



KEK Internal 2002-10  
January 2003  
A/H/M/R/D

平成 1 3 年度

# KEK 技術賞 受賞論文集

The KEK technology prize 2001

Edited by  
T. Notake

文部科学省 高エネルギー加速器研究機構



High Energy Accelerator Research Organization

**High Energy Accelerator Research Organization (KEK)**

KEK Reports are available from:

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

Phone: +81-29-864-5137  
Fax: +81-29-864-4604  
E-mail: [irdpub@mail.kek.jp](mailto:irdpub@mail.kek.jp)  
Internet: <http://www.kek.jp>

## 序 文

平成 13 年度 KEK 技術賞選考委員会  
委員長 人見 宣輝

KEK 技術賞は平成 12 年度に発足し、平成 13 年度は第 2 回目となるので、前回の経験を活かして、選考日程を二か月程速め、推薦書では選考に必要な事項をできるだけ記述していただけるような工夫するなど、選考方法なども若干の修正をおこなった。

本技術賞の主旨、審査にあたって特に重視された技術の伝承に関する考え方などは、「平成 12 年度 KEK 技術賞受賞論文集」の序文に書かせていただいたので、ここでは、平成 13 年度で選考経過を概説しておきたい。

平成 13 年度の公募は 10 月末を締め切りとし、推薦技術が 5 件寄せられた。これらに対して内容を分析し、さらに評価の完璧を期すために、選考対象者毎に調査担当委員を決め、さらに直接対象者から複数名の選考委員が内容をヒヤリングする機会も設けた。また、選考委員に直接関係のある研究についての技術が対象となった推薦技術については第三者のレフリーをたてた。これらの結果を持ち寄り、さらに選考委員会で真剣な討議をおこなって、以下の 3 件、4 名の諸君を受賞者と決定した。すなわち、

- 1) 佐藤節夫君「中性子散乱実験用位置敏感検出器、PSD2K システムの開発」
- 2) 寺島昭男君・東憲男君「LHC 用強収束超伝導四極電磁石の開発」
- 3) 山岡広君「BELLE 検出器用鉄構造体の開発」

である。本論文集はこれら受賞者諸君の成果を取りまとめたものである。

以上のような関門を通過しての受賞であるため、受賞者諸君とその技術は本賞の目的に充分合致した大変素晴らしいものである。しかし、賞に至らなかった諸君の技術自体も充分高いものであるため、本当に僅差であると言っても過言ではない。

昨年度版の論文集でも述べたが、まだ自薦または他薦されていない諸君、前回も含めて賞に至らなかった諸君、自分の技術を将来に伝承していくのだと言う気持ちで、まずは技術の向上、そして成果の公表の努力をされ、是非、チャレンジまた再チャレンジをしていただきたい。

(昨年度の論文内容等は<http://www-eng.kek.jp/oshirase.html>に掲載されているので参照願いたい。)

なお、この賞は技術部、施設部両部の技官が対象であることを付記し序文を締めくくりたい。

以上

# 平成13年度 KEK 技術賞 受賞論文集

## 目 次

序文

受賞論文

1. 中性子散乱実験用 位置敏感検出器、PSD2Kシステムの開発 1  
佐藤節夫
2. LHC用強収束超伝導四極電磁石の開発 11  
寺島昭男、東 憲男
3. BELLE 検出器用鉄構造体の開発 19  
山岡 広

編集後記 27

# 中性子散乱実験用 位置敏感検出器、PSD2K システムの開発

佐藤節夫

高エネルギー加速器研究機構  
物質構造研究所、中性子科学研究施設  
〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

## 概要

中性子散乱実験用の、中性子の到達位置と時刻を検出できるシステムを開発した。処理方式をアナログ方式からデジタル方式に変え、位置の分解能が7mm から4mm に改善された。写真1に開発を行なったPSD2K システムの中性子検出器（手前8本の円筒）と処理回路部分の写真を示す。

このシステムの処理回路部分に、再プログラミング可能なゲートアレイを使用したため、他のシステムへの応用が容易になった。ゲート数の余裕も十分にあり、ハードウェアの変更無しに、いろいろな機能が実現できた。

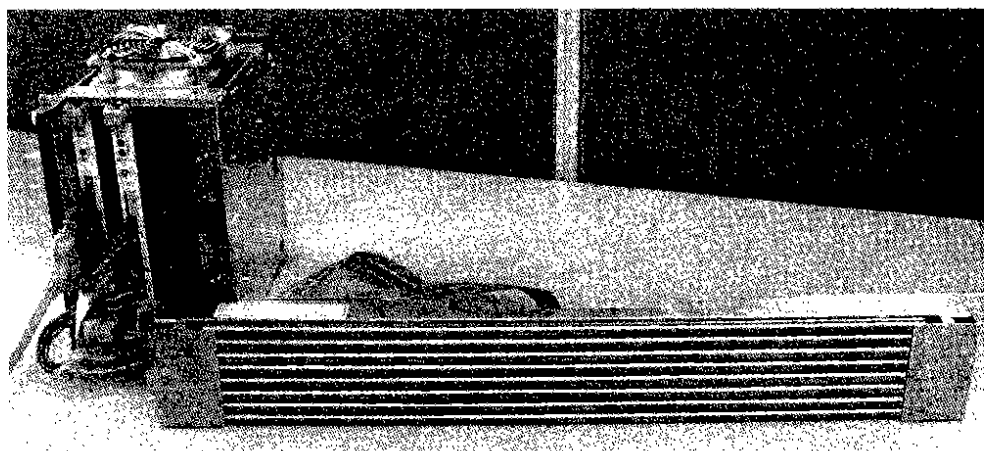


写真1 PSD2K システム

## 1. はじめに

中性子科学研究施設においては、多くの PSD (Position Sensitive Detector: 位置敏感型検出器) を使用した実験装置が、1980 年から現在までに建設されてきた。第一世代は小角中性子散乱装置、SAN 用のもので、PSD を 43 本使用したシステムである。このシステムは外注で設計・製作を行なった。現在は使われていない。

第二世代は 1990 年から 1993 年に開発を行なった粉末結晶解析装置、VEGA 用のもので、PSD を 250 本使用したシステムである。VME システムと位置の計算用に、VME ボードコンピュータを採用した（文献(3)参照）。現在、PSD 約 150 本分が稼動中である。

第三世代は 1994 年から 1997 年に開発を行なった高分解能粉末結晶解析装置、SIRIUS 用のもので、PSD

を 500 本使用したシステムである。パーソナルコンピュータを、VME ボードコンピュータの代わりに採用し、位置の計算をさせた（文献(2)参照）。現在、PSD 約 500 本分が稼動中である。

この PSD2K システムは第四世代に相当し、1998 年から開発している。検出器信号を増幅した直後の出力を ADC (アナログ-デジタル変換器) で変換し、これ以降の PSD 処理を完全にデジタル化し、高密度、高速、低価格を追求した。このシステムは、中性子の強度が 2 桁以上高くなると予想される、将来計画に向けて開発しているものである。

当初、PSD98 システムとして開発したが、改良し、PSD2K システムとした。基本方式、位置分解能はほ

ぼ同じであるが、処理速度が飛躍的に改善されたのと、製作方式が簡略化され、維持管理もしやすくなった。

2002 年 3 月現在の中性子科学研究施設では、SWAN グループで PSD 約 120 本分の PSD98 システムが稼動中である。また、MRP グループで 32 本分の PSD2K システムが稼動中である。ARISA グループで PSD2K システムのテスト中である。

SIRIUS グループで約 250 本分の PSD2K システムが稼動し始めた。

## 2. PSD2K システムの開発の動機

1990 年ごろから PSD の開発を行なっていて、第三世代の SIRIUS 用の PSD で開発をやめるにはあまりに問題点が多かった。500 本の PSD を前に、1 本 1 本丹念に調整していて感じたことは次のようなことである。

- 1: 精度を上げるための調整箇所が多すぎる。
- 2: アナログ処理で、いくつものアンプ、フィルターを通すため、高品質が得にくい。
- 3: 部品メーカーによる供給停止部品が多く、維持管理が困難。

そこでこれらを解決すべき方法として、デジタル処理ができないかを模索した。幸いにも、時代がデジタル処理に向かっていたので、次のように解決できることがわかった。

- 1: 信号のみで、正確に波高値のピークが求められるため、調整が不要(7項、図1.1参照)。
- 2: デジタル値にしてしまえば、有効桁数の確認だけで、劣化しない。
- 3: 世の中の流れがデジタルで、供給停止部品は少ない。

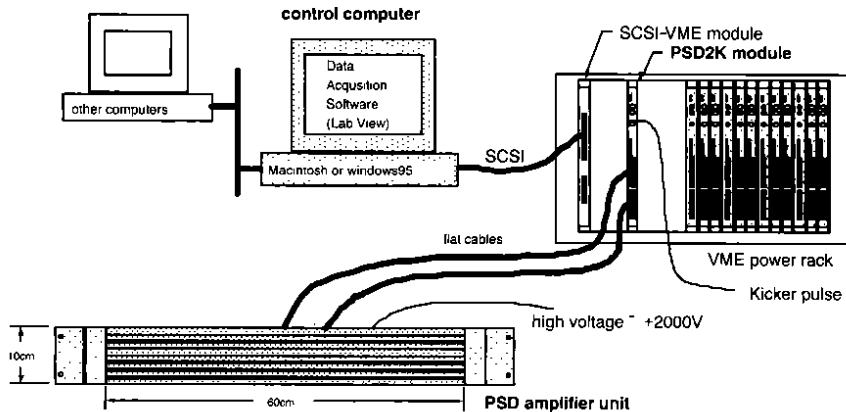


図1 PSD2K システムの基本構成図

デジタル化したお陰で、さらに次の点が改善された。

- 1: 位置の分解能が7mmから4mmに向上。
- 2: 一枚幅のダブルハイトのVMEボードで処理できるPSDの数が、4本から8本に増え、高密度化。
- 3: 64位置分解能\*8K時間分解能、128\*4K、256\*2Kが選択可能(16Mバイトメモリ)。
- 4: 1中性子当たり、0.5μ秒の処理能力。
- 5: 各PSDの設定値、スケール、オフセット、バランス等をEEPROMに記録できる。
- 6: データの高速転送用にFIFOバッファを持つ(ウルトラSCSI使用で、8Mバイト/秒)。
- 7: 低価格でPSD1本あたりの価格が4万円程度。

図1に、このシステムの基本構成図を示す。PSD支持箱(図中、PSD amplifier unit)、PSD2Kモジュール、制御用コンピュータからなる。PSD支持箱は8本のPSDを保持し、PSD出力を増幅する。PSD2KモジュールはPSD支持箱から信号を受け、位置を計算し、飛行時間の情報を合わせて、ヒストグラムを作り出す。制御用コンピュータはPSD2Kモジュールの初期設定と、ヒストグラムデータの読み出しを行なう。

### 3. データ処理の概要

使用するPSDはReuter-Stokes社製のRS-P4-0424-206である。形状は直径12.7mm(0.5インチ)、有効長約60cmのステン

レス製の円筒で、芯線抵抗は約4Kオームである。中性子の測定には円筒を接地(0V)にし、芯線に1400~2000Vの高電圧を加えて、ガス増幅をさせて使用する。

図2にデータ処理のブロック図を示す。PSDの全体長をL、到達点をx、両端に出てくる電荷量をそれぞれQ1、Q2とすると、 $x/L = Q2/(Q1+Q2)$ の関係式になる(抵抗分割法)。PSD支持箱は電荷Q1とQ2を電荷感応型アンプで電圧に変換し、これらの電荷に比例した波高電圧を持つパルスにして、外部に送り出す。

この信号をPSD2Kモジュールで解析処理を行なう。PSD2KモジュールはP12virカード4枚とPSD2K-VMEボード1枚で構成される、1枚幅VMEモジュールである。1枚のP12virカードで2本のPSDの波高値と到達時間を記録する。これらのデータをPSD2K-VMEボードが集め、プログラム・ゲートアレイで $Q2/(Q1+Q2)$ を計算し、それぞれの中性子の捕獲位置を求める。次に、相当するヒストグラムメモリ上に蓄積していく。

これらの処理はパイプライン方式で、並列に行なわれる。1中性子データ当たり、0.5μ秒で計算・蓄積できるので、8本のPSDから同時にデータが来ても、4μ秒で処理できる。そのため、処理速度が一定になるように、各入力で4μ秒のデッドタイムを設定した。

ヒストグラムデータは、制御用コンピュータからの要求があれば、測定の合間に、いつでも最新データを送り出すことができる。制御用コンピュータはPSD2Kモジュールの初期設定、および制御を行ない、最終的にデータの読み出し、保存をする。制御プログラムはNATIONAL INSTRUMENTS社のLabVIEWで作成した。このため、MacintoshとWindows98/95上で、同じ環境で使用できる。

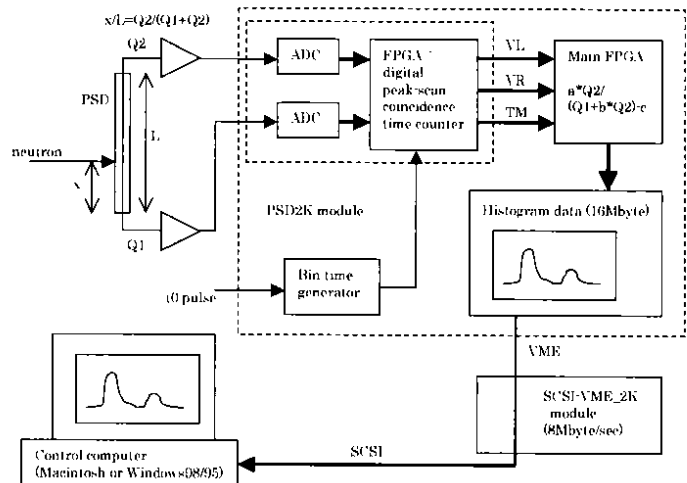


図2 PSD2K システムのデータ処理ブロック図

## 4. 完全デジタル化によるデータ改善

### 4.1 一様性

図3、4に PSD2K システムと古いシステム（第三世代のシステム：アナログ処理）のデータを示す。両方とも同じ条件にして測定を行なった。PSD 支持箱にカドミウムの 5mm 幅の棒を取り付け、その影を観測した。上 4 本を PSD2K システムで、下 3 本を古いシステムで測定した。パルス中性子源を使用し、5 ミリ秒のバーストパルスをカットし、50cm 離れた距離で測定した。

位置の分解能、直線性に違いは見られないが、古いシステムのばらつきが、統計以上であるのがわかる。これは、位置、波高値を求める ADC の特性が、そのまま出てきている。主な原因は、この ADC がハーフフラッシュタイプで、6 ビット-4 ビットで 10 ビットの精度を出しているが、前変換の 6 ビットが支配的である。さらに、この変換を、割算の代用として使うため、リファレンスをも変動させて使用するので、あまり良い特性が出ない原因の一つでもある。しかし、6 ビット精度で使用するには、あまり問題になっていなかった。

これに対し、PSD2K システムでは、始めに 12 ビット ADC でデジタル化し、後は計算だけで求めるので、ほとんど統計誤差だけになる。特に、ADC の使用方法に無理がないため、良い特性が得易い。これにより、新システムでは、より信頼性の高いデータが得

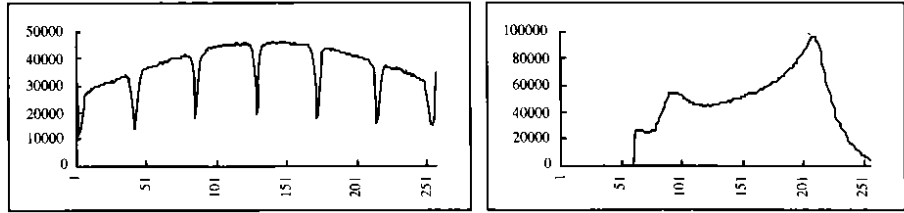


図3 PSD2K システムの位置データと波高値データ

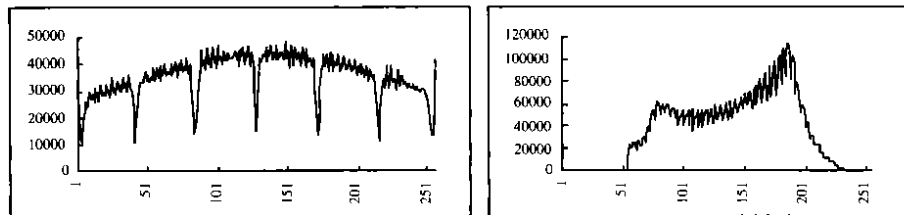


図4 古いシステム (SIRIUS) の位置データと波高値データ

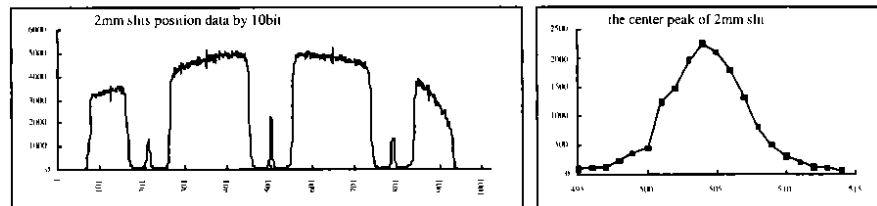


図5 PSD2K システムの位置データと波高値データ (1950V)

られることが期待できる。さらに、高精度の位置の分解能を必要とする実験にも使用できる可能性がある。

### 4.2 半値幅

次に位置の分解能が、良くなったことを見るために、2mm 幅のスリットを置いて、位置方向の観測軸を 10 ビットに拡げて測定を行なった。図5がそのデータである。有効桁は 8 ビットなので、若干システムティックなエラーが見える。

なぜ 8 ビットの有効桁か説明する。12 ビットの  $Q1$ 、 $Q2$  データから  $x/L = aQ2/(Q1+bQ2)-c$  を求める。割算を行なうため、分母になる  $Q1+bQ2$  (波高値) をあまり小さくできない。そこで、最大値の 4 分の 1 以下を捨てているので、最悪でも 10 ビットの精度が得られる (最大値で、12 ビットの情報なので、4 分の 1 付近では 10 ビットの情報しか得られないため)。さらに、PSD の不感帯を避けるために、 $a$  の値を 1.5~3 にとるので、3 分の 1 程度に精度が落ち、8 ビット程度になる。

