

# 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など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には、次にあげる項目を考慮しなければならない。

#### (a) 磁気的設計

磁場分布に無駄な部分が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。

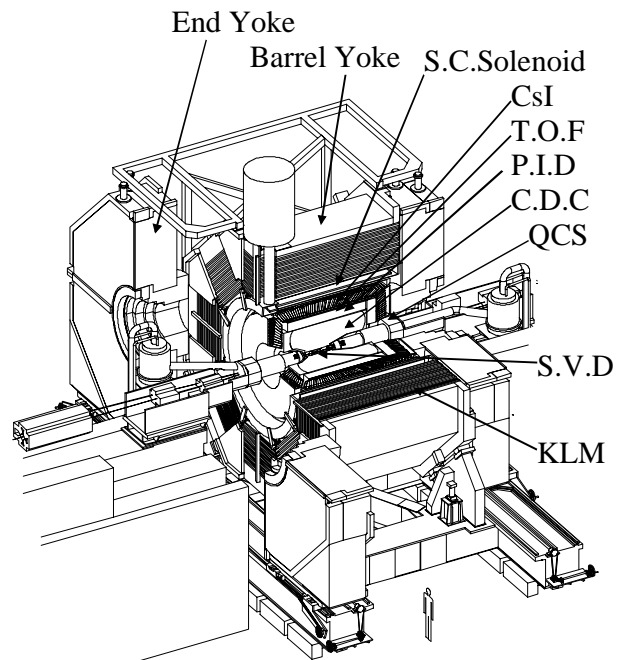


図 1 : Belle 粒子検出器

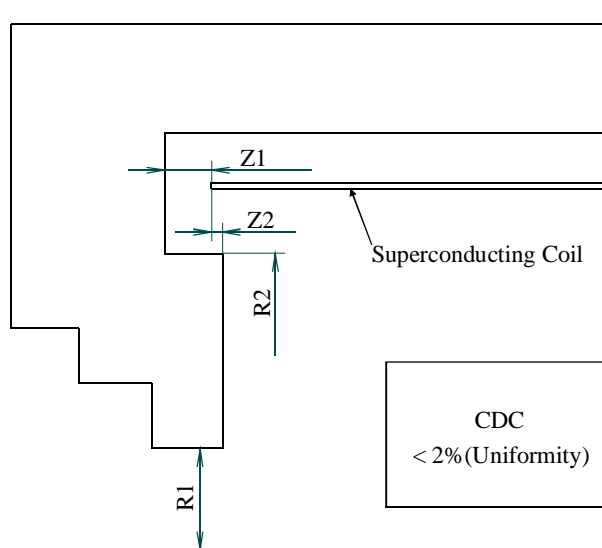


図2：鉄形状の最適化

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

## 2.2 磁気的設計

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、パ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、パ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、

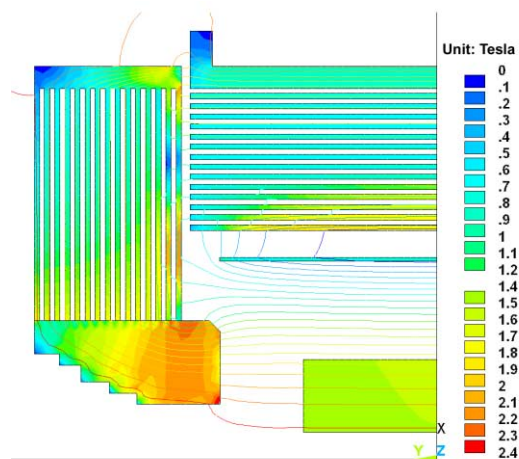


図3：磁場解析結果

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ことができると共に、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ことが判

