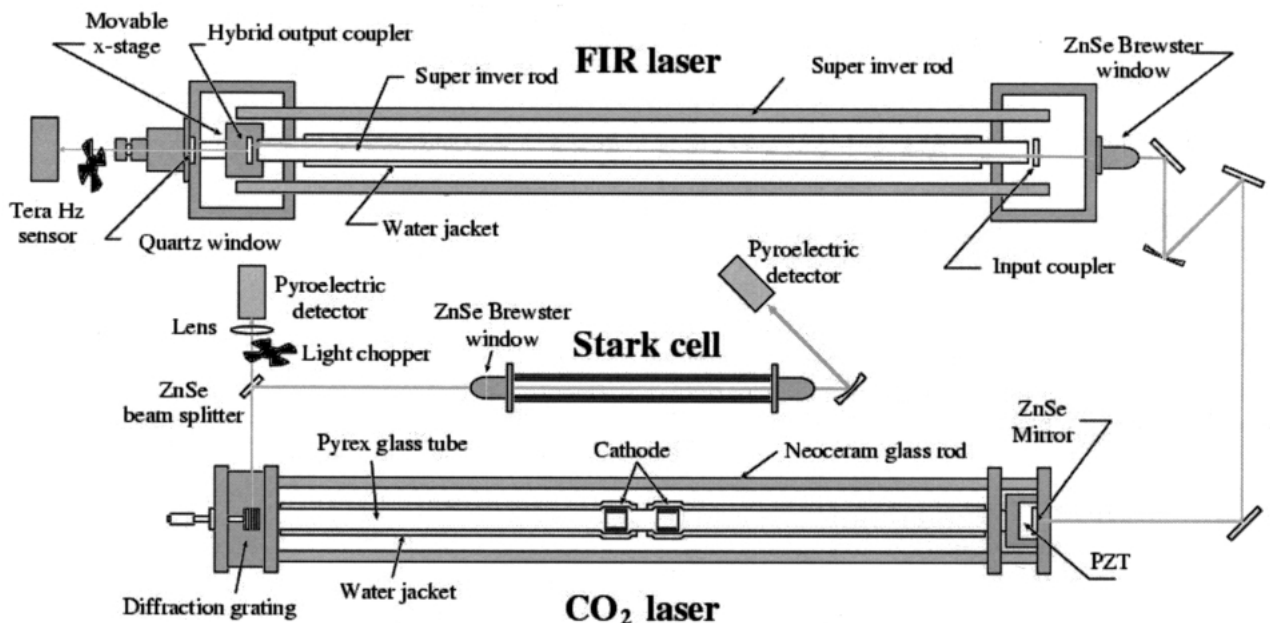


図4-3 光励起遠赤外レーザーシステム

#### 4-2 線型加速器

##### ビームデフレクタを用いた単バンチビームの生成

熱電子銃は、使用中にカソードに含浸されているBaが徐々に昇華し、コントロールグリッドに付着する。そのため、グリッドに印加されたパルス電圧によりカソードから引き出された主ビームの他に、電子銃に印加された高電圧によりグリッドから電子が引き出される、いわゆるグリッドエミッションが発生する。このグリッドエミッションが、蓄積リングでのシングルバンチ運転でのバンチ純度を下げる最大の要因となっている。SPring-8ではシンクロトロンの0.25秒の入射期間で、rf-koによりこのグリッドエミッションによる電子を蹴り飛ばしているが、このrf-koに使える時間が短いため完全に電子を取り除くことができない。そのため純度をさらに改善するためには、電子銃側でこのグリッドエミッション電子を除去することが不可欠である。そのため、電子銃直後に取り付け小型の高速ビームデフレクタを開発している。このデフレクタは2枚の平行電極とスリットより成り、7kVの高電圧パルスを印加してグリッドエミッションを横方向に蹴り飛ばし、主ビームのみがスリットを通過できるようにしたものである。テストベンチにおける試験の結果、電極間電圧がゼロの時(1ns幅)のみ、電子ビームがスリットを通り抜けてくることが確認された。現在、線型加速器に組み込むにあたって、空間電荷効果によるエミッタンス劣化とビーム損失を可能な限り少なくする、機器配置の最適化を実施している。

##### RF電子銃による高品質電子ビームの開発

低エミッタンス、フェムト秒領域の単バンチビームの生成を目的としてRF電子銃の開発が進められた。本年度は、最大27MWの高周波電力をRF電子銃空胴に供給し、カソード面最大電界強度140MV/m、光電子ビームのエネルギー3.2MeV、電荷量2nCの電子ビームを達成した。また、軌道とビーム強度が安定な低エミッタンス電子ビームの生成を目指し、真空系、レーザー系の詳細な見直しと装置の改良等を実施した。現在使用しているレーザーシステムはパルス幅が10psと固定で、かつレーザーパワーもパルス毎に20%以上の変動があるため、高品質ビームを実現するためには問題があるため、パルス幅が1から30psの間で任意に選択でき、かつ安定度が4%程度の新レーザーシステムが、最小エミッタンスを実現するために導入した。現在新レーザーシステムの調整を進めており、2001年に実験を再開する。また、これと平行して、3次元ビームシミュレーションコードの高精度化に関する開発を引き続き実施し、現在実験で得たカソード表面電界強度90MV/mで17 mm・mradのエミッタンスを再現するまでに改善された。現在、このコードを用いた解析によれば、現rf電子銃で、表面電界強度140MV/m、レーザーパルス幅20psで、約6 mm・mradのエミッタンスを予想している。今後、

実験でのこの値の確認と、エミッタンスとレーザーパルスのスポット強度分布、空胴形状、およびカソード材質等との関係を詳細に調べ、エミッタンス最小空胴の設計を行う。

#### 4-3 制御

##### VMEbus用CPUボードのR&D

2000年10月を境に、これまで採用してきたVMEbus 制御用CPUボードであるHP743rtが生産中止および販売中止となる。そのため、2000年はじめより、次期CPUボードのR&Dを行った。このR&Dを進めるに当たって、適度なパフォーマンスおよびリアルタイム性が得られること、CPUボードの安定供給が継続して得られること、また既存のVMEbusカード資産およびUNIXベースのソフトウェア資産が継承できるという観点から、IntelのCPUアーキテクチャ上で動作可能なSolarisまたはLinuxのシステムを対象を絞った。選定にあたってはCPUボード毎に各オペレーティングシステムとの相性や安定性、およびパフォーマンス計測を行った。その結果、CPUボードとしてXycom Automation社製XVME658、またオペレーティングシステムとしてHP743rtで行っていたプライオリティコントロールが標準で実装されているSolarisを採用する事とし、2001年の導入を目指して、現在各種インターフェースカードのデバイスドライバーの作成を進めている。