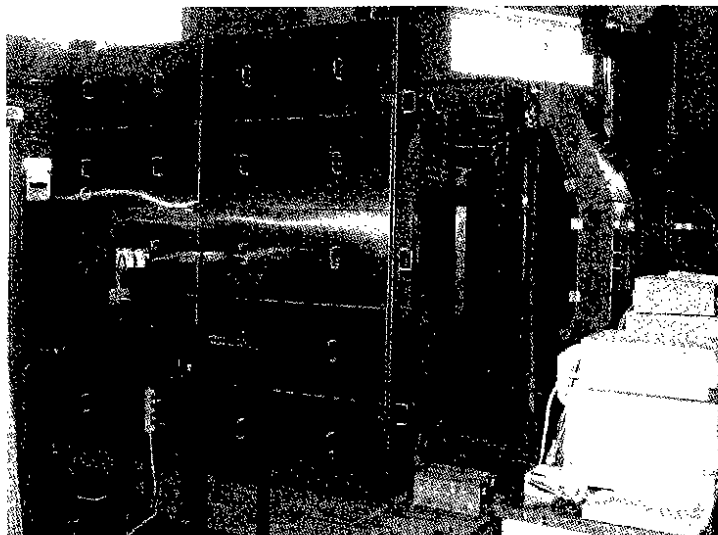


写真2 SIRIUS グループに 248 本増設

図5右の、真中のピークの拡大図を見ると、半値幅が6.75チャンネルである。この時の、両サイドのピークの間隔は577チャンネルで、400mmであるので、半値幅は4.68mm相当である。2mm幅スリット分を引くと4.2mmの半値幅であることが求められた。

文献(1)では、さらに3.8mmの位置分解能が得られている。

## 5. PSD2Kの使用状況

### 5.1 PSDの位置調整

写真2に示すように、SIRIUSグループに248本のPSDを増設し、PSD2Kシステムで測定を開始した。測定する試料位置から90度方向に、左右2ヶ所のバンク内に設置した。写真では右側だけが写っている。右側に120本、左側に128本を設置した。

図6に左側128本と右側120本の位置データを示す。横軸がPSDの位置で、縦軸がPSDである。調整のため、中心と、中心から20cm離れた位置に4cm幅のカドミウム板を3枚置いた。調整をしていない状態であるが、おおよそ合っているのがわかる。

図7に調整後のデータを示す。非常に良く合わせられたのがわかる。248本のPSD数時間で調整できた。

### 5.2 時間分析データ

図8にダイヤモンド粉末の時間分析データを示す。横軸がパルス中性子発生直後からの経過時刻(時間)で、縦軸がPSDである。試料のダイヤモンド粉末からの距離の差がピーク位置のずれでわかる。ここでは単純化のために、PSDの位置情報は使っていない。

### 5.3 時間補正分析データ

図9に有機物 thioamide の時間補正分析データを示す。横軸が時間で、縦軸がPSDである。図8を使用して、試料からの距離の時間差を補正し、ピーク位置がずれないようにした。

図10は図9のデータを足し合わせたものである。このことから、少ない試料のデータを広面積で検出し、

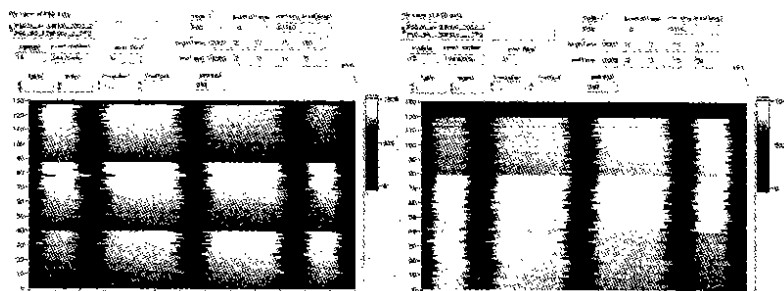


図6 248本 PSDの調整前データ、横：位置、縦：PSD  
左側：左90度バンク：128本 PSD、  
右側：右90度バンク：120本 PSD

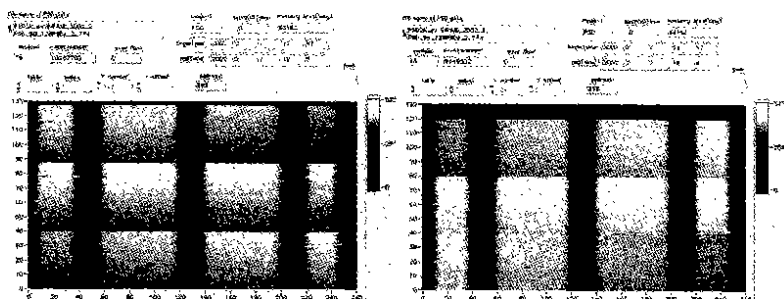


図7 248本 PSDの調整後データ

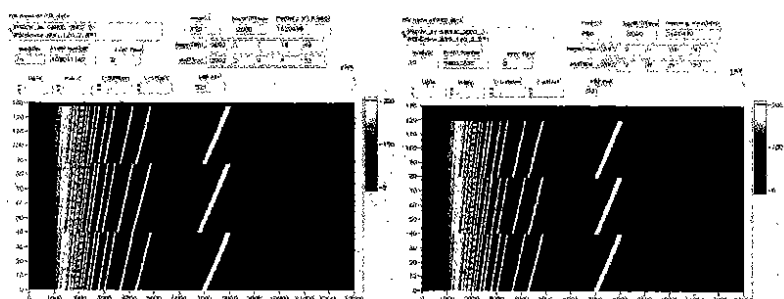


図8 ダイヤモンド粉末のデータ、横：時間、縦：PSD

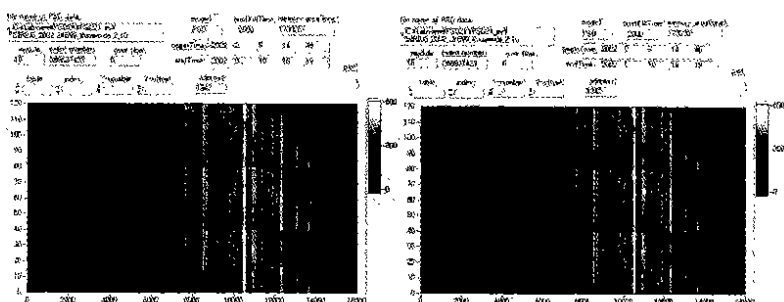


図9 有機物 thioamide のデータ、横：時間、縦：PSD

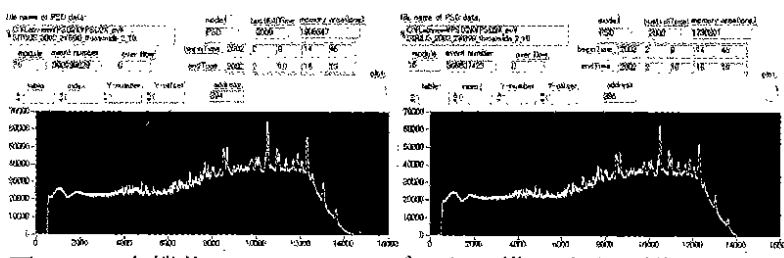


図10 有機物 thioamide のデータ、横：時間、縦：カウント数



補正して足し合わせ、効率が上げられるのがわかる。

## 6. PSD 支持箱

### 6.1 PSD 支持箱

PSD 支持箱の基本設計は、第二世代から変わっていない。2 枚の検出器基板からなる。写真 1 のように、前面に 8 本の検出器が隙間なく配置でき、その裏側にアンプが収納できるようにしている。

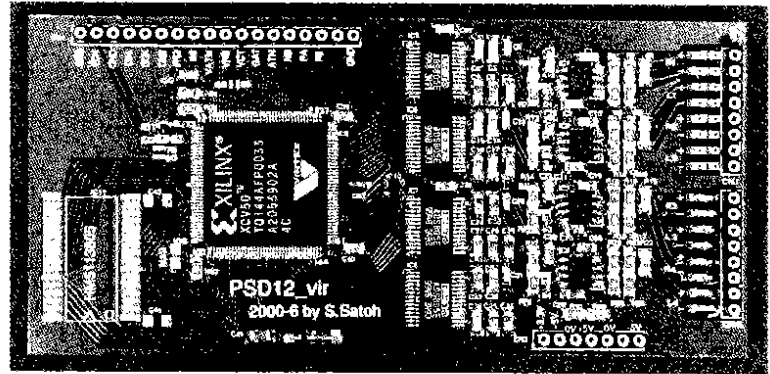


写真 3 P12vir カード

### 6.2 検出器基板

検出器基板は 9 枚の AMP97 カードから構成される。この中の 1 枚のカードはシールドと予備用で、8 枚が動作する。

検出器基板は電源供給・信号分配ラインと、テスト回路を持つだけである。1 枚の検出器基板と 8 枚の AMP97 カードの消費電流は、+12V で 136mA、-12V で -108mA の実測値であった。したがって、1 台の PSD 支持箱では、+12V で 272mA、-12V で -216mA となる。20 スロットの VME 電源を使用した場合、最大で 19 台の PSD 支持箱が使用されるので、必要な電源は、+12V で 5.2A、-12V で 4.1A となる。このため、汎用品の VME 電源が使用できる。

### 6.3 AMP97 カード

AMP97 カードは、電荷感応型のプリアンプと波形整形回路（アクティブフィルタ）で構成される。

表面実装部品で構成し、裏面の全てをアース面にし、シールドを強化した。並べて配置して、お互いのアース面でシールドし、クロストークが小さくなるようにした。また、調整箇所を無くした。ポールゼロ調整は最適値の固定抵抗で十分に合うことが確認されたので、省略した。DC レベル調整もデジタル処理で自動的に合わせられるので、省略した。

## 7. PSD2K モジュール

### 7.1 P12vir カード

PSD 支持箱からのパルス信号を、高速な ADC を使用し、12bit 精度、20MHz のサンプリングレートでデジタル化する。図 2 の真中、上に相当し、P12vir カード 1 枚は、これを 2 回路持ち、2 本の PSD が処理できる。

写真 3 に P12vir カードを示す。表面実装部品で構成し、裏面をできるだけアース面にした。ドーターカードとして、重ねて使用する。

信号の波高値は、単一波形の最大値から

最小値を引いて求める。これを視覚的に表したのが図 1 1 である。

パルス波形の検出は、クロック（CLK : 20MHz、50n 秒周期）ごとに前のデータと比較し、連続して 8 クロック分（400n 秒）大きくなった時に、パルスの立ち上がりとみなす。この状態以降で、前のデータより小さくなった時点をピークと判断し、この間の最大値を保存しておく。

最小値は、ピーク検出時間から 32 クロックから 48 クロック（1.6~2.4 μ 秒）前のデータの、16 クロック間（0.8 μ 秒）の最小値をとる。先ほどの最大値から、これを差し引いて、ピーク値とする。

PSD 左右の、二つの信号のピーク検出時間が 200n 秒の間にあったら、中性子データとみなして保存する。その後、PSD2K-VME 基板からポーリングされたら、このデータを送る。PSD 1 本分のデータは、左右のピーク値 24 ビットと、時間情報 16 ビットである。

このカードは波形記録機能を持つ。PSD の左右からの二つの信号を同時に、12 ビット、32 サンプリング分の波形が記録できる。サンプリングのクロックも、20MHz、10MHz、5MHz、2.5MHz の中から選ぶことができる。これにより、各信号の健全性を目で確かめることができる。

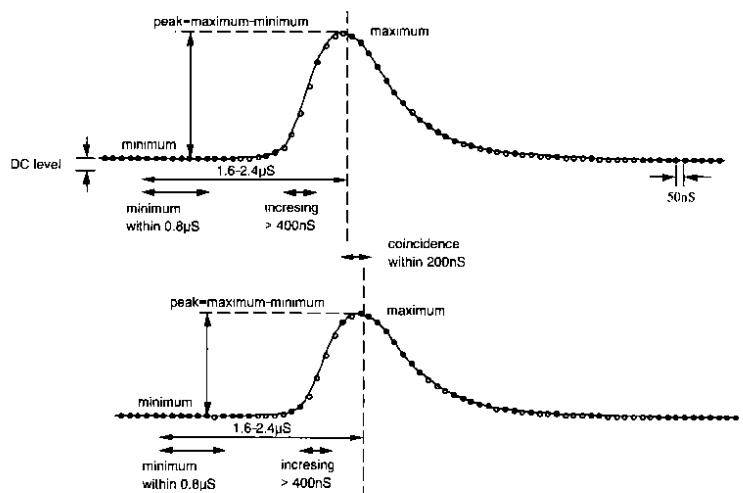


図 1 1 パルス波形からピーク値を求める方法

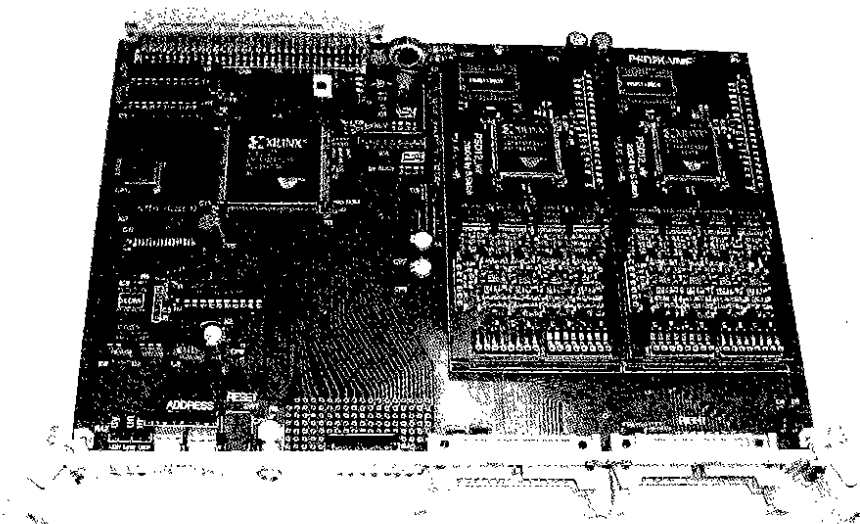


写真4 PSD2K-VME ボード

## 7.2 PSD2K-VME ボード

写真4に PSD2K-VME ボードの写真を示す。一枚幅のダブルハイト VME ボードで、8本の PSD のヒストグラムデータを蓄積、更新していく。ヒストグラム用メモリとして 16M バイトを持つ。

8本全てで、それぞれ 64 位置分解能で見た時、8K チャンネルの時間分解能で測定できる。データ幅はロングワード (4 バイト) である。この他に、128 位置分解能-4K 時間分解能、256 位置分解能-2K 時間分解能が選べる。

4枚の P12vir カードからのデータ読み出しは、4本の共通ラインで、ポーリングによって行なう。読み出すデータは PSD の左右の波高値と時間情報である。この方法により、製作が容易になった。0.5  $\mu$  秒以内で読み出せるので、後に続く位置の計算も 0.5  $\mu$  秒で行ない、並列処理ができるようにした。

40MHz クロックで同期を取りながら、各 PSD をポーリングする。データがない場合は 4 クロック、ある場合は 20 クロックの時間が掛かる。8本の PSD を検査するのに、最小で 32 クロック (0.8  $\mu$  秒)、最大で 160 クロック (4  $\mu$  秒) かかる。

並列処理を円滑に行なうために、左右の波高データ 24 ビット、時間情報 16 ビット、検出器番号 3 ビットの 43 ビットを、最大 16 セット記憶できる FIFO (先入先出し) バッファに、一時記憶する。

計算部分は、1 中性子当たり 18 クロックで計算する。基本的な関係式は  $x/L = Q2/(Q1+Q2)$  となり、L が PSD の全長、x が中性子が当たった場所までの距離、Q1 と Q2 が PSD の両端に出てくる電荷である。これに微調整のための、倍率(a)、比率(b)、オフセット(c)を含め、 $a*Q2/(Q1+b*Q2)-c$  の計算をする。

計算は 2 段の並列処理で、初段と後段に分けられる。初段で  $A=a*Q2$  と  $B=(Q1+b*Q2)$  を並列に求める。初段の結果で、波高値の合計 B が数居値(d)を超えて

いなければ、捨てる。そして、後段で位置を求める除算とオフセットの引き算、 $A/B-c$  を行ない、位置情報とする。乗算はクロックごとにシフトさせ、ビットが立っていれば加算する、アキュムレート法を使用する。除算はクロックごとにシフトさせ、除数を引き、ポローが出たら除数を戻す、引き戻し法を使用する。a と b を固定小数点として扱う。

初段、後段とも、同じ 17 クロックで処理する。結果は波高値の合計 12 ビット、位置情報 10 ビット、時間情報 16 ビット、検出器番号 3 ビットの 41 ビットを、最大 16 セット記憶できる FIFO

バッファに、一時記憶する。

最後にヒストグラムを更新する。2001 年 7 月現在で、ヒストグラムは 4 種類ある。一つは 1024 位置分解能と 256 波高分解能の、2つのヒストグラムを作るモード 0 である。位置合わせなどに使用する。残りの 3 種類は位置分解能と時間分解能の組み合わせで、64-8192、128-4096、256-2048 の、モード 1~3 がある。データの大きさを変えやすいように、読み出しの配列の次元を (時間、位置) としている。位置情報が先に読み出せるので、時間分解能が少ししか要らない時、必要な時間分だけ読み出し、データを小さくできる。

メモリのデータバス幅は 8 ビットで、データの更新には 1 バイトで約 100n 秒かかる。モード 0 では、1 中性子当たり、ヒストグラムを 2 個更新するので、200n 秒かかる。

さらに桁上がりで更新回数が増える。カウント数が 256 の時 2 倍、65,536 の時 3 倍、16,777,216 の時 4 倍に伸びる。したがって最悪で 800n 秒かかるが、16,777,216 回に 1 回と、非常に頻度が小さいので、前段の FIFO バッファで吸収され、8本の PSD 分が一度に来ても 1.6  $\mu$  秒程度で処理できる。モード 1~3 では、1 中性子当たり、ヒストグラムを 1 個更新するだけなので、モード 0 より半分の時間で済む。