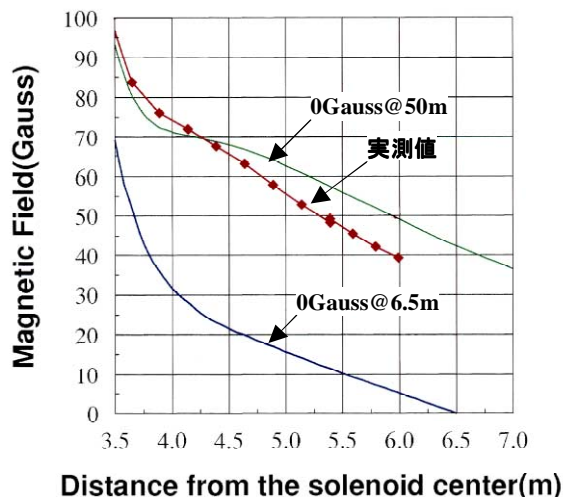


図4：ビーム軸上の磁場(漏れ磁場対策前)

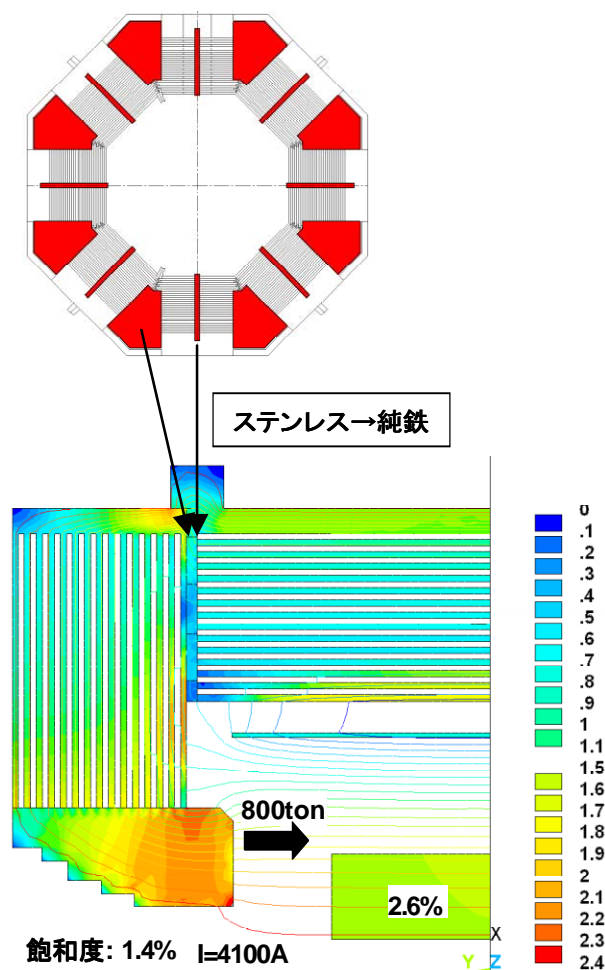


図 5：漏れ磁場対策後の解析結果

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。

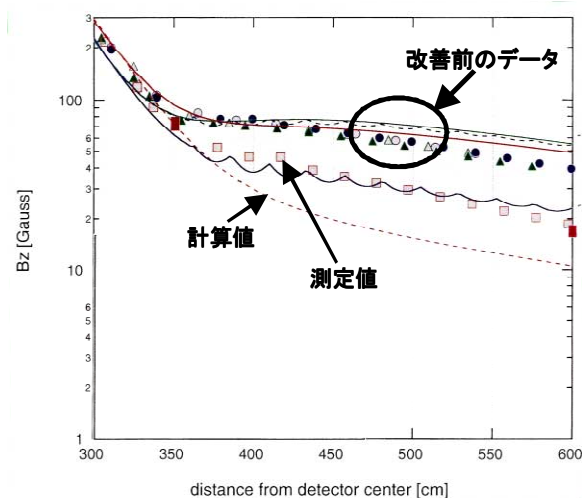


図 6：漏れ磁場対策後のビーム軸上の磁場

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 ガウス程度減少し、測定値と解析値も比較的良好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



