

KEK Internal 2007-7
February 2008
A/H/M/R/D

平成15年度～18年度
KEK 技術賞 受賞論文集

The KEK Technology Prize 2003-2006



High Energy Accelerator Research Organization

High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 2008

KEK Reports are available from:

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

Phone: +81-29-864-5124
Fax: +81-29-864-4602
E-mail: irdpub@mail.kek.jp
Internet: <http://www.kek.jp>

序 文

平成 19 年度 KEK 技術賞専門部会
部会長 春山 富義

KEK 技術賞は平成 12 年度に発足し、受賞対象となった KEK 発の優れた技術は、「KEK 技術賞受賞論文集」として刊行され、広く世に伝えられる。平成 12 年度、13 年度には適時に刊行されたが、残念なことに平成 14 年度以降の受賞論文集の発行が停滞してしまった。これまで歴代の専門部会において、論文集早期発行の重要性は指摘されてきたが実現には至らなかった。今年度の専門部会で、成果を適切な時期に刊行することが技術賞評価項目の一つにある「伝承」に直接関連することを重視し、困難を克服してこれまでの論文を早急に出版するべきとの結論を得た。その結果、今回平成 15 年度から平成 18 年度までの対象受賞論文を 1 冊にまとめることができた。平成 14 年度の受賞論文については資料整備の最終調整を行なっているため、別途出版することとした。従って本論文集には計 9 件（15 年度：2 件、16 年度：該当なし、17 年度：3 件、18 年度：4 件）の受賞論文を掲載している。

KEK 技術賞の選考基準については、これまで歴代の専門部会委員によって深く真剣な議論が行なわれ、現在では以下の 4 項目を基本とすることになっている。

1) 技術への取り組みが創造的である（創造性）：

技術開発への取り組みにおいて、技術的発想、創意工夫が明らかであること、キラリと光る技術、アイデアがあることを評価する。

2) 技術の具体化への貢献、成果が顕著である（具体化）：

機器開発や技術を育てることに、自立的かつ重要な貢献を果たし、その成果が際立っていることを評価する。

3) KEK の推進する研究計画への技術貢献が顕著である（貢献）：

KEK が推進する研究計画に、重要な貢献があることを評価する。但し、プロジェクトの成果ではなく、それに対して具体的な役割を果たした技術貢献を評価する。

4) 技術伝承への努力が積み重ねられている（伝承）：

積み上げられた技術が、自分だけのものでなく、今後も KEK のなかで伝承されていくための努力を評価する。学術・技術公表論文のみにとらわれず、成果に至る技術検討ノート、図面、写真、直接技術指導など様々な方法での技術伝承にむけた努力を評価する。

KEK 技術賞は技術職員による技術開発を対象にしている。以上の評価基準をふまえ、これまで培ってきた技術をもって、技術賞に応募されることを期待したい。KEK 技術賞専門部会は来年度も多くの優れた技術を世に伝えたいと願っている。

平成15～18年度 KEK技術賞 受賞論文

目 次

序文

受賞論文

平成15年度

1. PF リング入射用 6.25Ω 伝送線路型キッカーマグネット及び電源システムの開発・・・ 1
上 田 明 (物質構造科学研究所)
2. Belle シリコンバーテックス検出器 (SVD) の構造設計と製作・・・ 11
工作センターSVD エンジニアリンググループ
(大久保隆治、小池重明、佐藤伸彦、鈴木純一：共通基盤研究施設)

平成16年度

該当なし

平成17年度

1. 大強度高周波加速空洞の空気冷却装置の開発・・・ 21
戸 田 信 (加速器研究施設)
2. パイプライン機能とネットワークインターフェースを持つ高速 CAMAC インターフェース・・・ 28
安 芳 次、井 上 栄 二 (素粒子原子核研究所)
3. ブースター周辺のモニター開発・・・ 36
染 谷 宏 彦 (加速器研究施設)

平成18年度

1. PLL の位相比較を用いた音波式ガス検出装置・・・ 47
近 藤 良 也 (素粒子原子核研究所)
2. K2K 実験サイバー検出器読出し回路基板 (FEB)・・・ 54
村 上 武 (素粒子原子核研究所)
3. マイクロチャンネル分光結晶の開発・・・ 63
内 田 佳 伯 (物質構造科学研究所)
4. 粒子加速器・物理実験用超伝導低温機器における TIG 自動溶接技術の開発・・・ 67
安 島 泰 雄 (共通基盤研究施設)

編集後記・・・ 72

平成15年度受賞論文

1. PFリング入射用6. 25 Ω 伝送線路型キッカーマグネット及び電源システムの開発
上 田 明 (物質構造科学研究所)
2. Belleシリコンバーテックス検出器(SVD)の構造設計と製作
工作センターSVDエンジニアリンググループ
(大久保隆治、小池重明、佐藤伸彦、鈴木純一: 共通基盤研究施設)

PFリング入射用 6.25Ω 伝送線路型キッカーマグネット 及び電源システムの開発

上田 明

高エネルギー加速器研究機構

物質構造科学研究所、放射光光源系・インジェクショングループ

〒305-0801 茨城県つくば市大徳 1-1

概要

高エネルギー加速器研究機構、放射光実験施設 (PF) において現在のラティスで実現可能な最小エミッタンスでの入射を達成するために 6.25Ω の伝送線路型キッカーマグネットが開発された。キッカーマグネットはスペースの問題やビームのインピーダンスの問題のため、そのセル部を絶縁モールドする構造とし空気中で使用する。開発に当たり絶縁モールドを施したセルの絶縁破壊が問題となったが、絶縁モールドの改良により、安定した性能を持つ絶縁モールドセルが完成した。このキッカーマグネットにより最小エミッタンスである 28nmrad の入射に成功し、また放射光を使った入射ビームの測定結果より、このキッカーマグネットによるパルスバンプは 2 ターン目のビームに影響しないという目的を達成していることが確認された。

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構、放射光実験施設 (PF) では、現在のラティスで可能な最低エミッタンス 28nmrad でのユーザー運転を目指している。このビームオプティクスでは、ダイナミックアパーチャが非常に狭く、従来のパルスの長いウィンドウフレーム型キッカーマグネットでは入射できない。このモードでの運転を実現するためには、ビームがリングを周回する時間のうちにパルスが切れる早いキッカーマグネットを使うことが必要である。このモチベーションにより、6.25Ω の低い特性インピーダンスを持つ伝送線路型キッカーマグネットによる入射システムが提案された。これに伴いモールド法による 6.25Ω 伝送線路型キッカーマグネットのデザインを行い、これを実現するために技術開発を行った。

2. キッカーシステム

2.1 キッカーマグネットの役割

放射光実験施設の PF リングでは、線形加速器より 2.5GeV に加速された電子を 2 台のセプタムマグネット及び 4 台のキッカーマグネットを使用して入射している。図 1 に入射点のマグネット配置とバンプ起動の概念図を示す。

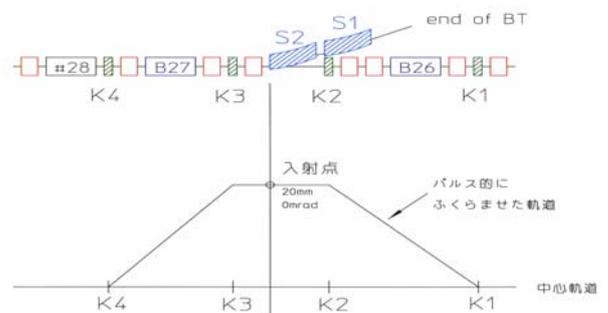


図 1 入射点及びパルスバンプの概念図

この 6 台のマグネットはライナックよりの入射ビームが来た時のみパル的に励磁される。まずライナックで加速された電子ビームはビームトランスポート (BT) を通り PF リングまで導かれるそして BT の最後尾にあるセプタムマグネット (S1, S2) により PF リングの中心軌道の近くに入射される。

しかしこのままでは、PF リングないに入射された電子ビームは、中心起動と入射位置の距離の差を振幅とする振動をするために、数周まわる間にセプタムマグネットの壁にぶつかってしまう。そこで入射時に 4 台のキッカーマグネット (K1-K4) を使用して一時的に中心軌道を入射ビームのほうによせる事をする。この時入射ビームは、よせられた中心起動との間の振幅で振動する。そして、素早く中心軌道を元に戻すことによりセプタムマグネットの壁に当たることをふせぎ、安定して蓄積される。

2.2 キッカーシステムとその特徴

このシステムは、Pulse Forming Line (PFL) に蓄積された電荷をサイクロトロンスイッチングで伝送線路型のキッカーマグネットに流し、さらにキッカーマグネットの先端部をショートすることにより反射電流波も使用する方式である。PFL の後端にはダイオードを介して終端抵抗が取り付けられ、反射電流波を整合している。図 2 にキッカーシステムの概念図を示す。またこのシステムの特徴は以下である。

1. 6.25Ω の低特性インピーダンス
2. 誘電体の使用によるコンパクトな設計
3. 分解・組立が容易である
4. RTV シリコンラバー絶縁による気中での使用

5. マグネット先端部をショートし反射波を使用
6. 耐電圧の高い PFL の使用
7. スリット入コーティングのセラミックダクト

てくる間に立ち下がるために、立ち下がり時間が 600nsec 以下にしなければならない。

また、空間的な制約としてウィンドーの大きさは、60mm (H) × 170mm (W) であり、ビーム方向の長さは 400mm である。したがって、非常にコンパクトな設計を求められる。

3.3 キッカーマグネットの設計 (インピーダンスの決定)

キッカーマグネットを設計する場合には、まず特性インピーダンスを決定しなければならない。

マグネットにかかる電圧 V と流れる電流 I は、特性インピーダンスを Z_0 とすると、

$$V = Z_0 I$$

である。そしてパルスの立ち上がり (立ち下がり) 時間 T は、マグネットのインダクタンスを L 、スイッチング素子の立ち上りを t_r とすると

$$T = \frac{L}{Z_0} + t_r$$

の関係がある。

これより、特性インピーダンスを低くすれば同じ電圧でも流れる電流は多くなるが逆に立ち上がり時間は長くなることがわかる。PF のキッカーマグネットは入射バンプを作るために使用されるため、600nsec 以下で立ち下がればよく、取り出し用のキッカーマグネットのような急峻な立ち上がりを要求されない。また、設置場所に余裕がなくコンパクトな設計を要求されたため、特性インピーダンスを低くして電圧を抑える設計とした。特性インピーダンスは、PFL ケーブルや電源とマグネット間のケーブルに 50Ω ケーブルを使用する事を考えると 50 の 2 の倍数分の 1 にするのが都合がよいため、50 の 8 分の 1 である 6.25Ω に決定した。

3.4 キッカーマグネットの設計 (電極板の大きさ・誘電体の選定)

キッカーマグネットのインダクタンス L は、

$$L = \mu_0 l \frac{w}{h}$$

であらわされるここで、 μ_0 は真空の透磁率、 l は magnetic length、 w は Gap width、 h は Gap height である。 l を 300mm として、スイッチ素子の立ち上がり時間を考慮すると、キッカーマグネットの立ち上がりを時間 T は約 200nsec 程度と考えられる。また 2.5GeV の電子を 4mrad 曲げるのに必要な電流はこの場合約 4,500A なので、マグネットにかかる電圧は約 28KV となる。

ここで、さらにマグネットにかかる電圧を下げるためにマグネット出口でショートして反射電流波も使用できるようにすると、立ち上がり時間は 2 倍の

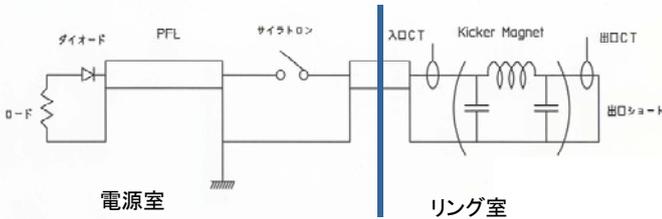


図 2 キッカーシステムの概念図

3. キッカーマグネットの設計

3.1 伝送線路型キッカーマグネットの原理

伝送線路型のキッカーマグネットとは、伝送線路の等価回路となるようにインダクタンス (L) を構成するフェライト部に一定間隔でキャパシタンス (C) を構成するコンデンサー板を配置したマグネットである。この L と C の組をセルと呼ぶ。

これを概念的に説明すると (図 3)、まず、同軸ケーブル (伝送線路) は、電場は内導体から外導体に向かいそして磁場内導体と外導体の隙間を同心円状に回っている。この同軸ケーブルの磁場を電子の偏向に使用するために一部に穴 (ギャップ) をあける。そして外導体を縮めてゆき、内導体のギャップを挟んだ反対側に持ってくる。さらに磁場を閉じ込めるためにフェライトを置き、キャパシタ部を外部に持ってきたものが伝送線路型のキッカーマグネットである。

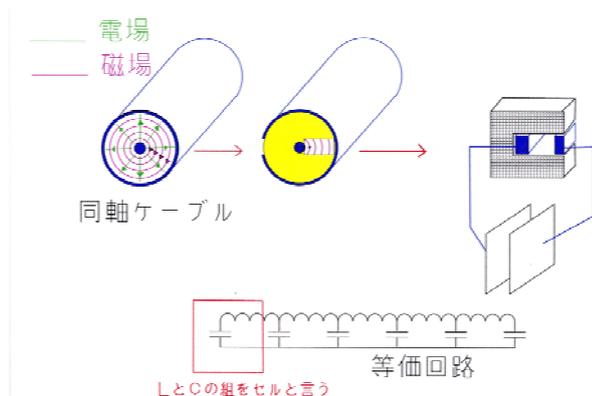


図 3 伝送線路型マグネット

3.2 求められるパルスの条件と制約

このキッカーマグネットに求められるパルスは、高輝度用のオプティックスより、最大の蹴り角が 4mrad そして、入射電子ビームが PF リングを一周し

約 400nsec まで伸びるが、マグネットにかかる電圧は 2 分の 1 の 14KV まで下げることができる。

マグネットを 10mm ごとに分割して 30 セルとする 1セルごとのインダクタンス L_0 は、31.9nH (実測値) である。特性インピーダンス Z_0 は、

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

であるので、必要なキャパシタンス C は、815pF と なる。

インピーダンスの低いマグネットで問題になるのは電極板の大きさである。

まず、伝送線路型のキッカーマグネットの電極板の 大きさ S は

$$S = C \frac{d}{2\varepsilon}$$

の式で書き表される。ここで C はキャパシタンス、 d は電極板の距離、 ε は電極板の間の誘電率である。

ここで、通常キッカーマグネットのように、真 空中に向かい合う電極板を使用すると、仮に $d=10\text{mm}$ と しても、 $S=0.46\text{m}^2$ つまり $68\text{cm} \times 68\text{cm}$ の大き さの電極板が必要となる。

この電極板の大きさは現実的な大きさではない。

そのため、電極板に誘電体を挟み ε を大きくして 電極板の面積を小さくする設計とした。

誘電体としては、高誘電率プラスチックのポリフ ャ化ビニリデン (PVdF) 及びアルミナセラミックス の試料の誘電率を実際に測定をした。図 4 にその結 果をしめす。

この測定結果によると、PVdF は、低い周波数領域 では高い誘電率を示すが 100KHz 以上になると誘電 率が急激に落ちる事がわかる。伝送線路型キッカー マグネットにおいてはその立ち上がりを損なわない ために 10MHz 程度まで一様な周波数特性が求められる。そのため使用する誘電体はアルミナセラミック ス (KP-95) に決定した。また $d=4\text{mm}$ とすることに より電極板の面積を小さくした。

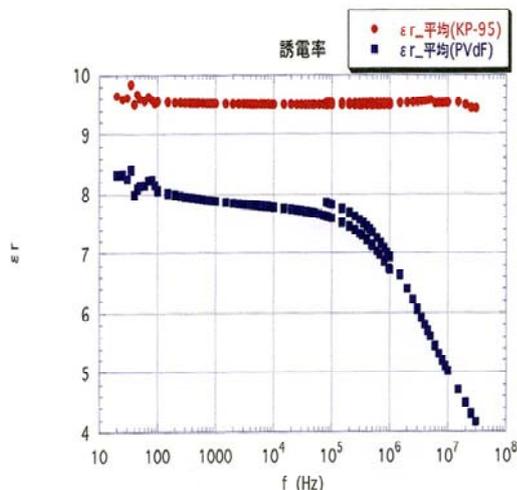


図 4 誘電率の測定結果

3.5 キッカーマグネットの設計 (絶縁の問題・放射線の問題)

PF リングでは、ビームの結合インピーダンスを下 げる必要があり、そしてキッカーマグネットに与え られたスペースはビーム方向に 400mm しかない。そ のため、通常の伝送線路型のキッカーマグネットの ように真空容器に入れることはできない。

このためキャパシタ部の絶縁はモールドを施すこ とでおこない。マグネットを気中で使用する構造と した。また真空ダクトは渦電流がパルス磁場の侵入 を妨げないようにセラミックスダクトを用い、また、 セラミックスダクト内面に Ti コーティングを施す。 ことによりビームのインピーダンスを低くしている。

また、モルディングにあたってはビームに水平 な面は、放射線が高いことを考慮して、キャパシタ 部はビームレベルを避け、さらにマグネット下部に キャパシタ部を集中させることにより、マグネット の分解がしやすいことを留意した。

図 5 にキッカーマグネットの概略図を示す。

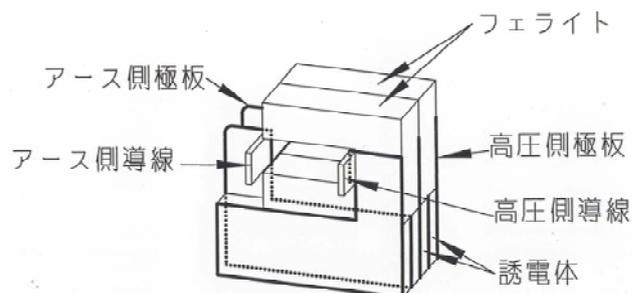


図 5 キッカーマグネットの概念図

3.6 キッカーマグネットの設計 (伝送線路型キッカーマグネット)

以上の事を考慮してキッカーマグネットを設計し た。主な仕様を表 1 に示す。

まずフェライトの幅は 10mm、30 セルとする。高 電圧側の電極板の厚みを 1.5mm 低電圧側を 2mm と する。磁極の長さは 345mm となる (フェライトのみ では 300mm)。誘電体は 4mm のアルミナセラミック ス板を使用した。

インピーダンスは 6.25Ω 、1セルあたりのインダク タンスは 31.9nH、キャパシタンスは 815pF である。ま た、マグネットの伝搬速度は 187nsec となる。

磁極の長さ	345mm
ウインドーの大きさ	60mm(H)×170mm(W)
最大磁場	942Gauss(at 4500A)
特性インピーダンス	6.25Ω
セル数	30セル
キャパシタンス	815pF
インダクタンス	31.9nH,
伝搬速度	187nsec
誘電体	アルミナセラミックス
最大電圧	15kV

表 1 design parameters

キッカーマグネットの組み立て図を図 6 に示す。コの字型のフェライトは上部を取り外すことができ、マグネット設置時は、マグネット下部を下からセラミックスダクトにはめ、上部を取り付ける。電流導入端子は左右対称に取り付けられ、片側から電流を導入し、他方はショートコネクターを取りつける。

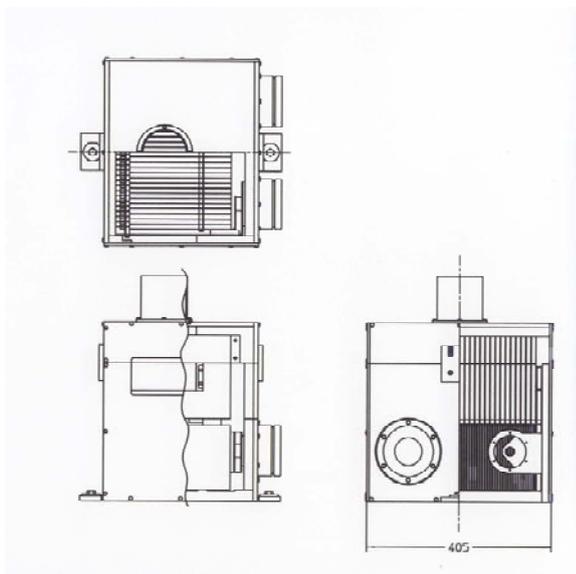


図 6 キッカーマグネット組み立て図

4. 絶縁モールドの技術開発

4.1 初期マグネットと絶縁破壊

以上の設計を元にマグネットを組み立て、キャパシタ部のあるマグネット下部全体をエポキシ剤を使用してモールドした。図 7 にモールド後のキッカーマグネットを示す。

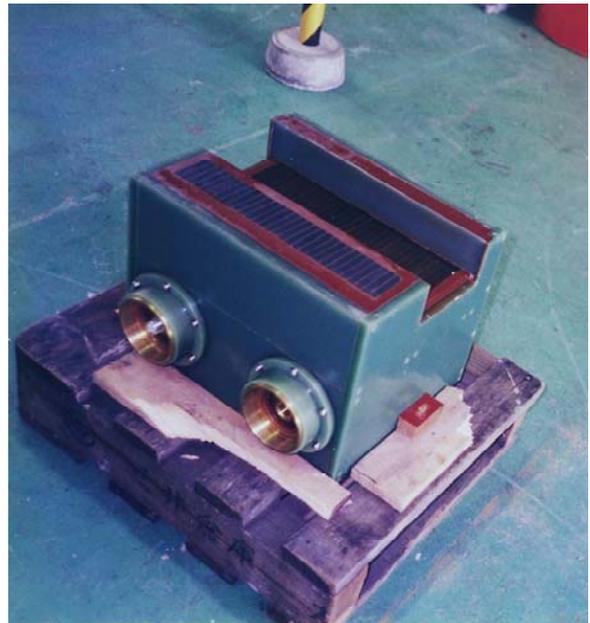


図 7 一体モールドをしたマグネット

しかしこのマグネットは、耐圧試験時に 5KV という低電圧で絶縁破壊を起こした。原因を調べるためにマグネットの外枠を削りモールド部を調べると、内部にエポキシ剤の収縮のために、無数の空隙があいている事がわかった。つまり空隙があくほどエポキシが収縮し内部のセラミックス板が割れていた。

図 8 と図 9 にモールド部にあいた空隙を示す。



図 8 モールド内の亀裂 (前面)



図9 モールド内の亀裂（背面）

このエポキシの収縮によるセラミックス板の割れを防ぐために、マグネット全体をモールドすることをやめて高電圧板、低電圧板、セラミックス板 2枚の 1セルごとにモールドし、絶縁を施したセルを組み立ててマグネットを作ることにした。1枚ごとにモールドすることによりセラミックス板の割れを防ぐとともに、もしセルが絶縁破壊したとしても、破壊されたセルのみ交換できる。図 10 に完成したモールドセルを示す。



図 10 個別にモールドされたセル

しかしこのセルモールドも対電圧試験をすると 10KV 以下の電圧での絶縁破壊が、相次いで起こった。絶縁破壊されたセルモールドを分解して調べると、セラミックス板に穴があいて、絶縁破壊していることがわかった。この時の絶縁破壊したセルを図 11 に示す。



図 11 モールドセル内の絶縁破壊

4.2 絶縁破壊の原因（ボイド）

アルミナセラミックス (KP95) の公称耐電圧は、10KV/mm であり、セラミックス板の厚みは 4mm なので、材料自身の耐電圧 40KV である。しかし製作したモールドセルは、これよりはるかに低い電圧で絶縁破壊を起こしている。この現象を説明するために、しばしば固体の絶縁破壊で問題になるボイド（固体中の微小な気泡）による絶縁破壊、すなわち「モールド中のボイド内で部分放電が、固体（この場合はセラミックス）を侵食していき絶縁破壊を起こす。」という仮定した。それを元に絶縁破壊したセラミックス板を分解し絶縁破壊場所に印をつけたものが図 12 である。

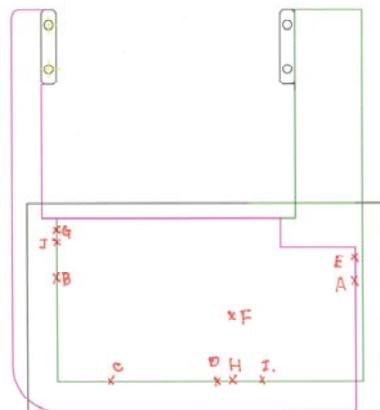


図 12 絶縁破壊箇所

この図は、高電圧板が緑色、低電圧板が赤、セラミックス板が黒で描かれている。また、セラミックス板は高電圧板と低電圧板に挟まれ、図からわかるように高電圧板、低電圧板はずれた位置にあり、高電圧板をモールド剤で埋める事により縁面距離を稼ぐ設計となっている。図をみると絶縁破壊箇所は点 F を除けばすべて高電圧板のエッジ部であり、かつモールド時に気泡が抜けにくい底辺部に多いことがわかる。さらに図の E の点のエポキシ部を実体顕微鏡で見るとその部分に気泡がありそこに黒いカーボンが付着していることがわかった。(図 13)さらに高電圧板のエッジに沿って顕微鏡で調べると絶縁破壊を起こしていない部分に G10 のスペーサーに引っかかったように多数の気泡が残っていることが確認できた。(図 14)



図 13 絶縁破壊部にあったボイド



図 14 高電圧板底辺にあるボイド

4.3 モールドの改良と絶縁破壊

セルをエポキシ剤でモールドするには、2液からなるエポキシの基材を混ぜたのち、一旦真空脱泡し、さらに電極板、セラミックス板をセットした型に入れ、もう一度真空脱泡を施している。しかし、この工程では十分な脱泡ができず、最も電界が高い高電圧板のエッジに気泡が残る。脱泡時間はエポキシ剤の反応時間で決まり、これ以上の時間をかけることはできない。セルの脱泡性をよくするために、高電圧板を船底型にして、さらに高電圧板を浮かすために使用していた、G10 のスペーサーを抜きモールドすることを試みた。

船底型の高電圧板を図 15 に、セルの電極配置を図 16 に示す。



図 15 船底型の高電圧板

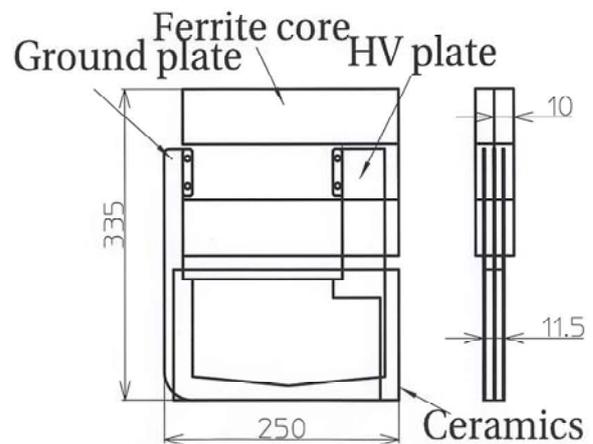


図 16 改良モールドセルの配置

しかし、この時スペーサーを抜いたため、その部分に入るエポキシ剤の量が増え、その部分の局所的な収縮による応力でセラミックス板が高電圧板に沿って割れ、絶縁破壊を起こした。図 17 に高電圧板のエッジに沿って割れ絶縁破壊したセラミックス板を示す。



図 17 収縮により割れたセラミックス板

次にセラミックス板の割れの原因となった部分に、脱泡時に必要な泡の通り道を残し、他の部分にアクリルのスペーサーを入れ、その部分にエポキシ剤の収縮による応力がかからないように工夫して、セルを制作し、耐電圧テストをした。

しかし、今度はアルミナのスペーサーの接着性が悪く沿面放電を起こした。沿面放電を起こしたセルを図 18 に示す。



図 18 沿面放電したセル

以上の結果を踏まえ、モールドセルの製法を再検討し、以下のような改良をした。

1. スペーサーとして薄い G10 の板の両側にガラス繊維シートを重ねたものを使用。
2. セラミックス板と電極板との接着性をよくするためにカップリング剤を使用。
3. エポキシ剤の収縮を抑えるために、アルミナの粉を増量剤として使用。

この改良により、耐電圧試験のような短時間性能は改善された。しかしこのセルでマグネットを組み、通電試験をすると、10 時間ほどの時間で 5 割ほどの高い確率で絶縁破壊を起こした。

絶縁破壊したセルを壊して、高電圧板のエッジ面を丹念に調べると脱泡時の気泡とよりほかに小さいボイドがエッジ面に確認された。図 19 に気泡によるボイド、図 20 に微小なボイドを示す。気泡によるボイドは直径が 1 mm 程度あるにたいし、この微小ボイドは 0.1mm ほどの直径である。

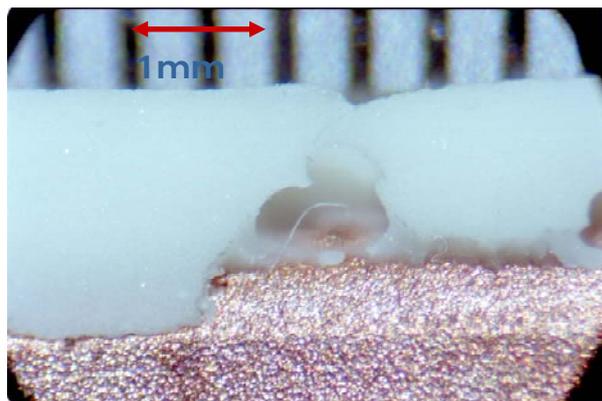


図 19 脱泡時の気泡によるボイド

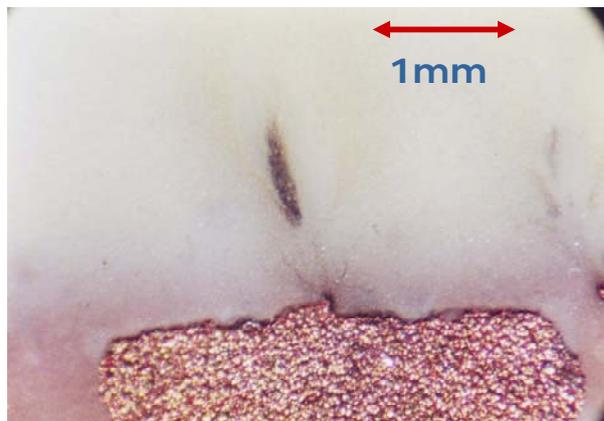


図 20 エポキシ剤の収縮によるボイド

4.4 モールド剤の再検討 とセルの完成

エポキシ剤の収縮できるボイド内に、通電中、微小放電が起こり、そのため長時間通電セラミックスを貫通する穴ができることがわかった。エポキシを使ったセルはエポキシ剤に増量剤 50%入れ収縮率は約 1.5%程度であるが、これ以上の増量剤を入れることは難しいので、ここでエポキシ以外のモールド剤を検討した。そして収縮率は大きいものの柔軟性があるウレタンと収縮率が低いシリコンラバーを新たな候補に選んだ。比較のためのエポキシ（増量剤なし）エポキシ（増量剤 50%）とも表 2 に結果を示す。（強度、接着性は実際にサンプルでテスト）

	ウレタン	エポキシ	エポキシ (増量剤 50%)	シリコンラ バー
体積収縮率	3%	3%	約 1.5%	0.3%
強度	○	◎	◎	○
接着性	×	○	○	◎
耐放射線性	○	◎	◎	△

表 2 モールド剤比較

この結果、シリコンラバーは収縮率も低いうえ接着性もよく、ボイドの発生を抑えかつ沿面放電にも強いことが予想された。シリコンラバーはエポキシよりも耐放射線性に劣るが、PF リングでは軌道面以外の放射線量は低く、設計の段階でモールド部は軌道面を避けていることより問題は少ないため、シリコンラバーを用いたモールドセルを制作し、マグネットを組み立てて通電テストを行った。（スパーサー構造は同じ）シリコンラバー製のセルを図 21 に組み立てたマグネットを図 22 に示す。



図 21 シリコンラバーモールドセル



図 22 キッカーマグネットの組み立て

キッカーマグネットの通電試験は、最高パルス電圧の 15KV で 25 時間行った。通電試験は、予備を含め 150 セルおこない。絶縁破壊したのは、明らかなボイドが残っていた 1 枚のみである。

5. 磁場測定と PF へのインストール

5.1 磁場測定結果

図 23 に伝送線路型キッカーマグネットの測定結果を示す。これはギャップの中心に 1 ターンのサーチコイルを入れ、出力される磁場の微分波形をオシロスコープで積分して計測した。

これによるとパルス幅 $1.4 \mu \text{ sec}$ (10%), 立ち上がり時間 550 nsec (10%–90%) である。

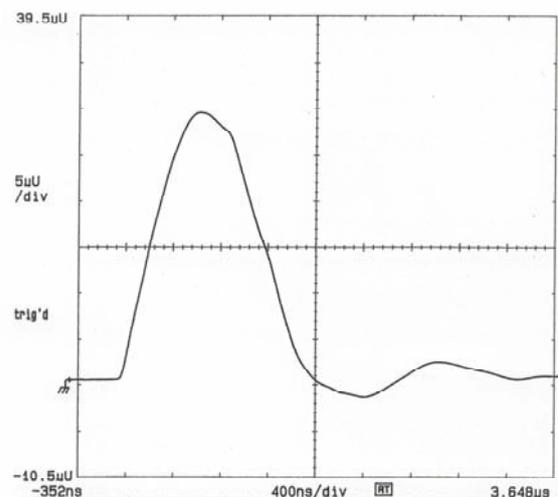


図 23 磁場波形

5.2 キッカーマグネットと電源部

図 24 に設置されたキッカーマグネット (K1) を図 25 に電源部を示す。キッカーマグネットはアルミの外枠に入り、マグネット上部に風冷ダクトを設置して、渦電流によるセラミックスダクトの発熱を抑えている。向って右側のコネクタより電流を導入し左側のコネクタ部でショートしている。また電源部は電源室内におかれパルサー部よりマグネット部まで 50Ω の胴軸線を 8 本つかい 6.25Ω とした伝送線で電流を導いている。



図 24 設置されたキッカーマグネット



図 25 キッカー電源パルサー部

5.3 開発の過程

この伝送線路型のキッカーマグネットの開発は、以下のような経過をとった。

- 1992 年：入射スキームの検討
 - 1995 年：コールドモデル (6.25Ω)
 - 1996 年：実機組立一絶縁破壊
 - 1997 年：セル単位のモールド開発
 - 1997 年：PF リング高輝度化改造
 - 1999 年：シリコンラバーセルの実用化
 - 2000 年：PF リングにインストール
- セルの開発は 1997 年より 1999 年まで続いた。

6. 放射光を用いたパルス波形と入射ビームの振動の測定

PF リングでは、偏向マグネットの B27 から出る放射光を地下実験室に導き光の位置を測定するシステムが開発されている。この B27 は入射バンプ中にあるため、この放射光を使用して、キッカーのパルスと入射ビームの振動を測定した。図 26 に測定システムを示す。B27 より取り出した光をリング地下室まで導き高速ゲートカメラで撮影することにより入射ビームの軌道およびキッカーマグネットの蹴り角を測定する。

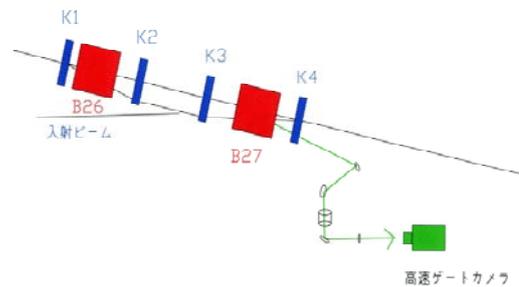


図 26 入射ビームの観察システム

図 27 にこのシステムで測定したキッカーマグネットのパルスを示す。青が水平、赤が垂直のビーム変位を示す。キッカーマグネットのトリガーを遅らせて変位を測定することによりキッカー波形を測定した。これによるとキッカーマグネットのパルス幅は 1.25 μsec となり、磁場測定の値とよく一致している。

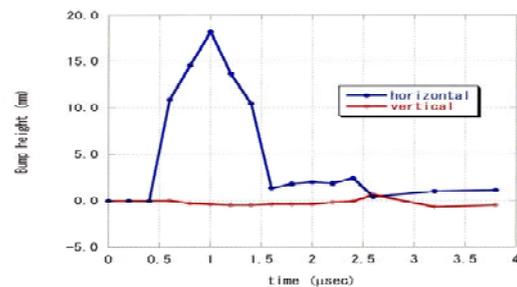


図 27 放射光によるキッカー波形の測定

次に入射ビームの振動を測定したものを図 28 に示す。青で示したものが low emittance optics、赤で示したものが normal emittance である。この図によると、最初の点のみ X 方向に大きく変位しているが、2turn 目からは中心軌道を中心とした振動をしていることがわかる。つまりキッカーによるパルスバンプはビームの 2turn 目以降に影響せず、入射ビームがリングを周回する時間のうちにパルスが切れるという要請を達成していることがわかる。