計算係数の倍率、オフセット、比率、数居値を EEPROM に記憶させている。それぞれの値は 16 ビット長で、4 種類あり、PSD 1 本につき、8 バイト必要である。値をセットする PSD を、VME アドレス 5 の 2~0 ビットで指定する。それぞれの値のセットは VME アドレス 8~15 の、8 バイトの空間を使用する。

8本の PSD のデータには、64 バイトの EEPROM が必要である。測定停止中にステータス (アドレス 5) に、0x40 を書き込むことによって、EEPROM へ自動的に書き込まれる。また、0x60 を書き込むこと

によって、EEPROM から自動的に読み取られる。電源投入時にも読み取られ、自動的に設定される。

パルス中性子実験では時間分析機能が重要であるので、パルス中性子発生直後（キッカーパルスで知らされる）からの時刻を知らせる信号（時間チャンネル）を発生し、中性子を捕獲した時刻の記録に使う。また、測定遅延時間は、パルス中性子発生直後のバーストをカットするもので、128 $\mu$ 秒単位で0から1023まで設定できる。

時間チャンネルはフラットモードと  $dt/T$ =一定モードがある。フラットモードの場合は単位が1 $\mu$ 秒となり、0から1023まで設定できる。設定した値で、一定の間隔の時間チャンネルとなる。

$dt/T$ =一定モードの場合はキッカーパルスからの経過時間に比例した時間チャンネルが与えられる。4種類の設定があり、128 $\mu$ 秒ごとに125、250、500、または1000n秒づつ増えていく。

測定遅延時間は、キッカーパルスから遅延時間後に測定が開始されるようにする。特に、 $dt/T$ =一定モードで、キッカーパルスからの経過時間を使用するので、128 $\mu$ 秒ごとにカウントアップする10ビットの  $TM[9:0]$  を出力する。遅延時間が経過していない間は、キッカーパルスが来ても無視し、前の測定を続ける。冷中性子実験で必要な機能である。

データの高速転送ができるように、書き込み、読み取り用に FIFO バッファを持つ。それぞれに32バイトの容量を持ち、待ち時間を最小限にした。

最高速度で、VME からの書き込みに250n秒/16ビット、読み出しに200n秒/16ビットで対応できる。測定中の読み出しでは、これにヒストグラム of 更新のメモリアクセスが加わるので、少し遅くなる。しかし、十分に空き時間があるので、最大でも2~3割程度の遅れにしかならない。

SCSI-VME\_2K モジュールを同時に開発し、これらの機能が有効に働くようにした。従来の SCSI-VME モジュールでは1Mバイト/秒程度の転送速度しかないので、16Mバイトの読み出しに、16秒もかかってしまう。SCSI-VME\_2K モジュールの開発と PSD2K モジュールの改良を行ない、8Mバイト/秒が実現でき、2秒で読み出せる。コンピュータにマッキントッシュの G4 と、ウルトラ SCSI の PCI ボード（8ビット幅、ロジテック LHA-600 シリーズ、4千円弱）を使用した。

VME 側の待ち時間が最小の場合、10Mバイト/秒の転送速度が得られるのがわかる。使用している DRAM メモリ（16Mバイト）は、もっと高速読み出しが可能はずなので、アクセス方式を工夫すれば、さらに高速化が期待できる。

## 8. 高速転送 SCSI-VME\_2K モジュール

前述のように、今までのものは1Mバイト/秒程度であったので、高速転送できる SCSI-VME モジュールの開発を行なった。使用する SCSI をウルトラ

SCSI とすると、20Mバイト/秒程度まで高速化が可能である。

PSD2K モジュールと同じ基板を使用し、ワンチップマイクロコンピュータ（マイコン）を載せた増設基板を加えた。SCSI の制御のほとんど全部をマイコンで処理し、データフェーズだけをゲートアレイで行なう。ゲートアレイは SCSI のコマンドフェーズ、メッセージフェーズを傍受し、同期転送モードの有無、REQ/ACK オフセット値、最小転送周期、VME アドレス、データ転送数などを自動的に取り込み、データフェーズの時に使用する。

ゲートアレイでのデータ転送は、VME バスのアービトレーションから始まる。SCSI 側で、すでに同期転送モードが指定されていれば、REQ/ACK オフセット値に沿い、ATN 信号が返らなくても REQ 信号を先行し、データ転送を行なう。

VME のデータ転送では、コントローラが DS0,1 信号をローにした瞬間に、DTACK 信号をローにして返すモジュールが一番速い。そこで、DS0,1 信号を DTACK 信号として返すテストモジュールを使用すると、12Mバイト/秒程度の高速転送が確認できた。また、非同期転送モードでも、4.5Mバイト/秒程度の転送ができた。

高速化の秘密は FIFO バッファを持たせ、パイプライン処理（並列処理）を多くしたことである。こうすることにより、待ち時間が減り、高速化ができた。

## 9. 他のシステムへの応用

### 9.1 2次元検出器、Bidim80

この PSD2K システムは、プログラマブルゲートアレイで設計しているため、他のシステムへの応用が容易である。

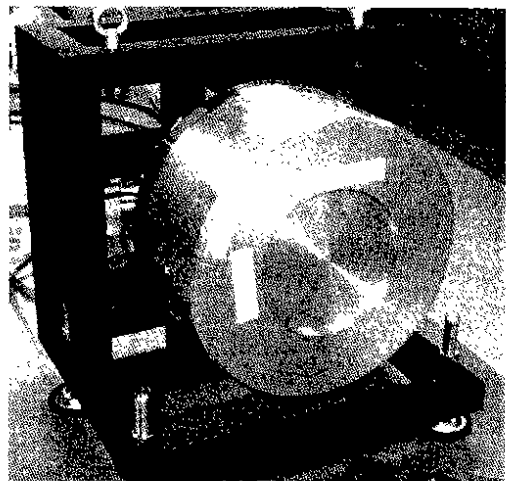


写真5 2次元検出器、Bidim80

写真5にフランスの ILL 研究所で開発された2次元検出器 Bidim80 を示す。He-3 ガスを封入した、2次元のマイクロストリップ検出器である。図12にその原理図を示す。基板の両面にマイクロストリップを直交するように配置し、中性子が He-3 ガスに捕

獲されて発生する電荷を両面で検出する。検出された電荷はそれぞれのマイクロストリップを伝わり、抵抗分割法で処理される。

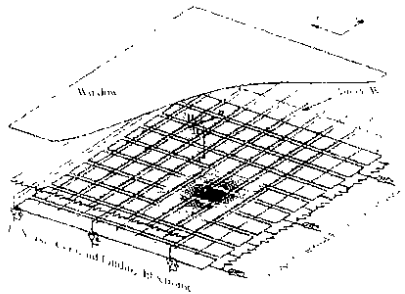


図 1 2 マイクロストリップ検出器の原理図

図 1 3 に、この 2 次元検出器の出力を解析したデータを示す。ILL 研究所は原子炉で中性子を発生させているため、時間分析機能がないが、パルス中性子源では絶対に必要である。このデータは北海道大学でのパルス中性子源で、縦横 8cm\*8cm の検出エリア内に、1cm 間隔ごとに 1mm 平方の穴を開けたカドミスリットを置いた結果である。パルス中性子発生後、2 ミリ秒経過から 250 μ 秒間のデータである。横方向が約 2mm、縦方向が約 3mm の分解能であった。歪みが見えるので、なんらかの補正が必要と思われる。

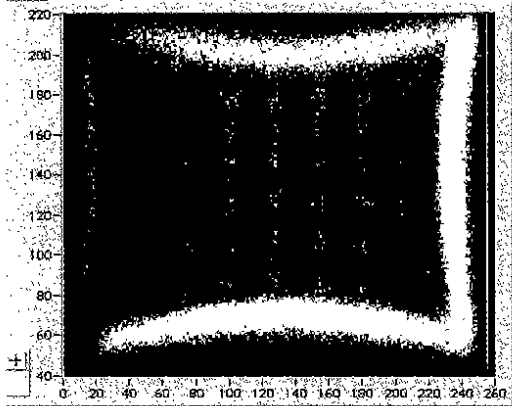


図 1 3 2 次元検出器データ

この ILL 研究所で開発された 2 次元検出器は、4 つの信号を出力し、2 次元の位置を表わす。2 信号で X 軸の位置を、残りの 2 信号で直交する Y 軸の位置を表している。この 4 信号を観察した結果、完全に同時でなく、600n 秒程度の間に到着する。これらを踏まえて、次のような変更を行なった。

1-PSD2K モジュールは 16 信号から、8 本の PSD のデータ処理を行なっているが、この内、2 本分の処理機能だけを使用した。1 本目を X 軸、2 本目を Y 軸とした。

2-X 軸、Y 軸共にフルスケールの解析を許すために、左右の信号のどちらか片方の入力だけでも中性子検出とする。ただし、800n 秒の間は待つ。さらに 800n 秒の間に、X 軸と Y 軸の両方に来なければならない。

3-位置と時間軸で測定する場合、X 軸、Y 軸、時間軸の順に、255\*255\*64、128\*128\*256、64\*64\*1024 の大きさとなる。

## 9.2 ファイバー 2 次元検出器 (パルス式)

理化学研究所が作製した、X 軸に 16 本、Y 軸に 16 本のファイバー 2 次元検出器用の読み出し回路を作製した。写真 6 に構成を、図 1 4 に原理図を示す。写真右下の ZnS シンチレータの両面に、直交させた 1mm 角の光ファイバーを取り付け、2 本の 16 チャンネルのマルチフォトマルで受けている。

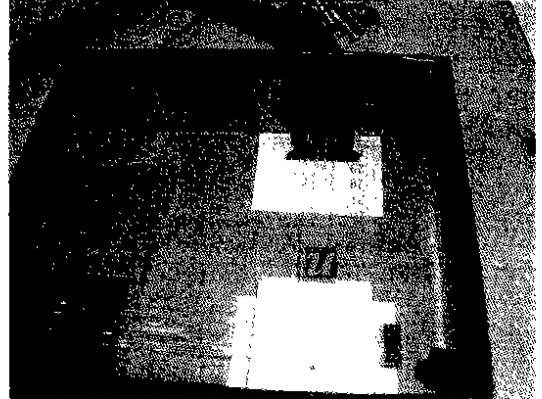


写真 6 16ch\*16ch ファイバー検出器

この検出器の読み出し回路に PSD2K モジュールを応用している。ファイバーで送られた光をマルチフォトマルで検出し、この読み出し回路で位置を求める。

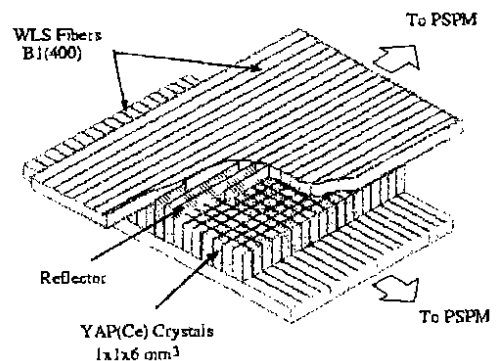


図 1 4 ファイバー検出器の原理図

写真 7 に読み出し回路を示す。PSD2K モジュールを母体とし、32 チャンネルの信号を処理するボードを 4 枚取り付けている。

フォトマルから出力される高速パルス (半値幅 4ns 弱) をカウントする方式で中性子を識別した。写真 8 に検出面に貼りつけたカドミウムのマークを、図 1 5 に読み出し回路のデータを示す。He-3 ガス検出器に比べ、10~20%の検出効率であった。

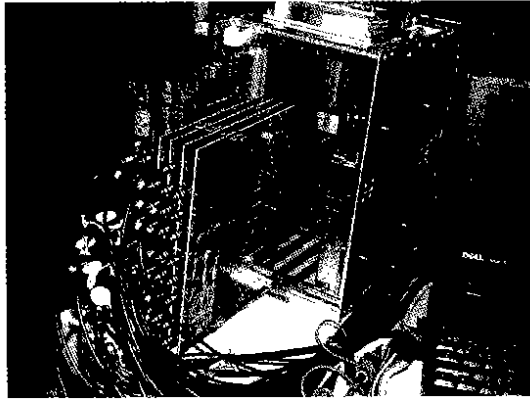


写真7 パルス式2次元読み出し回路

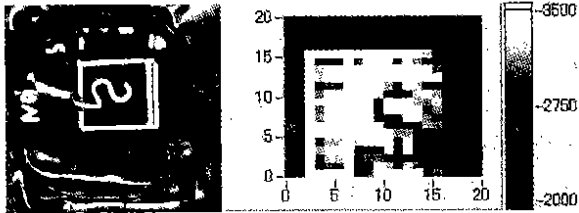


写真8、図15 カドミウムのマークと、読み出し結果

### 9.3 ファイバー2次元検出器 (チャージ式)

ILL 研究所が作製した、X 軸に 128 本、Y 軸に 128 本のファイバー2次元検出器用の読み出し回路を作製した。原理は 9.2 と同じで、図 1 4 のようになる。検出部分の構成は ZnS シンチレータの両面に、直交させた 0.4mm 角の光ファイバーを取り付け、4 本の 64 チャンネル・マルチフォトマルで受けている。

写真 9 にチャージ式 2 次元読み出し回路を示す。17 台の PSD2K モジュールを使用して読み出し、データ処理を行なう。

フォトマル出力をチャージアンプで受け、PSD2K システムと同様に、ADC で波高値を求める。X 軸と Y 軸でコインシデンスを取り、各軸の最大値の位置を中性子捕獲位置とする。

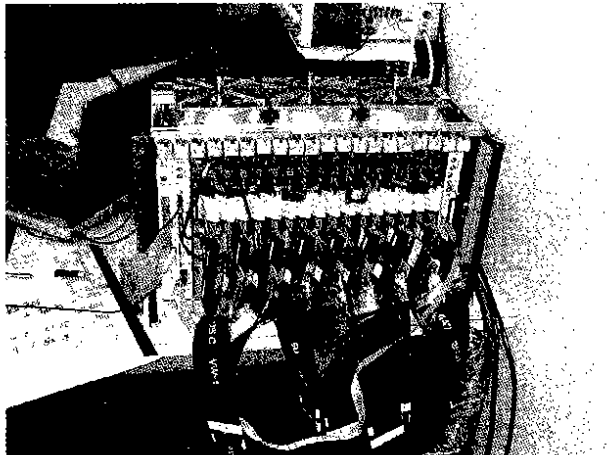


写真9 チャージ式2次元読み出し回路

写真 10 に検出面に貼りつけたカドミウムのマークを、図 1 6 に読み出し回路のデータを示す。非常

に良いデータが得られるのがわかった。He-3 ガス検出器に比べ、10~20%の検出効率であった。

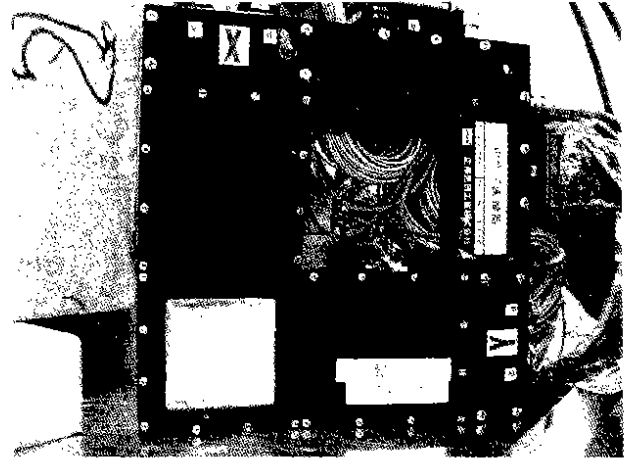


写真10 カドミウムのマーク

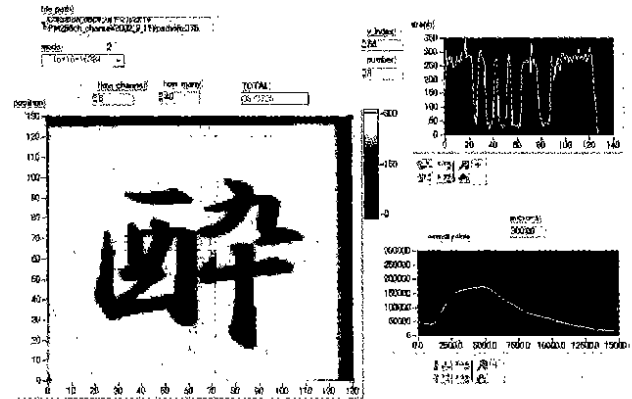


図16 読み出し結果

## 10. PSD システムのための検査回路

### 10.1 PSD 検査回路

PSD 検査回路は PSD システムの健全性を簡易に検査するためのものである。基本的な構成は、制御用のワンチップマイコンと、2 個の 12 ビットの D/A 変換器である。検査方法としては 2 種類の方式に分かれる。一つは実際の PSD を正確に真似て測定する、抵抗方式である。もう一つは、PSD システムに組み込んであるテスト回路を使用して、使用中の PSD システムの健全性を常に検査できる、テスト回路方式である。

写真 1 1 に抵抗方式の位置分解能検査回路の、一般的な使用例を示す。抵抗方式は PSD に真似た抵抗アレーの 8 箇所、1pF のコンデンサを介してパルスを加える。このパルスは、一方の D/A 変換器からの出力で作る、振幅が変わる矩形波であり、同時に 2 箇所以上に加えない。この写真の例では、4 枚の PSD 検査回路を使用し、PSD 4 本分のテストを一度に行なうものである。

任意の 1 箇所パルスを加えると、実際の PSD と同じに、抵抗分割された電荷が左右の両端に出力される。実際に使用されるチャージアンプで受けるこ

とにより、忠実にシステム全体の位置分解能の測定ができる。写真11では、アルミケースに入れた、AMP97カードを載せた検出器基板(アンプボックス)を使用している。この信号を文献(2)に載せたPSDコネクタ基板で左右の信号に振り分け、PSD2Kモジュールに入力し、健全性、処理精度等を確認する。