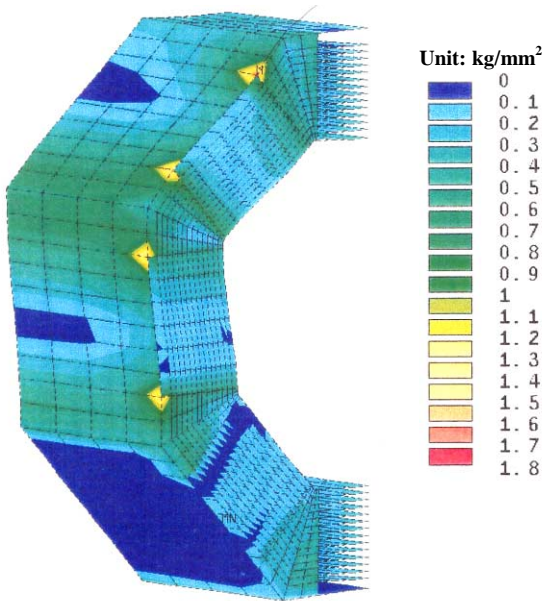


図 7：バレルヨークの構造解析

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

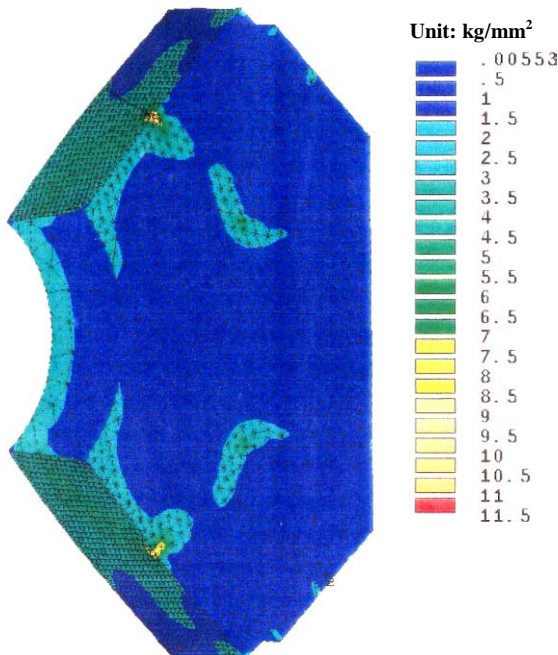


図 8：エンドヨークの構造解析

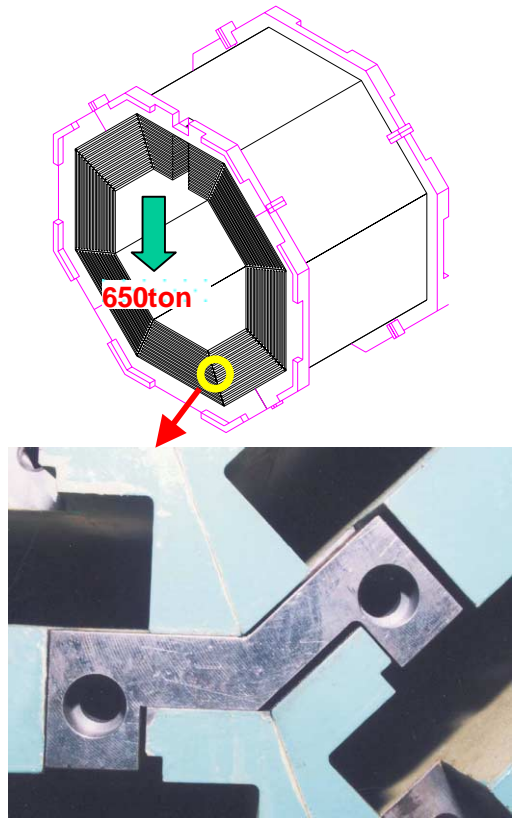


図 9：バレルヨークの支持構造

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られ、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

