



KEK Internal 2001-13
February 2002
A/H/M/R/D

平成 12 年度

KEK 技術賞 受賞論文集

The KEK technology prize 2000

Edited by
K. Ishii

文部科学省 高エネルギー加速器研究機構



High Energy Accelerator Research Organization

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

KEK Reports are available from:

Information Resources Division
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba-shi
Ibaraki-ken, 305-0801
JAPAN

Phone: +81-298-64-5137
Fax: +81-298-64-4604
E-mail: irdpub@mail.kek.jp
Internet: <http://www.kek.jp>

序文

一編の論文に十編の技術報告書

平成 13 年度 KEK 技術賞選考委員会
委員長 人見 宣輝
(平成 12 年度 KEK 技術賞選考委員会委員)

平成 12 年度は、「KEK の科学技術上のすぐれた業績を表彰し、もって広く技術の発展に資する」という目的で創られた KEK 技術賞の発足の年である。平成 12 年 11 月 13 日に、最初の選考委員会が開かれ、互選により木原元央加速器研究施設長（当時）を委員長に選出した。

そこで、KEK 技術賞は次のような観点で選考する事が申し合わされた。

- (1) 機構の研究活動に必要な実験装置等に関する技術開発と性能向上に対する顕著な貢献をなした業績
 - (2) プロジェクトの遂行、実験装置等の運転・維持においてなされた高い技術的専門性、技術力の蓄積が高く評価できる業績
 - (3) その他の優れた技術の開発（発明、改良）が技術賞の対象としてふさわしい事
 - (4) 選考に当たっては、成果の公表（書くという事、まとめるという事）の重要性を考慮する事、特に、ドキュメントとしての価値の高い技術報告の評価が必要である事
- 等である。

公募は 12 月 1 日から 22 日の間としたが、最終的に、13 件の推薦技術が寄せられた。これらに対して詳細な分析評価をし、さらに評価の完璧を期す為に、木原委員長より質問状を選考対象者に発送し回収した。これらの回答結果も含めて、さらに選考委員会で真剣な討議をおこなって、以下の諸君を賞者と決定した。（以下、応募順）

- 1) 高力 孝君「アトラス シリコン マイクロストリップ モジュールの開発」
- 2) 小菅 隆君「PF ビームライン・インターロックシステムとその集中管理システムの開発」
- 3) 大畠洋克君・飯田真久君「ヘリウム液化冷凍機の連続運転と制御システムの自動化」
- 4) 高富俊和君「卓越した超精密加工技術」

本論文集は、これら受賞者諸君の成果を取りまとめたものである。

以上のような関門を通過しての受賞である為、受賞者諸君とその技術は本賞の目的に充分合致した大変素晴らしいものであると言えよう。しかし、賞に至らなかつた諸君の技術自体も充分高いものである為、本当に僅差でこのような結果となっていると言つても過言ではない。冒頭述べた成果の公表という点で差異がついたものもあったので、若干それについて補足しておきたい。

この委員会では、しばしば木原委員長が口にされた「一編の論文を書く為には、その裏に十編の技術報告書があつてしかるべきだ。」という考え方方に則つて技術の伝承について議論がなされた。

技官諸君の技術成果については、将来それが使われるかどうか判りはしないという意見もある。事実そうかも知れない。しかし、同じものはともかく同様なものを開発したり運用したりしようとした時にはどうであろう。10 年経った後、人が代わっても、高いレベルからスタートし、素早く成果に結び付ける為には、その技術や考え方が、苦労した担当者により、きちんとドキュメントされ、伝承されたものが強い味方になるに違いない。

往々にして、自分の関連した実験などについての研究論文に自分の名前が載つたというだけで安心してしまうという事があると思う。

その論文がまとまる背景には、いろいろなアイデアの中から実験の手法をどう絞り込んだか、実験装置をどう構想し作ったか、それにどんな工夫が注がれたか、その運転にはどんなノウハウがあるのか、

など多くの技術が隠れているはずである。

教官の立場、技官の立場、またその関わり方によって、それぞれの技術が実験の中、各人の中に蓄積されているはずである。

しかし、紙数の関係もあり、どうしても実験結果を重視せざるをえない論文においては、それらが割愛されてしまう事が多くなってしまうのは否めない。言い換えれば、結果を出す為のプロセスの記録もKEKにとつては重要であり、それらを、後進が利用して、高い成果に早く到達できる助けとなっていく事も期待されているのである。

KEK インターナルレポートなどで、これらの成果が発行されるのは大変望ましい事である。しかし、どうしてもオフィシャルなものは敷居が高くならざるを得ない。ログノートや個人のファイルに雑然として入っているものを公にするという程度の簡易な報告システムがあれば、どんどんと技術が記録され、蓄積されていく事になるであろう。しかし各研究所や施設、あるいはもっと小さいグループの中で、このような技術報告の仕組みができているところはまだ少ないのである。

成果公表の気力はあっても入れ物、手段がなければできない相談であるので、このような技術報告の仕組みの充実が期待されるところである。それぞれの衝に当たっておられる方々には技術報告の仕組み作りを是非心掛けていただきたいと思う。

なお、まだ推薦されていない諸君、今回賞に至らなかつた諸君、自分の技術を将来に伝承していくのだと言う気持ちで、まずは技術の向上、そして成果の公表の努力をされ、是非、チャレンジまた再チャレンジをしていただきたい。

本稿は本来、前委員長の木原元央先生にお書きいただくのが筋であるが、ご退官なさっておられるために、筆者が代行して書かせていただいた事を付記する。

以上

平成12年度 KEK 技術賞 受賞論文集

目次

序文

受賞論文

	頁
1. アトラス シリコン マイクロストリップ モジュールの開発 高力 孝	1
2. PFビームライン・インターロックシステムとその集中管理システム 小菅 隆	11
3. ヘリウム液化冷凍機の連繋運転と制御システムの自動化 大畠洋克、飯田真久	21
4. 卓越した超精密加工技術 高富俊和	31
編集後記	39

アトラス シリコン マイクロストリップ モジュールの開発

高力 孝

高エネルギー加速器研究機構

素粒子原子核研究所・ATLAS グループ

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

池上陽一^a、寺田 進^a、海野義信^a、近藤敬比古^a
原 和彦^b、小林博和^b、秋元崇^b、荒井信一郎^b、新聞秀一^b、加藤陽一^b

^a 高エネルギー加速器研究機構

^b 筑波大学、〒305-8571 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

アトラス シリコン マイクロストリップ モジュールは、荷電粒子の飛跡を高精度に測定するための半導体二次元粒子飛跡検出器である。読み出し用回路基板には、物質量を極力少なくする為に回路部とケーブルが一体となった銅ポリイミド・フレキシブル基板と高熱伝導高剛性のカーボン／カーボン・コンポジット補強基板を組み合わせたハイブリッド基板を開発し、機械的電気的性能が優れていることを確認した。また、高精度が要求される組立は、リニアブッシュとピンを基本にしたシンプルなジグを開発し、充分な精度で量産出来ることが分った。

本報告書では、機械的な観点から、アトラス シリコン マイクロストリップ モジュールの開発について報告する。

1. はじめに

2006 年の完成を目指して建設が始まられている、欧州合同原子核研究機関 (CERN) の LHC 加速器を用いた衝突実験研究では、ヒッグス粒子や超対称性粒子の発見など素粒子物理学の本質的発展が期待されている。この LHC 加速器を用いた陽子・陽子衝突実験装置の一つに、アトラス測定器^[1]がある。アトラ

ス測定器は図 1 に示すように、高さ 22m 長さ 46m の巨大な測定器であり、各種の測定器により構成され、約 40 カ国の人々が共同で建設している。我々は、アトラス測定器の衝突点に近い半導体飛跡測定器 (Semiconductor tracker : SCT) の建設に参加している^[2]。SCT^[3]はバレル部とフォワード部からなっており、半径 300~520mm、長さ 5000mm の空間にシリンドラー 4 層、ディスク 9×2 層が配置され、さらにバレルモジュール (4×85×128mm³) とフォワードモジュール (4×85×160mm³) 合わせて約 5000 台のモジュールが取り付けられる。図 2 にバレル部を示す。これにはバレルモジュールだけしか示されていないが、実際には冷却パイプ、電源ケーブル、信号用光ケーブル等が布設され、信号数 700 万チャネル、総発熱量 35kW の途方も無い代物になる。LHC に使われるモジュールには、荷電粒子に対して速い応答 (40MHz) や高い位置測定精度 (23 μm) が要求されるばかりでなく、衝突点に近いので、10 年間で 3×10^{14} 粒子 / cm² 以上と見積もられる高い放射能にも耐える必要がある。

日本は、第 3 層の製作(600 バレルモジュールの製造とバレルシリンドラーの組立)を担当している。また、バレル部の高密度信号読み出し回路基板に、我々が提案した「銅ポリイミド／カーボン・ハイブリッド回路基板」が採用されることになり、全部で約 2500 台の基板を、LSI を除く全ての部品を実装した状態で共同建設機関に配付する予定である。

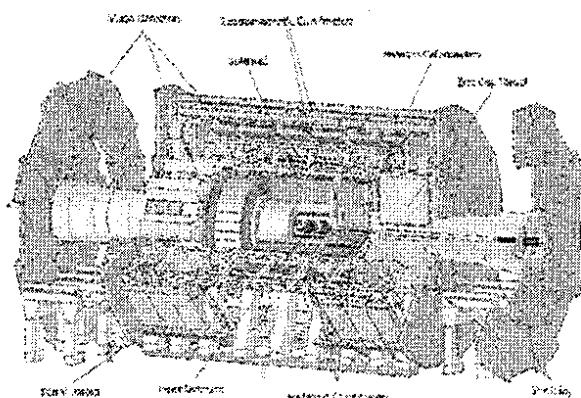


図 1：アトラス測定器

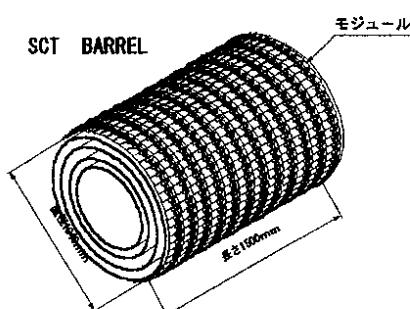


図 2：バレルシリンドラー

2. モジュール

2.1 モジュールの構造

モジュールは図 3 に示すように、シリコンセンサー、信号読み出し用回路基板、伝熱基板（ベースボード：センサーに挟まれているのでベリリア補強板しか見えていない）の 3 つの主要な要素からなっている。シリコンセンサーは両面に在り、両面一体型信号読み出し回路基板（以下ハイブリッド基板と言う）で両面とも中央部から読み出される構造である。電気的な接続は $25 \mu\text{m}$ のアルミワイヤーボンディングで行っている。構成部品の詳細を図 4 に示す。ベースボードを挟んで、表と裏に 2 枚ずつセンサーを接着したサンドイッチ構造をしている。ハイブリッド基板はセンサーを跨いでいるが、橋型にしてベリリア補強板に接着している。ワイヤーチェンバー等従来の飛跡検出器の読み出し回路部は、いわゆるデッドスペースになっているが、本モジュールではセ

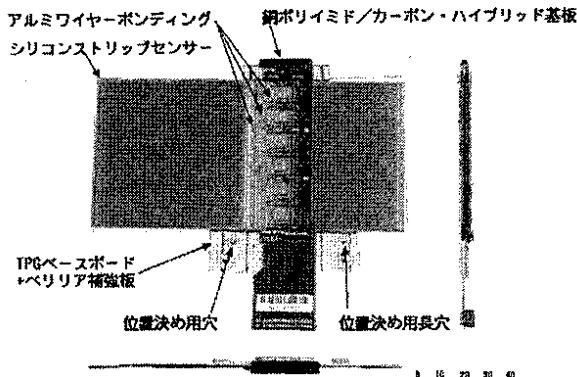


図 3: バレルモジュール

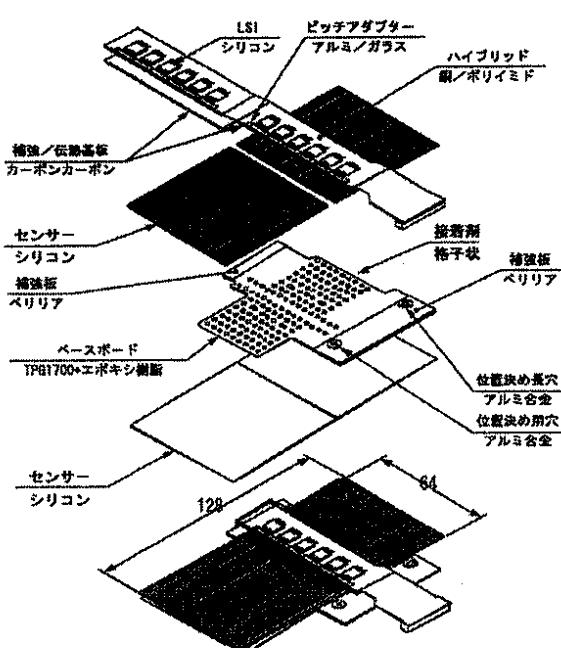


図 4: モジュールの構成

ンサーと一緒にになっているので、物質量を極力少なくしたハイブリッド基板を開発する必要がある。モジュールの諸特性を表 1 に示す。センサーのストリップは長手方向に平行になっているので、表と裏のセンサーを相対的に 40 mrad （約 2.2° ）回転して二次元検出を実現している。したがって、ハイブリッド基板も交わった配置になっている。

表 1: モジュールの主な特性

・ センサー枚数	表裏 各 2 枚
・ センサーの大きさ	$0.285 \times 63.6 \times 64 \text{ mm}^3$
・ センサーのタイプ	P in N
・ センサーのストリップピッチ	$80 \mu\text{m}$
・ センサーのストリップ数	760 本
・ 信号読み出し数	1536 チャンネル
・ ワイヤーボンド数	4980 本
・ ステレオ角度	$\pm 20 \text{ mrad}$
・ LSIチップ数	12 個
・ 消費電力	Min. 6.7W Max. 8.7W
・ センサー動作温度	-7°C
・ 動作電圧	150V~500V
・ 10 年間に被爆する陽子線量	Max. $3 \times 10^{14} \text{ 粒子/cm}^2$
・ センサー両面相対位置精度 (μm)	
長手方向 midxf	± 10
短方向 midyf	± 5
厚み方向 dz	± 50
・ ステレオ角精度	$\pm 0.13 \text{ mrad}$
・ 位置決め穴位置精度 (μm)	mhx ± 30
・ 平均放射長／モジュール	1.17%X0

2.2 使用材料

モジュールに使用されている材料は、図 4 に示す通りである。それらの主な材料特性を表 2 に示す。物質量が少ないのは放射長が長いことを意味するが、逆に極端に短い材料には銅と金がある。これはハイブリッドの導体なので、他の材料に置き換えるのは難しい。そこで、線幅を細くしたり（最小線幅 $75 \mu\text{m}$ ）、厚みを薄くして（最小厚み：銅 $12 \mu\text{m}$, 金 $0.3 \mu\text{m}$ ）影響を少なくしている。

また、表 2 で馴染みの薄い材料は、ベリリア、ボロンナイトライド、カーボン・カーボン、TPG であろう。ベリリアは、セラミックスの中で特に熱伝導が良い。ただし、毒性があるので、本当は使いたく無い材料である。ボロンナイトライドは、エポキシ接着剤の熱伝導率と熱膨張率を改善するために、フィラーとして使っている。放射長が長く、柔らかいのが特徴。カーボン・カーボンは、ハイブリッドの補強と熱をベースボードに逃がす働きをする。そのままだとカーボンの粉を発塵するので、発塵防止皮膜処理をして使用する。TPG は面方向の熱伝導率がダイヤモンドに匹敵するくらい良く、特異な材料である。雲母のように層間強度小さく、平らにするのも難し

い。この材料も発塵防止処理をする必要がある。これらの材料は、耐放射線性に優れていることは言うまでもない。

表 2 材料特性

	密度 g/cm ³	熱伝導率 W/m/K	熱膨張係数 ppm/K	放射長 cm	ヤング率 GPa
シリコン	2.34	126	2.6	9.36	113
アルミ合金	2.7	200	23	8.9	70
ペリリア	2.86	280	8.7	14.4	380
ポロンナイトライド	2.08	23	3.0	20.8	55
銅	8.96	400	17	1.43	117
金	19.3	316	14.2	0.34	78
カーボン カーボン	1.95	//700 ±20	//-0.8 ±1.0	21.8	//294 ±
TiG	2.26	ab=1700 c=25	ab=-1 c=25	19	ab=840 c=35
ポリイミド	1.42	0.2	10~20	28.7	~30
エポキシ接着剤	1~4	0.2~3	20~100	4~28.6	0.4~10

2.3 モジュール組立

モジュールの組立は以下の順序で行なう。

- センサーベースボード組立。
- 機械精度と各センサーの IV を測定して、問題ないことを確認。
- センサーベースボードの表側にハイブリッド基板を接着。
- センサーベースボードの裏側にハイブリッド基板を接着。
- ワイヤーボンディング

ハイブリッド基板は予め実装して各種の試験に合格したものを使用する。

組立には、高精度なセンサー位置決め装置と位置決めされたセンサーを吸着してモジュールに組立てる各種ジグを使用する。センサー位置決め装置を図 5

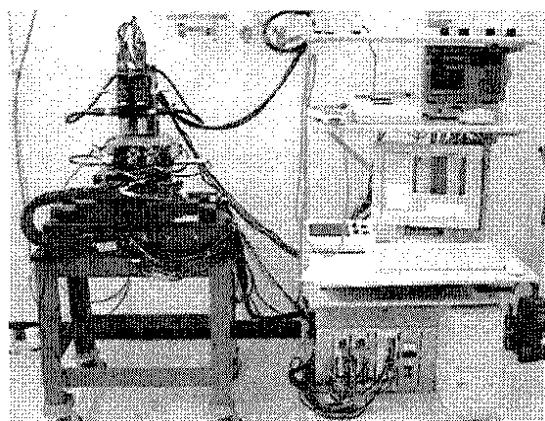


図 5：センサー位置決め用精密 XY ステージ

に示す。2台のCCDカメラとステージにある基準マークと連係してセンサーを位置決めするXYステージである。センサーはXYステージに取り付けられたXYR

(回転)ステージで別々に微調される。位置決めはCCDカメラからの画像処理信号でピエゾアクチュエータをコントロールし、自動的にされる。図6にXYRステージを示す。XYステージはACサーボモーターとリニアスケールを使ったフルクローズドループ制御のステージであるが、XYRステージの駆動は、

- X軸：手動操作モーター駆動+ピエゾアクチュエータ(ST=20 μm)
- Y軸：手動マイクロメーター+ピエゾアクチュエータ(ST=20 μm)
- R軸：ピエゾアクチュエータ(ST=40 μm)

である。ピエゾアクチュエータは高圧電源素子とDACを組み合わせてコンピュータコントロールしているだけで、特別な専用のコントローラは使用していない。XYステージと同じようにモーターコントロールにしなかったのは、ピエゾアクチュエータの分解能が格段に良い為と、センサーをステージにセットする時、ピエゾアクチュエータのストローク以内の精度で置けばそれ以上動かす必要が無いと考えたからである。センサー予備セット用ジグを図7に示す。X軸は、センサーを置く時に当たらないように3mm離しておくので、手動操作モーター駆動で遠隔操作出来るようにしてある。

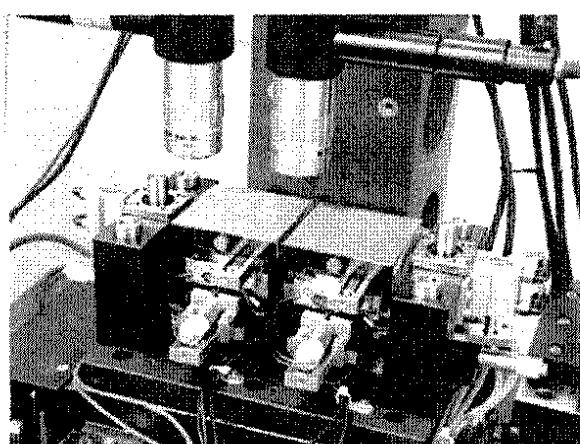


図 6：XYR ステージ

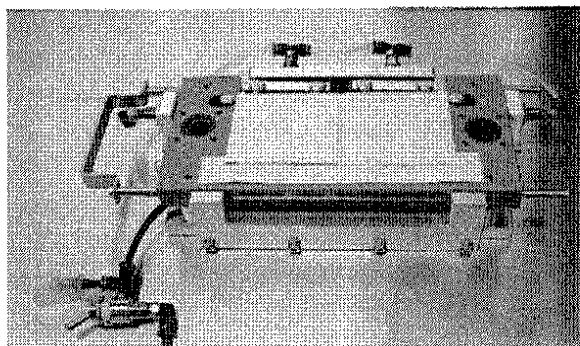


図 7：センサー予備セットジグ

2.4 組立ジグ

ステージとジグやジグ同志の位置合わせはリニアブッシュとピンで行っている。図6のXYRステージ両側にフランジ付きリニアブッシュとピンが配置されているのが解る。図7のジグにも同様にフランジ付きリニアブッシュが取り付けられており、ピンがあれば、ステージとジグやジグ同志で、再現性の良い位置合わせができる。つまり、リニアブッシュの位置が同じジグを作れば、複数のモジュールを同時に組立てることが出来る。通常、ピンの太さはリニアブッシュの内径よりも細くしてあるので、そのまま使うと $5\mu\text{m}$ 位ズレてしまう。そこで、寿命を考慮したうえで、使用するピンはリニアブッシュの内径より $5\sim7\mu\text{m}$ ミクロン太くしてある。こうすることによって互いに弹性範囲内で拘束されるので、遊びの無い、再現ある組立が達成できた。ただし、全てのジグのリニアブッシュの中心距離が同じである必要がある。そこで、マスターゲージを考案した。これによりジグをいくらでもコピー出来る。(現実にはリニアブッシュを固定するのはネジ止めなので、力加減等を考えながらやらないと数 μm 以内に中心距離を揃えるのは難しい)

センサーは裸の半導体なので、キズやゴミが付かないようにする必要がある。ジグと半導体が接触する部分を、プラスチックなど柔らかいもので被う方法もあるが、硬いゴミや欠けたシリコンがめり込んで、逆に傷を付ける要因になる。また、ジグをプラスチックで作ると精度が出ないし、表面だけ張り付けるのも加工が複雑になる。そこで、ジグの必要な面に無塵紙を置くだけの構造にした。無塵紙はボーラスなのでセンサーを真空吸着でき、無塵紙も同時に固定されることになる。そして、無塵紙を使うことにより、ゴミや有害なイオン不純物の問題がなくなった。交換も簡単である。問題なのは置き忘れたが、作業手順書の確認事項に必ず入れて対処する。

2.5 センサーベースボード組立

センサーベースボードの組立はモジュールの最も基本的な組立である。ジグは吸着プレートAと吸着プレートBを使う。図8に吸着プレートA、吸着プレートB、ピンベース及びマスターゲージを示す。吸