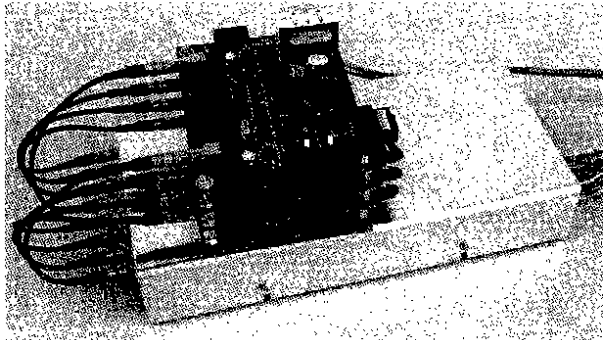


写真11 抵抗方式の位置分解能検査回路

## 10.2 時間機能検査回路

時間機能検査回路は写真12のような回路で、時間制御回路と、パルス発生回路と、カウンタで構成されている。時間制御回路はプログラマブルゲートアレイ1個で構成され、パルス発生回路と、カウンタは別クロックで動作し、それぞれが独立している。

時間制御回路は、20Hzの基準周波数を発生させ、これから設定した時間遅らせ(遅延時間)、設定した時間ゲートを開いて(ゲート時間)、この間だけパルスを出力する。そして、通過するパルスの総数を設定できる(総パルス数)。

パルス発生回路は、ゲートを通過するパルスを生じさせ、その周波数の設定ができる。カウンタは、ゲートを通過するパルスを独立にカウントすることにより、時間制御回路が正しく動作しているのを確認できる。

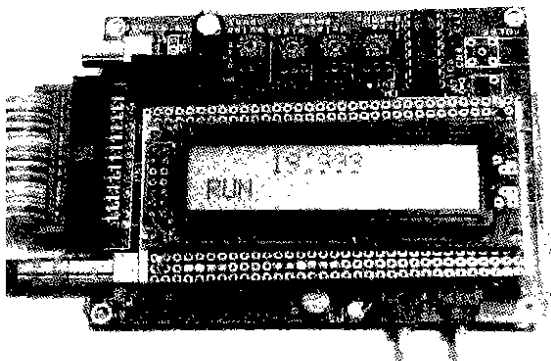


写真12 時間機能検査回路

この検査回路は、文献(2)などにも紹介している、TA17XC等の時間分析器の検査用に開発した。TA17XCに、アンプボックスの代わりに取り付け、電源はフラットケーブルから供給される。8入力同時に検査ができる。

PSD2Kシステムでの使用方法としては、写真11のアンプボックスの8入力全部に1pFのコンデンサを通して接続する。検査回路に4個の設定スイッチがあるが、例として左から2, 7, 7, 4と設定する。この場合、周波数100kHz、遅延10ミリ秒、ゲート10ミリ秒、総パルス100000カウントが設定されたことになる。

PSD2Kシステムを測定準備し、カウントをスタートさせると、"TOTAL"のカウント表示が"100000"で止まるのが確認できるはずである。この時の検査回路の表示も"100000"であれば、PSD2Kモジュールが取りこぼさなかったのが確認される。この状態で、時間軸で10000μ秒からデータがあり、20000μ秒で無くなっているのを確認する。このようにして、時間機能の検査を行なう。

## おわりに

長年、中性子検出器システムの開発をしてきたが、PSD2Kシステムは集大成といえる。これで技術賞が取り、感無量の思いがある。今後も、さらに高性能のシステムを目指したい。

システムのデジタル化は、時代の流れである。アナログ部品そのものが消えかかっている。アナログ方式からデジタル方式に変える最適な条件が揃って、PSD2Kシステムの開発は必然であったと思う。

PSD2Kモジュールはプログラマブルゲートアレイの比率が大きいので、非常に自由度がある。ゲートアレイのプログラムは簡単ではないが、ハードウェアの変更なしに他のシステムに応用できるのが実感できた。

現在は、最後の方に紹介した、ファイバー2次元検出器の読み出し回路の開発に力を注いでいる。各方面からの要望も多く、新しい中性子検出器システムとして期待されている。

## 参考文献

- [1] 佐藤節夫他. "中性子散乱実験用位置敏感検出器、PSD2Kシステムの開発", KEK Report 2001-9 August 2001 M/D
- [2] 佐藤節夫他. "中性子散乱実験用データ収集装置の開発", KEK Internal 96-14 November 1996 M
- [3] 佐藤節夫他. "PSD(Position Sensitive Detector)システムの開発", KEK Internal 93-10 November 1993 M/D
- [4] 佐藤節夫他. "8入力小型アンプ及び多入力時間分析器の開発", KEK Internal 92-4 April 1992 M/D
- [5] グレン F.ノル. "放射線計測ハンドブック", 日刊工業新聞社 1996年10月25日第2版2刷、ISBN4-526-02873-8 C3050
- [6] "SCSI 完璧リファレンス", OPEN DESIGN NO.1, 1994年3月1日、CQ出版社
- [7] 佐藤節夫. "SCSIビデオ信号ボードの製作", トランジスタ技術, 2000年1月号, pp.339-350, CQ出版社
- [8] 佐藤節夫. "SX18/20/28 シリーズの概要と評価", トランジスタ技術, 1998年12月号, pp.284-297, CQ出版社

# LHC用強収束超伝導四極電磁石の開発

寺島昭男<sup>1</sup>、東 憲男<sup>2</sup>

高エネルギー加速器研究機構

共通研究施設、工作センター、技術部工作課

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

## 概要

高エネルギー加速器研究機構では、欧州共同原子核研究機構 (CERN) における、ラージ・ハドロン・コライダー (LHC) 計画への技術協力として、ビーム衝突点用超伝導四極電磁石の開発が推進されている。その基礎開発として、低温工学センターと工作センターが中心となり、加速器研究施設、素粒子原子核研究所の協力を得て、1mモデルマグネットがインハウスで試作された。

NbTi 成形燃り線を用い、1.9K 超流動ヘリウムにより冷却されたコイルの 70mm の口径内に 240T/m (@ 8029A)の磁場勾配が要求された。衝突型加速器実験の最終ビーム収束に用いられることから、高磁場勾配、且つ高磁場精度が求められ、LHC 用超伝導電磁石の中でも高度な技術レベルが必要とされた。本報告では、著者らが責任を持った 1m モデルの試作開発と、その間に蓄積された技術について報告する。

## 1. はじめに

### 1.1 ビーム衝突点用・超伝導四極電磁石

LHC 加速器の四箇所のビーム衝突点(図 1)には、大型の粒子検出器システムが設置されるが、粒子の衝突頻度を高め、衝突時のビーム輝度(ルミノシティー)を高めるため、強力なビーム収束システムが必要となる。この要となるのがビーム衝突点用超伝導四極電磁石である。70mm のボア(口径)内に、運転磁場勾配として、215T/m が求められた(図 2)。

リングに 4 箇所あるビーム衝突点の直近に 2×4 台の磁石が一組となって配置され、複合レンズ系が構成される。4 箇所のビーム衝突点で合計 32 台が必要となる。日本(KEK)とアメリカ(FNAL)が、それぞれ独自の設計で、半数にあたる 16 台づつを分担して開発することになった。

ビーム衝突点からの強いビーム散乱により、1 台当たり数十ワットのビーム入熱照射にさらされる。このための温度マージンを確保するとともに、過酷な環境下での長時間(>~10 年)に亘る安定した運転を確保するため、磁石の基本設計は、240T/m を目標値として進められた。磁石コイル内での磁場は 10T に迫る高磁場勾配、高磁場精度の電磁石が求められた[1~5]。ビーム蓄積型加速器のための特有の

最先端技術が求められ、機構内での技術開発が不可欠であった。

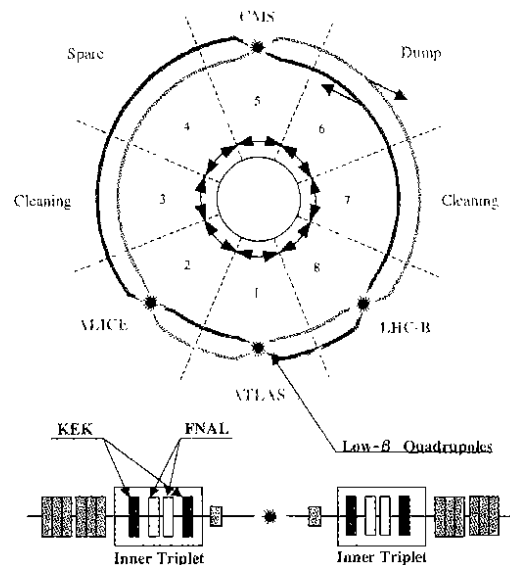


図 1: CERN/LHC 加速器計画  
加速器レイアウトとビーム衝突点用  
超伝導四極電磁石の配置

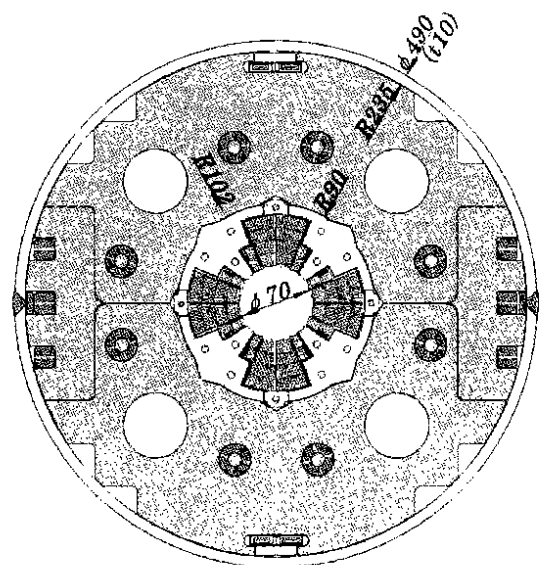


図 2: KEK で開発された LHC ビーム衝突点  
用超伝導四極電磁石断面

<sup>1</sup> E-mail : akio.terashima@kek.jp

<sup>2</sup> E-mail : norio.higashi@kek.jp

基本設計、試作を通して製作技術を蓄積するため、1996年の開発計画スタート時から、工作センターが参加し、以下のことを担当した。

- ・マグネットの機械構造設計、製作図面の作成。
- ・製作工程の立案と部分モデルの試作による検証。
- ・製作治具の設計、製作。
- ・コイルエンドスペーサ、ランプボックス等の重要な構成要素の試作。
- ・モデルマグネット(有効長さ1.07m)の試作。
- ・モデル製作で得たノウハウと整備した図面による実機設計への貢献。
- ・実機製作担当企業への製作技術の移転。

第一次の設計による1mモデルの1号機、2号機、および1号改良機の開発、試験結果を踏まえ、特に磁場精度の向上を目指して設計の改善が図られた。1mモデルの3、4号機が製作され、目標とする電磁石性能が達成された。マグネットの最終設計パラメータを表1に示す。

3号機の開発では、実機サイズ・プロトタイプ製作を担当することとなった製造メーカーから技術者が参加し、KEKでの共同作業を通して、実際の製作方法に対する迅速な技術移転が図られた。この結果、製造メーカーにより製作された5号機(有効長さ1.07mモデル)においても、性能に再現性のあることが確認され、基礎開発を完了することができた[6~9]。

## 2. 1mモデルマグネットの開発

### 2.1 超伝導線材

LHC ビーム衝突点用超伝導四極電磁石では、設計磁場勾配として240T/mが定められ、コイル内での最高磁場は~10テスラに達した。超伝導線材には、この高磁場環境における超伝導特性はもとより、コイルエンド部における、極めて小さな曲率半径(~7mm)での巻き線が可能となる強くしなやかで、約400気圧に相当する電磁圧力に対しても、機械的に十分安定であることが求められた。これらの要求を満たすものとして、工業的に技術が確立したNbTi超伝導線材が、超流動ヘリウム温度(1.9K)で用いられた。このことにより、超伝導線材としての限界条件(臨界点)に対し、設計条件で~90%、ビームロスによる熱吸収を伴う加速器での定格運転時において~80%の条件となるよう、超伝導線材(ケーブル)の設計パラメータが決定された[1, 2]。

実用超伝導線の設計では、曲率の厳しいコイル巻き線に耐え、高い占積率を実現できるラザフォード型成形撚線が採用され、絶縁には極低温で機械的にも強靱で、電気絶縁特性の安定した多重ポリイミドフィルムが採用された。

### 2.2 マグネット構造

コイル構造は高磁場勾配、高磁場精度の要求を共に十分に満たせるように、2層連続巻き(ダブルパンケーキ巻き)されたシェル型コイルを二つ重ねた4層コイルとなっている。また、高磁場勾配を求めて鉄

表1 ビーム衝突点用四極超伝導電磁石設計パラメータ

|                    |                     |                  |
|--------------------|---------------------|------------------|
| 磁場勾配 ( $G_0$ )     | 240                 | T/m              |
| 電流                 | 8,057               | A                |
| ピーク磁場              | 9.64                | T                |
| 負荷曲線比(@1.9K)       |                     |                  |
| 内側ケーブル             | 91                  | %                |
| 外側ケーブル             | 88                  | %                |
| コイル内径              | 35                  | mm               |
| コイル外径              | 81.1                | mm               |
| コイル有効磁場長さ          | 6.3                 | m                |
| コイル全長              | 6.53                | m                |
| コイル巻き数             |                     |                  |
| 1st-Layer          | 8+4                 |                  |
| 2nd                | 12+4                |                  |
| 3rd                | 15                  |                  |
| 4th                | 18                  |                  |
| ヨーク内半径             | 92                  | mm               |
| ヨーク外半径             | 235                 | mm               |
| シリンダー外半径           | 245                 | mm               |
| シリンダー全長            | $\leq 6.7$          | m                |
| 蓄積エネルギー            | 425                 | kJ/m             |
| インダクタンス            | 14.4                | mH/m             |
| 電磁力 (oclant)       |                     |                  |
| $\Sigma F_x$       | 1.40                | MN/m             |
| $\Sigma F_y$       | -1.67               | MN/m             |
| 磁場高調波成分 (参照半径17mm) |                     |                  |
|                    | (design/unc./sigma) |                  |
| 12極 $b_6$          | $<0.13/0.94/0.48$   | $\times 10^{-4}$ |
| 20極 $b_{10}$       | $<0.001/0.06/0.03$  | $\times 10^{-4}$ |

ヨークの寄与(~10%)を得るため、鉄ヨークがコイルに非常に近接した構造となっている。その結果、カラーはコイルに必要とされる予圧力を保持するには十分な強度を持ち得ず、精密な非磁性スペーサとしての役割に徹した設計となり、電磁力はカラーを通じて鉄ヨークに伝達され保持される。また、機械構造の単純化と、量産時の生産性・設備効率、再現性を追求した結果、四極電磁石でありながら、鉄ヨークは上下2分割構造が採用されていることが大きな特徴である。

要求される磁場精度(高次成分/四極成分  $\leq 10^{-4}$  @  $r=17\text{mm}$ )を満たすためには、各極には四極対称となる、均等な予圧力(50Mpa @RT)を発生させることが不可欠であり、機械構造設計、組立て方法に工夫が求められた。加速器実験での長期にわたる運転に供されることからサーマルサイクルの後においても、クエンチ(超伝導状態が崩れること)することなく、定格運転電流(7149A)に励磁できることが要求されている。冷却・励磁の際にも予圧力が、一定量保たれることが決定的に重要なことである。したがって、それらの基礎となる均一なコイル剛性を確保することも不可欠である。



開発された製作技術は企業へ技術移転され、実機(有効長さ 6.3m)の生産に生かされる。したがって、ここで開発される製作技術、製作治具は、すべて実機の工業生産に適用可能なものでなければならない。迅速な技術移転のため、製作技術は可能な限り適格に図面化される必要がある。マグネット構成部品はもとより、治具の全ての図面が電子ファイルにより企業に交付されることになるので、図面は細部に亘る正確さと併せて、検索利用が容易となるように体系的に整備されることが求められた。

### 2.3 150mm 機械モデルによる検証

このマグネットの特徴である、上下2分割ヨークによる電磁力保持構造(ヨークによる予圧力の発生)の健全性確認と、上下加圧ヨーキングの方法を確立するため、図3に示す『150mm 機械構造モデル』を試作して検証した。

1mモデルおよび実機の製作では、カラー、鉄ヨークは、ファインプランキングと呼ばれる精密打ち抜き法によって製作される必要があるが、これらの打ち抜き型は非常に高価であり、初期投資を効率的に行なうため、ここではカラー、鉄ヨークとも150mmを構成できる枚数が、ワイヤカット放電加工機で製作された。絶縁ラップ等、他の部品は計画されたものを忠実に再現し、コイルにはエンドスペーサの最適化のために試巻きされたコイルが分割利用された。

冷却後の機械構造の安定性を検証するため、キャパシタンス型の応力ゲージを用いて、室温および液体窒素冷却下でのコイル予圧の測定が行われた[8]。冷却時にも各極に必要な均一なコイル予圧力が保たれていることが確認され、この構造の妥当性が検証された。

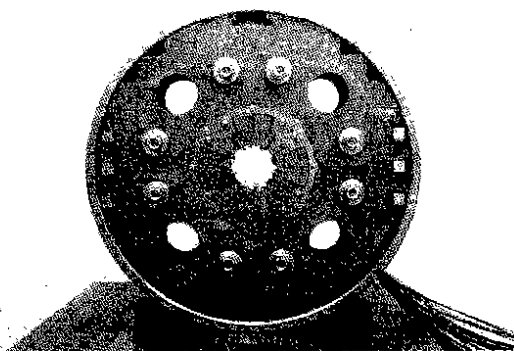


図3：150mm機械構造モデル

## 2.4 マグネットの試作、治具開発

### 2.4.1 マグネットの製作工程

加速器用超伝導電磁石の開発は、

- (1) 電磁・構造設計
- (2) 構成部品図の作成

- (3) 製作工程と治具の企画・開発
- (4) モデルマグネットの試作
- (5) 試験結果のフィードバック
- (6) 試作の繰り返し

のステップを踏むことにより、実用に耐える実機の製作が可能となる。なかでも治具開発の占める比重は大きく、本開発においても、全てのプロセスで、一貫して治具の製作と改良を重ね、バラツキの無い製作方法が確立された。また、マグネットの製作を行なうものが、その経験に基づいた治具の開発・改良を行なうことは、円滑なマグネットの開発に非常に有効、且つ大切なことであった。図4にマグネットの製作プロセスを示し、各工程の様子を、図5(a~i)に示す。