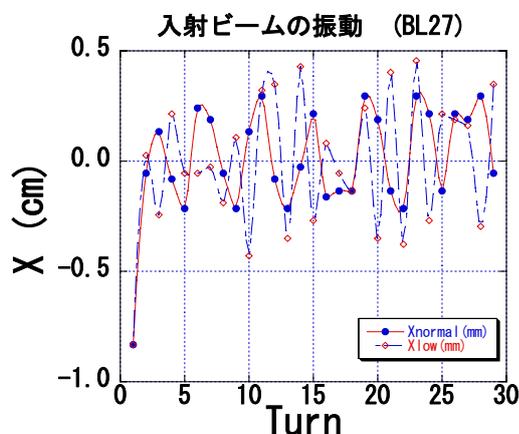


図 28 放射光による入射ビームの振動測定

7. 結論と将来への展望

この伝送線路型のキッカーマグネットは、6.25 Ω の低インピーダンスマグネットを実現して、低い電圧で大きな電流を流すことに成功した。そしてその構造面では、シリコンラバーによるセルモールドにより空気中での使用を可能とし、結果的に非常に狭い空間にマグネットを設置することを可能にした。また、要求されていた立ち下がり時間 600nsec、最大けり角 4mrad の性能を達成し、セラミックスダクトの内面に施された Ti コーティングに発生する渦電流による磁場減衰も、コーティングにスリットを入れる事により解決した。

このキッカーマグネットは現在も PF の入射キッカーとして安定に運転され、12.5pps における入射で最大 1A/sec の入射効率を達成している。またマシンスタディー時においては、このオプティクスで達成できる最少エミッタンス 28nmrad での入射に成功した。

このキッカーマグネットでは、誘電体をキャパシタ部に使用する事とシリコンラバーでの品質の高いモールドにより、マグネットを真空チャンバーに入れずに設置できるコンパクトなキッカーマグネットを構成できた。この方法により結合インピーダンスの低減が必要なリングにおいて伝送線路型のマグネットの使用が容易になった。かつ 6.25 Ω という低インピーダンスにより低い電圧でより大きな電流を流すことに道を開いた。

これらの事から、この技術は将来のダイナミックアパーチャーが小さい放射光リングや、リニアコライダーで用いられるダンピングリングのキッカーマグネットなどの高範囲な応用が可能である。

参考文献

- [1] A.UEDA, T.USHIKU and T.MITSUHASHI "Construction of Travelling Wave Kicker Magnet and Pulse Power Supply for the KEK-Photon Factory Storage Ring" The 2001 Particle Accelerator Conference(PAC2001), Chicago, Illinois, U.S.A., June 18-22, 2001
- [2] A. Ueda, T. Mitsuhashi, K. Harada and Y. Kobayashi "investigation of injection for the low-emittance lattice with new 6.25 Ω kicker magnet system at the photon factory" The 2004 European Particle Accelerator Conference(EPAC2004) 5 to 9 July 2004 at the Lucerne Culture and Congress Centre (KKL), Lucerne, Switzerland

Belle シリコンバーテックス検出器 (SVD) の構造設計と製作

大久保隆治¹、小池重明²、佐藤伸彦³、鈴木純一⁴

高エネルギー加速器研究機構

共通基盤研究施設機械工学センター、SVD エンジニアリンググループ

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

SVD(Silicon Vertex Detector) は高エネルギー加速器研究機構の B-ファクトリーで用いられる測定器の一つであり、電子・陽電子衝突によって生成した粒子の崩壊位置を求める重要な役割を担っている。シリコン基板、セラミックで製作された測定器部分の接着組立と、それを支え位置決めをする構造部分の設計製作と組立について述べる。

1. はじめに

SVDはBファクトリーの Belle 測定器(図1)のなかで最も衝突点近くに設置され、粒子の崩壊位置を高精度に測定するための測定器である。その構造は、ビームパイプの周囲を多角形状に囲んだラダーと呼ばれるシリコン基盤で作製された検出部と、それを支え精度良く位置決めするための構造体より成っている。

我々は1998年にSVD1と称する最初のSVDを製作(ラダー製作技術の開発、構造体の設計製作、構造体へのラダーマウント)し Belle 測定器へのインストールを行った。

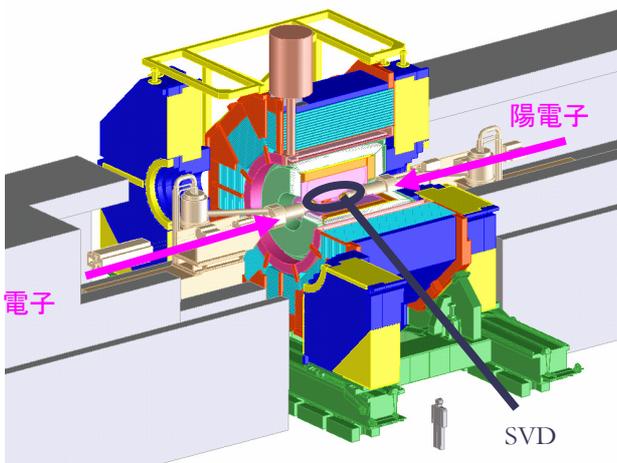


図1: Belle 測定器

その後、幾度かの改良を行ったが、2001年からは大幅な性能アップ(検出率、分解能、耐放射線の向上)を図るため、全面的に設計の見直しを行ったSVD2の製作に着手し、2003年夏に無事インストールを完了させた。今回我々はSVD1の経験を生かしながら、形状の複雑化、ビームパイプの重量増加に伴う構造体の再設計、ラダー構成部品(材料)の変更に伴う新たな接着技術開発など、山積する問題に対し、いかなる工夫を用いて解決したかを、SVD2の製作から Belle 測定器へのインストールまでについて報告する。

2. SVD 構造体の主な構成(図2, 図4参照)

(1)ビームパイプ 内部が 10^{-7} Pa以下の高真空になっていて、電子と陽電子が衝突する。中央部の衝突点付近が最も細く、0.5mm厚のベリリウム製二重管になっていて、堅くて脆いので、できるだけこの部分に応力がかからないことが必要である。

(2)SVDラダー SVDの粒子検出部であり、ここを荷電粒子が通過することによって電気信号が生じる。ビームパイプの周りに衝突点の円周上全てカバーするように多角形状に4層配置され、エンドリングに固定されている。

(3)エンドリング SVDラダーをビーム軸中心に対して $\pm 20\mu\text{m}$ で位置決めしている。また、SVDラダーから発生する熱を逃がすため、 $\phi 4\text{mm}$ の水冷用銅管が導電性接着剤にて取り付けられている。半割りにされた部分の互いの位置関係を保持するため、サポートシリンダーとは共加工した穴にテーパーピンをさして固定している。

(4)アウターカバー 0.5mm厚CFRP製で半円筒形状。SVDラダーに応力が加わらないように、すべての荷重とモーメントをここで受ける。また、組立後のエンドリングに取り付けたフランジに接着固定することにより、製作精度の影響が応力として働くのを防ぎ、かつ分離可能である。物質量が少なく、シリコンと熱膨張率が同等でアルミ合金以上の剛性のものが比較的容易に成形できることからCFRP製にした。

¹ E-mail: ryuji.ohkubo@kek.jp

² E-mail: shigeaki.koike@kek.jp

³ E-mail: nubuhiko.sato@kek.jp

⁴ E-mail: junichi.suzuki@kek.jp

(5)サポートシリンダー CFRP 製円筒に Al 製のフランジをエポキシ接着剤にて接着している。ビーム衝突点側のフランジは、エンドリングとともにピン穴をあけられ、2分割されたエンドリングの互いの位置だしに使われている。また、測定器部からのケーブル、水冷パイプは、ここで一旦固定され、SVD 構造体の外へ引き出されている。

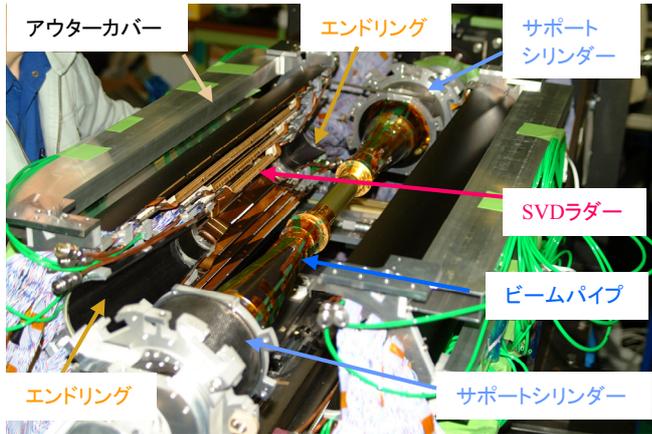


図 2 : 分割された SVD2

	密度 (g/cm ³)	ヤング率 (GPa)	熱膨張率 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 20 $^{\circ}\text{C}$)
シリコン(ラダー)	2.3	110	2.7
CFRP	1.8	160~240	-1.0~1.5
ステンレス鋼	7.8	210	17.3
アルミ合金	2.7	70	23.6
鉄	7.8	210	12.8
チタン	4.5	110	8.6
GFRP	1.8~2	30~40	7~10

図 3 : 材料の物性

3. SVD 構造体の設計・加工

3.1 設計

SVD 構造体の特徴として、次の点が挙げられる。

- 電子・陽電子衝突点に一番近いことから、通過する粒子の散乱を避けるために、物質量を可能な限り減らす必要がある。
- ビームパイプを後から組み込むため、ビーム軸方向に 2 分割できる構造にする必要がある。
- SVD ラダーを固定する面及びピン穴位置には高い精度 $\pm 20 \mu\text{m}$ が必要。
- SVD ラダーを固定する面は、ラダーからの発熱を冷却する必要がある
- 直径 200mm の円筒状の範囲にビームパイプ、測定器、冷却管、信号線が配置され、その他の空いたスペースのみが構造体として利用できる。

以上のことを満たすため、設計の方針として、精密に加工された部品を精密に組み立てるという方法ではなくて一般精度で組み立てられた構造体を必要な部分だけを高精度で仕上げ、その仕上げ状態を維持するという方法をとった。

具体的には、加工治具をラダーマウント治具として使い、最後にビームパイプと入れ替えることとし、精度の必要な SVD ラダー取り付け面を精密加工した。これにより、加工時の精度を SVD ラダー取り付けまで保持することができたが、加工時と SVD ラダー取り付け時のエンドリングの固定条件を同じにするため、片持ち状態で加工する必要が生じ、切削屑の洗浄も念入りにする必要があった。

SVD 構造体の設計に際しては、軽い材料、2 分割で片持ちでの加工という、精密加工に対する悪条件を解決するために、材料の選定から行った。軽くて強度が高い材料として考えたのはアルミ合金であるが、構造解析の結果アルミ合金では強度が足りない事がわかり、より軽くてヤング率が高い CFRP を選択した(図 3)。しかし CFRP を構成する炭素繊維は繊維方向以外では脆いため、

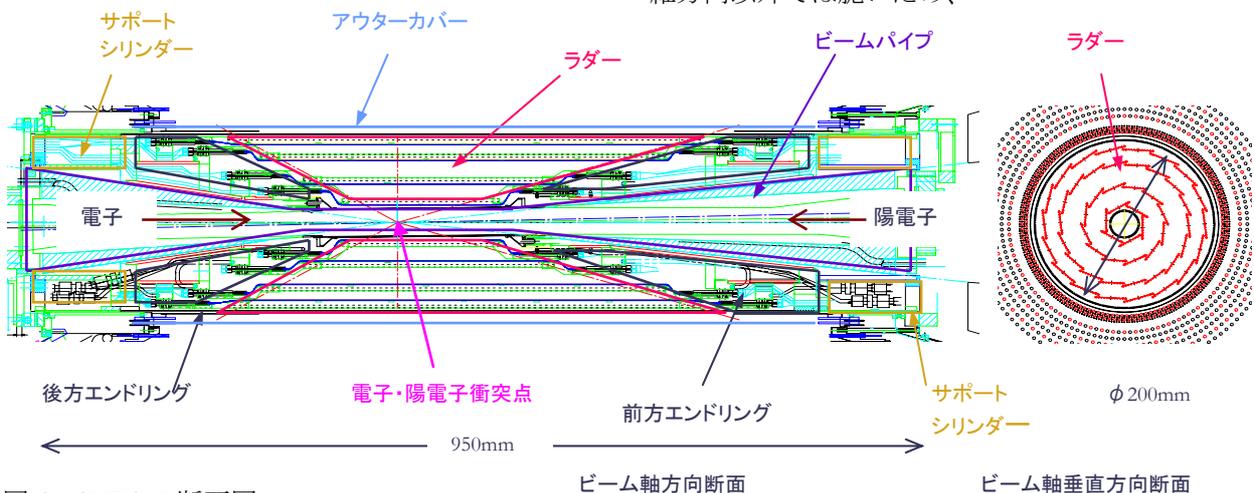


図 4 : SVD2 の断面図

高精度な加工には向いていないので R&D の結果、主要部分は CFRP を使用し、精密加工を行う部分にはアルミブロックを接着したハイブリッド構造にすることにした。

次に形状に関しては、図 4 にもあるように 2 分割されないサポートシリンダーをなるべく衝突点側へ伸ばすことで、2 分割される部分を減らすことにした。

3.2 加工

SVD ラダーを載せる面の面加工は、汎用のエンドミルで粗取りを行い、ダイヤモンドエンドミルによって切込み $10\mu\text{m}$ で仕上げを行った。ダイヤモンドを使用することにより切削抵抗が小さくアルミの溶着が起き難い加工が可能となった。ラダー位置決め用のピン穴加工は、まずセンタードリルという位置出し用のドリルで深さ 3mm 程の穴をあけ、ダイヤモンドドリルで下穴を通し、リーマで穴径を揃えた。

加工時に工夫した点は、1つの SVD ラダーを載せるのに必要な後方(bw)と、前方(fw)の2面を加工する際に(図5下)、エンドミルを、同一平面上のみで動かすようにした。また、加工中に機械の誤差が入らないように、機械のバックラッシュを避けるための動きを入れた。加工プログラムは、粗取り、仕上げで動作が異なるので、加工手順にしたがってプログラムすると、プログラムが大きくなり、加工機械のメモリに入らなくなる。さらに、大きなプログラムはバグや誤動作の原因ともなるので、理解しやすくバグのないプログラムにするために、マクロプログラムを使用し、主要プログラムとサブプログラムに分けることで、実際に誤動作した場合の検証時間が大幅に減少した。

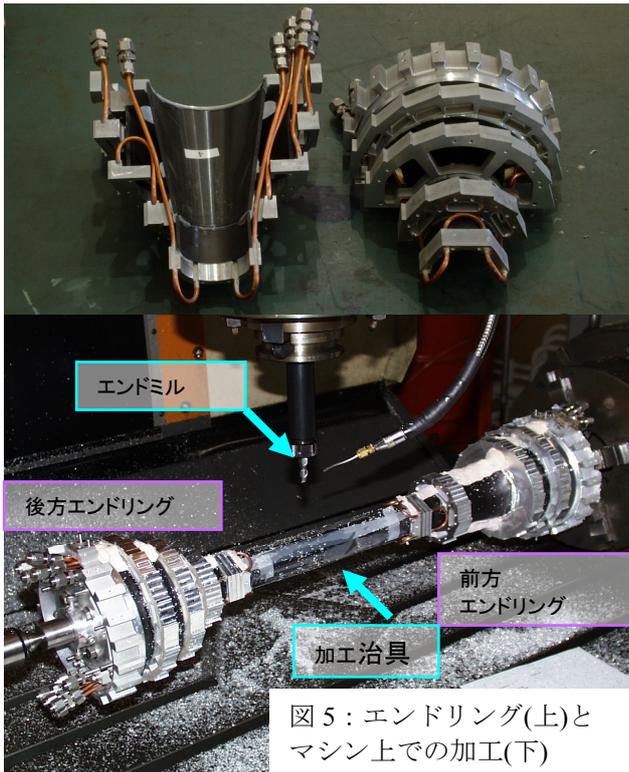


図 5 : エンドリング(上)とマシン上での加工(下)

3.3 測定

加工後の測定は、マシニングセンタにタッチセンサーを取り付け、各加工面の軸からの距離、ラダー位置決め用ピン穴の位置を測定した。その結果、軸からの距離については目標の $\pm 20\mu\text{m}$ を達成することができたが(図6)、ピン穴については粗加工時の切削応力を減らす方法が未解決のため剛性が高い部分では $\pm 20\mu\text{m}$ を達成しているが(図7)、剛性の小さい所での精度が $\pm 40\mu\text{m}$ まで落ちている(図8)。

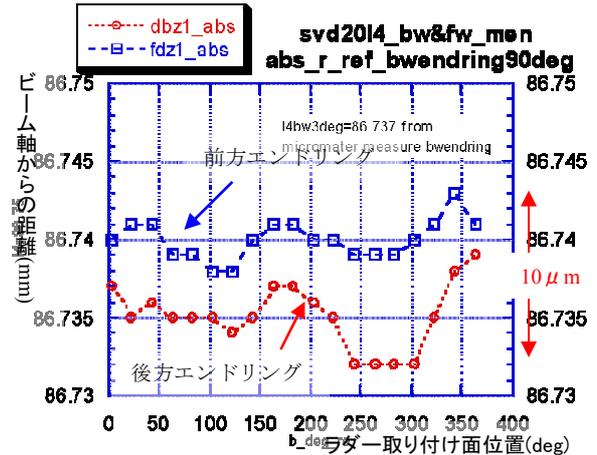


図 6 : ラダーの取り付け面測定結果 (第 4 層)

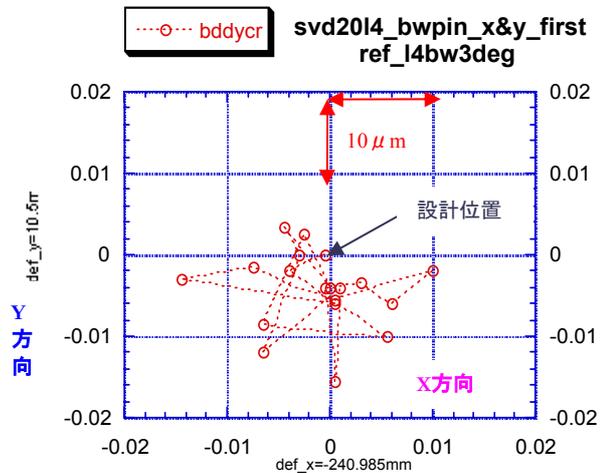


図 7 : ラダー位置決めピン穴位置精度(第 4 層後方)

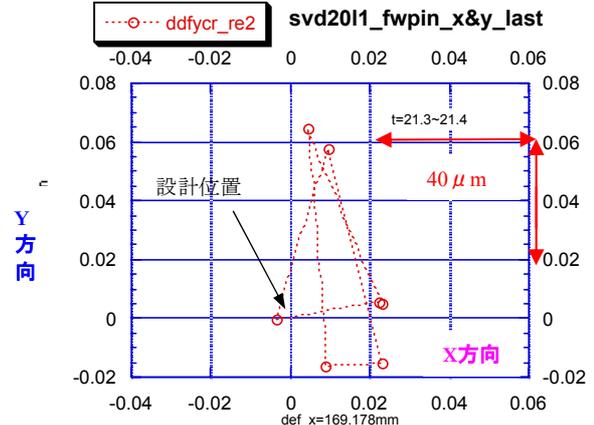


図 8 : ラダー位置決めピン穴位置精度(第 1 層前方)

4. ラダーの接着による組立と構造体への組込

4.1 ラダー構成

SVD1 ラダーの構成を図9に示す。両端部に信号読出用のハイブリッドIC基盤（以下ハイブリッドと呼ぶ）と、ハイブリッドのVAチップから発生する熱をエンドリングに逃がすためのヒートシンクがあり、中央部にDSSD(Double Sided Silicon Detector)と呼ばれる複数のシリコン検出器が複数枚配置されている。各部品は、端部を接着剤で接合し、さらに補強のためにサポートリブ2本を接着している。検出器回路の接続はワイヤーボンディングで行われる。

SVD2 ラダーの構成を図10に示す、SVD1 ラダーと同じく両端部には信号読出用のハイブリッドがあるが、ヒートシンクはなく、熱は台座を通じてエンドリングに逃がされる。中央部にはDSSDが配置され、ハイブリッドとDSSDはフレックスと呼ばれるプリント基盤を介して接着剤にて接合され、さらに補強のためのサポートリブとリブを支えるブリッジと称する部品を接着している。ワイヤーボンディングによって検出器回路へ接続されるフレックスを用いたことがSVD2 ラダーの最大の特徴である。

4.2 ラダー接着治具

SVD1 ラダーとSVD2 ラダーでは部品構成が異なるため、治具そのものを流用することは不可能であったが、基本的な設計方針は同じとした。すなわち、各接着工程別に専用治具を順次製作し、治具へのセッティング方法は簡素化し、各治具同一方法とする。これは、作業者が代わっても同品質の製品を作るための考慮である。また、DSSDの保護のため、接触部にはデルリンを使用すると共に反りが矯正できるように、固定方法は真空チャックとした。

SVD1 ラダー接着治具に求められた性能は、DSSD及びハイブリットを接着の際に接着空間を、一定かつ安定に保つことであった。デルリンは、加工により精度を出すことが困難な材料なため、加工後に接着テストと測定を繰り返し行い、測定結果を基に、治具の傾きや高さ誤差の補正を行った。また、接着剤が硬化するまで真空を引き続けることにより、一定かつ安定した状態を作ることが出来た。

SVD2 ラダー接着治具に求められた性能は、フレックスをDSSDに接着する際に、接着層に気泡を残さずに接着することであった。フレックスの接着面積は最大6500mm²であり、SVD1 ラダーの最大接着面積、ハイブリット同士の接着による1150mm²に比べて、5.6倍の接着面積に対して気泡を残さずに接着しなければならないことになる。しかも、ハイブリットが剛であったのに対し、フレックスは柔であった。

そのため、SVD1 ラダーとは異なる機構の治具の検

討を行ったが、最終的には従来の機構を用いて、接着剤が硬化する前に真空を切るという方法によって接着することが出来た(図11)。

SVD1 ラダーと比べ、SVD2 ラダーでは作業性も重視した。例えば、SVD1 ラダーではDSSDの治具間の移動にはピンセットを用いていたが、専用吸着治具を用いてハンドリングを容易にした。また、パーツ接着治具に接着剤塗布用治具の機能も持たせて治具間での移動回数を減らした。そして、接着後のラダーを安全に運搬するための専用収納箱の製作も行っている。全ての部品を合わせて最終形状にするためのフルアセンブリ治具を図12と図13に示す。

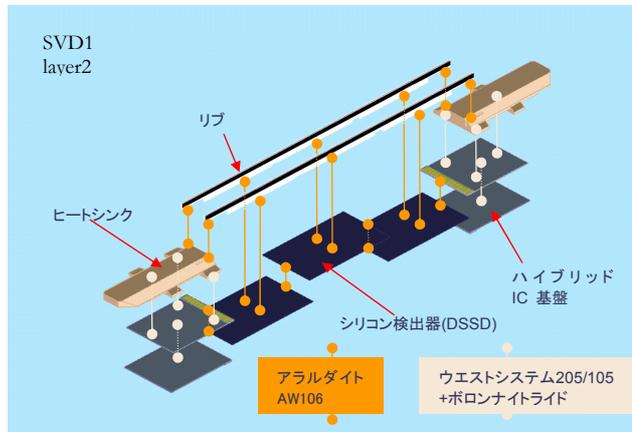


図9：SVD1 ラダーの構成

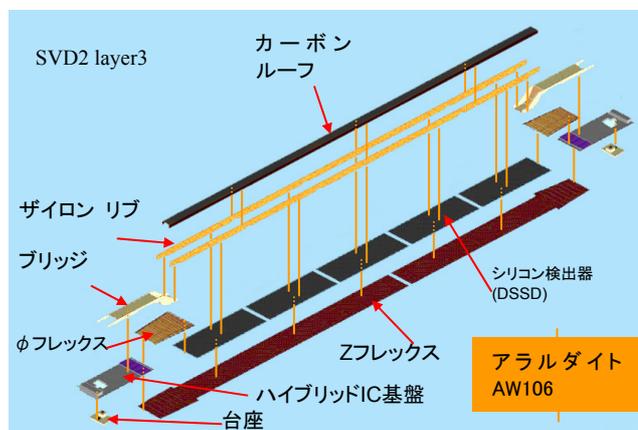


図10：SVD2 ラダーの構成

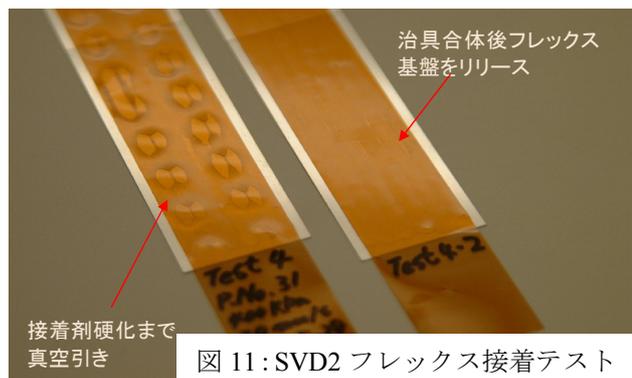


図11：SVD2 フレックス接着テスト

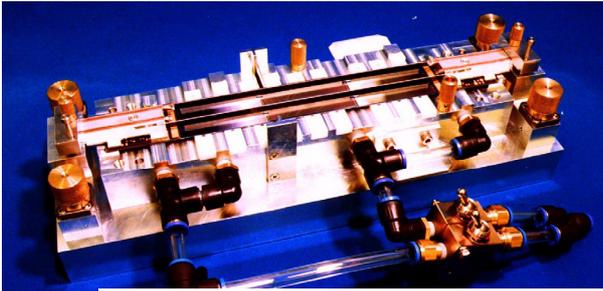


図 12: SVD1 ラダーフルアセンブリ治具



図 13: SVD2 ラダーフルアセンブリ治具



図 14: 完成した SVD1(上)及び SVD2(下)ラダー

4.3 ラダー接着

SVD1 ラダーでは、DSSD どうしを一定の間隔をあけ接着するための接着剤の量コントロール方法を見出すことに重点が置かれた。当初は接着剤ディスペンサーを手持ちで行っていたが、作業者が替わっても安定した接着が出来るよう「接着ロボット」(図 15)を使用することとした。接着強度を充分に出すために $0.1 \pm 0.05 \times 1 \times 27 \text{mm}$ の空間を過不足無く満たす量の接着剤を塗布する方法を確立するまでに半年を要した。シリンジを使って塗布する場合、吐出量は、吐出圧力、気温、接着剤混合後の経過時間、ノズル内径の個体差、ノズル-ワーク間距離及び送り速度、等の影響を受けるため、様々な条件でテストを行っ

た。具体的には、吐出圧力を一定にし、吐出量を比較すると、時間の経過とともに減少することが判ったが、その量を知るために 0.1mm のスペーサーと共にガラス板で挟み、広がった接着剤の面積を計り吐出量を計算した(図 16)。また、気温の違いにより吐出量が異なることは判っていたが、それ以外の要因で吐出量は一定にならなかった。調べてみると、シリンジに使用するノズルはプラスチック射出成型品であったため、ノズル形状が楕円形に変形している等、微妙に異なっており、吐出量に影響を与えていることが判った。このため、本番の接着作業でも毎回ガラス板による挟み込みテストを行い、塗布時の条件を決めるという接着方法になった。また、要求された $0.1 \pm 0.05 \text{mm}$ の精度では接着剤の量を決めることが困難であり、接着治具の校正を行い位置決め精度を向上させた。

SVD2 ラダーになってからは、接着方法が変わり、 $50 \mu\text{m}$ 厚のフレックスを介して DSSD を接着位置決めする構造となった。そのため接着の要領は全く異なったものになった。SVD2 ラダーでは、開発の早い時期より参加した為、SVD1 ラダー製作で得たノウハウを基に、いくつかの作業上の問題点を改善できるような治具設計を行うことが出来た。剛体どうしの接着だった SVD1 ラダーと違い、薄いフレックスを貼り付ける SVD2 ラダーでは接着治具の構造の検討から始めた。接着剤の量は、できるだけ少なく、且つ気泡が混入しない、という要求を満たす条件を見つけることが出来た(前節参照)。先行試作治具によりテストを重ねた結果を基に接着治具を開発した。

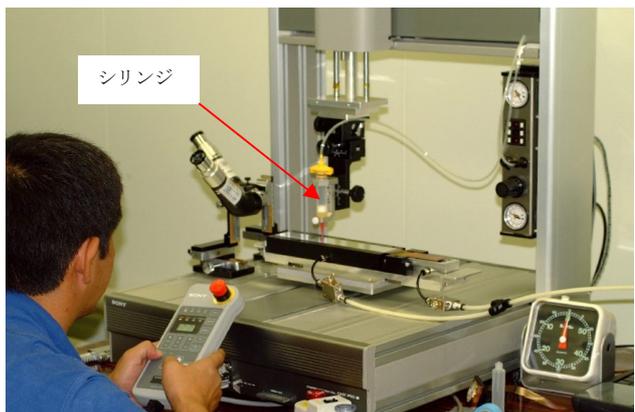


図 15: ロボットを用いた接着剤の塗布

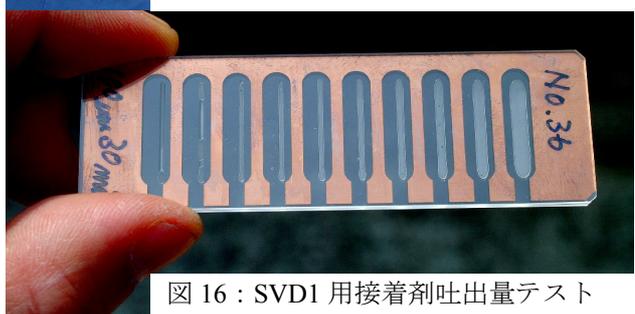


図 16: SVD1 用接着剤吐出量テスト

4.4 ラダー組み込み

エンドリングへのラダーの取り付けは、アセンブリベンチ上にラダーマウントジグを設置し作業を行った(図 17)。SVD1,2 ともに背板を介してラダーをアーム先端に取り付け、割り出し盤とピンによって角度位置決めされた構造体へ X 粗動レールで接近させ、XYZ 微動テーブルで隣のラダーに接触しないように確認しながらピン穴位置まで移動させて、ピンで位置決めし(図 19)、ねじでトルク管理して固定した(図 20)。隣のラダーとの距離は最小 1mm で複雑に重なっているため一方から近づけることができず、また、露出したワイヤーボンディング(図 22)に接触しないように確認しながらの作業となったので 1 枚の取り付けに 0.5~2 時間かかった。SVD1 では取り付けアーム先端と背板をネジ止めしていたので、2 人で行う必要であったが、SVD2 ではアームへのラダーの取り付けにクイックチェンジを使用することにより 1 人でできるようにした。しかし、SVD2 では 2m の信号線が付いたままのマウント作業であったため新たに 2 名が必要となり、結局 3 人でのマウントとなった。また、SVD2 はラダー全長が長いため、XYZ の微動の他にピッチ方向の微動機構を加えてある。

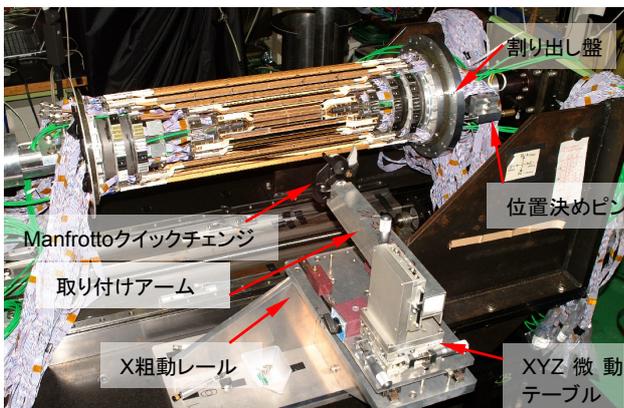


図 17 : SVD2 アセンブリベンチ



図 18 : SVD2 ラダーの組み込み作業

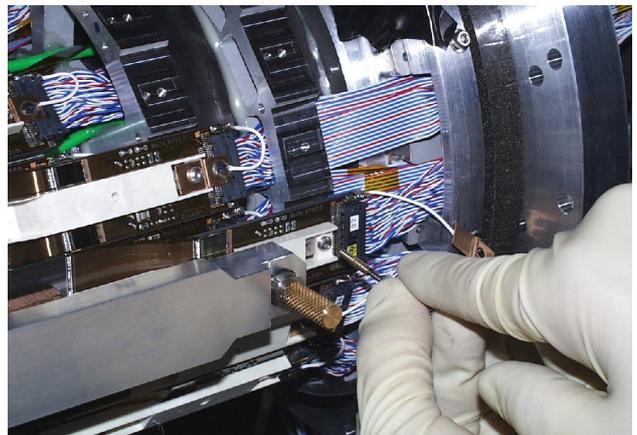


図 19 : ピンによるラダーの位置決め

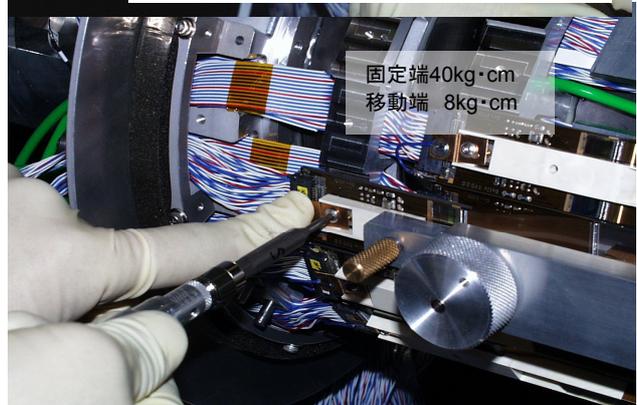


図 20 : トルク管理によるラダーの固定



図 21 : フルマウント終了時

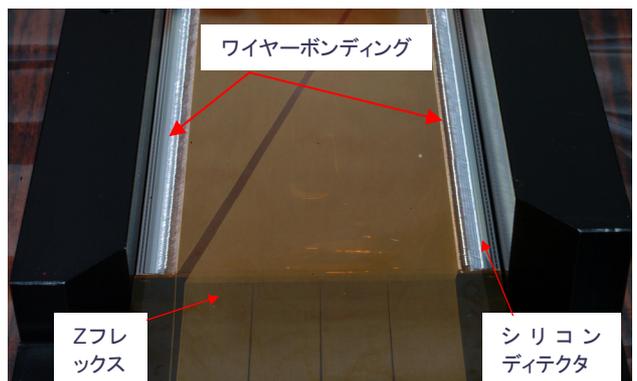


図 22 : ラダーのワイヤーボンディング

5. Belle 測定器への設置

5.1 ビームパイプの SVD 構造体への組込

SVD ラダーのマウントが終了した段階では、全体はビームパイプのあるべき位置にある加工治具によって支持されているので、SVD を 2 分割し加工治具をビームパイプに置き換える必要がある。そのため、ラダーマウント後、SVD にアウターカバーを取り付け、分割治具で補強し、加工治具なしでも精度を保てるようにした後、レール上で分割治具を支持しマイクロメーターヘッドで押して移動量をコントロールしながら分割し加工治具からはずした。その後、加工治具をビームパイプとサポートシリンダーを置き換え SVD ラダーがビームパイプに接触しないように細心の注意を払いながら SVD を元に戻しサポートシリンダーと結合し、テーパピンを用いて再位置決めをした。(図 23)。

ビームパイプの構造は、中央約 250mm がベリリウム二重管できていて、その両側にタンタル、タングステンでできた片側約 20kg のパイプが接合された形になっている。その接合部がもっとも弱く、設計上、片持ち不可とされており、また、両端支持でも、支持点をフランジ外側にとると壊れる恐れがあるので、フランジ内部に軸を迫り出させて支持点を重量部の重心に近づけた。