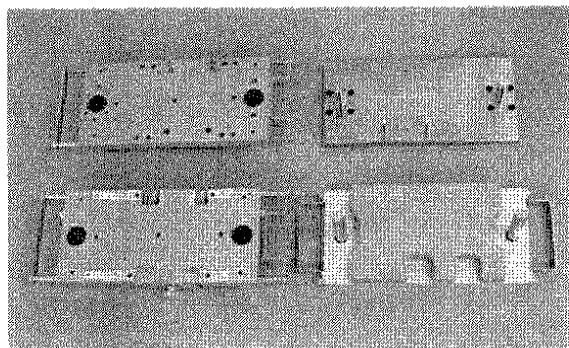


図8：吸着プレートB、マスター ゲージ
吸着プレートA、ピンベース

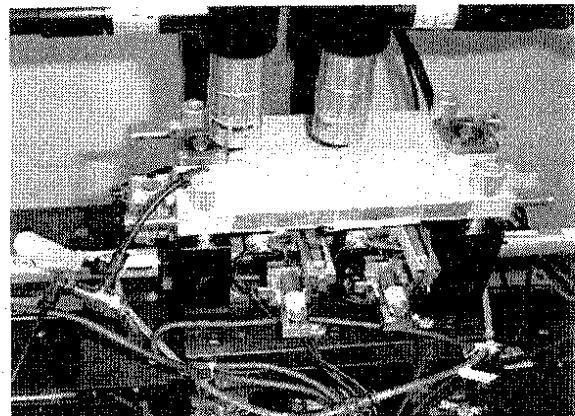


図9：センサー位置決め中

着プレートAはセンサーを吸着する機能とベースボードを位置決めする機能を持っている。共通の $\phi 12$ リニアブッシュの他に、 $\phi 6$ のリニアブッシュでベースボードを位置決めする。ベースボードにある位置決め用穴は $\phi 1.8$ なので、ピンは $\phi 1.8/\phi 6$ の段付きである。

センサーの位置決めが終了したらこの吸着プレートでセンサーを取り上げるが、吸着を切り替える時にセンサーが数 $\mu\text{m}\sim10\mu\text{m}$ ズレてしまうことが判った。これは両方の真空をONにして片方をOFFにした時が最も顕著で、強い真空の力で互いの平行度の違いやバックラッシュによる遊びによってセンサーが動かされるのが原因らしい。ズレの少ないのは、XYRステージの真空をOFFにして、1~2秒後に吸着プレートの真空をONにする場合である。しかし完全では無いので、吸着直後のセンサーの位置が判るように吸着プレートに穴を開けた。しかもズレた場合に直ぐやり直せるように、センサーの位置決めの最初から吸着プレートをセットしたまま行うようにした。その様子を図9に示す。

XYステージで位置決めされるセンサーは、2枚のセンサーの中心が2個のリニアブッシュの中心に合わせ、-20mrad傾けて位置決めされる。したがって、センサーを吸着した吸着プレートAと吸着プレートBのリニアブッシュに対するセンサーの位置は全く同じで、吸着プレートAに接着剤を塗布したベースボードをセットして吸着プレートBを突き合わせれば、 $\pm 20\text{mrad}$ のステレオ角を持ったセンサーベースボードが組立てられる。

2.6 センサーベースボードの接着

接着剤の使用には、

- ・接着剤の量は必要最小限にする
- ・空気溜まりをつくらない
- ・硬化歪みを最小限にする

工夫が必要である。そこで、ベースボードに塗布する接着剤のパターンは、図4に示すように格子状にした。そして、硬化後の接着剤の形状(ドット)を厚さ $75\mu\text{m}$ 、直径 2mm に想定した。接着剤はアラルダイト2011^[4]にBNフィラーを加えたもので、混合比は主剤 2.5g ：硬化剤 2.0g ：BN 2.0g である。BNフィ

ラーを30wt%も加えたので初期粘度が非常に高く、しかも常温硬化タイプなので時間とともに粘度が増し、60分以内に作業を終える必要がある。最初はロボットによる自動化を諦めていたが、吐出抵抗の少ない精密ノズルと、粘度の上昇とともに加圧する圧力を変えることで達成することが出来た。5×5のパターンによる吐出テストの結果を図10に示す。1ドット当たり0.26~0.28mgである。

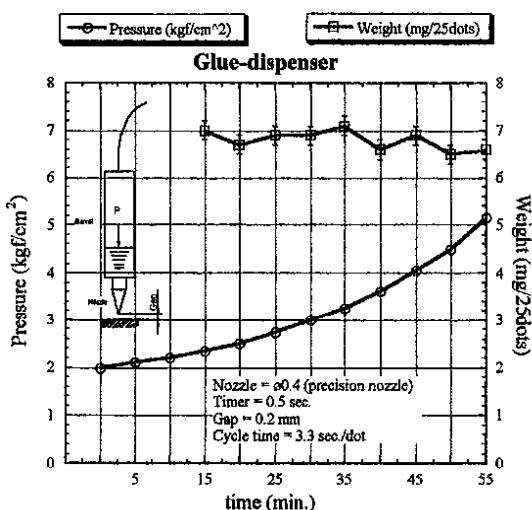


図10：接着剤吐出テスト

2.7 ハイブリッド基板の接着

ハイブリッド基板の位置精度は±100μmなので楽であるが、センサーに接着剤を付着させたり、ハイブリッド基板の実装部にダメージを与えないように、ちゃんとしたジグを使う必要がある。接着剤はセンサーベースボードと同じ常温硬化のものを使うので、片面ずつ接着する。接着が終了したセンサーベースボードを吸着プレートAにセットして、ハイブリッド接着ジグをピンに勘合させる。片面の接着が終わればセンサーベースボードをハイブリッド接着ジグ側に移す。ハイブリッド接着ジグにはヒンジがあつて折り返せるようになっており、センサーベースボ

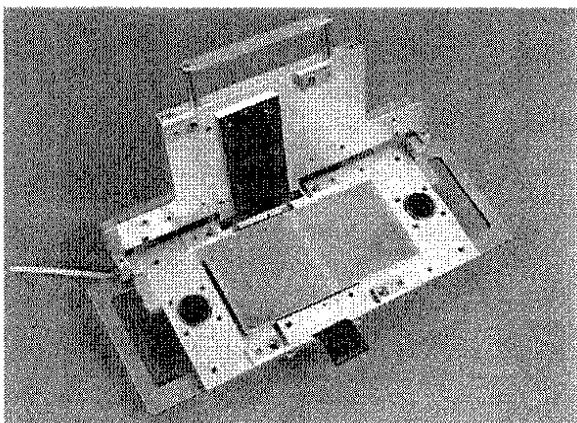


図11：ハイブリッド接着ジグ

ードを挟み込んでもう片面を接着する。図11にハイブリッド接着ジグを示す。表側の接着を終えて、裏側の接着を行なおうとしている所。

2.8 組立精度

組立精度の測定は、非接触三次元CNC画像測定機^[5]を使って実施している。モジュールを適当なフレームに固定して測定するが、測定対象面が両表面なので一度に測定することができない。手段としては、フレームに両側から見ることができる基準を設けるか、モジュール自身に共通の基準を探すかである。Z方向（平面度）の測定はそれ程高い精度（再現性）を要求していないので、表側のセンサーの四隅を基準にして測定している。裏側からは表側のセンサーの裏面しか見えないが、センサーの厚みを加えてやれば相対位置ができる。XY方向（位置精度）の場合は、最初はフレームにガラス製の基準マークを付けて両面から測定していたが、フレームを反転させた時のモジュールのサグによる位置関係の変化や、ガラスの屈折率の影響などで、数μmのばらつきを生じた。そこでZ方向の測定と同じようなやり方で出来ないか検討した。センサーの断面は真四角では無く台形になっているが、ダイシングソーと呼ばれるカッターで精度よく切られているので、ダイシングソーを途中で交換しない限り対称に切られているはずである。したがって、エッジを精度よく測定すれば良いと思われた。しかし結果は悪かった。色々調べた結果、表側のエッジの測定にばらつきが出ることが判明した。表側は台形の上底なので、エッジ検出をする時の焦点位置が少しでもずれると検出されるエッジも違ってくる。そこで、まず表面に焦点を合わせて、次に測定器のZ軸を動かさないでエッジを検出するようにしたら±0.5μm以下で再現するようになった。

図12に主要な位置のサーマルサイクル前と後の測定結果を示す。全て精度内に入っている。サーマルサイクルの条件は-30°C~50°C、5回である。

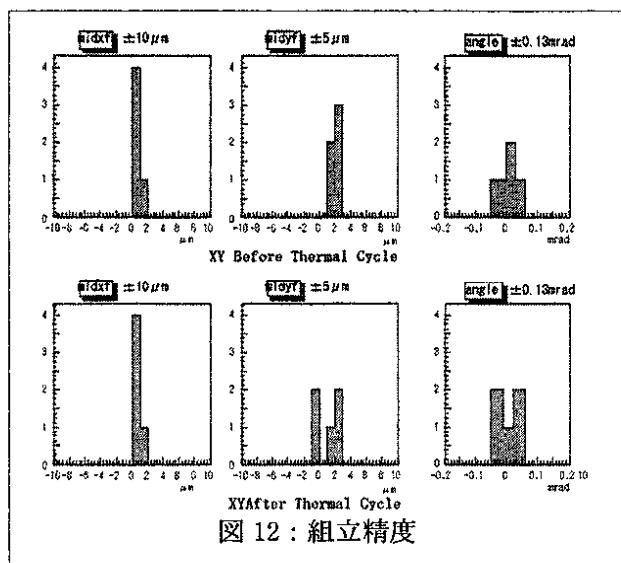


図12：組立精度

3. 銅ポリイミド／カーボン・ハイブリッド基板

3.1 ハイブリッド基板の選定

高密度実装 4 層基板の材料の候補としては、値段と汎用性（又は量産性）を考慮すると、以下の 2 種類に集約される。

- セラミックス配線基板（アルミナ、窒化アルミ、ベリリア等）
- プリント配線基板（ガラスエポキシ基板、銅ポリイミド・フレキシブル基板等）

セラミックス配線基板は、安定した材料であるが、材料特性表 2 から分かるように、アルミナは熱伝導が悪く、窒化アルミは放射長が短い。ベリリアはどちらも良いが、毒性があり、日本では非常に高価な材料で、加工も国内では不可能である。また、ライン幅／ラインピッチを $100\text{ }\mu\text{m}$ / $100\text{ }\mu\text{m}$ を要求した場合、ベースがセラミックスであっても、回路形成部は絶縁体に別の材料、例えばガラスやポリイミド樹脂を使う必要がある。その場合焼成温度が高いのと絶縁体との熱膨張差で反りが発生し、あまり薄く出来ない。大体ベースの厚みは 0.6 mm 以上は必要だとされている。回路形成部は 0.3 mm 位なので、合わせて 0.9 mm 以上にもなる。さらに、橋型に加工してから焼成したりするの無理である。

プリント配線基板は熱伝導が悪いが薄くできるので、適当な放熱基板と合せて使うことが可能である。ガラスエポキシ基板は、ビルトアップ法を使えば 0.5 mm 位まで薄く出来る。放射長はセラミックスに比べて倍くらいあるので、上記のセラミックスと同じ物質量にすれば、 0.6 mm のセラミックスの放熱基板が使える。セラミックスの他に、熱伝導が 2 倍の材料があれば、厚みを半分に出来るので、物質量も減らせる。また、別々に加工して後で接着できるので、橋型にするのも可能である。

銅ポリイミド・フレキシブル基板は、ガラスエポキシ基板よりももっと薄く、 0.3 mm 位に出来る。それに、カメラなどに見られるように、ケーブルと一体の基板に出来るので、接続部分が減って信頼性も増す。日本は、銅ポリイミド・フレキシブル基板を得意としており、小型機器にはほとんど使われている。この技術と高放熱基板を組み合わせれば、物質量の少ない、高機能な基板を作れる筈である。

以上の検討より、我々は銅ポリイミド・フレキシブル基板^[6]を採用することにしたが、そのためには以下の問題を克服する必要がある。

- 熱伝導が良く、剛性の高い補強基板
- 補強基板との接着性
- センサーとの熱膨張差の克服（シリコン = $2.6\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 、銅ポリイミド = $25\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ）

3.2 銅ポリイミド・フレキシブル基板の設計

図 13 にレイアウトを示す。4 層構成で、各 Layer ともに上半分はアナログ部で下半分はデジタル部である。

- Layer 1：部品実装面、信号線
- Layer 2：信号線
- Layer 3：グランド
- Layer 4：電源

物質量を減らすため、幅を極力狭くした。初期のデザインでは、幅が 27 mm だったが、最新のものは 21 mm まで減らすことが出来た。これは、回路部は元々幅が狭くて良かったのだが、ケーブルの幅に合わせていたため。これを、ケーブル部と回路部からケーブル部につながる部分だけをそのままにして、その他の部分を必要最小限の幅にした。このように色々な形状に出来るのも、銅ポリイミド・フレキシブル基板の特徴である。また、熱伝導が悪いのを改善する為に発熱場所のダイパッドにスルーホールを沢山作った。サーマルビアと呼ばれる。そして、補強板との電気接続もここでやって、補強基板にシールド効果を持たせている。

層構成を図 14 に示す。基材は、ポリイミド厚 $25\text{ }\mu\text{m}$ 、銅箔 $12\text{ }\mu\text{m}$ の無接着タイプを使用している。積層は厚み方向で対称になるように、両面基材に片面基材をニトリル系エポキシ接着剤で両側に張り合わせている。ポリイミド厚は $12.5\text{ }\mu\text{m}$ まで薄く出来るが、絶縁やインピーダンスを考えたら、 $25\text{ }\mu\text{m}$ が妥当なところである。銅箔は、物質量を極力減らす意味から、なるべく薄い方が望ましい。出力される信号はデジタルなので、電源供給さえ問題なければ、 $5\text{ }\mu\text{m}$ でもよい。しかし、銅箔の厚みは圧延銅箔、電解銅箔とともに $12\text{ }\mu\text{m}$ が限界である。それ以下の場合は、ポリイミドシートに適当なポンディングメタルを蒸着やスパッタで付け ($0.25\text{ }\mu\text{m}$)、その上にメッキする方法が取られている。この欠点は、銅の密着強度が通常のものに比べて半分位しかないことである。積層する時は、 150°C 位の熱を掛けたり、薬品処理などを頻繁に行うので、銅箔が容易に剥離する。試作

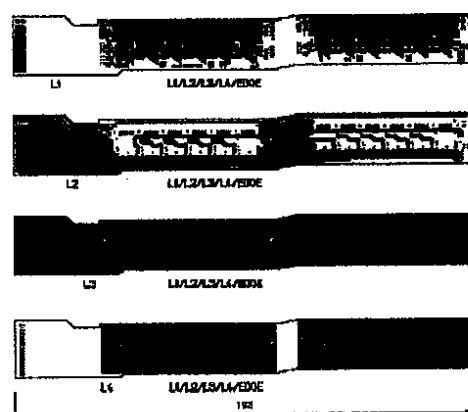


図 13：レイアウト

でもそれを確認した。圧延銅箔や電解銅箔は、表面を薬品処理などで荒らし、ポリイミドを直接キャスティングしているので密着強度が高いことは容易に想像できる。ただし、現在使用しているのは、 $17.5 \mu\text{m}$ のものをエッティングで薄くした物である。 $12 \mu\text{m}$ は、まだ市場に出たばかりで新しい基材。

Layer 1 と 4 の表面には、スルーホールメッキ ($20 \mu\text{m}$) が加わる。基材の銅箔の厚みをいくら薄くしても、スルーホールメッキで効果が薄められるのが現状である。後で、エッティングで薄くするやり方もあるが、その分、行程も増える。そこで、メッシュ (50%) にして、実効的に $4 \mu\text{m}$ の増加に押さえている。

回路部とコネクタ部は 4 層で、ケーブル部は 2 層であるが、単に銅箔が有り無しだけで基材のポリイミド層が途中で切れていないので、信頼性も高く、非常にスマートな構成である。また、ケーブル部の銅箔が Layer 2 と 3 の中心部分なので、曲げに対しても安全である。このように一体構造に出来るのが、銅ポリイミド・フレキシブル基板の特徴である。

IC と基板の電気的接続は、 $25 \mu\text{m}$ アルミワイヤーのウェッジワイヤーボンディングで行う。そのため、基板の表面は無電解金メッキが施されている。銅の上に金を直接メッキすると銅の中に金が拡散するので、バリヤーメタルとして Ni をメッキする。Ni メッキは硬いので、ボンディング性を良くする働きもある。 $1 \mu\text{m}$ 以下では不安定で、最低 $2 \mu\text{m}$ は必要である。製造は余裕をみて $4\text{--}6 \mu\text{m}$ に設定した。ワイヤーボンディング性は、放熱用基板（補強基板）と一緒に考える必要がある。センサーとのボンディングは、支えは両端なので、剛性が低いと超音波が充分伝達されず、ボンディング不良を起こす。ボンディング強度は 6 グラム以上あれば良いが、必ずアルミワイヤーのネックで切れる必要がある。剥がれることがあってはならない。

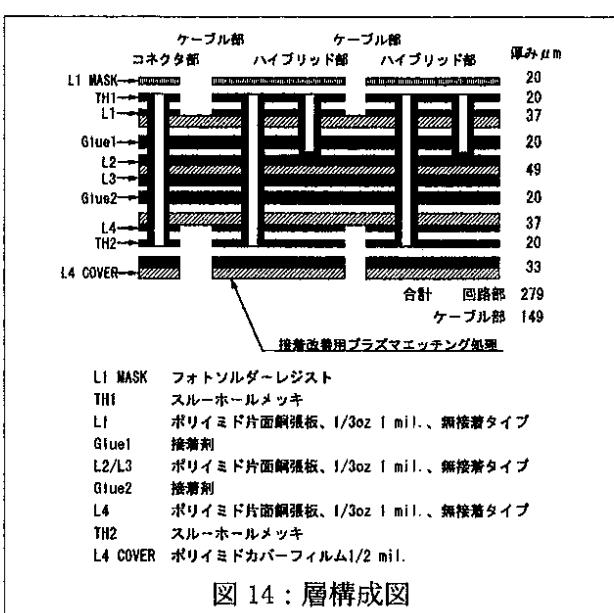


図 14：層構成図

3.3 カーボンカーボン・ブリッジ

材料特性表 2 から、熱伝導、放射長、剛性がいずれも良いものを選ぶと、金属ではベリリウム、セラミックスではベリリア、その他ではカーボン、カーボンが挙げられる。前者の 2 つは、何れも毒性があり、日本での入手は非常に高価で、加工も出来ない。

カーボン、カーボンは炭素繊維をレジンで固めて、レジンも炭素化させたものである。材料特性は焼成温度が高い程よく、 3000°C の物が一番性能が良い。繊維の方向は、一方向やクロスなど自由に設定できるが、材料が特殊なので、加工物に合わせて素材を作るのでは無く、素材に合わせて加工を考える必要がある。市場では、一方向材とクロス材が、いずれも $10 \times 200 \times 200 \text{ mm}^3$ 程度のブロック状で入手できる。クロス材は 1 プライが $250 \mu\text{m}$ 位があるので、切り出す厚みを 1 mm 以上にしないと $0/90$ の割合がデタラメになってしまう。一方、一方向材はトウと呼ばれる少し捩った束を使うのと、CFRP を作るのと同じように、 $100 \mu\text{m}$ 程度のプリプレグを積層する方法がある。トウで作ったものは薄い板に加工するとボイドが多数見られる。プリプレグ法は緻密で厚さ 0.3 に加工しても問題ない。表 3 にプリプレグ法^[7]で作った一方向材 (UD) の機械特性の一例を示す。材料特性の異方性が顕著である。

表 3：カーボン・カーボン一方向材の機械特性
熱処理温度 3000°C

・ 密度	1.9 g/cm^3
・ 曲げ強度 (0)	394 MPa
・ 曲げ強度 (90)	10 MPa
・ 曲げ弾性率 (0)	363 GPa
・ 引張り強度 (0)	294 MPa
・ 引張り弾性率 (0)	294 GPa
・ 層間せん断強度	20 MPa
・ 热伝導度	$k(0) = 700 \text{ W/m/K}$ $k(90) = 20 \text{ W/m/K}$
・ 热膨張係数	(0) $-0.8 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ (90) $10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$

繊維方向が長手方向に平行な平板 ($0.3 \times 21 \times 75 \text{ mm}^3$) を曲げてみると、 0° 方向は非常に硬く、 90° 方向は非常に軟らかい。このままでは、割れる心配が有り、使えそうにない。しかし、銅ポリイミド・フレキシブル基板と一緒にした時、 90° 方向はポリイミドと膨張係数や柔らかさが比較的近いことから、ポリイミドの粘り強さでカバーされるものと思われる。熱伝導度の異方性は、両端から熱を逃がす構造なので気にならない。したがって、放熱用基板に一方向カーボン・カーボンを選定した。

比較の為に $0.3 \times 21 \times 75 \text{ mm}^3$ に加工したアルミ合金とカーボン・カーボンにそれぞれハイブリッド基板を接着し、三点曲げ試験とヒーター加熱による温度分布の測定を行なった。まず三点曲げ試験では、スパンを 55 mm にした時、

- ・ アルミ合金 + ハイブリッド基板

4.1 $\mu\text{m}/\text{gf}$
 カーボン・カーボン+ハイブリッド基板
 1.1 $\mu\text{m}/\text{gf}$

で、カーボン・カーボンの方が約4倍剛性が高かった。接着後の仕上がり厚みはどちらも0.6mmだった。次に、温度分布の測定結果を図15に示す。カーボン・カーボンの中心の温度はアルミ合金のそれの半分であった。巾方向の温度分布の異方性が見られるようであるが、問題ない。

カーボン・カーボンは、表面が露出しているとカーボンの粉を発塵する。さらに、約7 μm の炭素繊維も脱離して接触する可能性もある。これらは、電気特性を確実に悪くするので、なんらかの発塵防止処理が必要である。表面に接着剤を塗れば良いと思うかもしれないが、密着性、作業性、厚味のコントロールなど難しい。金属メッキ法(銅+金)は、比較的簡単にできる方法である。ただし、膜厚が物質量にすぐ響くので、厚く出来ない。1~2 μm 位が限度である。しかし、これだと薄すぎて、密着が不十分な所が出来易い。実際に、炭素繊維が脱離してセンサーとショートしたような感じのモジュールがあった。その他の表面処理として、高分子樹脂のパリレン^[8]を気相蒸着法により膜付けする方法がある。この方法はあまり知られていないが、パリレン樹脂を加熱して蒸発させ、それを低真空容器内に導入して表面に付着させる方法である。蒸気なので、露出している部分はどの方向でも蒸着でき、小さな隙間も、平均自由行程より長ければ蒸着できる。また、膜の成長速度も、毎時1 μm 以下なので、緻密な膜が出来、下地との密着力も充分強い。したがって、カーボン・カーボンの表面処理に、パリレンコーティングを採用して、膜厚を10 μm にした。

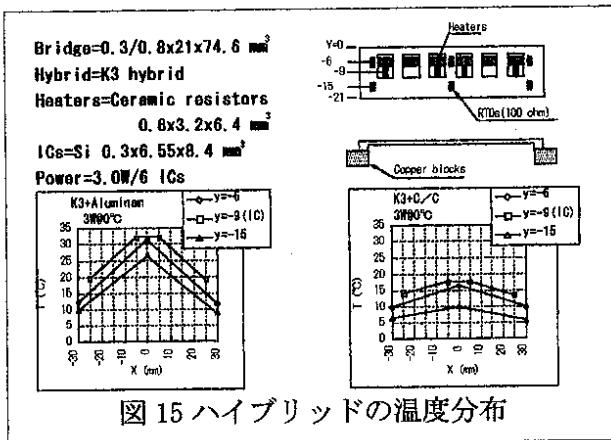


図15 ハイブリッドの温度分布

3.4 パリレンのレーザー表面処理

プラスチックで表面を覆うと問題になるのが接着性である。パリレンも例外では無く、そのままでは接着性が悪い。プラスチックの接着性を良くするには、表面を荒らせば良い。最近は、プラスチックの表面処理にプラズマエッチングを使う話をよく聞く。プラズマエッチング法は優れた方法だが、手元に装