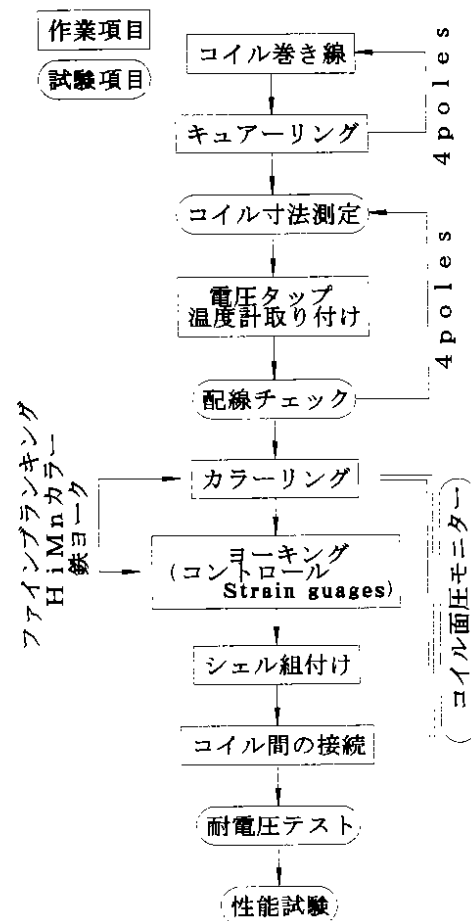


図4：マグネット製作フローダイアグラム

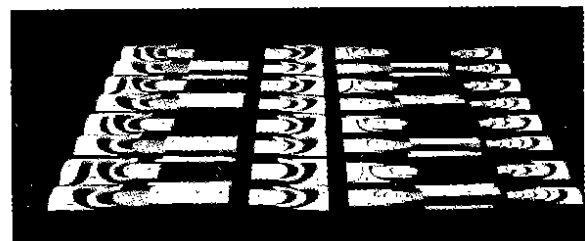


図5(a)：スペーサとランプボックス

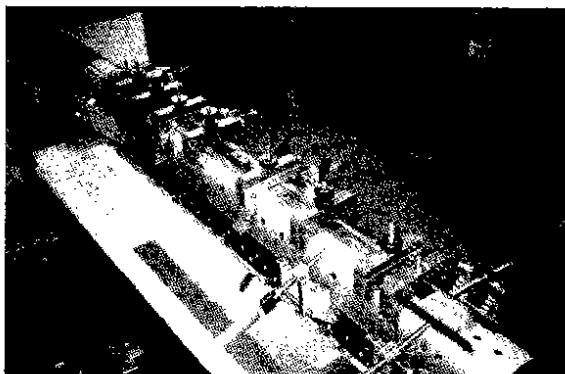


図5 (b) : コイル巻き線

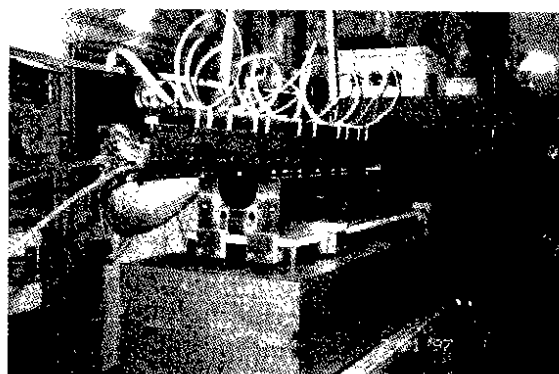


図5 (c) : コイルの加圧成形(モールド)

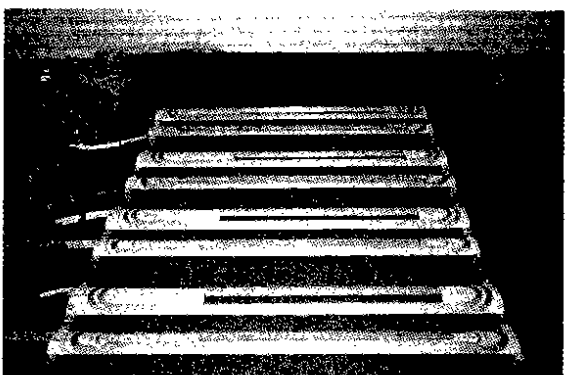


図5 (d) : モールド後のコイル

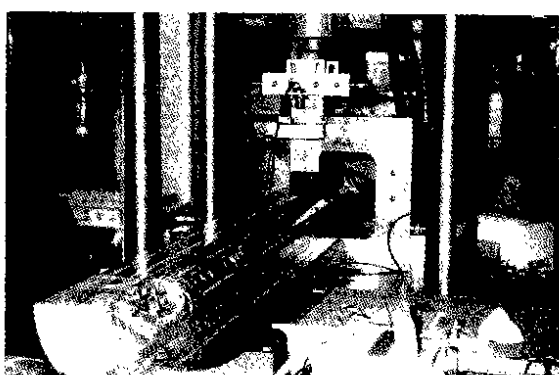


図5 (e) : コイルサイズ、ヤング率測定

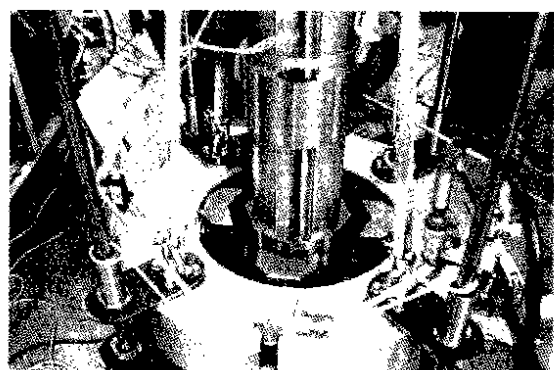


図5 (f) : カラーリングプレス

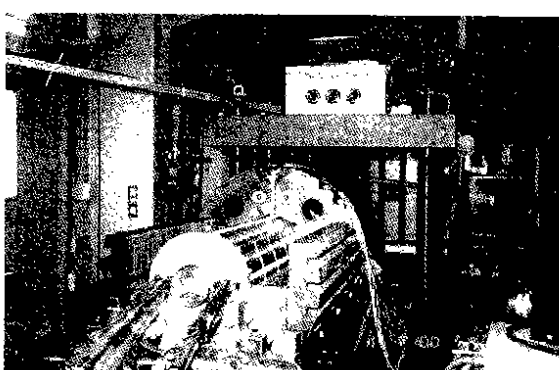


図5 (g) : ヨーキング

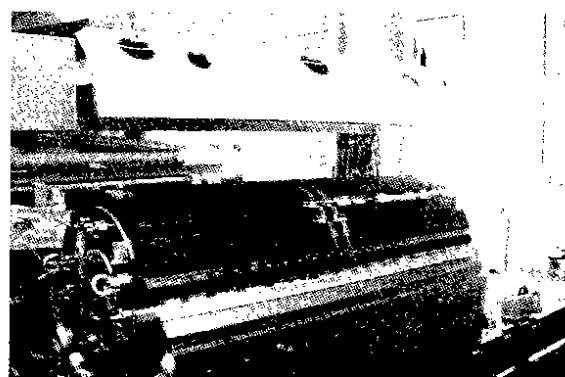


図5 (h) : シェルの組付け



図5 (i) : コイル間の接続

## 2.4.2 エンドスペーサとランプボックスの試作・製作

コイルエンドに用いるスペーサは、加速器用超伝導電磁石において、最も構造設計、機械加工の最適化が困難な要素であり、成形撚り線の加撓性を確認しながら、最終形状を決定するまでに多くの試作が必要となった。このスペーサの基本設計は、CERNで開発された磁場設計スペーサ・デザインプログラム“ROXIE” [10]により等周条件を基本として行われた。図6に ROXIE が与えるコイルエンドのケーブル配置を示す。複雑な三次元曲面を持つこのスペーサは、CAD/CAM によって具象化・チェックされ、傾斜式 NC 円テーブルを附加した同時5軸制御 MC (マシニングセンター) による加工を行なった(図7)。

試作したスペーサに巻き線を行ない、専用に製作した真空含浸装置によりエポキシ含浸を行なった後、カット断面を観察することで、超伝導線とスペーサとのフィッティング状態を確認した。ROXIE は設計の有力な手段であるが、汎用性を持たせるため CAD/CAM とのインターフェースを含んでいない。ROXIE データを直接 CAD に取り込み、平面図・側面図・展開図・アイソメトリック図の自動作図を行なうマクロ言語プログラム、CAM に転送するためのプログラムをそれぞれ整備した。これにより、作図ミスと入力ミスを防止するとともに、試作・形状決定への速いフィードバックを可能にした。

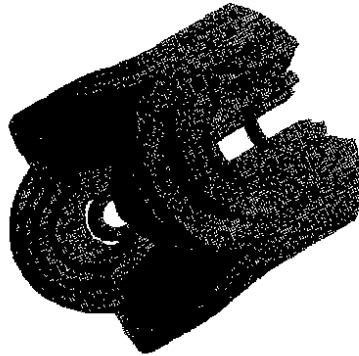


図6：ROXIE により計算されるコイルエンドの線材配置

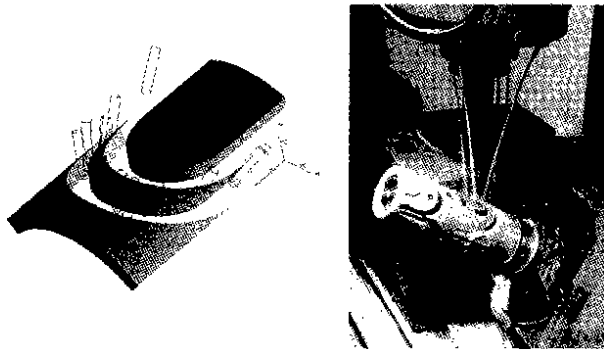


図7：CAM によるモデリングと同時5軸MC加工

インナーコイル(1-2層)、アウターコイル(3-4層)はダブルパンケーキ巻き線となっているので、線材は3次的に層間をわたっていく。構造的な不安定を生じ易く、従来クエンチを頻発する部分であった。3次元CADを用いた設計を行ない、線材にクエンチの原因となるような、無理な応力のかからない最適形状を得た(図8)。

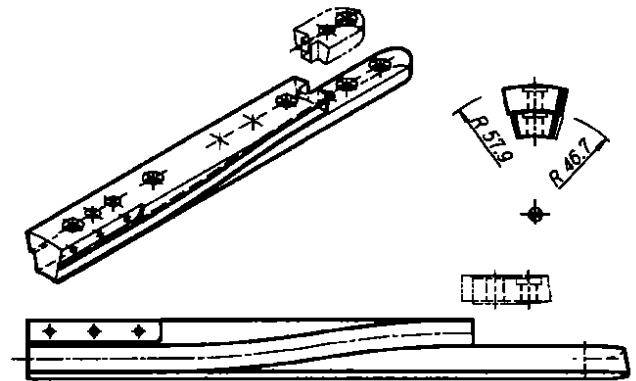


図8：1~2層間で超伝導ケーブルをスムーズに移行させるためのランプボックススペーサ

## 2.4.3 コイル内での超伝導線接続

磁場設計の要請から、2層目コイルは4ターンまではインナー用ケーブルを用い、5ターン目からはアウター用ケーブルを用いている。コイルの中にハンダ接続箇所を有することになるが、この付近は磁場が強く、詳細な設計と寸法管理された施工が不可欠であった。

4~5ターンの間にあるウェッジスペーサの中で、線材のストランドピッチ 90mm を超える 100mm をハンダ長さとした。線材表面に処理されているステプライト(5AgSn)の劣化を防ぐため、ハンダには銀入りハンダを使用した。ストランドの崩れを防ぐには、両ケーブルに予備ハンダを行ない、さらに、専用のハンダ治具を用いて施工した。

ハンダ接続後の絶縁回復に工夫を要した。GFRPのスペーサを用い、沿面距離で絶縁を確保することにより、線材が独自に持っていた絶縁フィルム以外、新たなフィルムの追加を不用にした。また、ハンダ接続の状態と、絶縁ラップ回復後のサイズ検査のため、各々ゲージを用意して簡略な判定が行なえるようにした。

## 2.4.4 2層連続巻き線と4層一体モールド

ダブルシェル構造の4層コイルで、均一な精度のよいコイルサイズを得るため、4層同時の一体成形を行なうことにした。従来、各層毎に行なっていた加圧加温成形に4層同時成形を含めると、1台あたりの成形回数は20回になってしまう。このモールド工程は加圧、昇温から成形終了まで、約8時間を要する作業であり、この回数・時間を節約するため、奇数層はモールドせず、連続して偶数層を巻き線し、その後2層同時に成形することとした。巻き線され

た状態の奇数層の上に偶数層の巻き線が可能となるように、巻き線治具に新たな工夫を行なった。

コイル押え治具は、線材を半径方向と周方向から常に保持し、巻き線中にコイルが緩むのを防ぐ構造とした。これにより奇数層の成形工程を省略し、インナーコイル(1-2層)、アウターコイル(3-4層)は各々連続して巻き線が行なえるようにした。4層同時成形により、コイルの寸法管理がより正確となった。

#### 2.4.5 コイル対地絶縁

対地絶縁用グラウンドラップにはポリイミドフィルムを使用した。4層構成を基本とすることで、コイル直線部とエンド部での絶縁接続箇所、1~4極の周方向の接続箇所でも、最低  $125\mu\text{m} \times 2$  層の確保を原則とした。絶縁沿面距離は  $15\text{mm}$  を基本とした。

$25\mu\text{m} \sim 125\mu\text{m}$  のフィルムで構成された、長さ  $1000\text{mm}$  を超えるグラウンドラップの沿面絶縁距離を含む図表示に苦心した。紙による模型を作り、アイソメ図を作成して設計を補った。最終組立て時において、実機の要求仕様である  $5\text{KV} @ \text{Air}$ 、 $1.5\text{KV} @ \text{GHe DC}$  の耐電圧が確認できた。

#### 2.4.6 カラーリング

カラー材には、高マンガン非磁性鋼を用いた。一般的にカラー材に要求される特性は、高耐力と低比透磁率である。加えて、このカラー材の積分熱収縮率は、鉄と同等の  $0.19\%$  となっている。このマグネットはヨークによって電磁力を支持しているため、冷却によるカラーの収縮が大きいと、コイル位置が不安定な状態となり、磁場性能を損なうことになる。 $300\text{K} \sim 4\text{K}(1.9\text{K})$  での積分熱収縮率を同等にすることによって、冷却時にもヨーク/カラーの組立て精度を保つことができた。収縮率の大きな  $\text{SUS316LN}$  等では達成できなかった設計である。

モールドされた四極のコイルは、カラーリングプロセスによって一体化された。組立てマンドレルを芯として仮組立てしつつ、グラウンドラップ等挿み、さらに絶縁保護用のポールシューを被せ、予め  $150\text{mm}$  の長さにスタックされたカラーモジュールを、コイル全長にわたり4方向から組み付けた。四極対称性を保ちながら、順次カラーモジュールを加圧し、すべてのモジュールに真鍮製のカラーピンφ4を挿入することによってカラーリングを完成した。本マグネットのヨーク/カラー構造では、カラーリング時点での予圧力は、所定の  $50\text{MPa}$  の  $1/10$  であるため、非常に容易なカラーリング作業となり、簡便なカラーリングプレスで行なうことができた。

#### 2.4.7 ヨーキング

ヨーキングでは、予めファインブランキングで打抜かれたヨーク材を、 $150\text{mm}$  の長さにスタックしたサブモジュールを組立てた。その際、スタックチューブと呼ばれるピンを液体窒素冷却による、冷し嵌めではめ込み、クリアランスゼロでのサブモジュールの組立て精度を実現した。カラーリングされたコイルは、上下2分割のヨーク内に組み込まれ、上下の

ヨークはキーを挿入することによって強固に固定された。このヨーキングは  $100\text{MPa}$ 、 $1000\text{トン/m}$  の圧縮力を加えて行われた。ヨークの2分割構造の採用によって、組立て工程が単純化され、量産時の工数削減に役立った。このヨーキング法による組立て、上下加圧の既存プレスを活用することにより、四方締めヨーキングプレスを新設することなく、四極マグネットが実現できたことは、前項の簡易型カラーリングプレスと併せ、エンジニアリングの立場から、大きな成果であった(図9)。

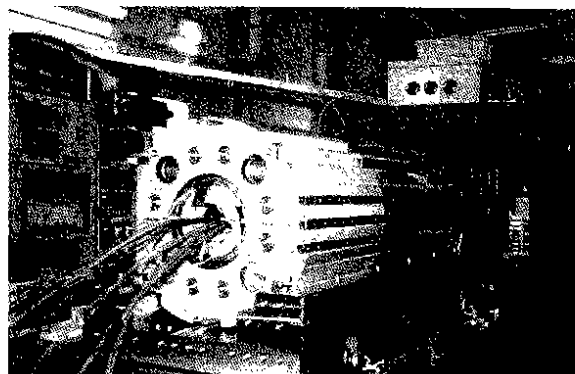


図9：ヨーキングを終えた#1号機

#### 2.4.8 コイル間の接続

四層四極マグネットでは、ダブルパンケーキ巻き線を採用していても、コイルの線材端は16本となり、コイル間の接続は7箇所へのぼる。この接続による本体磁場への悪影響、接続スペースの最小化のため、トリスタンQCSで採用した戻しターン法を用いることとした[11]。しかし、今回はコイルの内半径が小さいという、線材のアスペクト比が大きくて、エッジワイズ曲げに対する可撓性が十分でなく、単純な採用はできなかった。そこで、時計周りのノーマル巻き線と反時計周りのミラー巻き線を行なう、2対のコイルを製作する設計とし、戻しターンをコイルの内半径が大きくなる、2層目に用いることで解決した。この結果、マグネット端部での各コイル間の接続は図10に示されるように整然とした設計が実現した。