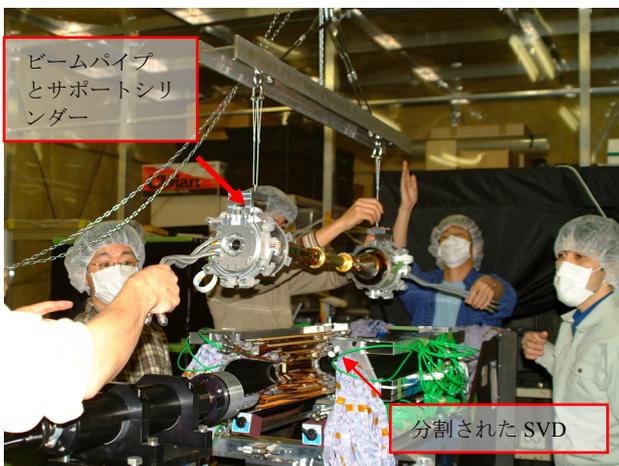


図 23 : ビームパイプの SVD 構造体への組み込み

5.2 Belle 測定器への固定方法

SVD は Belle 測定器の CDC(Central Drift Chamber) 内部に設置される。SVD1 での SVD 構造体とビームパイプの支持方法の概略を図 24 と図 26 に示す。SVD 構造体は、基本的には三点支持(両端支持はりと同等)として、自重による応力以外加わらないようにしている。そして、片側の一点に軸方向の拘束点を設けている。ビームパイプは、片側を板バネ(厚さ 1mm アルミ板) 支持、もう一方をスライドとして、CDC に取り付けるときに中央部分に応力が加わらな

いようにしている。また、ビームパイプと SVD は、取り付け部にエンジニアリングプラスチックである PEEK を使用して CDC から電氣的に絶縁している。

SVD2 では、ビームパイプの設計変更による重量増(10kg→40kg)に対応するため構造解析により支持方法の強化の検討をおこなった結果、両サイドとも 1.5mm×2 の二重板バネにする事により、ビームパイプの自重による変形量が 0.2mm 以下で軸方向の力に対する抵抗力が 0.01mm/kg という目標値を達成できた(図 25)。

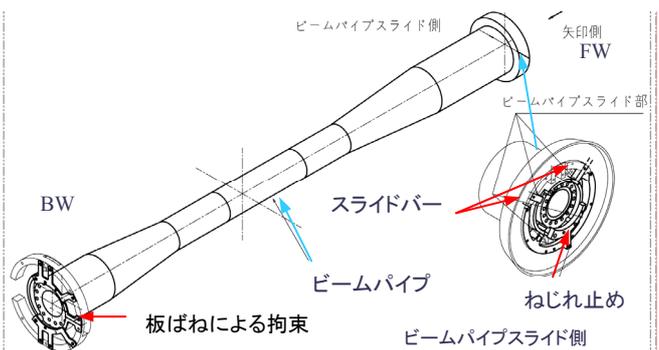


図 24 : SVD1 ビームパイプ支持方法

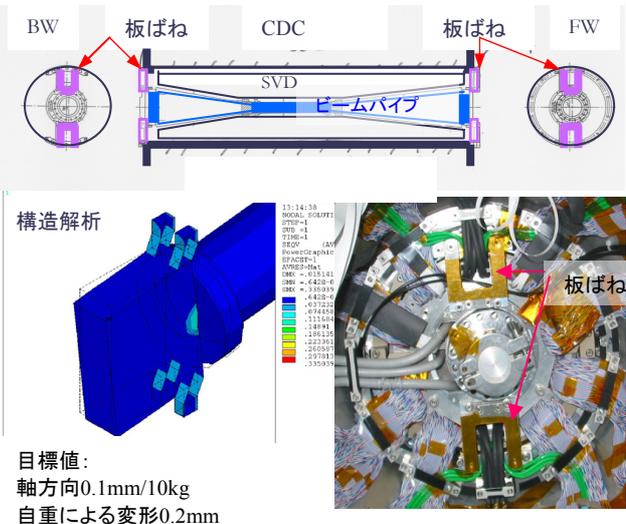


図 25 : SVD2 ビームパイプ支持方法

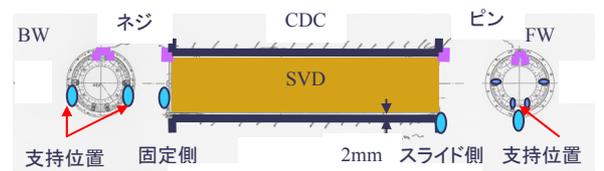


図 26 : SVD1 支持方法

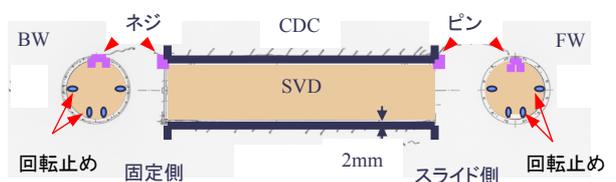


図 27 : SVD2 支持方法

SVD2 構造体の固定は、固定スペース狭くなったのと、設置後の再位置決めをしないことになったので、SVD2 構造体は二点支持で上から釣り下げられ、片方は軸方向固定で、もう一方は滑るようにし、回転方向は周りから支持バーを当てることによって止める、という方法に変更した(図 27)。

5.3 Belle 測定器への設置方法

○ 檣(そり)を用いた設置方法

下記の設置作業時の要求を満足するために、SVD 構造体を檣に乗せて樋と呼ばれるルール上を滑らせて設置する方法を考えた。

- ・ SVD 構造体と Belle 測定器との隙間は約 2mm
- ・ SVD 構造体には両端で支持する際の自重による応力以外かけない
- ・ 限られた作業スペースでの設置

SVD 構造体が載る檣の厚さは、1mm 以下であることが望ましかったが、構造解析による計算で、厚さ 0.8mm の SUS を半円筒状に曲げてリブの補強を施すことにより、設置作業時の檣の最大変形量を 0.2mm 以下にすることができる事が分かったので、その形状に決定した(図 28)。

○ 設置手順と固定

檣にのせられた SVD 構造体は、檣がその上を滑る樋、移動治具と共にクレーンで Belle 測定器前に移動(図 29①)、設置され(図 29②、図 30)、檣を Belle 測定器反対側よりロープ及び棒で、ストッパー兼位置決めに接触するまで引っ張って測定器に挿入される(図 29③)。位置決め位置では、0.5mm 程度檣から SVD 構造体が浮くようになっており、檣が抜きにくくなることを避けている。その後 SVD 構造体、ビームパイプの順に上部で別々に固定し、檣を抜いてから下部を同様に固定する。このようにして、SVD2 に加わる力をできるだけ抑えた設置が実現できた。

6. まとめ

工作センター(現、機械工学センター)で SVD 構造体の設計が始まったのは 1995 年であった。そして、1997 年からは試作と製作を開始し 2003 年までに SVD1 シリーズ 4 台、SVD2 を 2 台(それぞれ試作を含む)製作した。構造体の設計から始めて構造体の製作・加工、ラダーの接着組み立て技術の確立と企業と大学への作業指導、構造体へのラダー取り付け及びビームパイプの組み込み、Belle 測定器への設置方法と測定器内での支持方法の考案、そして設置作業と、様々な作業があったが、それに伴う種々の問題を創意工夫で解決し今のような成果を上げることが出来た。これからも、この開発で得られた経験を生かして行きたい。

謝辞

今回技術賞論文まとめるにあたり、Belle SVD グループの方々には助言、手助けをいただきましたことに心より感謝いたします。

参考文献

- [1] S. Koike, J. Suzuki, Y. Yamada, Design and Construction of a Structure for Silicon Vertex Detector, KEK Proceedings 99-16 November 1999 A/H/D
- [2] R. Ohkubo, N. Sato, M. Iwai, Development of Fabrication Technology of SVD Ladders in the BELLE Detector, KEK Proceedings 99-16 November 1999 A/H/D

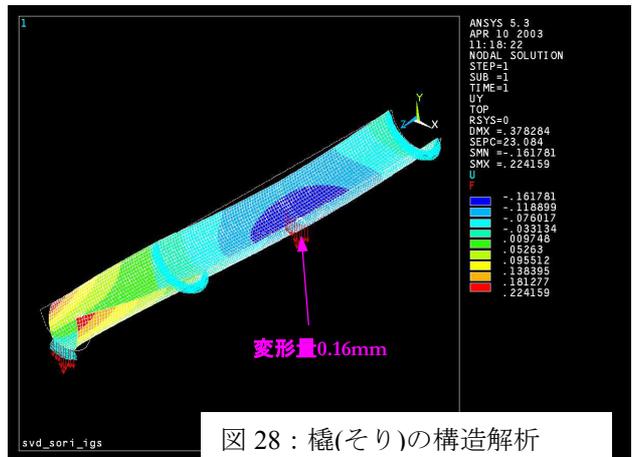


図 28 : 檣(そり)の構造解析

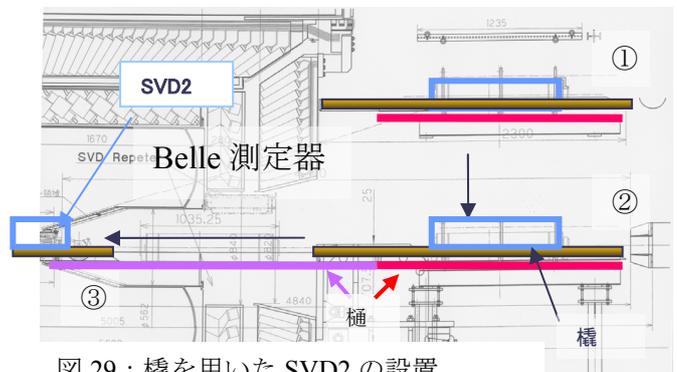


図 29 : 檣を用いた SVD2 の設置

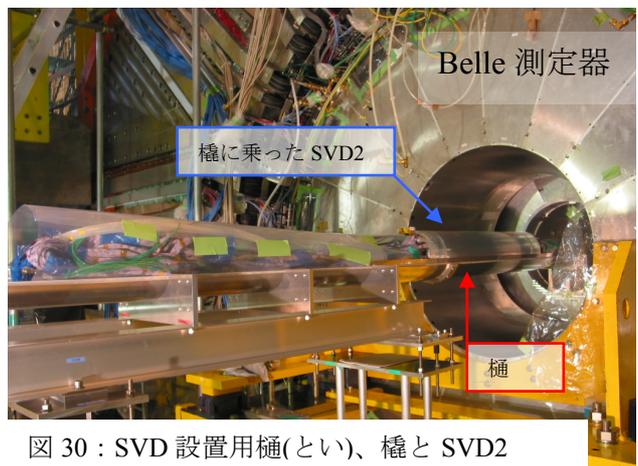


図 30 : SVD 設置用樋(とい)、檣と SVD2

平成16年度受賞論文

該当なし

平成17年度受賞論文

1. 大強度高周波加速空洞の空気冷却装置の開発
戸田 信（加速器研究施設）
2. パイプライン機能とネットワークインターフェースを持つ
高速CAMACインターフェース
安 芳 次、井 上 栄 二（素粒子原子核研究所）
3. ブースター周辺のモニター開発
染 谷 宏 彦（加速器研究施設）

大強度高周波加速空洞の空気冷却装置の開発

戸田 信

高エネルギー加速器研究機構

加速器研究施設、加速器第4研究系・高周波加速グループ

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

KEK-PS の高周波加速システムは、その加速空洞にフェライトコアを使ったもので、PS の建設以来 30 年以上にわたり運転されてきた。

近年、フェライトの代わりに金属磁性体を使った高周波加速装置が有望であることが知られようになり、グループでも研究・開発を行ってきたが、この程ブースタ加速器用の新加速装置の開発に成功し、ビーム加速及び共同利用運転に供することができた。

金属磁性体は、加速空洞に使うにあたり、フェライトと違い形状や導電性を持つ等の性質で扱いにくい点があったが、KEK-PS ブースタでの使用には、空気冷却で対応出来ることがわかり、強制空冷式の加速空洞の開発に至ったものである。

新加速装置は、空冷式である他に、増幅器の回路構成とあいまって広い周波数帯域を持ち、更に大強度のビーム加速に対応出来るという特長を持つ。その為、従来のシステムにあった空洞の共振周波数をビーム加速の周波数に合わせて自動的に同調させていくフェライトバイアス電流が不要になった。

この結果、従来の加速空洞で発生した漏水事故やフェライトバイアス電源関連の故障がなくなり、信頼性が大幅に向上した。

また、この新加速装置によるビーム加速においては、上記特長を反映して空洞に基本波の高周波と共に 2 倍高調波を重畳して加えることが出来た。これらの結果は、ビームの加速開始時におけるビームロス的大幅な減少、ビーム強度の大幅な増加、システムの安定性の向上、故障によるダウンタイムの減少に表れている。

1. はじめに

KEK-PS 高周波加速グループでは、以前から加速装置の広周波数帯域化、大電流のビーム加速を可能にするシステムの開発を目指してきた。

KEK-PS の高周波加速装置は、フェライトコアを使った加速空洞で、PS の建設以来 30 年以上にわたり運転されてきた。この従来の加速装置では、磁性体の特性やフェライトバイアス電流の自動同調システム等の制限で、ビームローディングにシステムが追従できない等の問題があった。この為、ビームの加速開始のところでビームロスが避けられなかった。

また、特にこのフェライトバイアス電流フィードバックシステムは、電流が比較的大きいこともあり、故障、トラブルが多かった。

この度、高周波加速グループでは、フェライトの代わりに金属磁性体 (Magnetic Alloy:MA) を使った加速空洞をはじめとする新たな加速装置を開発した。

新加速装置は、MA の特性を生かして広い周波数帯域をもち、大電流ビームに対応出来る加速装置となっており、空洞の共振周波数自動同調システムは必要としない。

新加速空洞は、空気中で磁性体を冷却している。

ここでは、強制空冷式の加速空洞、及び空気冷却装置の開発について報告する。

2. 金属磁性体 (MA) の特性

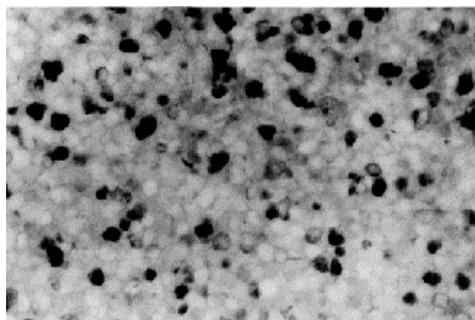
MA は、アモルファスとは違い微細な結晶構造を持つ金属磁性体である。構造は、薄いリボン状でそれを巻き枠に巻いてコア状にしている。

新加速装置の特性を決める重要な要素である磁性体の特性について以下に示す。

MA の特性

本加速装置に使用した MA (ファイナメット) は、コバルト基のアモルファスに熱処理を行って微細構造の結晶を形成させたもので、結晶粒は、およそ 10nm となっている。(図 2-1)

組成: Fe-Cu-Nb-Co-B



20μm

図 2-1 金属磁性体微細構造*1)

この MA の特長は、高い比透磁率を持ち、低磁歪で、温度特性、周波数特性が良く、また、アモルファスが経時変化に弱いのに比べて、非常に安定していることがあげられる。図 2-2 に MA の比透磁率の周波数特性、図 2-3 に経時変化特性を示す。

*1) 日立金属株式会社ホームページより

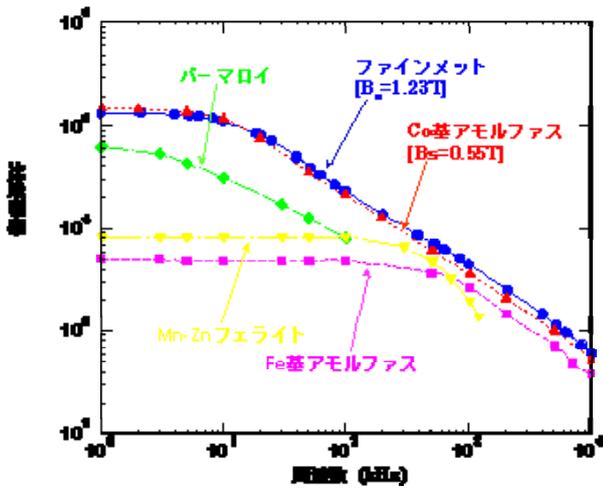


図 2-2 MA の比透磁率の周波数特性*1)

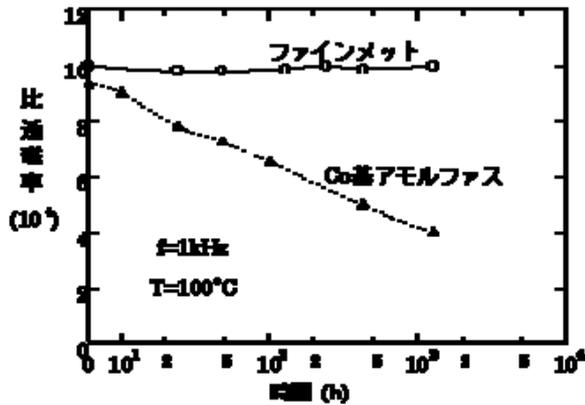


図 2-3 MA の経時変化特性*1)

MA コアの形状

MA コアは、幅 25mm、厚さ 20 μ m のテープ状の磁性体を SUS の巻枠に巻いたもので、内径 330mm、外形 700mm である。

空洞 1 台には、7 枚のコアを 5mm 間隔で組み込んでいる。図 2-4 に MA コアを空洞に組み込んでいる状況を示す。



図 2-4 磁性体スタック

3. 空冷式加速空洞の構造

空気冷却の仕組み

磁性体コアを冷却する為の空気の流れを図 3-1、及び図 3-2 に示す。冷却空気は、空洞の加速ギャップ部の下部から導入し、加速ギャップ部を冷却しながら加速管とコアとの間を通過してコアの内側に入る。そこからコアとコアの 5mm の空隙を通過してコアを冷却しながら外径方向に流れる。コアの外径側にたまった空気は、空洞の上部と下部にある 2 つの排気孔から外に導きだされる。

排気孔から出た空気は、空気冷却装置の熱交換器で冷やされ、再び冷却空気として空洞に供給される。

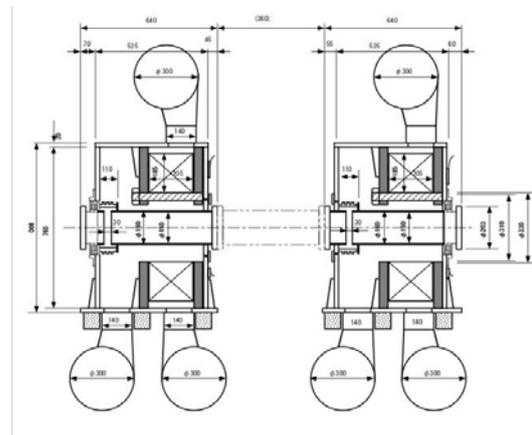


図 3-1 空洞構造概要

コアの冷却計算

図 3-2 は、コアの冷却計算のモデルである。以下、このモデルに基づいて行った計算を示す。

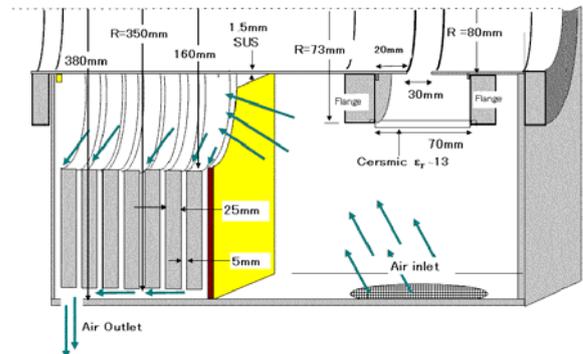


図 3-2 冷却計算モデル

空気流量 Q_a [m³/sec], コアでの消費パワー P [kW], 空気の温度上昇を ΔT_a [K] とすると次式が成り立つ。

$$P = 4.18 \cdot c \cdot \rho \cdot Q_a \cdot \Delta T_a$$

$$= 1.2 Q_a \cdot \Delta T_a \quad [\text{kW}]$$

ここで空気の比熱 $c = 0.24 [\text{cal/g} \cdot \text{K}]$ 、空気の密度 $\rho = 1.2 \times 10^3 [\text{g/m}^3]$ である。

ここから

$$Q_a = 0.83 P [\text{kW}] / \Delta T_a [\text{K}] \quad [\text{m}^3/\text{sec}]$$

または、

$$\Delta T_a = 0.83 P [\text{kW}] / Q_a [\text{m}^3/\text{sec}] \quad [\text{K}]$$

を得る。

従って、 $P = 12 \text{kW}$ 、 $Q_a = 1 [\text{m}^3/\text{sec}]$ とすると、 $\Delta T_a = 10.0 [\text{K}]$ となる。

7枚の磁性体の間を流れる空気の平均の断面積は、その幅 d を 5mm とすると次式で与えられる。

$$D = 8 \cdot d \cdot 2\pi(R_1 \cdot R_0)^{1/2} = 0.062 [\text{m}^2]$$

空気の平均流速は、流量 $Q = 1 [\text{m}^3/\text{sec}]$ とすると、 $V = Q_a/D = 16 [\text{m}/\text{sec}]$ となる。

ここで熱伝達係数 $\alpha = 0.06 [\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ 、磁性体表面積(側面)を $S_M = 7 \cdot 2 \cdot \pi(R_0^2 - R_1^2) = 4.0 [\text{m}^2]$ とすると、

磁性体表面と空気の温度差は、

$$\Delta T = (P [\text{kW}] / S_M [\text{m}^2]) / \alpha [\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$$

$$= 50.0 [\text{K}]$$

となる。

従って、コアの入り口での空気温度を T_{IN} とすると出口のコア表面温度 T_{FM} は、

$$T_{FM} = T_{IN} + \Delta T_a + \Delta T$$

$$= T_{IN} + 10.0 + 50.0 \quad [\text{K}]$$

$$= T_{IN} + 60.0 \quad [\text{K}]$$

となる。

次にコア内部の温度を見積もる。パワー密度を P_0 、 x をコアの側面からの軸方向の距離、 k を熱伝導率 ($=10 [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$) とすると温度 T は、次式で表される。

$$d^2T(x)/dx^2 = -1/k \cdot p_0$$

従って、表面温度を T_{FM} とすると、

$$T(x) = T_{FM} + P_0/2k \cdot (D^2/4 - x^2)$$

となる。

コアの厚さ $D = 0.025 \text{m}$ 、コアの容積を $V_c = 7 \cdot D \cdot \pi(R_0^2 - R_1^2) = 0.05 [\text{m}^3]$ とすると、

パワー密度は、

$$P_0 = 240 [\text{kW}/\text{m}^3] \quad \text{を得る。}$$

従って、コア中心の最大温度は、

$$T_{CM} = T(x=0) = T_{FM} + 1.9 = T_{IN} + 61.9 [\text{K}]$$

となる。

コアを冷却して暖かくなった空気は水で冷却する。温度上昇を ΔT_w とすると冷却するパワーは、次式で与えられる。

$$P = 4.18 \cdot c_w \cdot \rho_w \cdot Q_w \cdot \Delta T_w$$

ここで、水の比熱は、 $c_w = 1 [\text{kcal}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ で、水の密度は、 $\rho_w = 1000 [\text{kg}/\text{m}^3]$ である。

従って、水の温度上昇は以下の様になる。

$$\Delta T_w = P / (4.18 \cdot c_w \cdot \rho_w \cdot Q_w) \quad [\text{K}]$$

ここで、 $Q_w = 50 [\text{l}/\text{min}] = 8.33 \cdot 10^{-4} [\text{m}^3/\text{sec}]$ とすると

$$\Delta T_w = 3.4 [\text{K}] \quad \text{を得る。}$$

以上の計算より、 T_{IN} を 30°C に設定すると、コアの最大温度は 92°C で、コアを冷却する空気の温度は、 30°C から 40°C となる。また冷却水は、 20°C から 23.4°C になる。

そこで、対数平均温度差 $\Delta\theta_M$ は、

$$\Delta\theta_M = ((40-23.4)-(30-20)) / \ln((40-23.4)/(30-20)) = 13.0 [\text{K}]$$

となる。

熱交換係数を k 、熱交換面積を A とすると、熱交換量 Q は、

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta\theta_M$$

と表わせる。従って、

$$k \cdot A = Q/\Delta\theta_M = 0.92 [\text{kW}/\text{K}] \quad \text{となる。}$$

選択した熱交換機は、 $k = 0.699 [\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ 、 $A = 8 \cdot 0.465 [\text{m}^2]$ の製品で、

$$k \cdot A = 2.6 [\text{kW}/\text{K}]$$

となり、十分なマージンがある。

空洞構造

空洞の構造を図 3-3 に示す。

空洞は2台一組となっており、一台の高周波増幅器から高周波電力が供給される。

空洞外寸は、横 800mm x 高さ 800mm x 縦 520mm 程度の箱型をしている。空洞一台に一つの加速ギャップがあり、MA コアが7枚格納されている。

コアは、FRP の板と FRP のボルトでサンドイッチしてある。更に内径部の上部にある2本の太い FRP のボルトでコアの巻枠を内側から支えている。これは、コアに余分なストレスを加えない為である。

加速ギャップの下部にある長穴の吸気口から冷却空気が入り、加速管とコアの内径の間を通過して、コアとコアの隙間を流れて外径側に出る。コアとコアの隙間は、 5mm である。外径側に出た空気は、空洞の上部と下部の2ヶ所の排気孔(長穴)から外に出て、空気ダクトで熱交換器にもどされる。空気ダクトの径は 300mm である。

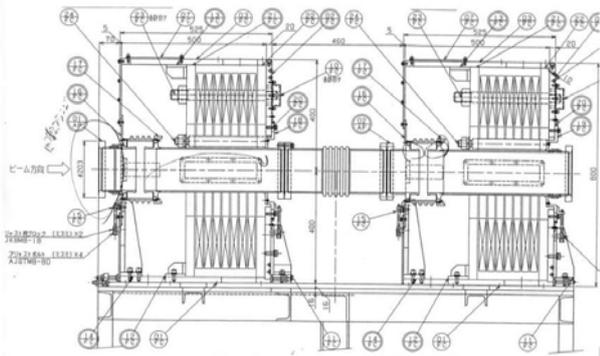


図 3-3 空腔構造詳細



図 4-1 空気冷却装置

加速管

加速管は、内径 150mm の円筒型で 30mm の加速ギャップをもつ。材質は、SUS で高周波電流が流れる部分は銅メッキを行った。セラミックスとの接合部分にはチタンを使っている。

図 3-4 に加速管のギャップ部を示す。



図 3-4 加速管ギャップ部

4. 空気冷却装置

空気冷却装置は、空腔を冷却して戻ってきた熱い空気を冷却水で冷やす熱交換器と冷えた空気を空腔に送り込む送風機、及び送風機を動かす電動機からなる。また、内部には、空気フィルター、風量を調節するダンパー等がある。

空気を送るダクトは、送り側を 1 本、戻り側を 2 本にしている。これは、空腔の中の磁性体を冷却した熱い空気がスムーズに空腔外に排出できるようにする為である。

図 4-1 に空気冷却装置を示す。

熱交換器

(1) 設計条件

熱交換器の選択を行うにあたり、以下の設計条件を用いた。

空気流量 (Q)	3600	[m ³ /hour]
空気温度 入口	40.0	[°C]
出口	30.0	[°C]
全負荷 (TH)	12.0	[kW]
冷却水 流量	50.0	[l/min]
入口	20.0	[°C]
出口	23.4	[°C]

(2) 冷却コイル選定

冷却コイルの選定は、上記設計条件により前節の計算を元にして製品選択を行った。

仮定コイル	18 N 列 x 760 x 16 段
管内径	8 mmφ x 1 t Al フィン
面積 (FA)	0.465 [m ²]
風速 (FV)	Q/(3600xFA) = 2.15 [m/sec]
伝熱係数 (k)	699 [W/m ² · K]
管 1 本流量	6.2 [l/min]
流速	0.56 [m/sec]
ぬれ面係数 (Cws)	1.0
対数平均温度差 (ΔT)	13.0 [K]

この仮定品のコイルを元に前節の計算から、対数平均温度差を 13[K] とすると、使用列数は、

$$N = TH / (k \cdot Cws \cdot FA \cdot \Delta T) = 3.55$$

となり、仕様を上回る製品として 8 列の冷却コイルを選択している。

送風機

送風機を選択に当たり、風量、風圧を決める必要がある。必要な風量はこれまでの計算で決まったが、風圧を決めるにあたり、流路の圧損の概略計算を行った。計算は、非圧縮性流体の定常流の損失を表したベルヌーイの式 (Bernoulli's equation) を元に行った。今回の装置は、空気であるので適用できないかもしれないが、概略を知ることが目的で、精度は求めないという方針である。

(1) 磁性体スタックの入口

空洞に空気を送り込み磁性体スタックへ導く。この時の空気流路の急収縮が減圧となる。

減圧 Δp_1 は、ベルヌーイの式より、流路が水平で非圧縮性の定常流の場合に以下の式が適用できる。

$$\Delta p_1 / (\rho \cdot g) = h_1 \quad [\text{m}]$$

ここで、 Δp_1 は圧力損失、 ρ は空気の密度 ($1.2 [\text{kg}/\text{m}^3]$)、 g は重力加速度 ($9.8 [\text{m}/\text{sec}^2]$) である。

一方、Darcy-Weishbach の式より、管摩擦損失は、 $h_1 = \lambda_1 \cdot u_1^2 / (2 \cdot g)$

で表される。

λ_1 は摩擦係数で u_1 は絞り込み後の空気速度である。

ここで、縮小断面の比より、急縮小管の収縮係数と損失係数 (図 4-2) から摩擦係数を得ることが出来る。

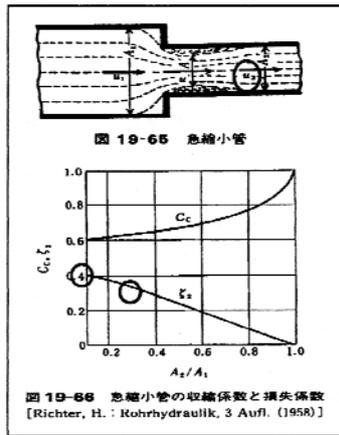


図 4-2 急縮小管の収縮係数と損失係数

空洞内の断面積は、 $Sg_1 = 0.76 \times 0.76 = 0.58 [\text{m}^2]$ 加速管とスタック間の空気流路の断面積は、

$$Sg_2 = \pi(0.162 - 0.082) = 0.06 [\text{m}^2] \quad \text{となる。}$$

従って、 $Sg_2/Sg_1 = 0.1$ の時の λ_1 は、図 4-2 から約 0.4 を得る。

ここでの空気流速は、 $u_1 = Q/Sg_2 = 16.7 [\text{m}/\text{sec}]$ となる。

従って、

$$h_1 = \lambda_1 \cdot u_1^2 / (2 \cdot g) = 111/2 \cdot g \quad [\text{m}]$$

圧力損失は、

$$\Delta p_1 = \rho \cdot 111/2 = 0.067 \quad [\text{kPa}] \quad \text{となる。}$$

(2) 磁性体コアの隙間

8カ所の隙間に空気が均等に流れると仮定して、1箇所当り、 $Q_M = Q/8 = 0.125 [\text{m}^3/\text{sec}]$ の流量となる。隙間の幅、 $d = 0.05 [\text{m}]$ 、コアの内側半径を r_i 、外側半径を r_o とすると、

隙間の平均断面積は、

$$S_M = d \cdot 2\pi(r_o \cdot r_i)^{1/2} \quad \text{と表せ、}$$

$$\text{通路長は、} L = r_o - r_i \quad \text{となる。}$$

Darcy-Weishbach の式より、ヘッド損失は、

$$h_2 = \lambda_2 \cdot L/D \cdot u_2 / (2 \cdot g) \quad [\text{m}]$$

となる。ここで、 λ_2 は管摩擦係数で、 D は通路の断面の等価径で、

$$D = 2 \cdot d \cdot 2\pi r / (d + 2\pi r) \approx 2 \cdot d \quad (d \ll 2\pi r)$$

である。ここで、流速 $u_2 = Q_M/S_M = 16.8 [\text{m}/\text{sec}]$ とすると、レイノルズ数は、

$$Re = D \cdot u_2 / \nu = 2 \cdot d \cdot u_2 / \nu \approx 13000 \quad \text{となる。}$$

ν は、空気の動粘度係数で、

$$\nu = 1.33 \cdot 10^{-5} \quad [\text{m}^2/\text{sec}] \quad \text{である。}$$

等価相対粗さ、 ε/D を 0.05 程度とすると、Moody 線図 (図 4-3) より、 $\lambda_2 = 0.07$ を得る。

従って、

$$h_2 = \lambda_2 \cdot L/D \cdot u_2 / (2 \cdot g) = 187.7/g \quad [\text{m}] \quad \text{となり、}$$

圧力損失は、

$$\Delta p_2 = h_2 \cdot \rho \cdot g \approx 225 \quad [\text{Pa}] \quad \text{となる。}$$

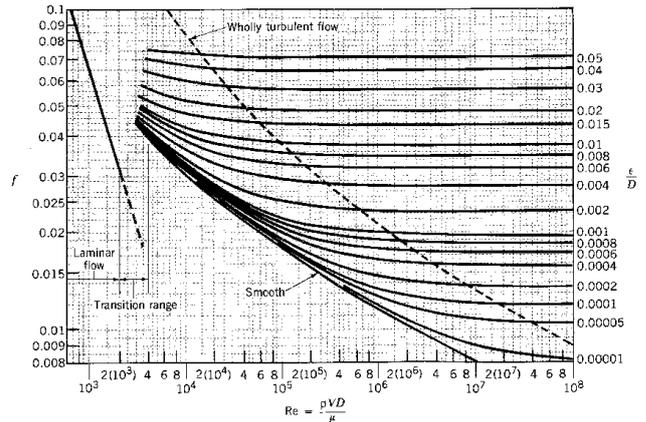


図 4-3 Moody 線図

(3) 空洞出口

空洞の上部と下部に $0.12 \text{m} \times 0.6 \text{m}$ の長穴の空気出口を設ける。この穴を通過する時の圧力損失は、(1) の磁性体スタックの入口の圧損と同様に計算できる。断面積が、 $0.18 [\text{m}^2]$ から $0.072 [\text{m}^2]$ に減少するので、その比は 0.4 となり、図 4-2 から摩擦係数 $\lambda_3 = 0.3$ を得る。

空気の流速は、2カ所に均等に分散するとして、

$$u_3 = 0.5/0.072 = 6.94 \quad [\text{m}/\text{sec}] \quad \text{となる。}$$

従って、

$$h_3 = \lambda_3 \cdot u_3 / (2 \cdot g) = 7.23/g \quad [\text{m}] \quad \text{となり、}$$

圧力損失は、

$$\Delta p_3 = h_3 \cdot \rho \cdot g = 8.7 \quad [\text{Pa}] \quad \text{を得る。}$$

(4) 空気ダクト

空洞に空気を供給するダクトは 1 本で、空洞から熱交換器に戻るダクトは 2 本で、共に同じサイズである。ダクトのサイズを直径 $D = 0.3 [\text{m}]$ 、長さ $L = 5 [\text{m}]$ とすると 1 本のダクトの場合は、

流速は、 $u_4 = Q/\pi r^2 = 14.1$ [m/sec]
 レイノルズ数は、 $Re = D \cdot u_4/\nu = 80000$ となる。
 等価相対粗さ、 ϵ/D を 0.02 程度とすると、Moody
 線図より、 $\lambda_4 = 0.05$ を得る。従って、
 $h_{4A} = \lambda_4 \cdot L/D \cdot u_4/(2 \cdot g) = 83.4/g$ [m]となり、

圧力損失は、
 $\Delta p_{4A} = h_{4A} \cdot \rho \cdot g = 83.4\rho = 100.1$ [Pa] となる。

同様にして、空洞からの戻りはダクトは2本となるので、流速は、 $u_5 = 14.1/2 = 7.05$ [m/sec]、レイノルズ数は、 $Re = 80000/2 = 40000$ となる。これより Moody 線図から、 $\lambda_5 = 0.05$ を得る。

従って、
 $h_{4B} = \lambda_5 \cdot L/D \cdot u_5/(2 \cdot g) = 20.7/g$ [m]となり、
 圧力損失は、
 $\Delta p_{4B} = h_{4B} \cdot \rho \cdot g = 20.7\rho = 24.9$ [Pa]となる。

(5) 熱交換器

冷却コイルは、面積が 0.465 [m²] で、8 列の製品である。このコイルの圧損は、カタログ値から 86 [Pa]となる。

(6) フィルター

フィルターの圧損についてもカタログ値から 70 [Pa]を得る。

以上の他にも、ダクトから空洞に入る部分、ダクトの接続部分等における圧力損失が考えられるが、上記に計算した主な部分に比べて損失圧力は、小さいと考えられる。上記の計算におけるトータルの圧力損失は、

$$\begin{aligned} \Delta p &= \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 + \Delta p_{4A} + \Delta p_{4B} + 86 + 70 \\ &= 67 + 225 + 9 + 100 + 25 + 86 + 70 \\ &= 582 \quad [\text{Pa}] \end{aligned}$$