置が無いと簡単には出来ない。装置の形状によってプラズマのでき方が違ってくるし、条件出しに手間がかかる。そもそも、そういう装置は製造ラインに入っているので、外注ではなかなか使わせてくれない。そこで、レーザーを使ってみた。もともと、ICの部分は電気的に接続する必要があるので、2×4 mm²の窓をエキシマレーザーで開ける予定であった。表面処理後、試験片を接着してピール強度を測定したところ、0.8kg/cmあり、合格だった。レーザーは単位面積当たりのパワーを定量的にコントロール出来るので、試作には便利である。

銅ポリイミド・フレキシブル基板も同じように表面処理する必要があるので、接着性改善用プラズマエッティング処理付の材料を使用している。

3.5 銅ポリイミド・フレキシブル基板とカーボン・ブリッジの接着

この接着は、フレキシブル基板が使えるかどうかのキーポイントである。接着剤は、厚味の一様性や取扱いよさからフィルム状接着剤^[9]を選んだ。厚味は50 μm で、硬化温度は、125°C×2時間である。銅ポリイミド・フレキシブル基板とカーボン・ブリッジの熱膨張差は24ppm/°Cもある。したがって、そのまま平らな状態で接着すると、室温ではフレキシブル基板側が大きく窪んだ形になる。そこで、まずフレキシブル基板とフィルム状接着剤及びカーボン・ブリッジを仮止めする。次にお椀のように窪んだジグにフレキシブル基板の表側が下向きになるようにセットしてシリコンゴムでシールする。そしてジグとシリコンゴムの間を真空にして基板をジグに密着させる。更に、シリコンゴムの外側から0.3MPaで加圧する。合計の圧力差として0.4MPaを掛けたことになる。そして、この状態で加熱して硬化させる。カーボン・ブリッジの熱膨張係数には異方性があるので、0°方向はR300で、90°方向はR450のアールが付いたジグを使用。室温での平面度は、±75 μm 以下に押さえられている。図16に接着ジグの概略を示す。

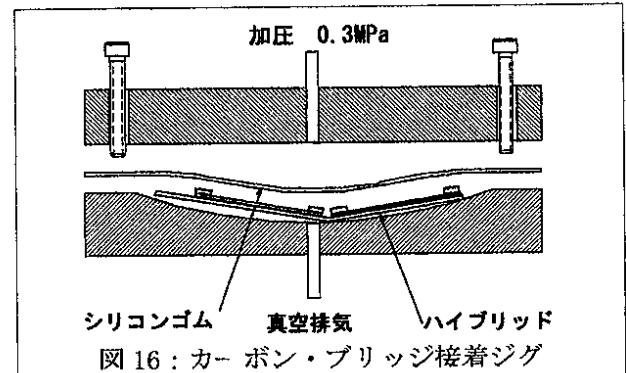


図16：カーボン・ブリッジ接着ジグ

3.6 表面はんだ付け実装

フレキシブル基板とカーボン・ブリッジの接着に使用しているフィルム状接着剤のガラス転移温度が低いので、リフローは残念ながら使えない。現在

はロボットを使って、接着による部品の仮止め、ブラックスの塗布、ハンダボールの供給を行い、手ハンダで仕上げている。レーザーや光ビーム法など使えば、限り無く自動ハンダに近付けることが出来ると思われる。ハンダは、環境に配慮して鉛フリーのSn96/Ag4を使用していたが、「Tin pest」^[10,11]の問題がUKグループから指摘され、急遽Sn/Pbの共晶はんだに戻すことにした。Tin pestは昔から良く知られている現象で、合金では問題無いとされてきたが、Snの割合が多いもの（鉛フリーはんだ等）を13°C～-50°Cで長期間（年単位）保存すると脆くなると言うものである。ウイスカーや出来的らしい。アトラスのモジュールは、低温、高電圧、高放射線と最も危険な条件が揃っているので、鉛フリーは諦めるしかない。但し、それで問題が解決したわけでは無い。世の中の表面実装部品が既に鉛フリー化されているからである。

4. モジュール冷却試験

シリコンセンサーが放射線損傷を受けると、全空乏化電圧も上がる。つまり、動作電圧を上げる必要がある。LHCで10年間に被曝する陽子線量はMax. 3×10^{14} 粒子/ cm^2 と見積もられており、動作電圧も100Vから500Vまで上げる必要がある。また、センサーのバルクもNタイプからPタイプに反転して比抵抗が下がり、流れる電流が増すので発熱も多くなって温度が上がる。センサーは半導体なので、温度が上がると抵抗が下がって益々電流が増えて発熱も多

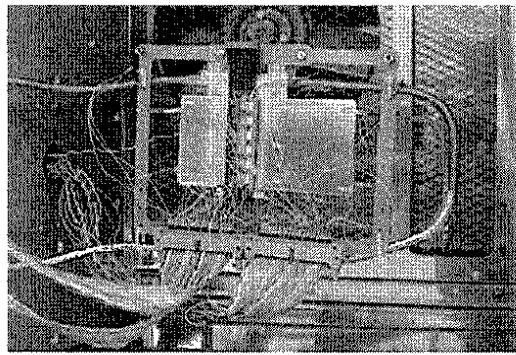


図 17：モジュール冷却テスト

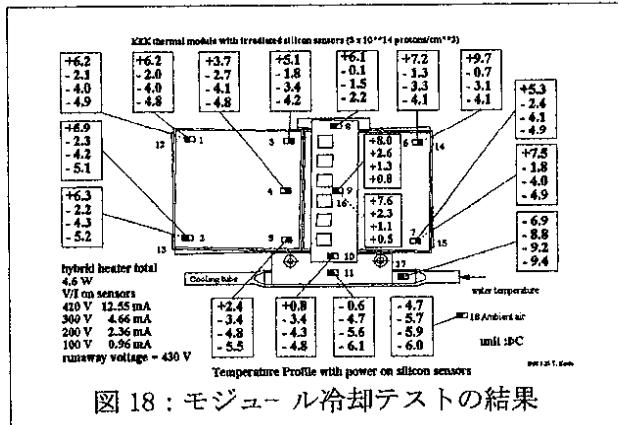


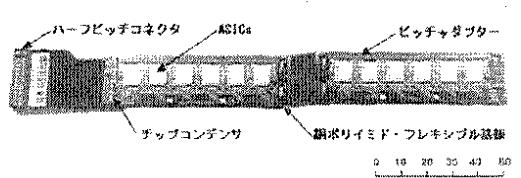
図 18：モジュール冷却テストの結果

くなる。もし冷却がこれに追い付かなければ、遂には熱暴走（Thermal runaway）^[12]を起こして溶けてしまう。それを防ぐ為に、モジュールはセンサーの温度が0°C以下になるように冷却され、しかも温度分布が均一になるように設計されている。図17はセンサーに陽子を 3×10^{14} 粒子/ cm^2 照射したモジュールの冷却試験の様子を示す。ハイブリッド基板からの発熱にはチップ抵抗を使った。温度素子は白金抵抗測温体を使用した。図18に測定結果を示す。300Vまでは、それぞれの電圧でシリコンセンサーの温度は均一になっているのが分かる。また、300Vを境にして電流と温度変化の様子が違っている。これはシリコンセンサーの発熱に対して冷却能力が足りなくなっているからである。この試験では冷却剤に不凍液を使い、入口温度-10°C、流量300cc/minに保った。このモジュールの熱暴走電圧は430Vであった。もちろんシリコンセンサーを0°C以下に保つように冷却すれば、500Vでも熱暴走は起こらない。

シリンドラーに取り付けられたモジュールは、配管の数がなるべく少なくなるように、一本の冷却パイプで12～24台まとめて冷却される。もしこの冷却に不凍液など比熱を利用したものを使うと、上流と下流のモジュールの温度差が大きくなり過ぎ、モジュールの電気性能の違いや温度差による機械的な歪みなどを生じて、精度の高い測定が出来なくなる。そこで、アトラスはフロン系の冷却剤を使い、蒸発潜熱を利用して冷却する予定である。理論上は比熱を利用したものより数十倍の冷却能力を持つ。ただし、測定器の外からシリンドラーまで8気圧で送り、シリンドラーのところに膨張弁を取り付けて断熱自由膨張させて-17°Cの気液混合流体を発生させないといけないので、そう簡単ではない。

まとめ

アトラスシリコンマイクロストリップモジュールの開発について機械的な観点で述べてきたが、電気的にも充分な性能を有することは言うまでも無い。日本グループ^[13]は、少ない人数ながらも各自がそれぞれの役割を分担して、組立（ペアチップの実装やワイヤーボンディングも含む）、各種テスト、データ収集、データ解析など一通りのことを自分達の手で出来る体制を整え、強力な集団となっている。今後は、モジュールの量産、銅ポリイミド／カーボン・ハイブリッド回路基板の量産、シリンドラーの組立と休み無く計画を進めて行かないといけないが、常により良いものを作るよう心掛けるつもりである。



銅ポリイミド／カーボン・ハイブリッド基板

謝辞

ここまで来られたのは、菅原機構長を初め、山田素核研所長他素核研のみなさん、契約課のみなさんなど、沢山の方々の強力なご支援のお陰です。また、参考文献にあるメーカーの他に、飯村精密株式会社、林栄精器株式会社、古本機工株式会社、武藏エンジニアリング株式会社、THK 株式会社、セイコーブレッシュジョン株式会社の方々にも大変お世話になっております。この場をお借りして皆様にお礼申し上げます。そして、これからも皆様の一層のご支援をお願い致します。

参考文献

- [1] ATLAS Technical Proposal for a General-Purpose pp Experiment at the Large Hadron Collider at CERN, CERN/LHCC/94-43 (1994).
- [2] ATLAS Inner Detector Technical Design Report, CERN/LHCC 97-16 (1997), CERN/LHCC 97-17 (1997).
- [3] Y. Unno, "ATLAS silicon microstrip Semiconductor Tracker (SCT)", Nucl. Instr. Meth. A453 (2000) 109-120, M. Turala, "The ATLAS semiconductor tracker", Nucl. Instr. Meth. A466 (2001) 243-254.
- [4] 接着剤 アラルダイト 2011 株式会社バンティコ BN フィラー 電気化学工業株式会社
- [5] 株式会社ミツトヨ
- [6] 日本メクトロン株式会社
- [7] 日石三菱株式会社
- [8] 日本パリレン株式会社
- [9] 日本エイブルスティック株式会社
- [10] www.geia.org/sstc/G12/mtg108/nasa_nepag_m108.pdf
- [11] www.smartgroup.org/pdf/timpest.pdf
- [12] T.Kohriki et al,First Observation of Thermal Runaway in the Radiation Damaged Silicon Detector,IEEE Trans. Nucl. Sci.vol.43,No.3 (1996)1200
- [13] <http://atlas.kek.jp/>

PF ビームライン・インターロックシステムとその集中管理システムの開発

小菅 隆

高エネルギー加速器研究機構

技術部測定器第五課

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

ビームライン・インターロックシステムは放射光研究施設のビームライン毎に設置され、放射線安全、ビームライン真空の保持、ビームライン構成要素の保護を目的とし高い信頼性の元に動作してきたが、様々な技術開発等を行うことにより信頼性を保持したまでの低コスト化及び省力化に成功した。

また、集中管理システムはこれらビームライン・インターロックシステムを統合的に監視・制御するシステムであり、これまでビームラインにおけるトラブルへの対応を迅速に行うための技術の導入を行ってきたが、新たに分散化システムを導入することで、高い保守性を有するシステムを構築することが出来た。

1. はじめに

放射光研究施設（以下 PF）には 2001 年 9 月現在、2.5GeV リングに 21 本、6.5GeV-AR リングに 3 本のビームラインが設置され様々な放射光利用実験が行われている。それぞれのビームラインは 1~4 本のブランチビームライン（branch beamline）に分岐され、リングからのシンクロトロン放射光は各ブランチビームラインの実験ステーションまで導かれる。ビームラインは真空中に保たれており、真空中止のためのゲートバルブや真空度を監視する真空ゲージなどを取り付けられている。また、X 線を利用するビームラインなどにはハッチと呼ばれる放射線防護用の区画が設置されており、実験装置等が収納されている。ビームライン・インターロックシステム（以下 BLIS）^[1-3]は PF の全てのビームラインに設置され、これらゲートバルブ、真空ゲージ、実験ハッチなどに加え放射光ビームの出射・停止を司るビームシャッターやセンサーなどを統合的に監視制御しており、高い信頼性を保持している。

PF ではビームライン性能の向上を目指した改造が頻繁に行われる。そのため BLIS は高い信頼性を維持すると共に非常に柔軟なシステムでなければならぬ。また、ビームラインの改造は放射光リング運転停止期間中の限られた期間に行われるため、BLIS 新設及び改造に際しては作業の省力化が求められる。これらと同時に低コスト化も大きな課題である。

これまで、PLC (Programmable Logic Controller、シーケンサ) を積極的に利用することで BLIS の柔軟性を確保することは可能となっていた。また、PLC のプログラムをビームライン毎に書き換える部分とビ

ームラインに共通の部分とに分割することにより、プログラミングに対する省力化もある程度行うことが出来た。しかし、システムの構成上、これ以上の省力化及び低価格化を行うためには限界があった。

そして、集中管理システム^[4-6]はこれら BLIS を統合的に監視・制御するシステムである。各 BLIS からの運転状態を示す信号は光ファイバーを用いて集中管理システムに入力される。また、集中管理システムからのビームライン使用の許可信号等は同じく光ファイバーを用いて各 BLIS に出力される。これまで集中管理システムは安定して動作してきたが、2.5GeV リングの集中管理システムにおいて老朽化等の問題が発生した。また、同システムにおいては運転中に保守作業を行えない等の作業上の問題点も指摘された。

以上、幾つかの問題点を克服すべく検討を重ねた結果、BLIS についてはシステム構成の大幅な見直し及び省配線システムの導入、プログラミングの省力化を図るためにプログラム自動生成システムの開発^[7]を行うこととした。また、集中管理システムについては加速器制御用に開発されたシステムである COACK (Component Oriented Accelerator Control Kernel)^[8-10]が非常に柔軟なシステムであり、集中管理システムにも有効であることに着目、COACK をシステムの中心に導入することにより、システムの分散化を行うこととした。

2. BLIS

BLIS はビームライン毎に設置されており、接続されたビームシャッター、ゲートバルブ、真空ゲージ、ハッチなどのビームラインコンポーネントを統合的に管理している（図 1 参照）。それぞれの BLIS は独立して動作しており、構成は以下のとおりである。

- メインラック：機器の制御を行うための PLC を内蔵するとともに保守などを行うためのコントロールパネル（メインコントローラ）も持つ。
- ステーションコントローラ：実験者が直接操作を行い、放射光ビームの出射及び停止、ゲートバルブの開閉等を行うためのコントロールパネル。
- ハッチ退出制御盤：ハッチ内に取り付けられ、ハッチを閉とする際の定められた退出手順を行うために使用される。
- ハッチ状態表示盤：ハッチ外側に取り付けられ、ハッチの開閉状態及びビームシャッターの

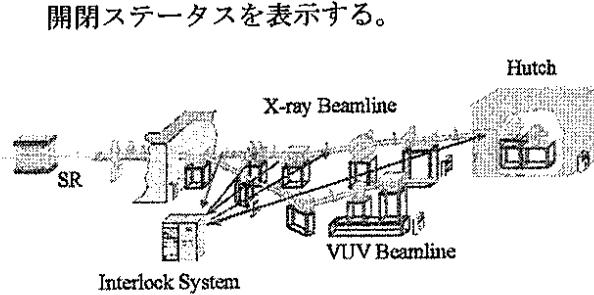


図1: ビームラインと BLIS

また、BLISにおいて接続された全てのビームラインコンポーネントの制御はメインラック内に内蔵されたOMRON製のPLCによって行われる。この事によりBLISは様々なビームライン構成に柔軟に対応する事が出来る。これまで、BLISは導入当初から定期的な動作試験及び保守作業等により、特に大きなトラブルも無く安定して動作してきた。

2.1 実験者の放射線被爆からの防護

BLISが動作する上で最も重要なロジックが放射線安全の為のロジックである。X線を利用するビームラインにおいて実験者は実験試料の交換や調整の為に実験ハッチに立ち入らなければならぬ。放射光利用実験は不特定多数の実験者により昼夜を問わず行われるため、放射線安全には細心の注意をはらう必要がある。BLISが備える放射線安全の為のロジックは次の通りである。

- ハッチ閉で初めてビームシャッターを開と出来る。
- ハッチ開となったら、ビームシャッターが閉まる。

この意味でハッチが閉まる事は大切なことである。PFでは単にハッチの扉を閉じただけでシステムがハッチの閉を認識するのでは、実験者などがハッチ内に取り残された場合などを考慮すると安全であるとしている。BLISでは以下のハッチ退出手順を設け、その手順が正しく遂行された場合にのみ、ハッチが閉であると認識する事にしている。

1. ハッチ内に誰も残されていない事を確認。
2. 退室制御盤の退室ボタンを押す。
3. 退室制御盤のブザーが鳴り、回転灯が回りだす。
4. ハッチのドアを閉める。
5. ハッチ状態表示盤の退室中ランプが点滅から常点灯に変わったら、ドアのキーを左に回しハッチを閉める。
6. ハッチが閉となる。

2.2 ビームライン真空の保持

ビームラインは真空に保たれているが、保守や実験試料の交換作業がビームラインの一部を真空リークさせた上で行われることがある。この時、ゲート

バルブ開閉等の操作手順の誤りはビームライン真空へ大きな影響を与えるだけでなく、リングの運転自体にも影響を及ぼしかねない。また、放射光利用実験中に何らかのトラブルにより発生する突発的な真空リークなどにも対応する必要がある。BLISでは真空のインターロックとして以下のようなロジックを採用している。

- 真空度が悪い場合、ゲートバルブを開しない
- 真空が悪化したらゲートバルブを閉とする

2.3 ビームラインコンポーネントの保護

放射光は非常に強力な光であり、ゲートバルブなどに直接照射されるとゲートバルブ自体が破損する可能性がある。また、ビームシャッターなどの冷却水の停止はビームラインに深刻なトラブルを引き起こす可能性がある。BLISはこれらビームラインコンポーネントを放射光ビームによる損傷から保護するためのロジックを備えている。

- ゲートバルブが開でなければビームシャッターを開しない
- ゲートバルブが開で無くなったらビームシャッターを閉とする

3. BLIS構築における低コスト化

BLISは様々なビームライン構成に対し柔軟に対応出来るが、システムのコスト削減が課題となっていた。今回、BLISの構成を根本から見直し(図2参照)タッチパネルや省配線システムを導入することでBLISの信頼性を確保したまま、約40%のコストダウンに成功した。

3.1 タッチパネルの導入

これまでBLISにおいて各ビームラインコンポーネントの状態を示す表示パネルには、LED表示及び彫刻あるいはシルク印刷によるグラフィックパネルを使用していた。しかし、この方法はビームラインの改造などの度にパネル部分の改造が必要な為、ビームライン改造時のコストに大きな影響を与えていた。

以前には高価であった液晶タッチパネルも最近になって低価格化が進み、BLISメインラック内のコントロールパネルやステーションコントローラに利用してもコストを抑える事が可能となった。新しいシステムでは、安価になった液晶タッチパネルを導入することで状態表示用LED及びゲートバルブ開閉スイッチ等への配線を減らしBLIS全体のコストを抑える事に成功した。また、新システムではビームライン改造時に発生するコストも大幅に削減されている。

3.2 省配線システム

これまで、BLISにおいて各ビームラインコンポーネントからの配線は全てBLISのメインラックに集

中していた。一般的に BLIS の制御するビームラインコンポーネントの数は 70 程度であり、BLIS のコントロールパネルからの配線も含めると BLIS メインラック内に直接接続される配線の数は膨大なものであった。省配線システムを導入することで配線に関するコストを削減することが出来る。新システムでは Device Net を採用することで BLIS 機器間の大幅な配線数削減に成功している。

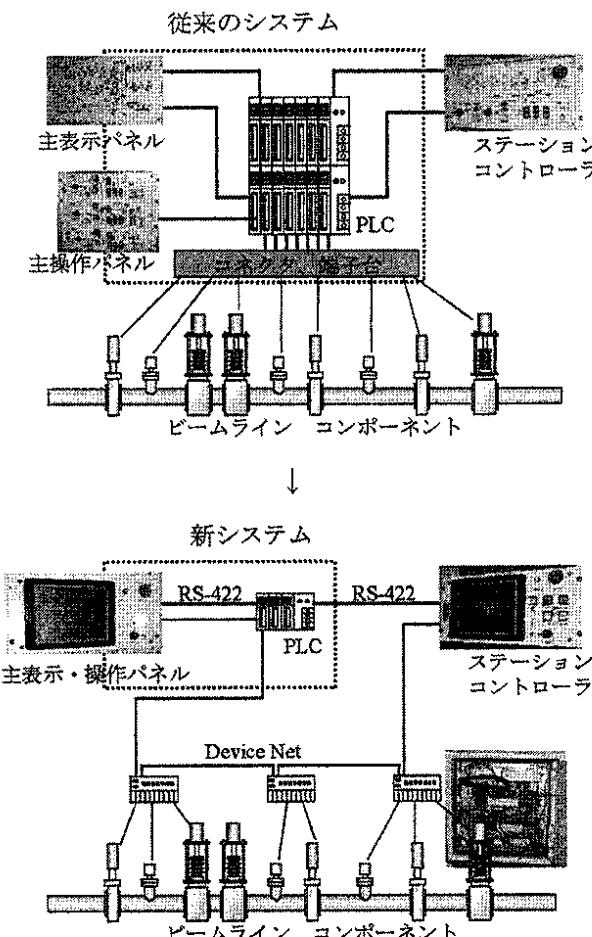


図2: 旧システムと新システム

4. BLIS プログラムの自動生成による省力化

BLIS に接続されるビームラインコンポーネントは全て PLC によって制御されるため、BLISにおいて PLC のプログラミングは非常に重要である。システムの完成に際しても、それぞれのロジックが正しく動作するかどうかの綿密なデバッグ作業が行われる。

これまで、出来る限りバグの少ないプログラムを作成する工夫として、プログラムをビームラインの構成毎に変更が必要な部分とそうでない部分に分割、ブロック化し、BLIS を新設する際にはこの変更の必要な部分をそのまま流用する方法をとっていた。また、プログラムのブロック化は開発時間においてもある程度有効であった。なお、プログラムの再利

用を可能とするために BLIS のシステム構成は統一されていた。

しかし、省配線システムの導入する上で大きな問題が発生した。省配線システムを利用した BLIS ではビームライン構成に伴い、接続されるビームラインコンポーネントの I/O アドレスが大きく変化するのである。これまでのブロック化の方法でも些細な I/O アドレスの変更ミスがバグの原因の大半を占めていた事を考慮すると、バグの発生する確率は大きくなる事が予想された。

これらの問題を解決する方法として考え出されたのが「BLIS プログラムの自動生成」である。BLIS プログラム自動生成システム（以下自動生成システム）では、取り決めて従ってビームラインの構成を入力しておく事で、BLIS のプログラムを自動的に作成する事が可能である。本システムの開発により大半を占めていた I/O アドレスの変更ミスによるバグが皆無となった。また、BLIS プログラム作成に要する時間も、ブロック化によるプログラミングが「約 4 日間」であったのに対して「約 3 時間程度」と大幅な短縮に成功している。