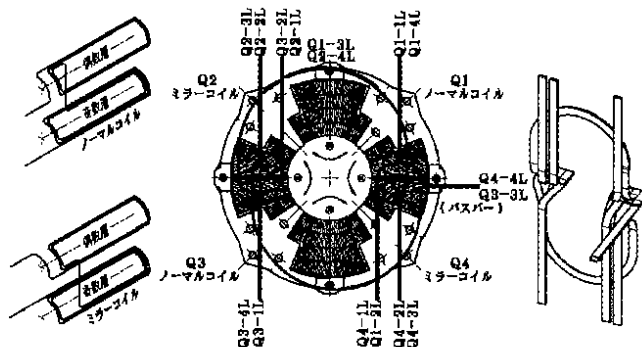


図10：水平面に整列されたポール間の接続

### 3. 開発された電磁石の特性

#### 3.1 コイルの剛性・寸法制御

コイル剛性は、マグネットのクエンチ特性、磁場精度に影響する。すなわち、コイル剛性が小さいと電磁力によるコイル変形が大きくなり、コイル予圧力が設計通りかけられなくなる。また、コイル間で剛性のバラツキが大きければ、コイルを組立てたときに、各々の変形量が異なることから、磁場精度が落ちる。成形時の応力とコイル剛性の関係を実験的にあらかじめ確認することにより、#4号機では、インナーコイル  $8.41\text{GPa} \pm 0.32\text{GPa}$  ( $1\sigma=18\mu\text{m}$ )、アウトターコイル  $8.09\text{GPa} \pm 0.44\text{GPa}$  ( $1\sigma=19\mu\text{m}$ ) に制御することができた。

コイルの周方向寸法は、主として磁場高次成分に影響する。ケーブル断面寸法の他に、絶縁テープに塗布したエポキシ樹脂量にも密接に関係する。コイルの試巻き線を行ない、成形時の加圧力、エポキシ樹脂塗布量とコイル寸法の関係が実測され、規定応力下で、規定寸法になるように制御された。コイルサイズの計測は、コイルサイズ測定装置を新たに開発して行われた。コイルの周方向に沿ったサイズを圧力の関数として計測し、設計値からのずれ、およびコイル間のばらつきが計測された。最終的にコイルサイズのばらつきは、標準偏差値で $\sim 20$ ミクロン以内に制御できた。1mモデル3~5号機のコイル寸法とコイル剛性の履歴を図11に示した。3、4、5号機と開発が進展するにつれ、コイル寸法が目標とした予備圧力(50 MPa)で、コイルの設計サイズに対して、 $50\mu\text{m}$ の範囲に近づいていることが判る。

製作精度は、コイル巻き線、成形、ヨーキングなどの各工程においてチェックされたが、最終的には組み上がった電磁石の磁場の高次成分を測定することで確認された。

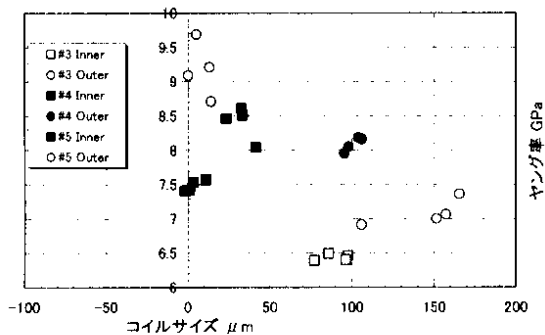


図11：コイルサイズとコイル剛性のチューニングの進歩。  
(測定には、(株)東芝殿の御協力を頂いた。)

#### 3.2 励磁特性・磁場測定試験結果

モデル1号機では、設計磁場勾配の25T/mに達した。その励磁トレーニング特性を図12に示す。また、3~5号機における初期クエンチ特性を図13に示す。各電磁石の最初のクエンチは、ほぼ運転時

の定格電流値(7149 A)あるいはそれを超えており、十分に要求に応える結果を得た。モデル3~5号機の磁場測定の結果を図14に示す。この結果に見られるように、磁場の高次成分は各々標準許容範囲内に収まり、電磁石が設計寸法の許容範囲内で製作されていることを示している。

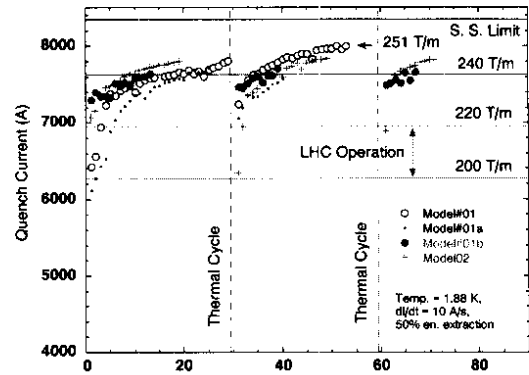


図12：モデル1~2号機のクエンチ特性

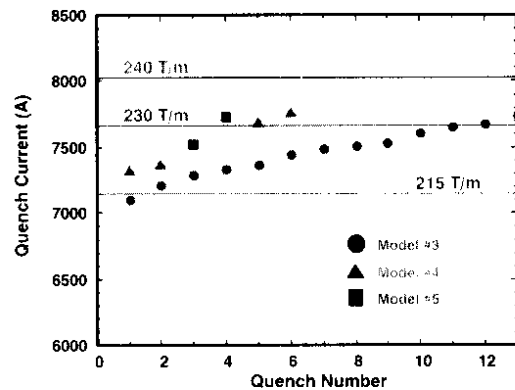


図13：モデル3~5号機のクエンチ特性

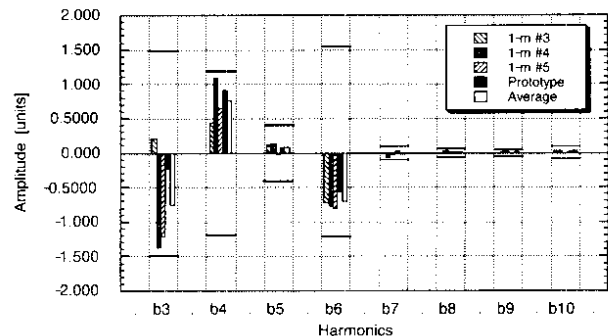


図14：モデル3~5号機の磁場高次成分の測定結果

### 4. 開発成果

この開発を通し、以下の技術的な成果を得た。

- ・#1、#2号機の試作結果を踏まえた設計を経て、実機製作用の最終デザインを得た。

- ・高磁場勾配：トレーニングなしで定格運転電流を超えるマグネットを実現できた。
- ・高磁場精度：要求される高磁場精度（磁場勾配均一度 $<10^{-4}$ ）を満足することができた。
- ・#3、#4、#5 (TSB) 号機の製作、試験を通じ、再現性（ $<10^{-3}$ ）の良い製作方法を確立することができた。
- ・設計、試作をインハウスで行ない、短期間でのフィードバックを可能にした。
- ・設計と製作の有機的な結合により、基盤となる多くの技術図面を蓄積できた。
- ・図面とともに蓄積された技術、ノウハウを迅速に技術移転することができた。

なお、これらの開発の詳細な記録は [12、13] に述べられている。現在、移転された技術により、実機の製作が企業において進められている。

## 5. まとめ

CERNでのLHC加速器への技術協力として1996年度にスタートしたビーム衝突点用超伝導四極電磁石の開発は、3ケ年のモデルマグネットの試作開発を経て、目標とする電磁石性能を得ることができた。この技術をもとに、1999～2000年度にフルスケール・プロトタイプ製作・試験、そして2001年度から実機生産開始へと順調に進行している。実機1号機は2001年11月に性能評価のための一連の試験を完了した。

励磁特性、磁場特性、マグネット保護に関して目標性能が確認され、クライオスタットへの組み込みのため、国際協力のパートナーである米国フェルミ研究所に搬送された。このようにモデルマグネットの基本設計、試作、試験評価に至るまでを一貫して機構内において行なうことが出来たことにより、その後、スムーズな企業への技術移転、実機製造の開始ができたものとする。開発された技術とノウハウが伝承され、今後、同様の超伝導電磁石の開発に生かされていくものと信ずる。

## 謝辞

LHC ビーム衝突点用超伝導四極電磁石の本基礎開発においては、多くの方々の励ましと御支援を頂きました。特に、菅原寛孝機構長、木村嘉孝物質構造科学研究所長には、計画当初からの変わらぬ励ましと暖かいご支援を頂きました。ここに深謝申し上げます。近藤健次郎共通研究施設長、三國技術部長、人見宣輝工作センター長には、本開発の推進にあたり多くの励ましを頂きました。心より感謝申し上げます。LHC マグネット開発グループの皆様方に励ましと御支援を頂きました。長期間、継続的にこの様な機会を与えて頂いた、工作センターの各位に感謝致します。

本計画はCERNとの共同開発研究として行われたものですが、特に共同研究のまとめ役としてご尽力頂

いたTom Taylor氏、1号機の機械設計を分担頂いたGlyn Kirby氏には大変お世話になりました。他のCERNのスタッフ、特にRanko Ostojic氏、Stephan Russenschuck氏には種々技術的なアドバイスを頂いております。ここに、感謝いたします。

またクウェンチプロテクションヒータの開発では、Flex Rodriguez Mateos氏をはじめ関係者の方々に大変お世話になりました。

開発された技術の移転がスムーズに行われたことは、プロトタイプならびに実機マグネットの製作担当会社である(株)東芝殿及びスタッフの方々の熱意と御協力の賜物です。ここにお礼申し上げます。最後に平成13年度KEK技術賞に御評価頂きましたことに、心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] A. Yamamoto, et al., "Design Study of a Superconducting Insertion Quadrupole Magnet for the Large Hadron Collider", IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 2, (1997) 747 - 750
- [2] A. Yamamoto, et al., "Development of a Superconducting Insertion Quadrupole Model Magnet for the Large Hadron Collider", Proc. of MT-15, Beijing, China, 1998, pp. 59 - 62
- [3] G.A. Kirby et al., "Mechanical Design and Characteristics of a Superconducting Insertion Quadrupole Model for the Large Hadron Collider", Proc. of MT-15, Beijing, China, 1998, pp. 63 - 66
- [4] A. Yamamoto et al., "Analysis of Mechanical Tolerances of a Low- $\beta$  Quadrupole Magnet for the LHC", IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol. 10, No. 1, (2000) 131 - 134
- [5] K. Tsuchiya et al., "Magnetic Design of a Low-beta Quadrupole Magnet for the LHC Interaction Regions", IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol. 10, No. 1, (2000) 135 - 138
- [6] Y. Ajima et al., "Development and Test Results of a Low- $\beta$  Quadrupole Model for the Large Hadron Collider", Proc. 6th European Particle Accelerator Conf., Stockholm, 1998, p. 2047 - 2049
- [7] N. Ohuchi et al., "Magnetic Field Measurements of a 1-m Long Model Quadrupole Magnet for the LHC Interaction Region", IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, (1999) 451 - 454
- [8] T. Nakamoto et al., "Quench and Mechanical Behavior of an LHC Low- $\beta$  Quadrupole Model", IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, (1999) 697 - 700
- [9] T. Shintomi et al., "Progress of LHC Low-Beta Quadrupole Magnet at KEK", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, (2001) 1562 - 1564
- [10] S. Russenschuck, "ROXIE: Routine for the optimization of magnet X-section, investigation and coil end design", CERN 99-01, 1999.
- [11] K. Tsuchiya et al., "Performance of the Eight Superconducting Quadrupole Magnets for the TRISTAN Low-Beta Insertions," IEEE Trans Magn. MAG-27, pp.1940-1943(1991)
- [12] 寺島昭男 他, "超伝導四極電磁石の製作・四極・四層マグネットのコイル間接続" 2000年度 東北大学技術研究会
- [13] 寺島昭男、東憲男 他, "LHC ビーム衝突点用・超伝導四極電磁石の基礎開発" KEK Report 2001-23

# Belle 検出器用鉄構造体の開発

山岡 広

高エネルギー加速器研究機構

素粒子原子核研究所、ベルグループ

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

## 概要

現在、本研究所において CP 比保存則の解明を目的とした素粒子実験が筑波実験室に据え付けられている「Belle 粒子検出器」を用いて精力的に進められている。この検出器は、総重量 1300 トン大きさ約 8m にもなる大型の検出器であるが、その重量の大部分が多くの鉄を組み合わせた鉄ヨークが占めている。設計にあたっては、粒子検出器としてのメンテナンス性を考慮すると共に超伝導電磁石が発生する磁場に対する電磁的な設計を実施して構造を最適化し、自重・地震力・電磁力などに対する力学的な設計をおこなった。組み立て・据え付けにあたっては、工期の短縮及び組み立て精度の確保を図るため、その方法について考えた。

本レポートは、この粒子検出器用鉄構造体に関する設計から据え付けに関して報告する。

## 1. はじめに

現在、図 1 に示すとおり筑波実験室に据え付けられている BELLE 粒子検出器は、大きさ高さ約 10m、幅・全長約 8m で八角筒の形状をしている。各測定器は、八角筒の中心軸に位置するビームパイプから同心円上に位置しその外側に中心磁場 1.5T を発生させる超伝導電磁石がある。

鉄構造体は、総重量約 1300 トンで八角形の筒を横置きにしたバレルヨーク部とそれに蓋をするような形でエンドヨークと呼ばれる部分に分かれている。バレルヨークは 8 個のブロックから構成され、ボルトによって組み上げられている。1 つのブロックは 47mm の鉄が 14 層あり、それが 44mm の空間をあけて構成されている。また、エンドヨークは 4 つのブロックから構成され、5 層のブロックと 10 層のブロックがある。測定器のメンテナンスの際にはエンドヨークは縦に 2 つに分かれて開き、内部へのアクセスを可能にしている。

設計では、まず磁場解析をおこなうことによって鉄構造体形状を最適化し、自重・電磁力・地震力に対する変形及び応力を許容値以下に抑えるように支持構造の設計をおこなった。またこの際には、測定器の領域をできるだけ削らないように大きさは最小化した。これ以外にも設計では、メンテナンス時の内部測定器への迅速なアクセスのための機構の設計や 3 万チャンネルにもなるケーブルの領域確保、組み立て・据え付け時に於いては、期間の短縮方法や精度の確保方法に関する設計・検討を行った。

## 2. 鉄構造体の設計

### 2.1 要求項目

粒子検出器用鉄構造体を設計する際には、次にあげる項目を考慮しなければならない。

#### (a) 磁氣的設計

磁場分布に無駄な部分ができないように鉄構造体形状を最適化し、ワイヤーチェンバー(CDC)領域:  $r=0.25\sim 0.9\text{m}$ ,  $Z=\pm 1.2\text{m}$  での磁場均一度が約 2% 以下であること。

#### (b) 構造設計

自重・地震力・電磁力に対して鉄構造体の変形及び応力が許容値以下であること。また、支持構造を増やす事は、測定器領域の減少につながる事から、支持形状を最少にすること。

(c) 容易に組み立て・据え付けを行うことができ、精度も確保できること。

(d) 構造体内部からのケーブル及び測定器のサポートのための領域を確保すること。

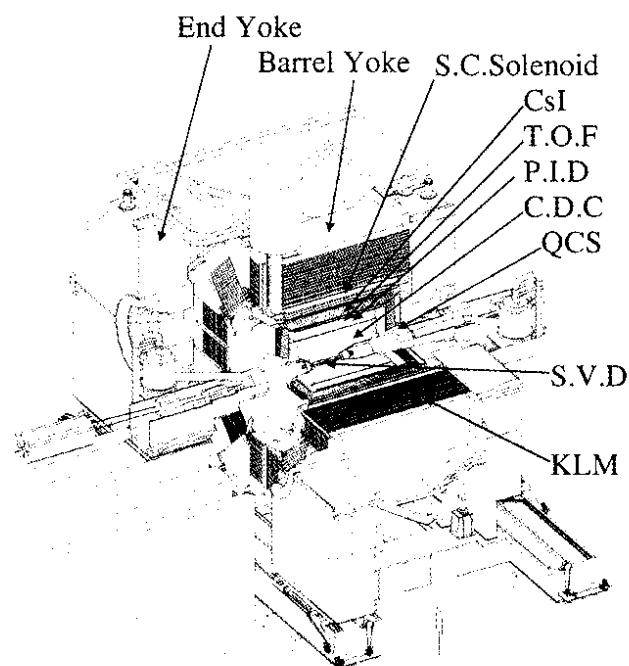


図 1 : Belle 粒子検出器

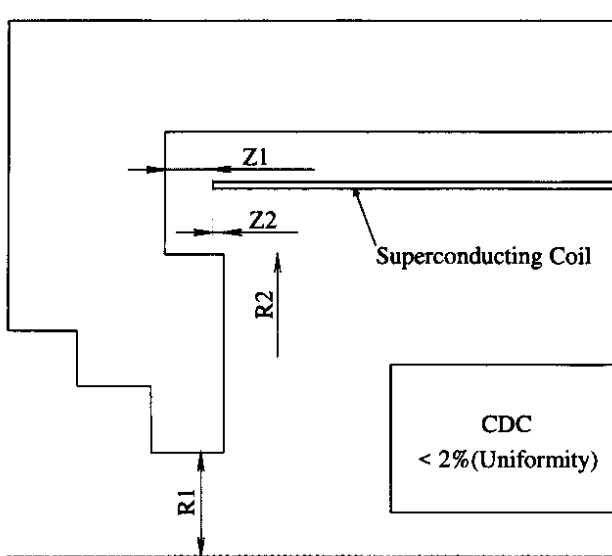


図2：鉄形状の最適化

- (e) メンテナンスまでの作業時間を最少にし、方法を簡単にする。
- (f) コストを抑制すること。

## 2.2 磁気的设计

設計をおこなうにあたって超伝導電磁石の条件として、中心磁場が1.5T、コイル半径が1.8m、全長が3.91mである。

磁場均一度の向上のための一つの方法として、鉄の飽和を極力抑えることである。このため必要な量だけ鉄を増やせばよいが、そのことは測定器領域の減少あるいは鉄の増加による製作時間及びコストの増加を招いてしまう。ここで鉄の飽和とは、磁石が発生するフラックスが鉄の中で吸収しきれずに外に漏れ出すことである。このため、飽和がおきていない場合は電流値と磁場が比例しているが、飽和がおこることにより、電流値と磁場が比例しなくなり発生する磁場が低くなる現象である。