程度となる。

余裕をとって送風機の選択を行った。

選択した送風機の能力は、性能線図より 1 [m³/sec] の流量で 794 [Pa]である。図 4-4 に送風機の性能曲線を示す。

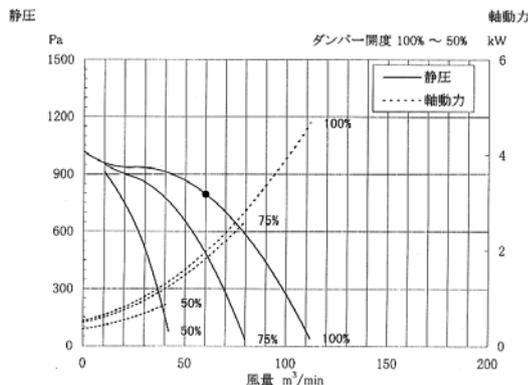


図 4-4 送風機性能曲線

5. 新加速装置による運転

空冷加速装置は、2005 年度に 1 号機、2006 年度に 2 号機をブースタに設置し、共同利用運転に供した。共同利用に供する前のシステムの調整過程で、終段増幅器の回路構成を変更した。特に、出力回路をトランス結合にしたことが大きな変更である。その為、当初の設計に比べて電力消費が大幅に減少した。従って、現在の運転では、空気冷却装置の負荷は、当初の 60~70%程度となっている。図 5-1 に電力増幅器の内部を示す。上部にトランスがみえる。



図 5-1 電力増幅器内部・出力トランス

加速空洞の温度測定

空気冷却装置の動作確認のため、運転中に簡易温度測定を行った。表 5-1 に測定結果を示す。

表 5-1 ブースタ 2 号機試験運転時の温度

	上流部	下流部	
空気往路	24.9	24.8	[°C]
空気復路	33.0-36.5	34.0-38.7	[°C]
空気流量 (設計値)	1.0	1.0	[m ³ /sec]
冷却水往路	20.5	20.5	[°C]
冷却水復路	-	24.2	[°C]
冷却水流量	41.0	42.0	[l/min]
空洞表面	28.2	31.6	[°C]

この測定結果から冷却パワーを計算すると、空気温度からは、上流部で 10.0~11.8kW、下流部で 14.4~16.0kW となり、合計で 24~28kW であることがわかる。また、冷却水の温度からは、下流部で約 11kW である。

この温度測定を行った時は、まだシステムの調整を行っている時で、設計計算に使用した 12+12=24kW という定格よりやや大きい出力を出していたので、消費パワーは高めに出ている筈である。

空気温度と水温から計算した消費パワーが合わないのは、空気の場合に測定箇所により温度が大きく異なることが影響していると思われる。また、空洞の一部（真空フランジ近く）を少量の冷却水で冷却していることや加速器室内の温度が比較的低いため、環境に流れる熱量が大きいのでその分は低めに出ていることになる。

温度測定は、増幅器の動作状況、加速器室内の環境等に大きく影響し、測定精度を上げるには、多大の準備等が必要となること、また、この精度を上げることの意義とコスト・手間等を考えて、これ以上の追求は行わなかった。

新加速装置によるビーム加速

図 5-2 は、新加速装置によるビーム加速の結果を表す。新加速装置の広い周波数帯域を持つ特性を生かして 2 倍高調波を重畳して、ビーム補足率の向上を図っている。従来の加速装置でのビーム加速の様子を示した図 5-3 と比べてみると入射部でのビームロスが大きく改善されていることがわかる。

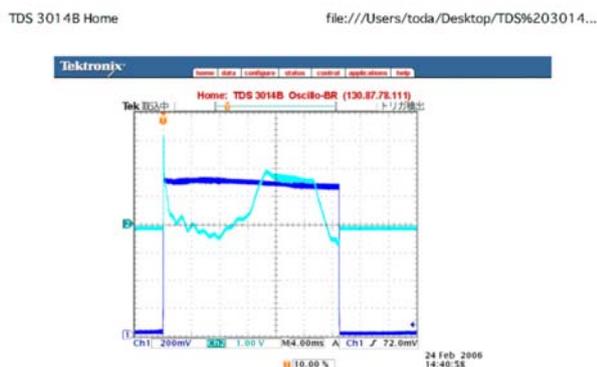


図 5-2 新加速装置によるビーム加速
(青色がビーム強度波形)

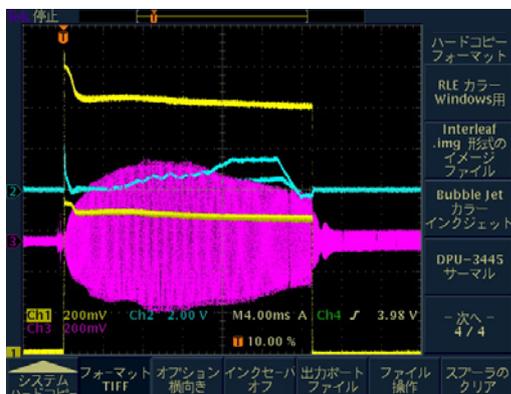


図 5-3 従来のシステムによるビーム加速
(黄色がビーム強度波形)

また、図 5-2 は、ビーム加速の様子を 100 回以上重ね取りしたものであるが、装置の安定性が高いため、重ねられた線が太くならず、1 回のトレースの様にみえる。

6. まとめと今後の課題

今回開発した空冷装置は、MA 磁性体を使った新加速装置において、重要なコンポーネントであり、加速システムの装置開発が比較的短期間で成功した要因ともなっている。

新加速装置の開発によって、

- ・ 広周波数帯域を持つ無同調型高周波加速装置
 - ・ 加速空洞の小型化、高い加速勾配
 - ・ システムの信頼性・安定性の向上
 - ・ ビーム強度の向上、ビームロスの低減
 - ・ ビームの安定性の飛躍的な改善
- などが実現できた。

今後の課題としては、

- ・ 冷媒をヘリウムにした更なる大パワーシステムの可能性の追求
 - ・ 装置の小型化、高性能化
- があげられる。

謝辞

この報告に当たり、一緒に開発に携わった二宮重史氏に多大なお世話になりました。この新加速装置の製造に関わって、電気興業株式会社の木藤、東、平島の諸氏に、株式会社東洋製作所の遠藤氏に大変お世話になりました。この報告の審査に当たり、有意義なご指摘、ご指導をいただいた、幅審査委員長を初め、審査委員の諸氏に感謝致します。

参考文献

- [1] S.Ninomiya, K.Muto and M.Toda. “NON-RESONANT ACCELERATING SYSTEM AT THE KEK-PS BOOSTER”, Proceedings of EPAC 2004, p1027
- [2] S.Ninomiya, K.Muto and M.Toda, “DESIGN STUDY OF NON-RESONANT ACCELERATING SYSTEM FOR THE KEK PS BOOSTER”, Proceedings of APAC’ 01, p535
- [3] 二宮重史, 戸田信, “BOOSTER に設置する無同調形加速装置の磁性体の強制空冷”, KEK ASN(PS)-451, Nov. 27, 2001
- [4] S.Ninomiya, K.Endo, K.Muto and M.Toda. “NON-RESONANT RF ACCELERATING SYSTEM”, Proceedings of EPAC 2000, p1981
- [5] 二宮重史, et al, “KEK-PS-Booster の無同調型高周波加速装置”, The 14 th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Japan, November 2003

パイプライン機能とネットワークインターフェースを持つ 高速 CAMAC インターフェース

安 芳次¹、井上栄二²

高エネルギー加速器研究機構

素粒子原子核研究所、オンライン・エレクトロニクスグループ

〒305-0801 茨城県つくば市大徳 1-1

概要

私たちはパイプライン CAMAC コントローラを開発した。本コントローラは、従来の CAMAC コントローラにはない画期的なアイデア（パイプライン機能）に基づいて、世界最高速の CAMAC 読み出しを実現した。また本コントローラは CPU を内蔵しネットワークインターフェース（Ethernet）を持つことで、最近のデータ収集アーキテクチャであるネットワーク型データ収集にマッチし、最新の読み出しシステムに組み込むことができる。本コントローラは、製品化され CC/NET という商品名で高エネルギー分野に限らず、加速器制御・核融合分野などにも広く利用されている。本論文は、パイプライン CAMAC コントローラ的设计思想・アーキテクチャ、そのソフトウェアおよび性能について明らかにする。

1. はじめに

パイプライン CAMAC コントローラ^{[1][2]}は PC/104-Plus シングルボードコンピュータを内蔵した CAMAC コントローラであり、CAMAC クレーットの 2 4、2 5 スロットに置かれる。図 1 はその概要を示す。本コントローラは PC/104-Plus シングルボードコンピュータ（SBC）、PCI コントロール部、CAMAC コントロール部から成る。PC/104-Plus^[3]は組み込みシステム用の標準 PCI 規格である。この SBC は低消費電力の CPU、Flash Disk、Fast Ethernet、USB など、デスクトップ PC の多くの機能を有しており、Linux オペレーティングシステムが動作する。各社から提供される SBC が選択可能である。

2. 設計思想とアーキテクチャ

パイプライン CAMAC コントローラは従来にはないパイプライン機能を実装した。ここでは本コントローラが、従来の CAMAC コントローラと何が違って何が画期的であるか、を明らかにする。

2. 1 従来の CAMAC アクセス法との違い

30 年前はコンピュータやシステムバスのスピードは今に比べると数桁の違いがある。CAMAC バスのス

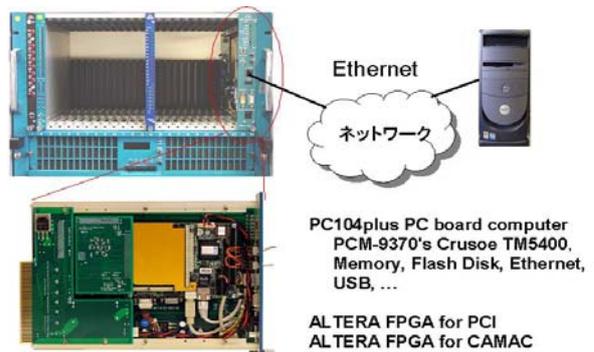


図 1：パイプライン CAMAC コントローラの概要

ピードは当時としては大変速いものであった。従って、CAMAC 1 サイクルの間、CPU もシステムバスも一旦 CAMAC アクセスを始めると、何もせずただひたすら CAMAC の終了を待つというアーキテクチャを採用した。1 つの CAMAC 命令は 1 つのアセンブラ命令に対応して実行される。図 2 に示すように、アセンブラ命令が起動されるとシステムバスはコンピュータのメモリから CAMAC 命令を引き出し、CAMAC インターフェースにその命令を送ろうとする。命令がコントローラに到着すると、CAMAC 命令が $1 \mu \text{sec}$ で実行され、その結果がシステムバスを介してコンピュータのメモリに書き込まれる。

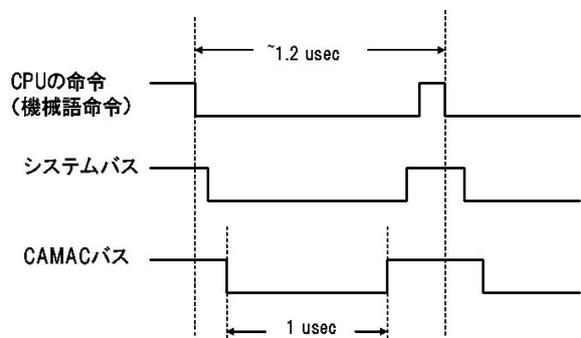


図 2：30 年前の CAMAC コントローラの CAMAC サイクル

¹ Yoshiji.Yasu@kek.jp

² eiji.inoue@kek.jp

この間、CPU はアセンブラ命令の実行に専念し、システムバスは他のサービスは一切せずひたすら CAMAC 命令の結果が返るのを待つ。当時の CAMAC アクセススピードは約 $1.2 \mu \text{ sec}$ と速いものであった。

しかし、コンピュータのスピードが飛躍的にアップしそれに伴いシステムバスのスピードも速くなった。CAMAC バスのスピードは相対的に遅くなり、CAMAC アクセスの終了をひたすら待つというアーキテクチャはコンピュータリソースを無駄にすることとなり、最近の CAMAC コントローラに見られるような CAMAC バスアクセスとシステムバスのアクセスを同期させず、切り離れたアーキテクチャを採用するようになった。図 3 に示すように、CAMAC アクセスはいくつかの命令に分割された。

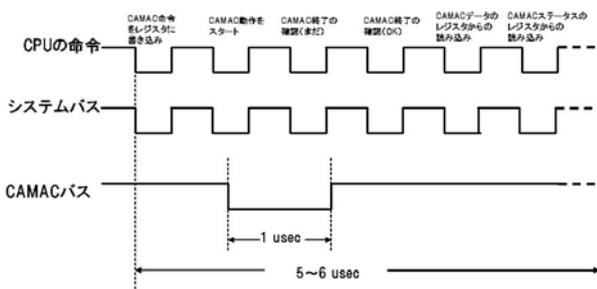


図 3 : 最近の CAMAC コントローラの CAMAC サイクル

CAMAC 命令を CAMAC インターフェースのレジスタに書く、CAMAC 命令を実行する、実行の終了を待つ、などである。これらの手順は 1 つ 1 つ随時的に行なわれるので、分割された手順の積算時間が CAMAC アクセスの処理時間となる。CAMAC インターフェースの設計やソフトウェアの実装にも依存するが、 $5\text{-}6 \mu \text{ sec}$ 程度かかってしまう。

最近の CAMAC コントローラの設計の問題点は、分割された CAMAC 命令の 1 つ 1 つが随時的に行なわれるところにあり、それらが平行して行なわれれば、分割された 1 つ 1 つの積算ではなく、分割されたどこか 1 つのボトルネックの処理時間が CAMAC アクセスの処理性能となる。パイプライン CAMAC コントローラのボトルネックは CAMAC の $1 \mu \text{ sec}$ というサイクルである。

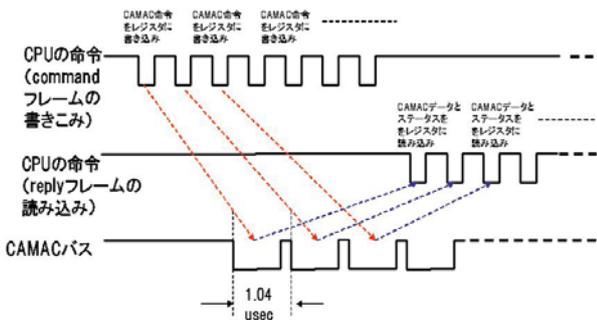


図 4 : パイプライン CAMAC コントローラの CAMAC サイクル

図 4 はパイプライン CAMAC コントローラの CAMAC サイクルを示す。コンピュータメモリから CAMAC インターフェースに CAMAC 命令が送られ、CAMAC サイクルが実行され、結果がコンピュータのメモリに書き込まれる一連の処理は平行して行なわれることがわかる。

2.2 アーキテクチャ

図 5 にパイプライン CAMAC コントローラのアーキテクチャを示す。このコントローラは 2 つのコントロール部からなる。1 つは PCI コントロール部、もう 1 つは CAMAC コントロール部である。

CAMAC コントロール部には 2 つの機能がある。1 つは CAMAC 機能で、もう 1 つは DAQ 機能である。CAMAC 機能は N (ステーション番号), A (サブアドレス番号), F (ファンクション) が与えられることで CAMAC 処理を行なう。

DAQ 機能はトリガーを受けて、ビジー信号を出すなど、データ収集のトリガー処理に関わる特別な機能を提供する。

TX PCI Engine と RX PCI Engine は PCI バスをシェアしながらそれぞれコンピュータメモリからのコマンドの転送と CAMAC 処理結果のコンピュータメモリへの転送を行なう。CAMAC 処理とそれらの処理は TX FIFO/RX FIFO および CMD FIFO/REPLY FIFO を介して非同期に行なわれているので、平行して実行される。それらの実行スピードは毎秒数十 MB なので、CAMAC 処理の毎秒 3 MB のスピードより遥かに速い。従って、TX PCI Engine と RX PCI Engine の処理は CAMAC アクセスのボトルネックにはならない。

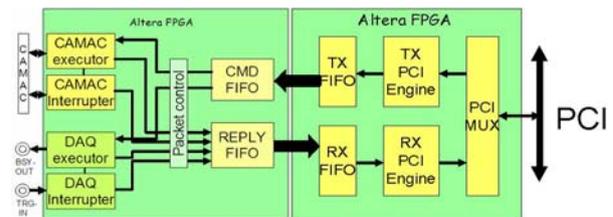


図 5 : パイプライン CAMAC コントローラのアーキテクチャ

2.3 何が画期的か?

パイプライン CAMAC コントローラは何が画期的であり、なぜ今までの CAMAC コントローラはこの方法を採用してこなかったのかを明らかにしたい。

なぜ今までの CAMAC コントローラはこの方法を採用してこなかったのか? その理由は、従来の CAMAC コントローラはレーテンシ (待ち時間) を最小にするというポリシーで、スループット (スピード) を最大にするという方法を取らなかったから、である。CAMAC コントローラに限らず、いままでの I/O コントローラはほとんどレーテンシを最小にするという方法を採用した。

レーテンシを最小にするためには、I/O 命令を出したら、できるだけ速くその応答を待つという方法を

取る。このパイプライン技術は、I/O 命令を出してもその応答を待たず、I/O 命令を出し続けながら、平行してその応答を待つという方法を取るため、レーテンシは最小にならない。

パイプライン CAMAC コントローラは、遅い CAMAC アクセスと速い CPU/バスのバランスを考慮し、レーテンシを最小にできないものの最小に近づけつつ、スループットを最大にする方法を取った。

この方法はネットワークを介してアクセスするときに威力を発揮する。ネットワークの世界ではいろいろの装置が平行して動作する。PC 計算機からネットワークを介してパイプライン CAMAC コントローラに連続してアクセスするとき、アクセススピードは平行して動作する 1 つ 1 つの足し算ではなく、どれか 1 つのボトルネックのスピードで決まるといえる点である。

図 6 はネットワークを介したパイプライン CAMAC コントローラの性能を示す。詳しい解説は 4 章の性能評価にゆだねるが、PC 計算機から Fast Ethernet を介して本コントローラへ、リモート CAMAC ライブラリを利用して CAMAC アクセスを行なった場合、1 つの CAMAC 命令を実行するのに要した時間は約 2.7 μ sec であった。重要な点は、2.7 μ sec の処理時間は CAMAC サイクルの実行時間ではなく、それ以外のところに処理のボトルネックがあるという点である。この場合はプログラミングの変更により CAMAC アクセスの性能をアップ出来ることがわかっている。

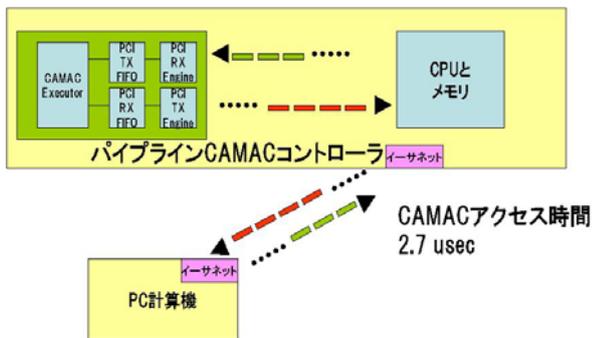


図 6 : ネットワークを介したパイプライン CAMAC コントローラ

3. ソフトウェア

パイプライン CAMAC コントローラ用ソフトウェアとして、Linux オペレーティングシステムに組み込みコントローラの操作を行うデバイスドライバ、ユーザがプログラムを作るとき直接利用するライブラリ、コントローラのために特化した Linux を作ったり修復したりするためのシステムソフトウェア、それからそれらを使った応用ソフトウェアなどが開発されている。

3.1 デバイスドライバとライブラリ

表 1 にはデバイスドライバのシステムコール一覧

を示す。システムコールにはデバイスをオープン・クローズするための open/close、コマンド・応答フレームを読み書きするための read/write、その他補助的な操作のための ioctl から成っている。

オープン/クローズ	pcc_open(), pcc_close()
リード/ライト	pcc_read(), pcc_write()
インタラプト	pcc_interrupt()
ioctl	pcc_ioctl() PCCIOC_RESET, PCCIOC_CLEAR_FIFO, PCCIOC_PUT_DATA, PCCIOC_GET_DATA, PCCIOC_EXEC_PIO, PCCIOC_KICK_READ, PCCIOC_DISABLE_INTERRUPT, PCCIOC_ENABLE_INTERRUPT, PCCIOC_WAIT_INTERRUPT, PCCIOC_DUMP_REGISTER

表 1 : システムコール一覧

表 2 にはライブラリ一覧を示す。ライブラリには従来 KEK オンライングループがサポートしてきたライブラリ群^[4]とパイプライン CAMAC コントローラ専用に変化して作ったライブラリ群からなる。

KEK 従来型のライブラリ	
セットアップ	camopen(), camcls()
CAMAC ファンクション	cgenz(), cgencc(), cseti(), creni()
CAMAC シングルアクション	camac()
割り込み処理	cenlam(), cdslam(), cwtlam()

CAMAC コントローラ特化型のライブラリ	
CAMAC/DAQ コマンドフレームジェネレータ	cam_gen_init(), cam_gen_cc(), cam_gen_daq()
PIO ルーチン	cam_put(), cam_get(), cam_exec_pio(), cam_single_cc(), cam_single_daq()
ブロック I/O ルーチン	cam_exec_dma(), cam_exec_dma_seq()
トリガーおよび割り込み待ちルーチン	cam_wait_lam(), cam_wait_trig()
CAMAC/DAQ リプライフレームルーチン	cam_extract_cc_data(), cam_extract_cc_status(), cam_extract_cc_qx(), cam_extract_daq_data()

表 2 : ライブラリ一覧

これらのドライバ・ライブラリの使い方については文献^[5]に書かれていて、またそれらは公開されている^[6]。

これらのドライバ・ライブラリを使った有用なコマンドや例題も用意されている。例えば、CAMAC コントローラを初期化するためのコマンド ;

```
% ./rst_cam
1 つの CAMAC 命令を実行するためのコマンド ;
% ./cam
Usage : ./cam n a f [data]
```

ここで n はステーション番号、a はサブアドレス、f はファンクション、data は書き込み時のデータ
データを書き込むために；

```
% ./cam 4 0 16 0xffffffff
```

```
Q = 1 : X = 1
```

ここで Q、X は CAMAC の信号で、書き込みが成功していることを示している。

書き込んだデータを確認するために；

```
% ./cam 4 0 0
```

```
Q = 1 : X = 1 : data = ffffff
```

例題の中で、exam0 は PIO ルーチンを使った基本 CAMAC 操作を実行し、exam1 は PIO ルーチンおよび DMA ルーチンを使用した CAMAC の読み書きを実行し、exam2 は PIO ルーチンを使って基本 DAQ 操作を実行する。PIO とは Direct Memory Access (DMA) 法を用いない方法である。DAQ 操作とはデータ収集に用いるトリガー処理を意味し、CAMAC コントローラはトリガーが入るとビジー信号を出すのでそれらに関わる一連の操作を示す。exam3 は PIO ルーチンを使って CAMAC からの LAM 割り込み処理を実行し、exam4 は PIO ルーチンを使って DAQ トリガー割り込み処理を実行する。

ユーザには参考文献ユーザガイド^[5]を読むと同時に、これらの例題を見ながら使い方を学ぶことをお勧めする。

3.2 システムソフトウェア

パイプライン CAMAC コントローラの基本システム構成はスタンドアロン Linux システムである。この他にディスクレス Linux システムも使用することができるようにした。

3.2.1 スタンドアロン Linux システム

スタンドアロン Linux システムを構築するために必要最小限のシステムをコンパクトフラッシュ上に構築した。図7にスタンドアロン Linux システムの構成を示す。

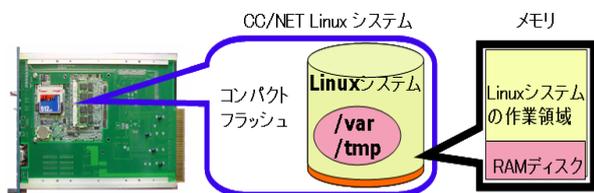


図7：スタンドアロン Linux システム

コンパクトフラッシュのサイズが 512MB、および 1GB のものを使用している。ftp 版の Linux を使用しているので、ユーザは自分でシステムを好みに合わせてインストールし直すことも可能である。システムインストールのやり方は、KEK オンライングループの Web ページ^[6]で全て公開しているので、ユーザが戸惑うことはない。コンパクトフラッシュは構造原理上、書き込み回数に制限がある。そのための対策として、システムの一部を RAM ディスクにして、コンパクトフラッシュへの書き込みが起らないようにした。

これによって、コンパクトフラッシュの破壊を回避することができた。アプリケーションの開発のためのユーザプログラム作成作業のためのスペースには、NFS マウントしたりリモートマシン上のハードディスク資源を使うことをお勧めする。システムの起動および停止時に CAMAC コントロール部のロジックをイニシャライズしリセットするためのスクリプトを組み込んであるので、システムが立ち上がった時点では、直ぐに CAMAC アクセスが可能になっている。現在、使用可能なスタンドアロン Linux システムは、GNU/Linux Debian 3.0(Woody)と 3.1(Sarge)^[7]および Scientific Linux CERN Release 3.0.4^[8]の3種類である。

3.2.2 ディスクレス Linux システム

二つ目の使用方法はディスクレス型としての使用方法である。図8にディスクレス Linux システムの構成を示す。

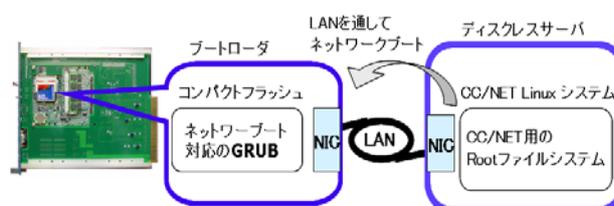


図8：ディスクレス Linux システム

この方法では、コンパクトフラッシュ上にはブートローダのみを置いておいて、ネットワークブートを行う。サーバ上には任意のディストリビューションの root ファイルシステムを配置しておいてダウンロードしてシステムを立ち上げる。

現在、CC/NET 用のディスクレス・クライアントシステムとして GNU/Linux Debian 3.0(Woody)と 3.1(Sarge)、FedoraCore 1^[9]、RedHat 9^[10]、Scientific Linux CERN Release 3.0.5 が利用可能である。ディスクレス・サーバ用のマシンおよびシステムはネットワークにつながるものであれば何でもよいのであるが、私たちは、GNU/Linux Debian 3.0(Woody)と 3.1(Sarge)、FedoraCore 1、RedHat 9、および Scientific Linux CERN Release 3.0.5、Solaris8 を使って問題なく使用できることを確認した。

ディスクレス・システムではシステムの動作速度がネットワークトラフィックに影響されるという欠点がある。しかし、これはプライベート LAN にすることで対応は可能である。一方で、ディスクレス・システムではサーバマシンのハードディスク上にクライアント用のシステムを構築するので、システム破壊が起こりにくいという利点がある。システムの起動および停止時に CAMAC コントロール部のロジックをイニシャライズしリセットするためのスクリプトを組み込んであるので、システムが立ち上がった時点では、直ぐに CAMAC アクセスが可能になっている点は、スタンドアロン Linux システムの場合と同

様である。システムインストールのやり方は、KEK オンライングループの Web ページ^[6]で公開している。

3.2.3 システム復旧ツール

何らかの事情でコンパクトフラッシュ Linux システムを壊してしまった時の復旧ツールを作成した。図 9 にシステム復旧ツールの機能を示す。

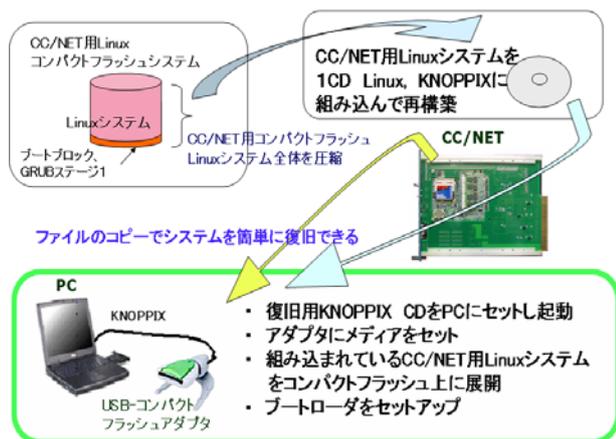


図 9 : システム復旧ツール

復旧ツールは、コンパクトフラッシュ Linux システム全体のファイルシステムを圧縮して、1 CD Linux、KNOPPIX³の中に組み込んで再構築したものである。システム復旧を行う場合には、復旧用 KNOPPIX の CD を手持ちの PC にセットして起動する。この時、PC の USB ポートには “USB-コンパクトフラッシュアダプタ” をつないでおく。このアダプタには復旧させたいコンパクトフラッシュのメディアをセットしておく。KNOPPIX システムが立ち上がったら、CD の中に組み込んである復旧用のコンパクトフラッシュ Linux システムの圧縮ファイルをコンパクトフラッシュ・メディアに書き戻す。最後に、メディア上のブートブロックにブートローダを書き込んでやれば、コンパクトフラッシュ Linux システムを復旧することができる。

3.3 応用ソフトウェア

パイプライン CAMAC コントローラはネットワークコンポーネントのひとつとしてデータ収集 (DAQ) システムに組み込むことを想定している。つまり、ひとつのパイプライン CAMAC コントローラがひとつのローカル DAQ を構成し、これらが複数集まってひとつの DAQ システムを構成する。トリガー情報を含む DAQ タグを共通化することによって、KEK オンライン・エレクトロニクスグループの次世代データ収集フレームワークである COPPER との共存も可能である。図 10 に、パイプライン CAMAC コントローラを DAQ コンポーネントとして DAQ システムに組み込む様子を示した。

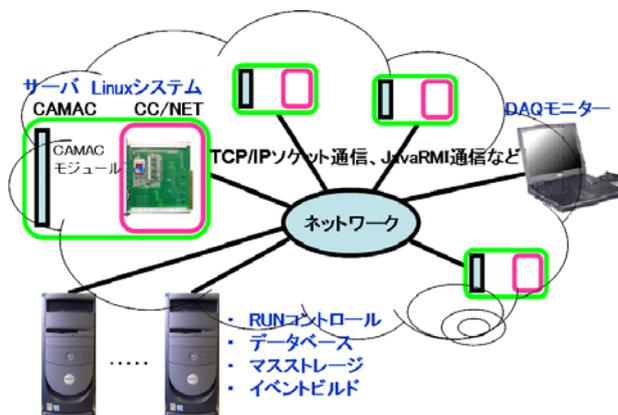


図 10 : DAQ コンポーネントとしてパイプライン CAMAC コントローラを使用

パイプライン CAMAC コントローラにはシングルボードコンピュータが搭載してあるので、ユーザの使用の仕方によってさまざまな読み出し方法が可能であり、また DAQ システムへの組み込みにも柔軟に対応できる。パイプライン CAMAC コントローラに標準添付の例題プログラムでは、TCP/IP ソケット通信を使ったリモートからの読み出し例題と、JavaRMI を使ったリモートからの読み出しの例題の 2 種類を示した。これ以外の例えばリモートアクセス可能な他の言語 Python 等を使う可能性も考えられる。これは、ネットワークへの接続を基本に設計してあるパイプライン CAMAC コントローラが、ネットワークレベルの DAQ システム構築に非常に大きな利点を持つことを意味している。

ここに示す応用ソフトウェアは 2 つある。1 つは TCP/IP ソケットを利用した簡易版リモートアクセスプログラムと呼ばれる応用ソフトで、もう 1 つは WEB を利用した JAVA/RMI 応用ソフトである。これらはユーザが DAQ プログラムを書く際の手がかりになるように、例題プログラムとして提供しているものである。それぞれ簡単に説明する。詳しくはユーザガイド^[5]を参照することをお勧めする。

3.3.1 簡易版リモートアクセスプログラム

より実践的な例題プログラムの一つとして簡易版リモートアクセスプログラムを作成した。実行例を図 11 に示す。このプログラムを使えば、VME ボードコンピュータのような環境のクライアントからでも支障なくデータ収集が可能である。簡易版リモートアクセスプログラムは TCP/IP ソケット通信をするプログラムである。これを使用するには次のようにする。まずサーバ側で、ccnet_server プログラムをコンパイルして実行しておく。クライアント側では、ユーザプログラムをコンパイルし、リモート CAMAC ライブラリとリンクして実行すれば使用できる。計算機の種類によりバイトオーダーが異なるという所謂エンディアン⁴の処置も施してあるので、SPARC マシンからも問題なく使用できる。

³ <http://openlab.jp/knoppix/>

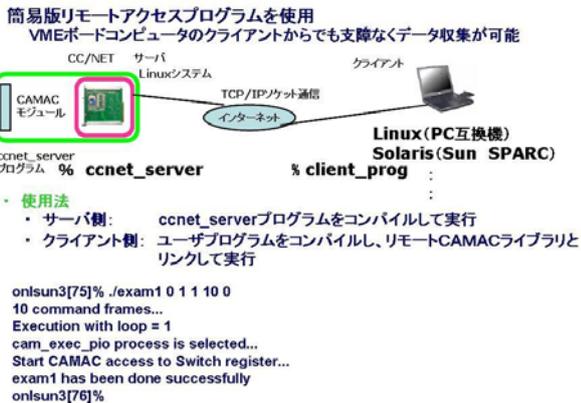


図 1 1 : 簡易版リモートアクセスプログラム

3.3.2 WEB アクセスプログラム

二つ目の実践的な例題プログラムは、JavaRMI を使った Web アクセスプログラムである。このプログラムを実行した時の様子を図 1 2 に示す。この例題は Web ベースのデータ収集システムへ拡張をする際の例として作成した。この例題プログラムを実行するには、まずパイプライン CAMAC コントローラ上で Web サーバ、例えば Apache を起動しておく。その後、JavaRMI サーバプログラムを起動する。この状態で、クライアント側から Web ブラウザを使ってサーバ上の html ファイルをアクセスする。そうすると、html ファイルに記述してあるアプレットがダウンロードされて、図 1 2 に示すような画面が表示される。ここで、テキストフィールドの部分に実行したい CAMAC コマンドとデータを入力し、GO ボタンを押す。そうすると、JavaRMI 通信で CAMAC コマンドがクライアントからパイプライン CAMAC コントローラに送られる。

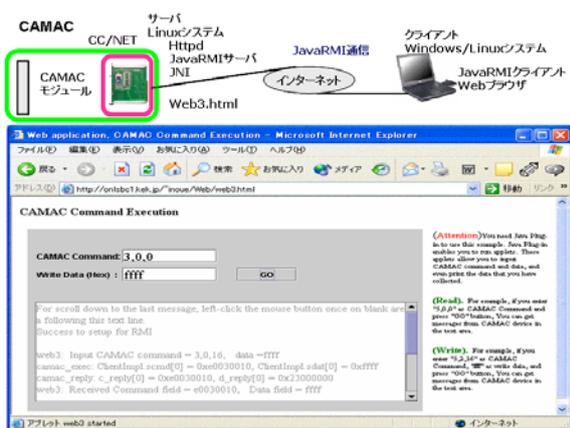


図 1 2 : JavaRMI 使用の Web アクセスプログラム

パイプライン CAMAC コントローラは受け取った CAMAC コマンドを JNI を通じて CAMAC ライブラリ・CAMAC ドライバへと渡し、CAMAC データウェイ・オペレーションが実行される。実行された結果は、再び JavaRMI 通信を通してクライアント側へ送り返されて、Web ブラウザ上のテキストエリアに表示されるとい

うものである。これらのプログラムは KEK オンライングループの Web ページ^[6]で公開している。

4. 性能評価

性能評価に使用した計算機は表 3 に示す。Desktop PC はネットワーク (Fast Ethernet : 100Mbps) を介した測定に利用した。CAMAC 操作に限らず、本コントローラの CPU 性能・メモリ性能・ネットワーク性能などさまざまな性能評価を行なったが、ここでは CAMAC 操作に関連する性能についてのみ紹介する。

System	Pipeline CAMAC Controller	Desktop PC
CPU	Transmeta Crusoe TM5400	Pentium4 Xeon
Frequency	500 MHz	2.8GHz
Cache	L2: 256k	L2: 512k
Chipset	VIA 82C868A	ServerWorks GC-SL
OS/CC	Linux-2.4.18/gcc3.2(RH8.0)	Linux-2.4.18/gcc2.96(RH7.3)