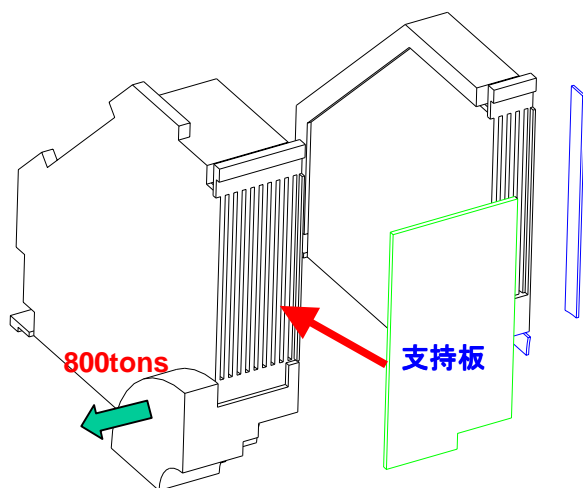


図 10 : エンドヨークの支持構造

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 1 2 に示す。

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

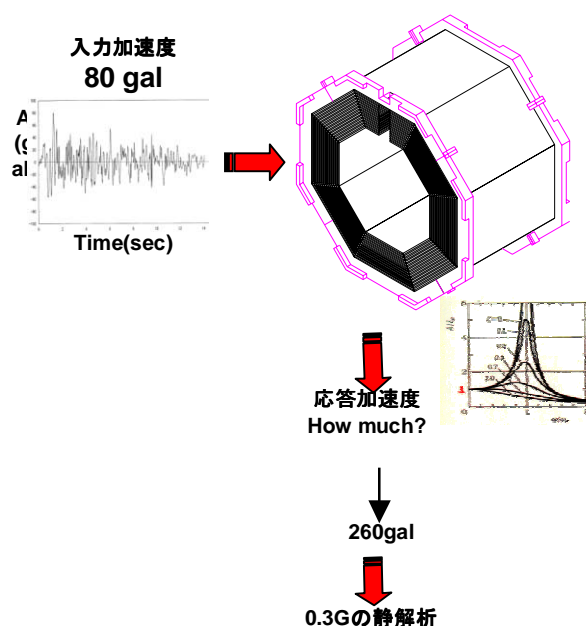


図 11 : 耐震設計の手順

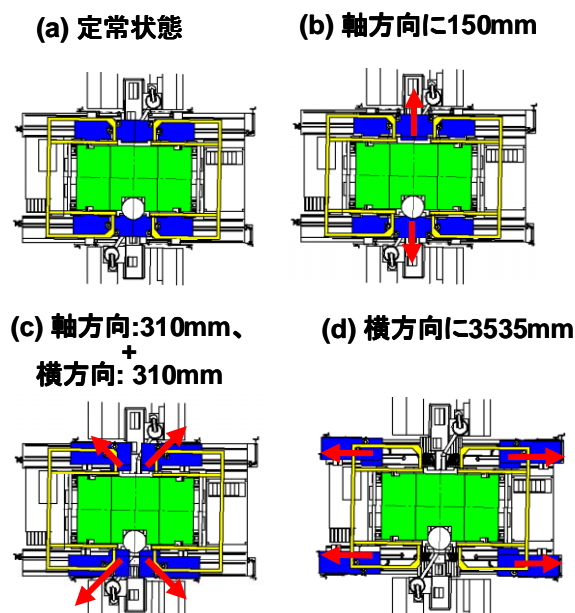


図 12 : エンドヨーク必要移動方向

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 1 3 に示す。一つあたりの移動

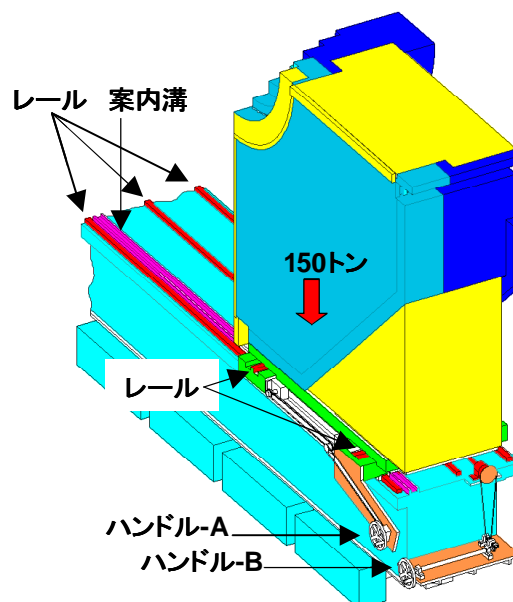