磁場設計では、磁場解析を実施することにより無駄な部分の鉄を排除して構造を最適化し、多少飽和はしていても要求される磁場均一度が満足できる量にした。また、もう一つの均一度改善方法として、図2に示すように Z1, R1 の値を最小化し、Z2, R2 値を均一度が最良になるように最適化した。

図3に解析結果を示す。色の違いは磁場の強さを表し、それぞれの線はフラックスを表す。解析の結果、バレルヨークとエンドヨークの間を密着させなくても磁場均一度は大きく悪くならない事がわかり、ここを磁気的に80mmあけることにした。このことにより、膨大な量の空間が生まれ、ケーブルを通すためのスペース及び測定器のサポート領域を容易に確保することができた。従来は、バレルヨークとエンドヨークを密着させていることから、ケーブルを通すための必要な空間をできるだけ正確に見積もり、そのための溝を鉄構造体に加工していた。このことが、製作時間とコストを増やす結果になった。また、

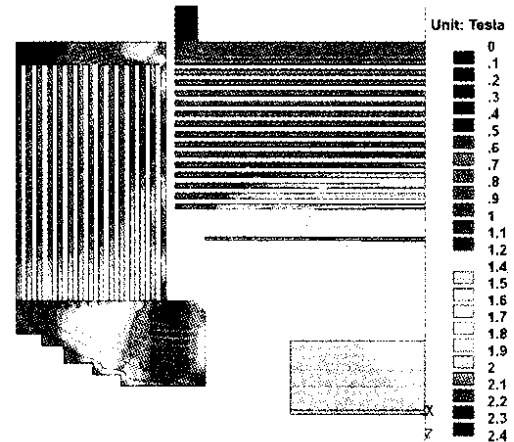


図3：磁場解析結果

磁場分布自体も周方向に変化しているため、このための評価が必要になった。また、磁場解析は通常、軸対称モデルの2次元解析をおこなうが、この磁気的空間をあけることにより、2次元磁場解析との整合性を高めることができた。更に、従来の粒子検出器用鉄構造体の材料は、非常に純度の高い純鉄を用いていたが、解析の結果、標準的な鉄であるJIS-S10Cを用いても磁場分布には大きく影響しないことがわかり、この鉄を用いた。このことが、高価な純鉄を用いた場合と比べてコストの削減につながる事ができると共に、純鉄と比べると機械的強度が強いため、構造設計の上で有利にすることができた。

## 2.3 漏れ磁場改善

鉄構造体が完成し超伝導電磁石み込まれた後、励磁試験が行われた。励磁中、BELLE 検出器の漏れ磁場を測定してみると予想以上に大きいことがわかった。原因を調査したところ、磁場解析では境界条件として鉄構造体外側の任意の地点で磁場をゼロにするという境界条件が必要になるが、この条件が短すぎたため漏れ磁場を低く計算してしまっただけが判

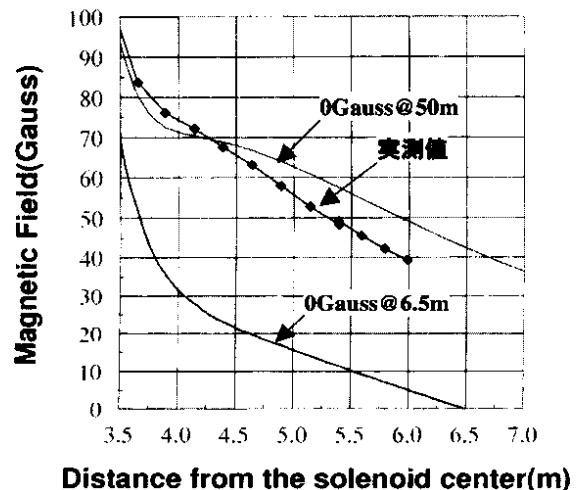


図4：ビーム軸上の磁場(漏れ磁場対策前)



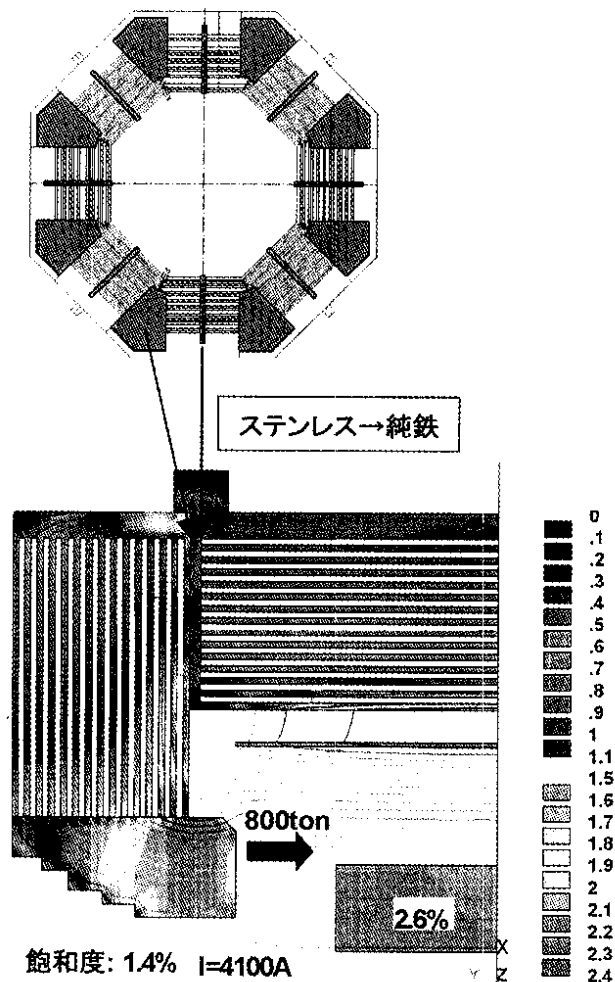


図5：漏れ磁場対策後の解析結果

明した。図4にビーム軸上の漏れ磁場を示す。当初の設計では、超伝導電磁石の中心から6.5m離れた地点で磁場をゼロと定義していたが、50m離れた地点で磁場をゼロにしてみると測定値とも一致した。

漏れ磁場を改善するために短期間でできる方法を検討した結果、バレルヨークの端面には電磁力を支持するためにステンレス製の板が取り付けられていたが、この板を鉄製に変えることにした。このことでバレルヨークとエンドヨークの間の80mmの磁気抵抗を低減させて漏れ磁場を抑えた。また、S10C相当の鉄を短期間で入手することは困難であることから、TOPAZ鉄構造体に用いられていた非常に純度の高い鉄を転用することにし、期限内に機械加工及び構造体への取り付けをおこなうことにした。その結果、製作・取り付け作業は短期間に予定通り完了することができた。ただし、このことで80mmの磁気的空間を失うことになった。

最終的な磁場解析の結果を図5に示す。ワイヤーチェンバー領域での磁場均一性は2.6%、エンドヨークに働く電磁力は約800トンと計算されこの値は構造設計の際に用いられた。また、必要な電流値は4100Aと計算された。

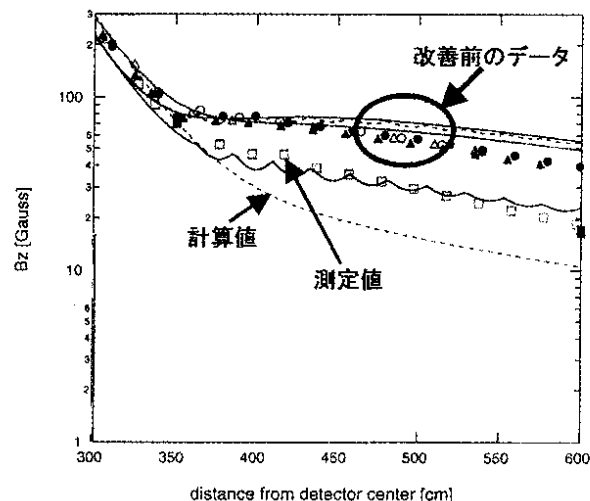


図6：漏れ磁場対策後のビーム軸上の磁場

図6にビーム軸上の漏れ磁場を示す。漏れ磁場は、対策前と比べて20～40 Gauss程度減少し、測定値と解析値も比較的良く一致させることができた。

### 2.3 構造設計

鉄構造体は、多くの鉄がボルトによって組み合わされた構造である。このため、それぞれの鉄を組み立てると、ボルトの伸びや曲げなどによって隣り合う構造物の中で滑ってしまったりあるいは開いてしまったりしてしまい、このことが組み立て精度の低下や鉄構造体全体としての剛性の低下を起こしてしまう可能性がある。また、荷重をボルトで支持させることは、そのために必要なボルトサイズが大きくなることから物理的なスペースが必要になりその分測定器の領域を削ってしまうということ、構造解析をする際には、ボルト構造という定義と評価が難しくなってしまうということがある。このため、荷重はボルトによって支えられるのではなく、主に支持構造材の面で受けさせることにした。また、支持構造材は測定器の領域を減少させることにつながるため、構造は可能な限り最小化した。

曲げに対する構造物の強さを表す曲げ剛性は、 $D=E \cdot I$ で表される。ここで、 $E$ はヤング率、 $I$ は断面2次モーメントである。このことから、鉄構造体の断面が溶接構造のような一体の構造物とすることができれば、八角筒自身が持つ膨大な断面2次モーメントをとれることから変形量や応力を許容値以下に抑えることができると考えた。このことを証明するため、バレルヨーク及びエンドヨークの構造解析を実施した。図7にバレルヨークの構造解析結果を示す。解析では、バレルヨークを1/4対称モデルに定義してそこに自重をくわえた。結果は、最大応力が17MPa、最大変位が0.7mmであると計算された。図8にエンドヨークの解析結果を示す。エンドヨークの端部に厚さ50mmの支持板を固定して、電磁力800トンの荷重をかけた場合の応力と変形量を解析した。結果は、最大応力が113MPa、変位が0.8mmである

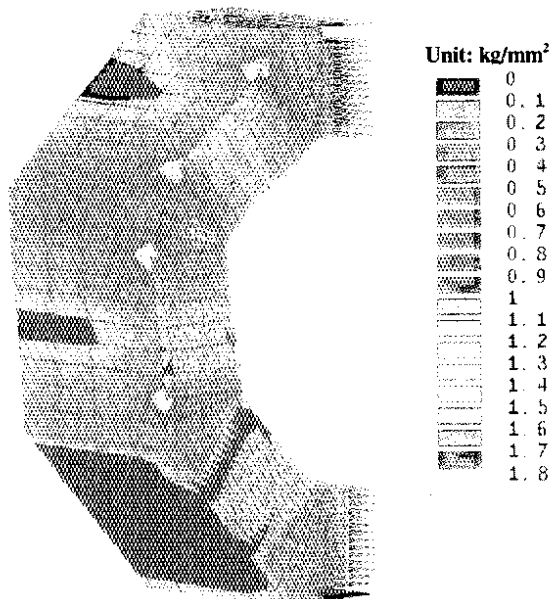


図7：バレルヨークの構造解析

と計算された。これらの解析結果から、できるだけ一体構造にすれば自重や電磁力に対して鉄構造を支持できるということが確認された。

構造設計する際の許容応力は日本建築学会による「鋼構造設計基準」を用いた。この設計基準は、鋼構造建築物の倒壊を防止する目的で広く鋼構造建築物に適用されている基準である。

バレルヨークは8個のブロックを組み合わせることで八角筒を形成しているが、隣同士を接続ボルトで単純に固定するのではなく、図9に示すとおり、精度良

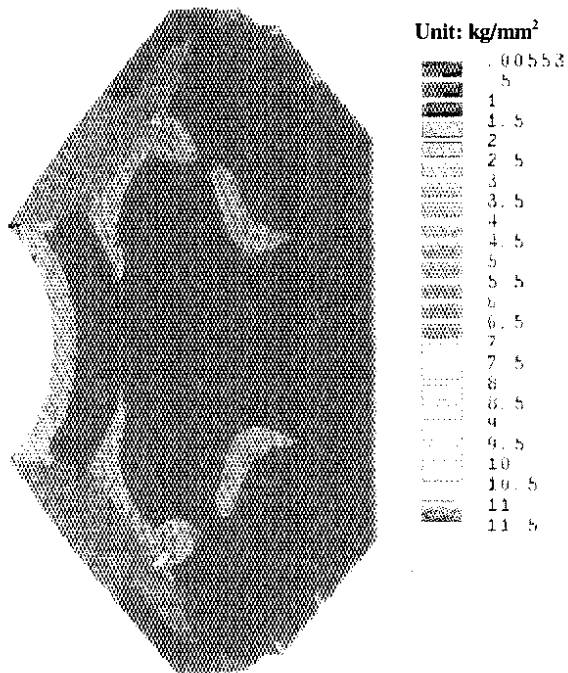


図8：エンドヨークの構造解析

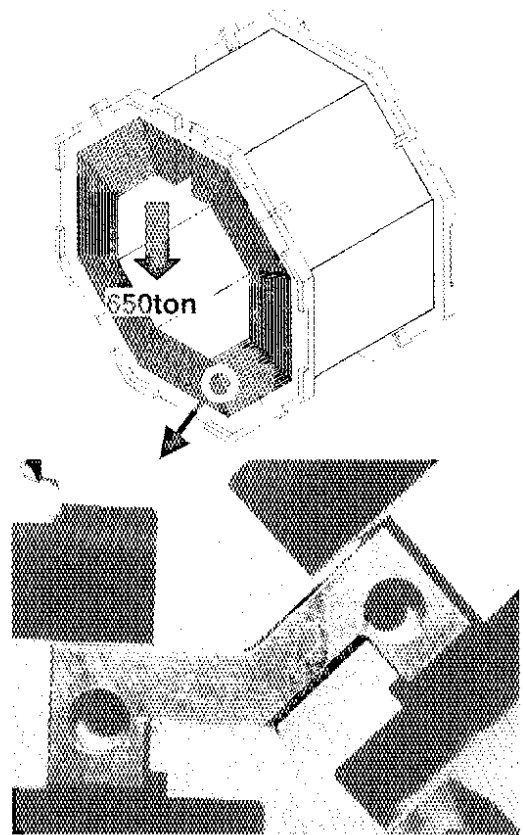


図9：バレルヨークの支持構造

く加工されたV字型をしたブロックを埋め込み固定することにより接続した。そしてこのV字ブロックに荷重を受け持たせることにより、ボルトの伸びによる変形量増加や隣同士の滑りを最小限に抑えることができると共に、全体としての剛性を溶接構造に近づけることができた。また測定器領域の減少を最小限にすることができ、八角形に組み上げたときの組み立て精度も確保することができた。

エンドヨークでは、電磁力 800ton に抵抗するために、図10に示すようにビーム軸方向に大きな断面二次モーメントを持つ支持構造物を取り付ければ、電磁力に抵抗できると考えた。このため、構造解析をおこないこの支持構造を検討した。解析ではビーム軸方向に最大とれる量を設定し、それと直角方向の最少厚さを計算した。なぜなら、この方向は測定器領域を削ることになるからである。その結果、エンドヨークの周方向に90度ずつ厚さ50mmの支持板を埋め込み、ボルトで固定した。

耐震設計の手順は図11に示すように、まず構造体に最大加速度80gal(0.2G)に正規化した様々な種類の地震波を入力した。そして、この入力加速度に対して構造体がどのくらい応答するか解析した。耐震設計において大切なことは、構造体の固有振動数と地震波の固有振動数をできるだけ離すことである。もし、互いの固有振動数が近いと地震波に対して構造体の応答が何倍にも拡大してしまうからである。解析の結果、最大の応答があったのは、城県沖地震

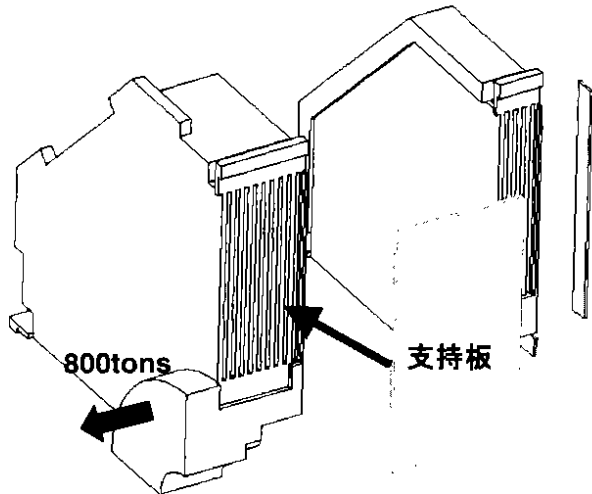


図10：エンドヨークの支持構造

のときで、その値は 80gal の入力に対して 260gal の応答があった。このことから 0.3G の静荷重を構造体に加えて静解析をおこない、変形や応力等を求めた。

鉄構造体は、更に詳細な検討・解析がなされ、健全性が確認された。

### 3 エンドヨーク移動装置

エンドヨークの移動装置は、内部の測定器メンテナンスのため、できるだけ早くエンドヨークを開閉できなければならない。また、内部の測定器等との干渉を避けるため、必要とされる移動は3方向要求された。エンドヨークの移動方向と必要距離を図12に示す。