表 3 : 測定に利用したコンピュータ

4.1 基本 CAMAC アクセス性能

図 1 3 は CAMAC アクセスを連続して実行した例で、1 つのアクセスに $1.04 \mu \text{sec}$ を要していることが示されている。CAMAC のビジー信号および S1 信号のオシロスコープへの出力をそのまま示した。

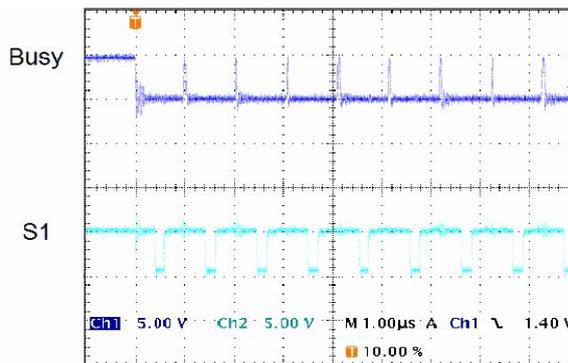


図 1 3 : CAMAC アクセスを連続して実行した例

4.2 16000 CAMAC フレームの性能

図 1 4 は 16000 CAMAC アクセスを連続して実行した例で、すべてのアクセス時間から 1 回あたりの時間が算出される。Tx DMA flag および Rx DMA flag はともに本コントローラの PCI コントロール部の中にある信号である。Tx DMA flag は CPU のメモリからコマンド・フレームが PCI 部に転送を促されるときにセットされ、Rx DMA flag はリプライ・フレームが CPU のメモリに転送を促されるときにセットされる。従って、まず DMAread が実行されることで Rx DMA flag がセットされる。ただこの時点では CAMAC アクセスは起こらない。次に DMA write が実行され、Tx DMA

flag がセットされると CAMAC アクセスが起こる。その後、コマンド・フレームがすべて PCI 部に送られると、Tx DMA flag はリセットされ、CAMAC アクセスが終了するとほぼ同時に Rx DMA flag がリセットされる。1 回の CAMAC アクセスがほぼ $1.04 \mu \text{sec}$ で実行されていることがわかる。

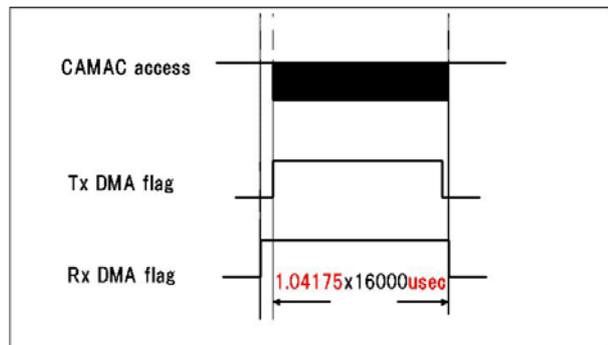


図 1 4 : 1 6 0 0 0 CAMAC フレームの性能

4.3 割り込み応答 CAMAC フレームを使った高速割り込み処理性能

図 1 5 は割り込み応答 CAMAC フレームを実行して、高速な割り込み処理を行なっている例である。割り

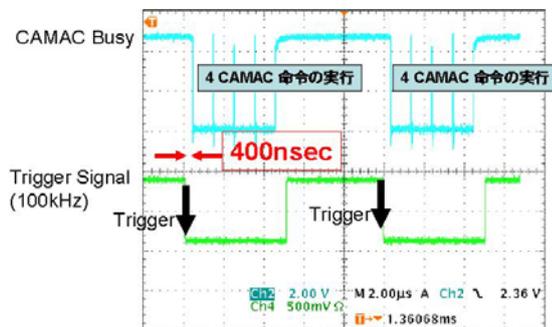


図 1 5 : 高速な割り込み処理を行なっている例

込みが発生してから 400nsec で割り込みを認識し、続いて 4 CAMAC フレームの読み出し処理を実行している。

DAQ 操作の中で DAQ 割り込み処理フレームは高速な割り込み処理を実現する。通常の割り込み処理には CAMAC の LAM 割り込み処理と DAQ 割り込み処理があり、割り込みが発生すると CPU に割り込み、Linux オペレーティングシステムがこれを認識して処理する。その処理スピードは CPU の性能やオペレーティングシステムに依存するが、 $10 \mu \text{sec}$ オーダーの処理時間がかかるものである。しかし、DAQ 割り込み処理フレームを用いると、割り込みは CPU には発生せず、本コントローラの中で処理される。本コントローラの DAQ 割り込み処理フレームの処理時間は 400nsec なのでその時間で割り込み処理が実行されることになる。

従来の方法で割り込み処理を行いつつ 4 CAMAC 命令を実行する場合、割り込み処理に $10 \mu \text{sec}$ 、4 CAMAC 命令処理に $20 \mu \text{sec}$ ($4 \times 5 \mu \text{sec}$) とすると、 $30 \mu \text{sec}$ かかることになるが、本コントローラの場合、 4.56 ($0.4 + 1.04 \times 4$) μsec で処理できることとなり、約 1 桁程度の性能向上が期待できる。

4.4 CAMAC ライブラリを使った CAMAC アクセス性能

図 1 6 は CAMAC ライブラリを使った CAMAC アクセス性能を示す。CAMAC ライブラリを使った場合、そのソフトウェアオーバーヘッドは無視できない。PIO ルーチンを用いた場合と DMA ルーチンを用いた場合とではそのオーバーヘッドが異なってくる。PIO ルーチンの場合には約 $6 \mu \text{sec}$ で、DMA ルーチンの場合には約 $30 \mu \text{sec}$ である。ただ PIO ルーチンを用いた場合 DMA ルーチンと比較しオーバーヘッドは少ないものの、そのスループットは高くない。1 CAMAC 命令の処理時間は、PIO ルーチンの場合には約 $2.67 \mu \text{sec}$ で、DMA ルーチンの場合には約 $1.08 \mu \text{sec}$ である。実行する CAMAC 命令の数によって PIO ルーチンと DMA ルーチンの優劣が変わる。そのクロスポイントは約 15 CAMAC 命令程度であることがわかった。

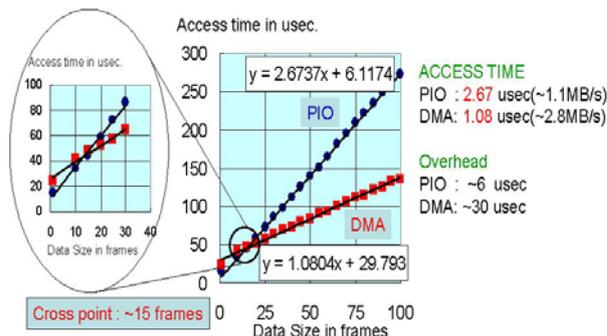


図 1 6 : CAMAC ライブラリを使った CAMAC アクセス性能

4.5 リモート CAMAC ライブラリを使った CAMAC アクセス性能

図 1 7 はリモート CAMAC ライブラリを使ってネットワークを介した CAMAC アクセスの処理時間を測定したものである。

ネットワークを介するとさらにオーバーヘッドが大きくなると予想される。実際、図に示されたように CAMAC 処理を始めるまでに約 $400 \mu \text{sec}$ 、1 CAMAC 命令当たりの処理時間は約 $2.7 \mu \text{sec}$ と確かに大きくなっている。

1 CAMAC 命令当たりの処理時間である約 $2.7 \mu \text{sec}$ はローカルで処理した時間である約 $1.08 \mu \text{sec}$ より大きい。なぜ大きいかを、その処理の中身を吟味して解明する。ネットワーク性能でそのスループットは測定結果より、約 10MB/sec であることがわかっていいる。コマンド・フレームとリプライ・フレームが

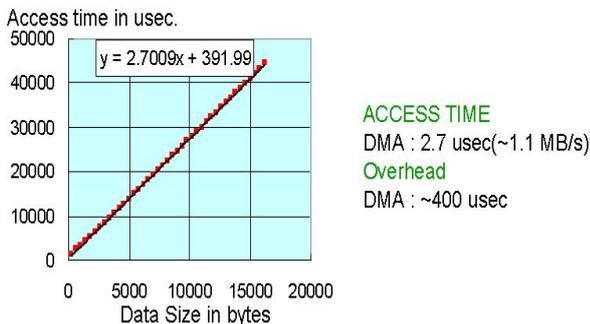


図 17 : リモート CAMAC ライブラリを使った CAMAC アクセス性能

同じネットワーク上で随時的に転送されている。従って、8 バイトのフレームが 2 つ、つまり 1 CAMAC 命令につき 16 バイトのデータが 10MB/sec のネットワーク上に流れていることになる。よってその処理時間は約 1.6 μ sec である。

この測定にはリモート CAMAC ライブラリを使用している。このライブラリはユーザの便宜性を優先するため、CAMAC 処理とネットワーク処理を随時的に行なっている。そのため処理時間は約 2.7 (1.08+1.6) μ sec となり、測定結果と一致する。

だが以前にも指摘したように、ネットワーク上に実行されるさまざまな処理は、一般に平行して実行される。もし CAMAC 処理とネットワーク処理 (コマンド・フレームとリプライ・フレームも平行して転送すること) を平行して行なうアプリケーションプログラムを実装すれば、さらに高速化を図ることができることを指摘したい。

5. 結論

私たちはパイプライン CAMAC コントローラを開発した。本論文で、設計思想・アーキテクチャ、そのソフトウェアおよび性能について明らかにした。

このなかで、PC 計算機からネッスピードを上げるにはこのパイプライン技術が必要、しかも唯一の方法であることを明らかにした。

また、本コントローラはパイプライン機能を実装することで、世界で一番速い CAMAC コントローラを実現させた。

このパイプライン技法は、パイプライン CAMAC コントローラに限らず、I/O 装置のスピードと CPU/バスのバランスがよい、いろいろなコントローラに適用可能であり、しかも唯一の方法であることも示すことが出来た。

このパイプライン技法は、平行して動作する 1 つ 1 つの足し算ではなく、どれか 1 つのボトルネック

のスピードで決まるという点で、ネットワークを介して I/O アクセスするとき威力を発揮することも解明した。

ユーザサポートの視点から、ドライバ・ライブラリはもとより、Flash ディスクやネットワークを介した Linux システムのサポートは重要であり、また豊富なドキュメントもユーザのサポートには欠かせないが、それらを整備することができた。

性能評価を行い、本コントローラのさまざまな CAMAC 性能を明らかにした。パイプライン機能が性能向上にいかに関与しているかを示すことができた。また、割り込み応答 CAMAC フレームを利用したデータ収集によって従来のデータ収集性能より 1 桁程度向上させることができることを明らかにした。

6. 謝辞

本コントローラは平成 14 年度の KEK における「民間等との共同研究」(東陽テクニカ社)により生まれたものである。協力をいただいた KEK オンライン・エレクトロニクスグループの諸氏に感謝する。また東陽テクニカ社(大栄無線電機社)・ファード社の諸氏に感謝する。

参考文献

- [1] IEEE, "IEEE Standard Modular Instrumentation and Digital Interface System (CAMAC) (Computer Automated Measurement and Control) IEEE Std 583-1975
- [2] Y.Yasu et al., "Development of a Pipeline CAMAC Controller with PC/104-Plus Single Board Computer, The 13th IEEE-NPSS Real Time Conference 2003, Montreal, Canada, May 18-23, 2003
- [3] PC/104 Embedded Consortium, PC/104-Plus Specification Version 1.2, August 2001
- [4] Y.Yasu, Usage Guide of CAMAC Library for UNIX, http://www-online.kek.jp/~inoue/CAMAC-Doc/doc/users_guide_v1.pdf
- [5] Y.Yasu et al., "User Guide of Pipeline CAMAC Controller with PC104Plus Single Board Computer (CC/NET)
- [6] パイプライン CAMAC コントローラ・ホームページ、
<http://www-online.kek.jp/~yasu/Parallel-CAMAC/>
<http://www-online.kek.jp/~inoue/Parallel-CAMAC/>
- [7] Debian GNU/Linux, URL: <http://www.debian.org/>
- [8] Scientific Linux CERN 3 (SLC3),
URL: <http://linux.web.cern.ch/linux/scientific3/>
- [9] Fedora Linux, URL: <http://www.fedora-linux.org/>
- [10] Red Hat Linux, URL: <http://www.redhat.co.jp/>

モニターは、図1の上中のM4とM5の間に位置するFast Bunch Monitorである。これらのモニターも2006年のPS運転終了に伴い使用されなくなることになりそうである。もしも何らかの形でPSの運転を考えるなら、これらのモニターの維持管理がある程度必要であり予算の調達を計画しなければならない。以下でそれぞれのモニターについて詳しく報告する。

1 Beam 位置モニター …CODを見たい

初期のBooster Beam位置モニターは、軌道のふくらみを見るために図1のS2, 5, 8の3箇所にモニターグループにより設置された。それらは、円筒状のモニターで、ブースターリングの直線部分にある専用ステンレス容器に収められていた。500MeV Boosterシンクロトロン1周のCOD(閉軌道のゆがみ)を観測するには、なるべく多くの所にBeam位置モニターを配置する必要があるが、これまで上記の場所以外に設置する余地は無いと思われていた。そこでBoosterシンクロトロンを自分で歩いて、自分の目で確認し、どこにどのような装置が、組み込まれているか再三再度確認した。(しつこい)良く見ると真空ペローの取り付け部分に設置できる余地があった。この部分はBoosterの(交流+直流)磁場が漏れ出ているところであり、交流磁場によって起こされる振動や渦電流による発熱の問題が懸念された。しかしこの部分に設置できれば、Boosterの真空ペロー端部部分のほとんどが同じ構造であるため、最大で7箇所に設置できる状況であった。そこで、発熱については現場に設置されている真空槽の発熱を確認し、ほとんど発熱が無いことなどから、この部分に設置することにした。設置場所が決まったので、この場所の条件に合う形状でBeam位置モニターを設計した。

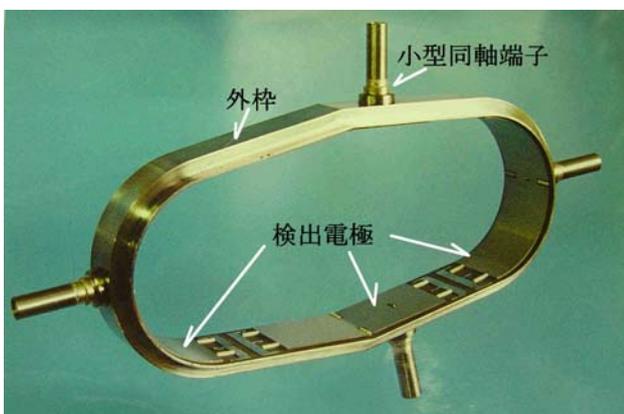


写真1 Beam 位置モニター

1-1 機械的設計

写真1が製作したBeam位置モニターで、図2にその模式図を示す。このモニターの外形寸法は、横152mm 縦73mm 奥行き27mmで、この内側に

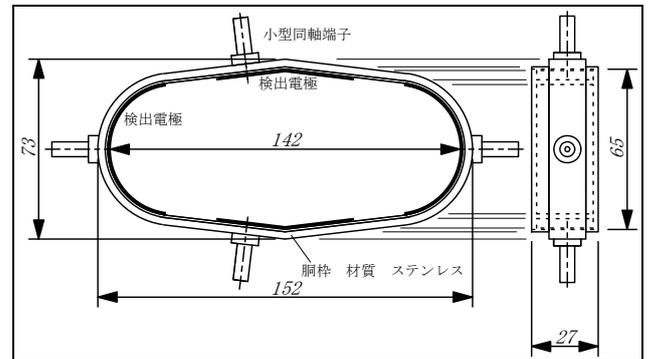


図2 モニターの模式図

上下左右の4つの電極でBeam位置を検出する。検出電極の外側の枠は電極の固定と、真空パイプの2つの役割を担う構造となっている。電極と胴枠ともに材質はステンレスである。またこの胴枠には4つの信号取り出し用小型同軸端子があり、位置信号を外に取り出す構造である。

1-2 位置検出電極の固定方法

写真2に固定部分の様子を示す。出来るだけビーム通過領域を阻害することがない構造とした。その手法として、スポット溶接を採用した。ねじを使用しないためビーム通過領域にねじの頭が出ないことや、タップなどのをあける厚みなども考慮しなくて良い。また、仕上がりもすっきりした。写真2からすっきりしたのがわかる。Beam位置検出電極の固定方法は、



写真2 電極取り付け部分

セラミックパイプと、ステンレス製つめ付板状スプリングを使用した。図3に組み立て工程を示す。図3 aが組み立て前である。ここでpが厚み0.5mmのステンレス製検出電極で固定用のつめが手前に出ている。sが厚み0.2mmのステンレス製電極固定用つめ付板状スプリングで、ここには0.6mm幅のつめがあり、セラミックパイプを固定するのに使用する。図3の白い円筒が長さ5mm 外径1.2mm 穴径0.8mmのセラミックパイプで検出電極のつめに差し込むことで、検出電極と外枠に隙間を持たせる構造になっている。それが図3のgである。また、そのセラミックを固定することで、電極を固定することと電極を絶縁する、2役を担う。組み立て方法を順に説明する。図3のbは、セラミックパイプを検出電極のつめに差し込んだところである。図3 cはそのセラミックパイプに固定スプリングを差し込み、赤い矢印で示された方向に、スポット溶接する。これにより、スプリングは適度に曲がり、固定の力を保ち、電極はセラミックパイプを介して外枠に固定される。

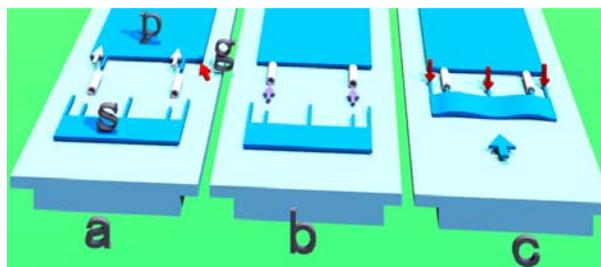


図3 電極の固定方法

1-3 事前の取り付けテスト

Booster シンクロトロンに組み込む前にステンレス製外枠のテスト品を作り、シンクロトロンに装着できるか確認してから取り付けた。図面上は、挿入出来ていても、実際に出来上がった製品には誤差があり、挿入出来ないこと考えられたからである。現実に0.3mm程度合わず挿入出来なかったため、少し小さくしたものを製作して無事入れることが出来た。

1-4 モニター挿入の様子

写真3が加速器にBeam位置モニターを組み込んだ様子で、モニターの見えている部分がわずか15mmになっている。モニター横から信号取り出し小型同

軸端子が見える。取り付け用のM8、六角穴付きボルトが狭いところに使われているのが見える。矢印の六角穴付きボルトの奥にあるボルトは、指で回すのも難しいところである。

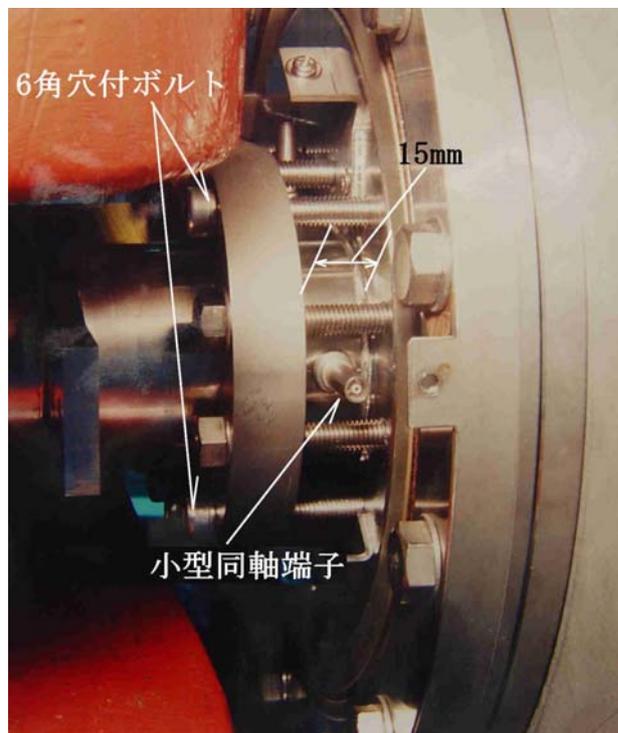


写真3 シンクロトロンに組み込んだ様子

1-4 専用工具

狭所作業に適する六角穴付きボルト

この位置モニターが設置される周囲の状況は、写真3を見ても分かる様にボルト締め作業をするには非常に狭く、モニターを組み込みにくい環境である。取り付けはM8ボルトで締めるが、一番狭い上下部分のボルトはスパナやソケットレンチが使用できないため、締め付け作業に使用できる専用工具を製作して、取り付けた。



写真4 位置モニター取付専用工具

写真4が専用工具で①手回し用と②電動用の2種類がある。この手回し専用工具の大きさは300mm*

200mm*19.6mm (長さ、幅、先端部分の厚み)。締め付け回転方向を傘歯車で90度曲げているため、横側からモニター取付けボルトの締め付け作業が可能になった。先端部分の厚みが19.6mmのため、指は入るがボルトは回せない様な狭いところでも、容易に六角穴付きボルトを回転させて締め付け作業が出来る。このように加速器は狭い作業場所が多く、作業場所に合った工具を製作することも大事なことだと強く思った。

1-5 締め付けトルクの管理

このモニターのボルト締め付け力は、100kg・cmである。この狭い場所に入る大きさで、このトルクに耐えられる歯車のテストをしたところ、プラスチックや焼結歯車の場合、変形したり、割れたりしてしまい、使い物にならなかった。結局焼入処理を施した歯車でないと使用できないことが分かった。

締め付けトルクの入力に対して、ボルトにかかる出力トルクを測定したところ、約5%低下していた。入力トルクに対して、出力トルクは歯車の摩擦によるロスがあるため、5%少なくなる傾向があった。そのため締めつけ時には5%多目に締め付けるようにした。

1-6 電气的設計モニター出力電圧

Beamによって誘起されるモニター電極の電圧をモニターに入るBeam電荷量から計算してみた。入射する陽子数は 2×10^{12} 個で、電荷量は、 1.602×10^{-19} 、検出電極のBeam方向の長さは25mm、ブースタの周長は、平均半径R=6.5mから周長は約41mである。よって位置モニターに入る全電荷量は25mm/41mの比率である。モニターの静電容量は測定により約200PFである。以上の条件より約1Vとなり。計算上観測が可能な十分な電圧であることを確認した。

1-7 Excelによる感度係数の計算

Beam位置モニターの感度特性を計算する。2次元ポアソン方程式を差分法^{*2}で表すと以下のように変換できる。

$$\varphi(x, y) = \frac{1}{4} \left\{ \varphi(x+h, y) + \varphi(x-h, y) + \varphi(x, y+h) + \varphi(x, y-h) + \frac{\rho(x, y)}{\epsilon_0} h^2 \right\} \quad (1)$$

式1からポテンシャルを計算し、その結果から電圧を計算した。ここでhは区分の距離である。この式からある座標の2次元空間ポテンシャルは、上下左右のポテンシャルの平均値を取ればよいことがわかる。ただしその条件は電場の場合、誘電率が等しい場合である。以下にExcelで行った計算の方法を示すが、PS(陽子加速器)のstudy report¹で書かれているので、詳細はそちらを参照されたい。図3でExcelを使ったポテンシャルの計算方法の概略を説明する。ポテンシャルは2次元座標を仮定し計算される。仮にE6の座標点のポテンシャルは、

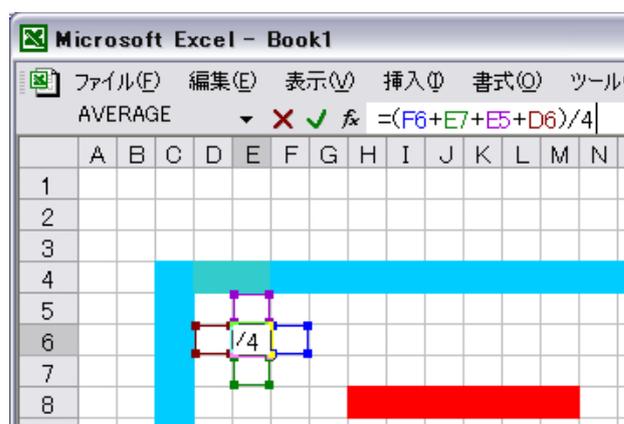


図3 EXCELでの電場計算

上下左右のポテンシャルを足し合せ、4分の1することで求まる。図2ではF6、E7、E5、D6、の各セルを加算し4で除算するという、いたって簡単な手続きである。Excelの1セルを1mmの区切りと考え、その各点のポテンシャルを計算する。Excelのシートに、計算する領域を置きそれぞれの点に計算のため計算式を入力する。Excelには便利な機能があり計算式のある。

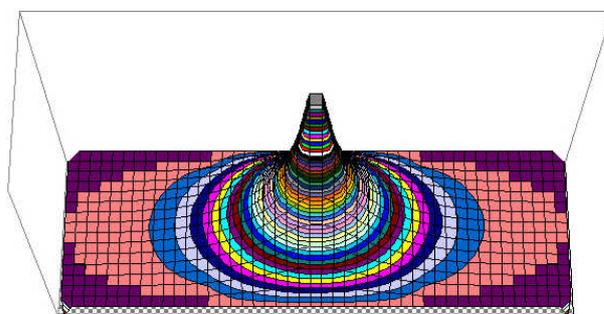


図4 EXCELでの電場計算によるポテンシャル

E6のセルをコピーして、計算する領域にペーストすることでシート上の必要な各セルにこの式を写すことができる。ただし、その操作の前に以下の2つの操作が必要である。①ツール中のオプション中の

計算方法を手動に切り替えこと。②ツール中のオプション中の反復計算を生かし、その条件を以下の値にする。反復数を 1000、変化の最大値を 0,01 にすることが必要である。これらの値は、条件により異なるので、計算の収束の様子を見て、変える必要がある。以上の操作を行わない場合、参照エラーが発生することがある。反復計算で計算を繰り返すと、真の値に近づく。計算ごとの差が小さくなるまで繰り返し、許容誤差以内になると、計算を自動的に停止する。このとき計算された、ポテンシャルの傾きが各座標の電界となり電圧を決める。図 4 はモニタ

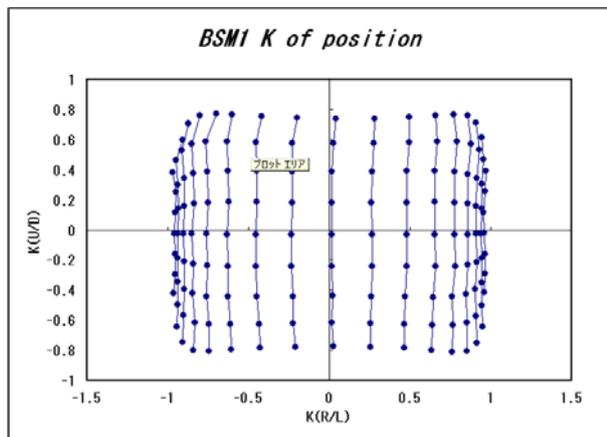


図 5 位置モニター感度特性測定値

一の境界条件の外枠が 0 電位で、中央に電荷を置きポテンシャルを計算した結果である。Excel による計算と測定された値の双方に大きな相違がないことを確認した。

1-8 感度特性の測定

位置感度 $K_{(U,L)}$ は $K_{(R,L)}$ は Beam によって誘起される各電極の電圧を V_R 、 V_L 、 V_U 、 V_D で示した時

$$K_{(R,L)} = \frac{(V_R - V_L)}{(V_R + V_L)} - (2)$$

または

$$K_{(U,D)} = \frac{(V_U - V_D)}{(V_U + V_D)} - (3)$$

とした、ただしこの位置モニターは非線形部分が大いことに注意が必要である。図 5 は、位置モニターの感度特性の測定値である。マーカの点間距離は 5mm である。Beam の半径方向軸の R 軸では、中心付近で 5mm ずれると、係数が 25% 変化するが中

心からずれた 20mm 付近では 5mm 移動すると 5% 程度となり感度が落ちている。そして R 方向の非線形性が強い。写真 5 が感度測定機である。アンテナ電極の材質はアルミである。位置モニターが R 方向（左右）に移動、またアンテナが Y 方向（上下）に移動するように出来ている。各位置で電極の電圧を測定し感度を測定した。電圧測定はネットワークアナライザーを使用し高感度で精密に測定ができた。モニターの前後は、アンテナの電場の乱れが少ないようにアルミのシールドで囲った。

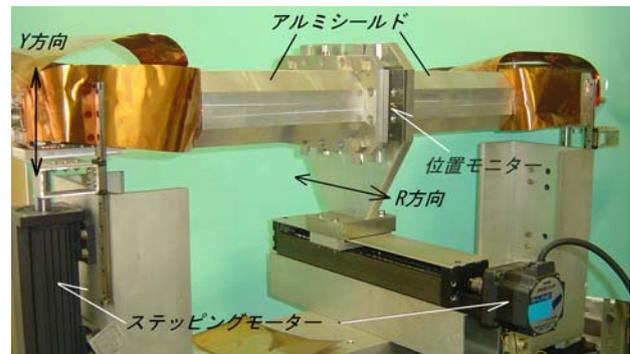


写真 5 位置モニター感度測定機

1-9 ステップ応答と寄生振動

電極に発生する Beam 信号電圧の時間応答を回路シミュレーションで確認し実際の信号と見比べた。測定された信号に寄生振動の様子が観測され、検出電極からの信号取り出し小型同軸端子までの回路を確認したところ、微小ながらインダクタンスがあり、その値を入れてステップ応答計算した結果、観測されたような振動が発生した。そのため寄生振動

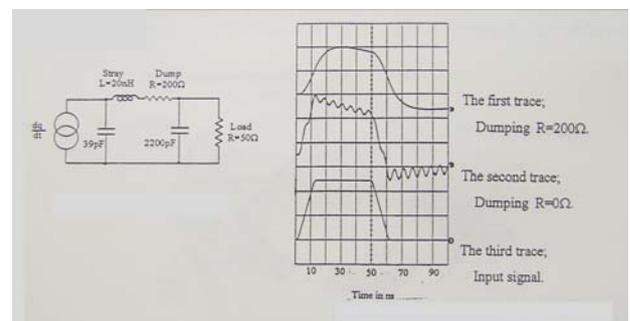


図 6 電極の寄生振動対策

を抑制する目的で抵抗を入れ、その応答を確認した。図 5 の 1 段目の波形は抵抗により振動を抑えた出力信号波形、2 段目は、振動の抑制がない場合で細かい振動が出ている、3 段目はモニターへ入ってきたビーム信号である。このように、Beam の形状を、ある程度保ちながら、振動を抑えて観測できる抑制抵

抗を決めた。この計算には、回路解析プログラムの SPICE を使用した。この位置モニターは高周波特性に優れているため、200MHz 成分による位置検出もできるので、Booster 内に入った Beam の 200MHz で見た位置測定にも使われた。また、全周に置かれたモニターはノイズ環境がよくない箇所があった。それは、RF 加速空洞の付近である。そのノイズは、かなり深刻で、そのままでは、Beam の位置測定はできなかった。しかし加速電圧がない状況であれば位置測定ができたので、入射直後の Beam 位置の測定を行い。入射 Beam と X 方向のベータートロン振動のインテンシティー効果による測定を行うことができた。このモニターを使った、加速器研究のレポートは巻末に記す。 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11

2-1 Beam ロスモニター

H⁻Beam 入射による真空槽破壊防止を目的に設置した。H⁻Beam 入射では炭素薄膜の破れ（破壊、変形、小穴）によって H⁻Beam のすり抜けがあり、その Beam による真空ベローズチャンバーの焼損による穴あき事故があった。もちろんこのようなこと



写真6 Beamによる真空槽ベローズの焼け焦げ

があれば Beam を出し続けることが出来なくなる。このような事故を予防する目的で Beam ロスモニターは製作された。写真6は、Booster 入射付近の真空ベローズチャンバーである。白○の中が H⁻Beam があたり、ベローズの表面が焼けて黒く変色しているのが分かる。写真7は、Beam のあたった炭素薄膜である。Beam があたると、炭素薄膜は、収縮してしわができて、ひびが入り、または穴が開き、ついには破けてしまう。そうすると真空ベローズチャンバーは Beam の直撃で焼損しそれが長い間続くと穴があく。炭素薄膜はすぐに破損するのではなく、徐々に、変形して、裂ける。その途中で、小さな穴や、裂け目などが出来て行くが、その初めの時期に小さな穴や裂け目を通りぬけた Beam によるロスを見分けること

で、炭素薄膜交換時期の判断が出来る。このロスモニターは比例計数管を横に複数並べたものである。

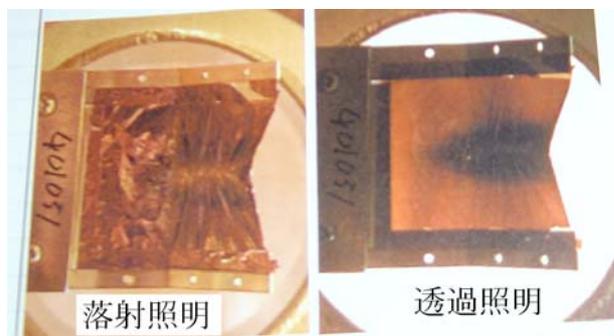


写真7 Beamのあたったカーボン薄膜

図7にロスモニターの比例係数管配置を示す。設置場所は、Booster M1 電磁石の前で、写真6の焼け焦げの斜め前である。図6からわかるように、H⁻Beam 軌道が示してある。この軌道の上に Beam ロス検出器用比例計数管 10 本を配置した。検出信号はすぐ下の前置増幅器で受け、加速器制御室に送られる。高周波信号減衰率の少ない 10D ケーブルを 110m 使い、1μ秒の信号の立ち上がり判別できるものとした。その理由は、ロスの発生する状況が、Beam の特性を

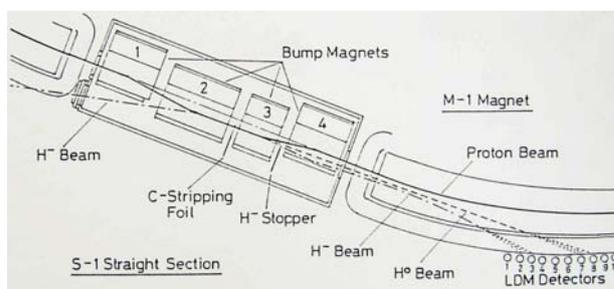


図7 ロスモニター配置

反映しており、Beam の長さは、40μ秒あるが1μ秒で Beam の性質が変化する、その様子を見るのに、高周波特性のよい信号伝達系が要求される。また 10 本の検出器を配置したのは 2 つの理由がある。ロス信号は検出位置にかなり敏感であるため密に検出器を配しておかないと抜けが生じてしまい、場所が少しずれるだけでロス信号が見えなくなる。また H⁰の様子を見たいため広範囲に検出器を分布させる必要があった。このようにロスの全貌を把握するには、高速でかつ多チャンネルな信号処理の構成が必要である。

2-2 測定器構成

測定器の構成を図7に示す。検出された各比例計数管の信号は、10ch高速チョッパー方式のスイッチにより10chの信号を1chにまとめ、デジタルオシロに取り込まれる。この10ch高速チョッパーはショットキーダイオードを用いたアナログスイッチで、切り替えの立ち上りおよび立ち下がり時間が5ナノ秒、信号ゲート時間が、90ナノ秒でスイッチング時間の総計は100ナノ秒である。そのため1 μ 秒の間に10chを切り替える性能がある。10chの信号を1chに変換されたBeamロス情報はGP-IBを介してパソコンに取り込まれる。これを、Beamロスの全体が見やすくなるようにパソコン画面上に見やすいように再構築して表示した。LINAC Beamの時間的長さは20 μ 秒で、データの総数は200点となる。ただしBeam信号の前後の時間を余分にとるので、実際は、1000点程度のロス信号のデータとなる。これらを出るだけ迅速に、また分かりやすく表示することは加速器の調整に使う機器として当然要求される性能である。開発当時パソコンの速度が遅く一回の測定の時間は5分程度かかっていた。その後計算機を更新して、約0.3秒で一回の測定が出来るようになった。そのため、ほぼリアルタイムにBeamロス信号を見ることが可能となった。また、比例計数管の応答が、出力電圧と、応答時間が最適に成るように回路定数を探した。比例計数管は、高抵抗で終端することで放射線に対する出力電圧が上がり、検出感度が上がるが、反面応答速度が遅くなるため高速性が失われる。