4.1 PLC とプログラミングの概要

PLC はマイクロコンピューターをベースとしたシステムで、一般的にリレーや電磁弁などを直接駆動可能なパラレル出力ポートやアイソレートされたパラレル入力ポートを持っている。また、小規模なものから大規模なシステム向けのものまで種類は様々で、ADC 入力、モーションコントロール機能等を付加する事が可能な機種もある。現在、BLIS ではパラレル入力及びパラレル出力のみを使用している。

これらの入出力の制御は PLC 用のプログラムを作成することによって行えるが、一般的には PC 上で動作するサポートソフト等を使用して、プログラムの作成からプログラムの転送、テストまでを行う。

4.1.1 ラダー図とニーモニック

PLC のプログラミングはラダー図を作成することから始まる。ラダー図では左右に電源の+と-をそれぞれ示す線を配し、その間に接点やリレーソレノイドを示す記号を配置していく。たとえば図3に示すリレーロジックをラダー図で表現すると図4のようになる。この例では「inputA」と名づけられたアドレス 00001 番の入力ポートと「inputB」と名づけられた 00002 番の入力ポートの両方が ON なったとき初めて「outputC」と名づけられた 00010 番の出力ポートが ON となる。また、「inputA」か「inputB」のどちらかが ON となると、「outputD」と名づけられた 00011 番の出力ポートが ON となる。このラダー図は直接サポートソフト上で入力する事が可能である。

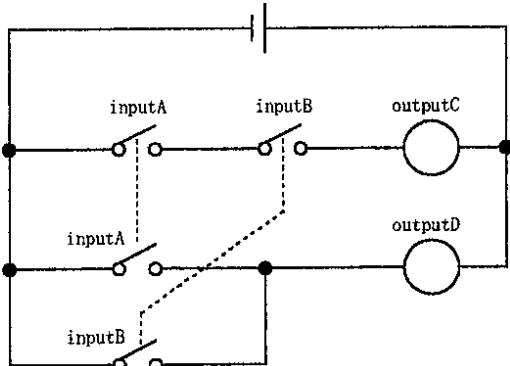


図3: リレーロジック回路例

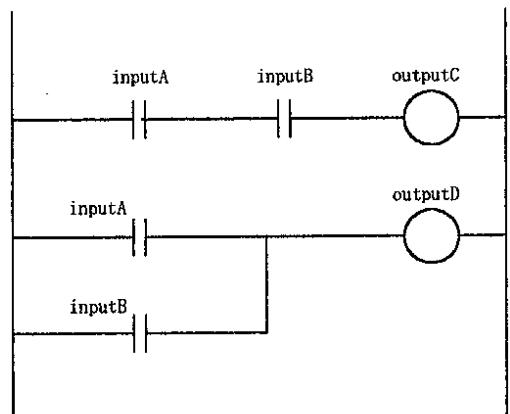


図4: ラダー図例

次に PLC のプログラムのもう一つの表現としてはニーモニックがあり、図 4 のラダー図をニーモニックに直すと以下のようになる。

```
LD 00001
AND 00002
OUT 00010
LD 00001
OR 00002
OUT 00011
```

プログラミングコンソールを使い直接 PLC にプログラムを入力する際やサポートソフトでニーモニック入力を行う際には、このようなニーモニックを直接入力することとなる。

自動生成システムではこのニーモニックを直接作成する。

4.1.2 BLIS におけるプログラム

BLIS の PLC プログラミングでは、可能な限り基本的なコマンドを使用するようにしている。この事で PLC に機種変更の必要が生じても大きな問題は発生しない。

図 5 は BLIS プログラムの抜粋でゲートバルブを制御する部分である。この部分ではゲートバルブが開いているか閉じているかの判断、開閉に時間がかかりすぎた場合等の以上の検知を行っている。

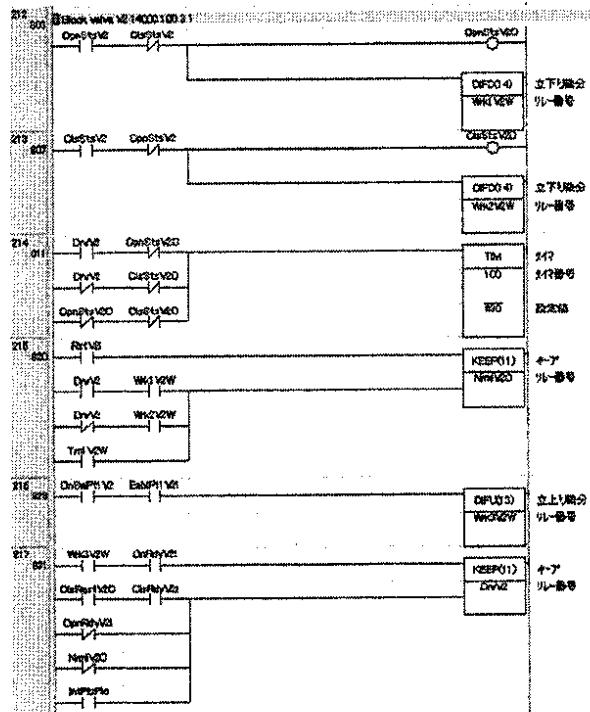


図5: BLIS プログラムの抜粋

これらのロジックは BLIS に接続されるビームラインコンポーネント毎に記述されるが、同様なビームラインコンポーネントならば、サポートソフト上でその部分をコピーし入出力ポート番号、或いは入出力名を書き換える事で毎回入力をを行う必要は無い。しかし、実際の BLIS プログラムは膨大で、ニーモニック表示した際の一つの命令を一行とすると、数千行にも及ぶ。昨今、サポートソフトの性能は向上してきたが、「入出力ポート番号、或いは入出力名を書き換える」のような手作業では当然の事ながら入力ミスが発生する。更にこの入力ミスによって発生するバグはテストの際にも発見が困難である。

発見が困難なバグの削減及び手作業に掛る労力の軽減が自動生成システム開発に関する大きな動機である。

4.2 自動生成システムの構成

自動生成システムは現在 OMRON 製の PLC のみに対応しており、次のプログラム及びデータファイルからなる。

- blisc : BLIS プログラム自動生成を行うためのメインプログラム。ビームライン構成を示すソースファイルから PLC のニーモニックを生成する。また、信号名のテーブルを生成することもできる。blislib 以下のディレクトリには本プログラムのサブルーチン群が格納される。
- blism2cx.pl : blisc により生成された PLC のニーモニックを市販の PLC サポートソフトへ転送するためのプログラム。
- blisic2cx.pl : blisc により生成された信号名のテーブルを市販の PLC サポートソフトへ転送す

るためのプログラム。

- xxx.bl (xxx は任意) : blisc を利用して BLIS プログラム自動生成を行うための blisc ソースファイル。ビームラインの構成を記述する。
- I/O アドレス外部参照ファイル: 各ビームラインコンポーネントが接続される PLC の I/O アドレステーブルは blisc ソースファイルに直接記述する事も可能であるが、外部ファイルとして別途用意することも出来る。ファイルの名前は任意である。
- xxx.nm (xxx の部分はソースファイルと同じ) : blisc の起動によって生成される PLC のニーモニック。
- xxx.tbl (xxx の部分はソースファイルと同じ) : blisio2cx.pl プログラムによって市販の PLC サポートソフトへ送られる I/O アドレスのテーブル。blisc を-t オプション指定して起動する事により出力される。

blisc 及び blisnm2cx.pl、blisio2cx.pl はそれぞれ Perl で記述されており、あらかじめ Perl5 がシステムにインストールされている必要がある。blisc は Perl の動作する様々なオペレーティングシステム（以下 OS）上で使用可能である。また、blisnm2cx.pl、blisio2cx.pl は Perl(Active Perl)のインストールされた Windows (Windows98、2000 etc.) 上で動作する。

4.3 自動生成システムの動作

自動生成システムでの最初の手順は BLIS の構成を示す blisc ソースファイルを作成する事である。また、必要に応じて I/O アドレス外部参照ファイルを作成する。次に blisc を使用してニーモニックを作成する。また、同様に blisc を使用して I/O アドレスのテーブルを出力する。

その後、サポートソフト（OMRON CXprogramer）を起動、blisio2cx.pl、blisnm2cx.pl を使用しサポートソフトに I/O アドレステーブル及びニーモニックを転送する。最後にサポートソフトでプログラムチェックを行った後、実際に PLC にプログラムを転送する。

なお、デバッグを行い手直しが必要になった場合はこの手順を繰り返す。但し、I/O アドレスに変更がなければ I/O アドレステーブルの blisc による出力及び blisio2cx.pl を使用しての転送は必要ない。

自動生成システムの使用に関する手順を図6に示す。

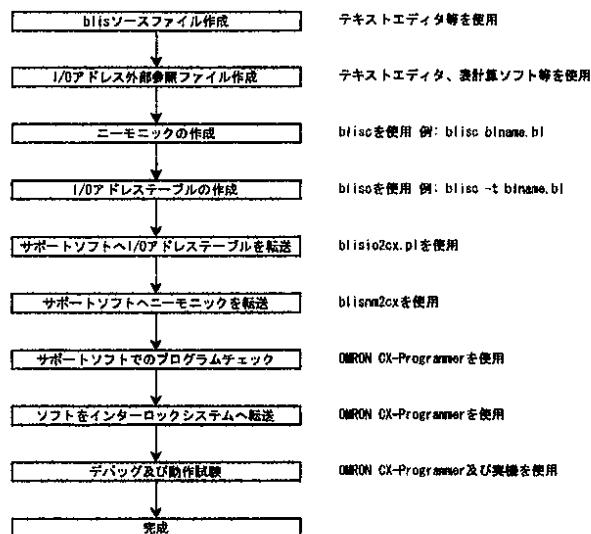


図6: BLIS プログラム自動生成の手順

4.4 ソースファイルの作成

blisc によって使用されるソースファイルはテキストファイルであり、一般的なテキストエディタを用いて作成する事が可能である。ソースファイル中に記述する項目は、宣言文やコンポーネントの作成を blisc に指示するためのコマンドであり、構成は次の通りである。

- I/O テーブルの宣言部
- 操作パネル等の設定及びロジック作成部
- ビームラインコンポーネント作成命令
- ビームライン構成の定義部
- 真空系の定義部
- 動作ロジックの作成命令

なお、ソースファイル中の "#" で始まる行及び改行だけの「空行」は blisc によって無視される。実際のソースファイルの抜粋を以下に示す。

```

# PLC に関する設定
def
  IntPlsPlc 25315
  TstDsplyPlc      10015
  Pls1sPlc 25502
  Pls02sPlc 25501
  EvtOnPlc 25313
  EvtOffPlc 25314
  DvNtErPlc      40114
enddef
:中略
# I/O アドレス外部参照ファイルの読み込み
def bl-1iolist.txt
:中略
# 操作パネル等の設定及びロジック作成
_PTMD_OPERATE = 10
make mctl 10100 10
_PTMD_OPERATE = 11
make bctl BctIA 10300 15 Valve
  
```

```

:中略
# ステーションコントローラ等の作成
_OpcAPtChannel = 32000
make opc OpcA 11500
:中略
# ビームラインコンポーネントの作成
_BbsACounter = 37
_BbsATimeUp = 1200
make shutter BbsA 12300 35 5 dual
_BbsBCounter = 44
_BbsBTimeUp = 1200
make shutter BbsB 12400 40 5 dual
:中略
# ビームライン構成の定義
def
_BlModeA 5
_BlModeB 5
_BlModeC 1
_WaterMain MskWtr_BbsA1Wtr_BbsB1Wtr
_AirMain AirMin_BbsA2Air
:中略
# 真空系の定義
vacsection Mbs_Va1_Vb1_Vc1
vacsection Va1_Ga1_Ga2_Ga3_Va2
vacsection Va2_Ga4_Va3
vacsection Va3_Ga5_Va4
vacsection Va4_Ga6
vacsection Vb1_Gb1_Gb2_Gb3_Vb2
vacsection Vb2_Gb4_Vb3
vacsection Vb3_Gb5_Vb4
vacsection Vb4_Gb6
:中略
# 動作ロジックの作成
make mlmctl
make mlbctl A
make mlbctl B
make mlbctl C
make mlabnormaldisplay MAbnrmlDspl Main
make mlabnormaldisplay AAbnrmlDspl A
make mlabnormaldisplay BAbnrmlDspl B
make mlabnormaldisplay CAbnrmlDspl C
:中略
# 終了
make end

```

4. 4. 1 I/O テーブル作成

blisc が出力するニーモニックでは直接の I/O アドレスが使用される為、初めに各ビームラインコンポーネントが接続される I/O アドレスの設定が必要となる。ソースファイル中での I/O アドレス定義は以下の通りである。

```

#書式 1
Name = Address

#書式 2
def
Name Address
Name Address
enddef

(Name:I/O 名、Address:I/O ポートアドレス)

```

また、I/O アドレスの定義に関しては外部ファイルを利用することも出来る。外部ファイルの参照を行う際は以下のようなコマンドを記述する。

`include filename`

(*filename* は任意のテキストファイル名)

このとき参照される外部ファイルは

I/O 名[TAB]I/O アドレス[改行]

のような形式であり、Excel などの表計算ソフトで作成したタブ区切りのテキストファイルがそのまま利用可能である。

4. 4. 2 操作パネル等の設定及びロジック作成

BLIS にはメインコントローラ、ステーションコントローラなど、ビームラインコンポーネントの状態表示及び開閉を行うための操作盤が存在する。これらのロジックの生成を行うための定義及びコマンドは以下の通りである。

#Operate Key 操作時に使用する定数の設定

_PTM_OPERATE = *Number*

(*Number* は設定値)

#メインコントローラロジックの作成

make mctl *Name* *Timer*

(*Address*: 使用する内部補助リレーのアドレス、*Timer*: 使用するタイマーカウンター番号)

#プランチコントローラロジックの作成

make bctl *Name* *Address* *Timer* *Option*

(*Name*: コントローラ名、*Address*: 使用する内部補助リレーのアドレス、*Timer*: 使用するタイマーカウンター番号、*Option*: パルプ操作スイッチを幾つ付けるか等のオプション)

#ステーションコントローラのタッチパネル設定

_OpcAPtChannel = *Address*

(*Address*: 使用する内部補助リレーの先頭アドレス)

#プランチコントローラロジックの作成

make opc *Name* *Address*

(*Name*: コントローラ名、*Address*: 使用する内部補助リレーの先頭アドレス)

4. 4. 3 ビームラインコンポーネントのロジック作成

ビームラインコンポーネント作成命令を以下の様に記述する事でビームラインコンポーネントに関するロジックを作成する事が出来る。

make Component *Name* *Address* *Option*

(*Component*: コンポーネント種別、*Name*: コンポーネント名、*Address*: 使用する内部補助リレーのアドレス、*Option*: コンポーネントに応じて指定するオプション)

4. 4. 4 ビームライン構成の分類

PF のビームラインの構成は多種多様であるが、ビームシャッター、ビームストッパー、実験ハッチ等の構成にのみ着目すると 40 種類の組み合わせが存在

する。自動生成システムではこれらの構成に応じたサブルーチンを Call する事で生成されるロジックを切り替えている。なお、各組み合わせについてはそれぞれ番号が割り振られており、以下の宣言文を記述する事でロジックの切り替えが行える。

```
_BlModeA Number
_BlModeB Number
_BlModeC Number
_BlModeD Number
(_ BlModeA～D:分岐ビームライン、Number:ビームライン構成に対する番号)
```

たとえば、分岐ライン B の実験ハッチが 1 つで、ダウンストリームシャッターがホワイト仕様になっている場合、構成選択宣言文は以下の通りとなる。

```
_BlModeB 5
```

4.4.5 真空系の定義

ビームライン真空に関するロジックを作成する前には、あらかじめビームライン真空に関するコンポーネントの構成を定義しておく必要がある。自動生成システムにおいて真空関連コンポーネント構成の記述は、手動バルブを除く全てのゲートバルブを閉じた時に出来るそれぞれの区画内に存在する真空関連機器名を列挙することにより行う。たとえば図 7 のような構成の場合の記述は以下のようになる。

```
#Section 1
vacsection Valve1_Gauge1_Valve2_Valve4
```

```
#Section 2
vacsection Valve2_Gauge2_Valve3
```

```
#Section 3
vacsection Valve3_Gauge3
```

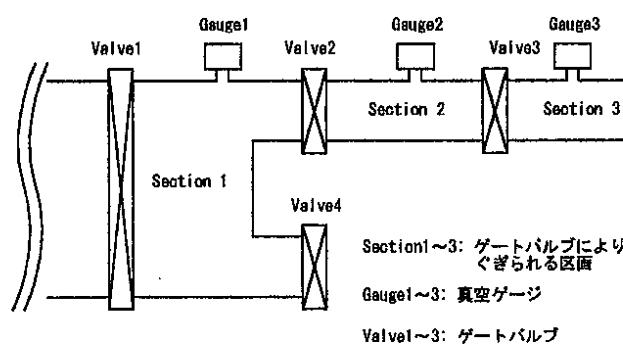


図7：真空環境の構成例

4.4.6 各種設定の定義

自動生成システムではビームライン構成や真空系定義の他にも各コンポーネントがどの分岐ラインに所属するかなどの定義を行う。

4.4.7 動作ロジックの作成

ビームライン構成の定義や真空計の定義を全て行った後はビームシャッターを開閉するための条件などの各コンポーネントに対するロジック作成を行う。以下にその例を示す。

```
#シャッターA ロジックの作成
make mshutter A
```

```
#ハッチ A ロジックの作成
make mlhutch A
```

4.5 自動生成

ソースファイルの記述が終了後、blisc によってニーモニック及び I/O テーブルの作成を行う。blisc の実行はコマンドラインから「blisc ソースファイル名」、あるいは「perl blisc ソースファイル名」（動作環境によって blisc が直接実行できない場合、以下例題には blisc を直接実行できる場合を使う）と入力することにより行う。

4.5.1 ニーモニックの出力

ニーモニックの作成は以下の様に blisc をオプション無しで起動することにより行う。

blisc filename

(filename.bl の拡張子を持ったソースファイル名)

なお、ソースファイルの記述にエラーがある場合、blisc はエラー部分を CRT 上に出力し途中で停止する。エラーなく自動生成が完了した場合、".nm" の拡張子が付いたニーモニックファイルが作成される。

4.5.2 I/O テーブルの出力

以下のように"-t"オプションを指定して blisc を実行すると、I/O アドレスに対する信号名の情報を持つ I/O テーブルが出力される。

blisc -t filename

(filename.bl の拡張子を持ったソースファイル名)

作成される I/O テーブルには".tbl" の拡張子が自動的に付加される。

4.6 サポートソフトへのプログラム転送

PLC へのプログラム転送及び実際のデバッグ作業はサポートソフトを使用して行う為、blisc によって作成されたニーモニック及び I/O テーブルをサポートソフトに転送する必要がある。しかし、現行のサポートソフトにはこれらのようなテキストファイルを直接読み込む機能は残念ながら用意されていない。自動生成システムでは Windows のクリップボードを使用し、ニーモニック及び I/O テーブルのデータを直接貼り付ける方法を使用する事でサポートソフトへのデータ転送を行う。

4.6.1 I/O テーブルの転送

サポートソフトに I/O テーブルを転送しておくとプログラムのラダー表示の際などに、各種 I/O 名が表示されるようになる。これら I/O 名の表示は実際のデバッグ作業を効率化するために不可欠な情報である。

I/O テーブルの転送には `blisio2cx.pl` を使用する。Windows 上に Perl が正しくインストールされていれば `blisio2cx.pl` をダブルクリックすることにより、コンソール画面が現れ以下の様にファイル名の入力が求められる。

Please input filename >

ここでファイル名を入力すると I/O テーブルがクリップボードにコピーされるので、その後、サポートソフトの変数テーブル表示画面上で貼り付けを行う。

4.6.2 ニーモニックの転送

サポートソフトにニーモニックを転送するためには `blisnm2cx.pl` を使用する。手順は I/O テーブルの転送と同様、`blisnm2cx.pl` を起動するとファイル名の入力が求められるので適切なニーモニックファイルの名前を入力する。その後、ニーモニックはクリップボード上にコピーされる。最後にサポートソフトのプログラム表示モードをニーモニックにし貼り付けを行うと全てのニーモニックがサポートソフト上に転送される。

5. 集中管理システム

全ての BLIS は光ファイバーにより集中管理システムに接続されている（図 8 参照）。集中管理システムはこれら BLIS から送られてくるシステムを監視すると共に、各 BLIS に対してビームライン使用の許可などの制御信号を送っている。これまでの集中管理システムの構成は図 9 に示す通り、DOS を使用したパーソナルコンピュータ（以下 PC）・CAMAC 及び自作のコントロールパネルより構成されていた。

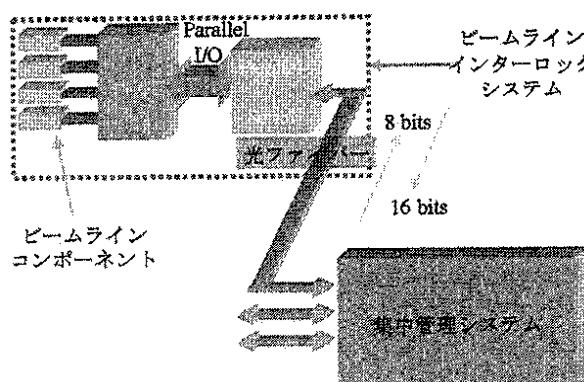


図8: BLIS と集中管理システム

集中管理システムはこれまで特に大きなトラブルも無く安定に動作してきたが、システムのプログラムは単一のシングルタスクのプログラムであった。このため、データベース更新などの些細な作業の為にもシステム全体を停止する必要がある等、保守作業上問題が指摘されていた。今回これらの問題を含め集中管理システムで使用している PC の老朽化及びハードウェアの同等品が入手困難になった等の理由から、COACK を利用した新しい集中管理システムを開発する事となった。

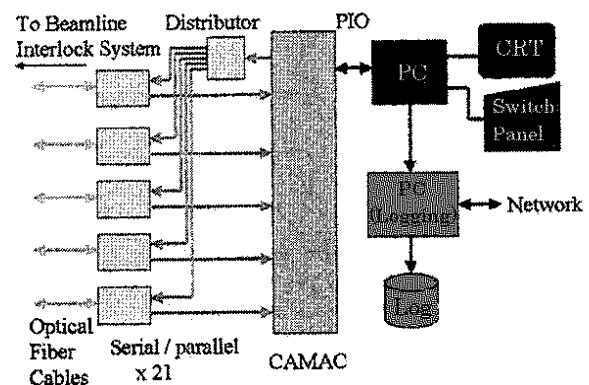


図9: 旧集中管理システムの構成

COACK はもともと加速器の制御用のシステムとして開発が行われてきたが、低価格な PC の利用が可能であること、ネットワークによるシステムの分散化が可能であること、また非常に高い柔軟性を持っている等の理由から、集中管理システムにも応用可能であり、集中管理システム自体の性能も格段に向かう事が可能である。今回開発した新集中管理システムでは COACK を使用する事で、今までの問題点を全て克服しようとしている。

6. COACK を導入した新集中管理システム

COACK を利用した新集中管理システムの構成を図 10 に示す。システムはネットワーク及び複数の PC から構成されている。ここで最も重要な PC は COACK サーバであり仮想的なビームラインのイメージをサーバ内に持っている。またこの他に、システム内には実際に各 BLIS と信号を送受するためのインターフェース用 PC (PLC Interface)、集中管理システムの実際の操作を行うためのオペレータ用 PC (Operators' PC)、集中管理システム用のプログラムを開発するための開発用 PC (Developers' PC) などの PC が接続されている。