移動するための装置としては、一般的にチルトタンクと呼ばれるものとリニアガイドと呼ばれるものが

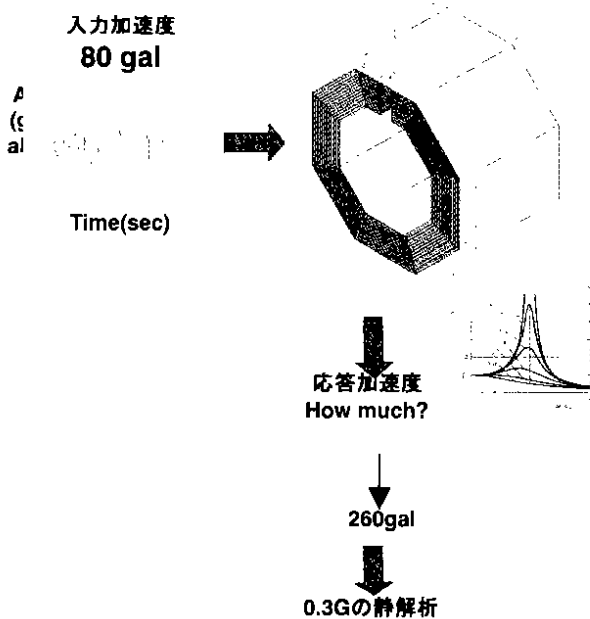


図11：耐震設計の手順

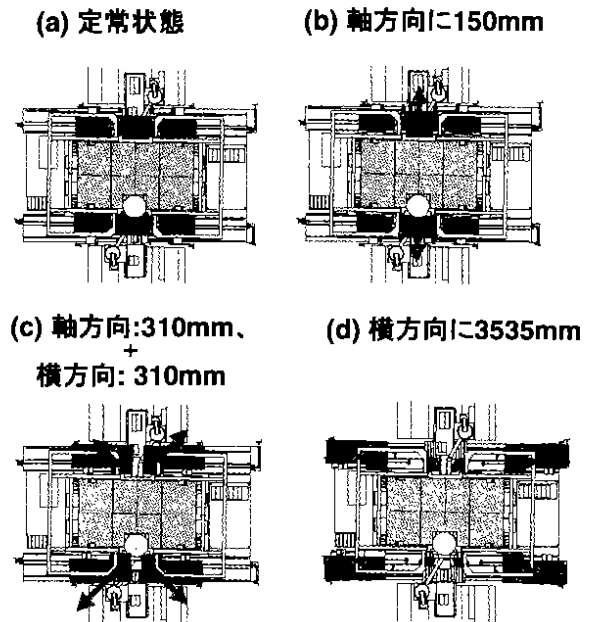


図12：エンドヨーク必要移動方向

ある。チルトタンクは主に重荷重の構造物を移動させるときに用いられ、設置精度も比較的ゆるくすることができる。しかし、位置再現性はあまり良くなく摩擦係数も一般的なベアリングと比べると大きい。これに対して、リニアガイドは、比較的軽荷重の構造物を移動させるのに用いられる。敷設精度が非常に高く要求されるが位置再現性が良く、摩擦係数もベアリング並に低いので小さな力でも構造物の移動が可能になる。

本設計では、位置再現性の良さと低摩擦係数の観点から、リニアガイドを用いることにした。このことにより素早い開閉ができると考えたためである。

装置の構造図を図13に示す。一つあたりの移動

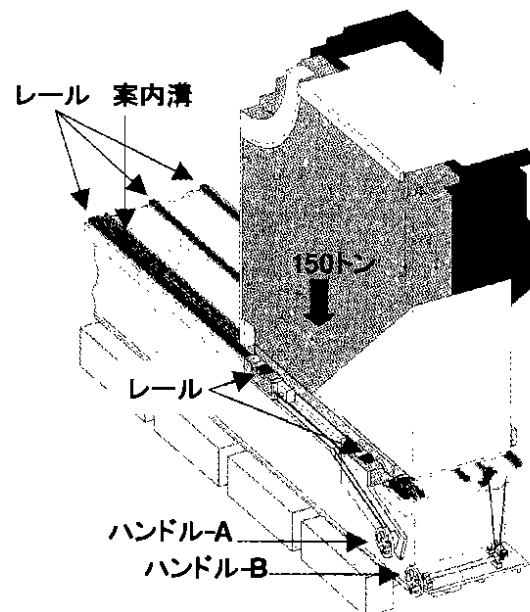


図13：エンドヨーク移動機構

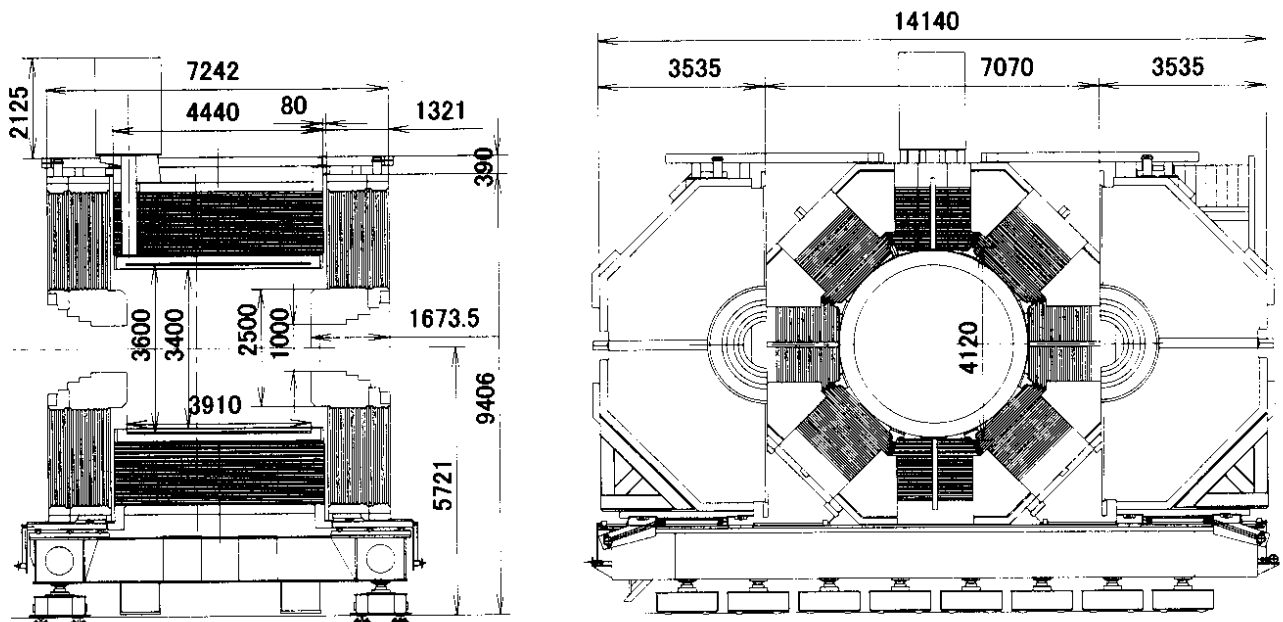


図 1 4 : Belle 検出器用鉄構造体最終図面

装置で移動しなければならない荷重は 150 トンである。レールは水平方向に 3 本敷設した。これは、エンドヨークが軸方向に移動する際には荷重のバランスも移動するからである。ビーム軸方向のレールは 2 本である。リニアガイドの仕様は、ベアリングの 1 個あたりの許容荷重は 53 トンで一カ所あたり 6 個用いた。設置精度は、互いのレールの平行度は  $28\mu\text{m}$  以下で前後のベアリングの高さの違いは  $86\mu\text{m}$  以下、そして左右の高さの違いは  $202\mu\text{m}$  以下である。移動する手順は、まず軸方向に下がるときはハンドル-A を回し、水平方向に動くときはハンドル-B を回す。45 度方向に動くときはハンドル-A とハンドル-B を同時に回す。移動は、案内溝でガイドされているため、意図しない方向に動いてしまうことはない。また、鉄構造体上部には、エンドヨークが全開してメンテナンス状態の時に、地震荷重によりエンドヨークが転倒しないように上部ガイドレールが取り付けられている。

以上のことで、開閉時間は、ハンドルを回す早さにもよるが、30 分以内には片手で開閉が可能にな

った。

最終的な Belle 検出器の図面を図 1 4 に示す。

## 4 組み立て・据え付け

### 4.1 工場での組み立て

工場での組み立ては、図 1 5 に示すように全部でパレルヨーク部では 112 枚、エンドヨーク部では 120 枚になる鉄板をそれぞれ 8 ブロックとエンドヨークでは、10 層と 5 層の 2 種類を 8 ブロックにわけた。一つのブロックを組み立てるときは、機械加工された精度がでている接続板に 47mm の板をそれぞれ接続して組み立てた。このようにして各ブロックを工場での組み立てることによって組み立て精度をだした。このことで鉄構造体として実験室で八角筒に据え付けたときの精度と据え付け期間の短縮を図った。

### 4.2 下部フレームの改造

一方、実験室ではこれらの部品を組むための下部

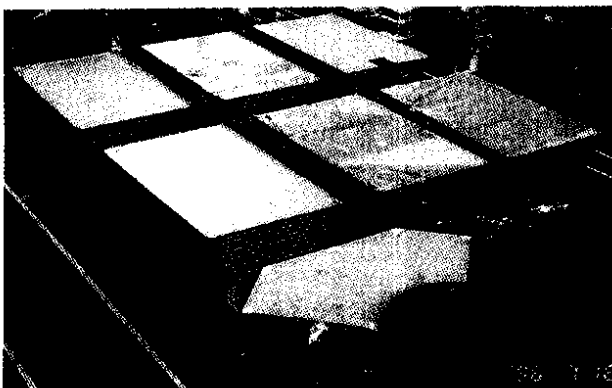


図 1 5 : 工場での各ブロックの組み立て



図 1 6 : 下部フレームの改造の様子

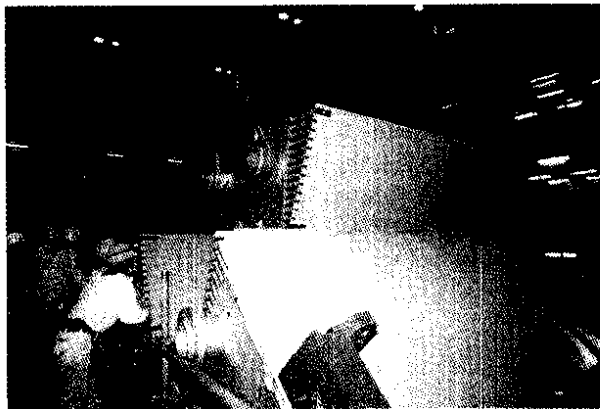
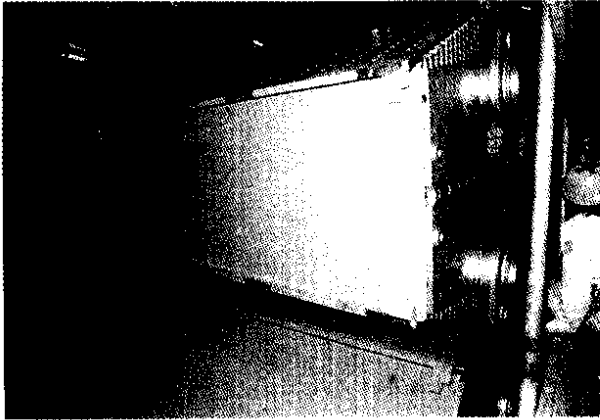


図17：バレルヨークの据え付けの様子。  
垂直部の据え付け(上)、最上部の据え付け  
(中)、バレルヨーク部の完成(下)。

フレームと呼ばれる台の改造を約一ヶ月かけておこなった。このフレームは以前、トリストアントパーズ検出器を載せていたベースで、ロールイン位置からロールアウト位置まで自走できる能力があり、更にレベル調整機構まで備わっているという非常に能力の高いベースである。これをコスト削減の意味も含めて、再利用することにした。

図16は、下部フレームの改造中の写真である。改造では、トパーズ検出器を支えていた支持材を撤去し、Belle 検出器のための支持材をあらたに取り付

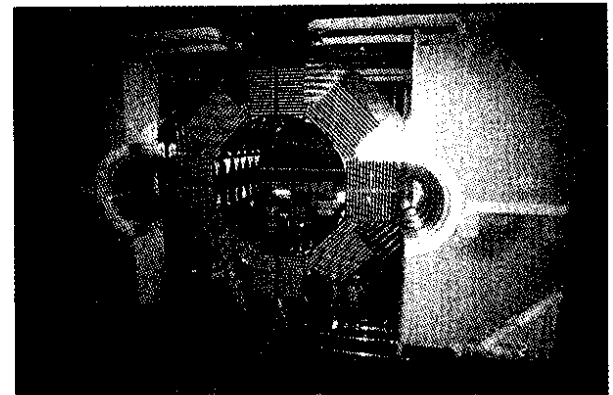
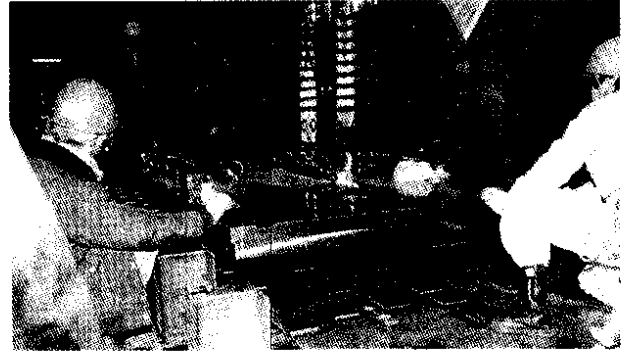


図18：エンドヨークの組み立てから完成まで。移動装置の据え付け(上)、エンドヨークの組み立て(中)、鉄構造体の完成(下)

けた。また、エンドヨークを開けたときには、その開口長から既存の寸法では全長が足りなくなることから、部品を継ぎ足して、ベース全長を延長した。

#### 4.3 バレルヨークの据え付け

バレルヨーク部の据え付けは、それぞれのブロックは既に精度がでていたため、単純に下部から組み上げていき、隣同士のブロックを連結するときは前述したV字型ブロックを用いて固定した。また、上部ブロックを据え付けるときは、内側から支持フレームによって支えることで、八角形の形状を保持した。図17に写真を示す。更に適宜、対辺寸法など

の寸法測定や測量をおこなうことで据え付け精度の確認をおこなった。

結局、バレルヨークの据え付けは約2ヶ月で終了させることができた。

#### 4.4 エンドヨーク移動装置の組み立て

エンドヨークの据え付けに先立って、移動装置の組み立てをおこなった。下部フレーム上は、エンドヨークが移動するため既設のフレームの断面形状では強度が不足したため、95mmの厚板で補強した。図18(上)に組み立て途中の写真を示す。写真にあるように、厚板を下部フレーム上に溶接で固定した。その上には既にリニアガイドが取り付けられている。リニアガイドは非常に高い敷設精度が要求されることから、エンドヨークと固定される前には、予め単独で走行試験がおこなわれた。このために要した期間は約1ヶ月である。

#### 4.5 エンドヨークの据え付け

エンドヨークの組み立ても、図18(中)に示すように基本的に下部から組み上げていき、電磁力を支持するための支持板を取り付けた。更に適宜、寸法測定や測量などをおこなって、据え付け精度の確認をおこなった。測量では特に、バレルヨークとエンドヨークの位置関係の測定が非常に重要である。もし、互いの位置関係がずれると、そのずれ量に従って超伝導電磁石を励磁したことによる偏芯力が増加してしまうことになる。エンドヨークの据え付け期間は約2ヶ月である。

鉄構造体として完成した後、ロールイン位置に移動し、構造体の基準レベルをビーム位置に合わせるための位置調整や、据え付け精度確認のための各種測量が行われた。

鉄構造体は、予定通り合計約6ヶ月で完成させることができた。図18(下)に鉄構造体完成時の写真を示す。

## 5 まとめ

まず、鉄構造体の設計・据え付けを行った上での反省点としては、既に述べてある漏れ磁場の問題である。このことは予め設計段階で許容される漏れ磁場を十分に広い領域で把握して磁場解析がおこなわれなければならない。

もう一つは、電磁石を励磁したときのエンドヨークの変位が設計値より大きいということがわかった。測定では、設計値0.7mmに対して約4mmの変位量があることがわかった。調べてみると、電磁力を受ける面の精度が出ていないため、片側4カ所ある支持面が均等に電磁力を支えておらず、その結果変位量が増加したと考えられる。ただし、これはエンドヨーク自身が変形して曲げられているのではなく、形状を保持したまま変位(移動)していると分析された。

最後に、現在、BELLE 検出器は、順調に実験をおこなっている。完成後も幾度となく地震がおこり、また超伝導電磁石の励磁も繰り返したが、Belle 粒子検出器用鉄構造体は健全であり、メンテナンス時も設計通り開閉され、作業が行われている。

## 参考文献

- [1] Cheng, M.T, et al., "A study of CP violation in B meson decays - technical design report", KEK-Report-95-1, April 1995, pp. 8-10 - 8-23, URL:[http://bsunsv1.kek.jp/belle/report/tdr/tdr\\_structure.ps.gz](http://bsunsv1.kek.jp/belle/report/tdr/tdr_structure.ps.gz)
- [2] KEK Progress Report 96-1, pp. 101-106, URL:[http://bsunsv1.kek.jp/belle/report/prog96/progress\\_iron\\_integ.ps.gz](http://bsunsv1.kek.jp/belle/report/prog96/progress_iron_integ.ps.gz)
- [3] "B-factory 用鉄構造体の設計", 技術研究会報告, July 1996, Published by 分子科学研究所技術課, pp. 21-24
- [4] KEK Progress Report 97-1, pp.40-41, pp.133-136., URL:[http://bsunsv1.kek.jp/belle/report/prog97/progress\\_3c.ps.gz](http://bsunsv1.kek.jp/belle/report/prog97/progress_3c.ps.gz)

## 平成13年度 KEK技術賞 受賞論文集

### 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科学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年に創設された。

各研究所・研究施設、技術部及び管理局から各2名選出される「KEK技術賞選考委員会」を設け、応募のあった候補者について審査のうえ、機構長に推薦することとしている。

募集については、電子メールにより機構内の全職員にアナウンスを行って候補者の推薦を受けることとしているが、もちろん自薦も歓迎している。

応募のための様式等については、本機構のホームページからダウンロード出来るよう工夫されており、毎年7月から10月を公募期間とし、年度内には授賞者を決定、発表する事としている。

平成12年度は4件5名、平成13年度は3件4名を表彰している。

KEK技術賞を受賞したものは、KEKインターナル・レポートで受賞論文集として出版され、広く関係者等にも配布することとしている。

なお、本レポートの発行が遅れたことを、受賞者はじめ関係者にこの場を借りてお詫びしたい。

また、本レポートは白黒印刷としたので、カラー版については以下を参照して頂きたい。

URL <http://www.kek.jp>

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

平成14年12月

出版担当 庶務課人事第一係