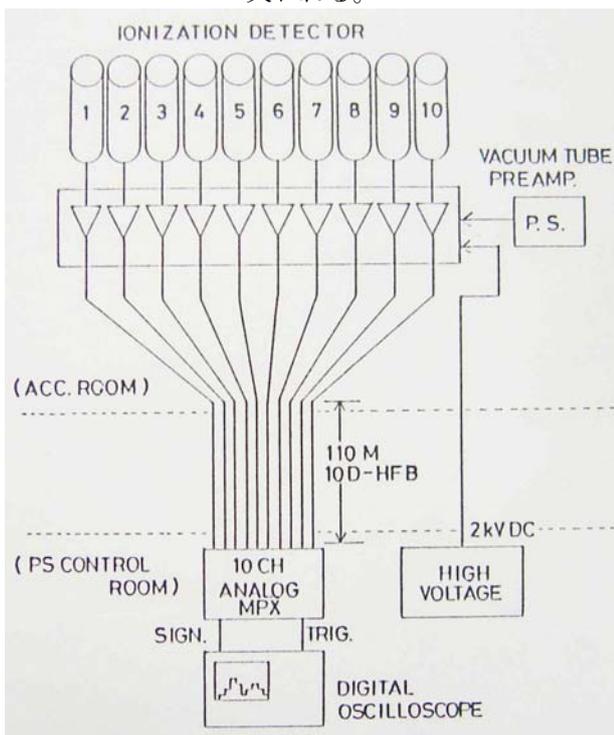


図8 ロスモニター測定器構成図

そこで、比例計数管の負荷抵抗を低くして、出力電圧をあまり低下させず、応答速度の良いところを探した。その結果ロスモニターの負荷を1K Ω に決定した。この場合の応答時間は100nsで、H⁻Beam入射の応答には十分な値である。更に放射線に強い電子回路として真空管式前置増幅器を採用したことにより、放射線ダメージによる増幅器の故障ない。写真9はデジタルオシロスコープで見たロス分布の様子である。

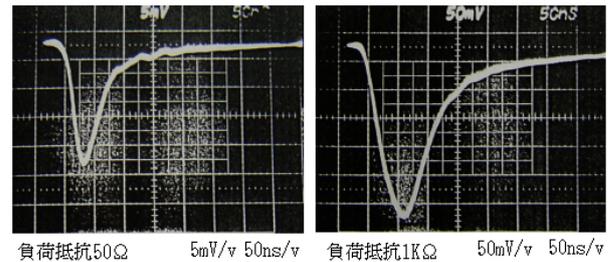


写真8 負荷抵抗と応答

写真9の上部はLINACからの入射Beamで、その長さは20 μ 秒である。写真下部がロスの様子を示し、横軸が検出器のチャンネル、縦軸がロスの強さである。入射後6 μ 秒後のロスの分布を拡大した。7ch

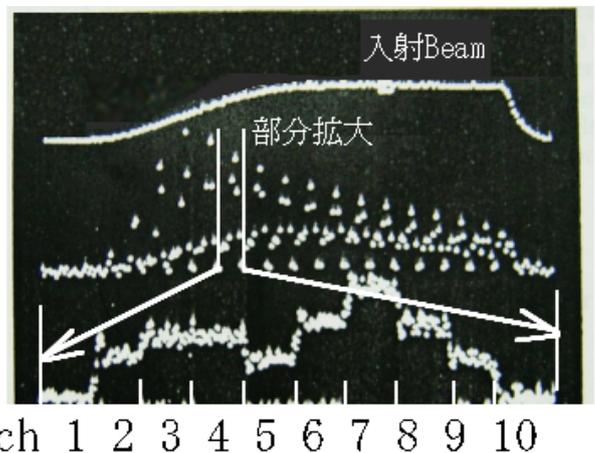


写真9 Beamロス分布信号

のロスが大きくなって起きているのがわかる。写真9中段は10ch高速チョッパーの出力で横軸が全幅で20 μ 秒である。ロス信号が1 μ 秒ごとに徐々に変化しているのがわかる。このロスモニターについてレポートがある。¹²

3-1 LINAC 運動量モニター

LINAC Beamの運動量分布の時間構造を観測して、タンクレベルの調整を精密に行うことでより安定なBeamを供給するのがその目的である。現在のように、LINAC運動量の時間分布が測定されるようになった

のはこの運動量分布モニターが初めてで、以前は、平均的な運動量の値しか知ることが出来なかった。このモニターは Beam loss モニター製作で養われた回路技術の応用して開発されたものである。

3-2 運動量モニターの構成

運動量モニターの構成を図8に示す。アナライザー電磁石で運動量別に選ばれたビームは捕獲電極に入り、運動量情報として検出される。たとえば、運動量の大きい粒子は、アナライザー電磁石で曲げられる度合いが少ないので磁石の軌道の大回りのコースを進み運動量の大きい粒子が外側の電極(図8の高)に捕獲される。運動量の小さい粒子は、曲げが強く運動量の小さい粒子の集まる電極(図8の低)に捕獲される。このように運動量の大小により、振り分けられた粒子が電極に入る。この電極は、50Ωで終端されており、入力された電流(粒子)に比例した電圧が現れる。これ以前の運動量測定は、末端が高抵抗であったため、入力電流の積分された電圧が出

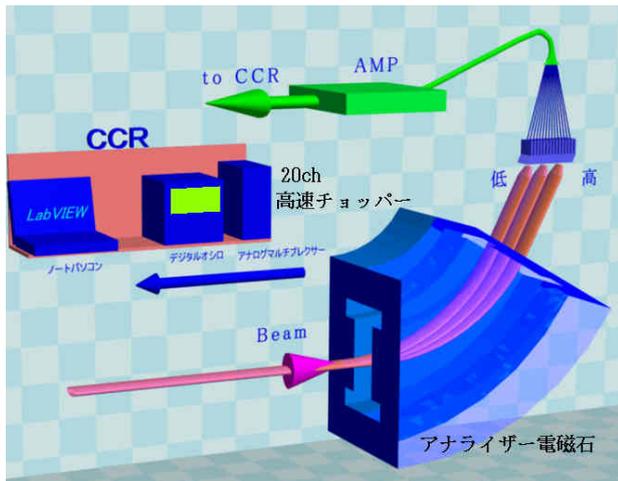


図9 LINAC 運動量モニター構成図

力されていた。そのため勿論、運動量の時間分布を測定できなかった。アナライザーの捕獲電極は96chあり、これらの信号は、捕獲電極のすぐ近くのプリアンプ(AMP)で50Ωに変換され、110m先の中央制御室に送られる。表示に使っているのは中央部分の40chでそれらは、中央制御室で選択される。使用している20ch高速チョッパーの制限から、隣り合う2チャンネルを加算回路で足し合わせ、20chを観測に使用している(捕獲電極の数で40ch)。20chの信号を20ch高速チョッパーで処理し、1chの信号にまとめ、デジタルオシロに入力する。GP-IBでそのデータをパソコンで取り込みデータ処理を行い、運動量の時間構造を主制御室のモニターに表示する。図

10がLINAC運動量モニターの画面である。画面の中央が運動量の時間構造を表示している。横軸は運動量の軸で右に行くほど高くなる。運動量幅は画面全幅で1.3%である。縦軸はBeamの強度で、高いほど、その運動量のBeam強度が高いことを示す。また上に

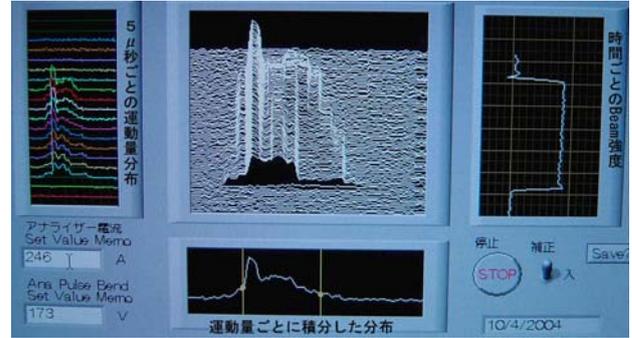


図10 LINAC 運動量モニター の画面

行くに従い時間が進む表示とした。図10では、はじめ運動量の幅が広いが、徐々に狭くなっていく様子がわかる。また単純な形状でなく、鋭いピークを持つ山が重ね合わさっているのもわかる。図10の下は各運動量別に積分したものである。図10の右が各時間のBeam強度を示した。図10の左は5μ秒ごとの運動量分布を表示し、詳細な変化をわかりやすくした。このLINAC運動量モニターについては⁸、LINAC研究会で報告されている。¹⁰

4-1 RF位相制御用モニター

RF位相制御用モニターは図1の右上四角で示したS5に設置されている。このモニターの目的は、Beam加速に必要なBeamの位相を測定することである。写真10にRF位相制御用モニターを示し、図11にその模式図を示す。銅製の大きな筒が位相検出電極のシールドで、筒の中にBeam検出電極がある。真空槽にこの電極が丸ごと入る構造になっている。Beam位相は、Beamがこの穴の中を飛んで行く時に誘起する電圧を検出電極で受け、真空管アンプ式を通して出力インピーダンスを50Ωに変換して出力される。写真10左下の金属製の箱が真空管式アンプで、ステンレス製パイプ中の同軸端子(真空封じ切り型)に接続して使用する(四角ワクのアンプ設置位置)。

最初、半導体式のアンプで試したところ、放射線の影響ですぐに壊れたため、真空管式アンプの採用とした。アンプの周波数帯域幅は100MHz必要である。真空管式アンプは、検出電極のすぐ近くになるよう設計した。その理由は、検出電極とアンプの間の信号取り出し線インダクタンスを極力小さくすることで高周波特性を劣化させないためである。このよう

な真空管式の増幅器として、CERNの増幅器があり、その回路を参考にした。はじめに製作した検出電極部分は、銅製のシールドと真空管式アンプの接地が1mmの銅線数本で設置した、そのため高周波的には

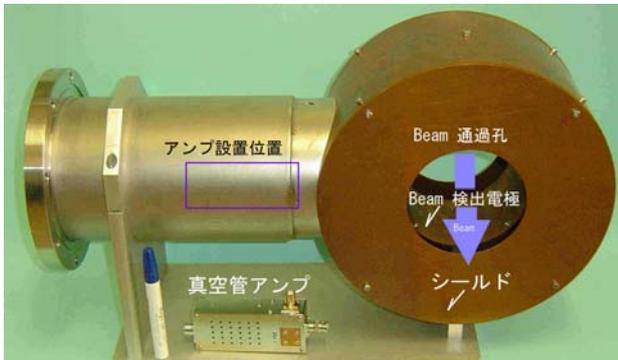


写真 10 位相モニター

不十分な接続になっていたことにより、寄生振動が発生していた。そこで、シールドと接地を一体構造とした。写真 10 にその様子をします。また、検出電極と、真空管式アンプの間にできてしまう、引き出し線のインダクタンスとアンプの入力

容量で起こる振動は、ダンピング抵抗を入れることで抑え振動を無くした。

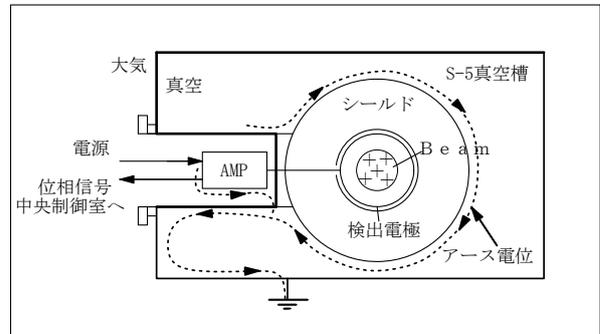


図 11 位相モニター模式図

図 11 はシールドと AMP のアースが一体化されているのを、模式的に表した。信号の伝送には 24D 同軸ケーブル使用し、その長さは、100m である。高周波の減衰を減らし、Beam 信号の高周波特性を悪化抑えた。

まとめ

Beam 位置モニターの設置場所を探すのに、他のグループとのやり取りで余分なエネルギーを使わないようにするため、既存の機器の場所を当てにすることなく、設置できるところを探し出した。そのため、今回のようなところになった。ECXECL で有限要素法を使って電場のポテンシャル計算をし、Beam モニター感度の関係を求めた。Beam 位置モニターの設置に必要な専用特殊工具を製作した。

ロス分布モニターは、ブースター入射のロス分布

の時間構造を見たいと思い製作した。炭素薄膜の寿命診断に使えた。

LINAC 運動量モニターについては、LINAC の運動量の時間構造を見たいと思い製作した。LINAC の調整に役立った。

RF 位相制御用モニターは、真空管という古い部品を使うことで、放射線に強いモニターができた。位相制御に貢献した。

謝辞

今回 KEK 技術賞の受賞対象モニターについて、興味を持って、仕事ができる環境に恵まれたことに、KEK PS の方々に感謝します。また得に春日俊夫教授、竹田繁教授、高崎栄一教授、二宮重史教授、佐藤吉博技師補、山根功教授、故佐々木寛教授、

の方々には入所以来多くのことを授かり感謝いたします。最後に、いつも共に加速器の仕事を行い、助言、忠告、そしてこの賞の推選をしていただいた安達利一助教授に心から感謝します。

参考文献

- [1] [ASN-434](#) Nov.21, 2000、ポテンシャル・電場・電荷・静電容量そして EXCEL (無同調型加速装置の加速 Gap の静電容量計算法) ,二宮、染谷
- [2] [SR-535](#) Feb. 7, 2002、新しいブースター入射調整法の可能性について入江、染谷、佐藤(吉)
- [3] [SR-541](#) Sep.12, 2002、ブースターリングにおける 200MHz BPM (その 2) 入江、染谷、佐藤(吉)、下崎、三浦(孝)
- [4] [SR-554](#) Mar.17, 2003、ブースターリングにおける 200MHz BPM (その 3) 染谷、佐藤(吉)、入江、三浦(孝) [1]
- [5] [SR-554](#) Mar.17, 2003、ブースターリングにおける 200MHz BPM (その 3) 染谷、佐藤(吉)、入江、三浦(孝) [1]
- [6] [SR-483](#) Dec.20, 1999、Booster 電磁石辺りのポジションモニターノイズ調査 染谷
- [7] [SR-403](#) Jun. 9, 1997、ブースターにおける e-p/ion 振動の観測 入江、安達、魚田、白形、染谷、高野、外山、山根
- [8] [SR-284](#) Jun.10, 1992、PS 40 MeV リニアックビームの P/P の時間依存、染谷
- [9] [ASN-208](#) Jun. 2, 1981、ブースターの新静電モニターおよびバッファ・アンプ春日、染谷、酒井
- [10] [MR-265](#) Jul.24, 1998、ESM-モニターの寄生振動 退治、染谷
- [11] PSI Poroc 95-02 A-6 Recent Development of Closed Orbit Monitor System in the KEK Booster Synchrotron
H.Someya,D.Arakawa,J.Kishiro,I.Yamane
- [12] Proceedings of the Workshop on Advanced Beam Instrumentation A Beam-Loss Distribution Monitor (LDM) H.Someya,Y.Satoh,I.Yamane

平成18年度受賞論文

1. PLLの位相比較を用いた音波式ガス検出装置
近藤良也（素粒子原子核研究所）
2. K2K実験サイバー検出器読出し回路基板(FEB)
村上武（素粒子原子核研究所）
3. マイクロチャンネル分光結晶の開発
内田佳伯（物質構造科学研究所）
4. 粒子加速器・物理実験用超伝導低温機器におけるTIG自動溶接技術の開発
安島泰雄（共通基盤研究施設）

PLLの位相比較を用いた音波式ガス検出装置

大学共同利用機関法人・高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所
物理第一研究系・クライオジェニック技術部門・近藤良也

1:はじめに

高エネルギー加速器研究機構においては、加速器や検出器、また各種の実験に液化ヘリウムを供給するため、ヘリウム冷凍機設備(以下:冷凍機設備)が各所に設置されている。最近の傾向として、これらは運転の省力化のため統合・集中化され、冷凍機設備より離れた制御室において操作・制御される事が多い。このため、現場で起こった事象を迅速かつ正確に把握する事は、冷凍機設備運転上極めて重要である。

冷凍機設備には、運転中に起こったトラブル、例えば地震、落雷による停電や装置故障、これらによるクエンチの発生、運転中の誤操作等を原因とする圧力上昇から設備を保護するため、緊急ガス放出ラインや安全弁・破裂板等(以下:安全弁等)を備えている。これらが作動することは、冷凍機設備の異常事態であり、ガスの放出による急激な圧力変動と、設備内のガスが失われ、運転の継続に影響を及ぼす場合がある。また、まれに安全弁等の故障や、低温ガスの吹き出しによる凍結で作動不良が起こり、ガスの放出がいつまでも続いてしまう不具合も発生する。

本ガス検出装置(以下:本装置)は、冷凍機設備の安全弁等からのガスの吹き出し・吹止まりを遠隔で検出するために開発したものであり、ガスの吹き出しを瞬時に検出し、冷凍機設備運転時における保安・安全性の向上を図る事を目的としている。

本装置は高圧ガス製造の現場では必要でありながら、実用化されていなかった技術であり、設備保安上の重要情報を得るために有用である。

本装置は、ガス中における音の伝搬速度(以下:音速)がガスによって異なることを利用しており、従来技術では実現困難な様々な特徴を持つ、メンテナンスフリーのガス検出装置を実現した。試作装置の稼働時間は7万時間を超え(2007年3月末)現在も不具合なく動作中である。

2:本装置の概要

2-1:要求される性能、及び従来技術における問題点

本装置に要求される性能としては、その目的から、長期間の安定動作を確保し、確実に漏洩ガスを検出する事が最も重要であり、検出にタイムラグがなく、ノイズや温度変化等、設置環境に影響されず、取扱が容易である事が望ましい。具体的には以下の条件を満たす必要がある。

2-1-①:メンテナンスフリーであること。

2-1-②:タイムラグ無く、瞬時にガスを検出できること。

2-1-③:ガス吹き出し時の振動・衝撃に耐えること。

2-1-④:強磁場、高湿度中で問題なく動作すること。

2-1-⑤:組立調整が容易であること。

2-1-⑥:現場での調整作業が一切不要であること。

2-1-⑦:低消費電力であること。

2-1-⑧:安価であること。

本装置の様な目的をもつヘリウム用のガス検出装置は、現在市販されていない。開発にあたっては、まずこれらの条件を満たし、使用に耐えうるものを従来技術の中で検討した。

現在実用化されているガス検出法としては、酸化反応、電気化学反応、熱伝導差等を利用するものが実用化されている。しかしながら、これらは検出に数秒から10秒程度のタイムラグが発生し、いずれも強磁場中での動作と、振動・衝撃への耐性は充分とは言えない。また消耗部分を有するため、定期的にメンテナンスが必要で、少なからぬランニングコストを要し、また長期連続動作に難点がある等、メンテナンスフリーとして取り扱うことができない等々の問題点がある。検討の結果、従来技術では要求を満たすことは困難との結論に達し、本技術を案出し装置を実用化した。

2-2:装置の構成

音速は媒質によって固有の値をもち、温度に依存する。

本装置は、空気中の音速(331m/秒)と被検出ガス中の

音速(ヘリウム:970m/秒)が異なる事を利用してガスの検出を行う。

最大の特徴は、速度を測定することなく、音波がガス中を通過した時に生じた音速の変化を、波形の位相変化としてフェーズロックドループ(以下:PLL)内で処理する事にある。このため本装置は、通常速度を計測する際に必要な、距離÷時間の演算を必要としない。故にセンサーのマイクロフォンとスピーカ間の位置合わせや温度補正も不要で、単純にスピーカから放出された音波を受信出来れば動作可能である。本装置のブロックダイアグラムをFig. 1に示す。

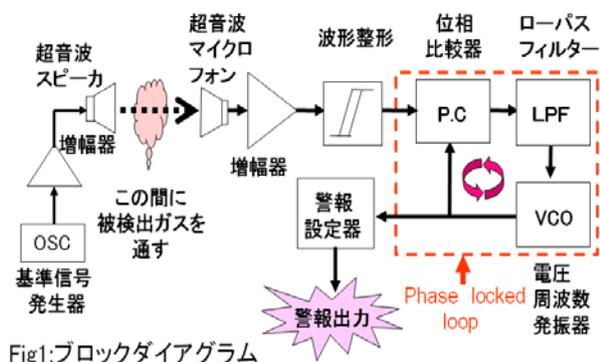
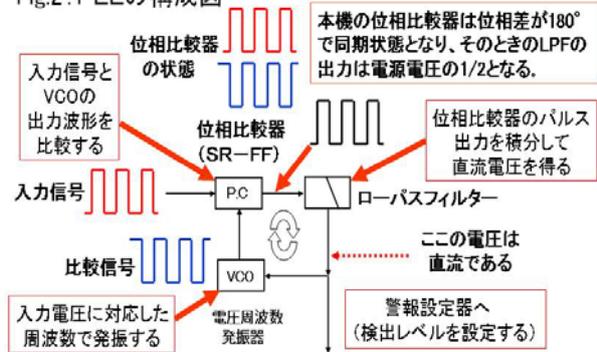


Fig1:ブロックダイアグラム

本装置は基準信号発生器、増幅器、超音波スピーカ、超音波マイクロフォン、波形整形器、位相比較器(以下:PC)、ローパスフィルター(以下:LPF)、電圧周波数発振器(以下:VCO)、及び警報設定器等から構成される。Fig. 1におけるPC以降の部分がPLL(Phase Locked Loop)と呼ばれ、PC、LPF、VCOの3要素から成り、これらは閉回路で結ばれ全体に帰還がかかる。以下PLLの動作について簡単に述べる。Fig. 2はPLLの構成を表したものである。

Fig.2: PLLの構成図



図中のPCは、入力信号とVCOからの比較信号の位相差を検出する誤差増幅器である。本装置ではエッジ動作

のSR-FF(セット・リセットフリップフロップ)型のPCを使用している。SR-FFはセットパルス入力とリセットパルス入力、及び出力の3端子を有しており、Fig. 2のPCにおいて、入力信号がセットパルスに、(入力信号がHレベルのときに出力が立ち上がる)、比較信号がリセットパルス(Hレベルとなれば出力は反転してゼロとなる)に対応し、相互の位相状態に応じたパルス列信号を出力する。

LPFはPCとVCO間に挿入され、PCからのパルス列信号の高調波・ノイズ等を除去し、VCOに制御信号の直流電圧を与える。この時定数は動作全体に影響を与えるので、適切な値を選ぶ必要がある。

VCOはLPFからの直流電圧に応じた周波数の信号を発生し、これがPCの比較信号となる。

ループ内においては、PCで各々の信号が比較され、LPFで積分された信号がVCOに入力されて、フィードバック作用により、入力信号の位相に追従するように制御される。

このようにPLLは位相領域におけるフィードバック機構であり、温度・圧力制御等で用いられる一般のフィードバック制御と同様に扱うことができる。

2-3:ガス検出動作

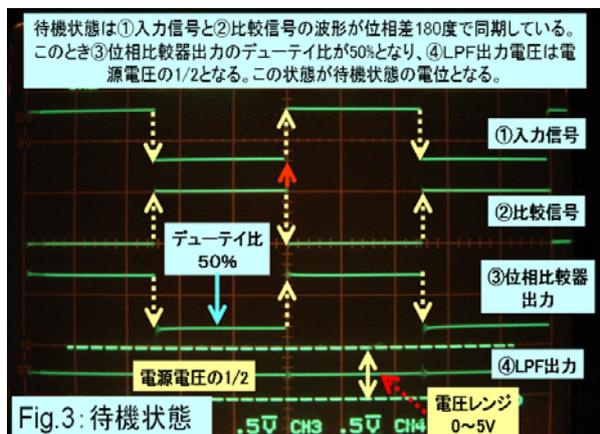
実機の信号の流れに沿ってガス検出動作を説明する。

まず基準信号をOSCで発生する。ここで使用している超音波センサーは固有の共振周波数を有しているため、OSCの発振周波数は一義的に決定される。

この信号が増幅され、超音波スピーカから音波が放出される。音波は空气中を伝わり、超音波マイクロフォンにて受信され増幅・波形整形を行いPLL内のPCへ入力される。PC内ではこの受信信号とVCOからの比較信号との位相を比較し、位相差に応じたパルス列信号を発生する。これをLPFで積分し直流信号を得て、VCOの周波数制御電圧とする。この信号によりVCOの周波数が制御され、PCに入力された入力信号と、ある一定の位相差で同期状態(又はロックとも言う)を保つように発振周波数が制御される。本装置の場合、PLLが同期するのが入力信号(受信波形)と比較信号(VCO出力波形)の位相差が 180° の時、PCからはデューティ比50%の矩形波が出力され、LPFで積分されると、電源電圧(5V)の1/2の電圧となる。

これが本装置の待機状態であり、言い方を変えれば空気中の音速を検出している状態に他ならない。

Fig. 3はこのときの各部の信号状態である。



この状態から、スピーカとマイクロフォン間に空気より音速が速いガス、(ヘリウム・水素等)が放出された場合について説明する。

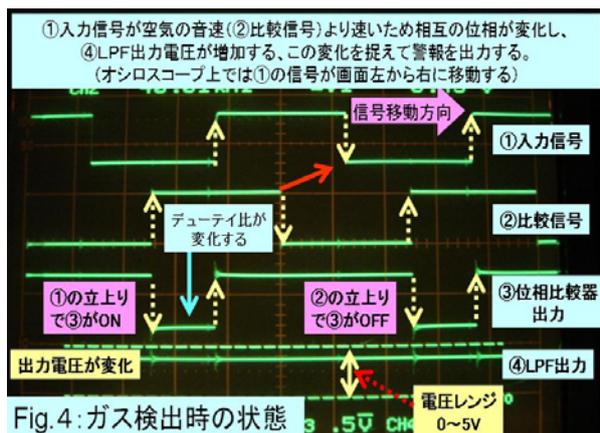


Fig. 4はガスを検出したときの各部の信号状態を表したものである。(この場合、音速は変化するが音波の波長は変化しない。)ヘリウム中の音速は空気中の約3倍であり、それがスピーカからマイクロフォンへ到達するため、同期が外れ①入力信号の波形の山と谷のタイミングが変化する。(空気より音速の速いガスの場合は、①入力信号がオシロスコープの画面上では左から右に流れる。)それにより③位相比較器出力が変化するので、④LPF出力が増加し、フィードバック作用によって再び位相を同期状態へ戻すように動作する。このときLPF出力は、待機状態の電位、すなわち電源電圧の1/2よりも高い電圧を得る。

ガスの検出はこのときのLPFの出力信号の変化を読み

取る事によって行う。

説明が冗長になるので省略するが、空気より音速が遅いガスを検出したときは、これと逆方向の動作が起こり、LPFの出力電圧は待機状態の電圧より低下する事になる。

つまり本装置は空気の音速を基準とし、入力信号波形の位相が一回転する範囲内で、被検出ガスの空気に対する音速の高低を弁別する事ができる。(なお水素ガス中の音速は1270m/sであり、ヘリウムガスよりさらに速く、検出はヘリウムガスより容易である。)

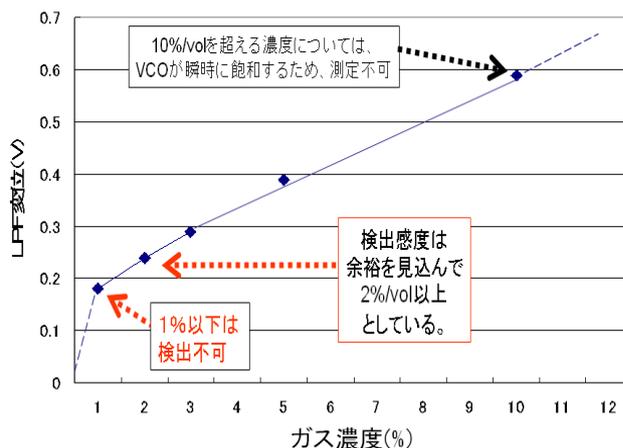
以上が本装置の概要である。参考のため最終頁に全回路図を示す。

3: 本装置の基本特性

本装置の基本特性は以下の通り。

- 使用周波数 40KHz
- 検出感度 2%以上(ヘリウムガス): Fig. 5に示す
- 検出距離 センサー間距離2m以内
(周囲温度16°C、無風状態)
- 温度安定性 ゼロ点変動30mV以内
(周囲温度-20°C~50°C)
- 電源 5V(安定化)、待機時消費電流 40mA
- 警報出力 接点信号、警報ランプ点滅、ブザー鳴動

Fig.5: 検出感度(ヘリウムガスによる)



4: ガス検出部(センサー)

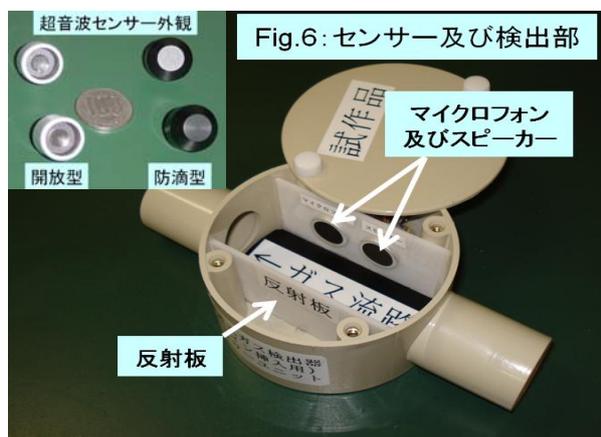
本装置は音波の変化を処理しガス検出を行うガス検出器と、センサーであるガス検出部から構成される。これまではガス検出器内の信号処理について述べて来たが、ここ

では音波の変化を捉えるガス検出部について記す。

本装置で用いているセンサーは、圧電セラミックス製の超音波スピーカと超音波マイクロフォンで、これは酸化反応や電気化学反応を利用したものではないため、長寿命である。また高インピーダンスであり共振周波数で鋭いピークをもち、非磁性体で、振動・衝撃に強いという特徴をもつ。検出部の開発はこれらの点に留意して行う必要がある。

検出部は、センサーを安全弁等の取り付け対象に固定する役目も負うので、安全弁等の動作に影響を与える事なく、かつ効率よく音波を検出する必要がある。また安全弁等の点検・交換に際して、迅速かつ容易に取り外しができるものでなければならない。

Fig. 6は本装置で使用しているセンサー、及びそれを組み込んだ検出部の一例である。



これはスピーカとマイクロフォンを並べてケースに納め、その反対側に反射板を設け、ガスは音波の経路を横切る構造となっている。センサーを直線上に向い合わせて配置してもよいが、音波を反射させることでセンサー間距離が2倍となり、得られる変位も倍増し、前置増幅器なしで利得を上げる事が出来る。よって検出部は基本的に音波を反射させる構造を採っている。検出部の寸法・形状は自由で、音波を受信する事が出来ればよい。今まで使用していた検出部と全く違う寸法・形状の検出部を接続しても、そのまま無調整で使用できる。本装置の大きなメリットである。

5: 装置使用の実際

現在、本装置は BELLE 冷凍機の安全弁等に取付け使用しており、停電時等における緊急ガス放出をトラブルなく検

出している。また、今まで検出が不可能だった放出弁からの微少なガス漏れを発見する事ができ、保安上有用である事が認識された。現在、現場での結果をフィードバックしながら改良を加え、運用を行っているところである。

装置使用の実際を以下に示す。Fig. 7は、Fig. 6の検出部を冷凍機設備の放出配管へ取り付けただのものである。

Fig. 8は安全弁の吹き出し口近傍に設置した例である。

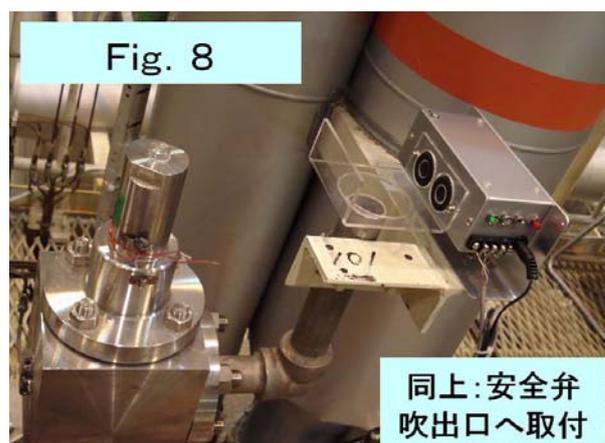


Fig. 9はガス検出器本体で、本装置の検出部以外を納

めたものである。組み立て時に初期設定として零点調整と警報設定を要するのみで、後の調整は一切必要ない。

使用に際しては、ガス検出部を取り付け対象に据え付けた後、ケーブルを背面の端子に接続し、電源を投入すれば即座に動作する。そのまま無調整で使用でき、取扱は極めて容易である。

6:本装置の特徴

本装置が従来技術と比較して特に改善・進歩させた点を以下に記す。

6-①:音波を用いた他のガス検出方式と比較し構造が簡単で安価である。

6-②:熱伝導等を利用した従来技術と比較し安定性に優れ長期連続動作が可能で、初期設定以外の調整は不要である。長寿命のセンサーを用いることで、メンテナンスフリーを実現した。

6-③:放出された音波を受信できれば良いので、センサーの位置合わせ等、一切不要。現場での据付・取扱いが容易である。

6-④:従来のガスセンサーは設置点のガスしか検出できないが、センサーのスピーカとマイクロフォン間の直線上のみならず、音波の反射等を利用すれば従来技術では困難だった部位のガス検出を行う事も可能である。

6-⑤:センサーが非磁性のため、磁場の影響を受けない。実際に1[T]中で問題なく動作する事を確認済みである。本機構の低温・冷凍機設備は、超伝導電磁石と組み合わせ使用される機会が多く、強磁場中で動作する事の意味は大きい。

このように本装置は、今まで例のない独特の構造・特徴をもつガス検出装置であり、他では持ち得ない様々なメリットを有している。

7:問題点及び今後の展開

本装置をいくつかの技術展示会等に出展する機会があり、その際、本装置に関する様々なご意見を頂いた。それは開発者自身が、改良を要すると考える部分と全く重なっており、本装置の応用範囲を広げるにあたり、ネックになっている部分でもあった。以下、現状における問題点を挙げ検討

を行ってみたい。

7-1:空気と音速に近いガスの検出は困難

本装置は現状では残念ながら、空気音速に近い窒素や酸素の検出はできない。検出機構の精度を上げれば原理的に可能であるが、一気に構造が複雑化し調整が困難になり、シンプルであるメリットが失われ、現行装置の特徴を活かせなくなる可能性が大きい。使用周波数の最適化も図る必要があると思われるが、入手可能な超音波センサーの周波数はそれほど多くなく、特に高い周波数のものは高価で入手が難しいという問題がある。またセンサー・検出部の改良も必要で、例えばホーンを取り付ければ、音波の指向性を高め、効率を上げることが出来るので前置増幅器が不要となる、等のメリットが生まれる。この点については検出回路だけではなく、装置全体の精度の向上を図る事が必要であると考えている。

7-2:検出感度が低い

装置の目的からは現行の感度で不都合はないが、技術的な意味から、感度の向上と低消費電力化並びに、よりローコストを目指し改良型を製作した。改良機は、検出感度を約2倍、消費電力3mA以下と、電池駆動も充分視野に入る値とする事ができた。またコンパクト化し取扱いの利便を図るため、電源以外をひとつの筐体に収めた。(Fig. 8がそれであり、BELLE冷凍機で運用中。)

検出感度については、なお一層の向上を目指し改良を進めている。

7-3:音波の到達距離が短い

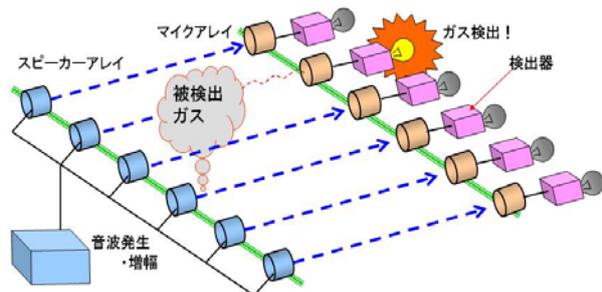
音波の到達距離の延伸も重要な課題であると考えている。本来が安全弁等への取り付けを目的としているため、現状では音波到達距離が2m程度であるが、これを数十mに延ばすことが出来れば、安全弁等以外へ応用範囲を広げることが出来る。

距離を伸ばすためには単純にスピーカへの入力電力を増やせば良いわけではなく、効率よく音波を放出し、周囲の影響、特に反射音や風に対する処理を厳重に行う必要がある。技術的困難があるが、積極的に取り組んでみたいと

考えている。

到達距離を延ばす事が出来れば、Fig. 10の様なシステムを構築する事が出来る。このシステムは、例えば将来水素エネルギーが普及し、水素自動車が一般化した際には、マンションの地下駐車場や工場建屋等でガス漏れ警報装置として利用できると思われる。