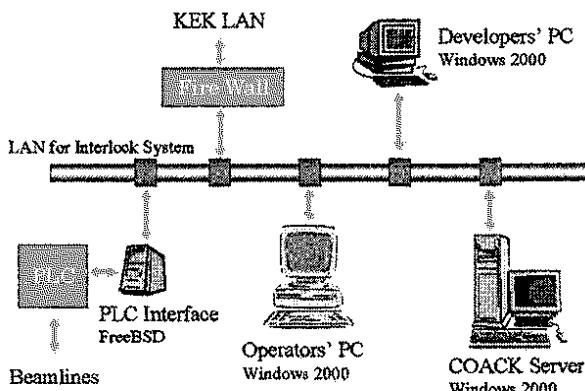


図10: COACK を利用した集中管理システムの構成

6.1 PLC への置き換え

既に述べた通り、旧集中管理システムはビームライン毎に異なった16のステータス信号をCAMACのインプットレジスターを通して監視していた。今回新システムの導入によりこの部分は2台のPLCに置き換えられている。

各PLCからの信号はRS-232Cを利用してインターフェース用PCに送られる。ここで、RS-232Cを採用した理由は、一般的なPCは基本的にシリアルポートを有しているのと共にPC上で動作する殆どのOSがこのシリアルポートをサポートしているからである。

各ビームラインの状況を監視する上で各BLISから送られてくる信号の変化はそれほど頻繁には起こらずRS-232Cを利用しても十分な転送結果を得ることが出来る。しかし、ビームライントラブルなどの際にはこれらの信号が数ミリ秒程度で変化するが、これらのステータス信号がどの順番で変化したかを知る必要がある。ここではPLC内にステータス信号の変化をバッファリングする仕組みを開発した。

ステータスバッファリングのシステムにおいて、各ビームラインから送られてくる16ビットの情報が変化したかどうかはPLCの持つXOR命令によりチェックされる。もし、ステータスが変わったことが分かると、変化情報はPLCのデータメモリーエリアにスタックされていく。その後、スタックされたデータは非同期にPCにより読み込まれる。

6.2 ハードウェア及びOS

新集中管理システムでは複数のPCが利用されている。OSとしてはインターフェース用PCにはFreeBSD 4.0 Releaseを、他のPCにはWindows 2000 Professionalを使用している。この様にシステムを分散化することで、各部分の開発や保守の際にシステム全体を停止する必要が無くなった。

6.3 ソフトウェア

旧システムでは以下に示す機能を持つ一つの大規模なプログラムが動作していた。

1. 各BLISからの入力をチェック（入力チェック）
2. ログデータの保存（ロギング）
3. ビームライン運転状況をモニター画面に表示（ステータス表示）
4. BLISに使用許可信号を送る（オペレート）

新システムにおいてこれらの機能は3台のPCに分散されている。始めに1及び2に関する機能はインターフェース用PCに、また、3及び4に関する機能はオペレータ用PCに移行された。COACKサーバはこれらの機能の中心的なロジック部分を担当している。

なお、オペレータ用PCで動作するプログラムはVisual Basicを利用してすることで高機能なグラフィカルユーザインターフェースを備えたものを作成する事が可能であった。実際のオペレータ用PC上で動作する集中管理システムアプリケーションプログラムの例を図11に示す。

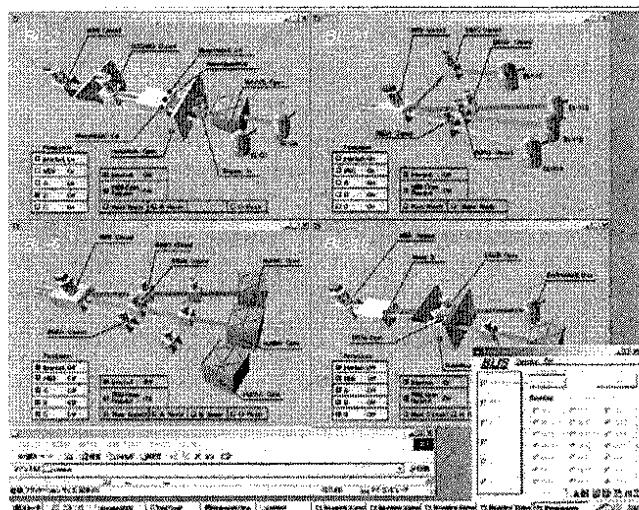


図11: 集中管理システム画面

6.4 non-Windows システム用 COACK インターフェース

COACKはWindows 2000上で動作するシステムであり、COACKサーバを含めオペレータ用PCなどではWindows 2000が使用されている。しかし、集中管理システムの構成上、インターフェース用PCにはFreeBSDが使用されており、COACKに対しnon-Windowsシステム用の何らかのインターフェースを開発する必要があった。ここではCOACKの持つTCP/IP Socket通信の機能を利用してインターフェースプログラムの開発を行った。このインターフェースプログラムからCOACKに対するメッセージの授受はXML(Extensible Markup Language)によって行われる。また、インターフェースプログラムの核

の部分は Perl を用いて記述されており、様々な OS 上で動作する事が可能である。

なお、今回開発したインターフェースプログラムの核の部分については COACK 以外のシステムにも応用可能であり STARS (Simple Transmission and Retrieval System)^[11]として別途開発を進めた。現在、STARS は PF におけるビームラインの一部の計測システムやカードリーダを利用した入退室システムに導入されている。

7. 集中管理システムにおける COACK の有用性

今回、実際に COACK を集中管理システムに導入することで以下のようない有用性が確認された。

初めに挙げられる有用性としては、COACK の導入によりシステムの核となる部分についての開発は一切行う必要がないと言うことである。既にシステムの中心的部分は COACK に含まれており、実際に開発する部分は末端の GUI (Graphical User Interface) アプリケーションや装置のドライバー等だけで良いのである。実際にシステムの開発時間は短縮され、旧システムを開発したときに要した開発期間は約 6 ヶ月であったのに対し、新システムにおいては僅か 2 ヶ月で開発作業を終了してしまった。

次に挙げられる有用性は、GUI アプリケーションプログラムの開発や保守に際してシステム全体を停止させる必要が無いということである。実際に今回システムの運転を開始した後に GUI アプリケーションのバグフィックスの必要が発生したが、システム全体を停止させる事無く集中管理システムの運転自体に影響を与える事は無かった。

まとめ

BLIS についてはタッチパネルや省配線システムの導入により、高い信頼性を保持したまでの大幅なコストダウンに成功した。また、BLIS プログラム自動生成システムの開発により、これまでと比較にならない程 BLIS プログラム作成に要する時間が短縮されたと共にバグの発生も大幅に減少した。

そして、集中管理システムにおいては新しく開発された COACK の導入により、非常に保守性の高い、安定したシステムを構築することが出来た。

ここで述べた BLIS と集中管理システムに関する技術開発は、齊藤裕樹氏及び伊藤健二氏と、COACK 開発とシステムの応用については濁川和幸氏、片桐広明氏、白川明広氏、木代純逸氏、阿部勇氏、黒川眞一氏、武藤正勝氏（東北大）、柴崎義信氏（東北大）、小平純一氏（核融合研）、小川英樹氏（核融合研）、小嶋護氏（核融合研）、井上知幸氏（核融合研）、横田光弘氏（核融合研）、塚田究氏（核融合研）らと共同で行ったことを付記しておく。

参考文献

- [1] T.Kosuge, Y.Saito and K.Ito Beam Line Interlock System in the Experimental Hall (BLIS) KEK Internal, 90-20 (1990)
- [2] 小菅隆、佐藤能雅、伊藤健二 放射光実験施設におけるビームライン・インターロックシステムとその集中管理 プラズマ核融合技術研究会報告 (1984) 242
- [3] 小菅隆、佐藤能雅 放射光ビームラインの真空保持及び放射線安全用インターロック系 名古屋大学プラズマ研究所 技術研究会報告 (1988) 206
- [4] 小菅隆、齊藤裕樹、伊藤健二 放射光ビームライン・インターロック集中管理システム 核融合科学研究所技術研究会報告 (1991) 172
- [5] 齊藤裕樹、小菅隆、伊藤健二 LAN を用いたインターロックシステムの監視 核融合科学研究所技術研究会報告 (1994) 228
- [6] 小菅隆、齊藤裕樹、伊藤健二 放射光ビームライン・インターロックシステムとネットワーク KEK Proceedings 95-14 (1996) 23
- [7] 小菅隆、齊藤裕樹、伊藤健二 ビームライン・インターロックシステムにおけるシーケンサープログラム自動生成の試み 技術研究会報告 1996・東京分科会 (1997) 59
- [8] I. Abe, et al., "COACK-II PROJECT ON ACCELERATOR CONTROL KERNEL DEVELOPMENT", ICAL-EPCS'99, Trieste, 1999
- [9] T. Kosuge, et al., "COACK APPLICATION FOR THE BEAMLINE INTERLOCK SYSTEM AT THE PHOTON FACTORY", PCaPAC2000, Hamburg, 2000
- [10] I. Abe, et al., "Recent status on COACK project", PCaPAC2000, Hamburg, 2000
- [11] 小菅 隆、齊藤裕樹、伊藤健二 計測・制御用簡易メッセージ配信システムの開発 東北大学技術研究会報告 (2001) 220

ヘリウム液化冷凍機の連繋運転と制御システムの自動化

大島洋克、飯田真久

高エネルギー加速器研究機構

低温工学センター

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

低温工学センターではセルンとの LHC 加速器建設協力の一環として、工作センター、加速器研究施設、素粒子原子核研究所の協力の下に、LHC に設置する強収束超伝導マグネットの開発を行っている。

今回、このマグネットの低温試験を行う上で必要な液化冷凍システムを構築した。これは予算及び建設期間が限られた条件の下で、既存の 2 基の液化冷凍機を連繋運転することで液化能力を改善したものである。この報告書では、連繋システムの構成、改造、性能試験について述べる。

尚、このシステム構築は技術系職員を中心になって行ったものである。

1. はじめに

低温工学センターでは、加速器科学・物理科学研究における、低温・超伝導機器開発研究などに液化ヘリウムを供給する業務を行う一方で、CERN で建設中の LHC に設置する強収束超伝導四極電磁石の開発を行っている。この超伝導電磁石の開発は、工作センター、加速器研究施設、素粒子原子核研究所の協力のもとに、当センターで行われているものである。

センターには、液化能力 300 リットル／時の液化能力を持つ液化機(TCF200)と 150 リットル／時または 300W の能力を持つ液化冷凍機(CB20)が各々 1 基づつ設置されている。これまでセンターハの業務としては液化ヘリウムの供給が主であったため、前者の液化機を液供給専用として稼働させてきた。1996 年度から LHC 加速器建設協力に対する覚書が両研究所間で取り交わされ、1m モデルによる開発研究が開始され、そのための専用機として旧 AMY 検出器用の液化冷凍機をセンターに移設して使用することとなった。又、これは TCF200 が故障した場合の液供給用のバックアップ機としても使用できる。

モデルによる開発が順調に進み、1999 年度からプロトタイプ(実機と同寸法)による開発研究に移行するにしたがって、現状の設備を従前のまま使用していくことに限界があることが分かった。すなわち、1m モデルマグネットを冷却、試験をするだけであるならば、移設した液化冷凍機が持つ能力で十分対応できる。しかし、7m のプロトタイプと実機を試験(クエンチ試験)するためには液化能力が十分でない。新規に 300 リットル／時程度の能力を持つ液化冷凍機を

新設するか、現有設備を有効活用して要求に対応するか二者択一である。

前者の方法を取れば能力は十分であるし、試験項目に添って最適のシステムを構築することが可能であり、理想的かつ魅力的である。しかし、新たに数億円の経費と新設のための時間(最低 2 年間)及び運用させるための高圧ガス保安法による手続き(新規書類作成)を必要とする。そこで、我々が選択した方法は、現有の 2 基の設備を有効活用し、連繋運転をすることによって、液供給業務と LHC マグネットの開発研究を両立させることであった。これによって、大幅な経費の節減と時間を短縮することができた。

この報告書では、今回開発した連繋システムの構成、同システムの改造ならびに性能試験の結果について報告する。

2. センターの低温機器システム

低温工学センターの高圧ガス設備の概略機器フロー図及び機器配置を図 1 及び図 2 に示す。

LHC マグネット冷却用に設置されている高圧ガス機器は次のとおりである。

- ・第四低温棟液化冷凍機(液化能力 150L/時、又は 300W)
 - ・LHC マグネット試験用 1.8K クライオスタット
 - ・2400L 液化ヘリウムデュワー
 - ・循環圧縮機(風量 2253Nm³/時)
 - ・中圧精製器(処理能力 100Nm³/時)
 - ・中圧タンク(貯蔵能力 570Nm³)
 - ・精製器用液化窒素貯槽(7069L)
 - ・回収圧縮機(回収能力 100Nm³/時)
 - ・回収ヘリウムガスカーボル(貯蔵能力 1086Nm³)
 - ・高純ヘリウムガスカーボル(貯蔵能力 965Nm³)
 - ・クライオスタット 1.8 K 冷却用減圧ポンプ
- 連繋運転の為の 2400L デュワー送液用及びユーザー供給用の高圧ガス機器は次のとおりである。
- ・第二低温棟液化機(液化能力 300L/時)
 - ・3000L 液化ヘリウムデュワー
 - ・循環圧縮機(風量 2900Nm³/時)
 - ・高圧精製器(処理能力 180Nm³/時)
 - ・両液化機、精製器用液化窒素貯槽(12270L)
 - ・回収圧縮機 2 台(回収能力 180Nm³/時、

- 210Nm³/時)
- ・回収ヘリウムガスカーボル (貯蔵能力 1440Nm³ × 2, 1800Nm³)
 - ・高純ヘリウムガスカーボル (貯蔵能力 1440Nm³)
可搬式ヘリウムガスボンベ (貯蔵能力 1070Nm³ × 2, 1080Nm³)

又、第二及び第四低温棟に設置してあるヘリウムデュワー間は、連繋運転の為に新たに製作したトランスマーラインによって接続されている。TCF200で液化されたヘリウムは、いったんデュワーに貯液された後、第四低温棟にあるデュワーに液送される。これは、連繋運転によるCB20で液化したヘリウムと一緒にLHCマグネットの試験に供用される。

図には示していないが、クライオスタット、減圧ポンプ及びヘリウムデュワーは回収ガスラインに接続され、減圧及び蒸発したヘリウムガスはガスバックを通じて回収圧縮機にて回収用ヘリウムガスカーボルに充填される。回収されたヘリウムガスは、精製器を通して純度を高め、高純ヘリウムガスカーボルに充填、もしくは液化機にて再液化される。

ユーザーへの液供給用トランスファチューブは2400L及び3000Lデュワーに設置され、必要に応じてどちらからでも液供給が可能になっている。これは一方の液化機が故障等により運転が出来ない場合のバックアップとして機能している。

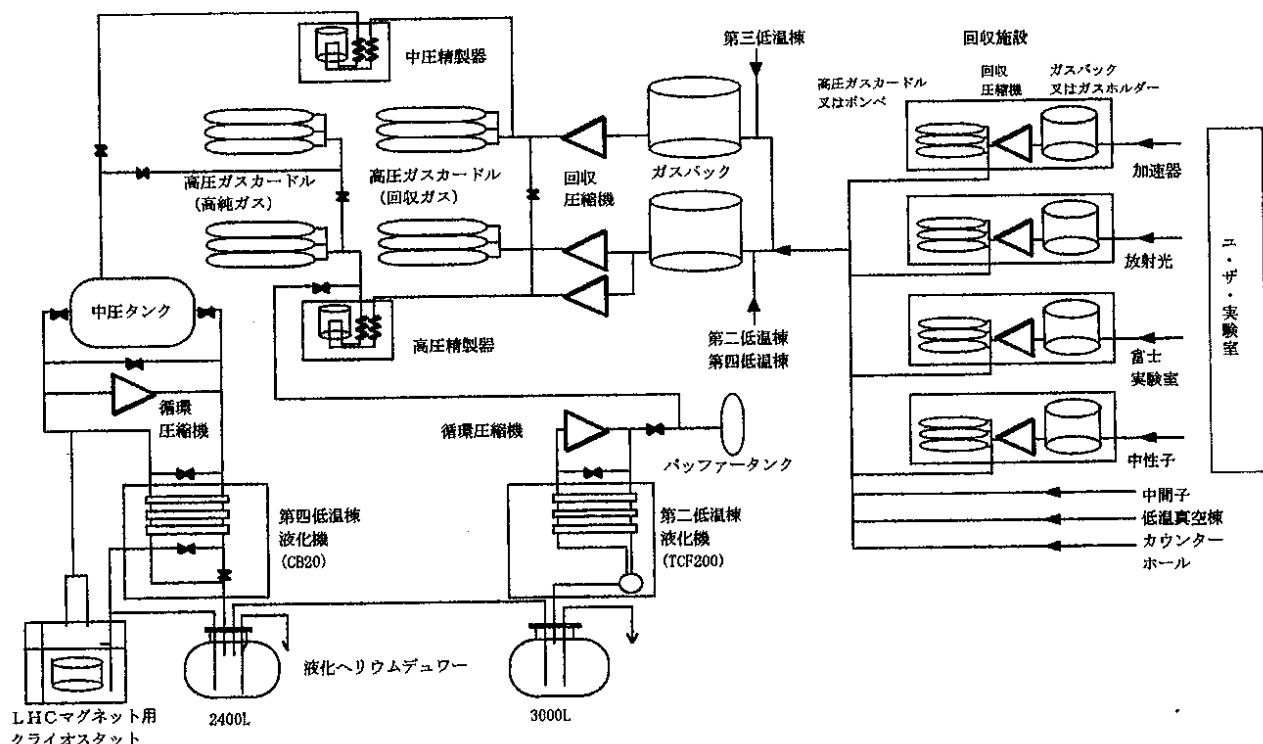


図1：低温工学センター高圧ガス機器概略フロー

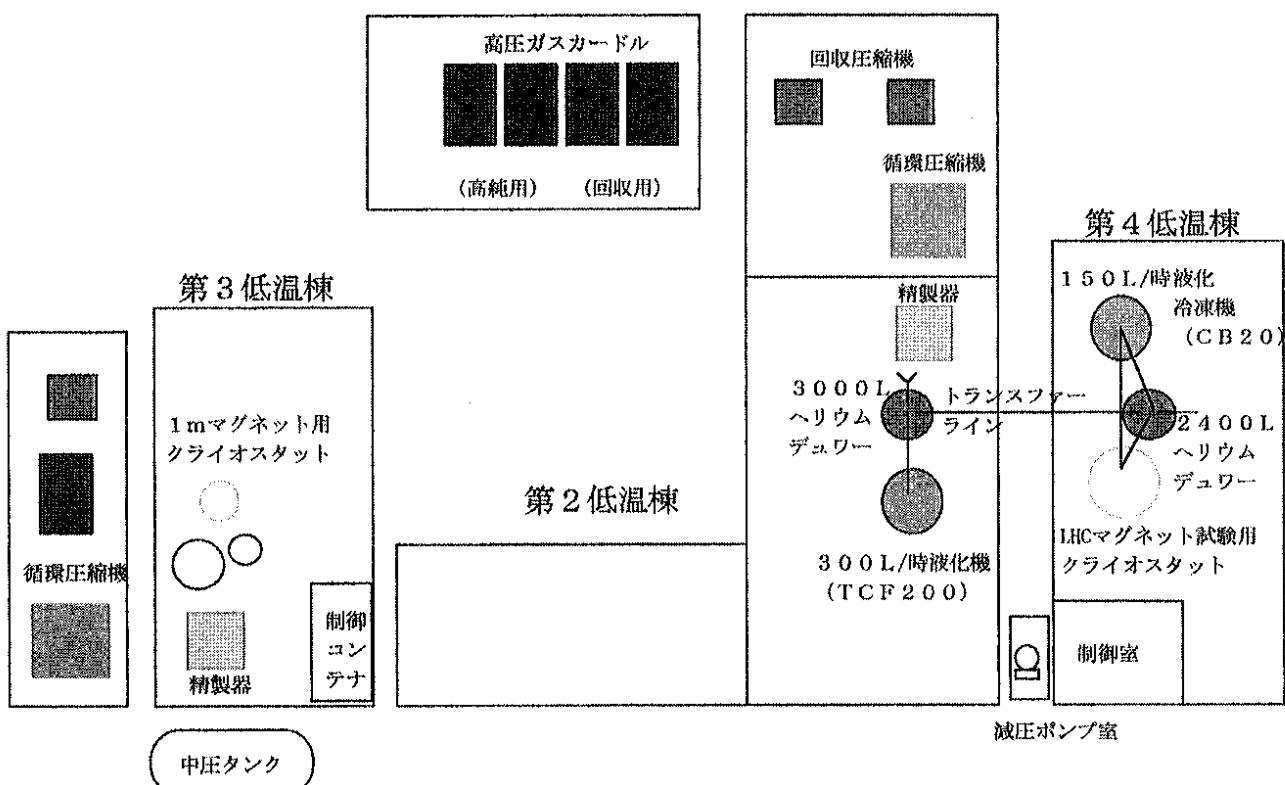


図2：低温工学センター施設配置図

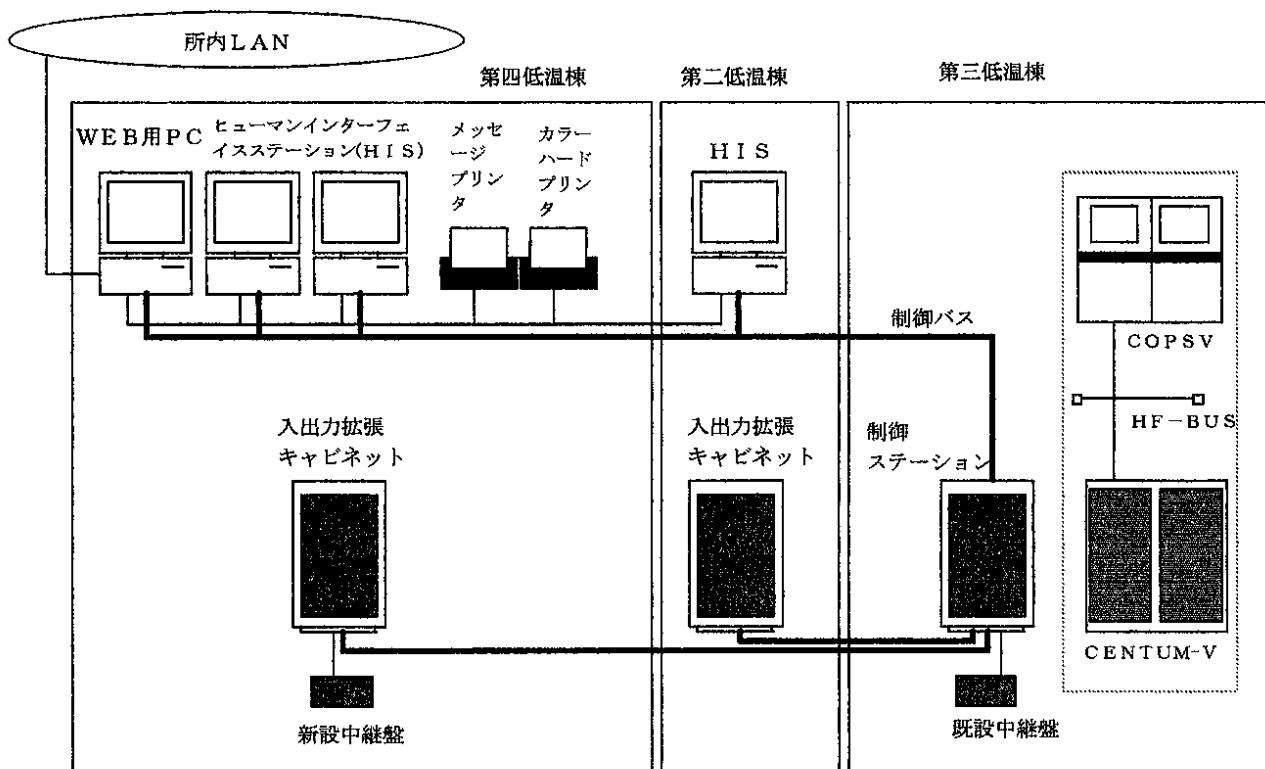


図3：新制御計算機 CENTUM CS3000 システム配置図

3. システムへの要求事項及びその検討

LHC マグネットの性能試験を行うための液化冷凍機とクライオスタッフへの要求性能は以下の通りである。

① 試験スケジュールの為の要求

- マグネット冷却から励磁試験、磁場測定、加温までの期間を4週間とする

(内訳) クライオスタッフ真空置換及び系内循環精製、マグネット冷却(常温から4.2K) : 一週間
4.2Kから1.8K冷却及び励磁(クエンチ)試験 : 一週間
磁場測定 : 一週間
加温運転 : 一週間