図 13 : エンドヨーク移動機構

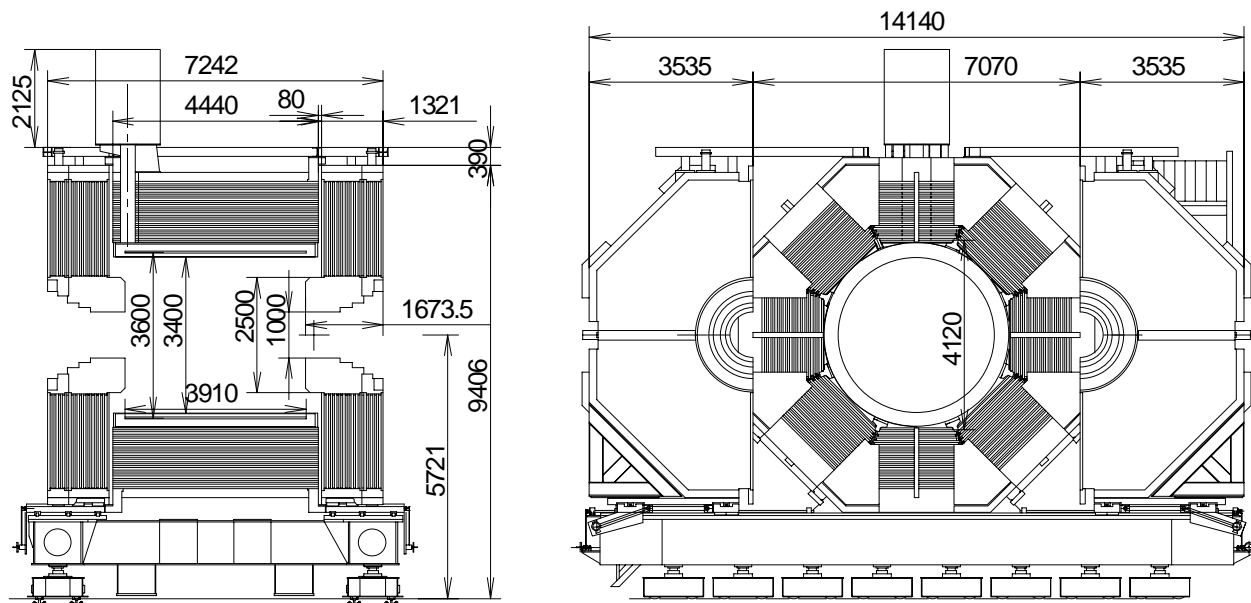


図 1 4 : Belle 検出器用鉄構造体最終図面

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時はハンドル-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バレルヨーク部では 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、機械加工されて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行うことで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