Fig.10: 平面ガス監視システム(案)
広範囲の平面を監視。地下駐車場等へ設置。



7-4: 外乱に対しての影響

BELLE冷凍機設備が設置されている実験室内には、様々なノイズや空調の風等があり、これらが外乱となって誤動作が起こる事がある。誤動作は信頼性の低下を意味するので、実際の運用結果を基にして、外乱を受けにくい構造をもつ検出部の開発を行っている。

誤動作の原因のほとんどは風によるもので、(センサー全体が覆われている Fig. 7 の様なタイプでは風による誤動作は起きていない。)現場においては机上テスト時には想定出来なかった複雑な空気の流れがあり、風を避けるための覆いや、風向きを考慮したセンサー配置、また検出部の取付け姿勢・形状の変更等の改良を行い、実際の使用状況下で信頼性の検証を行っているところである。なお本装置に関する国内の特許出願9件のうち、8件が検出部に関するものである。

8: おわりに

本装置開発の直接の動機は、以前ヘリウム冷凍機を運転していた際に、操作ミスで破裂板を破ってしまい、それに気付かずガスをほとんど失ってしまった事に端を発している。

爾来、細々と開発を続けていたが失敗ばかりが続き、何とかしたいと思いながらどうにもならず、やがて放り出した

形になっていた。あるとき音波を使う事を思いつき、何とか思いつきを形にする事が出来た。時間はかかったが当初の目標は達成出来たと思う。現在は、運用を重ねながら信頼性の向上と、使い易さを追求して装置全般の改良を行い、ガス検出以外の応用も検討しているところである。

9: 謝辞

本装置の開発においては、試験運用段階以降に様々な方々のお力添えを頂きました。

技術展示会への出展にご協力頂いた方々、技術賞に推薦して下さいました方々、また特許出願に関しては知財係の方々に大変お世話になりました。お一人お一人のお名前を挙げる事はいたしません、この場をお借りして心から深くお礼申し上げます次第です。ありがとうございました。

10: その他

10-1: 参考文献等

2004年度大阪大学技術研究会予稿集:P38

News@KEK 2006.4-11:P58-60

TX テクノロジーショーケース2007インツクバ予稿集:P49

科学技術振興機構・新技術説明会2007予稿集:P17-21

常陽新聞2007年2月26日:7面【話題】

2007年度春季低温工学・超電導学会予稿集:P61

10-2: 本技術に関する知的財産権は以下の通り

国内に関して

特開2007-040823、特開2007-040794

特開2007-033206、特開2007-033204

特開2007-033199、特開2007-033191

特開2006-105917、特開2005-043091

特願2005-296119

米国特許

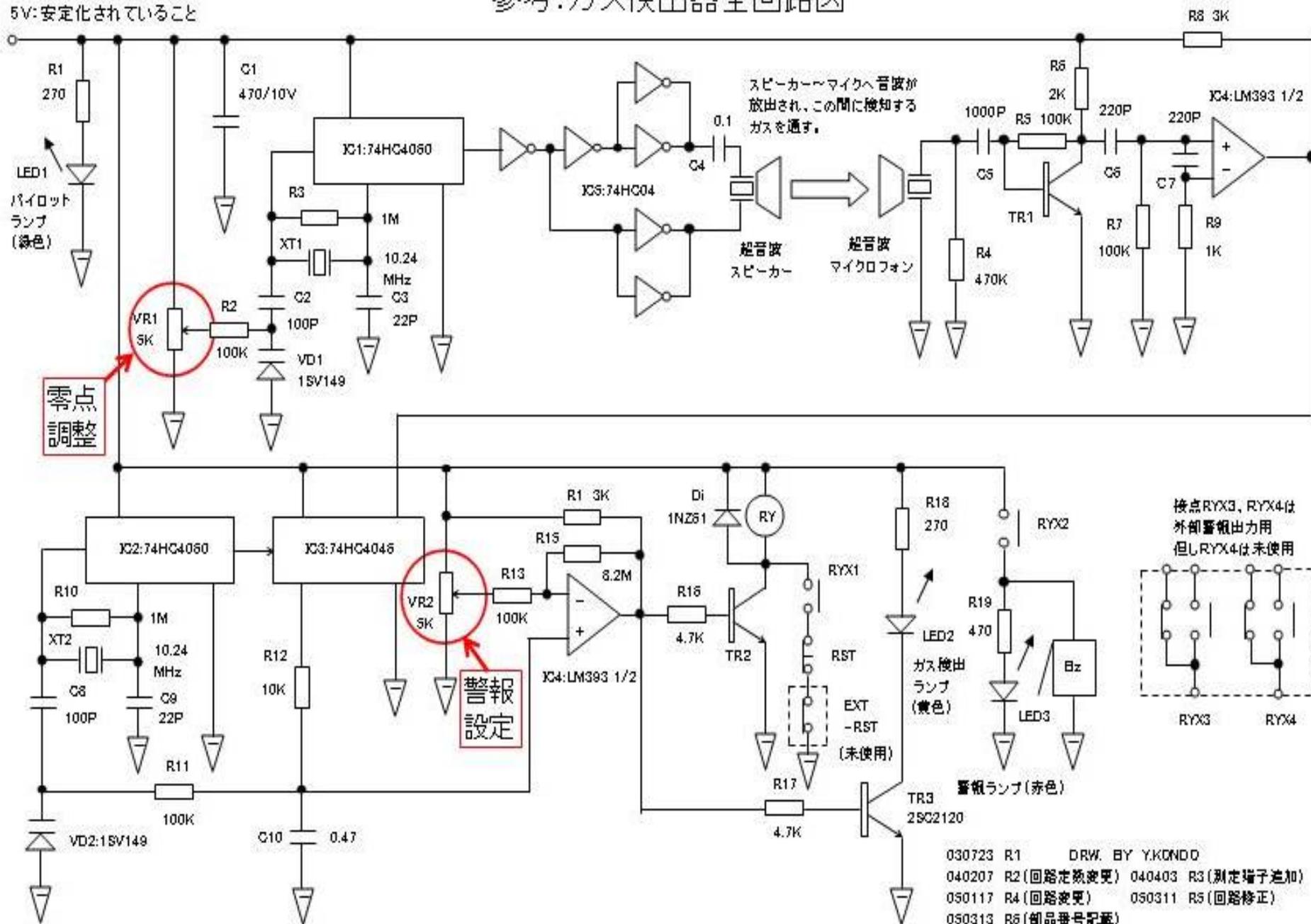
GAS DETECTING METHOD、AND GAS

DETECTING DEVICE

United States Patent No. US 7, 143, 632 B2

参考:ガス検出器全回路図

5V:安定化されていること



030723 R1 DRW. BY Y.KONDO
 040207 R2 (回路定数変更) 040403 R3 (測定端子追加)
 050117 R4 (回路変更) 050311 R5 (回路修正)
 050313 R6 (部品番号記載)

K2K 実験サイバー検出器読み出し回路基板(FEB*)

素粒子原子核研究所物理第3研究系 村上 武

はじめに

FEB 基板は K2K 実験サイバー検出器のフロントエンド読み出し回路用に開発した基板です。シンチレーションファイバー・マルチアノードフォトマル (MAPMT) と組合わせた検出器からの読み出しに使用され、K2K 実験は無事終了しました。

FEB; Front End Board

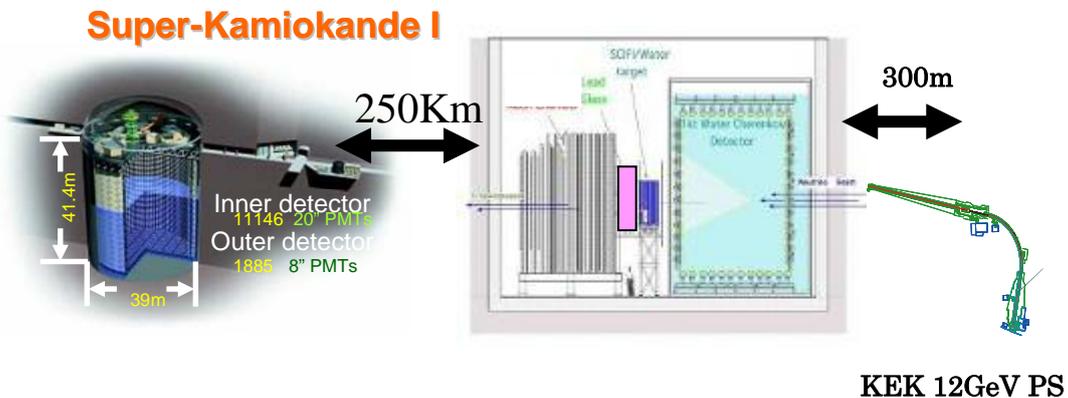
— 内容 —

- 1、K2K(ニュートリノ)実験の概要、サイバー検出器の概要
- 2、FEB 基板回路について
 - 1)ASIC(VATA Chip)の概略
 - 2)高密度実装
 - 3)メカニカル部
 - 4)大量製造・インジェクション基板について
- 3、米国での再利用(FNAL)について
- 4、そこから得た技術の活用(フレキシ基板)について
- 5、まとめ

1、K2K(ニュートリノ)実験の概要、サイバー検出器の概要

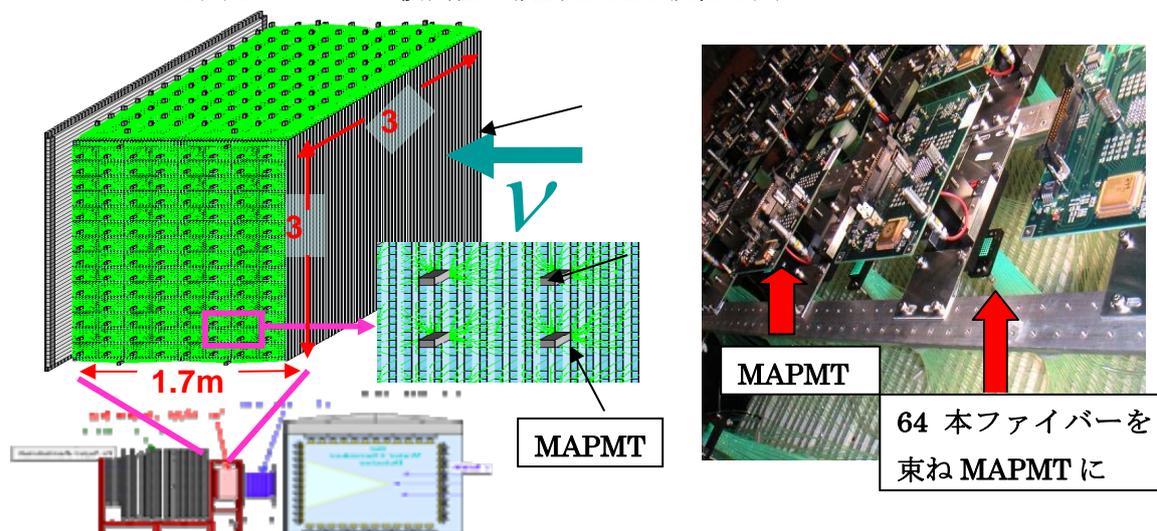
K2K 実験は 1999 年 4 月から KEK で人工的に作られたニュートリノを 250 キロ離れた岐阜県神岡にある東京大学宇宙線研究所のニュートリノ検出器・スーパーカミオカンデに発射し、その間に生ずる「ニュートリノ振動」と呼ばれる現象を精密に観測する世界に先がけて開始した国際共同実験です(写真 1)。

写真 1 K2K 実験の概要



サイバー検出器は縦、横 16000 本のシンチファイバーと 250 個のマルチアノードフォトマル(64CH-MAPMT)で構成されています。この 3m のシンチファイバーを 64 本束ね、片端を 64CH-MAPMT に入れ (写真 2)、そのフォトマル信号は FEB 上で処理されます。

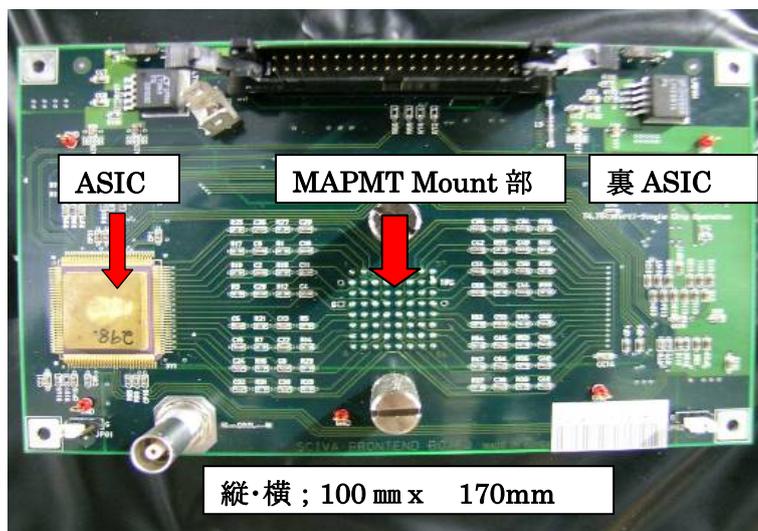
写真 2 サイバー検出器の概要と FEB 設置写真



2、FEB 基板回路について

シンチファイバー64 本束ねフォトマルに入った信号は、専用のコネクタを介して FEB 上に入ります(写真 3)。入った 64 信号は AC カップルを通して最初の 32 信号は 1 つ目の ASIC*1 で処理され、残り 32 信号は 2 つ目の ASIC で処理されます。出力の 1 つは 64 入力信号の OR 信号が出力される(Ta/Tb)。もう 1 つは 64 入力信号が決められたクロック信号(CKb)に同期して 64 信号シリアルに出力(Outp/Outm)されます。

写真 3 FEB 全体写真



2-1)ASIC(VATA Chip)の概略

FEB で使用した ASIC Chip は VATA Chip*2 と呼ばれ、ASIC は 26mm 角のケースに 2 つのベアチップ(VA/TA ; 4mm 角)が 114 本のワイヤーでリード足とワイヤーボンディングされている(写真 4)。

TA の機能は 32 信号の入力が各々 Fast shaper(80ns)を通り Discriminator されたのち 32 信号の OR がとられ、その OR 信号が出力されます。この信号は Fast trigger としてこれから述べる VA のサンプルホールド信号として使用されます。

VA の機能は 32 信号の入力が各々 Preamp され slow shaper を通り sample&hold されます。この sample&hold は 32 信号入力各々のチャージ量に相当し、マルチプレクサーされ、クロックに同期してシリアルに出力されます(図 1)。

写真 4 ASIC Chip 写真

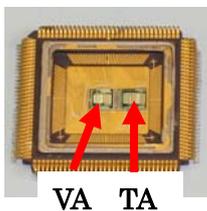
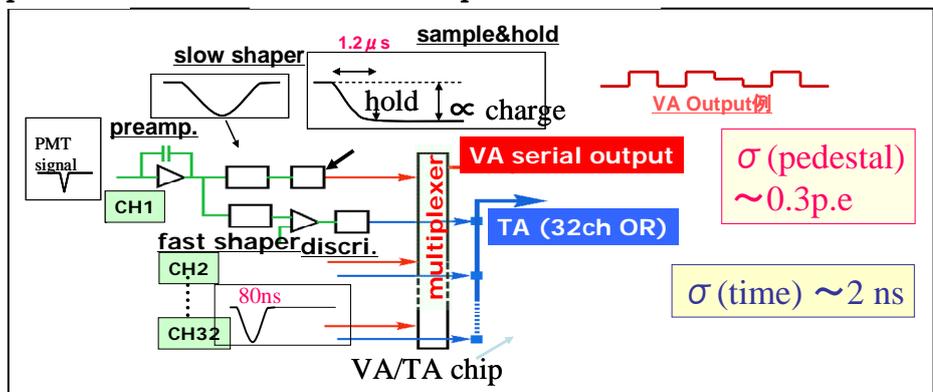


図 1 ASIC Chip ブロック図



2-2)高密度実装

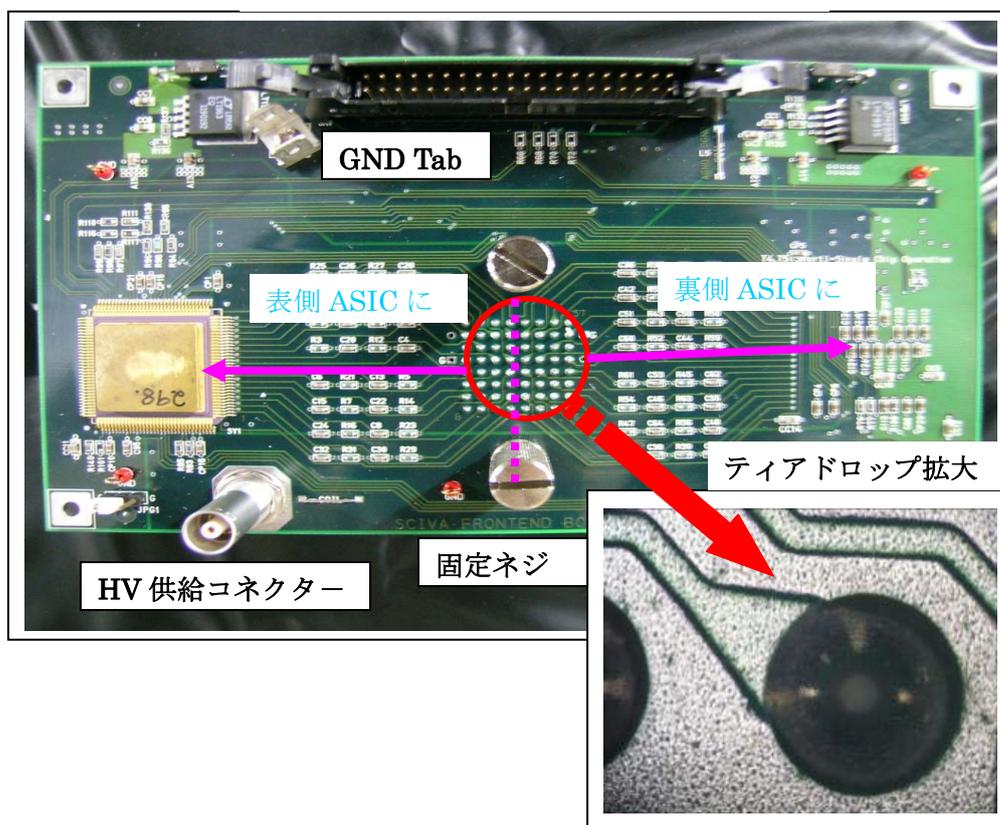
FEB はファイバー64 本分のエリア以下の大きさに抑え、サイバー検出器の側面、上面に設置されたアルミ材の上に規則正しく取付け、更に MAPMT を FEB に固定ネジで取付ける。ASIC Chip は 32ch /chip なので FEB 裏面にも 1 chip 実装して 64ch 分を構成している。実装している抵抗、コンデンサーは全て素子サイズの小さな表面実装部品を使用し、基板サイズをコンパクトにしてある。MAPMT 用ソケット部の配線パターンはティアドロップ技法を使用している。ランドとパターンを接続する時にどうしても繋ぎの部分でパターンが細る傾向がある。それをこのティアドロップ技法を使うことにより確実にランドとパターンを接続することが出来る(写真 5)。

2-3)メカニカル部

写真 5 でわかるように FEB には MAPMT 固定ネジがあり、基板と一体となっていて、逆さにしてもネジは落ちません。ネジは手で回して MAPMT を固定します。MAPMT 用 (2kV)電源はコネクタ(LEMO)と専用ケーブルを介して供給しています。基板上には MAPMT 用電源パターンは安全面とノイズ対策上置いていません。基板上ではアナロググランドとデジタルグランドを分離していますが、共通にすることも簡単に出来ます。データ収集ケーブルのグランドも手による差込で可能な GND タブを使用して設置場所が不便

な所でも作業がしやすくしています。データ収集ケーブルによる伝送では差動伝送で、外来ノイズに対して強くしてあります。伝送及び基板内での配線はアナログ信号・デジタル信号それぞれ分離しています。

写真5 FEBとティアドロップ部拡大写真



2-4)大量製造・インジェクション基板について

FEBの試作はKEK・回路室で行い、大量製造はK2K実験に共同実験として参加しているソウル大学が主導となり、韓国の会社で製造しました。製造枚数 250 枚(64chx250 枚)=16000ch。

当初は実装部品が違ったり、ASIC Chipの動作不良等がありました。またASIC Chipにバイアスを掛けるにもチップの個体差があり、そこで急遽インジェクション基板を開発しました(写真6)。これは1入力に矩形波を入れると、8x8のピン(64ch)より擬似フォトマル信号が出力されます。このピンの部分をFEBのMAPMTソケットに差込して、あたかもPMTからの信号かのようにして、FEBの各種テスト、バイアス値の調整に使用しました。

250枚のFEBはバーコード管理し、FEBはそれぞれチェックシート(写真7)に従いパラメーター記入し、ペDESTAL・リニアリティの補正がデータ収集解析で個々に加えられます。これら一連の作業は韓国で行い、インジェクション基板が威力を発揮しました。

写真6 インジェクション基板

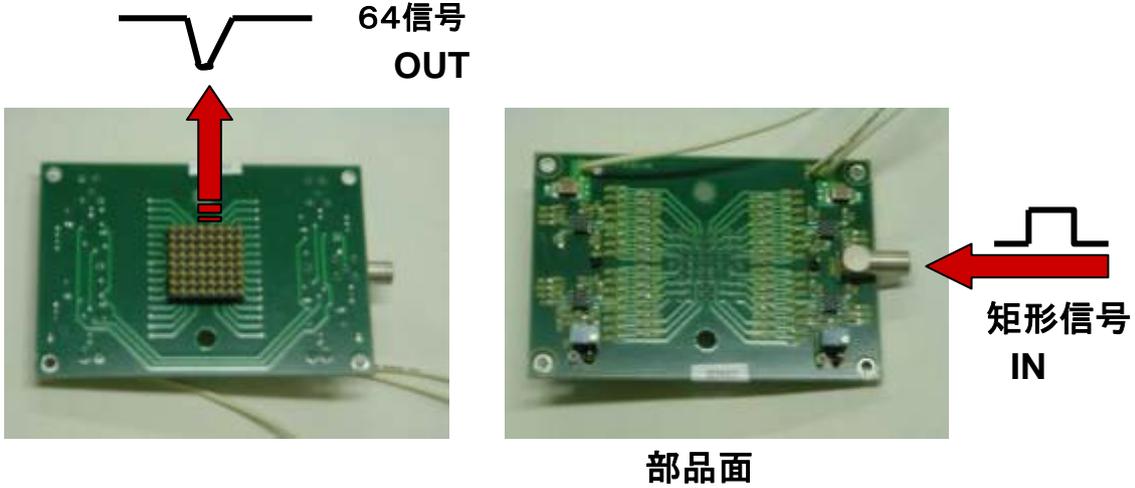


写真7 FEB とチェックシート

FEBのチェックシート
(韓国にて)

1/1 ページ



バーコード
による管理

- チップのバイアス値/枚
- ペDESTAL・リニアリティ-
測定

収集データの補正

```

Checklist for Shift Person
FEB ID: _____ DATE: _____
Name of shift crew: _____

-- Cable Connection --
( ) Confirm VME is off.
( ) Connect FEB to cable.
( ) Confirm the other side of cable is connected to DAQ board.
( ) Connect shield ground lines of cable to ground tab.

-- Fuse Check & DC Bias Check
( ) Fuse check with multi-meter before power is on.
( ) Turn on VME.
( ) Check +/- 5V on fuse.
( ) Check +/- 2.5V on filter output (VVSS/TVSS/VVDS/TVDD, on AI 3, 5, 2, 4)
( ) Check bias voltages of VA/TA according to the check sheet.

-- Test Mode --
( ) Check no LEWP cable connection to DAQ board.
( ) Run script for the test mode.
( ) Check the results.
    1. Gain
    2. Deviation from linear response.
    3. Noise
    "For whole 64 channels"
    (Note - not 1 channel, look at all 64 channels !!!)

-- Normal Mode --
( ) Confirm turn off VME.
( ) Set function generator with correct numbers.
    (Freq : 70Hz, Ampl : 800mV, Offset : -400mV, Slop Function)
( ) Connection between function generator and DAQ board with LEMO cable.
( ) Insert the charge injection board (CIB) onto FEB correctly.
( ) Connect positive/negative power lines to fuses of FEB correctly.
( ) Connect LEMO cable from function generator to the input of CIB.
( ) Confirm turn on VME.
( ) Run script, "normalmode.sh".
( ) Check if there is any dead channel.
( ) Turn OFF VME.
( ) Disconnect all lines of CIB, pull out CIB (Be careful!!!), disconnect FEB.
    
```

FEB Number	Chip ID 0 / II		
VVDD(A13)(V)	TVDD(A15)(V)	VVSS(A12)(V)	TVSS(A14)(V)

	PREBIAS(V)	SHABIAS(V)	VFS T(AV)
FRONT(CHIP1)	R96	R95	R110
BACK(CHIP2)	R104	R103	R118
	VFP(mV)		VFS VA(mV)
BACK	R113(CHIP1)	R122(CHIP2)	R112(CHIP1) R120(CHIP2)

<http://susy06.snu.ac.kr/~xfcms/checklist.html>

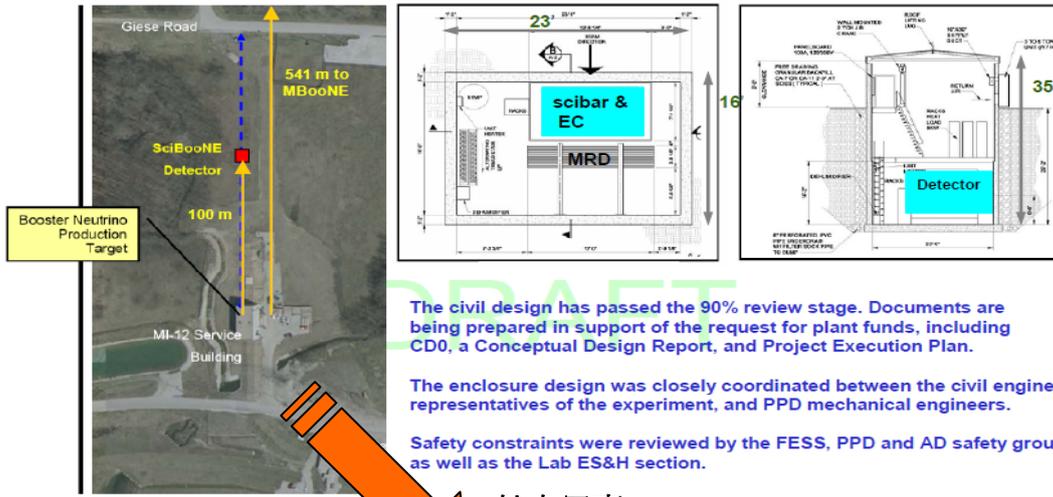
2003/05/22

3、米国での再利用(FNAL)について

K2K 実験は無事終了し、上記読出し回路部が全て日米科学技術協力の一環で米国(フェル研)での SciBooNE (写真8) と呼ばれるニュートリノ実験に再利用されと聞き大変うれしく思っています。

写真8 SciBooNE 写真(From FERMI)

Properties of the detector
Scibar – Location in the BNB

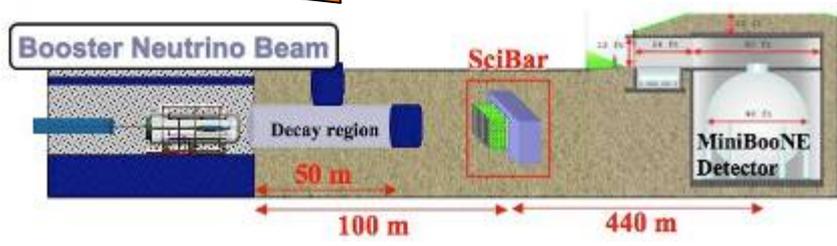


The civil design has passed the 90% review stage. Documents are being prepared in support of the request for plant funds, including CD0, a Conceptual Design Report, and Project Execution Plan.

The enclosure design was closely coordinated between the civil engineers, representatives of the experiment, and PPD mechanical engineers.

Safety constraints were reviewed by the FESS, PPD and AD safety groups, as well as the Lab ES&H section.

拡大写真

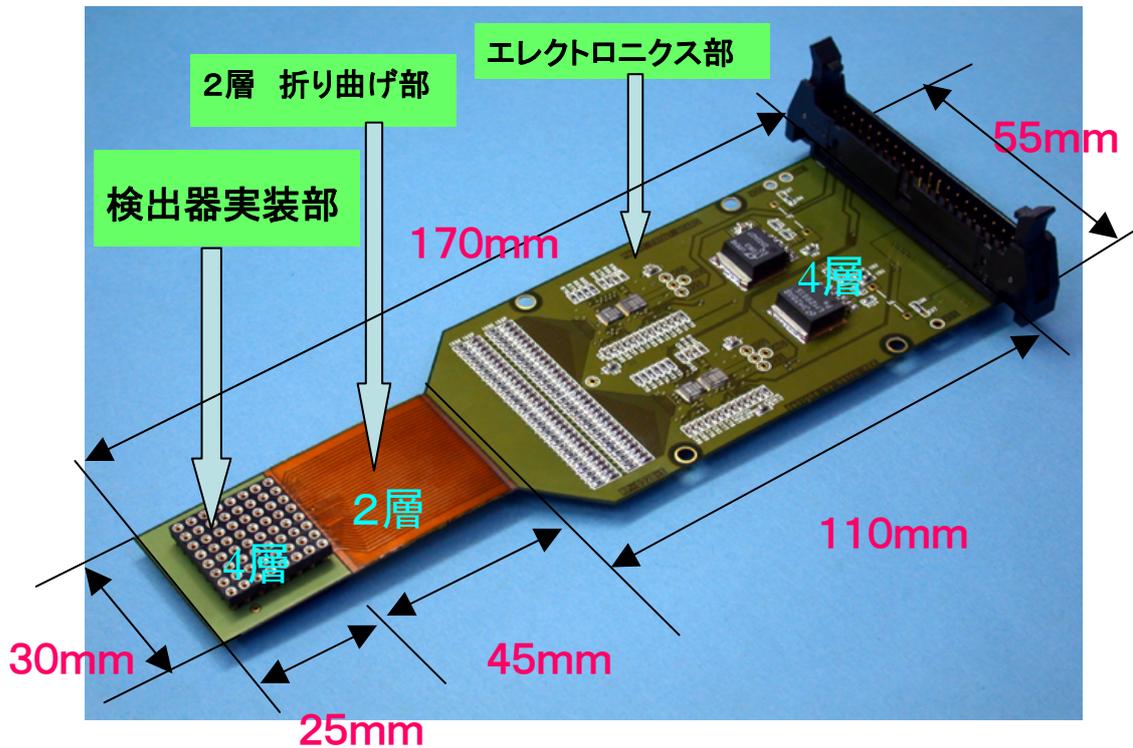


4、そこから得た技術の活用(フレキシ基板)について

4-1) 活用例 1

VATA チップを使用した例としてフレキシ基板があり、写真9に示します。基板材がポリイミド材で2層部分が 50 μ mm 厚、4層部分が 200 μ mm 厚です。写真の左側のソケット部に検出器(MAPMT-64ch 想定)が結合され、2層部分で信号が伝送されその部分は 90° に折り曲げ可能です。それにより検出器の高密度配置が可能となりました。写真右側は回路部で右端に標準データ収集モジュールと接続する為の 40 芯コネクタを取付けてあります。FEB では VATA チップが金属のパッケージに入っていたが、ここでは VA-TA 夫々ペアを接着材でフレキシ基板上に貼付けしペアとフレキシ基板に回路パターン配線した部分を 25 μ の金線ワイヤーでワイヤーボンディングしてある。それにより FEB より 1/20 面積にすることが可能となった。このモジュールは 64ch-MAPMT 読出し回路標準モジュールとして利用者に提供している。

写真9 64CH MAPMT 読出し回路基板

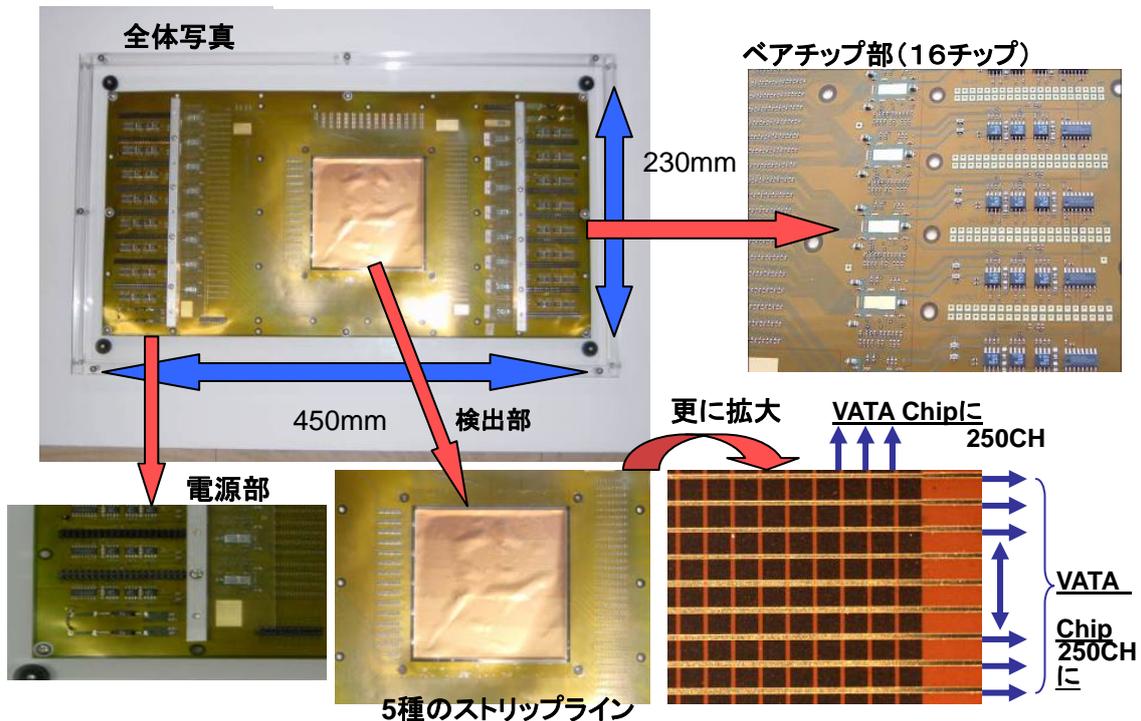


4-2) 活用例 2

VATA チップを使用した活用例 2 として写真 10 に示します。この基板も基板材がポリイミド材のフレキシ基板です。基板サイズが縦・横(230mm x 450mm)と非常に大きいです。更に VATA ベアチップが夫々 16 個実装されベアは全てフレキシ基板とワイヤーボンディングされています。基板の中心に 100mm 角のストリップラインがパターンされています。基板表面側は 5 種類のストリップライン (25 μ 、40 μ 、50 μ 、75 μ 、100 μ 線幅 ; ピッチは 400 μ ; 厚 50 μ) が合計 250 ライン左右にパターン化されていて、片端を回路部に配線してあります。一方基板裏面にもストリップライン (全て 360 μ 線幅 ; ピッチは 400 μ) が合計 250 ライン上下にパターン化されていて、片端を回路部に配線してあります。この左右、上下のラインが信号を検知することにより 100mm 角での座標値がわかります。

この回路基板は測定器開発室のプロジェクトの 1 つである MPGD*₃ 開発の検出器からの 2 次元読出し回路基板です。X 線を利用した 2 次元読出し回路としても利用を考えています。

写真 10 500CH MPGD 読出し回路基



5、まとめ

K 2 K 実験サイバー検出器読出し回路基板をデザイン・製作し実験に貢献でき大変嬉しく思っています。

海外 ASIC なので英文マニュアルを読みながら回路デザイン、思うように動作してくれなく苦労しました。しかし最後にはメカニカル部と回路部を組合わせた低ノイズ FEB ができました。そこから得られたノウハウを生かし技術の活用（フレキシ基板への応用）ができました。

これまで京都大学の中家先生、横山先生、院生の皆様、測定器開発室発足してからは幅先生、宇野先生、回路室の田中先生には色々サポートしていただき大変有難うございました。この場を借りてお礼申し上げます。

最後に読出し回路部が米国で利用され、SciBooNE 実験が成功し良好な成果が出ることを願います。

(注釈、参照)

ASIC*₁; Application Specific Integrated Circuit

VATA Chip*₂; IDEAS(ノルウェー)製 ASIC の総称名 (VA;VA32_Rich2,TA;TA32CG2 が製品名
<http://www.ideas.no/products/ASICs/pdf/>

MPGD*₃; Micro Pattern Gas Detector

<http://www-sciboone.fnal.gov/>

<http://www.kek.jp/newskek/2006/novdec/SciBooNE.html>

(投稿論文)

- 1) Design, construction, and initial performance of SciBar detector in K2K experiment.