注) 期間内の土日は運転しない。

② 試験のために要求される冷凍機の性能とクライオスタッフへの要求

- クライオスタッフの内圧の抑制と冷却時のエンタルピー軽減の為、電磁石クエンチ後の液温上昇を4K以下にするように貯液量を最適化する。但し、高圧ガス設備として保安法に基づく最小肉厚は確保する。
- 電磁石クエンチ後の目標再冷却時間を6時間以下になるよう、再冷却に必要な冷凍能力を確保する。
- 少ない人員で24時間運転を繰り返すには無理が生じるため、マグネットを常温から4.2Kまで冷却(初期冷却)する以外は1日16時間(8時間勤務2交代制)の運転に押さえる。

③ その他

- 限られた人員で運転が可能な事。
- 限られた予算に収まるようにすること。
- マグネット試験スケジュールを考慮し、短期間にシステムを完成すること。

①及び②に対する液化機への要求

液の消費量は、励磁試験(クエンチ試験)時が最も多いためこれについて必要液化量を考える。

液化機への要求は励磁試験を1日2回として1日あたり5000L程度の液化能力が必要になった。

(内訳)

- 1.9K冷却に必要な液化ヘリウム量は1400L×2
- クエンチ後に放出された液化ヘリウム量(全貯蔵エネルギーが液化ヘリウム内に放出されると想定)300L×2
- クライオスタッフへの熱侵入による蒸発量1200L
- ユーザーへの供給に日1000L程度

結果として、現在保有する液化冷凍機(第二低温棟液化機が300L/時、第三低温棟液化冷凍機が150L/時)をトランスファーラインで接続し、連繋して運用すれば十分の能力を持ち、尚且余力があるためにユーザーへの液化ヘリウムの供給も行えることが解った。

③に対する要求

第二低温棟液化機は旧式のため手動によるバルブ操作で運転をしなければならない。2台の液化冷凍機を同時に運転、監視をすること、特に起動時から液化定常運転までは技術と注意が必要であり、低温工学センター内の人員だけでは負担が重い。そこで、負担の軽減をするためには第二低温棟の液化機の運転を自動遠隔操作出来るようにすることが必須である。そこで、手動バルブから自動バルブへ改良し、圧力等の情報を制御器へ送り、二台の液化冷凍機を集中監視化させ、尚且運転を自動化し、又、各運転条件に合わせた制御プログラムを組む。こうすることで監視業務に集中することができるため、負担の軽減が可能になる。

以上の事を考慮し、連繋運転に必要な制御システムを検討した結果、横河電機製分散処理制御システムセンタム CS3000を採用した。これは1mマグネット冷却用液化冷凍機(移設前に第三低温棟で試験を行った)で使用した制御機の後継機種であり、互換性と共に、制御器の制御点数が格段に増大している。こうすることで2台の液化機を同時に監視制御が可能になる。

又、後継機種であることで制御プログラム等の移植作業を比較的容易に行うことが出来、新規プログラム作成方法も前機種を踏襲しているため、これまでプログラム開発を行ってきた低温工学センター職員の手で作成することができる。こうすることでプログラム設計、作成等にかかる経費を大幅に削減することが出来た。

4. システムへの要求事項及びその検討

4.1 ハードウェア

連繋運転システムのハードウェアの設計と構築に際して、以下の事項に留意し、作業を行った。

○機器の配置

- 第三低温棟から第四低温棟に機器を移設する際、設置後の配管工事のコストを抑えるため現有配管ができるだけ利用した。さらに、新規の配管は高さ方向のスペースを有効に利用し、後日点検並びに作業に支障がないように機器の配置を設計した。

- 第四低温棟内に設置する制御室を中二階にして、一階部と天井部を実験準備用のフリースペースとして確保した。

- 両液化機の連繋運転とマグネット試験用クライオスタッフとの整合性

(1) 運転圧力からの各機器の検討

第二低温棟液化機用コールドボックス(TCF200)は、気液分離槽を持ち液化ヘリウムを単相流で第二低温棟ヘリウムデュワー(HD900)に液送している。第二低温棟液化機用圧縮機の吸入運転圧力は0.06MPaGなので、コールドボックス(TCF200)内のバルブのC V値の関係から第二低温棟ヘリウムデュワー(HD900)の内圧は0.04MPaGまでしか上げることができない。そ

こで、第四低温棟ヘリウムデュワー(R95)は0.03MPaG、クライオスタット(CS800)は0.02MPaG、第四低温棟コールドボックス(CB20)出口圧力は0.01MPaGの圧力で運転を行えるように、新規バルブのCV値を設計した。

(2) 圧縮機の吸入圧力による吸入配管の口径の検討

今回、第四低温棟液化冷凍機用圧縮機(C10)からコールドボックス(CB20)間の距離が移設に従い10mから300mに延長されたため、配管の圧力損失(0.005MPa以下)を抑えるため、延長部の吸入配管の口径を125Aから150Aに変更した。

(3) 第二-第四低温棟ヘリウムデュワー間を繋ぐトランスマルチラインの検討

- バイオネットの数を出来るだけ少なくし、立ち上がり及び立ち下がりを最小限に抑え長さを30m以内にし、熱侵入量を出来るだけ少なくするようにトランスマルチラインの設計を行った。
- 現有設備の機器構造(プラットホーム等)を有効利用した配管配置及び既存のトップフランジ接続ポートを利用した合理的な配置になるように設計した。

○第二低温棟液化機(TCF200)の自動化

(1) 調整弁の検討

- コールドボックスの入出口弁を手動弁から自動調整弁に変更した。
- ポジショナーを空空変換器から電空変換器へ変更した。

(2) 自動化に必要な入出力信号の割付けおよび結線

これまで使用されていたタグ名と入出力結線番号を統一させ、混乱を起こさない様にした。

○新制御計算機(CENTUM CS3000)における入出力点数検討

自動化における入出力点数をリストアップし、将来の点数増加を考慮し、下記の様に割付を行った。

第二低温棟 AI=32(0)、AO=16(2)、DI=64(25)、DO=64(34)

第三低温棟 AI=32(9)、AO=16(7)、DI=64(10)、DO=64(53)

第四低温棟 AI=106(7)、AO=32(2)、DI=64(14)、DO=64(6)

○未使用

新制御計算機の現状の割付点数=旧制御計算機3台

現状の割付点数は新制御計算機の最大割付点数の約半分(リモートI/O等の追加により新たに現設備相当の遠隔監視、遠隔操作並びに自動制御が可能)

○高圧ガス申請に対して以下の書類を作成した。

- 機器一覧表
- 高圧ガスフローシート
- 機器配置図
- 配管図

○ユーザーへの液供給用トランスマルチチューブの設計

第四低温棟へ送るトランスマルチラインの増設に因って第二低温棟ヘリウムデュワー(HD900)のユーザーへの液供給用トランスマルチポートが二口から一口になった為、一つのポートから二つのデュワーにトランスマルチ出来るようにユーザー液供給用トランスマルチチューブの設計を行った。また、バックアップとして第四低温棟ヘリウムデュワー(R95)からもユーザーへの液供給が出来るようトランスマルチチューブの設置を行った。

○制御機-機器間の信号確認

制御機-機器間の誤配線等を確認するため、機器側から模擬信号を入れ信号確認を行った。

4.2 ソフトウェア

連繋運転システムのハードウェアの構築と並行して、ソフトウェアの設計と構築を以下の手順で行った。

- 必要入出力点数のリスト作成
- 既存プログラムの整理を行い、新制御計算機(CENTUM CS3000)への移植
- エンジニアリングループ図の設計と作成
- 第二低温棟液化機の自動制御プログラムの設計と作成
- 連繋運転制御プログラムの設計と作成
- 制御およびモニターのグラフィック画面作成
- 励磁試験時の電磁石電源と高圧ガス機器のインターロックの作成
- 自動運転パラメータのチェックおよび制御システムのチューニング
- 自動制御プログラムのバグ出し

以上の作業スケジュールは以下の通りであった。

- 1999年9月～1999年12月 連繋運転システムの設計、高圧ガス申請書類の作成
- 2000年1月～2000年3月 移設、配管工事、高圧ガス完成前事前検査、完成検査書類作成
- 2000年6月～2000年8月 第二低温棟液化機(TCF200)の自動化(ハードウェア)
- 1999年9月～2000年9月 ソフトウェアの設計と構築

5. 連繋運転システムおよび自動運転システムの性能確認試験

連繋運転システムおよび自動制御システムの性能を確認するために以下の試験を行った。

5.1 運転モードの説明 (図4、5参照)

以下の自動運転モード (1) 単独運転モード、(2) 連繋運転モード、(3) マグネット冷却運転モード (4) マグネット加温モードについて説明する。

(1) 単独運転モード

第四低温棟液化冷凍機単独で運転を行い、マグネットが5K以下に冷却されていて液の消費の少ない磁場測定試験時に用いられる運転モード

(2) 連繋運転モード

第二低温棟液化機と第四低温棟液化冷凍機の連繋で運転を行い、マグネットが50K以下に冷却されていて液の消費の多いトレーニング試験時に用いられる運転モード

(3) マグネット冷却運転モード

マグネットを300Kから4.5Kまで冷却する運転モードで、マグネットの温度が50K以上は第四低温棟液化冷凍機単独で寒冷ガスにより冷却を行い、50K以下からは連繋運転で液化されたヘリウムにより冷却を行い、クライオスタット(CS800)に貯液するモード

(4) マグネット加温モード

マグネットに内蔵されたヒーターを用いて1.9Kから300Kまでヒーター加温する運転モード

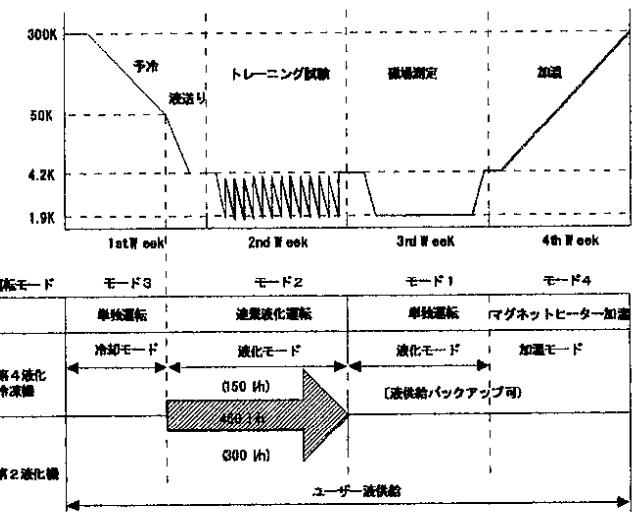


図4(b)：試験スケジュールと運転モードの関係図

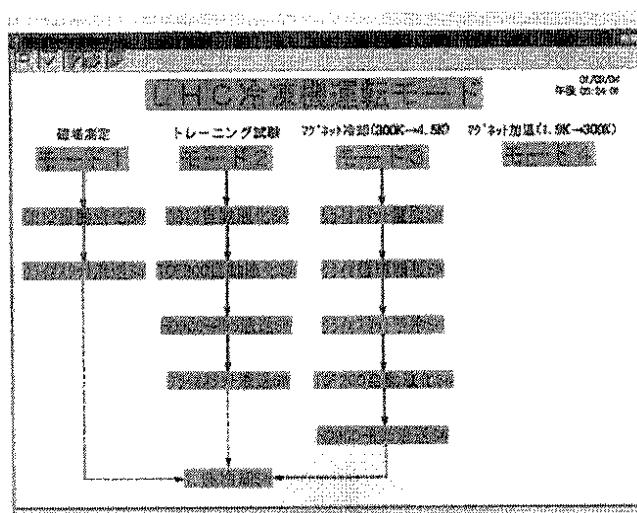
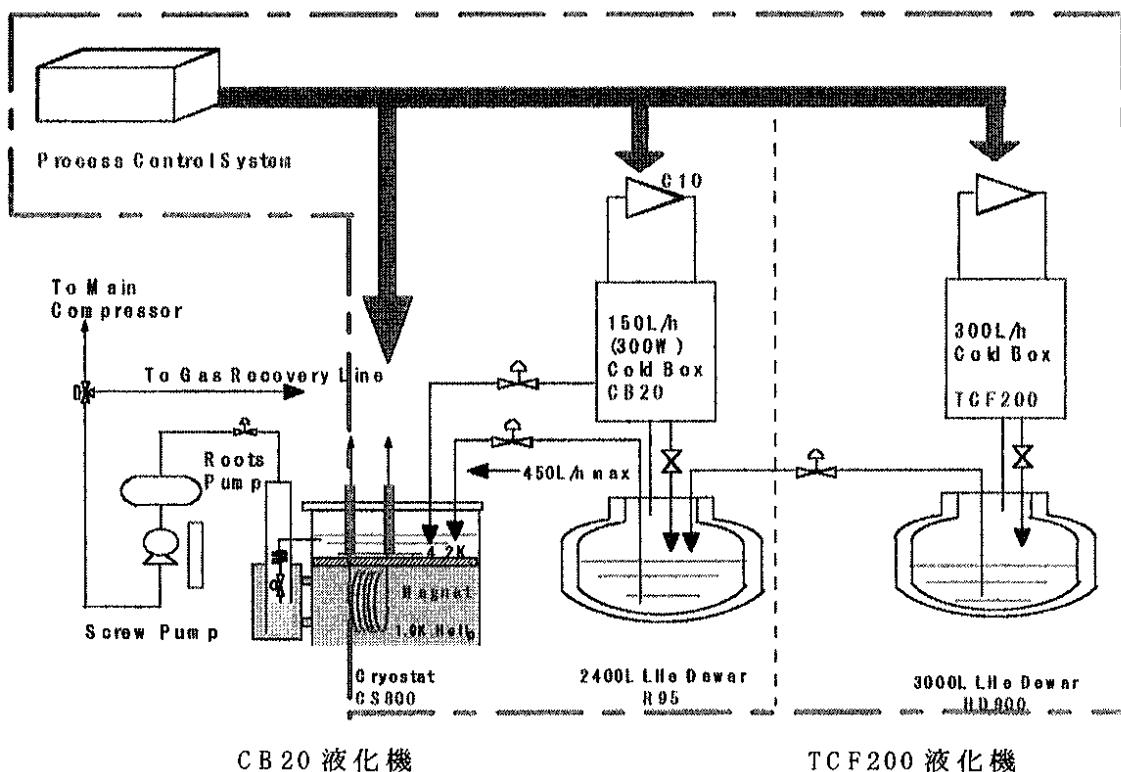
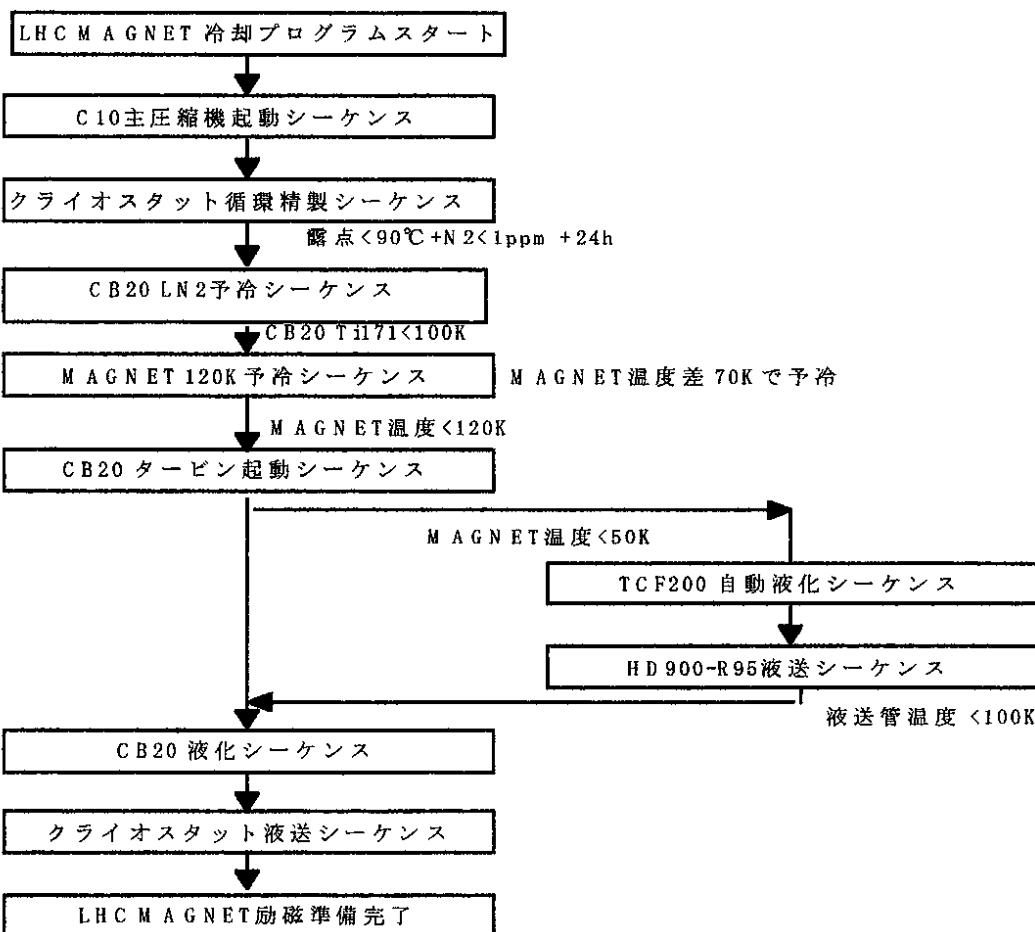


図4(a)：制御計算機のモニター画面



CB 20 液化機

TCF 200 液化機



自動運転流れ図（モード3）

5図：連繋運転システムの概略フロー図（上図）と自動運転フローの一例（下図）

5.2 連繋運転時の液化能力運転

連繋運転により液化能力が設計値である 450 リットル／時を達成できるかどうかの確認試験を行つた。

確認試験は以下の方法で行った。

・第二低温棟ヘリウムデュワー(HD900)と第四低温棟ヘリウムデュワー(R95)の差圧を 0.01MPa、送液弁の開度を 40% 固定で第二低温棟液化機と第四低温棟液化冷凍機の連繋運転を行い、各々の液化能力の測定を行う。

・試験結果

第二低温棟ヘリウムデュワー(HD900) 平均 124L/h

第四低温棟ヘリウムデュワー(R95) 平均 338L/h

以上の結果、図 6 に示すように連繋運転により合算した液化能力は設計値を越える 462 リットル／時であることが確認できた。

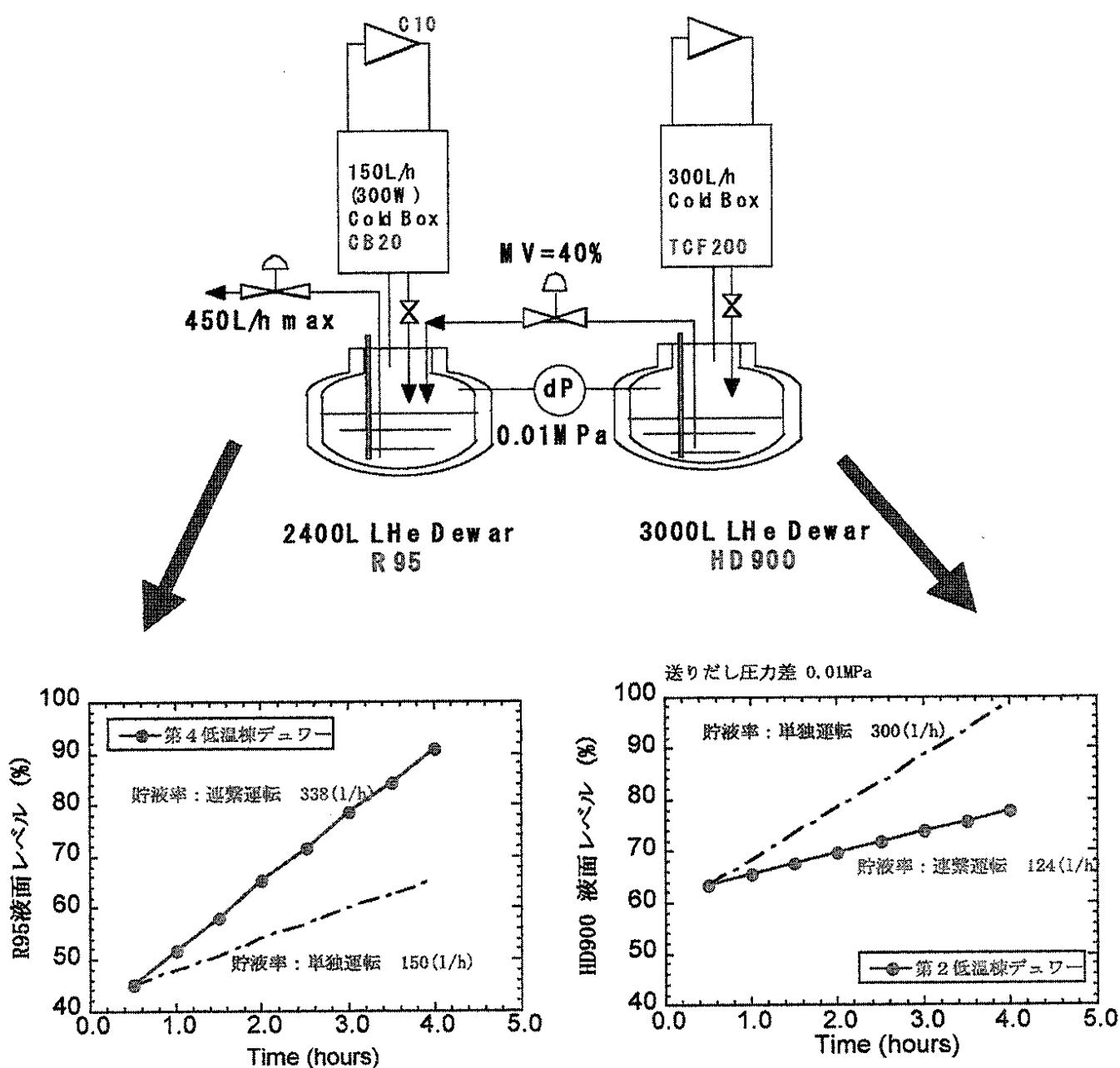


図 6 : 液化能力性能試験

5.3 マグネット冷却試験

試験用クライオスタートを接続し、実際にマグネットを冷却し、以下の項目についてシステムの性能確認試験を行った。

(1) マグネット冷却試験 (300K から 4.2K 冷却)