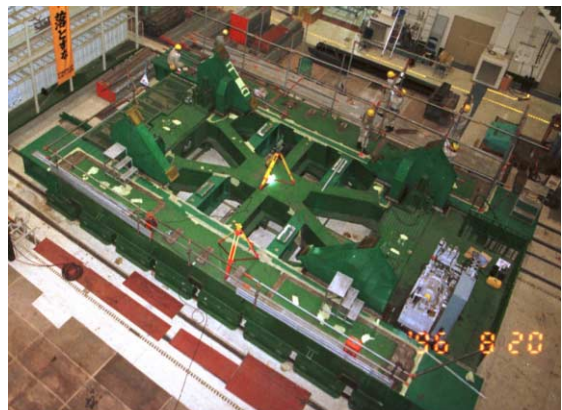


図 1 6 : 下部フレームの改造の様子



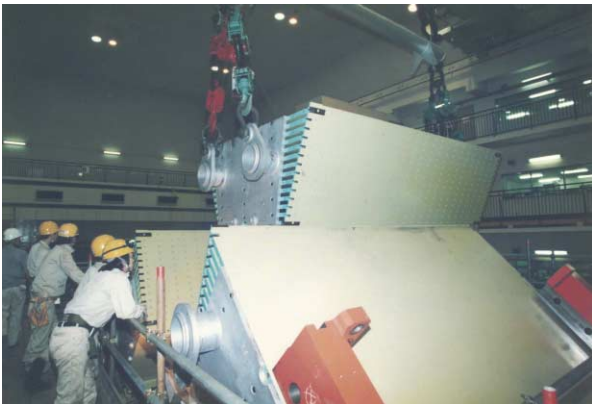
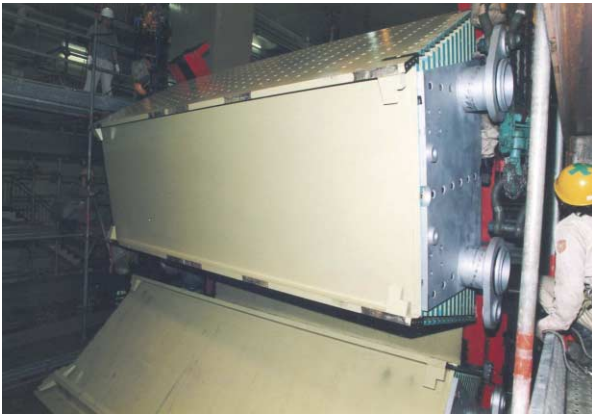


図 1 7 : バレルヨークの据え付けの様子。  
垂直部の据え付け(上)、最上部の据え付け  
(中)、バレルヨーク部の完成(下)。

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、トリスタントパ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 1 6 は、下部フレームの改造中の写真である。改造では、トパ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

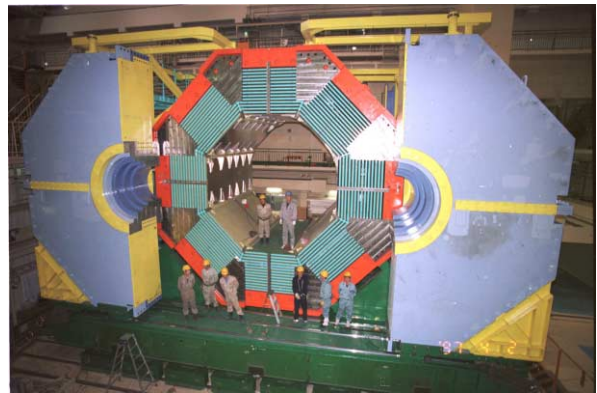


図 1 8 : エンドヨークの組み立てから完成まで。移動装置の据え付け(上)、エンドヨークの組み立て(中)、鉄構造体の完成(下)

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るため、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 1 7 に写真を示す。更に適宜、対応寸法など

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なければならなかった。

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://bsunsrv1.kek.jp/belle/report/tdr/tdr\\_structure.ps.gz](http://bsunsrv1.kek.jp/belle/report/tdr/tdr_structure.ps.gz)
- [2] KEK Progress Report 96-1, pp. 101-106. URL: [http://bsunsrv1.kek.jp/belle/report/prog96/progress\\_ir\\_on\\_integ.ps.gz](http://bsunsrv1.kek.jp/belle/report/prog96/progress_ir_on_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://bsunsrv1.kek.jp/belle/report/prog97/progress\\_3c.ps.gz](http://bsunsrv1.kek.jp/belle/report/prog97/progress_3c.ps.gz)