S. Yamamoto et al. 2005. 6pp.

Published in IEEE Trans.Nucl.Sci.52:2992-2997,2005.

- 2) The K2K SciBar detector.

K. Nitta et al. Jun 2004. 7pp.

Contributed to 10th Vienna Conference on Instrumentation, Vienna, Austria, 16-21 Feb 2004.

Published in Nucl.Instrum.Meth.A535:147-151,2004. e-Print Archive: hep-ex/0406023

マイクロチャンネル分光結晶の開発

○内田佳伯

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所

1,概要

PF マルチポールビームラインBL16A の従来の分光結晶では放射光における熱問題等が十分に解決されていなかったため分光結晶の性能を引き出しきれていなかった。そこでマイクロチャンネル分光結晶を開発し、熱問題等を解決することにより分光結晶の性能を引き出すことが可能となった。

2.本論

<はじめに>

円形加速器を電子、陽電子などの荷電粒子が光速に近い速さで回っている場合、それらが磁場によって軌道を変えられる時、電磁波が放射される、これを放射光と言う。放射光は図1に示すように可視光からX線の領域までの幅の広いエネルギー範囲の光を含む連続光であり、この強力な電磁波を用いて広く物理・化学、生物に至る電子状態、電子構造に関する研究が行われている。一般には軌道を変える向電磁石から発する放射光を用いるが、さらに高い強度の放射光光源として、永久磁石を交互に配置したマルチポールウイグラーが開発されている。本報告このマルチポールウイグラーはBL16における分光結晶の開発に関するものである。大強度の放射光光源の開発は言うまでもなくその利用実験に大きな利益を与えるが、一方で、熱問題という大きな問題を投げかけてくる。BL16の場合全放射熱量は約8KWに達し、図1に示すように任意のエネルギーのX線

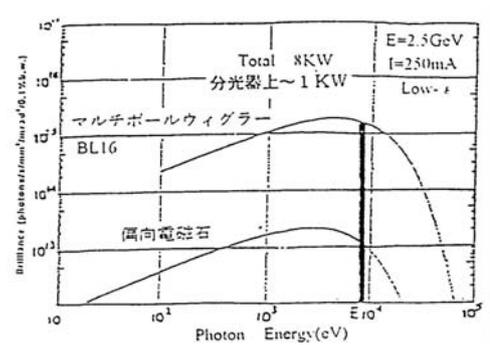
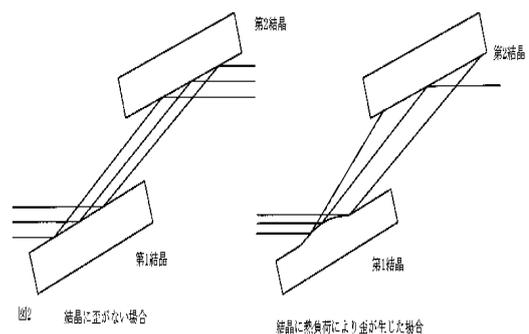


図1



を取り出す分光結晶(X線領域の分光素子としてシリコン結晶が用いられる)に熱変形と言う問題を投げかけている。すなわちBL16に導入されている定位置出射のため採用されている2結晶分光器の場合、第1結晶に変形がない時には、第1結晶で回折したX線はすべて第2結晶で回折されるが、もし入射X線の熱負荷により熱変形が生ずると、第1結晶で回折したX線は一部しか第2結晶で回折されない。従って2結晶分光器ではこの熱変形を取り除くことが重要な開発要素となる。

<マイクロチャンネル分光結晶の概要>

従来BL16で用いられてきた直接水冷の第1結晶を図3に示す。シリコン結晶に冷却水が流れる水路は切れ、結晶を直接冷却し、水が漏れないようにOリングを使用する構造となっている。またみぞ幅は0.6mm、フィン幅は1mmである。しかしながらこの冷却方式では十分ではなかった。この分光結晶の変形を示すため高調波のシリコン(333)反射(25KeV)のロックンングカーブを図4に示す。先ず、蓄積電流の少ない(b)においても計算値に比べて半値幅がかなり広がり、このことは水圧による変形が生じていることを示している。さらに蓄積電流の増加とともに(C)半値幅の値が増加するのは、明らかに熱変形によるものである。このように直接冷却しているもののいぜん問題点としては、冷却効果と水圧による変形という問題が残された。そこで上記の問題を解決するために単位面積あたりの水路の数を増し冷却効率をあげるマイクロチャンネル結晶の導入を検討し同時に水圧による変形を除去するために、水路を切ったシリコン結晶の下部を別のブロックと接合することをを行った。これにより水圧・冷却効率という問題は解決できるが接合時及び結晶表面研磨時の変形という別な問題が生ずることとなった。接合時の変形の除去に関しては接合の際結晶を数百度に加熱する必要があるがフィンの切れた結晶とホルドブロックが異なる物質で熱膨張係数が大きく異なると冷却した際に応力が残り変形する可能性がある。また同じ物質同士のほうが接合しやすい面もある。そこで結晶、ブロックともシリコンとした。また接合方法は当初銀・ガラスペーストを用いたがペーストが冷却水に溶けフィンにつまり冷却効率が低下する欠点があったため現在は水との安定性等の理由により金の拡散接合を用いることで接合時の変形は除去できた。次に研磨時の変形除去に関しては結晶表面の熱負荷を冷却水に逃がすため結晶表面

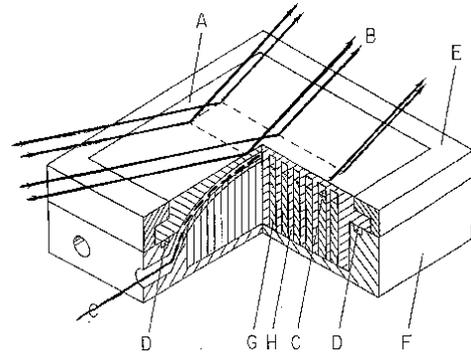


図 3

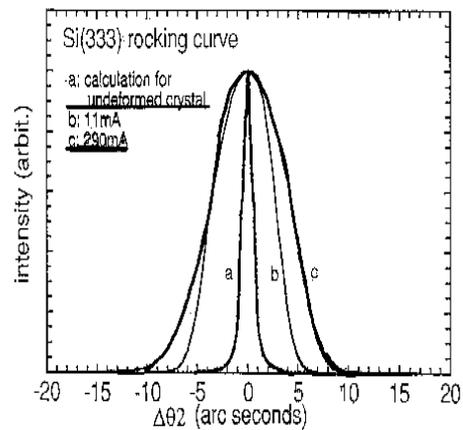


図 4

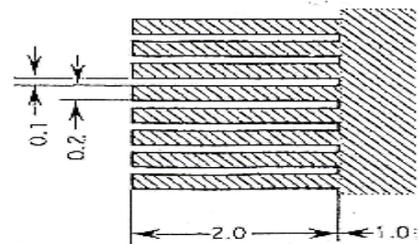
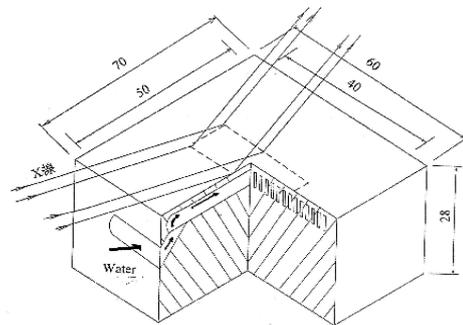


図 5

と水路との距離をある程度短くする(1mm)必要があるが接合する際には(1)最初から結晶表

面と水路との距離を1mmとした結晶を接合する方法と(2)厚い結晶(数cm)にフィンを切り接合後に1mmとなるまで研磨する方法がある。(1)ではフィンが切れた結晶の厚みが3mmと薄いため接合時に(2)では研磨時に結晶が変形する可能性があったが両方試作し評価した結果(2)のほうが優れていた。以上により接合時・研磨時の変形の問題は解決できた。図5に今回開発したマイクロチャンネル結晶の概要を示す。

マイクロチャンネル結晶にはみぞ幅0.1mm、フィン幅0.2mm、フィンの長さ2mmの水路が切られている。
<性能評価>

性能評価には以下に述べる2通りの方法を用いた。1つは放射光を用いず、X線管を用いた評価(オフライン評価)であり、他方は実際に放射光を用いた評価(オンライン評価)である。図6にオフライン評価を行う実験を示す。

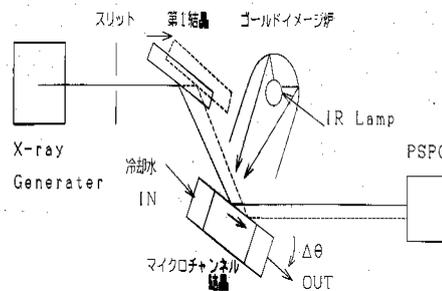


図6

封入X線源を用い、その後ろにスリット、第1結晶、マイクロチャンネル結晶、検出器を配置しており、赤外線ゴールドイメージ炉をもちいてマイクロチャンネル結晶に熱負荷をかけられるようになっている。評価方法はマイクロチャンネル結晶の変形を測定するために、第1結晶を移動させ、マイクロチャンネル結晶にX線があたる場所を変える。ここで第1結晶面とマイクロチャンネル結晶面とが平行でなければ、回折はおこらない。逆にその回折角のずれを場所ごとで測定することにより結晶の変形を測定することができる。図7はその測定結果をまとめたものである。黒丸は冷却水を流さず負荷をかけない状態、四角印は冷却水を流して負荷をかけない状態、三角印は冷却水を流して熱負荷(約1KW)をかけた状態で測定したものである。これらの結果から、実際に分光結晶として用いる約-15mm～15mmの領域において貼り合わせだけで結晶は上に凸に約3秒変形しているが、水圧による変形はほとんどなく、熱負荷による変形は約2秒である。このオフライン評価でマイクロチャンネル結晶は、従来の直接水冷結晶よりよい性能を示すことが分かった。続いて実際にBL16に導入し、オンラインでの評価した結果を図8に示す。図は8.3KeVでのシリコン(111)

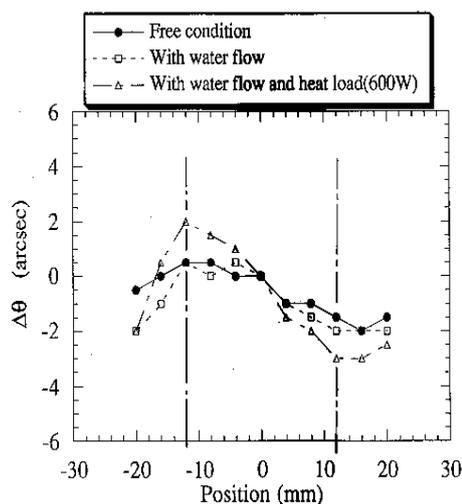


図7

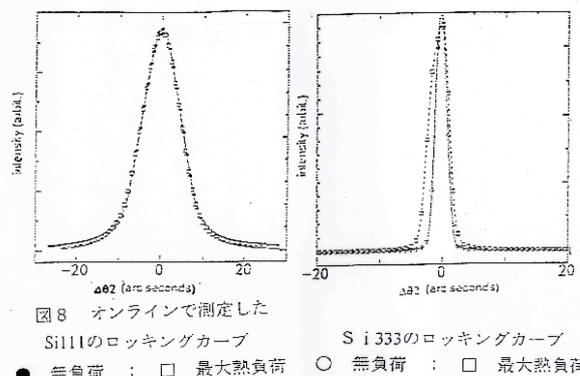


図8 オンラインで測定した
Si111のロックンクカーブ
Si333のロックンクカーブ
● 無負荷 ; □ 最大熱負荷 ○ 無負荷 ; □ 最大熱負荷

図8

からの一次波のロックンクカーブ及び高調波25KeVのシリコン(333)反射でのロックンクカーブ

を示す。先ず1次波に関してはスリットを全開にした最大熱負荷においても熱負荷のない状態のものに変化が見られず、かつその半値幅は理論値と一致している。3次高調波においてもわずかにピークの広がりが見られるがそれでも2.2秒から3.5秒程度の変化でしかない。

<シュミレーション>

結晶表面温度上昇が大きいほど熱変形が大きくなるので温度上昇がどれくらいになるか計算することも重要である。そこで最初に簡単に手計算により温度上昇を計算した。分光結晶の場合は加熱面積が比較広くその直下の裏面を冷却して熱の流れが厚さ方向に1次元的に伝わるモデルで計算することができる。この場合素子の厚み方向に1次元的に熱が伝わるとし、素子表面から厚み方向にはかった距離を $X(m)$ 、素子の熱伝導率を $\lambda(W/mK)$ 、流体の熱伝達率を

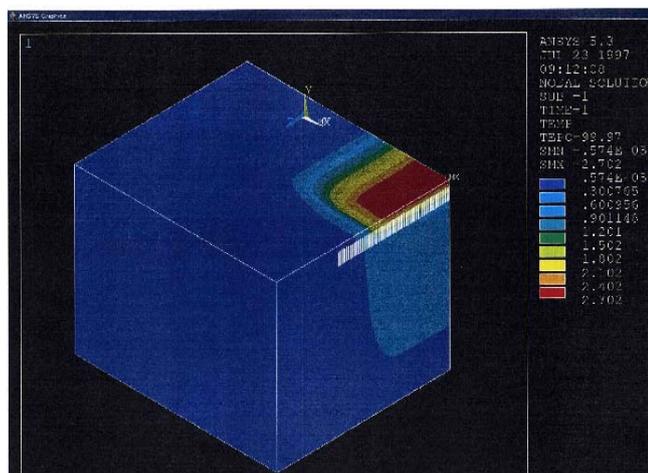


図9

$\alpha(W/m^2 K)$ 、素子表面の熱流束を $q(W/m^2)$ 、熱負荷面と冷却面の面積比を S^* 、素子表面の温度を θ_s 、冷却面の温度を θ_w 、冷却流体の温度を θ_b とすると $\theta_s = \theta_b + (q/\alpha S^*) + (qx/\lambda)$ 、 $\theta_w = \theta_b + (q/\alpha S^*)$ で与えられ、計算すると $3.5^\circ C$ となった。次に形状が複雑なので有限要素法 *ansys* を用いて結晶表面温度上昇のシュミレーションも行った結果約 $3^\circ C$ となった(図9)。最後にオンラインの結果であるが赤外線カメラで結晶表面温度上昇を測定した結果約 $4^\circ C$ でありシュミレーションの結果とほぼ同じ値となった。

<まとめ>

今回開発したマイクロチャンネル分光結晶は十分に高熱負荷 X 線光学素子として用いることができることが明らかになった。実際 BL16 において結晶交換することなく約 10 年性能を発揮し続けた。残念ながら諸般の事情により 2006 年で BL16A は閉鎖されたが結晶は新規ミニポールビームライン BL3 に移設され、評価の結果新規ビームラインでも使用上問題のない性能がでている

粒子加速器・物理実験用超伝導低温機器における

TIG 自動溶接技術の開発

Development of Automatic TIG Welding Technology for

Cryogenic System in Particle Accelerator Physics

共通基盤研究施設

機械工学センター

安島泰雄

1 はじめに

大強度陽子加速器 J-PARC の 50GeV-750kW 陽子ビームを利用した次期ニュートリノ振動実験用のビームラインの建設が進められている。このビームラインには、双極磁場と 4 曲磁場を同時に発生する複合磁場型超伝導磁石を設置することが決定している。

この超伝導磁石の冷媒を保持する圧力容器は、図 1 に示すようにシェルと呼ばれる半円状にロールした長さ約 4m、厚さ 10mm のステンレス板を鉄ヨーク外周に被せこの板を縦継ぎ溶接することで形成されている。

高圧ガス保安法の要請から、この圧力容器の縦継ぎ溶接部は、溶接線全長にわたって裏当て金無しの“完全溶け込みの片側突合せ溶接”であることが求められている。また、シェルの溶接による変形を磁石性能評価の指針である軸方向真直度、ねじれが 0.3mm 以下であること。さらに、シェル溶接部の安定な品質の確保並びに作業効率と製造コストの低減化が求められた。

今回、この片側突合せ溶接部にインサートリングを、挟み込み、さらに自動溶接機を併用することにより、圧力容器の設計課題であったシェルの縦継ぎ溶接技術を確立した。



J-PARC 全景

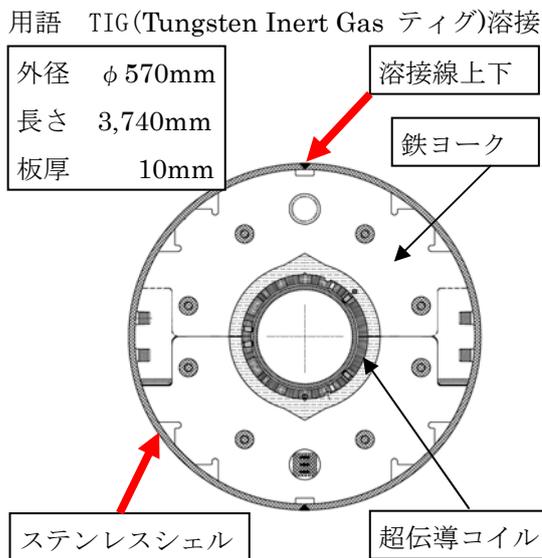


図 1 超伝導磁石の断面とシェル溶接線

2 シェル溶接部の継ぎ手形状と自動溶接機の最適条件

シェル溶接部の継ぎ手形状は、完全溶け込み片側突合せ溶接を行うため、U 字形開先を採用した。この開先形状の検討段階で、高圧ガス保安法の適用を目標に裏ビードの形成状態や溶接層数並びに余盛高さ等の検討を最初に行った。この検討結果をもとに平板を用いた開先形状の選択や裏ビードの形成状態の健全性を確

認し、超伝導磁石ショートサンプル及びプロトタイプの溶接を行った。この溶接過程において自動溶接機の設定パラメータである溶接電流、電圧、溶接速度、パルス周波数、フィラーの供給量、溶接終始点の設定を決定した。

図2に示すように開先の先端部に凸型断面を持つ SUS308L 製のインサートリングを挟み込み、溶接初層時の完全溶け込みの確保を計画した。継ぎ手の性能確認として、初層溶接後ビデオスコープで溶接線全線にわたる目視検査、溶接終了後に溶接線全線にわたる放射線透過試験 (RT 検査) 及び浸透探傷試験 (PT 検) を行った。

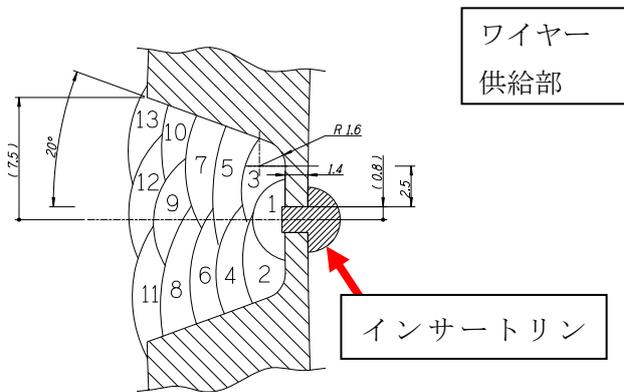


図2 シェル継ぎ手溶接部の断面構造

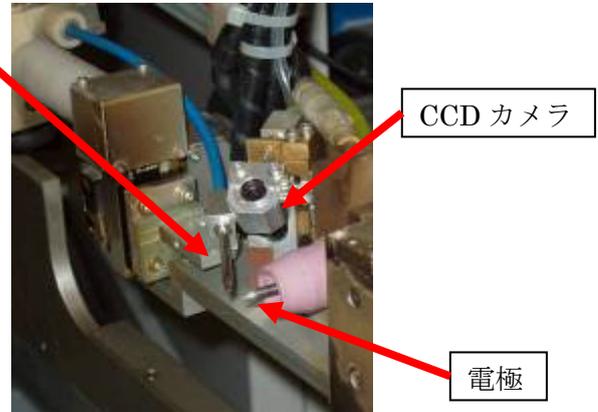


図3 溶接機ヘッド

3 裏ビードの形成とバックシールドガスの管理

裏ビードの正常な形成のために、溶接中の残存酸素濃度が 0.5%/volume 以下に管理することが必要で、図4のバックシールドガス(Ar)専用治具を超伝導磁石ヨークとシェルの間に装填し、ガス置換を行った。この置換作業に4時間程度必要で作業効率と経済性を考え改良することが求められた。

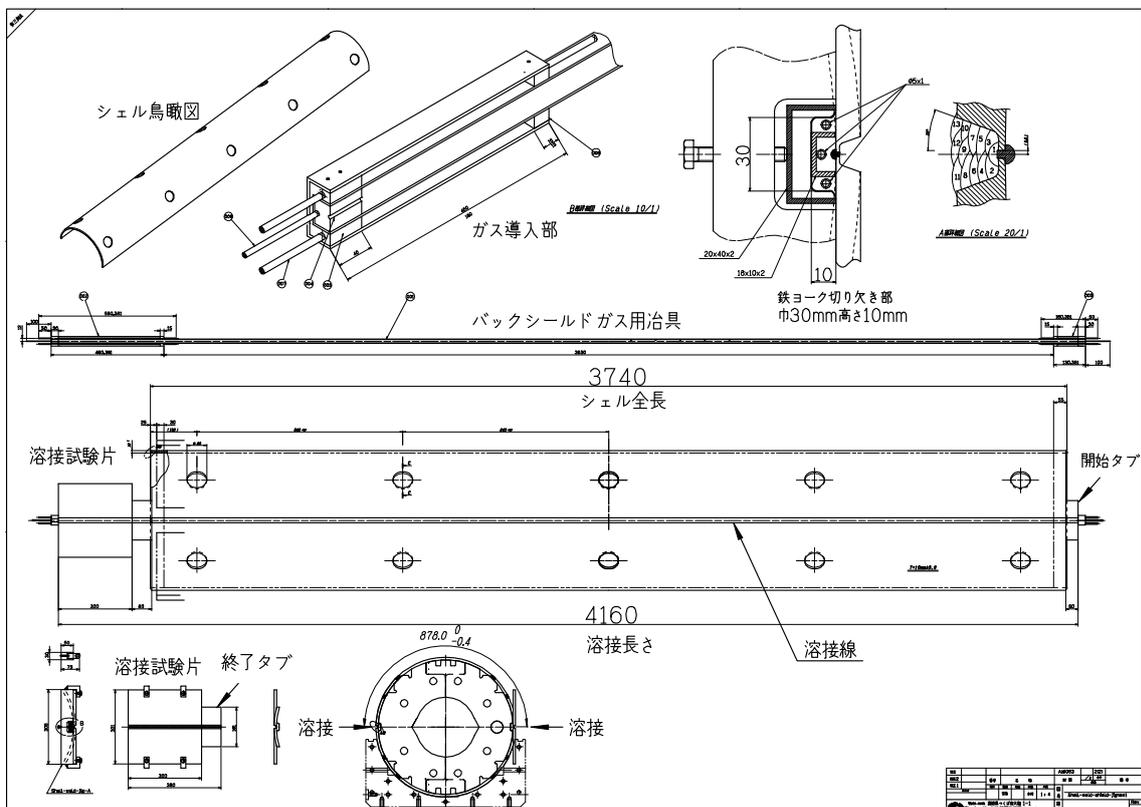


図4 バックシールドガス用治具

4 溶接部の安定な品質の確保・作業の効率化と製造コストの低減化

超伝導磁石シェルについて開先形状を含めた再設計を行い、溶接パス（1パスの溶接1時間以上）数を再考した。ルート面距離を2.5mmから2mm（図5）にすることで強度を損なわず溶接パスを減少し作業時間の短縮を図ることとした。設計肉厚1.4mm最大差0.3mmを持つルート面肉厚を100mmピッチで測定し、測定された肉厚に合わせて溶接電流の微調整をすることにより欠陥の無い溶接ビードを形成した。また4時間以上必要であった溶接開始までの段取りとガス置換並び位置合わせについてバックシールドガス装填治具を鉄ヨークの空間に装填した後、ガス導入口と出口部だけを残し隙間を全てアルミテープで目張りをした。この段取りによってガス置換時間を2時間以下とすることが出来た。

溶接ビードの乱れを解消するため、フィラー（溶接棒）をソリッドタイプからストランドタイプ（図6）に変更することにより溶接層数を6層13パスが5層11パスとした。この結果、2箇所ある縦継ぎ溶接線で計4パス減少することになり1台の超伝導磁石では4時間、超伝導磁石製作数全体では128時間もの作業効率と経済性の改善となった。

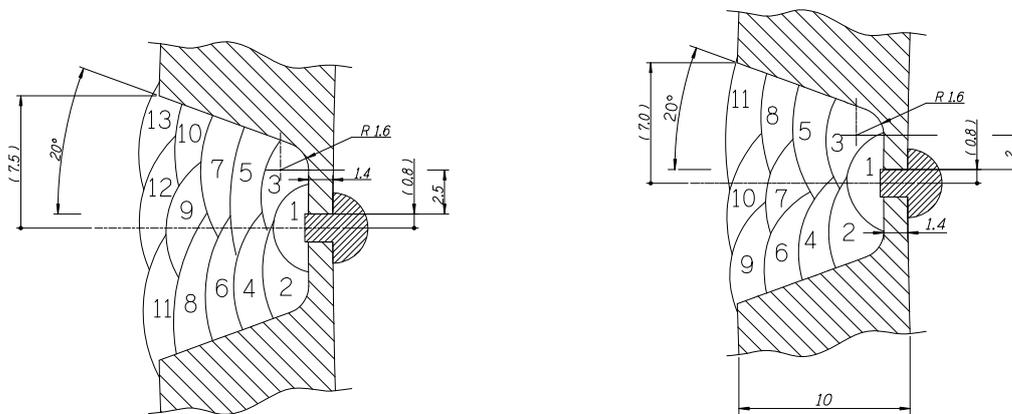


図5 シェルルート面距離と溶接パス

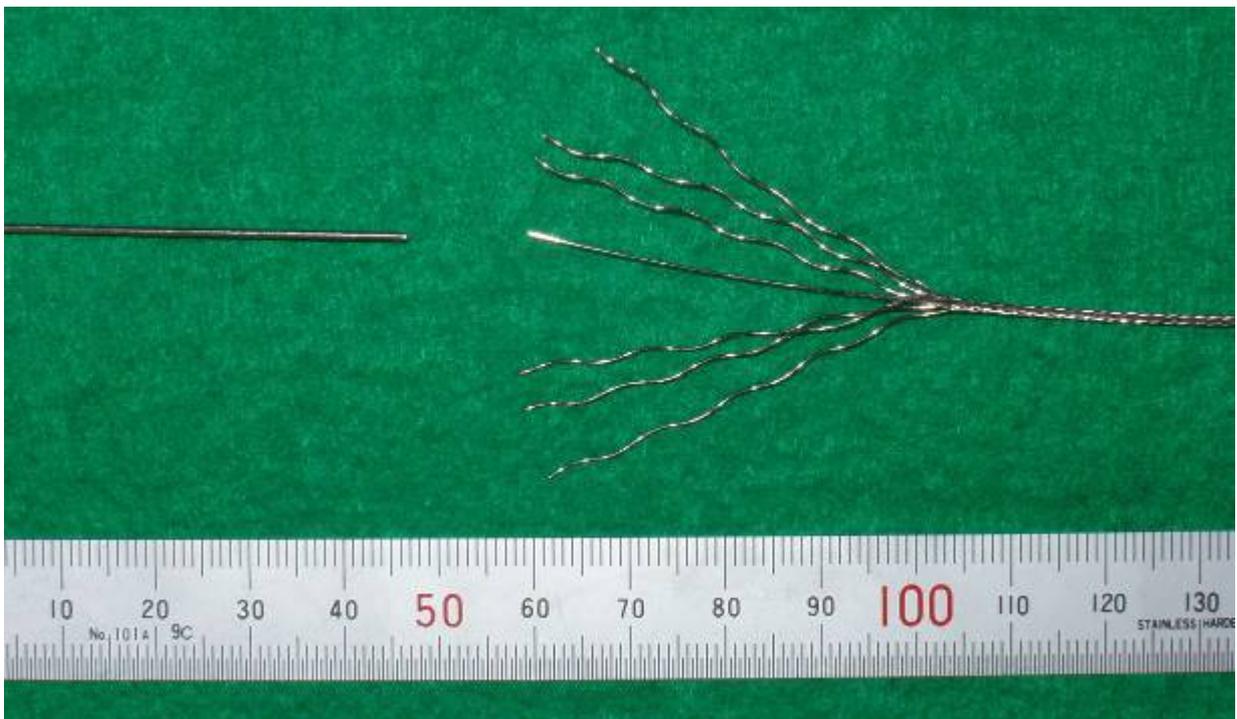


図6 ソリッドワイヤー（左） ストランドワイヤー7本より線（右）

5 ねじれ防止と形状測定

シェルの縦継ぎ溶接によって発生する超伝導磁石の変形、ねじれを防止することは、超伝導磁石の安定した性能を保証する上で重要な技術課題である。構造上2箇所あるシェル縦継ぎ溶接線を左右同時進行で溶接することは、変形防止上有効な手段であり、自動溶接機の最大の特徴である。レーザートラッカーを使用した精密測定結果を図7に示す。

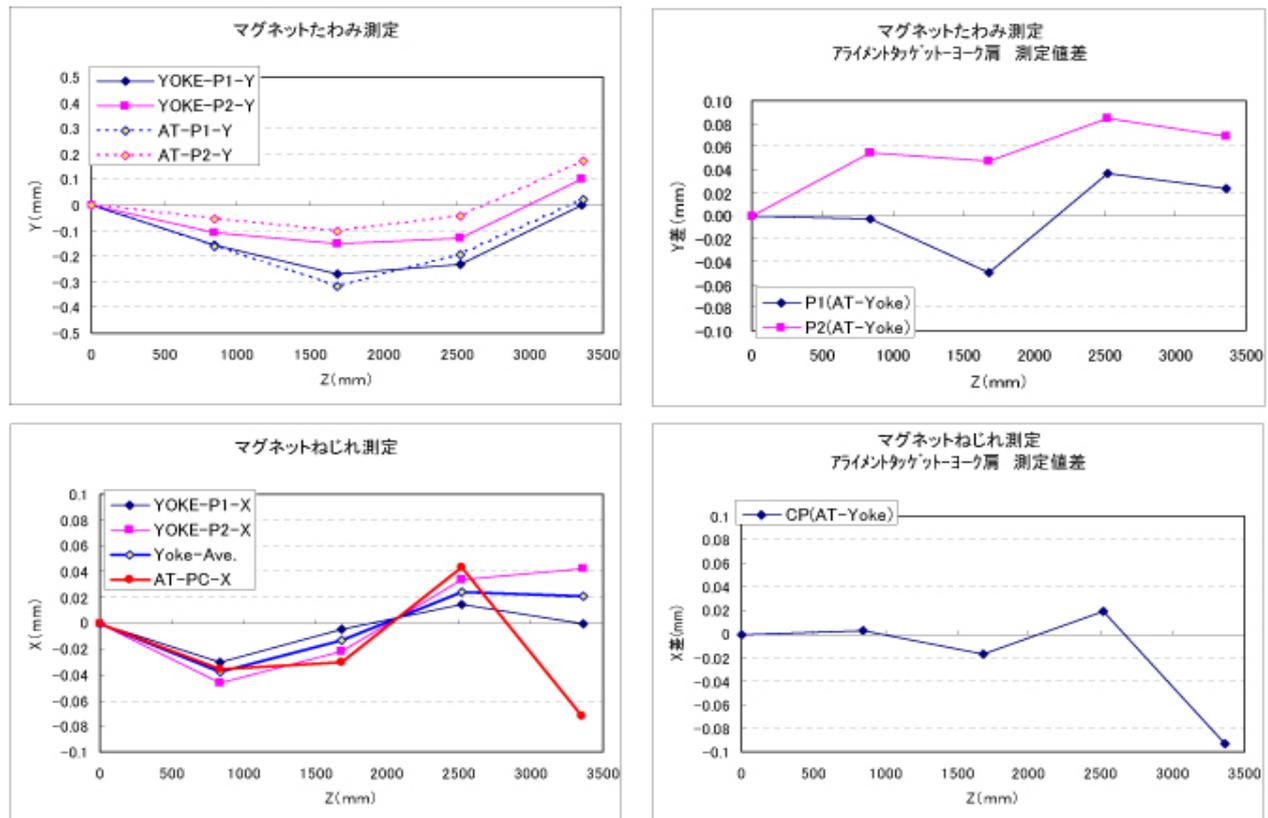


図7 測定結果 測定 KEK 都丸 (株) 東芝

6 今後の課題・展望

今後、自動溶接機において唯一自動化されていないのがフィラーの供給部分である。手溶接では右手で溶接トーチをコントロールし、左手でフィラーの挿入角度、位置、供給量を立体的な角度で見ながら調整する。今回、溶接トーチ付近に取り付けた、CCDカメラの映像をモニター（平面的な映像）で熔融プール（金属が液状化している部分）の状態を見ながら溶接オペレーターが手動で挿入角度、位置（0.3mm）を操作することが求められた。ここが一番難しい所で溶接オペレーターの経験と技量の必要とする作業であった。今回使用したプレス治具は、SSC用超伝導磁石開発のために製作されたものを再々利用（LHC超伝導磁石の開発に使用）した。そのプレス支柱と超伝導磁石フォーミングブロック間の空間は、35mmと非常に狭いものであった。この限られた空間に溶接機能を全て盛り込むことは不可能であり自動溶接機を含めた新しいプレス治具の使用が可能であれば溶接トーチのウェービング（揺動）、双方向（前進、後退）機能を備えることにより、フィラー供給位置の許容公差は格段に広がり安価なソリッドワイヤーの使用も可能になると考えられる。また双方向で溶接することにより溶接時間を短縮することは安易なことで、これらを可能にすることで熟練度の高い溶接技術者を必要とすることなく機械精度の均一化、高品質で、製造コストを軽減する完全自動化の実現が可能であると考えられる。

7 まとめ

高圧ガス保安法を遵守し、圧力容器の設計課題であった“完全溶け込み片側突き合わせ溶接法”による、シェルの縦継ぎ溶接技術を確立した。また磁石性能評価の指針である軸方向真直度、ねじれが 0.3mm以下であることを立証し、複合磁場型超伝導磁石の製造契約会社である三菱電機㈱に、この溶接技術の技術移転を溶接手順書と共に行い、現在実機 12 号機の縦継ぎ溶接が終了した。



2 台同時溶接



溶接全景

参考文献

- (1) 安島泰雄 2005 年度 秋季低温工学・超伝導学会
J-PARC ニュートリノビームライン用超伝導電磁石システム
- (2) 安島泰雄 2006 年 分子科学研究所 技術研究会
クライオスタット自動溶接技術の開発
- (3) 安島泰雄 2006 年 高エネ研メカワークショップ
超伝導マグネット圧力容器の溶接技術
- (4) 安島泰雄 2007 年 KEK 技術交流会
J-PARC 装置関連技術

編集後記

KEK技術賞は、高エネルギー加速器研究機構における技術上の優れた業績を表彰し、もって広く技術の発展に資することを目的として平成12年度に創設された。

推薦された技術賞候補案件は、各研究所、研究施設、技術部及び管理局から選出された委員による「KEK技術賞専門部会」において審査される。審査は各推薦者によるそれぞれの技術内容紹介と技術開発現場における候補者本人による内容説明を必ず行なった上、部会において審議、最終判断を行なう。その際、より十分な検討を行なうため、追加資料を本人から提出してもらうこともある。こうした審査を経て、技術賞が決定され機構長に推薦される。

審査基準は、これまで積み上げられてきた審査に対する基本的な考え方をふまえ、以下の4項目を基本としている。

- (1) 技術への取り組みが創造的である
- (2) 技術の具体化への貢献、成果が顕著である
- (3) KEKの推進する研究計画への技術貢献が顕著である
- (4) 技術伝承への努力が積み重ねられている

KEK技術賞の募集は毎年11月までを公募期間とし、年度内に受賞者を決定・発表する。受賞論文は、KEKインターナル・レポート（本冊子）として出版され、広く関係者等にも配布されている。応募様式のダウンロード等、更に詳しいことは本機構の共済福祉係のホームページをご覧ください、更に多くの皆さんが自分の磨き上げた技術をもって、KEK技術賞へチャレンジしていただくようお願いしたい。

平成20年2月
出版担当 人事労務課共済福祉係