第四低温棟液化冷凍機単独運転により 50K まで冷却し、その後第二低温棟液化機を立ち上げ、連繋運転により液送りを行い、4.2K まで冷却すると同時に、クライオスタートに貯液した。

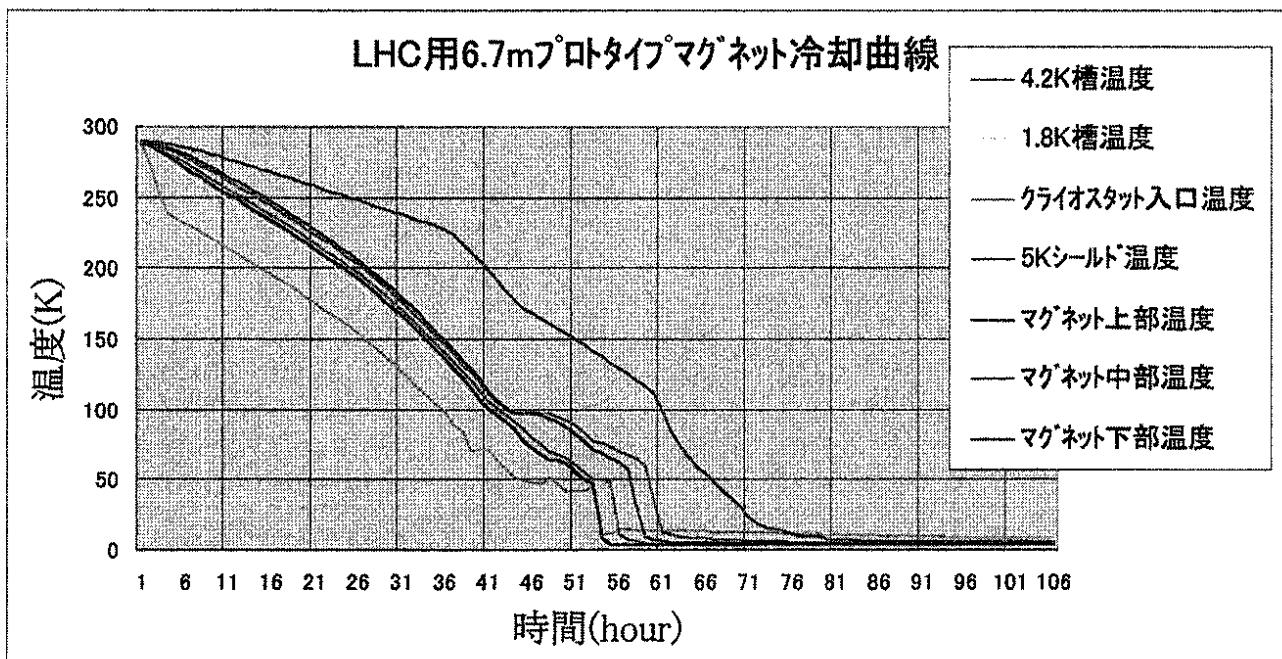


図 7 : マグネット冷却試験(300K→4.2K)

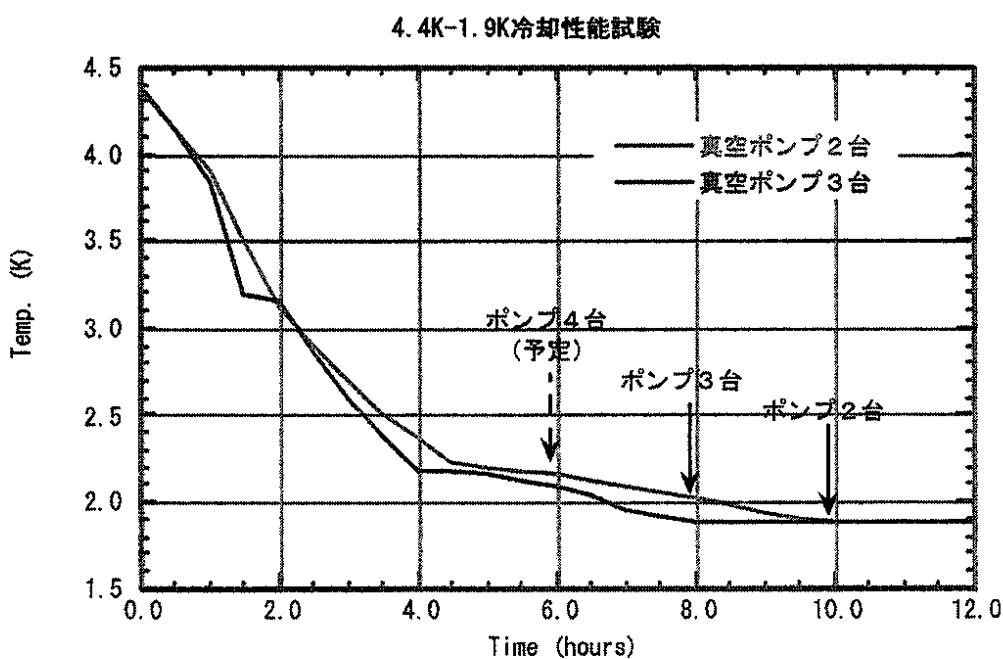


図 8 マグネット冷却試験(4.2K→1.9K)

冷却時間は図7に示すように設計要求の80時間以内であった。

(2) マグネット冷却試験 (4.2K から 1.9K 冷却)

1.9K 超流動ヘリウム温度まで冷却するために、超流動ヘリウム発生熱交換器用減圧排気系を駆動し、マグネットを 1.9K まで冷却した。冷却時間は図8に示すように3セットの排気系を駆動して約8時間であった。排気系をさらに1台増設する予定であるので、設計どおり6時間で冷却できる見込みである

(3) トレーニング試験

連繋運転モードによりマグネットのクエンチ試験を行った。マグネットのクエンチによる液の蒸発で消費量が大幅に増えるので、連繋運転で液を確保する必要がある。この試験によりトレーニング試験を最大3回／日行えることが確認できた。

(4) 定常冷却試験

磁場測定時には、液の消費が少ないので、第四低温棟液化冷凍機単独運転で十分である。今回の試験で、単独運転で必要な液が確保できることが確認できた。

(5) 加温試験

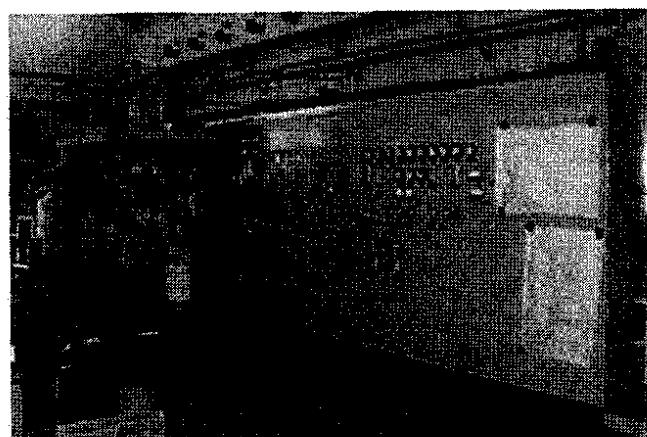
4.2K から室温までのマグネットの加温が自動でできることが確認できた。

まとめ

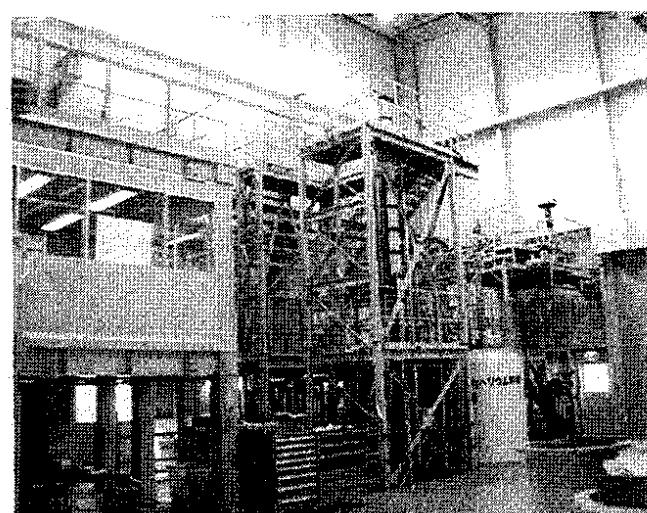
- (1) LHC 用超伝導電磁石試験用の冷却システムを、現有設備を有効に活用した連繋システムにより、経費を節減し、約半年間（実質工事期間は3ヶ月）の短期間で完成了。
- (2) ハード及びソフトの設計、構築をほぼ二人で行った。
- (3) 各運転モードの自動運転プログラムが正常に動作することを確認した。
- (4) 2台の液化機連繋運転で 450L/H 以上の液化能力を達成した。
- (5) 循環精製運転を含めて、6.7m マグネット（質量約 10t）の 300K から 4.5K までの冷却が1週間以内（実質5日間）にできることを確認した。
- (6) 4.5K から 1.9K までの冷却が真空ポンプのフル装備で6時間以内にできる見通を得た。
- (7) 国内では初めてであろう二台連繋液化冷凍機システムを完成了。
- (8) 2001年3月から実機と同寸法のプロトタイプマグネットの冷却を行い、順調に試験中である。
- (9) 今後の課題として、クエンチ等の自動処理の改善を引き続き行っている。

謝辞

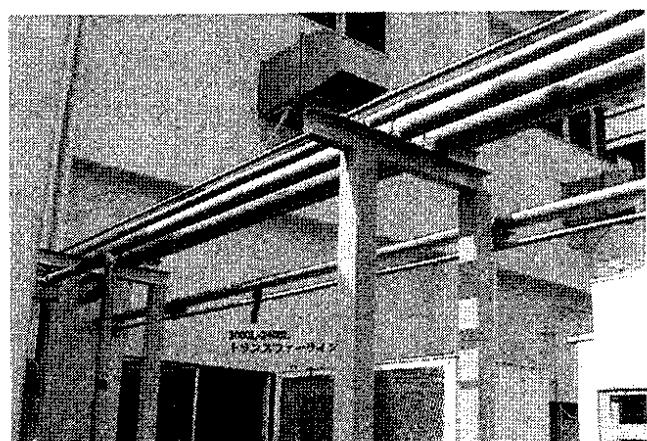
とても大変な仕事でしたが、このような開発の機会に巡り会え、責任のある仕事を私たち技官にまかせて頂いた低温工学センターの方々に感謝します。



第二低温棟 液化機室



第二・第四低温棟ヘリウムデュワー間
トランシスファー・ライン



第四低温棟マグネット試験設備

卓越した超精密加工技術

高富 俊和
高エネルギー加速器研究機構
技術部工作課
〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

工作センター内での業務は、短期的な設計や加工業ばかりでなく、機構のプロジェクトに対応するための開発グループに参加し、工作特有の技術で寄与するという形もある。特に筆者の場合は、ダイヤモンド工具を用いた超精密加工技術の開発などを中心におこなっている。

その中で、X バンド加速管用ディスク（以下ディスクと呼ぶ）の要求加工精度を満足する加工をおこなうために、機構内外における加工技術について調査をおこなったが、技術的に確立されていない部分が多く、一から加工技術を構築する必要があった。そのため加工機の開発、および加工技術の確立などをおこない、加工試験を繰返すことにより $1 \mu\text{m}$ 以下の高精度で安定性の高い加工をおこなうことができる超精密加工技術を習得・構築することができた。

また、その成果については学会等で報告し、企業などへの技術指導も行っている。

本報告では、X バンド加速管用ディスクの超精密加工を中心に、そこで発生した問題点とそれをどのように解決したかについて述べる。

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構では、実験機器等の高精度化にともない超精密加工の要求が高まってきた。そこで、ダイヤモンド切削による超精密加工技術を取り入れ要求に対応している。

X バンドのような非常に高い周波数（11.4GHz）でビームの性質を損なわずに加速させるためには士 $1 \mu\text{m}$ の寸法精度と形状精度が必要とされる。また、この加速管は約 200 枚の個々の寸法が異なるディスクから構成されており、高精度で加工することはもとより、その精度を安定的に継続することが重要となる。

ディスク加工に要求される精度を達成するために超精密加工の試験を開始したが、安定した加工をおこなうことが困難であった。そこで、加工時に発生する加工不安定性についてその要因と考えられる項目を考察し解決策を検討した。

2. 加工時に発生する誤差要因

実際の加工では、図 1 に示すような誤差要因により加工精度の低下が発生する。これらを解決するには、加工理論、加工技術、加工機の性能、環境によ

る影響などトータル的に考察し、加工精度に起因する加工誤差の原因を究明する必要がある。

ディスク加工における加工誤差要因としては、加工機の運動精度、工具刃先形状の仕上げ面への転写性、加工環境およびディスクを無歪で加工機に取り付ける方法などの周辺技術が考えられる。また実際の加工をおこなう場合、環境等の影響により加工機が変形し、工具位置が変化することもわかっている。

これらの誤差要因を取り除くため、加工試験を繰り返しながら加工方法の確立および、精度向上のための技術開発をおこなった。また、加工物の測定のための測定器の開発等を行うことにより、現在ようやく要求される精度の加工が行えるまでになった。

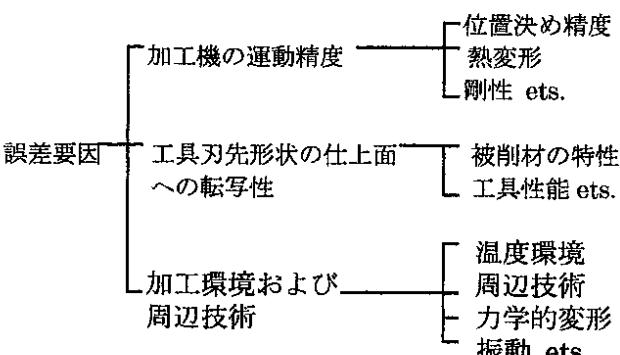


図 1 : 加工時に発生する誤差要因

3. 加速管の説明

3.1 加速管とは

加速管とは、電場を形成する電極により粒子（荷電粒子）を加速する装置で、加速器の主要部分である。現在製作している加速管は、2つの線形加速器によって、電子、陽電子を数百 GeV まで加速し衝突させることにより、高エネルギー物理実験をおこなうための装置で、これまでの線形加速器の約 10 倍も高いエネルギーまで加速できる次世代の衝突型線形加速器の加速管として考えられているものである。

3.2 加速管の構造

今までに試作として数種類の加速管を製作した。加速管単体の構造は、主に入出力カプラー、ビームポート、本体となるディスクにより構成され、

全長は図2に示す1.3m長や1.8m長の加速管を製作している。

ディスク間の接合は拡散接合とロー付けによっておこなわれ、接合後の真直度を必要とする。また、加工により加速周波数を決定するため、超精密加工を必要とする。

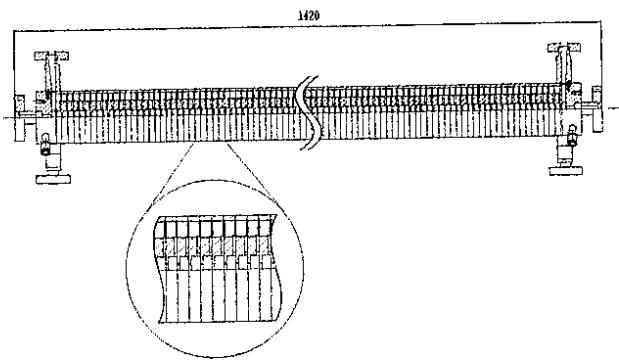


図2：1.3m長DS(Detuned Structures)タイプの加速管の構造

3.3 ディスク形状

図3はRDDSタイプのディスクを示す。空洞部断面形状は円弧と直線で形成されている。また、各ディスクはわずかながら寸法が異なり、今までにない高電界加速管であることと、拡散接合によるディスク間の接合をおこなうため、加工時における切りくずの巻き込み等による傷は避けなければならない。

これらの加工に要求される精度は、寸法精度 $\pm 1\mu\text{m}$ 、円弧形状部の輪郭度 $2\mu\text{m}$ 、同軸度、平面度 $0.5\mu\text{m}$ 、平行度 $1\mu\text{m}$ および、表面粗さ 50nmRy など高精度が要求される。また、材料には無酸素銅を使用する。

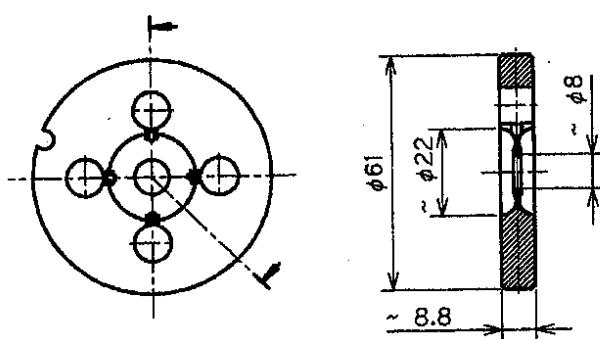


図3：RDDS(Rounded Damped Detuned Structure)タイプの加速管ディスク

4. 超精密加工機について

超精密加工では、加工機の運動精度が加工精度に

大きく影響を与える。近年、加工機の運動精度は向上しているが、加速管ディスクのような形状の加工を数百枚単位でおこなう場合、剛性や熱変形などの影響により充分な運動精度をもっているものではない。そこで、加工機の運動性能について調査をおこない、高精度な加工がおこなえるように調整をおこなった。

4.1 超精密旋盤

使用した超精密旋盤は、東芝機械(株)社製を使用した。構造としては、スピンドルに静圧空気軸受け(エアースピンドル)を用いた。エアースピンドルは空気圧により軸を浮上させ、ベルトインモーターにより回転を与えており、そのため、高精度な回転が得られ、多くの超精密加工機に使用されている。

本加工機は温度変化の影響を抑えるため低熱膨張のスーパーインバー材のスピンドルに載せかえた。

テーブルの案内には、ニードルローラーを用いたダブルV溝スライドテーブルを使用している。加工機械のスライドテーブルに要求される条件は、摩擦が小さく円滑に移動する、スティックスリップなどの不連続な動作をしない、移動精度が良い、剛性が十分大きく減衰能力が良いこと、保守管理が容易などがあげられる。

超精密加工機においては、すべり案内、転がり案内、静圧空気案内、静圧油案内などが用いられているが、位置決め精度、剛性の面から、ニードルローラーを用いたダブルV溝機構を採用した。測定により真直度は $0.15\mu\text{m}/150\text{mm}$ でニードルローラーの転がりによる変動は $0.02\mu\text{m}$ 以下である。

ディスクのスピンドルへの固定方法には、真空チャックを用いた。また、加工液には加工部の冷却と切りくずの除去のためケロシンをミスト状にして吹きつけた。ゴミ影響や外部からの熱の流入を抑えるため加工機はクリンルーム(クラス1000)のブース内に設置した。温度管理は $\pm 0.5^\circ\text{C}$ でおこなっている。工具位置制御はFUNAC(ファンック(株)社製)15Tによりクローズド制御を行い、最小単位は $0.01\mu\text{m}$ である。

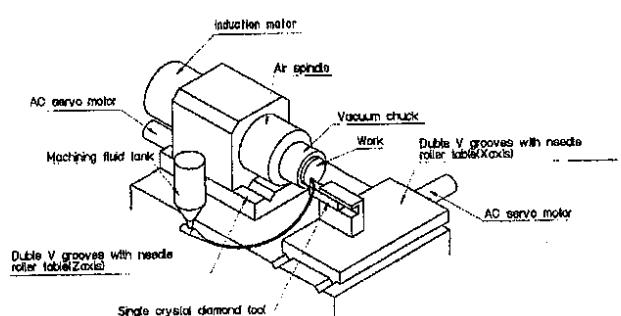


図4：超精密旋盤の構造

4.2 ダイヤモンドバイト

バイトは刃先が円弧形状の単結晶ダイヤモンドバイトを使用した。ダイヤモンドは物質中最も硬く、高剛性で、耐摩耗性にすぐれ、他の物質との摩擦係数が小さく、熱伝導率が優れている。また、アルミニウム、銅に対して化学的にも安定で、鋭利な刃先稜が製作可能である。これらの特性によりダイヤモンドバイトは超精密加工に適している。

バイトの形状は、先端が R0.4mm の片刃バイトでウインドアングルは 120°、輪郭度は 0.2 μm 以下である。材質はシャンク部が SUS410、チップ部は超硬合金で銀ローによりダイヤモンドを固定、シャンクとチップはネジにより固定されている。

ダイヤモンドバイトの使用上の問題点としては、高価であること、扱いに注意を要すること、個々のバイトで性能にばらつきがあること、チッピングの発生により加工不能になる、バイトの交換時間が長いなどがある。また、極力剛性を落とさないようにディスクの加工に最適と思われる形状とした。

Single crystal diamond tool

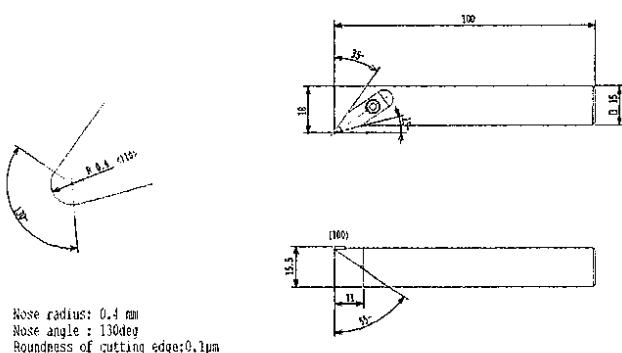


図 5 : 単結晶ダイヤモンドバイト

4.3 真空チャック

加工物をスピンドルに固定する方法には固定による変形を防ぐため真空チャックを用いた。

真空チャックは、ディスクの平面度、表面の傷に大きく影響するため、かなりの試行錯誤により今の構造を得ることができた。構造はベース部とチャック部により構成され、チャック部を交換することにより、いろいろなディスク形状の固定も可能である。材質は、ダイヤモンドとの親和性を考慮して A5052 を使用した。

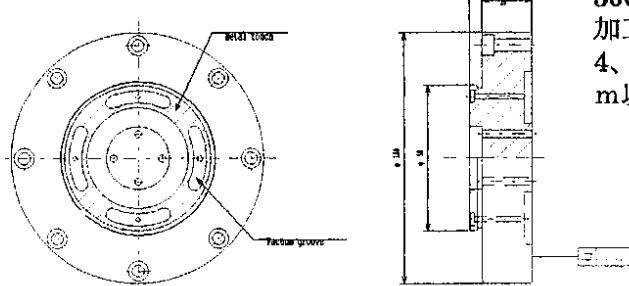


図 6 : 真空チャックの構造

5. 加工時に発生した問題点

実際にディスクの加工試験をおこなうと、幾多の問題が発生し加工精度の低下をまねいた。これらの問題が発生するたびに、加工精度に影響する加工誤差の検証をおこない原因を究明して解決していった。

特に、高精度で安定的に継続する加工についてはわれわれもまったくの未経験であり、工作機械メーカーからの情報も充分でなく、問題が出るたびに処理し技術を構築しなければならなかつた。

また、サブミクロンの寸法を評価できる測定技術も確立されていなかったため、測定器の開発からおこなう必要があった。そのため、加工そのものより問題を解決することに多くの時間を必要とした。

これらの問題点について、どのように解決していくか主要な項目について以下に説明する。

6. 平面度不良

ディスクの加工では、平面度を 0.5 μ m 以下にする必要がある。ところが、加工後の測定の結果 1 μ m 程度しか平面度がでていなかつた。

そこで、平面度に影響を与える誤差要因について検証を行つた。誤差要因と考えられるのは、加工機の運動精度として、スライドテーブルの真直度、スライドテーブルとスピンドルの直角度、スピンドルの回転精度などが考えられ、機械精度の仕上面の転写性および加工環境・周辺技術としては材料の剛性、加工条件、加工方法、荒加工時の平面度、真空チャックの形状などが考えられる。

個々について調査を行つた結果、加工機のスライドテーブルの真直度および、スライドテーブルとスピンドルの直角度については、ピッティング方向に 0.4 μ m 程度のバックラッシュが見られるものの、真直度は P-P で 0.1 μ m 以下であり、平面度不良の直接の原因では無いことがわかつた。スピンドルの回転精度、材料についても問題は無かつた。

平面度不良のもっとも大きな原因だったのは、ディスクを真空チャックに吸引することにより変形が起り、荒加工時の平面度の不良が仕上げ加工後まで残つてしまふことをつきとめた。

そこで、真空チャックについては 4.3 で述べたように、できるだけディスクに変形を与えない吸着できる形状とし、荒加工時に平面度を向上させるため、ディスクの吸着面側に研削やラッピングを採用した。また、荒加工時の加工歪を抑えるため、加工後 500°C 2 時間のアニールをおこない、仕上げ加工時も加工歪を考慮した加工条件として加工厚さ 10 μ m を 4、4、2 μ m で加工することにより、平面度を 0.5 μ m 以下に抑えることができた。

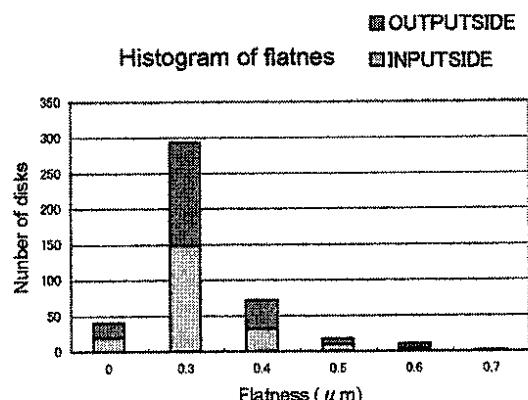


図 7 : 加工後のディスクの平面度

7. 連続加工時に発生する寸法のばらつき

加速管を製作するには、個々のディスクを高精度に維持したまま連続して加工をおこなわなければならない。しかし、実際には機械の位置決め精度、環境による影響、測定方法等の誤差要因により連続加工したディスクの寸法にばらつきが生じた。

7.1 測定器の開発

寸法のバラツキは、ディスクの外径 ($\phi 61$) を測定し、比較することにした。サブミクロンの精度で寸法を簡単に測定する測定器が無いため、測定器の開発を行った。

測定方法としては、固定された 2 つの静電容量型の変位センサー（分解能 $0.01 \mu\text{m}$ ）間にディスクを通すことにより基準寸法のレファレンスとの比較測定を行った。繰返し測定精度は $\pm 0.2 \mu\text{m}$ が得られた。

これにより、連続加工と平行して高精度な測定が短時間できるようになった

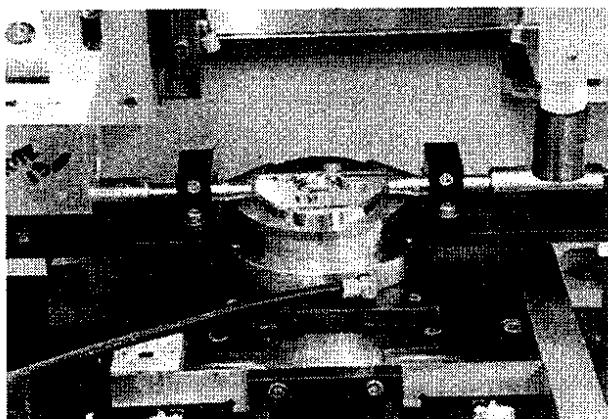


図 8 : 外径測定器

7.2 環境による影響

連続加工時の加工精度を低下させる要因としては、加工環境温度が大きく影響していることがわかった。

環境温度の調査を行った結果、温度管理されたブース内で加工をしているにもかかわらず場所により温度差が生じていた。これは、スピンドルの回転による熱の発生や外部からの熱の流入が原因であると考えられた。

また、加工中に加工物に温度変化が生じていることもわかった。これは、加工液として使用しているケロシンのエアーミストにより加工物の温度が低下することが原因である。

現状の環境では、これらによる温度変化をコントロールすることは困難である。そこで、加工時のディスクの温度と外径寸法の関係について調査した。これにより、外径寸法のばらつきは、加工時のディスクの温度による熱膨張と関係があることがわかった。(図 9)

そこで、加工時のディスクの温度を測定し、その温度を加工機に入力することにより、熱膨張を考慮した指令値で加工できるシステムを構築した。これにより、温度変化のある環境下でも安定した加工をおこなうことができるようになった。

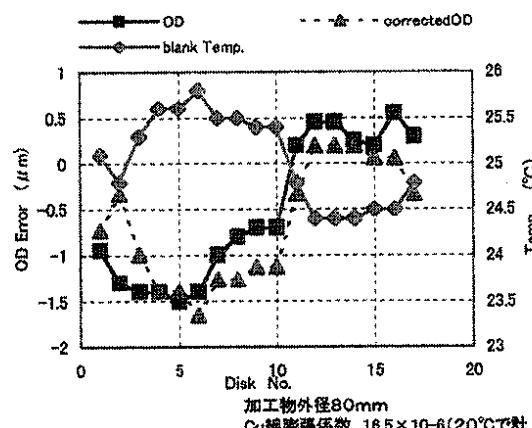


図 9 : 加工時のディスクの温度と外径寸法の関係

8. 曲面加工時の形状誤差

ディスク加工後に図 10 に示す a1 部の円弧形状の測定をおこなった結果、曲面部に $15 \mu\text{m}$ 程度の形状誤差が発生した。これは、加工機の動作不良に問題があると考察し調査を行なった。

8.1 加工機の動作不良について検証

加工時にバイトがどのような動きをしているのか検証するため加工機に測定器を取り付け、実際のディスク加工時の円弧動作をさせたときのバイトの動きを確認した。その結果、加工機の指令値の軌跡どおりにスライドテーブルが動いていないことがわかった。

スライドテーブルの動きは、各モーターに制御系からのパルス信号により移動をおこなっている。円

弧動作をさせる場合、X,Z 軸のパルス信号の出力を同期させる必要がある。

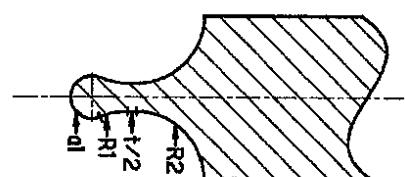


図 10 : バイトの軌跡

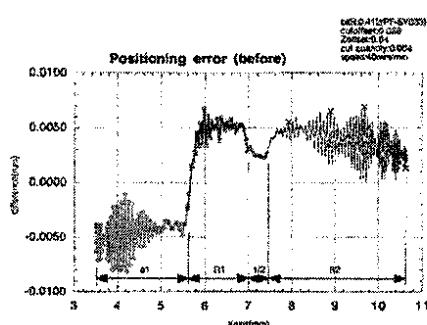


図 11 : 調整前の加工機の動き

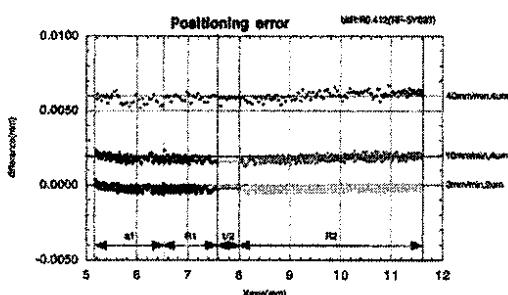


図 12 : 調整後の加工機の動き

図 10 に示すような加工軌跡 (a1→R2) で動作させた場合、任意の点での指定値からの半径方向のずれ量を測定すると、図 11 のようになつた。横軸は工具移動距離 (X 軸)、縦軸は指令値からの偏差を表している。このときの工具送り速度は 40mm/min すなわち円弧の動作をさせた場合、制御系からのパルス信号に対してモーターが正確に動いていないため $5 \mu\text{m}$ ほど指定した半径値より小さく動いていることを示している。また、最大 $6 \mu\text{m}$ 微小振幅が生じていることがわかつた。

これは、制御盤とモーターとスライドテーブルの自動制御のバランスが崩れていたため、制御盤の

パラメーターを調整するとともに、スライドテーブルの移動速度の最適値を測定結果から求めた。

その結果、図 12 のような結果が得られた。これらは実際の加工時の動作をさせたときの結果を表したもので 40mm/min は仕上げ寸法が 6 ミクロン残し、10mm/min は 2 ミクロン残し、3mm/min は仕上げ寸法となっている。

この加工条件では、円弧部での工具位置決め精度が $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 以下であることが明らかになつた。

8.2 工具刃先半径誤差の測定

加工機の動きの調整をおこなつたあとに、まだ数ミクロンの形状誤差が曲面部に残つた。これは、工具の刃先半径に誤差があるのではないかと考え検証を行つた。

NC 制御では、工具刃先半径を加工機に入力することにより、工具中心軌跡を計算し加工が行なわれる。円弧形状を加工する場合、加工ポイントは工具刃先の曲面に沿つて移動する。そのため、加工される形状は工具の刃先形状が転写されたものとなるので、工具の刃先半径は高精度に測定しなければならない。しかし、工具メーカーの測定値では精度が不足している可能性があると判断し、工具刃先半径を高精度に測定できる測定器の開発をおこなつた。

測定原理としては、真円度測定機の高精度な回転を基準とし、加工した半球の曲率半径誤差を求ることにより、R バイトの平均的な刃先半径を容易に、また高精度に測定できるものである。

球面形状の加工では、バイトの刃先半径中心の軌跡を与えることにより加工が行なわれる。球の中心と切れ刃半径中心を結ぶ線上に切削点がくるのでバイト形状が転写され刃先半径が求められるはずである。通常、バイトの刃先半径中心位置の設定方法としては、テストピースの端面側 (Z 軸) と側面側 (X 軸) を加工し、その測定結果からバイトの刃先中心を求め、これを制御系に与えることにより設定をおこなっている。

図 13 に示すように、バイトの刃先半径 (br) に誤差 (Δbr) がある場合、バイトの刃先半径中心が ($\Delta br/\sqrt{2}$) だけずれる。この状態で加工される半球の形状は、X, Z 方向に半径誤差分の (Δbr) だけずれたところの交点 (P) を中心とした半径 ($R + \Delta br$) で加工される。これにより $\theta = 45^\circ$ で極値をもつことがわかる。他の誤差要因が無いとすると、 $\theta = 45^\circ$ での形状誤差は、

$$\Delta t(45) = \Delta br \cdot (\sqrt{2} - 1) \quad (1)$$

となる。

$\Delta t(45)$ の値を、真円度測定機により真円度誤差として測定し、バイトの実刃先半径の誤差を求めバイト刃先半径値の補正をおこなう。これにより、バイトの切れ刃全体での平均的な刃先半径を高精度に測定することができ、ディスクの円弧部 (a1,b1 等) の形状誤差を $\pm 0.2 \mu\text{m}$ に抑えることができた。

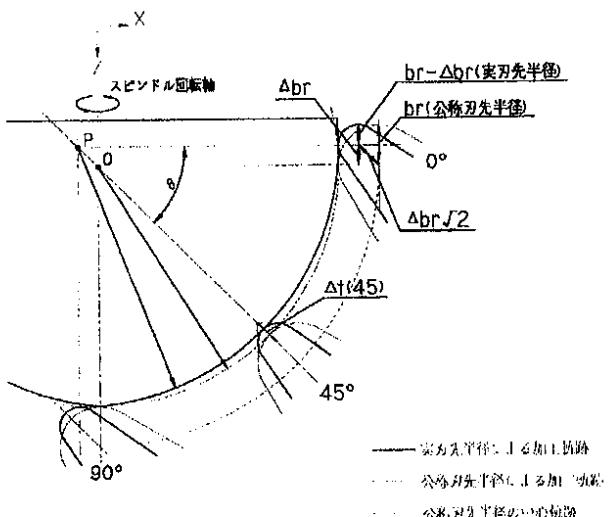


図 1 3 : 半球を加工したときの概念図

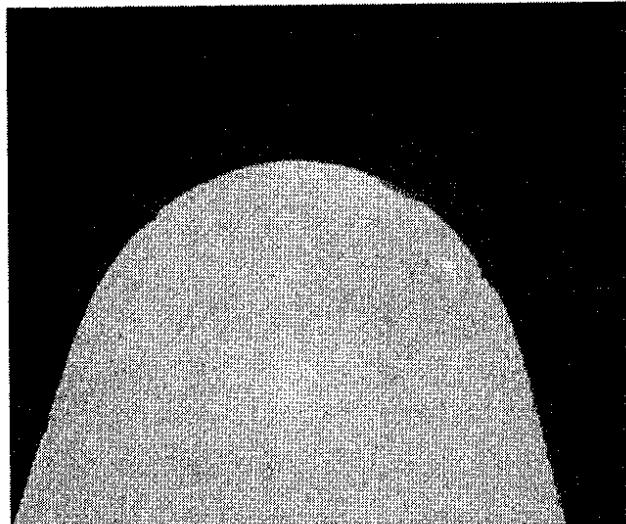
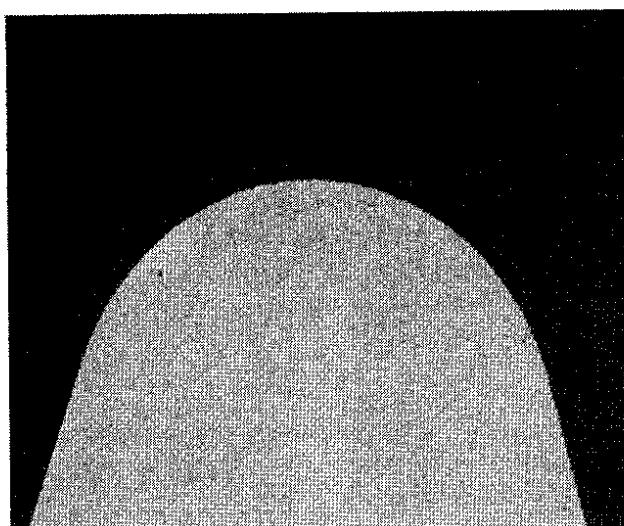


図 1 4 : バイトの写真

9. バイトの損耗

バイトの損耗は、摩耗によるものよりもほとんど刃先のチッピングによるものだった。チッピングが発生するとディスクの表面粗さが途端に悪化してしまい不良品となる。チッピングの原因は、穴部の断続切削によるものと、汎用加工機で加工された面を加工する場合、平面度、面粗度が悪く切り込み量が変化するため、バイトへの衝撃が大きくなるためだと思われる。

チッピングを抑えるため、仕上げ加工前に中仕上加工をおこなうことにより、仕上げ加工でのチッピングの発生をほとんど無くすことができた。また、加工方向を考慮することによりバイトへの負担を抑えている。チッピングしたバイトは再研磨修理を行っている。



New tool

10. 加工誤差を極力抑えるための加工方法、加工手順

10.1 加工手順

数百枚を超える精度安定化のための加工試験の結果から得られた情報をもとに下記のような加工手順を確立した。

①荒加工

超精密加工では、荒加工の平面精度が仕上げ加工後の平面度を決定するため、荒加工は非常に重要である。

荒加工は仕上げ代 $40 \mu m$ 残しで寸法精度 $\pm 0.02 mm$ である。また、平面度の向上のため両端面の研削を行う。

②アニーリング

荒加工時の加工歪を除去するためにおこなう。真空炉で $500^\circ C / 2 h$ の条件である。

③ハンドラップ

真空チャックとの接合面をラッピングすることにより、平面度の向上と端面のスクラッチの除去を目的とする。方法は #800 サンドペーパーをオプティカルフラット上でラッピングをおこなう。

④中仕上げ加工

中仕上加工を行うことにより、仕上げ加工時のバイトダメージの軽減と、反転回数をふやすことによる平面度の向上を図っている。中仕上加工での仕上げ代は $10 \mu m$ 残しとしている。

⑤仕上げ加工

仕上げ加工では、連続で加工をおこなうことによる温度変化の影響をどれだけ抑えられるかが重要である。そこで、加工機の温度を安定させるため、加工開始前には十分にアイドリングを

おこなう。また、加工直後のディスクの温度を測定し、次のディスクの設定温度として入力する。各ディスクの加工後の外径を測定し、温度変化による寸法に変化がないことを確認しながら加工をおこなう。

10.2 プログラミング

加工誤差を抑えるために加工プログラムについても考慮した。①温度変化による影響を抑えるため、加工時の温度を制御系に入力することにより、熱膨張を考慮した値に変換し加工をおこなう。②スライドテーブルのバックラッシュの影響を抑えるため、同じ方向で加工をおこなう。③位置決め精度を向上させるため、位置決め後加工機が安定するまで停止させる。などをおこなう。

10.3 加工条件

加工条件については、加工歪を小さくするため最大切り込み量を $20\mu\text{m}$ 以下におさえた。また、仕上げ加工では切り込みを $4\mu\text{m}$ とし、最終加工では $2\mu\text{m}$ とした。

加工速度は理論面粗さが $0.03\mu\text{m}$ となるように設定し、円弧動作では加工誤差を小さくするため速度を落とした。

加工液には、ケロシンをミスト状にして吹きつける。

表1：ディスクの加工条件

加工条件	中仕上げ加工	仕上げ加工
仕上げ代	$10\mu\text{m}$ 残し	
Rotation speed	2800 r.p.m	2800 r.p.m
Cutting speed	40mm/min	40mm/min (キャビティ内 3mm/min)
Cutting depth	$6\mu\text{m}$	$4\mu\text{m}+4\mu\text{m}+2\mu\text{m}$
Tool	単結晶ダイヤモンドバイト	単結晶ダイヤモンドバイト
Chuck	真空チャック	真空チャック
Process time	$\sim 15\text{min/1disk}$	$\sim 30\text{min/1disk}$

10.4 ディスクのチャッキング

ディスクを真空チャックに取り付ける場合、界面にゴミ等をはさまないことが重要となる。洗浄方法をいくつか試した結果、アセトンを塗布した光学レンズ用ワイパーで拭き取る方法を採用した。

回転軸との芯出し精度は、ディスク両面の同軸度誤差となるため $\pm 0.2\mu\text{m}$ 以下の調整が必要となる。そこで、外径の回転ぶれを静電容量型の変位センサーにより測定し調整を行った。このとき、調整のための移動量が大きいと界面での凝着等により傷が発

生する。それを防ぐために位置決め用のガイドにより粗位置決めをおこない、真空チャックの吸着力を下げるにより容易に調整できるようにした。また、取付け時の温度変化の影響を抑えるため作業時間をできるだけ一定にするよう心がけた。

現状は手作業で行っているが将来的には自動化を検討中である。

11. 加工結果

200枚のディスク加工後の測定により、外径寸法のバラツキは $\pm 0.5\mu\text{m}$ 、平面度は $0.3\mu\text{m}$ 以下で加工できた。平行度については、いくつかのディスクで許容値をオーバーしたものがいた。原因についてはまだ不明な点もあるが、チャックとの界面でのゴミおよび傷により傾きが発生したものと思われる。

三次元測定機 (ZEISS UPMC 850C) による測定結果は、測定プローブによる圧痕の影響により評価が困難であるが $\pm 2\mu\text{m}$ の加工精度であった。また、各ディスクの周波数測定の結果から要求される加工精度を充分に満足していることがわかった。

バイトの寿命については $20\text{km} \sim 400\text{km}$ とかなりバラツキが見られ、全てチッピングによるものだった。

これらのことより、試験加速管ディスクの加工方法については、ほぼ確立できたといえる。

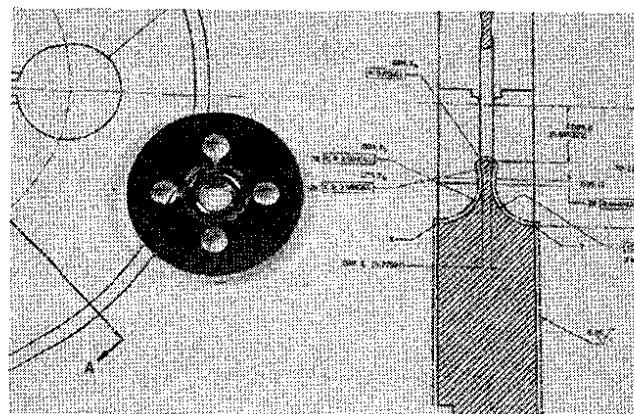


図15 : RDDS DISK

まとめ

超精密加工の作業は、どれだけ誤差要因を取り除くことができるかが重要である。加工機、工具の性能は日々向上しているが、実際の加工をおこなう場合、加工環境による影響および作業者の熟練度などにより加工を困難にしている。特に、長期にわたり加工精度を維持するには、温度が大きく影響しているため、これを取り除くことが重要である。そのため、作業全体を自動化することにより温度の安定化をはかることがこれからの課題となっている。また、サブミクロンの絶対測定をおこなうことが困難であることも加工に大きく影響している。そこで、測定

機の開発、測定方法の確立が重要である。

その他の問題として、バイトの長寿命化、加工時間の短縮、洗浄方法の確立なども今後の課題として検討しなければならない。

謝辞

超精密加工において、人見工作センター長、東助教授をはじめ、X バンドグループの高田元加速器研究施設総主幹、肥後助教授、峠助教授に貴重なご助言とご指導を頂きました。また、工作センターの皆さんに多大なご協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 飯塚：超精密位置決め制御とその現状 1991、精密工学会秋期大会シンポジューム
- [2] 井川、島田：超精密切削加工の精度限界 1986、12 精密工学会誌
- [3] 高富、小泉、東、小池、山元：超精密加工中に使用する切削液の温度と寸法誤差に関する研究 1993 精密工学会秋期大会
- [4] 鈴木、北島、奥山：軸対称非球面の高精度切削に関する研究 精密工学会誌 Vol65.No3.1999
- [5] 高富、東、渡辺、舟橋、人見：切削加工した半球の真円度測定によるバイト刃先半径の決定法 1999 精密工学会秋期大会
- [6] Y.Higashi, 他 : Studies on high-precision machining of accelerator disks of X-band structure for a linear collider KEK-Report 2000-1
- [7] 高富、東、真木、小池、小泉：超精密加工による高精度飛跡検出器の開発 1991 精密工学会秋期大会
- [8] 東、小池、高富、小泉：X 線集光用軸対称非球面ミラーの加工装置の開発 1992 精密工学会秋期大会
- [9] 小池、東、高富、小泉、山元：X 線集光用ミラーの加工の研究 1994 精密工学会秋期大会

平成12年度 KEK技術賞 受賞論文集

編集後記

KEK技術賞表彰制度は機構長が授賞を行うものであり、KEK技術賞選考委員会が選考・推薦を行った。選考委員は、各研究所、施設、管理局、技術部から各2名の委員で構成し、庶務が事務処理に当たってきた。応募様式等はホームページからダウンロード出来る仕組みになっており、電子メールでもアナウンスをおこなった。毎年、7月から10月にかけて公募を行う事にしており、年度内に授賞者を決定、発表する事にしている。

第1回目の平成12年度分を、KEKインターナル・レポートとして発行する運びとなったが、今後、シリーズとしてKEKのホームページにも掲載する事にした。本印刷は白黒とした為、カラーで見たい時はホームページから印刷する等して頂きたい。

URL <http://www.kek.jp>
<http://www-eng.kek.jp/oshirase.html>

平成14年2月

出版担当
庶務 人事第3係 石井京子

